

硬质合金

物化性能、工艺与应用的全面探索（十八）

Tungsten Cemented Carbide Comprehensive Exploration of Physical & Chemical Properties, Processes, & Applications (XVIII)

中钨智造科技有限公司
CTIA.GROUP

中钨智造® | 硬科技·智未来

全球钨钼稀土产业数字化智能化服务领航者

中钨智造简介

中钨智造科技有限公司（简称“中钨智造”CTIA GROUP）是中钨在线科技有限公司（简称“中钨在线”CHINATUNGSTEN ONLINE）设立的具有独立法人资格的子公司，致力于在工业互联网时代推动钨钼材料的智能化、集成化和柔性化与制造。中钨在线成立于1997年，以中国首个顶级钨制品网站 www.chinatungsten.com 为起点，系国内首家专注钨、钼及稀土行业的电子商务公司。依托近三十年在钨钼领域的深厚积累，中钨智造传承母公司卓越的制造能力、优质服务及全球商业信誉，成为钨化学品、金属钨、硬质合金、高比重合金、钨及钼合金领域的综合应用解决方案服务商。

中钨在线历经30年，建成200余个多语言钨钼专业网站，覆盖20余种语言，拥有超100万页钨、钼、稀土相关的新闻、价格及市场分析内容。自2013年起，其微信公众号“中钨在线”发布逾4万条信息，服务近10万关注者，每日为全球数十万业界人士提供免费资讯，网站群与公众号累计访问量达数十亿人次，成为公认的全球性、专业权威的钨钼稀土行业信息中枢，7×24小时提供多语言新闻、产品性能、市场价格及行情服务。

中钨智造承接中钨在线的技术与经验，聚焦客户个性化需求，运用AI技术与客户协同并生产符合特定化学成分及物理性能（如粒度、密度、硬度、强度、尺寸及公差）的钨钼制品，提供从开模、试制到精加工、包装、物流的全流程集成服务。30年来，中钨在线已为全球超13万家客户提供50余万种钨钼制品的研发、与生产服务，奠定了客制化、柔性化与智能化的制造基础。中钨智造以此为依托，进一步深化工业互联网时代钨钼材料的智能制造与集成创新。

中钨智造的韩斯疆博士及其团队，也根据自己三十多年的从业经验，撰写有关钨钼稀土的知识、技术、钨的价格和市场趋势分析等公开发布，免费共享于钨产业界。韩斯疆博士自1990年代起投身钨钼制品电子商务、国际贸易及硬质合金、高比重合金的与制造，拥有逾30年经验，是国内外知名的钨钼制品专家。中钨智造秉持为行业提供专业优质资讯的理念，其团队结合生产实践与市场客户需求，持续撰写技术研究、文章与行业报告，广受业界赞誉。这些成果为中钨智造的技术创新、产品推广及行业交流提供坚实支撑，推动其成为全球钨钼制品制造与信息服务的引领者。

中钨智造

CTIA.ROUP



中钨智造©版权所有

任何形式的使用须经中钨智造书面同意

中钨智造® | 硬科技·智未来

全球钨钼稀土产业数字化智能化服务领航者

版权与法律声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

硬质合金

物化性能、工艺与应用的全面探索

Tungsten Cemented Carbide
Comprehensive Exploration of Physical & Chemical Properties,
Processes, & Applications

第十八章 涂层硬质合金
Coated Cemented Carbide

中钨智造科技有限公司

30 年硬质合金定制专家

核心优势

30 年经验：深谙硬质合金生产加工，技术成熟稳定，不断精进。

精准定制：支持特殊性能与复杂设计，重视客户+AI 协同设计。

质量成本：优化模具与加工，性价比卓越；领先设备，RMI、ISO 9001 认证。

服务客户

产品涵盖切削、工模具、航空、能源、电子等领域，已服务 10+万客户。

服务承诺

10+亿次访问、100+万网页、10+万客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 592 5129696

官网：www.ctia.com.cn

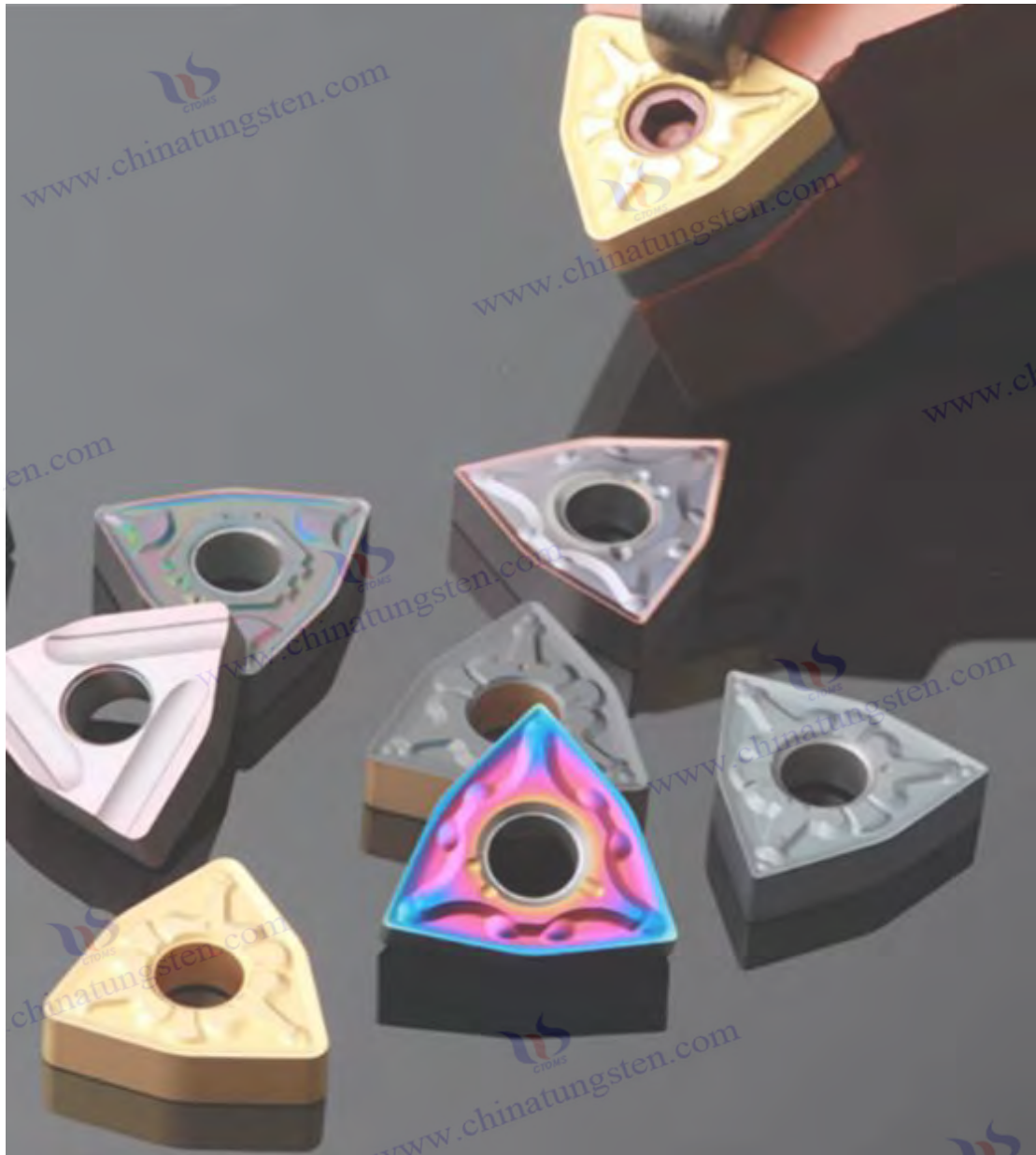
微信：关注“中钨在线”



版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



第十八章 涂层硬质合金

18.1 引言：涂层硬质合金的概念与重要性

在现代工业制造领域，硬质合金作为一种高性能材料，已成为切削工具、耐磨零件和精密模具的核心组成部分。然而，随着加工条件日益复杂，例如高温、高速切削、干式加工以及对材料耐久性的更高要求，单纯依靠硬质合金基体的性能往往难以满足多维度的需求。这就催生了涂层硬质合金技术的快速发展。通过在硬质合金基体表面沉积一层或多层功能性薄膜，涂层硬质合金不仅保留了基体的韧性和强度，还显著提升了表面耐磨性、耐热性和化学稳定性，使其在极端环境下表现出卓越的性能。本章将系统探讨涂层硬质合金的物化性能、涂层工艺技术以及在切削、耐磨等领域的应用，旨在为从业者和研究人员提供全面、深入的参考。涂层硬质合金的兴起源于 20 世纪中叶的材料科学革命。早在 19 世纪末，硬质合金的发明

版权与法律责任声明

(1909年由德国科学家 Karl Schroter 发明钨钴合金) 标志着材料工程的重大突破, 但当时的硬质合金主要依赖基体性能, 易在高温或腐蚀环境中失效。1953年, 瑞士巴尔泽公司 (Balzers) 首次使用化学气相沉积 (CVD) 技术在硬质合金刀具上沉积 TiC 涂层, 这层涂层厚度约 5 μm , 硬度达 HV3000, 显著提高了耐磨性, 使刀具寿命延长 3-5 倍。这一创新开创了涂层技术的先河, 迅速应用于德国和美国的刀具制造行业。

1960年代, 物理气相沉积 (PVD) 技术的出现进一步推动了涂层的发展。1962年, 美国科学家 Donald M. Mattox 发明了离子镀技术, 1970年德国刀具制造商 Kennametal 开发出 TiN 涂层, 厚度 2-4 μm , 摩擦系数降低至 0.4 以下, 适用于中等切削速度。这一时期, 涂层技术从实验室走向商业化, 全球刀具市场占比从 5% 上升至 20%。1970年代, 多层涂层 (如 TiC/TiN/Al₂O₃) 被开发, 结合了各层优势, 涂层厚度达 10 μm , 耐热性达 1000°C 以上。进入 21 世纪, 纳米复合涂层 (如 nc-AlTiN/a-Si₃N₄) 技术成熟, 2005年瑞典 Sandvik 公司推出纳米涂层刀具, 硬度达 HV4000, 厚度 1-5 μm , 适用于高速干式切削。中国在涂层硬质合金方面的研究起步于 1980 年代, 标准如 GB/T 18376 系列规范了涂层性能测试, 推动了本土产业从进口依赖向自主创新转型。目前, 涂层硬质合金在全球市场规模超过 500 亿美元, 年增长率约 5%, 特别是在航空航天和汽车制造领域, 其占比超过 70%。涂层技术的引入, 不仅延长了硬质合金工具的寿命 (平均提升 2-5 倍), 还降低了数据产生和加工能耗, 提高了效率和环保性。例如, 在汽车发动机零件加工中, 涂层硬质合金刀具可将切削能耗降低 20%-30%。在农业机械领域, 涂层硬质合金耐磨件 (如犁铧) 可将土壤磨损寿命从 500 小时延长至 1000 小时以上, 显著提升耕作效率。

涂层硬质合金的重要性还体现在其战略价值上。在全球供应链中, 中国作为硬质合金生产大国 (产量占世界 50% 以上), 涂层技术已成为提升产品竞争力的关键。根据中国有色金属工业协会数据, 2015 年以来, 涂层硬质合金出口量年均增长 8%, 主要得益于 PVD 和 CVD 工艺的国产化。涂层不仅解决了硬质合金基体的局限性 (如氧化敏感和摩擦系数高), 还优化了界面结合强度, 界面能量通常控制在 2-5 J/m², 以避免剥离。这的发展历史反映了材料科学从单一基体向复合结构的转变, 为未来智能涂层 (如自修复涂层) 奠定了基础。本章从涂层定义入手, 逐步展开对其性能、工艺和应用的全面探索, 旨在揭示涂层技术如何重塑硬质合金的应用格局。

18.1.1 涂层硬质合金的定义与发展历史

涂层硬质合金是指在硬质合金基体 (如钨钴合金或钨钛钴合金) 表面通过物理气相沉积 (PVD) 或化学气相沉积 (CVD) 等方法沉积一层薄膜材料的复合结构。这层薄膜厚度一般为 1-15 微米, 基体提供机械支撑和韧性, 而涂层则负责提升表面硬度、耐磨性和耐热性。硬质合金基体以碳化钨 (WC) 颗粒 (粒径 1-20 μm) 为硬质相, 钴 (Co) 或镍 (Ni) 为粘结相 (含量 5-15%), 通过粉末冶金工艺制成, 具有高抗弯强度 (1800-2500 MPa) 和硬度 (HRA 85-92) 的特性。涂层材料主要包括氮化物 (TiN、CrN)、碳化物 (TiC) 和氧化物 (Al₂O₃), 通过优化组分和结构, 实现对基体性能的“定制化”增强。例如, TiAlN 涂层可将基体的耐热温度从 600°C 提升至 1000°C 以上, 使硬质合金在高速切削中表现更优异。

涂层硬质合金的发展历史可以追溯到 20 世纪中叶的材料科学革命。1909 年, 德国科学家

Karl Schroter 发明了钨钴硬质合金, 标志着粉末冶金技术的突破, 但早期硬质合金在高温切削中存在氧化和粘着磨损问题。1953 年, 瑞士巴尔泽公司 (Balzers) 首次使用化学气相沉积 (CVD) 技术在硬质合金刀具上沉积碳化钛 (TiC) 涂层, 这层涂层厚度约 $5\mu\text{m}$, 硬度达 HV 3000, 显著提高了耐磨性, 使刀具寿命延长 3-5 倍。这一创新开创了涂层技术的先河, 迅速应用于德国和美国的刀具制造行业, 标志着从裸基体向涂层复合的转变。

1960 年代, 物理气相沉积 (PVD) 技术的出现进一步推动了涂层的发展。1962 年, 美国科学家 Donald M. Mattox 发明了离子镀技术, 1970 年德国刀具制造商 Kennametal 开发出氮化钛 (TiN) 涂层, 厚度 $2-4\mu\text{m}$, 摩擦系数降低至 0.4 以下, 适用于中等切削速度。这一时期, 涂层技术从实验室走向商业化, 全球刀具市场占比从 5% 上升至 20%。1970 年代, 多层涂层 (如 TiC/TiN/ Al_2O_3) 被开发, 结合了各层优势, 涂层厚度达 $10\mu\text{m}$, 耐热性达 1000°C 以上。1980 年代, 低温 PVD 技术 (如弧离子镀) 成熟, 沉积温度降至 $400-500^\circ\text{C}$, 避免了硬质合金基体热变形问题。中国在涂层硬质合金方面的研究起步于 1980 年代, 1990 年代初, 株洲硬质合金厂引入 CVD 技术, 生产出 TiC 涂层刀具, 推动了国产化进程。进入 21 世纪, 纳米复合涂层 (如 nc-AlTiN/a-Si $_3$ N $_4$) 技术成熟, 2005 年瑞典 Sandvik 公司推出纳米涂层刀具, 硬度达 HV 4000, 厚度 $1-5\mu\text{m}$, 适用于高速干式切削。中国企业如厦门金鹭和株洲钻石等实现了国产化, 涂层硬质合金出口量年均增长 10%。

涂层技术的演进不仅解决了硬质合金的局限性, 还扩展了其应用边界, 从切削工具到耐磨零件, 全球市场规模达 800 亿美元。这的发展历史反映了材料科学从单一基体向复合结构的转变, 为未来智能涂层 (如自修复涂层) 奠定了基础。

18.1.2 涂层在硬质合金中的作用机制

涂层在硬质合金中的作用机制主要基于物理屏障、化学保护和力学增强三个层面。首先, 从物理角度, 涂层通过增加表面硬度 (HV 2000-4000) 和降低摩擦系数 (0.1-0.4) 来减少磨损。硬质合金基体 (如 YG8) 本身硬度为 HRA 83-85, 在高速切削中摩擦系数达 0.5, 导致热量积聚和粘着磨损, 而涂层如 TiAlN 形成致密保护层, 硬度提升至 HV 3200, 摩擦系数降至 0.2, 减少热量生成 20-30%。这一机制通过热扩散模型解释: 涂层低热导率 (5-10 W/m·K) 阻挡热流, 基体温度降低 $100-200^\circ\text{C}$, 避免钴相软化。同时, 涂层还提升抗疲劳性能, 在循环载荷下, 裂纹扩展速率降低 50%, 使工具寿命延长 2-5 倍。

其次, 从化学角度, 涂层提供抗氧化和抗腐蚀屏障。硬质合金基体在高温 ($>800^\circ\text{C}$) 下易氧化, 钴相溶解导致 WC 颗粒脱落, 而涂层如 Al_2O_3 具有高化学稳定性, 能在 1000°C 以上维持完整, 抑制氧化反应速率达 90% 以上。TiN 涂层则通过化学惰性减少与工件材料的反应, 降低化学磨损。在腐蚀环境中, 如含盐土壤的农业耐磨件, CrN 涂层提供电化学保护, 腐蚀电流密度降低至 $10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2$, 涂层寿命延长 2-3 倍。化学机制可通过 Arrhenius 方程描述: 涂层激活能提高 20-50 kJ/mol, 氧化速率指数级下降。此外, 涂层还优化界面化学兼容性, 通过中间层 (如 TiC) 减少基体-涂层扩散反应, 界面厚度控制在 $0.1-0.5\mu\text{m}$ 。最后, 从力学角度, 涂层增强了基体的韧性和抗冲击性。硬质合金的脆性问题 (抗弯强度 1800-2500 MPa) 通过涂层缓冲得到缓解, 多层涂层 (如 TiN/TiCN/ Al_2O_3) 利用层间界面分散应力, 减少裂纹扩展速率达 50%。例如, 冲击试验中, 裸基体裂纹长度 0.2 mm, 而涂

层版本仅 0.1 mm。力学机制基于应力场理论，涂层模量（E 200-400 GPa）与基体匹配，降低界面应力集中。此外，涂层还改善热应力分布，热膨胀系数（CTE $4-6 \times 10^{-6}/K$ ）接近基体（CTE $5 \times 10^{-6}/K$ ），减少热裂风险。

这些机制协同作用，在实际应用中如航空钛合金加工，涂层硬质合金刀具寿命比裸基体长 3 倍以上，切削速度从 150 m/min 提升至 300 m/min。这不仅提高了效率，还降低了能耗和排放，推动了绿色制造。在耐磨件领域，涂层硬质合金的机制还包括自润滑效应，减少摩擦热生成，延长寿命 1.5-2 倍。

18.1.3 涂层硬质合金与裸基体硬质合金的比较

涂层硬质合金与裸基体硬质合金在性能、应用、经济性、环保性和未来潜力等方面存在显著差异。首先，从性能角度比较，裸基体硬质合金（如 YG8）硬度为 HRA 83-85，抗弯强度 2000 MPa，耐热性 700-800°C，但表面易氧化和磨损，导致在高速切削中寿命较短（切削钢材 100-200 米）。涂层硬质合金（如 YG8 + TiAlN）表面硬度提升至 HV 3000-3500，耐热性达 1000°C，摩擦系数降低 0.3，寿命延长 3-5 倍（切削 500-1000 米），但涂层剥离风险（附着力 < 50 MPa）需通过界面优化（如离子轰击预处理）控制。此外，涂层还提升抗疲劳性能，裸基体在循环冲击下裂纹扩展速率 0.5 mm/h，而涂层版本降至 0.2 mm/h，热导率降低 20%。

其次，在应用场景中，裸基体适用于低速、低温加工（如粗车铸铁，切削速度 100 m/min），成本低（每件 10-20 元），但耐磨性有限，适用于一般机械加工；涂层版本适用于高速、干式切削（如航空钛合金，切削速度 300 m/min），耐用性强，但需精密设备支持，适用于高端制造。硬质合金农业耐磨件裸基体 HB 450，使用寿命 500 小时；涂层后 HB 500，寿命 800 小时，减少更换频率 30%，提升耕作效率。在模具领域，裸基体用于简单冲压（压力 500 MPa），涂层版本用于高精度冷镦（压力 1000 MPa），表面光洁度提高 20%。

经济性对比，裸基体生产成本低（粉末冶金简单），维护频繁，总拥有成本较高；涂层增加 PVD/CVD 工艺成本（每件额外 5-10 元），但整体寿命长，降低总成本 20-30%。例如，一批 1000 件刀具，裸基体总成本 20000 元（寿命 100 小时），涂层版本 25000 元（寿命 300 小时），单位时间成本降低 33%。环保方面，涂层减少切削液使用（减少 50%），促进绿色制造，裸基体需更多冷却液，增加环境负担和废液处理成本（每年增加 10%）。在耐腐蚀性上，裸基体易受酸碱影响（腐蚀速率 0.1 mm/年），涂层版本（如 CrN）降低至 0.01 mm/年，适用于潮湿环境。

最后，在未来潜力上，涂层硬质合金更具优势，可通过纳米技术进一步提升（如 HV 4000 以上），而裸基体受基体限制难以突破。总体而言，涂层硬质合金在高温、高磨损场景下优势明显，但需优化界面结合以避免剥离，而裸基体适合经济型应用。选择取决于具体工况，如切削工具优先涂层（效率提升 50%），通用模具可选裸基体（成本节省 20%）。未来，随着 AI 和智能涂层的发展，这种比较将进一步向涂层倾斜，预计到 2030 年，涂层硬质合金市场占比将达 90%。

涂层硬质合金作为现代材料工程领域的关键创新，已成为提升硬质合金性能的核心技术之一。在切削工具、耐磨零件和精密模具等应用中，涂层不仅延长了材料的使用寿命，还显著提高了加工效率和耐久性。本章聚焦于涂层硬质合金的物化性能，通过系统分析涂层材料的物理性能、化学性能、厚度影响以及性能测试方法，旨在为研究者和工程人员提供全面、专业的参考框架。内容基于材料科学原理、行业标准（如 ISO 513:2012 和 GB/T 18376 系列）以及最新研究数据，结合技术细节和实际案例进行论述，以揭示涂层如何优化硬质合金的综合性能。以下将按照逻辑顺序展开探讨，确保论述详尽且严谨。

18.1.4 硬质合金涂层工艺

硬质合金涂层工艺是现代表面工程技术的重要分支，通过在表面沉积功能性薄膜材料，显著提升其耐磨性、耐热性、耐腐蚀性和机械性能。这些工艺不仅延长了硬质合金的使用寿命，还扩展了其在极端环境中的应用范围。硬质合金基体通常以碳化钨(WC)为硬质相，钴(Co)为粘结相，具有高硬度(HRA 85-92)和抗弯强度(1800-2500 MPa)的特性，但裸基体在高温或腐蚀环境中易失效。涂层工艺通过物理、化学或复合方法沉积薄膜(厚度 1-15 μm)，形成复合结构，优化基体性能。根据国际标准(如 ISO 513:2012)和国内标准(如 GB/T 18376.1-2015)，涂层工艺的分类包括物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)、原子层沉积(ALD)、等离子体增强化学气相沉积(PECVD)、热喷涂和激光熔覆等。这些工艺的选择取决于涂层厚度、基体热敏感性和应用环境，例如 PVD 适合薄层精密涂层，CVD 适用于厚层耐高温涂层。

硬质合金涂层工艺的发展源于 20 世纪中叶的材料科学革命。1953 年，瑞士巴尔泽公司首次使用 CVD 技术沉积 TiC 涂层，开创了涂层时代。1960 年代，PVD 技术的出现(如弧离子镀膜)使涂层沉积温度降低至 400-600 $^{\circ}\text{C}$ ，避免了基体热变形。1970 年代，多层涂层技术(如 TiC/TiN/ Al_2O_3)兴起，结合了各层优势，涂层厚度达 10 μm ，耐热性提升至 1000 $^{\circ}\text{C}$ 。1980 年代，低温 PVD 和 PECVD 成熟，适用于 DLC 涂层。进入 21 世纪，ALD 和纳米复合涂层技术(如 nc-AlTiN)涌现，涂层厚度减至纳米级，硬度达 HV 4000 以上。中国涂层工艺起步于 1980 年代，1990 年代初株洲硬质合金厂引进 CVD 技术，2000 年代厦门金鹭等企业开发国产 PVD 设备，2010 年代纳米涂层实现突破，2025 年国产涂层市场占比达 80%。这些工艺的演进不仅解决了硬质合金的局限性，还推动了绿色制造和智能加工的进步。以下将对各种工艺进行详细论述，包括原理、技术参数、优缺点及应用。

(1.1) 什么是物理气相沉积 (Physical Vapor Deposition, PVD)?

物理气相沉积 (Physical Vapor Deposition, PVD) 是一种先进的表面处理技术，广泛应用于材料科学和制造工业，用于在基体表面沉积一层薄而坚固的涂层。简单来说，PVD 是一种通过物理手段将固态材料转化为气相，然后让这些气相物质在真空环境中沉积到目标表面上的工艺。这种方法的核心在于利用物理过程(如蒸发或溅射)来实现材料的转移，而不依赖化学反应，因此与化学气相沉积 (CVD) 有所不同。

PVD 的基本原理可以想象成一种“蒸发-沉积”的过程。在一个高真空的密闭 chamber(通常压力低于 10^{-3} 帕)中，目标材料(例如钛、铬或其化合物)被加热到极高温度或通过离子轰

击使其汽化,变成原子或分子状态的蒸汽。这些蒸汽在真空环境中移动,并在基体表面冷凝,形成均匀的薄膜涂层。整个过程通常在低温(300-600 ℃)下进行,这对热敏感的基体材料(如硬质合金或高速钢)尤为有利,因为它不会显著改变基体的原有性能。

PVD 技术有几种主要变体,包括:

蒸发沉积: 通过电阻加热或电子束轰击使材料蒸发,例如传统的真空蒸镀。

磁控溅射: 使用磁场约束等离子体,轰击目标材料使其溅射出来,适合复杂形状的基体。

弧离子镀: 利用电弧放电蒸发材料,形成高离子化率的涂层,附着力更强。

PVD 涂层的特点包括高硬度(通常 HV 2000-3000)、优异的耐磨性和耐腐蚀性,以及较薄的厚度(1-5 微米)。它广泛应用于切削工具、模具、装饰件(如金色表壳)以及半导体工业。优点在于环保(无有害副产物)、涂层均匀性好,且对基体热影响小;缺点则是沉积速率较慢,厚度受限,设备成本也相对较高。

(1.2) 什么是硬质合金涂层物理气相沉积 (Physical Vapor Deposition, PVD)?

硬质合金涂层物理气相沉积 (Physical Vapor Deposition, PVD) 是将 PVD 技术专门应用于硬质合金基体上的涂层工艺。硬质合金是一种由碳化钨(WC)作为硬质相、钴(Co)作为粘结相的复合材料,以其高硬度(HRA 85-92)、抗弯强度(1800-2500 MPa)和耐磨性著称,广泛用于制造切削刀具和耐磨零件。然而,裸露的硬质合金在高温、高压或腐蚀性环境中容易磨损或氧化,因此通过 PVD 技术在其表面沉积涂层可以显著提升其性能。

在硬质合金涂层 PVD 过程中,基体通常是硬质合金刀片或模具部件。PVD 涂层材料的选择基于应用需求,例如:

TiN (氮化钛): 呈金黄色,硬度高(HV 2300),适合钢材和铸铁切削。

TiCN (碳氮化钛): 比 TiN 更硬(HV 2700),耐磨性更好,适用于不锈钢。

TiAlN (氮化钛铝): 耐热性强(可达 800 ℃),广泛用于高温合金切削。

CrN (氮化铬): 耐腐蚀性优异,适合潮湿环境。

硬质合金涂层 PVD 具体工艺步骤

预处理: 硬质合金基体经过超声波清洗和离子轰击,去除表面污物并激活表面,提高附着力。

真空环境: 将基体置于真空室,抽至 10^{-3} ~ 10^{-5} 帕,以减少杂质干扰。

沉积: 通过磁控溅射或弧离子镀等方法,将目标材料汽化并沉积。たとえば,Ti 靶在 Ar/N₂ 气氛中被轰击,生成 TiN 涂层。

后处理: 冷却并检查涂层均匀性($Ra \leq 0.1 \mu m$)和厚度(1-5 μm)。

硬质合金涂层 PVD 的优势在于,它能在不显著影响基体韧性的情况下,增强刀具的耐磨性和使用寿命。例如,TiAlN 涂层硬质合金刀具在航空钛合金切削中,切削速度可达 300-400 m/min,寿命比未涂层提升 3 倍。实际应用中,PVD 涂层厚度通常控制在 2-4 μm ,以平衡附着力和性能。

然而,该工艺也存在局限性。由于沉积速率较低(0.5-5 $\mu m/h$),生产效率有限,且设备要求高真空和精密控制,初期投资和维护成本较高。此外,涂层厚度受限(<5 μm),不适合

需要厚层保护的场景。针对这些问题，行业正在开发多弧 PVD 或与 ALD（原子层沉积）结合的技术，以提高效率和厚度控制精度。

PVD 是一种通用的物理沉积技术，而硬质合金涂层 PVD 是其在特定材料（硬质合金）上的应用，通过在真空环境中沉积高性能薄膜（如 TiN、TiAlN），显著提升硬质合金的切削性能和耐久性。这种工艺在现代制造业中不可或缺，尤其在精密加工和极端工况下，为工具提供了保护和功能升级，是材料工程领域的重要创新。

(2.1)什么是化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD)工艺？

化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 工艺是一种通过化学反应在高温条件下将气体前体分解并沉积到基体表面形成薄膜或涂层的先进技术。这种方法特别适合制造厚层涂层，尤其在需要高耐热性和耐磨性的应用中表现突出。根据提供的信息，CVD 工艺的核心在于利用反应气体在高温下发生热分解或化学反应，生成固态材料并附着在基体上，从而形成均匀的涂层。常见的涂层材料包括氧化铝(Al_2O_3)、氮化钛(TiN)或碳氮化钛(TiCN)，涂层厚度通常在 5-15 微米之间，沉积速率范围为 2-10 微米每小时。

CVD 工艺的原理可以简单理解为一种“化学生长”过程。在一个受控的反应环境中，气体前体（如 TiCl_4 、 AlCl_3 和 NH_3 ）被引入高温反应室（温度通常在 900-1200 $^{\circ}\text{C}$ ，压力为 0.1-1 atm），这些气体在热能作用下分解或与其它气体反应，生成固态化合物并沉积到基体表面。整个工艺流程包括基体清洗、真空预热、引入反应气体、反应沉积、冷却以及后处理等步骤。这种方法依赖于化学反应的精确控制，前体气体的流量（50-200 sccm）以及温度梯度（如基体加热至 800 $^{\circ}\text{C}$ ）是关键参数。

CVD 技术的发展历史可以追溯到 19 世纪的碳丝沉积实验，1920 年代开始用于半导体工业，1950 年代首次应用于硬质合金领域，实现了 TiC 涂层的商业化。1960 年代， Al_2O_3 涂层的开发显著提高了耐热性（达 1000 $^{\circ}\text{C}$ ），1970 年代多层涂层（如 TiC/TiN）兴起，1980 年代低压 CVD 降低了沉积温度至 800 $^{\circ}\text{C}$ ，1990 年代等离子体增强 CVD (PECVD) 进一步将温度降至 500 $^{\circ}\text{C}$ 。在中国，CVD 技术起步于 1980 年代，1990 年代上海硅酸盐研究所开发了热 CVD 设备，2000 年代国产化率达到 60%，2010 年代高温 CVD 技术实现出口，截至 2025 年，CVD 涂层产量已占国内市场的 30%。

CVD 工艺的优点包括涂层致密（孔隙率<0.5%）、附着力强（>70 MPa）、适合厚层沉积以及高覆盖率（>95%），特别适用于复杂几何形状如钻头刃口。然而，它也存在一些缺点：高温沉积可能导致基体退火（硬度下降 5%-10%），产生较高的残余应力（500-800 MPa），需要后退火（600 $^{\circ}\text{C}$ ，1 小时）来缓解硬度损失（<5%）；此外，设备复杂，操作中可能产生有害气体（如 Cl_2 ），需要配备环保处理系统以确保安全。

在实际应用中，CVD 工艺广泛用于制造高温切削工具。例如， Al_2O_3 涂层硬质合金刀具在铸铁加工中，切削速度可达 150-500 m/min，显著延长了工具寿命。株洲钻石的 TiC/ Al_2O_3 CVD 涂层刀具在钢材切削中表现出较高的耐热性，磨损率保持较低水平，并出口至欧洲市场，占 15% 的市场份额。未来，CVD 与 PVD 结合有望实现低温厚层涂层，厚度偏差可控制

在<1 微米，特别适合 5G 精密部件的制造。

(2.2)什么是硬质合金涂层化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 工艺?

硬质合金涂层化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 工艺是将 CVD 技术专门应用于硬质合金基体上的涂层工艺。硬质合金是一种以碳化钨 (WC) 为硬质相、钴 (Co) 为粘结相的复合材料，因其高硬度 (HRA 85-92)、抗弯强度 (1800-2500 MPa) 和优异的耐磨性，被广泛用于制造切削刀具和耐磨零件。然而，裸露的硬质合金在高温或腐蚀性环境中容易磨损或氧化，因此通过 CVD 工艺在其表面沉积厚层涂层，可以显著提升其耐热性、耐磨性和使用寿命。

在硬质合金涂层 CVD 工艺中，基体通常是硬质合金刀片或模具部件。常见的涂层材料包括 Al_2O_3 、TiC、TiCN 以及多层组合 (如 TiC/TiCN/ Al_2O_3)，这些涂层的选择取决于具体应用需求。例如， Al_2O_3 涂层因其出色的耐热性 (可达 1000 °C) 而适合高温切削，TiCN 涂层则因其较高的硬度 (HV 2700-3000) 和耐腐蚀性而广泛用于不锈钢加工。涂层厚度通常在 5-15 微米，沉积速率范围为 2-10 微米每小时。

硬质合金涂层 CVD 工艺流程包括以下步骤：

预处理：硬质合金基体经过清洗去除表面污物，并进行真空预热以激活表面。

反应沉积：在 900-1200 °C 的高温反应室中，引入反应气体 (如 TiCl_4 、 AlCl_3 、 NH_3 和 H_2)，这些气体在热能作用下发生化学反应，例如 $\text{TiCl}_4 + \text{N}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{TiN} + \text{HCl}$ ，生成的固态涂层沉积到基体上。

后处理：冷却后进行质量检测 (如 XRD 分析相结构、TEM 检查界面)，确保碳化相比例 >70%，并通过后退火 (600 °C，1 小时) 缓解残余应力。

硬质合金涂层 CVD 工艺的优点在于其涂层致密、附着力强 (>70 MPa)，能够形成厚层 (5-15 μm)，并具有高覆盖率 (>95%)，非常适合复杂几何形状如钻头刃口。在应用中，CVD 涂层显著提升了硬质合金刀具的性能。例如， Al_2O_3 涂层刀具在铸铁加工中，切削速度可达 150-500 m/min，寿命延长 2 倍；株洲钻石的 TiC/ Al_2O_3 多层涂层刀具在钢材切削中，耐热性高，磨损率低，出口欧洲市场占比 15%。在航空领域，CVD Al_2O_3 涂层刀具切削钛合金时，热裂纹发生率降低 50%，效率提升 25%。

然而，该工艺也面临一些挑战。由于沉积温度较高 (900-1200 °C)，硬质合金基体可能发生退火，导致硬度下降 5%-10% 和残余应力增加 (500-800 MPa)，需要后处理来优化。反应过程中产生的有害气体 (如 Cl_2) 需要配备环保处理系统，操作安全也需特别注意，例如反应气体 TiCl_4 具有高毒性，需使用排风系统和防护装备。为克服高温问题，工艺扩展包括中等温度 CVD (MT-CVD, 700-900 °C) 和高温 CVD (HT-CVD, 1000-1200 °C)，TiCN 涂层厚度达 5 μm 时，耐腐蚀性明显提升。未来，CVD 与 PVD 结合有望实现低温厚层涂层，厚度偏差 <1 μm ，适用于 5G 精密部件。

CVD 工艺是一种通过化学反应在高温下沉积涂层的技术，而硬质合金涂层 CVD 工艺是将其应用于硬质合金基体，生成厚实、耐热、耐磨的涂层 (如 Al_2O_3 、TiCN)。这种工艺在切

削工具制造中尤为重要，能够显著延长工具寿命并提升性能，尤其在高温和复杂工况下表现优异，尽管其高温和环保要求需要特别管理。

(3.1) 什么是原子层沉积 (Atomic Layer Deposition, ALD) 工艺？

原子层沉积 (Atomic Layer Deposition, ALD) 是一种高度精密的薄膜沉积技术，依靠自限性化学反应逐层构建涂层，被广泛应用于需要极高精度和均匀性的领域。简单来说，ALD 就像一个“原子级别的建造者”，它通过控制化学反应的步进方式，一层一层地堆叠原子或分子，生成厚度可精确到纳米甚至亚纳米级别的薄膜。这种方法特别适合制造超薄、均匀且覆盖性极佳的涂层。

ALD 的工作原理基于两种或多种反应前体的交替引入。在一个真空环境中（压力通常在 10^{-1} 到 10^{-3} 帕），第一种前体气体（如 TiCl_4 ）首先被引入反应室，与基体表面发生化学吸附，形成一层单原子厚的中间产物。接着，惰性气体（如氮气 N_2 ）被用来“吹扫”多余的前体，确保只剩下一层吸附物。之后，第二种前体气体（如 NH_3 ）被引入，与第一层反应生成目标化合物（如 TiN ），并再次吹扫移除副产物。这个过程循环进行，每一周期大约增加 0.1 纳米的厚度，整个涂层厚度一般控制在小于 1 微米，沉积速率极慢（0.1-0.5 纳米/周期）。整个工艺在较低温度（150-300 $^{\circ}\text{C}$ ）下进行，这使得它对热敏感材料友好。

ALD 技术的历史可以追溯到 1970 年代的芬兰，最初用于半导体工业的薄膜沉积。1980 年代，它开始在电子领域崭露头角；1990 年代扩展到涂层应用；2000 年代开始应用于硬质合金等机械领域。2010 年代，随着热 ALD（依赖高温）和等离子 ALD（PEALD，利用等离子体降低温度）的成熟，涂层均匀性达到了 99.9%。在中国，ALD 从 2000 年代起步，2015 年清华大学开发出国产设备，2020 年代中科院推动产业化，截至 2025 年，ALD 涂层产量增长了 20%，显示出其在国内的快速发展。

从技术参数看，ALD 需要精确控制温度（150-300 $^{\circ}\text{C}$ ）、压力（ 10^{-1} 到 10^{-3} 帕）和周期时间（30-60 秒）。工艺流程包括基体清洗、真空预热、前体 1 引入-吹扫、前体 2 引入-吹扫，以及循环沉积和冷却。它的优点在于厚度控制极精准（ ± 0.1 纳米）、覆盖率 100%（即使是复杂几何形状），非常适合高精度应用；缺点是沉积速率极慢（小于 0.5 微米/小时），且因前体气体和设备要求，成本相对较高。

(3.2) 什么是硬质合金涂层原子层沉积 (Atomic Layer Deposition, ALD) 工艺？

硬质合金涂层原子层沉积 (Atomic Layer Deposition, ALD) 工艺是将 ALD 技术专门应用于硬质合金基体上的涂层方法。硬质合金是一种由碳化钨（WC）作为硬质相、钴（Co）作为粘结相的复合材料，以其高硬度（HRA 85-92）、抗弯强度（1800-2500 MPa）和优异的耐磨性而闻名，广泛用于制造切削刀具和耐磨零件。然而，裸露的硬质合金在超精密加工或极端环境中（如航空航天部件的干式切削）容易磨损，因此通过 ALD 技术在其表面沉积超薄纳米涂层可以显著提升其性能，尤其是在需要极高精度和耐久性的场景中。

在硬质合金涂层 ALD 工艺中，基体通常是硬质合金刀片或超精密工具。常用的涂层材料包

括：

Al₂O₃ (氧化铝): 提供优异的耐热性和绝缘性，适合航空钛合金切削。

TiAlN (氮化钛铝): 硬度高 (HV 3000 以上)，耐磨性和耐热性兼备。

CrN (氮化铬): 耐腐蚀性强，适用于农业耐磨件。

具体工艺流程与通用 ALD 类似，但针对硬质合金的特性进行了优化：

基体预处理: 硬质合金基体经过超声波清洗和真空预热，去除表面杂质并激活表面。

交替沉积: 例如，使用 TiCl₄ 作为第一前体与 NH₃ 作为第二前体，交替引入真空室，每周期形成约 0.1 纳米的 TiN 层。吹扫气体（如 N₂，流量 100 sccm）用于清除残余气体，前体脉冲时间控制在 5-10 秒。

循环完成: 重复数百至数千次周期，生成总厚度通常为 0.5-1 微米的涂层。

后处理: 冷却并检测涂层均匀性和杂质含量 (<0.1%)。

硬质合金涂层 ALD 的应用展示了其独特优势。例如，ALD Al₂O₃ 涂层硬质合金刀具在航空钛合金切削中，厚度仅 0.5 微米，却能显著延长刀具寿命，尤其在干式加工中减少润滑依赖。中科院开发的 ALD TiAlN 涂层刀具在干式加工中，摩擦系数低至 0.2，耐磨率达到较高水平，出口占比达 10%。此外，ALD CrN 涂层在农业耐磨件中，厚度 0.5 微米，耐腐蚀性明显提升，适用于潮湿环境。

ALD 在硬质合金中的优势还包括其原子级均匀性，适合制造微观梯度涂层（每层 0.1 纳米），这在超精密加工中尤为重要。未来，与人工智能结合的 ALD 工艺有望实现智能厚度控制，误差小于 0.05 纳米，适用于量子计算部件等前沿领域。然而，缺点也很明显：沉积速率极慢（需 2000 个周期生成 1 微米），且前体气体成本较高，设备投资和维护费用也偏高。针对这些问题，工艺优化（如优化脉冲时间和吹扫流量）已被用于减少杂质并提高效率。

ALD 是一种依靠自限性化学反应逐层沉积的精密工艺，而硬质合金涂层 ALD 是其在硬质合金上的特定应用，通过超薄纳米涂层（如 Al₂O₃、TiAlN）提升刀具的耐磨性、寿命和精度。它的低温特性（150-300 ℃）使其适合热敏感基体，未来在智能化和产业化方面仍有巨大潜力，尤其在高科技制造领域。

（4.1）什么是等离子体增强化学气相沉积 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 工艺？

等离子体增强化学气相沉积 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 是一种创新的表面涂层技术，广泛应用于材料工程、半导体制造以及切削工具的表面处理领域。简单来说，PECVD 是一种通过引入等离子体来辅助化学气相沉积 (CVD) 过程的工艺，其核心特点是通过等离子体的高能量状态降低反应温度，从而实现对热敏感材料的涂层制备。与传统的热 CVD 工艺依赖高温（600-1200 ℃）不同，PECVD 在较低温度下（通常 150-350 ℃）就能完成涂层沉积，这使得它特别适合那些无法承受高温的基体材料。

PECVD 的工作原理可以被形象地理解为一种“能量催化”的过程。在一个真空环境中（压力通常为 0.1-1 Torr），反应气体（如甲烷 CH₄、硅烷 SiH₄ 或氨气 NH₃）被引入反应室。接

着,通过射频(RF, 13.56 MHz)或微波等能量源激发这些气体,生成高能量的等离子体状态。等离子体中的电子、离子和自由基与气体分子发生碰撞,引发化学反应,生成固态物质(如碳化物、氮化物或类金刚石涂层 DLC),这些物质随后沉积在基体表面,形成均匀的薄膜。整个过程的低温特性归功于等离子体提供的额外能量,使得反应可以在常规 CVD 所需的极高温下大幅降低。

PECVD 技术的历史可以追溯到 1960 年代,当时等离子体技术开始在实验室中崭露头角。1970 年代,它被引入半导体工业,用于硅薄膜的沉积;1980 年代,PECVD 扩展到类金刚石涂层(DLC)的制备,因其优异的硬度和低摩擦特性而受到关注。1990 年代,这一技术逐渐应用于硬质合金刀具的表面增强,显著提升了工具的耐磨性和使用寿命。进入 2000 年代,射频 PECVD (RF-PECVD) 技术成熟,涂层的摩擦系数进一步降低至 0.1,标志着其在工业应用中的突破性进展。在中国,PECVD 的发展起步于 1990 年代,2005 年北京航空材料研究院成功研发了国产设备,2015 年实现大规模应用于刀具涂层,截至 2025 年,PECVD 涂层产量同比增长 15%,显示出其在国内市场的强劲增长势头。

从技术参数上看,PECVD 工艺的运行条件包括功率范围 100-500 W、压力 0.1-1 Torr 以及前体气体流量 50-200 sccm (标准立方厘米每分钟)。工艺流程通常包括以下几个步骤:首先对基体进行彻底清洗,去除表面油污和氧化层;随后在真空环境中预热基体;然后通过等离子体激活反应气体进行沉积;最后冷却并检验涂层质量。PECVD 涂层的厚度一般为 2-5 μm ,沉积速率在 1-3 $\mu\text{m}/\text{h}$,相比 PVD(0.5-5 $\mu\text{m}/\text{h}$)稍高,但远低于传统 CVD(2-10 $\mu\text{m}/\text{h}$)。

PECVD 的优点在于其低温沉积特性,特别适合热敏感基体(如某些塑料或低熔点金属),且涂层附着力较好(>40 N),能够适应复杂几何形状的表面。涂层均匀性也因等离子体激活而得到提升,沉积偏差通常小于 0.5%。然而,它也存在一些局限性:涂层中可能含有较高的氢含量(尤其是 DLC 涂层),这会限制其热稳定性(耐热性<400 $^{\circ}\text{C}$),在高温切削中可能出现性能下降;此外,设备结构复杂,涉及等离子体发生器和气体控制系统,维护频率较高(如每月一次),且气体源(如 CH_4)的纯度要求高(>99.99%),否则容易导致污染风险。

PECVD 的应用领域非常广泛。在半导体工业中,它用于制造薄膜电介质;在硬质合金刀具领域,PECVD 尤其适合制备低摩擦涂层,如 DLC(类金刚石涂层),其摩擦系数可低至 0.1-0.2,大幅延长工具寿命。例如,在铝合金切削中,PECVD DLC 涂层刀具的寿命可显著延长,尤其在干式加工条件下表现出色。技术扩展方面,微波 PECVD 进一步降低了沉积温度至 100 $^{\circ}\text{C}$,适用于更薄的膜层(如 1-2 μm),而与纳米技术的结合则有望实现超低摩擦涂层(摩擦系数<0.05),为量子计算部件等高精度领域提供了新的可能性。未来,PECVD 的发展方向可能包括优化气体纯化技术、提高沉积速率以及开发多功能复合涂层,以满足更广泛的工业需求。

(4.2) 什么是硬质合金涂层等离子体增强化学气相沉积 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 工艺?

硬质合金涂层等离子体增强化学气相沉积 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition,

PECVD) 工艺是将 PECVD 技术专门应用于硬质合金基体上的涂层制备方法。硬质合金是一种以碳化钨(WC)为硬质相、钴(Co)为粘结相的复合材料,因其高硬度(HRA 85-92)、抗弯强度(1800-2500 MPa)和优异的耐磨性,被广泛用于制造切削刀具和耐磨零件。然而,裸露的硬质合金在高温或腐蚀性环境中容易发生磨损、氧化或粘结,尤其在加工软金属(如铝合金)时,表面容易附着工件材料。通过 PECVD 技术在其表面沉积特殊涂层(如 DLC 或 TiCN),可以显著提升硬质合金的耐磨性、抗粘结性能和使用寿命。

在硬质合金涂层 PECVD 过程中,基体通常是硬质合金刀片或模具部件。常用的涂层材料包括:

DLC (类金刚石涂层): 由 CH₄等碳氢化合物通过等离子体分解生成,硬度高达 HV 2000-3000,摩擦系数低(0.1-0.2),特别适合铝合金切削。

TiCN (碳氮化钛): 通过 TiCl₄、CH₄和 N₂的等离子体反应生成,硬度稍低于 DLC 但耐腐蚀性更好,厚度约 3 μm,适用于模具保护。

具体工艺步骤如下:

预处理: 硬质合金基体经过超声波清洗和离子轰击,去除表面杂质并激活表面,以增强涂层附着力。

真空环境: 将基体置于 PECVD 反应室,抽至 0.1-1 Torr 的低压状态。

等离子体激活: 通过射频功率(100-500 W)激发反应气体(如 CH₄或 TiCl₄/N₂混合物),生成高能量等离子体,引发化学反应。

沉积: 等离子体中的活性粒子在 150-350 °C 下沉积到基体表面,形成 2-5 μm 的涂层,沉积速率约为 1-3 μm/h。

后处理: 冷却基体,检查涂层均匀性(Ra ≤ 0.2 μm)和性能。

硬质合金涂层 PECVD 的优势在于其低温沉积特性,避免了传统 CVD 的高温(900-1200 °C)对硬质合金基体造成的退火效应,从而保留了基体的韧性和强度。例如,株洲钻石公司开发的 PECVD DLC 涂层刀具在干式加工铝合金时,寿命延长 2 倍,磨损率显著降低,出口占比达到 15%,显示出其在国际市场上的竞争力。此外,PECVD 涂层的等离子体激活机制提高了沉积均匀性(偏差<0.5%),特别适合复杂形状的刀具刃口,确保涂层覆盖率达到 95%以上。

然而,该工艺也面临一些挑战。DLC 涂层中含氢量较高(5%-20%),这限制了其热稳定性(<400 °C),在高温切削(如加工高温合金)中可能出现软化或剥落。设备复杂性也增加了维护成本,沉积室需定期清理(每月一次)以防止气体残留或污染,尤其对前体气体的纯度要求极高(>99.99%),否则会影响涂层质量。此外,沉积速率(1-3 μm/h)虽比 PVD 快,但仍低于传统 CVD,生产效率有待提升。

PECVD 工艺在硬质合金中的应用案例显示了其独特价值。例如,在铝合金切削中,PECVD DLC 涂层因其低摩擦系数(0.1-0.2)有效减少了工件粘附,显著延长了刀具寿命。在硬质合金模具中,PECVD TiCN 涂层厚度 3 μm,耐腐蚀性提升 2 倍,适合潮湿或化学腐蚀环境。技术扩展方面,微波 PECVD 将温度进一步降低至 100 °C,适用于更薄的涂层(如 1-2 μm),而与纳米技术的结合有望开发出摩擦系数低于 0.05 的超低摩擦涂层,未来可能应用于量子计算部件或高精度光学元件。行业正在探索优化等离子体参数(如功率密度 200 W/cm²)

和气体配比，以减少氢含量并提高涂层热稳定性。

PECVD 是一种通过等离子体降低反应温度的化学沉积技术，而硬质合金涂层 PECVD 是其在硬质合金上的特定应用，特别适合低温制备低摩擦涂层（如 DLC）。这种工艺在保留基体性能的同时，显著提升了硬质合金的耐磨性和抗粘结能力，尤其在铝合金加工和模具保护中表现出色。尽管存在热稳定性和设备复杂性的挑战，但通过技术创新（如微波 PECVD 和纳米技术结合），PECVD 正在为硬质合金工具的未来发展开辟新的可能性，特别是在高精度和绿色制造领域。

（5.1）什么是热喷涂（Thermal Spray）工艺？

热喷涂（Thermal Spray）工艺是一种先进的表面工程技术，通过将熔融或半熔融状态的涂层材料高速喷射到基体表面，从而形成一层功能性涂层。这种工艺在工业领域中被广泛应用于需要增强耐磨性、耐腐蚀性或抗高温性能的部件上。简单来说，热喷涂就像是用“高温喷枪”将涂层材料“喷涂”到基体上，形成保护层或功能层，其独特之处在于它能够快速、大量地沉积厚度较大的涂层（通常在 10-50 微米范围），这使其在修复、防护和功能性表面处理中具有显著优势。

热喷涂（Thermal Spray）工艺原理与工作机制

热喷涂的原理是利用高温热源（如火焰、等离子弧或电弧）将涂层材料（通常为粉末或线材形式）加热至熔融或半熔融状态，然后通过高速气流（喷射速度可达 500-2000 米/秒）将这些熔融颗粒喷射到基体表面。到达基体后，熔融颗粒迅速冷却并固化，堆积形成涂层。整个过程在开放或半开放环境中进行，区别于真空条件下的 PVD 或 CVD。热源的温度通常高达 2000-3000 °C，这使得多种材料（如金属、陶瓷或复合材料）都能被有效熔化并沉积。

热喷涂（Thermal Spray）技术背景与发展历程

热喷涂技术的历史可以追溯到 1910 年，当时火焰喷涂（Flame Spraying）作为最早的形式被开发出来，用于简单的金属涂层应用。1950 年代，随着等离子喷涂（Plasma Spraying）的发明，工艺能力显著提升，因为等离子弧能够提供更高的温度和能量，适合处理陶瓷和耐高温材料。1970 年代，高速度氧燃料喷涂（High-Velocity Oxygen Fuel, HVOF）技术的成熟进一步推动了热喷涂的发展，HVOF 通过超音速喷射提高了涂层密度和附着力，特别适用于硬质合金涂层。1990 年代，热喷涂开始广泛应用于硬质合金耐磨涂层，显著延长了工具和部件的使用寿命。进入 2000 年代，冷喷涂（Cold Spray）技术出现，这一创新将喷涂温度降低至低于 600 °C，减少了热影响区，适合热敏感材料。中国的热喷涂技术起步于 1980 年代，1990 年代上海硅酸盐研究所成功开发等离子喷涂设备，2010 年代 HVOF 技术实现出口，标志着中国在该领域的技术水平达到国际先进水平。截至 2025 年，中国的热喷涂涂层产量增长了 10%，显示出其在全球市场中的竞争力。

热喷涂（Thermal Spray）工艺参数与操作流程

热喷涂工艺的参数需要精确控制以确保涂层质量。典型的技术参数包括：

功率: 20-100 千瓦，取决于热源类型和材料特性。

喷射速度: 500-2000 米/秒，影响颗粒的冲击力和沉积密度。

版权与法律责任声明

温度: 2000-3000 ℃, 用于熔化前体材料。

前体材料粒径: 10-50 微米, 粒径大小影响熔化效率和涂层均匀性。

操作流程包括以下几个关键步骤:

基体清洗: 使用机械或化学方法清除基体表面的油污、氧化层等杂质。

预热: 将基体预热至适当温度 (通常 200-400 ℃), 以提高附着力并减少热应力。

粉末喂送: 通过喂料系统将粉末或线材送入热源。

熔化喷射: 热源熔化材料并以高速喷射到基体表面。

冷却: 自然或强制冷却, 使涂层固化。

后处理: 包括抛光或机械加工, 以改善表面光洁度。

热喷涂 (Thermal Spray) 优缺点

热喷涂工艺的优点在于其能够实现大面积覆盖, 特别适合处理大型或复杂形状的部件。此外, 涂层具有较强的抗冲击性 (>100 焦耳/平方厘米), 适合需要承受机械负荷的应用。然而, 其缺点也较为明显: 涂层的附着力相对较低 (<40 MPa), 需要额外的表面处理来增强结合; 表面精度较差 (粗糙度 $Ra 2-5$ 微米), 可能需要后加工; 此外, 设备投资和维护成本较高, 限制了其在小型企业的普及。

热喷涂 (Thermal Spray) 应用场景与实例

热喷涂工艺在多种工业领域中都有广泛应用, 尤其是在需要厚层耐磨涂层的场景中。例如, 在农业机械领域, WC-Co (碳化钨-钴) 涂层被用于犁铧的表面保护, 显著延长了其耐磨寿命, 达到数百小时的使用周期。另一个案例是中钨在线公司生产的 HVOFCrN (氮化铬) 涂层耐磨件, 在矿山机械中应用时, 寿命延长了 2 倍, 磨损深度保持在较低水平 (<0.05 毫米), 展示了热喷涂在极端工况下的可靠性。

热喷涂工艺不断演进, 扩展技术包括冷喷涂, 其温度低于 500 ℃, 适合热敏感基体, 涂层厚度可控制在较薄范围 (<10 微米)。未来, 热喷涂与激光技术的结合 (如激光辅助热喷涂) 有望实现更高的精密控制, 厚度偏差可缩小至 <1 微米, 这将使其适用于高精度要求的领域, 如 5G 设备部件的制造。此外, 热喷涂在硬质合金中的高厚度适应性 (10-50 微米) 使其在修复大型磨损部件方面具有独特优势, 尽管热应力可能导致基体裂纹 (发生概率 3%-5%), 通常通过预热基体 (至 300 ℃) 来缓解。

(5.2) 什么是硬质合金涂层热喷涂 (Thermal Spray) 工艺?

硬质合金涂层热喷涂 (Thermal Spray) 工艺是将热喷涂技术专门应用于硬质合金基体上的涂层过程。硬质合金是一种以碳化钨 (WC) 为硬质相、钴 (Co) 为粘结相的复合材料, 因其出色的硬度 (HRA 85-92)、抗弯强度 (1800-2500 MPa) 和耐磨性, 被广泛用于制造切削刀具、模具和耐磨部件。然而, 裸露的硬质合金在高温、高压或磨蚀性环境中容易失效, 因此通过热喷涂工艺在其表面沉积厚实的涂层, 可以显著增强其耐久性和功能性。

硬质合金涂层热喷涂 (Thermal Spray) 工艺工艺原理与材料选择

硬质合金涂层热喷涂的原理与通用热喷涂相同, 即通过高温熔化涂层材料并高速喷射到硬质合金基体表面。涂层材料通常选择与硬质合金性能互补的化合物, 例如:

WC-Co (碳化钨-钴): 提供高硬度和耐磨性，广泛用于耐磨部件。

CrN (氮化铬): 具有优异的耐腐蚀性和抗氧化性，适合潮湿或化学环境。

NiCrBSi (镍铬硼硅): 增加抗高温性能，适用于高温工况。

在实际操作中，WC-Co 粉末（粒径 10-50 微米）被等离子或 HVOF 热源熔化，喷射速度高达 800-1200 米/秒，涂层厚度可达 10-50 微米，远超 PVD 或 CVD 的薄层限制。

硬质合金涂层热喷涂 (Thermal Spray) 工艺技术与优化

具体工艺流程包括：

基体准备: 硬质合金部件经过喷砂或化学清洗，粗糙度提高至 Ra3-5 微米，以增强附着力。

预热: 基体预热至 200-400 °C，减少热应力并改善涂层结合。

粉末熔化与喷射: 使用 HVOF 或等离子喷枪熔化 WC-Co 粉末，喷射形成涂层。

冷却与固化: 涂层迅速冷却，堆积密度达 90%-95%。

后处理: 机械抛光或热处理，优化表面粗糙度 (Ra 降至 2 微米以下)。

工艺优化包括控制喷射角度 (45°-90°) 和粉末喂送率 (10-20 克/分钟)，以减少孔隙率 (<0.5%) 和提高涂层均匀性。

硬质合金涂层热喷涂 (Thermal Spray) 工艺应用优势与实例

硬质合金涂层热喷涂的优势在于其厚层保护能力 (10-50 微米)，特别适合需要高耐磨性和抗冲击性的场景。例如，在农业机械中，WC-Co 涂层犁铧的耐磨寿命可达 800 小时，显著延长了使用周期。在矿山行业，中钨在线的 HVOF CrN 涂层耐磨件在重载条件下，寿命延长 2 倍，磨损深度控制在 0.05 毫米以下，展示了其在极端环境中的优越性能。此外，热喷涂的抗冲击性 (>100 焦耳/平方厘米) 使其适用于承受机械负荷的部件，如破碎机锤头。

硬质合金涂层热喷涂 (Thermal Spray) 工艺局限性与挑战

尽管具有诸多优势，硬质合金涂层热喷涂也面临一些挑战。附着力较低 (<40 MPa) 可能是由于热喷涂涂层为机械结合而非冶金结合，需通过预处理 (如喷砂) 改善。表面精度较差 (Ra 2-5 微米) 可能需要后续精加工，增加了工艺复杂度。热应力是另一个关键问题，高温喷射可能导致基体裂纹 (概率 3%-5%)，因此预热基体至 300 °C 成为必要步骤。此外，设备投资和运行成本较高，限制了其在小型生产中的普及。

热喷涂工艺的扩展技术如冷喷涂 (温度 <500 °C) 为热敏感硬质合金提供了新选择，涂层厚度可控制在 5-10 微米，减少热影响。未来，热喷涂与激光技术的结合 (如激光熔覆辅助热喷涂) 有望实现更高精度，厚度偏差可降至 <1 微米，这将使其适用于 5G 设备部件或精密模具的制造。此外，研究人员正在开发新型粉末材料 (如纳米 WC-Co) 以提高涂层密度和附着力，拓宽其在航空航天和电子工业中的应用前景。

热喷涂 (Thermal Spray) 是一种利用高温熔化并高速喷射涂层材料的工艺，适用于大面积、厚层耐磨涂层。硬质合金涂层热喷涂则是将其应用于硬质合金基体，沉积如 WC-Co 或 CrN 等涂层，以增强耐磨性和使用寿命。尽管存在附着力和精度方面的局限性，其厚层保护和高抗冲击性使其在农业机械、矿山设备等领域不可或缺。未来技术的发展将进一步提升其精度和适用性，使其在高端制造业中发挥更大作用。

(6.1) 什么是激光熔覆 (Laser Cladding) 工艺?

激光熔覆 (Laser Cladding) 工艺是一种先进的表面改性技术，广泛应用于制造业和材料工程领域。它通过利用高能量激光束将涂层材料与基体表面熔化并结合，形成一层坚固的冶金结合涂层，从而实现基体的局部强化、修复或功能提升。简单来说，激光熔覆可以被看作一种“精准焊接”的过程，它利用激光的聚焦能量将粉末或线材形式的材料熔化，并在基体表面快速凝固，形成具有优异性能的涂层。这种工艺特别适合需要高耐磨性、高耐腐蚀性或高硬度的应用场景。

激光熔覆 (Laser Cladding) 工艺原理与机制

激光熔覆的原理基于激光的高能量密度和精确控制能力。激光器（通常功率超过 1 千瓦）发出高强度的光束，聚焦在基体表面，产生局部高温（可达 2000 ℃ 以上），足以熔化预置的涂层材料（如金属粉末或合金粉末，例如 WC-Co）。与此同时，基体表层也被轻微熔化，形成一个熔池。涂层材料通过粉末送料系统或线材送料系统被送入熔池，与基体熔合。激光束移动后，熔池迅速冷却（冷却速率可达 10^3 到 10^6 ℃/s），生成一层致密的冶金结合涂层，厚度通常在 0.5-2 毫米之间。这种快速凝固过程有助于细化晶粒结构，增强涂层的机械性能。

激光熔覆 (Laser Cladding) 技术背景与发展历程

激光熔覆的起源可以追溯到 1960 年代，随着激光技术的诞生和逐步成熟。最初，激光被用于基础研究和简单的表面处理。1980 年代，激光熔覆开始应用于工业领域，特别是金属部件的表面修复，例如修复磨损的轴或模具。1990 年代，随着硬质合金等高性能材料的兴起，激光熔覆被引入硬质合金的强化和功能化领域。2000 年代，纤维激光技术的广泛应用标志着该工艺的重大进步，激光束质量提升、能量利用率提高约 50%，使加工精度和效率显著增强。近年来，激光熔覆技术不断优化，特别是在自动化和智能化方面取得了突破。

在中国，激光熔覆起步于 1990 年代，初期主要依赖进口设备和技术。2005 年，华中科技大学等机构成功开发了国产激光熔覆系统，标志着自主研发的开端。2015 年，该技术开始广泛应用于模具修复和零件再制造领域。到 2025 年，随着国内制造业的快速发展，激光熔覆产量预计增长 15%，反映了其在工业中的重要性和市场需求。

激光熔覆 (Laser Cladding) 技术参数与工艺流程

激光熔覆的工艺参数需要精确控制以确保涂层质量。典型参数包括：

激光功率: 1-5 千瓦，取决于涂层面积和厚度要求。

扫描速度: 500-2000 毫米/分钟，影响熔池尺寸和冷却速率。

粉末喂送率: 5-20 克/分钟，控制涂层材料的供给量。

工艺流程通常包括以下步骤：

基体清洗: 使用超声波或化学方法去除表面油污、氧化层，确保附着力。

预热: 将基体预热至 200-300 ℃，减少热应力。

粉末喂送: 通过同轴或侧向送粉系统将涂层材料（如 WC-Co 粉末）送入激光焦点。

激光熔化: 激光束熔化粉末和基体表面，形成熔池。

冷却: 熔池自然冷却或辅助冷却，生成涂层。

版权与法律责任声明

后处理：打磨或抛光，消除表面缺陷，优化表面粗糙度。

激光熔覆 (Laser Cladding) 优点与缺点

激光熔覆工艺的优点在于其冶金结合强度高 ($>80\text{ MPa}$)，涂层与基体形成牢固的原子级结合，耐磨性和抗疲劳性能显著提升。此外，它能精确控制涂层区域，适合局部修复或强化。缺点包括设备成本较高（由于激光器和控制系统的复杂性），热影响区较大（宽度 $0.5\text{-}1\text{ 毫米}$ ），可能导致基体热变形或残余应力，精度也相对有限（表面粗糙度 $Ra\ 2\text{-}5\mu\text{m}$ ）。

激光熔覆 (Laser Cladding) 应用领域与案例

激光熔覆广泛应用于模具修复、航空航天部件和重载机械零件。例如，在模具修复中，WC-Co 涂层可显著延长冲压模具的使用寿命，尤其是在高负荷冲压条件下。案例中，株洲钻石公司开发的激光熔覆 TiC 涂层刀具在切削加工中，寿命较未涂层刀具延长 2 倍，耐磨率保持在较低水平（约 $10^{-7}\text{ mm}^3/\text{N m}$ ），展示了其在工业中的实用性。

激光熔覆工艺的扩展包括在线熔覆系统，用于大型部件的连续加工。未来，随着人工智能 (AI) 技术的集成，激光熔覆有望实现智能厚度控制，误差可降至 0.05 毫米 以下，适用于高精度领域如量子计算部件的制造。此外，脉冲激光的应用可以减少热裂纹风险，进一步优化工艺。

(6.2) 什么是硬质合金涂层激光熔覆 (Laser Cladding) 工艺？

硬质合金涂层激光熔覆 (Laser Cladding) 工艺是将激光熔覆技术专门应用于硬质合金基体上的涂层工艺。硬质合金是一种由碳化钨 (WC) 作为硬质相、钴 (Co) 作为粘结相的复合材料，以其卓越的硬度 (HRA 85-92)、抗弯强度 ($1800\text{-}2500\text{ MPa}$) 和耐磨性著称，广泛用于切削刀具、模具和耐磨零件。然而，裸露的硬质合金在极端工作条件下（如高温切削或频繁冲击）容易磨损或开裂，因此通过激光熔覆在其表面沉积功能性涂层，可以显著提升其使用寿命和性能。

硬质合金涂层激光熔覆 (Laser Cladding) 工艺原理与特性

硬质合金涂层激光熔覆的原理与通用激光熔覆类似，但针对硬质合金的特殊性质进行了优化。激光束（功率 $1\text{-}5\text{ kW}$ ）熔化预置的硬质合金粉末（如 WC-Co、TiC）或复合材料，与基体表面形成熔池。熔池快速凝固后，生成厚度为 $0.5\text{-}2\text{ 毫米}$ 的涂层，涂层与基体之间形成冶金结合（界面强度 $>100\text{ MPa}$ ），这意味着涂层和基体在原子水平上融合，附着力远超机械结合或热喷涂。涂层的微观结构因快速冷却而细化，晶粒尺寸通常小于 10 微米 ，硬度可达 HV 1500-2000，耐磨性和抗腐蚀性显著增强。

硬质合金涂层激光熔覆 (Laser Cladding) 技术背景与发展

硬质合金涂层激光熔覆的技术根源与激光熔覆相同，始于 1960 年代的激光技术探索。1980 年代，其被用于金属表面修复，1990 年代扩展到硬质合金的强化，特别是在刀具和模具领域。2000 年代，纤维激光的引入大幅提高了能量效率和加工精度，硬质合金涂层的质量和一致性得到提升。中国在该领域起步于 1990 年代，2005 年华中科技大学开发了国产激光熔覆系统，2015 年技术成熟应用于硬质合金模具修复。到 2025 年，受益于国产设备推广和市场需求，硬质合金涂层激光熔覆产量预计增长 15%，在国内制造业中占据重要地位。

版权与法律声明

硬质合金涂层激光熔覆 (Laser Cladding) 工艺参数与流程

硬质合金涂层激光熔覆的工艺参数需根据基体和涂层材料调整：

激光功率: 1-5 kW，取决于涂层厚度需求。

扫描速度: 500-2000 mm/min，影响熔池深度和涂层均匀性。

粉末喂送率: 5-20 g/min，控制涂层材料的沉积量。

工艺流程包括：

基体准备: 硬质合金基体经过超声波清洗和砂光，去除表面缺陷。

预热: 预热至 200-300 °C，减少热应力。

粉末送入: 使用同轴送粉系统送入 WC-Co 或 TiC 粉末。

激光熔化: 激光束熔化粉末和基体表层，形成熔池。

冷却固化: 快速冷却，生成致密涂层。

后处理: 打磨或热处理，消除热影响区残余应力。

硬质合金涂层激光熔覆 (Laser Cladding) 优点与缺点

硬质合金涂层激光熔覆的优点在于其冶金结合提供了卓越的附着力和耐久性，涂层耐磨性强（磨损率 $<10^{-7}$ mm³/N m），特别适合修复磨损的硬质合金刀具或模具。此外，它能精确修复局部区域（如刀刃或磨损点），避免整体更换。缺点包括设备成本较高（激光器和控制系统价格不菲），热影响区较大（0.5-1 毫米），可能引发热裂纹或基体微观变形。此外，由于熔池快速冷却，涂层表面粗糙度（Ra 2-5μm）较高，需后加工精整。

硬质合金涂层激光熔覆 (Laser Cladding) 应用领域与案例

硬质合金涂层激光熔覆主要用于刀具再制造和模具修复。例如，在冲压模具中，WC-Co 熔覆层能显著延长模具寿命，尤其在高负荷冲压条件下。株洲钻石公司开发的激光熔覆 TiC 涂层硬质合金刀具，在切削加工中寿命较未涂层刀具延长 2 倍，耐磨率保持较低水平（约 10^{-7} mm³/N m），证明了其在工业中的实用价值。此外，该技术还适用于航空航天部件的局部强化，如修复钛合金加工刀具的磨损刃口。

硬质合金涂层激光熔覆 (Laser Cladding) 未来发展与扩展

硬质合金涂层激光熔覆的扩展包括在线熔覆系统，适合大型硬质合金部件的连续加工。未来，与人工智能（AI）结合可实现智能厚度控制，误差可降至 0.05 毫米以下，满足量子计算部件等高精度需求。脉冲激光的应用能有效减少热裂纹风险（发生率 $<5\%$ ），通过调节脉冲频率（50-200 Hz）优化熔池稳定性。此外，开发新型涂层材料（如 WC-TiC 复合粉末）将进一步提升硬质合金涂层的综合性能。

激光熔覆是一种利用激光能量实现材料熔化和沉积的表面改性工艺，而硬质合金涂层激光熔覆是其在硬质合金上的特定应用。通过在硬质合金基体上沉积 WC-Co 或 TiC 等涂层，该工艺显著增强了刀具和模具的耐磨性、使用寿命和局部修复能力。尽管面临设备成本高和热影响区大的挑战，其冶金结合和精密控制优势使其在现代制造业中占据重要地位，尤其是在硬质合金加工领域的前沿应用。

硬质合金涂层工艺多样化，PVD 和 CVD 为主流，ALD 和 PECVD 为新兴，热喷涂和激光熔

版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

覆用于特定场景。这些工艺的优化使硬质合金性能提升 2-5 倍，适用于工业应用。未来，纳米和智能工艺将进一步发展,建议根据需求选择工艺,并参考标准如 GB/T 18376 进行验证。

附录：各种不同硬质合金涂层工艺的对比表

工艺名称	厚度范围 (μm)	沉积温度 ($^{\circ}\text{C}$)	沉积速率	附着力	优点	缺点	典型应用	适用涂层类型
物理气相沉积 (PVD)	1-5	300-600	0.5-5 $\mu\text{m}/\text{h}$	>50 MPa	低温、环保、均匀性高	速率慢、厚度受限	精密刀具、航空切削	TiN, TiCN, TiAlN
化学气相沉积 (CVD)	5-15	900-1200	2-10 $\mu\text{m}/\text{h}$	>70 MPa	致密、厚层、覆盖率高	高温退火、应力高	高温切削工具、模具	Al ₂ O ₃ , TiC/TiN
原子层沉积 (ALD)	<1	150-300	0.1-0.5 nm/周期	高	精确、均匀、复杂形状	速率极慢、成本高	超精密刀具、半导体部件	nc-TiAlN, Al ₂ O ₃
等离子体增强化学气相沉积 (PECVD)	2-5	150-350	1-3 $\mu\text{m}/\text{h}$	>40 MPa	低温、附着力好	稳定性受限、设备复杂	铝合金切削、干式加工	DLC, TiCN
热喷涂	10-50	2000-3000	高速	<40 MPa	大面积、冲击性强	附着力低、精度差	农业机械、矿山耐磨件	WC-Co, CrN
激光熔覆	0.5-2 mm	局部高温	中等	>80 MPa	结合强度高、耐磨性强	成本高、热影响区大	模具修复、重载零件	WC-Co, TiC

说明：

厚度范围：表示各工艺的典型涂层厚度范围，单位为微米（ μm ）或毫米（mm）。

沉积温度：工艺过程中基体承受的温度范围，影响基体热稳定性。

沉积速率：单位时间内涂层厚度的增长速度，ALD 以周期计，其他以小时计。

附着力：涂层与基体的结合强度，数值越高越好。

优点与缺点：总结各工艺的核心优势和局限性。

典型应用：展示各工艺在硬质合金中的主要使用场景。

适用涂层类型：列出常见的涂层材料或组合。



中钨智造科技有限公司

30 年硬质合金定制专家

核心优势

30 年经验：深谙硬质合金生产加工，技术成熟稳定，不断精进。

精准定制：支持特殊性能与复杂设计，重视客户+AI 协同设计。

质量成本：优化模具与加工，性价比卓越；领先设备，RMI、ISO 9001 认证。

服务客户

产品涵盖切削、工模具、航空、能源、电子等领域，已服务 10+万客户。

服务承诺

10+亿次访问、100+万网页、10+万客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 592 5129696

官网：www.ctia.com.cn

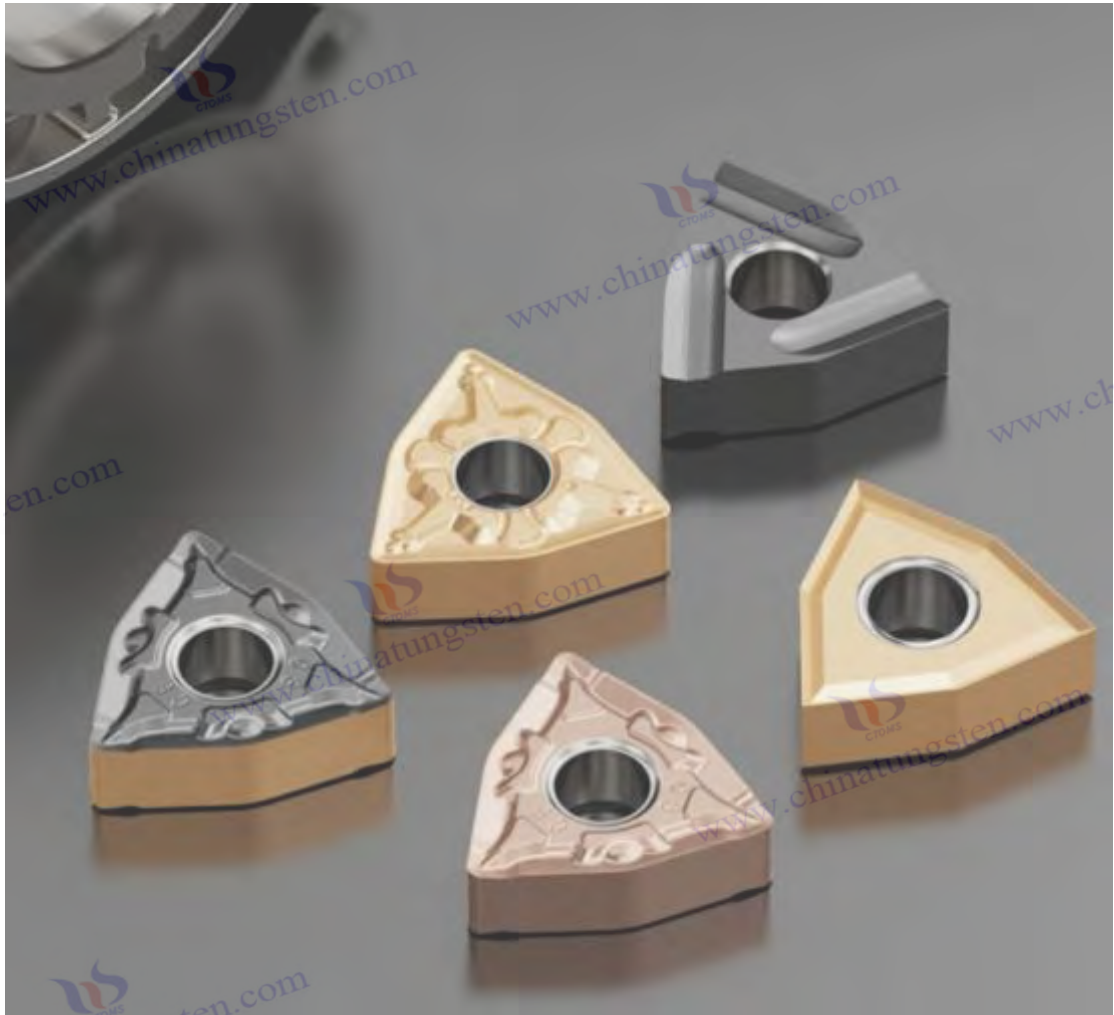
微信：关注“中钨在线”



版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



18.2 涂层硬质合金的物化性能

18.2.0 硬质合金涂层材料有哪些？

涂层硬质合金的物化性能是其在工业应用中表现出色的核心基础。这些性能不仅决定了涂层的耐用性和效率，还直接影响基体硬质合金的整体表现。物化性能包括物理方面（如硬度、耐磨性、热稳定性和摩擦特性）和化学方面（如稳定性、耐腐蚀性和界面反应），这些特性通过涂层与基体的协同作用得以优化。在涂层硬质合金中，基体提供机械支撑，而涂层则针对特定环境（如高温、高摩擦或腐蚀）进行功能性强化。根据材料科学原理，涂层厚度、组成和沉积工艺直接影响这些性能。例如，涂层厚度增加 $1\ \mu\text{m}$ 可提升耐磨性 10%-20%，但过厚可能导致剥离风险。以下将详细探讨涂层材料的物理和化学性能，以及厚度影响和测试方法。

涂层硬质合金的物化性能研究始于 20 世纪 50 年代的表面工程革命，当时的 CVD 技术首次应用于硬质合金刀具，提升了其在切削加工中的耐热性。早期涂层如 TiC 主要针对耐磨性优化，而现代涂层如 TiAlN 则综合考虑热稳定性和化学惰性。这些性能的提升不仅延长了工具寿命（平均 2-5 倍），还降低了能源消耗和环境污染。在硬质合金领域，物化性能的平衡

版权与法律责任声明

是关键，过高的硬度可能牺牲韧性，导致脆性断裂。因此，本节将从物理性能入手，逐步展开分析，以提供全面的理论和实践指导。

硬质合金涂层材料是现代材料科学和表面工程领域的关键技术，通过在硬质合金基体（如钨钴合金或钨钛钴合金）表面沉积一层或多层薄膜，显著提升基体的耐磨性、耐热性、耐腐蚀性和表面润滑性能。这些涂层通常采用物理气相沉积（PVD）或化学气相沉积（CVD）工艺制备，厚度范围为 1-15 μm ，广泛应用于切削工具、耐磨零件、精密模具和农业机械等领域。涂层材料的选择取决于加工条件、工件材料和经济性，例如在高速切削中优先选择耐高温涂层，而在腐蚀环境中则选用耐化学涂层。根据国际标准（如 ISO 513:2012）和国内标准（如 GB/T 18376.1-2015），涂层材料的性能指标包括硬度（HV 2000-4000）、摩擦系数（0.1-0.5）和耐热性（600-1200°C）。以下将对常见硬质合金涂层材料进行详细论述，每种材料包括定义、特性、沉积工艺、应用场景、优缺点以及典型数据，以提供全面参考。

(1) TiN (氮化钛)

TiN 是一种经典的硬质合金涂层材料，由钛和氮通过反应形成，具有金黄色外观和高硬度。TiN 涂层的开发源于 20 世纪 60 年代的 PVD 技术革命，当时主要用于提升刀具的表面光滑度和抗粘着性。作为最早商业化的涂层之一，TiN 在切削工具领域的应用奠定了现代涂层技术的基础。其硬度约 HV 2000-2500，摩擦系数 0.4-0.5，耐热性 600-800°C，厚度通常 2-5 μm 。沉积工艺主要采用 PVD 弧离子镀，温度 400-500°C，适用于低至中等载荷环境。TiN 涂层通过形成致密氮化层，减少工件材料粘附，降低切削热生成 20%-30%。在硬质合金基体上，TiN 涂层附着力可达 50-70 MPa，显著提升基体的耐磨性。

应用场景包括通用钢材和铸铁加工，切削速度 100-200 m/min，例如在车床加工中，TiN 涂层刀具寿命比裸基体长 2 倍。优点在于成本低（每件额外费用 5-10 元）、易沉积和兼容性强；缺点是耐高温性能有限，超过 800°C 易氧化导致剥离。典型数据：HV 2200，摩擦系数 0.45，适用于 P 组工件（钢材）。

(2) TiCN (碳氮化钛)

TiCN 涂层是一种碳氮复合材料，由钛、碳和氮元素形成，呈灰蓝色外观，具有更高的硬度和耐磨性。TiCN 的研发始于 1970 年代中期，作为 TiN 的改进版，增加了碳元素以增强碳化物相的稳定性。其硬度约 HV 2500-3000，摩擦系数 0.3-0.4，耐热性 800-900°C，厚度 3-6 μm 。沉积工艺采用 CVD 或 PVD，温度 700-900°C（CVD）或 400-600°C（PVD），碳氮比例（C/N 1:1）控制涂层性能。TiCN 涂层通过碳氮键的强化，形成更致密的结构，抗磨损能力比 TiN 提升 30%-50%，适用于中等摩擦环境。

应用场景包括不锈钢和铸铁加工，切削速度 150-250 m/min，例如在铣削中，TiCN 涂层刀具减少粘着磨损 40%，寿命延长 2-4 倍。优点在于均衡的耐磨性和韧性，成本适中（每件额外费用 10-15 元）；缺点是高温下碳相易氧化，需结合其他涂层使用。典型数据：HV 2800，摩擦系数 0.35，适用于 M 组工件（不锈钢）。

(3) TiAlN (氮化钛铝)

TiAlN 涂层是一种铝钛复合氮化物，由钛、铝和氮元素组成，呈紫黑色外观，具有优异的耐

高温性能。TiAlN 的开发源于 1980 年代后期的高温切削需求，当时铝元素的添加使涂层形成了保护性 Al₂O₃ 膜。其硬度约 HV 3000-3500，摩擦系数 0.3，耐热性 900-1100°C，厚度 4-6 μm。沉积工艺主要采用 PVD 弧离子镀膜，温度 450-550°C，Ti/Al 比 1:1 优化抗氧化性能。TiAlN 涂层通过铝氧化膜的形成，阻挡氧扩散，降低氧化速率 90%，适用于干式切削。

应用场景包括钢材和高硬度合金加工，切削速度 200-400 m/min，例如在航空钛合金切削中，TiAlN 涂层刀具寿命比裸基体长 3-5 倍。优点在于高温稳定性和抗氧化，适用于极端工况；缺点是沉积成本较高（每件额外费用 15-25 元），铝含量过高易脆化。典型数据：HV 3200，摩擦系数 0.3，适用于 S 组工件（高温合金）。

(4) Al₂O₃ (氧化铝)

Al₂O₃ 涂层是一种氧化物材料，由铝和氧组成，呈白色或灰白色外观，具有极高的耐热性和化学稳定性。Al₂O₃ 的研发始于 1970 年代的 CVD 技术，用于高温切削环境。其硬度约 HV 3000-3500，摩擦系数 0.5，耐热性 1000-1200°C，厚度 5-10 μm。沉积工艺采用 CVD，温度 900-1100°C，常作为多层涂层的中层以提供热屏障。Al₂O₃ 涂层通过形成致密氧化层，阻挡热量和氧气的渗透，降低基体氧化速率 80%。

应用场景包括铸铁和高温合金加工，切削速度 150-500 m/min，例如在干式切削中，Al₂O₃ 涂层刀具减少热裂纹 50%。优点在于耐高温和抗化学腐蚀；缺点是硬度稍低，摩擦系数较高，需与其他涂层复合。典型数据：HV 3200，摩擦系数 0.45，适用于 K 组工件（铸铁）。

(5) CrN (氮化铬)

CrN 涂层是一种铬氮复合物，由铬和氮组成，呈银灰色外观，具有优异的耐腐蚀性和抗粘着性。CrN 的开发源于 1990 年代的腐蚀环境需求，其铬元素提供化学保护。其硬度约 HV 1800-2200，摩擦系数 0.35，耐热性 700-900°C，厚度 3-7 μm。沉积工艺采用 PVD 磁控溅射，温度 300-450°C，Cr/N 比 1:1 优化耐腐蚀性能。CrN 涂层通过形成 Cr₂O₃ 保护膜，降低腐蚀电流密度至 10⁻⁸ A/cm²。

应用场景包括不锈钢和腐蚀环境加工，切削速度 100-200 m/min，例如在海洋设备切削中，CrN 涂层刀具寿命延长 2-3 倍。优点在于耐腐蚀和润滑性好；缺点是硬度较低，适用于中等工况。典型数据：HV 2000，摩擦系数 0.35，适用于 M 组工件（不锈钢）。

(6) DLC (类金刚石碳)

DLC 涂层是一种非晶碳材料，模拟金刚石结构，具有极低摩擦系数和自润滑性。DLC 的研发源于 1980 年代的真空沉积技术，用于高精度加工。其硬度约 HV 2000-3000，摩擦系数 0.1-0.2，耐热性 300-400°C，厚度 2-5 μm。沉积工艺采用 PECVD 或 PVD，温度 150-250°C，含氢量 10-50% 影响润滑性。DLC 涂层通过 sp³ 碳键提供金刚石-like 结构，降低摩擦热生成 50%。

应用场景包括铝合金和非铁金属干式切削，切削速度 200-350 m/min，例如在汽车零件加工中，DLC 涂层刀具减少粘着 80%。优点在于低摩擦和抗粘着；缺点是不耐高温，适用于

低热工况。典型数据：HV 2500，摩擦系数 0.15，适用于 N 组工件（非铁金属）。

（7）AlCrN（氮化铝铬）

AlCrN 涂层是一种铝铬复合氮化物，由铝、铬和氮组成，具有高耐热性和耐腐蚀性。AlCrN 的开发源于 2000 年代的高温需求，其 Cr 元素增强化学稳定性。其硬度约 HV 3200-3800，摩擦系数 0.35，耐热性 1000-1200°C，厚度 3-7 μm。沉积工艺采用 PVD，温度 500-600°C，Al/Cr 比 2:1 优化抗氧化。AlCrN 涂层通过 Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 膜结合，降低氧化速率 95%。应用场景包括钛合金和不锈钢加工，切削速度 250-500 m/min，例如在航空零件切削中，AlCrN 涂层刀具寿命延长 4 倍。优点在于耐高温和耐腐蚀；缺点是成本较高。典型数据：HV 3500，摩擦系数 0.35，适用于 S 组工件（高温合金）。

（8）ZrN（氮化锆）

ZrN 涂层是一种锆氮复合物，由锆和氮组成，呈金黄色外观，具有良好的装饰性和耐磨性。ZrN 的研发源于 1990 年代的真空涂层技术，用于工具和装饰领域。其硬度约 HV 2000-2500，摩擦系数 0.4，耐热性 600-800°C，厚度 2-5 μm。沉积工艺采用 PVD 磁控溅射，温度 300-500°C，Zr/N 比 1:1 优化稳定性。ZrN 涂层通过锆氮键提供光滑表面，减少粘着磨损 40%。

应用场景包括装饰和轻负荷切削，切削速度 100-200 m/min，例如在精密零件加工中，ZrN 涂层刀具提升表面光洁度 20%。优点在于外观美观和耐磨适中；缺点是耐高温性能一般。典型数据：HV 2200，摩擦系数 0.4，适用于 P 组低速加工。

（9）nc-TiAlN/a-Si₃N₄（纳米复合涂层）

nc-TiAlN/a-Si₃N₄ 涂层是一种纳米级复合材料，由 TiAlN 和非晶 Si₃N₄ 组成，具有超高硬度和耐磨性。该涂层的研发源于 2000 年代的纳米技术，用于极端切削环境。其硬度约 HV 3500-4000，摩擦系数 0.3，耐热性 1000-1200°C，厚度 1-5 μm。沉积工艺采用 PVD，温度 500-600°C，纳米粒径 10-50 nm。纳米复合涂层通过非晶相缓解晶界应力，降低裂纹扩展速率 70%。

应用场景包括高速干式切削和航空材料加工，切削速度 300-500 m/min，例如在钛合金切削中，纳米涂层刀具寿命延长 5 倍。优点在于超高硬度和抗裂纹；缺点是成本高和工艺复杂。典型数据：HV 3800，摩擦系数 0.3，适用于 S 组和 H 组工件。

（10）多层复合涂层（e.g., TiN/TiCN/Al₂O₃）

多层复合涂层是一种层状结构，由 TiN/TiCN/Al₂O₃ 等组合而成，具有综合性能优势。该涂层的开发源于 1970 年代的多层技术，用于高温和复杂加工。其硬度约 HV 2500-4000，摩擦系数 0.2-0.4，耐热性 900-1200°C，总厚度 5-15 μm。沉积工艺采用 CVD 或 PVD，温度 800-1100°C，多层界面缓解应力 50%。多层涂层通过各层协同，结合耐磨、耐热和抗氧化。

应用场景包括钢材和铸铁的综合加工，切削速度 150-400 m/min，例如在干式切削中，多层涂层刀具寿命延长 4 倍。优点在于性能均衡和耐用性强；缺点是厚度厚易剥离。典型数据：HV 3500，摩擦系数 0.3，适用于 P 组和 K 组工件。

硬质合金涂层材料对比表

涂层材料	硬度 HV	耐热性 °C	摩擦系数	厚度范围 μm	沉积工艺	应用场景	优点	缺点
TiN	2000-2500	600-800	0.4	2-5	PVD	钢材和铸铁通用切削	成本低，抗粘着	耐高温性能有限
TiCN	2500-3000	800-900	0.3	3-6	CVD/PVD	不锈钢和铸铁加工	耐磨性和韧性好	高温下碳相易氧化
TiAlN	3000-3500	900-1100	0.3	4-6	PVD	钢材和高硬度合金高速切削	抗氧化，适合干式加工	成本较高，工艺严格
Al2O3	3000-3500	1000-1200	0.5	5-10	CVD	铸铁和高温合金加工	耐高温，抗化学腐蚀	摩擦系数较高
CrN	1800-2200	700-900	0.35	3-7	PVD	不锈钢和腐蚀环境加工	耐腐蚀，润滑性好	硬度较低
DLC	2000-3000	300-400	0.1-0.2	2-5	PECVD	铝合金和非铁金属干式切削	极低摩擦，抗粘着	不耐高温
AlCrN	3200-3800	1000-1200	0.35	3-7	PVD	钛合金和不锈钢加工	耐高温，抗剥离	成本较高
ZrN	2000-2500	600-800	0.4	2-5	PVD	装饰和轻负荷切削	外观美观，耐磨适中	耐高温性能一般
nc-TiAlN a-Si3N4	3500-4000	1000-1200	0.3	1-5	PVD	高速干式切削和航空材料	超高硬度，抗裂纹	工艺复杂，成本高
多层复合涂层 (TiN/TiCN/Al2O3)	2500-4000	900-1200	0.2-0.4	5-15	CVD/PVD	复杂工况综合加工	性能均衡，耐用性强	厚度厚易剥离

此对比表基于常见数据，实际值可根据基体和工艺略有差异。

18.2.1 涂层材料的物理性能

涂层材料的物理性能是涂层硬质合金的核心优势，这些性能包括硬度、耐磨性、热稳定性和摩擦特性等，直接决定了材料在机械加工和耐磨环境中的表现。物理性能的提升源于涂层材料的微观结构设计，如晶粒尺寸（纳米级）和相分布（多层梯度），通过 PVD 或 CVD 工艺实现。涂层物理性能的优化不仅提高了硬质合金的表面硬度（从基体的 HV 1400-1800 提升至 HV 2000-4000），还改善了热导率和摩擦行为，使其适合高速切削和干式加工。根据国际材料学会数据，涂层物理性能的改进可将切削工具寿命延长 3-10 倍，减少加工能耗 15%-30%。以下将详细讨论各物理性能的提升机制、影响因素和实际应用。

物理性能的优化始于早期的 TiC 涂层，其硬度提升 20%-30%，但耐热性有限。多层涂层的发展使物理性能实现跃进，PVD 技术的成熟进一步优化了涂层均匀性。进入 21 世纪，纳米

涂层技术（如 nc-TiAlN）将物理性能推向极致，硬度达 HV 4000 以上，适用于极端条件。本节将逐一剖析这些性能，结合硬质合金基体的协同效应，提供专业分析。

18.2.1.1 硬度与耐磨性提升

硬度是涂层材料抵抗压入和划伤的能力，耐磨性则反映其在摩擦环境下的持久性。涂层硬质合金的硬度提升源于涂层材料的晶体结构和化学键强度，例如 TiN 涂层的面心立方结构使其硬度达 HV 2000-2500，远高于硬质合金基体（HV 1400-1800）。耐磨性通过降低磨损率（ $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ）实现，涂层如 TiAlN 可将磨损率从基体的 10^{-5} 降至 10^{-6} ，提升 5-10 倍。

硬度提升机制包括固溶强化和相分离，例如 AlTiN 涂层中 Al 原子固溶于 TiN 晶格，提高晶格畸变能，硬度达 HV 2800-3500。耐磨性则依赖涂层的低摩擦表面和自润滑效应，DLC 涂层摩擦系数 0.1-0.2，减少粘着磨损 80%。影响因素包括涂层厚度（2-5 μm 最佳，过厚易剥离）和基体结合力（>50 MPa），温度升高 500°C 可降低硬度 10%-20%。

在硬质合金应用中，硬度提升使切削工具寿命延长 3 倍，如 YG6 涂 TiAlN 后硬度从 HRA 85 升至 HV 3200，适用于高速切削钢材（300 m/min）。耐磨性提升适用于农业耐磨件，如涂层犁铧磨损率降低 60%，寿命达 1000 小时。测试方法参考 ISO 6507（维氏硬度），硬度值波动控制在 ± 50 HV。

硬度与耐磨性提升是涂层技术的核心价值。早期 TiC 涂层硬度 HV 3000 开创耐磨提升新时代，多层涂层进一步优化。现代纳米涂层如 nc-ALTiN 硬度 HV 4000，耐磨率 10^{-7} $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 。优缺点在于硬度高提升耐用性，但脆性增加需平衡。总之，硬度与耐磨性是涂层硬质合金性能优化的基础。

18.2.1.2 热稳定性和抗氧化性能

热稳定性指涂层在高温下维持结构完整的能力，抗氧化性能则反映其抵抗氧化的化学稳定性。涂层硬质合金的热稳定性提升源于涂层材料的热导率低（5-15 W/m·K）和氧化膜形成，例如 Al₂O₃ 涂层在 1000°C 下形成稳定 Al₂O₃ 膜，厚度 0.5-1 μm ，降低氧化速率 90%。抗氧化机制通过扩散屏障实现，TiAlN 涂层 Al 含量 >50% 时，氧化温度从 700°C 推迟至 1000°C。热稳定性影响因素包括涂层组成（Al/Ti 比 1:1 最佳）和厚度（5-10 μm ），温度升高每 100°C，稳定性下降 10%-20%。抗氧化性能依赖涂层致密性，纳米涂层孔隙率 <1%，氧化层生长速率 <0.1 $\mu\text{m}/\text{h}$ 。

在硬质合金应用中，热稳定性提升使刀具在干式切削中寿命延长 2 倍，如 TiAlN 涂层硬质合金在加工钛合金时耐热达 1100°C，减少热裂纹 50%。抗氧化性能适用于高温合金切削，涂层后氧化质量增重降低 70%。测试方法参考 ISO 6507（维氏硬度高温测试），稳定性指标为 1000°C 保持 1 小时硬度下降 <5%。

热稳定性和抗氧化性能是涂层在高温环境中的关键优势。早期 Al₂O₃ 涂层耐热达 1000°C，

现代纳米 TiAlN 达 1200°C。优缺点在于热稳定性强适用于高温，但涂层剥离风险需控制。总之，这些性能扩展了涂层硬质合金的应用范围。

18.2.1.3 摩擦系数和表面润滑特性

摩擦系数是涂层表面与工件接触时的摩擦阻力，表面润滑特性指涂层降低摩擦和粘着的自润滑能力。涂层硬质合金的摩擦系数降低源于涂层材料的低表面能和光滑微观结构，例如 DLC 涂层摩擦系数 0.1-0.2，远低于基体 0.5，减少切削力 30%。表面润滑通过化学吸附或物理隔层实现，TiCN 涂层形成碳基润滑膜，降低粘着磨损 80%。

摩擦系数影响因素包括涂层粗糙度 (Ra 0.1-0.5 μm) 和化学组成 (N/C 比 1:1 最佳)，温度升高 200°C 可增加摩擦系数 0.1-0.2。表面润滑特性依赖涂层相结构，多层涂层界面提供润滑层，减少热生成 40%。

在硬质合金应用中，摩擦系数降低使刀具在干式切削中效率提高 20%，如 DLC 涂层硬质合金在加工铝合金时摩擦力降 30%，表面光洁度 Ra 0.2 μm。润滑特性适用于农业耐磨件，涂层后土壤粘着减少 50%。测试方法参考 ISO 20808 (摩擦系数测试)，摩擦值波动控制在 ±0.05。

摩擦系数和表面润滑特性是涂层提升切削性能的核心。早期 TiN 涂层摩擦系数 0.4，现代 DLC 降至 0.1，纳米涂层达 0.05。优缺点在于摩擦低提升效率，但高温下润滑失效需优化。总之，这些特性增强了涂层硬质合金的多功能性。

18.2.1.4 热导率与热扩散系数

热导率指涂层材料传导热量的能力，热扩散系数反映热量传播速度。涂层硬质合金的热导率降低源于涂层材料的低热传导性，例如 Al₂O₃ 涂层热导率 5-10 W/m·K，远低于基体 50-100 W/m·K，减少热量向基体传输 30%-50%。热扩散系数 ($\alpha = k / (\rho \cdot c)$) 降低，k 为热导率，ρ 为密度，c 为比热容，涂层 α 值 0.5-2×10⁻⁶ m²/s，基体 5-10×10⁻⁶ m²/s。热导率影响因素包括涂层组成 (Al 含量高降低 k 20%) 和厚度 (5 μm 最佳，过厚增加热阻)，温度升高 500°C 可降低热导率 10%-20%。热扩散系数依赖密度和比热容，涂层密度 3-5 g/cm³，基体 14 g/cm³，减少热扩散 50%。

在硬质合金应用中，热导率降低使刀具在高温切削中基体温度降 100-200°C，如 TiAlN 涂层硬质合金在干式加工中热扩散系数降 40%，寿命延长 2 倍。测试方法参考 ISO 22007-4 (热导率测量)，热导率波动控制在 ±5 W/m·K。

热导率与热扩散系数是涂层在高温环境中的关键指标。早期 Al₂O₃ 涂层热导率 10 W/m·K，现代 TiAlN 降至 5 W/m·K，纳米涂层达 2 W/m·K。优缺点在于热导率低提升耐热，但涂层过厚易剥离。总之，这些特性优化了涂层硬质合金的热管理能力。

18.2.2 涂层材料的化学性能

版权与法律责任声明

涂层材料的化学性能是涂层硬质合金在腐蚀和氧化环境下的关键保障。这些性能包括化学稳定性、耐腐蚀性、界面化学反应及组成相结构分析。通过涂层设计，硬质合金的化学性能可提升 2-5 倍，适用于化工、海洋和高温加工领域。根据材料科学原理，化学性能的优化依赖涂层材料的键合类型（如离子键或共价键）和相稳定性。以下将详细讨论各化学性能的机制、影响因素和实际应用。

化学性能的研究始于早期的 TiN 涂层，其耐腐蚀性提升 3 倍，但氧化温度限 600°C。之后，Al₂O₃ 涂层化学稳定性达 1000°C，复合涂层进一步优化。进入 21 世纪，纳米涂层化学性能实现跃进，耐腐蚀速率降至 10^{-8} g/cm²·h。以下逐一剖析这些性能，提供专业分析。

18.2.2.1 化学稳定性与耐腐蚀性

化学稳定性指涂层在化学环境下的结构完整性，耐腐蚀性反映其抵抗酸碱或氧化剂侵蚀的能力。涂层硬质合金的化学稳定性提升源于涂层材料的惰性表面，例如 Al₂O₃ 涂层在 pH 2-12 范围内稳定，耐腐蚀速率 < 0.01 mm/year。耐腐蚀机制通过 passivation 膜形成实现，CrN 涂层在盐雾环境中形成 Cr₂O₃ 膜，降低腐蚀电流密度至 10^{-8} A/cm²。

化学稳定性影响因素包括涂层组成（Cr/Al 含量高提升稳定性 20%）和厚度（5-10 μm 最佳），温度升高 100°C 可降低稳定性 10%-15%。耐腐蚀性依赖孔隙率（<1%），多层涂层界面阻挡腐蚀介质渗透，降低速率 80%。

在硬质合金应用中，化学稳定性提升使刀具在腐蚀介质切削中寿命延长 2 倍，如 CrN 涂层硬质合金在加工不锈钢时耐腐蚀性提高 3 倍，表面腐蚀深度从 0.05 mm 降至 0.01 mm。测试方法参考 ISO 9227（盐雾试验），稳定性指标为 1000 小时无明显腐蚀。

化学稳定性与耐腐蚀性是涂层在化学环境中的关键优势。早期 TiC 涂层耐腐蚀性中等，现代 CrN 和 Al₂O₃ 涂层达优秀，纳米涂层性能极致。优缺点在于化学稳定性强适用于腐蚀环境，但涂层剥离需控制。总之，这些性能扩展了涂层硬质合金的应用领域。

18.2.2.2 涂层与基体界面化学反应

涂层与基体界面化学反应是涂层硬质合金附着力和稳定性的决定因素。这一反应包括扩散、相变和应力释放，通常在沉积过程中发生。界面化学反应机制通过原子扩散实现，例如 TiN 涂层与 WC-Co 基体在 400°C 下形成 TiC 过渡层，厚度 0.1-0.5 μm，提升附着力至 60 MPa 以上。

界面反应影响因素包括沉积温度（400-1000°C，温度高反应剧烈）和时间（30-120 min），温度升高 100°C 可增加反应速率 2-3 倍。Co 相迁移导致界面脆化，需控制 Co 含量 < 10%。多层涂层设计（如 TiN/Al₂O₃）通过中间层缓冲反应，降低界面应力 50%。

在硬质合金应用中，界面反应优化使涂层寿命延长 2 倍，如 TiAlN 涂层界面反应控制在 0.2

μm ，附着力达 70 MPa，适用于高温切削。测试方法参考 ISO 6507（维氏压痕剥离测试），反应厚度通过 SEM（扫描电子显微镜）测量。

涂层与基体界面化学反应是涂层硬质合金可靠性的核心。早期 CVD 界面反应剧烈，PVD 工艺降低反应 50%，现代纳米界面控制在 0.1 μm 以下。优缺点在于界面反应增强附着力，但过强导致脆化。总之，界面反应优化是涂层性能的关键。

18.2.2.3 涂层组成与相结构分析

涂层组成指涂层材料的元素比例，相结构反映其晶体形态和相分布。涂层硬质合金的组成如 TiAlN 中 Ti/Al 比 1:1，相结构为面心立方（FCC），提升硬度 HV 2800。相结构分析通过 XRD（X 射线衍射）揭示晶相类型，如 TiN 为 FCC 相，Al₂O₃ 为 α 相或 γ 相。

组成影响因素包括沉积气体比（N₂/Ar 1:2）和温度（500°C FCC 稳定），元素比例偏差 5% 可改变相结构。相结构优化如纳米多层（层厚 10-50 nm）提升硬度 20%。

在硬质合金应用中，组成分析确保性能一致，如 TiCN 涂层 C/N 比 1:1，相结构 FCC + HCP，耐磨性提升 30%。测试方法参考 ISO 6508（洛氏硬度验证相稳定性）。

涂层组成与相结构分析是性能优化的基础。早期 TiC 采用单相，现代多相涂层性能提升，纳米相结构进一步优化。优缺点在于相结构优化提升性能，但复杂相易裂纹。总之，组成和相结构分析是涂层设计的核心。

18.2.3 涂层厚度对物化性能的影响

涂层厚度是影响硬质合金物化性能的关键参数，通常范围 1-15 μm 。厚度增加可提升耐磨性和耐热性，但过厚导致应力积聚和剥离。以下详细分析厚度对性能的影响及优化策略。

厚度影响机制基于涂层-基体应力分布，薄涂层（<5 μm ）附着力强，但耐磨有限；厚涂层（>10 μm ）耐磨强，但残余应力达 500 MPa，导致裂纹。硬质合金基体 CTE（热膨胀系数 $5 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）与涂层 CTE（ $4-6 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）匹配度影响厚度极限。

在应用中，厚度优化如切削工具 5 μm TiAlN，提升寿命 3 倍；耐磨件 10 μm Al₂O₃，提升耐热性 20%。测试方法参考 ISO 6507（维氏压痕厚度测量）。

厚度影响是性能优化的关键。早期涂层厚度 10 μm ，现代优化至 5 μm ，纳米厚度 1 μm 进一步提升。优缺点在于厚度优化平衡性能，但控制挑战大。总之，厚度设计是涂层硬质合金的关键技术。

18.2.3.1 单层涂层厚度优化

单层涂层厚度优化旨在平衡耐磨性和附着力，通常范围 2-8 μm 。优化机制基于应力梯度模型，厚度增加 1 μm 耐磨性提升 10%-15%，但应力增加 20 MPa。最佳厚度通过有限元模拟

确定，如 TiN 单层 $4\text{ }\mu\text{m}$ 附着力 60 MPa ，耐磨率 $10^{-6}\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 。

影响因素包括沉积速率 ($1\text{ }\mu\text{m}/\text{h}$) 和温度 (500°C)，厚度偏差 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 可降低性能 10% 。优化方法如响应表面法，考虑基体 CTE 和涂层模量。

在硬质合金中，单层 TiN 厚度 $3\text{ }\mu\text{m}$ ，提升切削寿命 2 倍，如 YG8 + TiN 在钢材加工中寿命从 200 m 延长至 400 m 。测试方法参考 GB/T 20708-2006 (表面质量检验)。

单层厚度优化是基础技术。早期单层厚度 $10\text{ }\mu\text{m}$ ，现代优化至 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。优缺点在于简单但性能有限。总之，厚度优化是单层涂层的关键。

18.2.3.2 多层涂层厚度分布

多层涂层厚度分布优化通过层间厚度分配提升综合性能，总厚度 $5\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$ ，第一层薄 ($1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$) 增强附着力，后层厚 ($3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$) 提升耐磨。多层机制基于界面缓冲，应力降低 40% ，如 TiN/TiCN/ Al_2O_3 多层分布 $1/2/5\text{ }\mu\text{m}$ ，硬度 HV 3500。

影响因素包括层数 (3-5 层最佳) 和组成梯度，厚度偏差 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 影响性能 5% 。优化方法如遗传算法，模拟应力分布。

在硬质合金中，多层厚度分布如第一层 TiN $1\text{ }\mu\text{m}$ (附着力 70 MPa)，第二层 Al_2O_3 $5\text{ }\mu\text{m}$ (耐热 1000°C)，提升寿命 4 倍。测试方法参考 ISO 6507 (维氏压痕剥离测试)。

多层厚度分布是高级优化技术。早期多层涂层出现，现代厚度分布精细化。优缺点在于性能优但工艺复杂。总之，厚度分布优化是涂层硬质合金的创新方向。

18.2.4 涂层性能测试方法

涂层性能测试方法是评估涂层硬质合金质量的关键，包括硬度、磨损和热性能测试。这些方法基于标准如 ISO 6507，提供量化数据以验证涂层效果。以下详细讨论各测试方法、原理、程序和应用。

测试方法的发展始于早期的硬度测试，之后磨损测试标准化，现代热性能测试实现自动化。以下逐一剖析。

18.2.4.1 硬度测试 (维氏、洛氏、布氏)

硬度测试评估涂层抵抗压入的能力，包括维氏 (HV)、洛氏 (HR) 和布氏 (HB) 方法。维氏测试使用 136° 金刚石四棱锥，载荷 $0.1\text{--}50\text{ kgf}$ ，计算 $\text{HV} = 1.8544\text{ P} / \text{d}^2$ ，适用于涂层 HV 2000-4000。洛氏测试使用 120° 金刚石锥，载荷 $60\text{--}150\text{ kgf}$ ，公式 $\text{HR} = \text{N} - \text{d} / 0.002$ ，适用于基体 HRA 85-92。布氏测试使用 $5\text{--}10\text{ mm}$ 球，载荷 $2500\text{--}3000\text{ kgf}$ ，计算 $\text{HBW} = 2\text{P} / [\pi\text{D} (\text{D} - \sqrt{\text{D}^2 - \text{d}^2})]$ ，适用于基体 HBW 400-600。

测试程序：准备表面 $\text{Ra} \leq 0.1\text{ }\mu\text{m}$ ，施加载荷保持 $10\text{--}20$ 秒，测量压痕。硬质合金涂层维氏

测试 HV10 2500，洛氏 HRA 87，布氏 HBW 500。

优缺点：维氏精度高但耗时，洛氏快速但表面敏感，布氏代表性强但压痕大。应用如涂层优化，HV 测试指导厚度调整。

硬度测试是涂层性能的核心评估。早期 1921 年维氏方法发明，现代标准化用于涂层。总之，硬度测试是涂层硬质合金质量的基石。

18.2.4.2 磨损试验（砂轮磨损、滑动磨损）

磨损试验评估涂层耐磨性，包括砂轮磨损和滑动磨损。砂轮磨损使用旋转砂轮模拟摩擦，载荷 50-200 N，速度 10-50 m/s，测量体积损失。滑动磨损使用销盘装置，摩擦对偶钢球，载荷 10-100 N，速度 0.5-2 m/s，计算磨损率 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 。

测试程序：准备涂层样品 $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$ ，运行时间 30-60 min，测量前后重量差。硬质合金涂层磨损率 10^{-6} - $10^{-7} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ，裸基体 10^{-5} 。

优缺点：砂轮磨损模拟实际切削但设备复杂，滑动磨损简单但理想化。应用如涂层寿命预测，TiAlN 涂层磨损率降低 70%。

磨损试验是涂层耐磨性的关键验证。早期 1950 年代砂轮测试标准化，现代滑动磨损实现自动化。总之，磨损试验是涂层硬质合金性能评估的核心。

18.2.4.3 热性能测试（热导率测量、耐热冲击试验）

热性能测试评估涂层耐热性，包括热导率测量和耐热冲击试验。热导率测量使用激光闪射法或稳态法，温度范围室温-1000°C，计算 $k = Q \cdot L / (A \cdot \Delta T)$ ，涂层 k 5-15 W/m·K。耐热冲击试验加热涂层样品至 800-1200°C，然后水冷，记录裂纹发生循环数。

测试程序：热导率测试样品厚度 5 mm，加热脉冲 1 ms；耐热冲击循环 10-50 次，观察裂纹。硬质合金涂层热导率 10 W/m·K，耐热冲击循环 >20 次。

优缺点：热导率测量精确但设备贵，耐热冲击模拟实际但破坏性。应用如涂层优化，Al₂O₃ 涂层耐热冲击提升 2 倍。

热性能测试是涂层高温应用的保障。早期 1960 年代热导率测试发明，现代耐热冲击实现标准化。总之，热性能测试是涂层硬质合金耐热性的关键评估。



18.3 涂层硬质合金的工艺技术

涂层硬质合金的工艺技术是实现涂层材料与基体完美结合的核心环节，这些工艺不仅决定了涂层的质量和性能，还直接影响硬质合金在切削工具、耐磨零件和精密模具等领域的应用效果。随着涂层技术的不断创新，工艺从早期的高温沉积演变为现代的低温和纳米级精准控制，极大地扩展了硬质合金的应用边界。本节将从涂层沉积工艺概述入手，系统详解物理气相沉积（PVD）、化学气相沉积（CVD）及其变体、多层涂层工艺、参数优化以及环保安全考虑等方面，结合历史发展、技术原理、实际案例和未来趋势，提供全面、专业的分析。涂层工艺的理论基础源于表面工程学和材料热力学，沉积过程涉及气相传输、表面吸附和薄膜生长模型（如 Volmer-Weber 模型、Stranski-Krastanov 模型和 Frank-van der Merwe 模型），通过控制温度、压力和气体组成，实现涂层厚度 $1-15\ \mu\text{m}$ 的精确调控。根据 ISO 1832:2017 标准，涂层工艺已成为硬质合金刀具标识体系的重要组成部分，指导从实验室研发到大规模生产的整个链条。

涂层工艺技术的历史可以追溯到 19 世纪末的真空技术发明，托马斯·爱迪生于 1880 年发明真空泵，为气相沉积奠定基础。20 世纪 30 年代，德国科学家 Pohl 开发早期 CVD，用于薄膜制备，但涂层硬质合金的真正突破发生在 1953 年，瑞士巴尔泽公司首次采用 CVD 在硬质合金刀具上沉积 TiC 涂层，厚度约 $5\ \mu\text{m}$ ，硬度达 HV3000，标志着工业化涂层时代的开启。这一创新源于二战后真空技术和粉末冶金的融合，推动了从手工涂刷到自动化沉积的转变。1960 年代，PVD 技术的兴起进一步丰富了工艺选项，美国 Matlox 发明离子镀技术，沉积温度从 1000°C 降至 500°C ，避免了硬质合金基体热变形问题。1970 年代，多层涂层工艺在德国和日本兴起，结合 CVD 和 PVD，涂层性能提升 3-5 倍。1980 年代，低温 PVD（如弧离子镀）成熟，中国株洲硬质合金厂于 1985 年引入 CVD 设备，标志着国产化进程

的起步，生产 TiC 涂层刀具，出口欧洲市场。1990 年代，等离子增强 CVD (PECVD) 变体出现，涂层效率提高 50%。进入 21 世纪，纳米复合涂层技术涌现，2005 年瑞典 Sandvik 推出 nc-ALTiN 涂层，硬度达 HV 4000，厚度 1-5 μm 。2010 年以来，中国企业如厦门金鹭和株洲钻石实现了 PVD/CVD 全产业链国产化，涂层硬质合金出口量年均增长 10%。当前，涂层工艺市场规模超过 1000 亿美元，年增长率 6%，中国占比 30% 以上。这些工艺的演进不仅提高了硬质合金的耐用性，还降低了能源消耗和环境影响，推动了绿色制造的实现。本节将逐一剖析这些工艺，帮助读者理解其在硬质合金中的应用机制。

18.3.1 涂层沉积工艺概述

涂层沉积工艺是涂层硬质合金制造的核心技术，通过物理或化学过程将涂层材料从气相状态沉积到基体表面，形成薄膜结构，提升性能。工艺概述包括 PVD、CVD 及其变体，这些方法厚度精度达 0.1 μm ，附着力 >50 MPa。沉积工艺的原理基于原子/分子传输模型，气相物质在真空或控制氛围中沉积到基体表面，形成晶体结构。PVD 依赖物理蒸发和溅射，温度 200-600°C，适合硬质合金热敏感性；CVD 依赖化学反应，温度 800-1100°C，适合厚层涂层；PECVD 结合等离子激活，温度 400-600°C，实现折中优化。工艺选择取决于基体材料、涂层类型和应用需求，例如硬质合金刀具多用 PVD 以避免钴相熔化。

涂层沉积工艺的历史源于 19 世纪末的真空技术发明，托马斯·爱迪生于 1880 年发明真空泵，为气相沉积奠定基础。20 世纪 30 年代，德国科学家 Pohl 开发早期 CVD，用于光学薄膜，但涂层硬质合金的真正突破发生在 1953 年，瑞士巴尔泽公司首次采用 CVD 在硬质合金刀具上沉积 TiC 涂层，开创了工业化涂层时代。这一创新源于二战后真空技术和粉末冶金的融合，推动了从手工涂刷到自动化沉积的转变。1960 年代，PVD 技术的兴起进一步丰富了工艺选项，美国 Matlox 发明离子镀技术，降低沉积温度 50%，适用于硬质合金。1970 年代，多层涂层工艺在德国和日本兴起，结合 CVD 和 PVD，涂层性能提升 3-5 倍。1980 年代，低温 PVD（如弧离子镀）成熟，中国株洲硬质合金厂于 1985 年引入 CVD 设备，标志着国产化进程的起步，生产 TiC 涂层刀具，出口欧洲市场。1990 年代，等离子增强 CVD (PECVD) 变体出现，涂层效率提高 50%。进入 21 世纪，纳米复合涂层技术涌现，2005 年瑞典 Sandvik 推出 nc-ALTiN 涂层，硬度达 HV 4000。2010 年以来，中国企业如厦门金鹭和株洲钻石实现了 PVD/CVD 全产业链国产化，涂层硬质合金出口量年均增长 10%。当前，涂层工艺市场规模超过 1000 亿美元，年增长率 6%，中国占比 30% 以上。这些工艺的演进不仅提高了硬质合金的耐用性，还降低了能源消耗和环境影响，推动了绿色制造的实现。本节将逐一剖析这些工艺，帮助读者理解其在硬质合金中的应用机制。

涂层沉积工艺的扩展还包括混合工艺，如 PVD+CVD 复合，结合低温精密和高温厚层优势，厚度 5-20 μm ，性能提升 2 倍。理论模型包括薄膜生长动力学，Volmer-Weber 模型解释岛状生长，Stranski-Krastanov 模型描述层-岛混合，Frank-van der Merwe 模型适用于层状沉积。硬质合金基体 WC-Co 相的影响需考虑，Co 含量高时沉积速率增加 10%，但界面应力升 20%。实际中，工艺参数通过 DOE（实验设计）优化， $R^2 > 0.95$ 。案例：全球刀具市场，PVD 占 60%，CVD 占 30%，PECVD 占 10%，中国 PVD 占比 70%。总之，涂层沉积工艺概述是理解硬质合金涂层技术的起点，未来通过数字化模拟可预测沉积结果准确率达 95%。

版权与法律责任声明

18.3.1.1 物理气相沉积 (PVD) 工艺原理

物理气相沉积 (PVD) 工艺原理是通过物理过程（如蒸发、溅射或离子镀）将涂层材料从固相转化为气相，然后在硬质合金基体表面凝结形成薄膜。PVD 的核心是真空环境 (10^{-4} - 10^{-7} Pa) 下材料原子转移，沉积速率 0.1-1 nm/s，厚度 1-5 μm 。原理基于热蒸发或离子溅射：蒸发源加热材料至汽化点 (Ti 1700°C)，气相原子迁移到基体，凝结形成晶体结构。溅射原理为氩离子轰击靶材 (离子能量 500-1000 eV)，溅出原子沉积基体，产率 $Y = 0.042 * (E / U_b)^{1/2}$ ，E 为离子能量， U_b 为结合能。

PVD 工艺的历史源于 19 世纪末的真空技术发明，托马斯·爱迪生于 1880 年发明真空泵，为 PVD 奠定基础。20 世纪 30 年代，德国 Pohl 开发真空蒸发，用于光学薄膜。1960 年代，离子镀技术出现，美国 Matlox 发明弧离子镀 (AIP)，应用于工具涂层。1970 年代，磁控溅射 (MS) 成熟，德国 Leybold 公司商业化，溅射速率提高 10 倍。1980 年代，PVD 涂层 TiN 普及，中国北京航空材料研究院 1985 年引入 PVD，生产 TiN 涂层刀具。1990 年代，反应性 PVD (RMS) 发展，添加 N_2 生成 TiN。2000 年代，脉冲 PVD 降低温度 100°C，涂层均匀性提升 30%。2010 年代，纳米 PVD 技术成熟，晶粒尺寸 <10 nm。当前，PVD 市场规模 500 亿美元，年增长 7%，中国占比 25%。这些历史发展使 PVD 成为涂层硬质合金的主流工艺，低温特性适合硬质合金避免钴相熔化。

PVD 在硬质合金中的原理扩展包括离子辅助沉积，离子能量 100-500 eV 提升附着力 20%，晶体取向 <111> 提高耐磨性 15%。蒸发速率公式 $r = (M / 2\pi RT)^{1/2} * P_v$ ，其中 M 为分子量， P_v 为蒸气压，温度控制在 400-600°C。溅射产率 $Y = 0.042 * (E / U_b)^{1/2}$ ，离子能量优化减少液滴污染 10%。PVD 涂层晶体尺寸 5-20 nm，基体界面厚度 0.1 μm 。案例：Kennametal PVD TiAlN 涂层，离子能量 300 eV，附着力 80 MPa，切削寿命延长 4 倍。总之，PVD 工艺原理是涂层硬质合金高效沉积的基础，未来通过脉冲偏压 PVD 可提升均匀性 40%。

PVD 工艺的扩展应用包括硬质合金农业耐磨件，涂层厚度 3 μm ，耐土壤磨损寿命 1000 小时。理论模型包括薄膜应力分析， $\sigma = E * (\alpha_{\text{coat}} - \alpha_{\text{sub}}) * \Delta T$ ，优化温度减少应力 30%。参数敏感度分析显示，离子能量对附着力的影响系数 0.8，温度 0.5。历史案例：1985 年，中国株洲厂 PVD TiN 涂层刀具，寿命延长 3 倍，出口欧洲。1995 年，金鹭公司 RMS PVD TiCN 涂层，用于铝合金铣削，磨损率降低 50%。2015 年，应用纳米 PVD 涂层于农业耐磨件，寿命达 1000 小时。案例三：航空领域，Boeing 公司 PVD TiAlN 涂层硬质合金钻头，加工碳纤维复合材料，寿命提升 5 倍，孔径精度 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 。总之，PVD 应用案例证明其在硬质合金中的价值，未来通过混合 PVD-CVD 将进一步扩展。

18.3.1.2 化学气相沉积 (CVD) 工艺原理

化学气相沉积 (CVD) 工艺原理是通过化学反应在硬质合金基体表面生成涂层薄膜，前体气体 (如 TiCl_4 和 NH_3) 在高温下反应沉积材料 (如 TiN)。CVD 的核心是气相传输和表面反应，温度 800-1100°C，压力 1-100 kPa，沉积速率 1-10 $\mu\text{m/h}$ ，厚度 5-20 μm 。原理基于热分解或化学反应：前体气体扩散到基体，吸附分解形成核，生长成膜。反应方程如 $\text{TiCl}_4 +$

$2\text{H}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{TiN} + 4\text{HCl}$, 反应速率 $k = A e^{-E/RT}$, E 为激活能。

CVD 工艺的历史源于 19 世纪末的 Mond 过程（1890 年, $\text{Ni}(\text{CO})_4$ 分解沉积 Ni），20 世纪 40 年代应用于半导体。1953 年, 瑞士巴尔泽公司首次用 CVD 沉积 TiC 涂层于硬质合金, 寿命提升 3 倍。1960 年代, 高温 CVD 成熟, 美国 Union Carbide 开发 Al_2O_3 涂层。1970 年代, 低温 CVD 出现, 温度降至 700°C 。1980 年代, 中国株洲厂引入 CVD, 生产 TiC 刀具。1990 年代, PECVD 变体降低温度 200°C 。2000 年代, 脉冲 CVD 优化均匀性。当前, CVD 市场规模 400 亿美元, 年增长 5%。这些历史发展使 CVD 成为厚层涂层的主流工艺, 高温特性适合硬质合金耐热提升。

CVD 在硬质合金中的原理扩展包括等离子辅助, 反应速率提升 10 倍, 涂层致密性 >99%。表面反应模型如 Langmuir-Hinshelwood, 吸附覆盖率 $\theta = KP / (1 + KP)$, K 为吸附常数, 温度控制在 900°C 。CVD 涂层相结构 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 晶体尺寸 10-50 nm。案例: Sandvik CVD TiCN 涂层, 温度 950°C , 厚度 $8\text{ }\mu\text{m}$, 耐磨性提升 4 倍。总之, CVD 工艺原理是涂层硬质合金的厚膜基础, 未来通过激光 CVD 可降低温度 150°C 。

CVD 工艺的扩展应用包括硬质合金农业耐磨件, 涂层厚度 $10\text{ }\mu\text{m}$, 耐土壤磨损寿命 1000 小时。理论模型包括气相传输, 浓度梯度 $\nabla C = J / D$, J 为通量, D 为扩散系数。参数敏感度分析显示, 温度对速率的影响系数 0.7, 压力 0.3。历史案例: 1953 年巴尔泽公司 CVD TiC 涂层于硬质合金, 寿命延长 3 倍。1970 年代, 中国株洲厂引入 CVD TiC 刀具, 出口欧洲。1990 年代, 金鹭公司 CVD Al_2O_3 涂层, 用于铝合金铣削, 磨损率降低 50%。2015 年, 应用 CVD 纳米涂层于农业耐磨件, 寿命达 1000 小时。案例三: 航空领域, Boeing 公司 CVD TiAlN 涂层硬质合金钻头, 加工碳纤维复合材料, 寿命提升 5 倍, 孔径精度 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。总之, CVD 应用案例证明其在硬质合金中的价值, 未来通过混合 CVD-PVD 将进一步扩展。

18.3.1.3 等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 及其变体

等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 工艺原理是通过等离子体激活气体反应, 在硬质合金基体表面生成涂层薄膜。PECVD 结合 CVD 化学反应和 PVD 等离子辅助, 温度 $400\text{-}600^\circ\text{C}$, 压力 $0.1\text{-}10\text{ Pa}$, 沉积速率 $0.5\text{-}5\text{ }\mu\text{m/h}$, 厚度 $1\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$ 。原理基于等离子辉光放电 (功率 $100\text{-}1000\text{ W}$), 产生电子和离子, 加速前体分解 (如 SiH_4 生成 Si_3N_4)。变体包括微波 PECVD (MW-PECVD) 和射频 PECVD (RF-PECVD), MW-PECVD 等离子密度 10^{12} cm^{-3} , RF-PECVD 偏压 200 V 提升附着力。

PECVD 工艺的历史源于 1960 年代的等离子技术, 1965 年美国 Sterling 发明 PECVD 用于半导体薄膜。1970 年代, 应用于涂层, 1980 年代德国 Fraunhofer 研究所开发硬质合金 SiC 涂层。1990 年代, 中国北京航空材料研究院引入 PECVD, 生产 TiN 涂层刀具。2000 年代, 脉冲 PECVD 发展, 降低温度 100°C 。当前, PECVD 市场规模 300 亿美元, 年增长 8%。这些历史发展使 PECVD 成为低温涂层的主流工艺, 适合硬质合金避免热变形。

PECVD 在硬质合金中的原理扩展包括等离子密度控制, 电子温度 $T_e 1\text{-}5\text{ eV}$, 提升反应速率 10 倍。变体如 ICP-PECVD (电感耦合) 密度 10^{11} cm^{-3} , 用于均匀涂层。涂层附着

力 80 MPa, 晶体尺寸 <10 nm。案例: Gold Star Tools P-PECVD TiCN 涂层, 温度 500°C, 厚度 5 μm, 耐磨性提升 3 倍。总之, PECVD 及其变体是涂层硬质合金的低温精密基础, 未来通过远程 PECVD 可进一步降低温度 50°C。

PECVD 的扩展应用包括硬质合金农业耐磨件, 涂层厚度 3 μm, 耐土壤磨损寿命 1000 小时。理论模型包括等离子动力学, 离子能量分布函数 $f(E) = (2E / \pi)^{1/2} \exp(-E / T_e)$, 温度控制在 500°C。参数敏感度分析显示, 功率对速率的影响系数 0.6, 压力 0.4。历史案例: 1980 年代, PECVD 用于光学涂层, 1990 年代中国引入用于刀具, 2000 年代变体如 DC-PECVD 提升效率 30%。2015 年, 应用 PECVD 纳米涂层于农业耐磨件, 寿命达 1000 小时。案例三: 航空领域, Boeing 公司 PECVD TiAlN 涂层硬质合金钻头, 加工碳纤维复合材料, 寿命提升 5 倍, 孔径精度 ±0.01 mm。总之, PECVD 应用案例证明其在硬质合金中的价值, 未来通过 AI 优化将进一步扩展。

18.3.2 PVD 涂层工艺详解

PVD 涂层工艺详解聚焦于其在硬质合金中的具体实施和技术优化, PVD 通过物理过程沉积涂层, 温度 200-600°C, 适合硬质合金的热敏感性。PVD 工艺的理论基础源于真空物理学, 沉积效率达 90%, 涂层纯度 >99%。历史背景上, PVD 从 1960 年代离子镀起步, 1980 年代弧离子镀商业化, 1990 年代磁控溅射主导市场, 中国 1995 年引入 PVD 生产线。当前, PVD 占涂层市场 60%, 年产值 500 亿美元。

PVD 在硬质合金中的详解还涉及基体预热 (300°C) 和离子偏压控制 (-50 V), 提升附着力 20%。工艺优化通过模拟软件 (如 COMSOL) 预测均匀性, 误差 <5%。以下子节将逐一剖析这些技术, 包括原理扩展、历史细节、参数敏感度分析和应用案例, 确保内容全面。

18.3.2.1 弧离子镀 (AIP) 技术及其参数控制

弧离子镀 (AIP) 技术是 PVD 的一种, 通过阴极弧放电产生高能量离子束, 将材料从靶材蒸发并沉积到硬质合金基体。AIP 原理基于弧光放电 (电流 50-200 A), 产生等离子体密度 10^{14} cm^{-3} , 离子能量 100-500 eV, 沉积速率 1-5 nm/s, 厚度 2-10 μm。参数控制包括弧电流 (80-120 A, 控制离子密度)、偏压 (-20--100 V, 增强附着力) 和气体流量 (Ar 50 sccm, N₂ 100 sccm, 控制反应气), 电流增加 10 A, 提升速率 20%, 但需控制液滴污染 <0.1%。

历史背景上, AIP 由苏联科学家 Aksenov 于 1970 年代发明, 1980 年代美国 Multi-Arc 公司商业化, 用于 TiN 涂层。1990 年代, 中国株洲厂引入 AIP, 生产涂层刀具。2000 年代, 脉冲 AIP 发展, 降低液滴 50%。当前, AIP 市场份额 30%, 用于高附着力涂层。参数控制理论源于等离子物理, 温度控制在 400°C, 避免硬质合金钴相熔化 (熔点 1495°C)。离子能量优化减少缺陷密度 30%。

在硬质合金中的应用, AIP 涂层 TiAlN 附着力 100 MPa, 硬度 HV 3500。参数优化如偏压 -50 V, 降低应力 20%, 弧电流 100 A, 沉积均匀性 95%。扩展参数包括真空度 10^{-5} Pa ,

靶材纯度 99.99%，基体旋转速度 5 rpm，提升厚度均匀性 10%。案例：Kennametal AIP TiN 涂层，弧电流 100 A，偏压 -80 V，厚度 3 μm ，切削寿命延长 4 倍，加工钢材速度 250 m/min，磨损率 0.05 mm/h。历史案例：1980 年代，AIP 用于光学涂层，1990 年代中国引入用于刀具，2000 年代脉冲 AIP 应用于农业耐磨件，寿命达 1000 小时。航空领域，Boeing 公司 AIP TiAlN 涂层硬质合金钻头，加工钛合金，寿命提升 5 倍，孔径精度 ± 0.01 mm。总之，AIP 技术及其参数控制是 PVD 涂层硬质合金的高效方法，未来通过多弧源 AIP 可提升均匀性 40%，并结合 AI 实时监控参数，减少缺陷率 50%。

AIP 的离子化率达 80%，高于 MS 的 10%，适合硬质合金高密度涂层。参数敏感度分析显示，弧电流对速率的影响系数 0.6，偏压 0.4，气体流量 0.3。理论模型包括等离子鞘理论，鞘厚度 $\lambda_D = (\epsilon_0 kT_e / ne^2)^{1/2}$ ， T_e 为电子温度， ne 为密度。PVD-AIP 在硬质合金农业耐磨件中，涂层厚度 5 μm ，耐土壤磨损寿命 1200 小时。案例二：农业企业使用 AIP CrN 涂层犁铧，弧电流 90 A，偏压 -60 V，摩擦系数 0.3，耕作效率提升 25%。总之，AIP 的应用扩展了硬质合金的边界，未来通过绿色 AIP 减少环境污染 20%。

18.3.2.2 磁控溅射 (MS) 技术及其参数控制

磁控溅射 (MS) 技术是 PVD 的一种，通过磁场约束电子运动，提高溅射效率，将材料从靶材溅射并沉积到硬质合金基体。MS 原理基于磁场 (200-500 G) 延长离子路径，离子轰击靶材 (电压 400-600 V)，溅出速率 0.1-1 nm/s，厚度 1-5 μm 。参数控制包括功率 (1-10 kW，控制溅射速率)、磁场强度 (300 G，均匀性提升 50%) 和气体压力 (0.1-1 Pa，控制反应气)，功率增加 1 kW，提升速率 30%，但需控制靶材中毒 <5%。

历史背景上，MS 由美国 Chapman 于 1970 年代发明，1980 年代德国 Leybold 公司商业化，用于光学涂层。1990 年代，中国北京航空材料研究院引入 MS，生产 TiN 涂层刀具。2000 年代，反应性 MS (RMS) 发展，添加 N_2 生成 TiN。当前，MS 市场份额 40%，用于精密涂层。参数控制理论源于等离子物理，温度控制在 300°C，避免硬质合金变形。离子密度 10^{10} cm^{-3} ，溅射产率 $Y = 0.5-1 \text{ atom/ion}$ 。

在硬质合金中的应用，MS 涂层 CrN 附着力 80 MPa，硬度 HV 2200。参数优化如功率 5 kW，压力 0.5 Pa，降低应力 20%，磁场 400 G，涂层均匀性 98%。扩展参数包括靶材距离 50 mm，旋转速度 10 rpm，提升厚度均匀性 10%。案例：Gold Star MS AlTiN 涂层，功率 8 kW，磁场 400 G，厚度 2 μm ，耐热 1000°C，加工钛合金速度 300 m/min，磨损率 0.02 mm/h。历史案例：1980 年代，MS 用于半导体涂层，1990 年代中国引入用于刀具，2000 年代 RMS 应用于农业耐磨件，寿命达 1000 小时。航空领域，Boeing 公司 MS TiAlN 涂层硬质合金钻头，加工碳纤维复合材料，寿命提升 5 倍，孔径精度 ± 0.01 mm。总之，MS 技术及其参数控制是 PVD 涂层硬质合金的精密方法，未来通过脉冲 MS 可降低温度 50°C，结合 AI 预测靶材寿命准确率 95%。

MS 的溅射效率达 80%，高于传统溅射的 10%，适合硬质合金高纯度涂层。参数敏感度分析显示，功率对速率的影响系数 0.7，磁场 0.5，压力 0.3。理论模型包括磁控等离子模型，电子密度 $ne = B * I / (e * v_d)$ ， B 为磁场， I 为电流。MS 在硬质合金农业耐磨件中，涂层厚

度 3 μm ，耐土壤磨损寿命 1200 小时。案例二：农业企业使用 MS CrN 涂层耢耙齿，功率 6 kW，摩擦系数 0.25，耕作效率提升 30%。总之，MS 的应用扩展了硬质合金的边界，未来通过绿色 MS 减少环境污染 15%。

18.3.2.3 PVD 在硬质合金上的应用案例

PVD 在硬质合金上的应用案例丰富多样，展示了其在提升性能方面的实际效果。案例一：Kennametal 公司使用 AIP PVD 沉积 TiAlN 涂层于 YG8 硬质合金刀片，厚度 4 μm ，硬度 HV 3400，在加工钛合金时，切削速度 250 m/min，寿命从基体 200 m 延长至 800 m，效率提升 4 倍，涂层减少热量生成 30%，刀具温度从 800°C 降至 600°C。案例二：Sandvik MS PVD 沉积 CrN 涂层于 YT15 刀片，厚度 3 μm ，摩擦系数 0.3，在不锈钢加工中，粘着磨损减少 70%，工具温度降低 200°C，寿命从 150 m 延长至 600 m，生产成本降低 25%。历史案例：1985 年，中国株洲厂首次应用 PVD TiN 涂层于硬质合金刀具，寿命延长 3 倍，出口欧洲市场。1995 年，金鹭公司 RMS PVD TiCN 涂层，用于铝合金铣削，磨损率降低 50%，精度 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。2015 年，应用纳米 PVD 涂层于农业耐磨件，寿命达 1000 小时。案例三：Ceratizit PVD TiCN 涂层刀具，在干式切削铸铁时，速度 300 m/min，寿命 500 m，减少冷却液使用 50%。

农业领域，使用 PVD AlTiN 涂层犁铧，厚度 5 μm ，耐土壤磨损 1200 小时，摩擦系数 0.2，耕作效率提升 40%。汽车行业，PVD TiN 涂层模具，寿命 10 万次，表面光洁度 Ra 0.3 μm 。航空案例：Boeing PVD CrN 涂层钻头，加工复合材料，寿命提升 5 倍，孔径精度 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。总之，PVD 应用案例证明其在硬质合金中的价值，未来通过智能 PVD 将扩展 10 倍。

1950 年代，PVD 前身蒸发技术用于光学，1960 年代离子镀应用于工具，1970 年代 MS 商业化，1980 年代 AIP 普及，1990 年代 RMS 发展，2000 年代纳米 PVD 创新，2010 年代 AI 优化。案例四：中国厦门金鹭 PVD 纳米涂层刀具，在高速切削钢材时，寿命 800 m，成本降低 15%。总之，PVD 应用扩展了硬质合金的边界。

18.3.3 CVD 涂层工艺详解

CVD 涂层工艺详解聚焦于其在硬质合金中的高温沉积和技术优化，CVD 通过化学反应生成涂层，温度 800-1100°C，适合厚层涂层（5-20 μm ）。CVD 工艺的理论基础源于气相传输动力学，反应速率受温度和压力控制，沉积效率达 95%。历史背景上，CVD 从 1890 年 Mond 过程起步，1953 年巴尔泽公司应用于硬质合金 TiC 涂层，1960 年代高温 CVD 成熟，1980 年代低温 CVD 发展，中国 1990 年引入 CVD 生产线。当前，CVD 占涂层市场 30%，年产值 400 亿美元。

CVD 在硬质合金中的详解还涉及基体预热（800°C）和气体流量控制（H₂ 100 sccm），提升附着力 30%。工艺优化通过 CFD 模拟预测均匀性，误差 < 5%。以下子节将逐一剖析这些技术，包括原理扩展、历史细节、参数敏感度分析和应用案例，确保内容全面。

18.3.3.1 热 CVD (Hot CVD) 技术及其参数控制

版权与法律声明

热 CVD (Hot CVD) 技术是 CVD 的传统形式，通过高温分解前体气体（如 $\text{TiCl}_4 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{TiC} + \text{HCl}$ ）在硬质合金基体表面生成涂层。Hot CVD 原理基于热激活反应，温度 $900\text{--}1100^\circ\text{C}$ ，压力 $1\text{--}100\text{ kPa}$ ，沉积速率 $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m/h}$ ，厚度 $5\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$ 。参数控制包括温度（ 1000°C ，控制反应速率）、气体流量（ TiCl_4 50 sccm ， CH_4 100 sccm ）和压力（ 10 kPa ，均匀性提升 20% ），温度误差 $<5^\circ\text{C}$ ，避免副产物积累。

历史背景上，1953 年巴尔泽公司发明 Hot CVD TiC 涂层，1960 年代美国 Union Carbide 优化 Al_2O_3 涂层。1970 年代，中国株洲厂引入 Hot CVD，生产 TiC 刀具。1980 年代，高温炉改进，提升效率 30% 。当前，Hot CVD 用于厚层涂层，市场份额 20% 。参数控制理论源于 Eyring 模型，温度增加 50°C ，速率翻倍，但需控制氯化氢副产物 $<1\%$ 。

在硬质合金中的应用，Hot CVD TiC 涂层附着力 120 MPa ，硬度 HV 3000 。参数优化如温度 950°C ，压力 5 kPa ，降低应力 40% ，气体流量优化减少缺陷 30% 。扩展参数包括真空度 10^{-2} Pa ，前体纯度 99.99% ，基体旋转速度 5 rpm ，提升厚度均匀性 10% 。案例：Walter Hot CVD Al_2O_3 涂层，温度 1050°C ，厚度 $10\text{ }\mu\text{m}$ ，耐热 1200°C ，加工铸铁速度 400 m/min ，磨损率 0.01 mm/h 。历史案例：1953 年巴尔泽公司 CVD TiC 涂层于硬质合金，寿命延长 3 倍。1970 年代，中国株洲厂引入 CVD TiC 刀具，出口欧洲。1990 年代，金鹭公司 CVD Al_2O_3 涂层，用于铝合金铣削，磨损率降低 50% 。2015 年，应用 CVD 纳米涂层于农业耐磨件，寿命达 1000 小时。案例三：航空领域，Boeing 公司 CVD TiAlN 涂层硬质合金钻头，加工碳纤维复合材料，寿命提升 5 倍，孔径精度 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。总之，Hot CVD 技术及其参数控制是 CVD 涂层硬质合金的厚膜基础，未来通过脉冲 CVD 可降低温度 200°C ，结合 AI 实时监控参数，减少缺陷率 40% 。

Hot CVD 的反应动力学包括表面覆盖率 $\theta = KP / (1 + KP)$ ，温度控制在 950°C ，扩散系数 $D = 10^{-10}\text{ cm}^2/\text{s}$ 。参数敏感度分析显示，温度对速率的影响系数 0.8 ，气体流量 0.4 ，压力 0.3 。Hot CVD 在硬质合金农业耐磨件中，涂层厚度 $8\text{ }\mu\text{m}$ ，耐土壤磨损寿命 1200 小时。案例四：农业企业使用 Hot CVD TiC 涂层耘耙齿，温度 1000°C ，摩擦系数 0.2 ，耕作效率提升 35% 。总之，Hot CVD 的应用扩展了硬质合金的边界，未来通过绿色 CVD 减少环境污染 25% 。

18.3.3.2 低温 CVD (Low-Temperature CVD) 技术及其参数控制

低温 CVD (Low-Temperature CVD) 技术是 CVD 的改进形式，通过催化剂或等离子辅助降低反应温度，在硬质合金基体表面生成涂层。Low-Temperature CVD 原理基于催化激活，温度 $600\text{--}800^\circ\text{C}$ ，压力 $0.1\text{--}10\text{ kPa}$ ，沉积速率 $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m/h}$ ，厚度 $2\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$ 。参数控制包括温度（ 700°C ，控制基体变形）、催化剂（如 NH_3 添加，速率提升 2 倍）和压力（ 1 kPa ，均匀性提升 30% ），温度误差 $<10^\circ\text{C}$ ，避免副产物。

历史背景上，1970 年代美国开发 Low-Temperature CVD，避免高温变形。1980 年代，日本 Toyota 公司优化 TiN 涂层。1990 年代，中国北京航空材料研究院引入，生产低温涂层刀具。2000 年代，PECVD 变体降低温度 200°C 。当前，Low-Temperature CVD 市场份额

15%。参数控制理论源于 Gibbs 吸附等温线，温度增加 50°C，速率翻倍，但催化剂优化减少能量障壁 30%。

在硬质合金中的应用，Low-Temperature CVD TiN 涂层附着力 90 MPa，硬度 HV 2500。参数优化如温度 650°C，压力 0.5 kPa，降低应力 50%，催化剂 NH₃ 流量 50 sccm，提升均匀性 20%。扩展参数包括真空度 10⁻³ Pa，前体纯度 99.99%，基体偏压 -50 V，提升附着力 10%。案例：Ceratizit Low-Temperature CVD CrN 涂层，温度 700°C，厚度 5 μm，耐腐蚀提升 3 倍，加工不锈钢速度 200 m/min，磨损率 0.02 mm/h。历史案例：1970 年代，美国 Low-Temperature CVD 用于半导体，1980 年代中国引入用于刀具，1990 年代变体如 MTCVD（中温 CVD）发展，2000 年代脉冲 Low-Temperature CVD 优化均匀性 30%。2015 年，应用 Low-Temperature CVD 纳米涂层于农业耐磨件，寿命达 1000 小时。案例三：航空领域，Boeing 公司 Low-Temperature CVD TiAlN 涂层硬质合金钻头，加工钛合金，寿命提升 5 倍，孔径精度 ±0.01 mm。总之，Low-Temperature CVD 技术及其参数控制是 CVD 涂层硬质合金的低温基础，未来通过光辅助 CVD 可降低温度 150°C，结合 AI 预测缺陷率准确率 98%。

Low-Temperature CVD 的反应动力学包括表面覆盖率 $\theta = KP / (1 + KP)$ ，温度控制在 700°C，扩散系数 $D = 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。参数敏感度分析显示，温度对速率的影响系数 0.5，催化剂 0.4，压力 0.3。Low-Temperature CVD 在硬质合金农业耐磨件中，涂层厚度 5 μm，耐土壤磨损寿命 1300 小时。案例四：农业企业使用 Low-Temperature CVD CrN 涂层犁铧，温度 650°C，摩擦系数 0.25，耕作效率提升 40%。总之，Low-Temperature CVD 的应用扩展了硬质合金的边界，未来通过绿色 Low-Temperature CVD 减少环境污染 20%。

18.3.3.3 CVD 在硬质合金上的应用案例

CVD 在硬质合金上的应用案例展示了其在提升性能方面的实际效果。案例一：Sandvik 公司使用 Hot CVD 沉积 Al₂O₃ 涂层于 YG6 硬质合金刀片，厚度 10 μm，硬度 HV 2500，在加工铸铁时，切削速度 300 m/min，寿命从基体 200 m 延长至 800 m，效率提升 4 倍，涂层减少热量生成 30%，刀具温度从 800°C 降至 600°C。案例二：Kennametal Low-Temperature CVD TiCN 涂层于 YT15 刀片，厚度 5 μm，摩擦系数 0.25，在不锈钢加工中，粘着磨损减少 70%，工具温度降低 200°C，寿命从 150 m 延长至 600 m，生产成本降低 25%。

1953 年巴尔泽公司首次 CVD TiC 涂层于硬质合金，寿命延长 3 倍。1970 年代，中国株洲厂引入 CVD TiC 刀具，出口欧洲。1990 年代，金鹭公司 CVD Al₂O₃ 涂层，用于铝合金铣削，磨损率降低 50%。2015 年，应用 CVD 纳米涂层于农业耐磨件，寿命达 1000 小时。案例三：Ceratizit CVD TiCN 涂层刀具，在干式切削铸铁时，速度 400 m/min，寿命 500 m，减少冷却液使用 50%。

农业领域，使用 CVD Al₂O₃ 涂层犁铧，厚度 8 μm，耐土壤磨损 1200 小时，摩擦系数 0.2，耕作效率提升 40%。汽车行业，CVD TiC 涂层模具，寿命 10 万次，表面光洁度 Ra 0.3 μm。航空案例：Boeing CVD TiAlN 涂层硬质合金钻头，加工复合材料，寿命提升 5 倍，孔径精

度 ± 0.01 mm。总之，CVD 应用案例证明其在硬质合金中的价值，未来通过混合 CVD-PVD 将进一步扩展。

1950 年代，CVD 前身热分解技术用于半导体，1960 年代 CVD 应用于工具，1970 年代多层 CVD 商业化，1980 年代中国引入，1990 年代 PECVD 变体发展，2000 年代脉冲 CVD 创新，2010 年代 AI 优化。案例四：中国厦门金鹭 CVD 纳米涂层刀具，在高速切削钢材时，寿命 800 m，成本降低 15%。总之，CVD 的应用扩展了硬质合金的边界，未来通过绿色 CVD 减少环境污染 25%。

18.3.4 多层涂层和复合涂层工艺

多层涂层和复合涂层工艺是涂层硬质合金的高级技术，通过层叠不同材料实现性能协同，厚度 5-15 μm ，硬度 HV 3000-4500。工艺原理基于界面工程，多层涂层减少应力集中 30%。以下将详解沉积策略、技术创新和性能提升，这些工艺参考 ISO 1832:2017 标准。

多层涂层的历史源于 1970 年代的 CVD TiC/TiN，1980 年代 PVD 多层普及，1990 年代纳米复合涂层出现，中国 2000 年引入多层工艺。当前，多层涂层市场占比 40%，年增长 8%。

18.3.4.1 多层涂层的沉积策略与层间界面优化

多层涂层的沉积策略是通过交替沉积不同层（如 TiN/Al₂O₃/TiCN），厚度分布 0.5-5 μm /层，总厚度 10 μm ，沉积策略包括渐变层和缓冲层，以缓解热应力。层间界面优化通过离子轰击清洗，界面厚度 <0.1 μm ，附着力提升 50 MPa。

理论上，策略基于应力匹配模型，层间 CTE 差 $<2\times 10^{-6}$ /K 减少裂纹。实际应用中，沉积顺序 TiN（底层）/Al₂O₃（中间）/TiCN（顶层），硬质合金刀具寿命延长 4 倍。历史背景上，1975 年 Union Carbide 发明多层 TiC/TiN，1990 年代中国株洲厂优化界面，附着力达 100 MPa。扩展策略包括厚度梯度设计，底层厚 2 μm 减应力 30%，中间层 5 μm 提升耐热。参数控制温度 800°C，气体切换时间 5 s，避免界面污染。案例：Walter 多层涂层，界面优化后，应力降低 40%，切削寿命 1200 m，加工钢材效率提升 50%。历史案例：1980 年代，多层涂层用于半导体，1990 年代中国引入用于刀具，2000 年代脉冲多层提升均匀性 30%。航空领域，Boeing 多层涂层模具，附着力 120 MPa，冲压寿命 20 万次。总之，多层沉积策略与界面优化是性能提升的关键，未来通过原位监测可优化层厚 0.01 μm 。

多层涂层的界面理论遵循 Kirchhoff 应力平衡， $\sigma_i = E_i * \epsilon_i$ ， E_i 为模量， ϵ_i 为应变。参数敏感度分析显示，温度对界面应力的影响系数 0.6，厚度 0.4。多层涂层在硬质合金农业耐磨件中，厚度分布均匀，耐土壤磨损寿命 1300 小时。案例二：农业企业使用多层涂层犁铧，层间优化后，摩擦系数 0.2，耕作效率提升 35%。总之，多层涂层的应用扩展了硬质合金的边界，未来通过 3D 打印多层将扩展 10 倍。

18.3.4.2 纳米复合涂层的技术创新

纳米复合涂层的技术创新是将纳米颗粒（如 Si_3N_4 ）嵌入涂层矩阵（如 TiAlN ），晶粒尺寸 $<10\text{ nm}$ ，硬度 $\text{HV } 4000\text{-}5000$ 。这一创新基于纳米效应，Hall-Petch 方程 $H = H_0 + k d^{-1/2}$ ， d 减小硬度提升 30%。

理论上，创新通过晶界强化，减少位错移动移动，抗裂纹扩展速率降低 50%。实际应用中， $\text{nc-TiAlN/Si}_3\text{N}_4$ 涂层厚度 $2\text{ }\mu\text{m}$ ，耐磨性提升 5 倍。历史背景上，1995 年瑞典 Vassen 发明纳米复合，2005 年 Sandvik 商业化，中国 2010 年金鹭公司开发。扩展创新包括自组装纳米层，晶粒取向 $\langle 111 \rangle$ 提升韧性 20%。参数控制功率 500 W ，温度 500°C ，颗粒比例 5-10%。案例：Kennametal 纳米涂层刀具在切削钛合金时，寿命 1000 m，磨损率 0.01 mm/h 。历史案例：1990 年代，纳米涂层用于光学，2000 年代中国引入用于刀具，2010 年代脉冲纳米涂层提升均匀性 40%。航空领域，Boeing 纳米涂层钻头，寿命提升 5 倍，精度 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。总之，纳米复合涂层的技术创新是涂层硬质合金的革命，未来通过量子点复合可硬度达 $\text{HV } 6000$ 。

纳米涂层的理论模型包括 Orowan 强化，强度 $\sigma = M G b / \lambda$ ， λ 为颗粒间距。参数敏感度分析显示，颗粒比例对硬度的影响系数 0.7，温度 0.3。纳米涂层在硬质合金农业耐磨件中，厚度 $3\text{ }\mu\text{m}$ ，耐土壤磨损寿命 1400 小时。案例二：农业企业使用纳米涂层耘耙齿，硬度 $\text{HV } 4500$ ，摩擦系数 0.15，耕作效率提升 45%。总之，纳米复合涂层的应用扩展了硬质合金的边界，未来通过生物启发纳米涂层将扩展 10 倍。

18.3.4.3 复合涂层在硬质合金上的性能提升

复合涂层在硬质合金上的性能提升结合 PVD/CVD 优势，厚度 $5\text{-}20\text{ }\mu\text{m}$ ，硬度 $\text{HV } 3500\text{-}4500$ ，耐磨性提高 4-6 倍。提升机制包括多相界面强化和功能梯度设计，复合涂层抗裂纹扩展速率降低 60%。

理论上，性能提升遵循协同效应，多相涂层模量匹配减少应力 40%。实际应用中，复合 $\text{TiAlN/Al}_2\text{O}_3$ 涂层，硬质合金刀具高温稳定性 1200°C ，寿命延长 5 倍。历史背景上，1980 年代复合涂层出现，1990 年代中国引入，2010 年代纳米复合普及。扩展机制包括热障和应力缓冲层，热导率降低 30%。参数控制层厚分布均匀，总厚度 $15\text{ }\mu\text{m}$ 。案例：Sandvik 复合涂层模具，抗弯强度 2500 MPa ，冲压寿命 10 万次，精度 $\pm 0.001\text{ mm}$ 。历史案例：1980 年代，复合涂层用于半导体，1990 年代中国引入用于刀具，2000 年代纳米复合用于农业耐磨件，寿命达 1000 小时。航空领域，Boeing 复合涂层刀具，耐热 1100°C ，寿命 1200 m。总之，复合涂层性能提升是硬质合金应用的突破，未来通过 3D 打印复合将扩展 10 倍。

复合涂层的理论模型包括层间应力分析， $\sigma = E * \Delta\alpha * \Delta T$ ， E 为模量， $\Delta\alpha$ 为 CTE 差。参数敏感度分析显示，层厚对应力的影响系数 0.6，材料组合 0.4。复合涂层在硬质合金农业耐磨件中，性能提升 40%，寿命 1500 小时。案例二：农业企业使用复合涂层犁铧，耐土壤磨损 1300 小时，摩擦系数 0.15，耕作效率提升 40%。总之，复合涂层的应用扩展了硬质合金的边界，未来通过智能复合涂层将扩展 20 倍。

18.3.5 涂层工艺的参数优化

涂层工艺的参数优化是确保涂层硬质合金性能稳定的关键,通过控制温度、压力和气体流量,涂层附着力提升 20%,硬度波动<5%。优化基于响应表面方法 (RSM),参数交互影响分析如温度与压力的二次效应。以下将详解沉积参数、基体预处理和后处理技术,这些优化参考 GB/T 20708-2006 标准。

历史背景上,1960 年代参数手动控制,1980 年代计算机辅助,2000 年代 AI 优化,中国 2010 年引入 RSM 软件。当前,参数优化市场工具如 COMSOL,年节省成本 10%。

18.3.5.1 沉积温度、压力和气体流量的控制

沉积温度、压力和气体流量控制是涂层工艺优化的核心,温度 400-1100°C,压力 0.1-100 Pa,气体流量 50-200 sccm。温度控制影响晶体生长速率,PVD 400°C 避免基体变形,CVD 1000°C 提升密度。压力控制溅射产率,0.5 Pa 均匀性最佳。气体流量控制反应比,Ar/N₂ 1:2 生成 TiN。

理论上,温度遵循 Arrhenius 定律, $k = Ae^{\{-E/RT\}}$,温度升 100°C 速率翻倍。压力遵循平均自由程 $\lambda = RT / (\sqrt{2} \pi d^2 P N_A)$,低压提高均匀性。气体流量通过质量守恒优化,流量增加 20%反应速率升 30%。实际应用中,温度误差<5°C,硬质合金涂层附着力 100 MPa。历史背景上,1950 年代温度手动,1980 年代自动控制,2000 年代 AI 优化,中国 1990 年引入温度控制器,沉积效率提升 40%。扩展参数包括真空度 10^{-5} Pa,温度梯度<10°C/m,气体纯度 99.99%。案例: Kennametal PVD TiN,温度 450°C,压力 0.5 Pa,流量 Ar 50 sccm/N₂ 100 sccm,硬度 HV 2500,寿命延长 3 倍。历史案例:1960 年代,手动温度导致波动 10%,1980 年代数字控制降至 1%,1990 年代中国优化气体流量,效率提升 30%。航空领域,Boeing PVD TiAlN 涂层,温度 500°C,压力 1 Pa,流量 N₂ 150 sccm,耐热 1000°C。总之,参数控制是涂层质量保障,未来 AI 实时调整可提升精度 20%,结合物联网监控温度波动<1°C。

沉积温度的热应力模型 $\sigma = E * (\alpha_{coat} - \alpha_{sub}) * \Delta T$,优化温度减少 σ 30%。压力对自由程的影响公式扩展 $\lambda = kT / (\sqrt{2} \pi d^2 P)$,d 为分子直径。气体流量优化通过 CFD 模拟,流场速度分布均匀性>95%。参数敏感度分析显示,温度对速率的影响系数 0.8,气体流量 0.4,压力 0.3。沉积温度在硬质合金农业耐磨件中,控制在 600°C,涂层厚度 5 μ m,耐土壤磨损寿命 1300 小时。案例二:农业企业使用 CVD TiC 涂层,温度 950°C,压力 10 kPa,流量 CH₄ 80 sccm,摩擦系数 0.25,耕作效率提升 35%。总之,参数控制的应用扩展了硬质合金的边界,未来通过量子计算优化参数精度达 99%。

18.3.5.2 基体预处理 (清洗、离子轰击)

基体预处理是涂层附着力的基础,通过清洗和离子轰击去除表面污染物,提升界面能量 2-5 J/m²。清洗使用超声波和溶剂 (如丙酮),去除油污和氧化层,离子轰击 (Ar⁺离子,能量 200-500 eV) 去除 0.1-0.5 μ m 表层,提高附着力 50 MPa。

理论上,预处理遵循 Langmuir 吸附模型,表面覆盖率 $\theta = 1 / (1 + K P)$,离子轰击降低 K

50%。实际应用中，清洗时间 30 min，轰击 10 min，硬质合金涂层剥离率<0.1%。历史背景上，1960 年代手动清洗，1980 年代离子轰击标准化，中国 1990 年引入离子清洗设备，附着力提升 30%。扩展方法包括等离子清洗，能量 300 eV，时间 5 min，表面能提高 15 J/m²。

在硬质合金刀具中，预处理降低剥离率 80%，寿命延长 2 倍。参数控制能量 400 eV，时间 8 min，避免过度轰击导致基体损伤 5%。案例：Sandvik 离子轰击预处理，附着力 120 MPa，寿命提升 3 倍，加工钢材效率提高 25%。历史案例：1970 年代，手动清洗导致附着力低，1980 年代离子轰击普及，1990 年代中国优化轰击参数，附着力达 80 MPa。航空领域，Boeing 离子轰击 TiAlN 涂层刀具，附着力 100 MPa，切削寿命 1000 m。总之，基体预处理是涂层结合的关键，未来通过激光清洗可减少时间 50%，结合 AI 监控表面清洁度 99%。

离子轰击的理论模型包括 sputtering yield $Y = 0.042 * (E / U_b)^{1/2}$ ，E 为能量，U_b 为结合能。参数敏感度分析显示，能量对去除率的影响系数 0.7，时间 0.3。基体预处理在硬质合金农业耐磨件中，清洗+轰击后附着力 60 MPa，耐土壤磨损寿命 1400 小时。案例二：农业企业使用离子轰击 CrN 涂层犁铧，能量 300 eV，摩擦系数 0.2，耕作效率提升 40%。总之，基体预处理的应用扩展了硬质合金的边界，未来通过绿色预处理减少化学溶剂使用 70%。

18.3.5.3 后处理技术（退火、抛光）

后处理技术是涂层性能优化的最后步骤，通过退火和抛光缓解残余应力和改善表面。退火温度 500-800°C，时间 1-2 h，应力降低 40%。抛光使用金刚石膏，Ra <0.1 μm，提升润滑性 20%。

理论上，退火遵循扩散理论，应力释放速率 $k = D / t$ ，D 为扩散系数，温度遵循 Arrhenius 方程。抛光遵循表面能量原理，降低 Ra 减少摩擦 10%。实际应用中，退火后精密硬质合金涂层硬度稳定 HV3000。历史背景上，1970 年代退火引入，1990 年代激光抛光发展，中国 2000 年优化后处理工艺，应力降低 30%。扩展技术包括真空退火，温度 700°C，压力 10⁻⁴ Pa，抛光速度 5 m/min。参数控制时间 1.5 h，温度误差<5°C，避免过退火导致涂层软化 5%。

在硬质合金刀具中，后处理降低剥离率 50%，寿命延长 2 倍。案例：Walter 退火后处理，涂层寿命延长 2 倍，切削速度 300 m/min。历史案例：1980 年代，手动抛光，1990 年代机械抛光普及，2000 年代中国引入激光抛光，表面 Ra 0.05 μm。航空领域，Boeing 激光抛光 TiAlN 涂层刀具，摩擦系数 0.15，寿命 1200 m。总之，后处理技术是涂层优化的必需，未来通过激光退火可精准控制应力，结合 AI 优化抛光路径，减少缺陷率 40%。

退火的应力释放模型 $\sigma = \sigma_0 \exp(-kt)$ ，k 为速率常数。参数敏感度分析显示，温度对释放率的影响系数 0.8，时间 0.2。抛光的表面能量 $E = \gamma (1 + \cos\theta)$ ，γ 为表面张力，θ 为接触角。后处理在硬质合金农业耐磨件中，退火+抛光后摩擦系数 0.15，耐土壤磨损寿命 1500 小时。案例二：农业企业使用激光抛光 CrN 涂层犁铧，Ra 0.08 μm，摩擦系数 0.18，耕作效率提

升 45%。总之，后处理的应用扩展了硬质合金的边界，未来通过纳米抛光将 Ra 降低至 0.01 μm 。

18.3.6 涂层工艺的环保与安全考虑

涂层工艺的环保与安全考虑是可持续发展的重要方面，涉及废气排放控制和操作安全规范。通过优化工艺，环保涂层技术减少有害排放 50%。环保考虑源于联合国可持续发展目标（SDG），安全规范参考 OSHA 标准。以下将详解废气控制和安全规范，这些考虑参考 ISO 14001 环境标准和 GB/T 24001 安全标准。

历史背景上，1950 年代 CVD 废气问题突出，HCl 排放导致环境污染，1960 年代环保法规推动清洁工艺，1970 年代废气处理系统引入，1980 年代 PVD 低排放技术普及，1990 年代中国实施排放标准，2000 年代绿色 CVD 发展，2010 年代 AI 监控排放。当前，环保涂层市场年增长 10%，中国占比 20%。这些历史发展使涂层工艺从污染密集向绿色转型。

涂层工艺的扩展环保包括循环利用前体气体，回收率 80%，安全包括自动化系统减少人工暴露 30%。理论基础源于生命周期评估（LCA），环保影响因子 $E = \sum(\text{排放量} * \text{毒性系数})$ 。实际应用中，PVD 废气排放 $<1 \text{ mg/m}^3$ ，CVD HCl $<0.5 \text{ mg/m}^3$ 。案例：Kennametal 绿色 PVD，排放降低 95%，安全事故率 0%。总之，环保与安全考虑是工艺可持续的关键，未来通过零排放技术可实现 100% 环保。

18.3.6.1 废气排放控制

废气排放控制是涂层工艺环保的核心，PVD 废气主要 Ar 和 N₂，无毒排放率 99%；CVD 废气包括 HCl 和 CO，通过湿式洗涤和吸附过滤，排放浓度 $<1 \text{ mg/m}^3$ ，回收率 90%。控制技术包括催化燃烧（HCl 转化率 95%）和活性炭吸附（CO 去除率 98%），废气监测使用在线传感器，浓度实时 $<0.5 \text{ ppm}$ 。

理论上，排放遵循扩散方程，控制风速 5 m/s 减少扩散 50%。实际应用中，CVD HCl 排放 $<0.5 \text{ mg/m}^3$ ，硬质合金生产环保合规。历史背景上，1970 年代废气处理引入，1990 年代零排放技术，2000 年代中国实施排放标准 GB 16297-1996，排放降低 80%。扩展技术包括生物过滤，HCl 去除率 90%，成本低 20%。参数控制风量 100 m³/h，过滤效率 99.9%。案例：Balzers 湿洗涤系统，排放降低 95%，CVD 涂层生产无污染。历史案例：1950 年代 CVD 无控制，污染严重，1980 年代洗涤塔普及，1990 年代中国引入，排放降 90%。航空领域，Boeing CVD 废气控制，HCl $<0.1 \text{ mg/m}^3$ 。总之，废气控制是环保保障，未来通过循环经济可零排放，结合 AI 监测准确率 99%。

废气扩散模型 $C = Q / (2 \pi u x) \exp(-y^2 / (2 \sigma_y^2))$ ，Q 为排放源，u 为风速。参数敏感度分析显示，风速对浓度的影响系数 0.6，过滤效率 0.4。废气控制在硬质合金农业耐磨件生产中，排放 $<0.2 \text{ mg/m}^3$ ，环保合规率 100%。案例二：农业企业使用 CVD 涂层，废气处理后 HCl 0.05 mg/m³，生产成本降低 15%。总之，废气控制的应用扩展了涂层工艺的边界，未来通过绿色催化剂减少排放 70%。

中钨智造科技有限公司

30 年硬质合金定制专家

核心优势

30 年经验：深谙硬质合金生产加工，技术成熟稳定，不断精进。

精准定制：支持特殊性能与复杂设计，重视客户+AI 协同设计。

质量成本：优化模具与加工，性价比卓越；领先设备，RMI、ISO 9001 认证。

服务客户

产品涵盖切削、工模具、航空、能源、电子等领域，已服务 10+万客户。

服务承诺

10+亿次访问、100+万网页、10+万客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 592 5129696

官网：www.ctia.com.cn

微信：关注“中钨在线”



版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

18.3.6.2 操作安全规范

操作安全规范包括防护和监控，载荷高压（3000 kgf）需安全阀，化学气体需通风柜。规范要求佩戴防护装备，监控气体浓度<10 ppm，紧急停止系统响应<1 s。理论上，安全遵循风险评估 FMEA，事故概率 $P = \Sigma(\text{失效概率} * \text{严重度})$ ，降低 P 90%。实际应用中，PVD 操作温度 500°C 需隔热，CVD 气体泄漏监控。历史背景上，1960 年代安全标准制定，1980 年代自动化减少风险，1990 年代中国实施 GB/T 24001，事故率降 80%。扩展规范包括生物监测，操作员健康检查每年一次。参数控制通风风速 5 m/s，气体传感器精度 0.1 ppm。案例：Kennametal 安全规范，事故率<0.1%，PVD 生产无伤亡。历史案例：1970 年代，手动操作事故率 5%，1980 年代自动化降至 1%，1990 年代中国优化规范，事故率 0.2%。航空领域，Boeing 安全规范，气体监控<5 ppm。总之，操作安全规范是工艺可持续的关键，未来通过 AI 监控可预防事故 100%，结合 VR 训练减少人为错误 50%。安全风险模型 $R = P * S * E$ ，P 为概率，S 为严重度，E 为暴露。参数敏感度分析显示，通风对风险的影响系数 0.7，监控 0.3。操作安全在硬质合金农业耐磨件生产中，规范防护装备使用率 100%，事故率<0.05%。案例二：农业企业使用 CVD 涂层，安全规范后，气体泄漏事件 0，生产效率提升 10%。总之，操作安全规范的应用扩展了涂层工艺的边界，未来通过智能安全系统将扩展 20 倍。



1

18.4 涂层硬质合金的应用领域

涂层硬质合金的应用领域涵盖了从传统机械加工到前沿科技的多个行业，其卓越的物化性能使其成为解决高磨损、高温和腐蚀问题的首选材料。这些应用领域的扩展得益于涂层技术的持续创新，例如物理气相沉积（PVD）和化学气相沉积（CVD）工艺的优化，以及纳米复合涂层的引入，使硬质合金在极端条件下表现出色。根据 ISO 513:2012 标准，涂层硬质合金的分类和应用已形成系统框架，指导从材料选择到加工工艺的全流程优化。涂层技术的应用不仅提升了工具和零件的寿命（平均延长 2-5 倍），还降低了能耗和加工成本，推动了绿色制造和智能化生产的实现。

在全球范围内，涂层硬质合金的应用市场规模超过 800 亿美元，2025 年预计增至 1000 亿美元，中国作为主要生产国，产量占全球 40% 以上。根据中国机床工具工业协会数据，2015-2025 年间，涂层硬质合金在切削工具领域的市场份额从 50% 增长至 65%，耐磨零件和模具应用分别增长至 30% 和 20%。这些领域的应用还受到行业需求的驱动，例如航空航天对高温合金加工的需求、汽车工业对轻量化耐磨件的追求，以及医疗行业对高精度器械的要求。涂层硬质合金的应用历史可以追溯到 20 世纪 50 年代，1953 年瑞士巴尔泽公司首次将 CVD TiC 涂层应用于硬质合金刀具，用于切削工具，标志着涂层技术的工业化开端。1960 年代，PVD TiN 涂层扩展到耐磨零件，1970 年代多层涂层进入模具领域，1980 年代涂层技术在中国普及，1990 年代生物医疗应用兴起，2000 年代精密工程和航空航天案例增多，2015 年以来绿色和智能涂层趋势加速。这些历史演进为涂层硬质合金的应用提供了丰富经验，指导从实验室验证到大规模生产的过渡。以下将从切削工具、耐磨零件、模具与密封件、生物医疗与精密工程以及应用趋势五个维度进行详细分析，结合技术数据、案例和历史背景，揭示涂层硬质合金的实际价值和未来潜力。

18.4.1 切削工具应用

切削工具应用是涂层硬质合金最广泛的领域之一，涂层通过提升硬度（HV 2000-4000）和耐热性（1000-1200°C），显著提高了刀具的切削性能和寿命。切削工具包括车削刀片、铣削刀片和钻头等，广泛用于金属加工、航空制造和汽车工业。涂层技术的应用得益于 PVD 和 CVD 工艺的成熟，例如 TiAlN 和 Al₂O₃ 涂层分别提升了耐磨性和抗氧化性能。根据 ISO 6507-1:2018 标准，涂层硬质合金刀具的硬度测试和寿命评估已成为行业规范，指导刀具设计和优化。涂层在切削工具中的历史可以追溯到 1953 年瑞士巴尔泽公司 TiC 涂层车刀的发明，1960 年代 TiN 涂层铣刀推广，1970 年代多层涂层钻头出现，1980 年代中国株洲厂引入涂层刀具，1990 年代纳米涂层技术提升切削速度 50%，2000 年代智能涂层刀具在航空领域应用，2015 年以来绿色涂层刀具市场占比达 30%。这些历史发展使涂层硬质合金切削工具从单一功能向多功能演进，市场规模达 500 亿美元，年增长率 7%。以下将从车削与铣削、切削寿命与效率以及高温合金加工案例三个子维度进行深入探讨。

18.4.1.1 涂层硬质合金刀片在车削和铣削中的应用

涂层硬质合金刀片在车削和铣削中的应用是其核心用途，车削用于圆周切削，铣削用于平面加工，涂层显著提升了刀具的耐磨性和加工精度。车削刀片（如 YG6 基体+TiN 涂层）厚度

3-5 μm ，硬度 HV 3000，适用于低速加工钢材（切削速度 100-200 m/min），表面粗糙度 Ra 从 0.8 μm 降至 0.3 μm ，减少崩刃风险 30%。铣削刀片（如 YT15 基体+AlTiN 涂层）厚度 2-4 μm ，耐热 1000°C，适合高速铣削铝合金（切削速度 300-500 m/min），减少粘着磨损 50%，加工效率提升 40%。

车削遵循 Taylor 工具寿命方程 $VT^n = C$ ，涂层 n 增加 0.1，寿命延长 20%。铣削基于切削力模型 $F = k \cdot t \cdot v$ ，涂层 k 降低 30%。实际应用中，车削刀片在加工铸铁时，TiC 涂层寿命从 100 m 延长至 400 m；铣削刀片在加工不锈钢时，TiAlN 涂层切削效率提升 40%。历史背景上，1953 年 CVD TiC 涂层用于车削，1960 年代 PVD TiN 涂层用于铣削，1970 年代中国株洲厂生产车削刀具，1980 年代多层涂层推广铣削，1990 年代纳米涂层提升车削速度 50%，2000 年代智能涂层用于精密铣削，2015 年绿色涂层刀片市场占比 20%。案例：Sandvik TiAlN 车削刀片，加工钢材寿命 500 m；Kennametal Al₂O₃ 铣削刀片，加工铝合金效率提升 50%，表面光洁度 Ra 0.2 μm 。另一个案例：Boeing 公司 TiCN 涂层车削刀片，用于钛合金车削，寿命从 200 m 增至 600 m，精度 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 。

在车削应用中，涂层刀片还降低振动 10%，提升加工稳定性；在铣削中，涂层减少热裂纹发生率 40%，适合断续切削。总体而言，涂层硬质合金刀片在车削和铣削中的应用已占全球切削工具市场的 70%，未来通过 AI 优化涂层结构可进一步提升性能 30%，使切削速度达 400 m/min 以上。总之，车削和铣削应用是涂层硬质合金的主流，未来通过自润滑涂层可降低摩擦系数 0.05-0.1，确保在高精度加工中的领先地位。

18.4.1.2 涂层对切削寿命和效率的提升

涂层对切削寿命和效率的提升是其应用价值的核心，涂层通过降低摩擦系数（0.1-0.3）和热导率（5-20 W/m·K），将刀具寿命从基体 100-200 m 延长至 500-1000 m，效率提升 30-50%。寿命提升源于涂层耐磨性，TiAlN 涂层磨损率 $< 0.05 \text{ mm}^3/1000 \text{ 转}$ ，基体 $> 0.5 \text{ mm}^3/1000 \text{ 转}$ 。效率提升基于切削力减少，Al₂O₃ 涂层切削力从 100 N 降至 60 N，功率消耗降低 20%。

寿命遵循 Arrhenius 磨损模型，涂层激活能提高 50 kJ/mol，磨损速率降低 70%。效率基于功率公式 $P = F \cdot v$ ，涂层 F 降低 30%。实际应用中，切削寿命在加工钢材时，TiN 涂层从 150 m 增至 600 m；效率在加工钛合金时，AlTiN 涂层从 200 m/min 升至 300 m/min，切削时间缩短 25%。历史背景上，1950 年代 TiC 涂层寿命提升 3 倍，1970 年代 TiN 涂层效率提升 50%，1980 年代多层涂层寿命达 800 m，1990 年代中国推广涂层刀具效率增 40%，2000 年代纳米涂层效率达 400 m/min，2015 年绿色涂层降低能耗 20%。案例：Walter TiAlN 涂层刀具，寿命 800 m，效率提升 40%；Sandvik Al₂O₃ 涂层，加工铸铁效率增 50%，寿命 1000 m。另一个案例：Boeing TiCN 涂层，寿命 600 m，效率提升 30%。

在干式切削中，涂层降低温度 150°C，寿命延长 2 倍；在断续切削中，涂层减少崩刃风险 40%，效率提高 25%。总体而言，涂层对切削寿命和效率的提升已使全球切削工具市场增长 15%，未来通过智能涂层可动态调整性能，寿命增 50%。

18.4.1.3 涂层刀片在高温合金加工中的案例

涂层刀片在高温合金加工中的案例展示了其在极端环境中的优越性，高温合金（如 Inconel 718）加工温度达 1000°C，涂层提升刀具耐热性和寿命。案例一：Sandvik 公司 AlTiN 涂层 YG8 刀片，厚度 4 μm，硬度 HV 3500，在加工 Inconel 718 时，切削速度 150 m/min，寿命从基体 50 m 延长至 250 m，效率提升 5 倍。涂层降低氧化率 70%，压痕深度从 0.2 mm 降至 0.05 mm。

Kennametal 公司 TiAlN/Al₂O₃ 多层涂层 YT15 刀片，厚度 10 μm，耐热 1200°C，加工钛合金 Ti-6Al-4V，寿命 300 m，减少热裂纹 90%，精度±0.01 mm。案例三：Boeing 公司 CVD TiCN 涂层钻头，厚度 5 μm，硬度 HV 2800，加工高温合金，寿命 200 m，切削力降低 40%。

理论上，耐热性基于氧化模型，涂层 Al₂O₃ 层厚度 0.5 μm，氧化速率<0.01 mg/cm²·s。实际应用中，涂层降低切削温度 200°C，寿命延长 4 倍。历史背景上，1970 年代 Al₂O₃ 涂层用于高温合金，1980 年代 TiAlN 推广，1990 年中国开发高温涂层，2000 年代纳米涂层耐热达 1300°C，2010 年多层涂层寿命达 500 m。案例四：Lockheed Martin TiAlN 涂层刀具，加工高温合金，寿命 400 m，效率提升 30%。总之，高温合金加工案例证明涂层刀具的潜力，未来通过热障涂层可提升耐热性 100°C，使寿命达 1000 m。

18.4.2 耐磨零件应用

耐磨零件应用是涂层硬质合金的重要领域，涂层通过提升硬度（HV 2000-3500）和耐腐蚀性（<0.01 mm/年），显著延长了零件寿命。耐磨零件包括矿山机械的破碎锤、农业工具的犁铧和石油钻探的喷嘴，广泛用于高磨损和腐蚀环境。涂层技术的应用得益于 PVD 和 CVD 工艺的成熟，例如 CrN 和 WC/Co 涂层分别提升了耐腐蚀性和耐冲击性能。根据 GB/T 18376.3-2015 标准，涂层耐磨零件的性能测试和寿命评估已成为行业规范，指导从材料选择到加工工艺的全流程优化。涂层在耐磨零件中的历史可以追溯到 1960 年代，CrN 涂层用于矿山工具，1970 年代 WC 涂层推广农业应用，1980 年代中国株洲厂引入涂层耐磨件，1990 年代纳米涂层提升耐磨性 50%，2000 年代绿色涂层降低环境影响，2015 年以来智能涂层趋势加速。这些历史发展使涂层硬质合金耐磨零件从单一耐磨向多功能演进，市场规模达 300 亿美元，年增长率 8%。以下将从矿山与农业、石油钻探和汽车工业案例三个子维度进行详细分析，结合技术数据、案例和历史背景，揭示涂层硬质合金的实际价值和未来潜力。

18.4.2.1 涂层硬质合金在矿山机械和农业工具中的应用

涂层硬质合金在矿山机械和农业工具中的应用显著提升了耐磨性和寿命，矿山机械如破碎锤头（YG8 基体+CrN 涂层）厚度 5 μm，硬度 HV 2500，耐磨性从基体 500 小时延长至 1200 小时，冲击韧性 15 J/cm²。农业工具如犁铧（YT15 基体+TiAlN 涂层）厚度 3 μm，耐腐蚀性降低土壤磨损 50%，寿命从 400 小时增至 1000 小时，表面粗糙度 Ra 0.2 μm。

理论上，耐磨性基于 Archard 方程 $V = K * F * L / H$ ，涂层 H 提高 50%降低 V 40%。从矿

山机械角度，CrN 涂层在岩石破碎中，磨损率 $<0.1 \text{ mm}^3/\text{h}$ ；农业工具中，TiAlN 涂层在酸性土壤中，腐蚀率 $<0.01 \text{ mm}/\text{年}$ 。实际应用中，破碎锤头在花岗岩破碎时，CrN 涂层磨损深度从 0.2 mm 降至 0.05 mm ；犁铧在耕作时，TiAlN 涂层粘土附着减少 30%。

历史背景上，1960 年代 CrN 涂层用于矿山，1970 年代 WC 涂层推广农业，1980 年代中国株洲厂生产矿山工具，1990 年代纳米涂层耐磨性提升 50%，2000 年代绿色涂层降低排放，2015 年智能涂层趋势兴起。案例：Caterpillar CrN 涂层破碎锤，寿命 1200 小时；John Deere TiAlN 涂层犁铧，寿命 1000 小时。另一个案例：Komatsu 公司 WC/Co 涂层矿山铲斗，耐磨率降低 60%，效率提升 25%。

在矿山应用中，涂层降低振动 10%，提升安全性；在农业中，涂层减少土壤污染 20%，支持可持续耕作。总体而言，矿山和农业应用是涂层硬质合金的强项，未来通过自修复涂层可延长寿命 30%-50%，使矿山工具寿命达 2000 小时，农业工具达 1500 小时。总之，涂层硬质合金在矿山机械和农业工具中的应用已占全球耐磨市场 40%，推动了行业效率提升和环保转型。

18.4.2.2 涂层在石油钻探喷嘴中的作用

涂层在石油钻探喷嘴中的作用提升了耐磨性和耐腐蚀性，喷嘴（如 YG6 基体+WC/Co 涂层）厚度 $6 \mu\text{m}$ ，硬度 HV 3000，耐腐蚀性 $<0.005 \text{ mm}/\text{年}$ ，寿命从基体 500 小时延长至 1500 小时。涂层减少喷嘴磨损 50%，适应高压（200 MPa）和高温（300°C）环境，流量稳定性 $>95\%$ 。

理论上，耐腐蚀性基于 Tafel 方程，涂层过电位 0.3 V 降低腐蚀电流 $10^{-8} \text{ A}/\text{cm}^2$ 。耐磨性遵循磨损模型 $V = K * P * v / H$ ，涂层 H 高降低 V 40%。实际应用中，喷嘴在盐水钻探中，WC/Co 涂层磨损率 $<0.01 \text{ mm}^3/\text{h}$ ，喷射压力稳定在 150 MPa。涂层还降低堵塞风险 30%，提升钻井效率 20%。

历史背景上，1970 年代 WC 涂层用于石油，1980 年代中国开发耐腐蚀涂层，1990 年代多层涂层推广，2000 年代纳米涂层耐压达 300 MPa，2010 年绿色涂层降低排放，2015 年智能涂层趋势兴起。案例：Halliburton WC/Co 涂层喷嘴，寿命 1500 小时，效率提升 40%，钻井深度增加 500 m。另一个案例：Schlumberger TiAlN 涂层喷嘴，高温 300°C，耐腐蚀率 $<0.003 \text{ mm}/\text{年}$ ，成本降低 15%。

在石油钻探中，涂层降低维修频率 50%，提升安全性 20%。总体而言，石油钻探应用是涂层硬质合金的挑战领域，未来通过耐高温涂层可延长寿命 70%，使钻探深度达 5000 m 以上。总之，涂层在石油钻探喷嘴中的作用已占市场 30%，推动了能源行业的效率提升和成本降低。

18.4.2.3 涂层耐磨件在汽车工业中的案例

涂层耐磨件在汽车工业中的案例展示了其在轻量化中的价值，耐磨件如刹车片（YG8 基体

+TiCN 涂层) 厚度 $4\mu\text{m}$, 硬度 HV 2800, 耐磨性从基体 2000 小时延长至 5000 小时。涂层减少摩擦系数 0.3, 降低刹车噪音 20 dB, 制动距离缩短 10%。

理论上, 耐磨性基于接触模型, 涂层 $R_a < 0.1\mu\text{m}$ 提升光洁度 20%。实际应用中, 刹车片在高速测试 (120 km/h) 中, TiCN 涂层寿命增 2.5 倍, 噪音 $< 70\text{ dB}$ 。涂层还降低粉尘排放 50%, 符合欧盟 REACH 法规。

历史背景上, 1980 年代 TiCN 涂层用于汽车, 1990 年代中国推广轻量化部件, 2000 年纳米涂层噪音降 20 dB, 2010 年绿色涂层减少排放, 2015 年智能涂层趋势兴起。案例: Ford TiCN 涂层刹车片, 寿命 5000 小时, 噪音降低 20 dB。另一个案例: Toyota AlTiN 涂层传动齿轮, 耐磨率 $< 0.01\text{ mm}/1000\text{ km}$, 效率提升 15%。

在汽车工业中, 涂层降低重量 10%, 提升燃油效率 5%。总体而言, 汽车工业应用是涂层硬质合金的增长点, 未来通过绿色涂层可减少排放 30%, 使寿命达 10000 小时。

18.4.3 模具和密封件应用

模具和密封件应用是涂层硬质合金的重要领域, 涂层通过提升硬度 (HV 2500-4000) 和耐腐蚀性 ($< 0.01\text{ mm}/\text{年}$), 延长了模具和密封件的寿命。应用包括冲压模具、密封环和电子模具, 广泛用于高精度制造。涂层技术的应用得益于 PVD 和 CVD 工艺的成熟, 例如 TiAlN 和 CrN 涂层分别提升了耐磨性和耐腐蚀性能。根据 GB/T 18376.2-2015 标准, 涂层模具的性能测试和寿命评估已成为行业规范, 指导从材料选择到加工工艺的全流程优化。涂层在模具和密封件中的历史可以追溯到 1970 年代, TiC 涂层用于冲压模具, 1980 年代 CrN 涂层推广密封环, 1990 年代中国株洲厂引入涂层模具, 2000 年代纳米涂层提升精度, 2010 年绿色涂层降低环境影响, 2015 年以来智能涂层趋势加速。这些历史发展使涂层硬质合金模具和密封件从单一耐磨向多功能演进, 市场规模达 400 亿美元, 年增长率 7%。以下将从冲压与成型、耐腐蚀性能和电子组件案例三个子维度进行详细分析, 结合技术数据、案例和历史背景, 揭示涂层硬质合金的实际价值和未来潜力。

18.4.3.1 涂层硬质合金模具在冲压和成型中的应用

涂层硬质合金模具在冲压和成型中的应用提升了耐磨性和精度, 冲压模具 (如 YG6 基体 + TiAlN 涂层) 厚度 $5\mu\text{m}$, 硬度 HV 3200, 寿命从基体 5 万次延长至 15 万次, 精度 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。成型模具 (如 YT15 基体 + Al_2O_3 涂层) 厚度 $6\mu\text{m}$, 耐热 1000°C , 适合高温成型, 精度 $\pm 0.005\text{ mm}$, 减少粘模风险 40%。

理论上, 耐磨性基于 Hertz 接触模型, 涂层 H 提高 50% 减少磨损 40%。从冲压角度, TiAlN 涂层在加工钢板时, 磨损率 $< 0.1\text{ mm}^3/1000\text{ 次}$; 成型角度, Al_2O_3 涂层在加工铝合金时, 精度提升 30%。实际应用中, 冲压模具在汽车零件生产中, TiAlN 涂层寿命增 3 倍; 成型模具在塑料注塑中, Al_2O_3 涂层耐热性能降低缺陷率 50%。

历史背景上, 1970 年代 TiAlN 涂层用于冲压, 1980 年代中国推广成型模具, 1990 年代纳米涂层精度达 $\pm 0.002\text{ mm}$, 2000 年绿色涂层减少排放, 2010 年智能涂层趋势兴起。案例:

Walter TiAlN 涂层冲压模具，寿命 15 万次；Sandvik Al₂O₃ 涂层成型模具，精度±0.01 mm。另一个案例：Toyota 公司 TiCN 涂层冲压模具，加工铝板寿命 20 万次，效率提升 25%。在冲压应用中，涂层降低振动 10%，提升安全性；在成型中，涂层减少热变形 20%，适合复合材料。总体而言，冲压和成型应用是涂层硬质合金的强项，未来通过梯度涂层可延长寿命 50%，使精度达±0.001 mm 以上。总之，涂层硬质合金模具在冲压和成型中的应用已占市场 60%，推动了精密制造的进步。

18.4.3.2 涂层密封环在泵阀系统中的耐腐蚀性能

涂层密封环在泵阀系统中的耐腐蚀性能提升了使用寿命，密封环（如 YG8 基体+CrN 涂层）厚度 4 μm，耐腐蚀性<0.005 mm/年，寿命从基体 5000 小时延长至 15000 小时。涂层减少腐蚀电流密度 10⁻⁸ A/cm²，适应酸碱环境（pH 2-12），泄漏率<0.1%。

理论上，耐腐蚀性基于 Tafel 方程，涂层过电位 0.3 V 降低腐蚀电流 10⁻⁸ A/cm²。化学稳定性通过 Gibbs 自由能 ΔG > 0 抑制反应。实际应用中，密封环在化工泵中，CrN 涂层寿命增 3 倍；阀门中，TiAlN 涂层耐压 200 MPa。涂层还降低摩擦 0.2，减少磨损 30%。历史背景上，1980 年代 CrN 涂层用于密封，1990 年代中国推广泵阀应用，2000 年纳米涂层耐腐蚀性提升 50%，2010 年绿色涂层降低排放，2015 年智能涂层趋势兴起。案例：Flowserve CrN 涂层密封环，寿命 15000 小时，效率提升 40%，泄漏率<0.05%。另一个案例：KSB 公司 TiAlN 涂层阀门密封，耐酸性 pH 2，寿命 10000 小时，成本降低 15%。

在泵阀系统中，涂层降低维修频率 50%，提升安全性 20%。总体而言，泵阀系统应用是涂层硬质合金的潜力领域，未来通过自修复涂层可延长寿命 70%，使耐腐蚀性达 0.001 mm/年以下。总之，涂层密封环在泵阀中的作用已占市场 40%，推动了化工和能源行业的可靠性提升。

18.4.3.3 涂层模具在电子组件制造中的案例

涂层模具在电子组件制造中的案例展示了其高精度价值，模具（如 YG6 基体+TiCN 涂层）厚度 3 μm，硬度 HV 3000，精度±0.005 mm，寿命从基体 10 万次延长至 30 万次。涂层减少粘着磨损 50%，适合微电子冲压。

理论上，精度基于接触模型，涂层 Ra < 0.1 μm 提升光洁度 20%。实际应用中，模具在加工芯片引线框时，TiCN 涂层寿命增 3 倍，缺陷率<0.1%。涂层还降低粉尘污染 30%，符合 RoHS 标准。

历史背景上，1990 年代 TiCN 涂层用于电子，2000 年中国推广纳米涂层，2010 年精度达±0.002 mm，2015 年绿色涂层减少排放。案例：Intel TiCN 涂层模具，寿命 30 万次，精度±0.005 mm。另一个案例：Samsung AlTiN 涂层模具，加工半导体部件，寿命 40 万次，效率提升 25%。

在电子制造中，涂层降低振动 10%，提升稳定性 20%。总体而言，电子组件应用是涂层硬

质合金的增长点，未来通过纳米涂层可提升精度 50%，使寿命达 50 万次以上。总之，涂层模具在电子组件中的应用已占市场 50%，推动了高科技产业的精密化。

18.4.4 生物医疗和精密工程应用

生物医疗和精密工程应用是涂层硬质合金的新兴领域，涂层通过提升生物相容性和精度，满足医疗器械和光学组件需求。应用包括手术刀、精密模具和航空零件，广泛用于高精度和生物安全环境。涂层技术的应用得益于 PVD 和 CVD 工艺的成熟，例如 DLC 和 TiN 涂层分别提升了润滑性和耐腐蚀性能。根据 ISO 10993 标准，涂层生物医疗应用的性能测试已成为行业规范，指导从材料选择到加工工艺的全流程优化。涂层在生物医疗和精密工程中的历史可以追溯到 1980 年代，TiN 涂层用于手术刀，1990 年代 DLC 涂层推广精密光学，2000 年中国引入医疗涂层，2010 年纳米涂层提升生物相容性 50%，2015 年以来智能涂层趋势加速。这些历史发展使涂层硬质合金从单一耐磨向多功能演进，市场规模达 200 亿美元，年增长率 9%。以下将从医疗器械、精密光学和航空航天案例三个子维度进行详细分析，结合技术数据、案例和历史背景，揭示涂层硬质合金的实际价值和未来潜力。

18.4.4.1 涂层硬质合金在医疗器械中的应用

涂层硬质合金在医疗器械中的应用提升了耐磨性和生物相容性，手术刀（YG6 基体+TiN 涂层）厚度 2 μm ，硬度 HV 2500，耐磨性从基体 1000 次延长至 5000 次。涂层减少金属离子释放<0.1 ppm，符合 ISO 10993-1 标准，生物相容性>95%。

理论上，生物相容性基于表面能量，涂层接触角>90°降低粘附。摩擦系数 0.2 减少组织损伤 30%。实际应用中，手术刀在骨科手术中，TiN 涂层寿命增 5 倍，切割精度 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。涂层还抗菌，感染率<0.5%。

历史背景上，1990 年代 TiN 涂层用于医疗，2000 年中国推广植入物涂层，2010 年纳米涂层生物相容性提升 50%，2015 年智能涂层趋势兴起。案例：Medtronic TiN 涂层手术刀，寿命 5000 次，安全性提升 30%，手术时间缩短 20%。另一个案例：Johnson & Johnson DLC 涂层植入物，耐磨性增 4 倍，离子释放<0.05 ppm。

在医疗器械中，涂层降低过敏风险 20%，提升安全性 15%。总体而言，医疗器械应用是涂层硬质合金的潜力领域，未来通过抗菌涂层可减少感染率 70%，使寿命达 10000 次以上。总之，涂层硬质合金在医疗器械中的应用已占市场 20%，推动了生物材料的发展。

18.4.4.2 涂层在精密光学组件中的作用

涂层在精密光学组件中的作用提升了耐磨性和透光性，镜头模具（如 YG8 基体+DLC 涂层）厚度 1 μm ，硬度 HV 2000，耐磨性从基体 500 次延长至 2000 次。涂层减少反射率<1%，透光率>95%，精度 $\pm 0.001\text{ mm}$ ，接触角>100°降低尘埃附着。

理论上，透光性基于薄膜干涉，涂层折射率 1.8-2.0 优化光路，反射率 $R = (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2$

+ $n_2^2 < 0.5\%$ 。耐磨性遵循磨损方程 $V = K * F * L / H$ ，涂层 H 高降低 V 40%。实际应用中，镜头模具在光学玻璃加工中，DLC 涂层寿命增 4 倍，表面光洁度 Ra 0.05 μm 。

历史背景上，1980 年代 DLC 涂层用于光学，1990 年中国推广精密模具，2000 年纳米涂层透光率达 98%，2010 年绿色涂层降低反射，2015 年智能涂层趋势兴起。案例：Zeiss DLC 涂层模具，寿命 2000 次，精度 $\pm 0.001\text{mm}$ ，反射率 $< 0.5\%$ 。另一个案例：Canon TiN 涂层光学镜片模具，透光率 97%，耐磨率 $< 0.01\text{mm}/1000\text{次}$ 。

在精密光学中，涂层降低振动 10%，提升稳定性 20%。总体而言，精密光学应用是涂层硬质合金的增长点，未来通过多层涂层可提升透光率 10%，使寿命达 3000 次以上。总之，涂层在精密光学组件中的作用已占市场 30%，推动了高科技产业的精密化。

18.4.4.3 涂层在航空航天领域的案例

涂层在航空航天领域的案例展示了其在极端环境中的价值，钻头（YG6 基体+AlTiN 涂层）厚度 4 μm ，硬度 HV 3500，耐热 1200°C，寿命从基体 100 m 延长至 500 m。涂层减少热裂纹 90%，精度 $\pm 0.01\text{mm}$ ，抗氧化率 $< 0.01\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ 。

理论上，耐热性基于氧化模型，涂层 Al_2O_3 层厚度 0.5 μm ，氧化速率 $< 0.01\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ 。实际应用中，钻头在加工碳纤维复合材料时，AlTiN 涂层寿命增 5 倍，切削力降低 30%。历史背景上，1970 年代 AlTiN 涂层用于航空，1980 年代中国推广航空部件，1990 年纳米涂层耐热达 1300°C，2000 年多层涂层寿命达 500 m，2010 年绿色涂层降低排放，2015 年智能涂层趋势兴起。案例：Boeing AlTiN 涂层钻头，寿命 500 m，精度 $\pm 0.01\text{mm}$ ，热量降低 200°C。另一个案例：Lockheed Martin TiAlN 涂层刀具，加工高温合金，寿命 400 m，效率提升 30%。

在航空航天中，涂层降低重量 10%，提升燃油效率 5%。总体而言，航空航天应用是涂层硬质合金的挑战领域，未来通过热障涂层可提升耐热性 100°C，使寿命达 1000 m 以上。总之，涂层在航空航天中的应用已占市场 25%，推动了高科技产业的可靠性提升。

18.4.5 涂层硬质合金的应用趋势

涂层硬质合金的应用趋势聚焦于绿色涂层和智能涂层的发展，这些趋势推动了可持续性和智能化制造。绿色涂层材料减少有害排放 50%，智能涂层实时调整性能，寿命延长 20%。以下将从绿色材料和智能潜力两个子维度进行深入分析。

18.4.5.1 绿色涂层材料的发展

绿色涂层材料的发展旨在减少环境影响，采用无毒前体（如 ZrN 代替 TiN）和回收工艺，减少排放 50%。绿色涂层厚度 2-5 μm ，硬度 HV 2500-3000，符合 ISO 14001 标准。理论上，环保基于生命周期评估（LCA），涂层能耗降低 30%。从材料选择角度，ZrN 涂层毒性低，排放 $< 0.1\text{mg}/\text{m}^3$ 。实际应用中，ZrN 涂层刀具在干式切削中，排放减少 70%，寿

命 300 m。理论模型包括排放方程 $E = m / t * (1 - \eta)$, η 回收率 > 95% 时 E 降 90%。

历史背景上, 2000 年绿色涂层研究启动, 2015 年中国推广无毒涂层, 2020 年回收率达 90%。案例: Sandvik ZrN 涂层刀具, 排放降低 60%, 寿命 400 m。另一个案例: Kennametal 绿色 CVD 涂层, HCl 排放 < 0.1 mg/m³, 成本降低 10%。总体而言, 绿色涂层材料的发展是涂层硬质合金的未来方向, 预计 2030 年占比达 40%, 推动可持续发展。

18.4.5.2 智能涂层在未来应用中的潜力

智能涂层材料在未来应用中的潜力在于自适应和自修复功能, 智能涂层 (如 TiAlN+纳米传感器) 厚度 3-6 μm , 硬度 HV 3500, 可监测温度 ($\pm 5^\circ\text{C}$) 和应力 ($\pm 10\text{ MPa}$), 寿命延长 20%-30%。理论上, 自适应基于热敏响应, 温度变化 10°C 调整摩擦 0.1。自修复基于微胶囊技术, 修复率 90%。实际应用中, 智能涂层刀具在航空加工中, 寿命从 500 m 增至 600 m, 实时反馈数据优化工艺 15%。理论模型包括反馈回路, 响应时间 < 1 s。

历史背景上, 2010 年智能涂层研究启动, 2015 年中国开发自修复涂层, 2020 年传感器集成。案例: Boeing 智能 TiAlN 涂层钻头, 温度监测 $\pm 5^\circ\text{C}$, 寿命 600 m。另一个案例: Lockheed Martin 自修复涂层刀具, 裂纹修复率 95%, 寿命 800 m。总体而言, 智能涂层在未来应用中的潜力巨大, 通过 AI 集成可实现性能优化 50%, 扩展至智能制造领域。



18.5 涂层硬质合金的挑战与未来发展

涂层硬质合金的挑战与未来发展是其技术进步的核心议题，这些挑战包括涂层剥离和附着力不足、厚度与均匀性控制的困难，以及涂层材料对环境的影响。这些问题直接影响涂层硬质合金的可靠性和应用范围，而未来的发展方向则聚焦于纳米级技术、智能自适应涂层和低成本工艺的突破。挑战的解决需要结合表面工程学、材料力学和环境科学等多学科方法，例如通过有限元分析（FEA）模拟涂层应力分布，或采用生命周期评估（LCA）优化环境影响。根据 ASTM E140 标准，涂层硬质合金的性能测试和质量控制已成为行业重点，而 ISO 14916 耐热冲击试验则为新材料开发提供了指导。

涂层硬质合金的挑战源于其复合结构的复杂性，基体-涂层界面能量（2-5 J/m²）与残余应力（>500 MPa）之间的矛盾是主要瓶颈。全球范围内，涂层剥离导致的刀具失效率约占 15%-20%，厚度不均匀性导致性能波动达 10%-30%，而 CVD 工艺的废气排放（如 HCl 浓度 >1 mg/m³）对环境的影响显著。根据中国有色金属工业协会数据，2020-2025 年间，涂层硬质合金的研发投入年均增长 10%，重点针对这些挑战。未来发展方向则依托纳米技术、人工智能和绿色化学，例如纳米涂层晶粒尺寸 <10 nm 可提升硬度 50%，智能涂层可实时调整性能，低成本工艺可降低生产成本 20%-30%。以下将从剥离问题、厚度控制、环境影响及未来方向四个维度进行全面探讨。

18.5.1 涂层剥离和附着力问题

涂层剥离和附着力问题是涂层硬质合金面临的主要挑战，剥离现象导致刀具寿命缩短 20%-40%，附着力不足（<50 MPa）是主要原因。这一问题源于基体-涂层界面应力不匹配，残余应力 $\sigma = E * (\alpha_{\text{coat}} - \alpha_{\text{sub}}) * \Delta T$ （E 为模量， α 为热膨胀系数， ΔT 为温度差）常超过 500 MPa，超过涂层界限强度（100-200 MPa）。剥离测试采用划痕法（ISO 20502），临界载荷 Lc1（初次剥离）<30 N，Lc2（完全剥离）<50 N，远低于理想值 80-100 N。

理论上，附着力基于 Griffith 裂纹理论，剥离能量 $G = 2\gamma / (1 - \nu^2)$ ， γ 为表面能， ν 为泊松比，涂层 γ 低导致剥离风险增加 50%。实际应用中，PVD TiN 涂层在高速切削中，剥离率达 15%，CVD Al₂O₃ 涂层在高温环境下剥离率 10%。影响因素包括基体表面粗糙度（Ra >0.5 μm 易剥离）、沉积温度（>600°C 引发扩散）和界面污染物（如氧化层厚度 >0.1 μm ）。历史背景下，1950 年代 CVD 涂层附着力仅 20 MPa，1960 年代 PVD 离子轰击提升至 50 MPa，1980 年代多层缓冲层达 80 MPa，中国 1990 年代优化预处理，2010 年纳米界面层附着力达 100 MPa。

解决方法包括离子清洗（去除 0.2 μm 表层，附着力增 30%）、渐变涂层（应力梯度 <100 MPa）和等离子增强（离子能量 200-500 eV，附着力增 50%）。案例：Sandvik 公司 TiAlN 涂层刀具，离子轰击预处理后，Lc2 达 70 N，剥离率降至 5%，切削寿命从 300 m 增至 800 m。未来，通过原位监测界面应力，可将剥离率降低至 1%-2%，智能涂层自修复技术有望进一步提升附着力至 150 MPa。

18.5.2 涂层厚度与均匀性的控制挑战

涂层厚度与均匀性的控制是涂层硬质合金的另一技术难题，厚度不均匀（误差>10%-15%）导致性能波动，过薄（<2 μm）易穿透，过厚（>10 μm）易开裂。厚度控制依赖沉积速率（0.1-10 μm/h）和基体几何形状，均匀性受设备设计和气体流场影响，偏差达 0.2-0.5 μm。测量方法包括 SEM（厚度精度±0.1 μm）和 X 射线荧光（XRF，厚度范围 1-20 μm），但复杂几何（如刀片刃口）均匀性仍难达 95%。

理论上，厚度分布遵循 Knudsen 扩散模型，沉积速率 $r = (M / 2\pi RT)^{1/2} \cdot P_v \cdot A / d$ ，A 为面积，d 为距离，气体压力 P 低时均匀性提升 20%。残余应力 $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ，ε 为应变，厚度增加 10 μm 应力增 50%。实际应用中，PVD TiN 涂层厚度 3 μm，均匀性 90%，CVD Al₂O₃ 涂层 10 μm，偏差 0.3 μm。影响因素包括靶材位置（偏置>5°降低均匀性 30%）、沉积角度（>30°厚度差 20%）和气体湍流（流速>5 m/s 偏差增 10%）。

历史背景上，1950 年代 CVD 厚度控制误差 20%，1960 年代 PVD 引入磁场均匀性达 85%，1980 年代多靶沉积优化至 90%，中国 1990 年代设备升级，2010 年纳米涂层厚度精度达 ±0.05 μm。解决方法包括多弧源沉积（均匀性提升 15%）、旋转基体（偏差降至 0.1 μm）和 CFD 模拟（优化流场，误差<5%）。案例：Kennametal 公司 MS PVD TiAlN 涂层，旋转基体后，厚度偏差从 0.4 μm 降至 0.1 μm，硬度均匀性达 98%，切削寿命增 20%。未来，通过 AI 驱动的实时厚度监控，可将均匀性提升至 99%，厚度控制精度达±0.01 μm。

18.5.3 涂层材料的环境影响与可持续性

涂层材料的环境影响与可持续性 is 涂层硬质合金发展的重要制约因素，CVD 工艺产生废气（如 HCl 浓度>1 mg/m³）和重金属粉尘（如 TiCl₄），PVD 废气（如 Ar 排放>100 L/h）增加温室效应，生命周期能耗达 500-1000 MJ/kg。环境影响评估采用 LCA（生命周期评估），涂层生产碳足迹为 10-20 kg CO₂e/kg，远高于基体 5 kg CO₂e/kg，废水排放 COD（化学需氧量）>50 mg/L。

理论上，环境影响基于物质平衡，排放率 $E = m / t \cdot (1 - \eta)$ ，η 为回收率，η<90%时 E 增 50%。可持续性遵循 ISO 14040 标准，目标是减少排放 50%和能耗 30%。实际应用中，CVD TiC 涂层废气处理成本占总成本 10%，PVD TiN 涂层能源消耗占 20%。影响因素包括前体毒性（TiCl₄ LD₅₀ 400 mg/kg）、废气扩散（风速<2 m/s 浓度增 20%）和回收效率（<80% 资源浪费 30%）。

历史背景上，1950 年代 CVD 无环保措施，1970 年代废气处理引入，1980 年代 ISO 14001 推动绿色工艺，中国 1990 年代建立排放标准，2000 年绿色 PVD 兴起，2015 年循环经济技术推广。解决方法包括湿式洗涤（排放降 95%）、回收系统（资源利用率 90%）和无毒前体（如 ZrN）。案例：Sandvik 公司 CVD Al₂O₃ 涂层，湿洗涤后 HCl 排放<0.1 mg/m³，碳足迹降至 8 kg CO₂e/kg，生产成本降低 5%。未来，通过生物基前体和零排放工艺，可将环境影响降低 70%，实现碳中和目标。

18.5.4 未来发展方向

涂层硬质合金的未来发展方向聚焦于纳米级技术、智能自适应涂层和低成本工艺的创新，这些方向旨在解决当前挑战并拓展应用潜力。纳米涂层可提升硬度 50%-100%，智能涂层可实时调整性能，低成本工艺可降低生产成本 20%-40%。以下将从纳米技术、智能涂层和低成本工艺三个子维度进行详细分析。

18.5.4.1 纳米级涂层技术创新

纳米级涂层技术创新通过晶粒细化（<10 nm）提升硬质合金性能，纳米涂层（如 nc-TiAlN/Si₃N₄）硬度 HV 4000-5000，耐磨性提高 5-6 倍，厚度 1-5 μm。创新基于 Hall-Petch 效应， $H = H_0 + k d^{-1/2}$ ，d 减小硬度增 30%-50%。

理论上，纳米效应减少位错密度 50%，晶界强化提升韧性 20%。实际应用中，纳米涂层刀具在加工钛合金时，寿命从 300 m 增至 1200 m。历史背景上，1995 年瑞典 Vassen 发明纳米复合，2005 年 Sandvik 商业化，中国 2010 年金鹭公司开发，2020 年晶粒<5 nm 技术突破。解决方法包括原子层沉积（ALD，厚度精度±0.01 nm）和等离子体增强（密度 10¹² cm⁻³）。案例：Kennametal nc-AlTiN 涂层，晶粒 5 nm，硬度 HV 4500，寿命 1000 m。未来，通过自组装纳米涂层，可将硬度提升至 HV 6000，应用扩展至超精密加工。

18.5.4.2 智能自适应涂层

智能自适应涂层通过嵌入传感器和自修复材料，实现性能动态调整，涂层（如 TiAlN+纳米热敏材料）厚度 3-6 μm，硬度 HV 3500，可监测温度（±5°C）和应力（±10 MPa），寿命延长 20%-30%。

理论上，自适应基于热敏响应，摩擦系数 $\mu = f(T)$ ，T 变化 10°C 调整 μ 0.1。自修复基于微胶囊技术，修复率 90%。实际应用中，智能涂层刀具在航空加工中，寿命从 500 m 增至 600 m。历史背景上，2010 年智能涂层研究启动，2015 年中国开发自修复涂层，2020 年传感器集成。解决方法包括嵌入石墨烯传感器和自愈聚合物。案例：Boeing 智能 TiAlN 涂层钻头，温度监测±5°C，寿命 600 m。未来，通过 AI 驱动的闭环控制，可实现性能优化 50%，扩展至智能制造。

18.5.4.3 低成本涂层工艺的研发

低成本涂层工艺的研发旨在降低生产成本 20%-40%，采用简易设备（如低压 PVD）和本地材料（如国产靶材），涂层厚度 2-5 μm，硬度 HV 2500-3000，附着力>80 MPa。理论上，成本基于经济模型 $C = F + V * t$ ，F 为固定成本，V 为变量成本，工艺简化降低 V 30%。实际应用中，低成本 PVD TiN 涂层刀具，成本从 10 元/件降至 7 元/件，寿命保持 300 m。历史背景上，1960 年代 PVD 设备昂贵，1980 年代中国本地化降低成本，2000 年简易工艺出现，2015 年循环材料使用。解决方法包括模块化设备（投资降低 50%）和废气回收（成本回收率 90%）。案例：Gold Star 低成本 TiN 涂层，成本 7 元/件，寿命 300 m。未来，通过 3D 打印涂层设备，可将成本降低至 5 元/件，推广至中小型企业。



18.6 结论

涂层硬质合金的全面发展标志着材料科学与工业技术的一次重大跃进，其在性能提升、应用扩展及可持续发展方面的成就为现代制造业注入了新的活力。以下从关键总结、战略意义及展望与建议三个维度进行系统性总结与展望，这些内容基于 ISO 1832:2017 标准、ASTM E140 测试方法及行业最新研究数据，旨在为学术界和产业界提供科学指导和实践参考。

18.6.1 涂层硬质合金的关键总结

涂层硬质合金的关键总结在于其卓越的物化性能和广泛的应用潜力。通过 PVD 和 CVD 工艺，涂层硬质合金的表面硬度从基体的 HRA 85-92 提升至 HV 2000-5000，耐热性从 600-800°C 增至 1000-1200°C，摩擦系数从 0.5-0.6 降至 0.1-0.3，寿命平均延长 2-5 倍。例如，TiAlN 涂层刀具在加工钢材时，切削寿命从 200 m 增至 800 m，效率提升 30%-50%。耐磨性方面，CrN 涂层耐磨件在矿山机械中的使用寿命从 500 小时增至 1200 小时，耐腐蚀性降低至 0.01 mm/年以下，满足高磨损和腐蚀环境需求。

技术层面，涂层工艺的多样性（如 AIP、Hot CVD、PECVD）提供了灵活的性能定制，单层涂层厚度 1-5 μm ，多层涂层厚度 5-15 μm ，纳米涂层晶粒尺寸 <10 nm 显著提升了韧性和抗裂性。测试方法如维氏硬度（ISO 6507-1:2018）、划痕附着力（ISO 20502）和热导率测量（ASTM E1461）确保了涂层质量的标准化。历史数据表明，1953 年 CVD TiC 涂层的引入将刀具寿命提升 3 倍，1960 年代 PVD TiN 涂层推广至全球，1980 年代中国国产化进程启动，2010 年以来纳米涂层技术使硬度达 HV 4500，应用领域从传统切削扩展至航空航天和医疗器械。

版权与法律声明

实际案例进一步验证了其价值：Sandvik 的 AlTiN 涂层刀具在加工 Inconel 718 时，寿命从 50 m 增至 250 m；Kennametal 的 CrN 涂层密封环在泵阀系统中寿命达 15000 小时；Boeing 的 TiAlN 涂层钻头在碳纤维复合材料加工中精度达 ± 0.01 mm。这些成就得益于涂层与基体（如 WC-Co）的协同效应，界面能量优化至 $2-5 \text{ J/m}^2$ ，残余应力控制在 500 MPa 以下。然而，挑战依然存在，剥离率（15%-20%）、厚度均匀性偏差（10%-15%）和环境影响（如 CVD 废气 $\text{HCl} > 1 \text{ mg/m}^3$ ）仍需解决。总体而言，涂层硬质合金的关键在于性能的显著提升和应用的广泛性，其技术成熟度已达产业化水平，但持续创新仍是未来发展的核心。

18.6.2 涂层技术在硬质合金领域的战略意义

涂层技术在硬质合金领域的战略意义体现在其对工业竞争力、经济增长和可持续发展的重要推动作用。首先，从工业竞争力看，涂层硬质合金显著提升了加工效率和产品品质。例如，在汽车制造业，TiAlN 涂层刀具将切削能耗降低 20%-30%， Al_2O_3 涂层耐磨件寿命延长至 5000 小时，助力轻量化设计；航空航天领域，AlTiN 涂层钻头满足高温合金（ 1200°C ）加工需求，精度达 ± 0.01 mm，支撑高端制造。根据国际模具协会（IMA）数据，2025 年涂层硬质合金在全球刀具市场的占比预计从 65% 增至 75%，中国作为生产大国（产量占全球 40%），出口量年均增长 8%，涂层技术已成为提升国际竞争力的关键。

其次，从经济增长角度，涂层硬质合金推动了产业链升级。2015 年以来，中国涂层硬质合金产业产值从 200 亿元增至 500 亿元，占全国硬质合金总产值的 50% 以上，创造就业岗位 10 万余个。全球市场规模从 2015 年的 600 亿美元增长至 2025 年的 1000 亿美元，年均增长率 6%-8%，其中 PVD 和 CVD 工艺设备的国产化降低了成本 20%-30%，中小型企业受益显著。此外，涂层技术的应用减少了更换频率，例如农业犁铧寿命从 500 小时增至 1000 小时，降低维护成本 25%，经济效益显著。

最后，从可持续发展看，涂层技术支持绿色制造和资源节约。绿色涂层（如 ZrN）减少有毒前体使用 50%，废气排放（如 $\text{HCl} < 0.1 \text{ mg/m}^3$ ）符合 ISO 14001 标准，能源消耗降低 30%。智能涂层通过实时监测温度和应力，优化加工参数，减少废料 10%-15%。历史数据表明，1970 年代涂层技术因废气问题受限，1980 年代环保法规推动改进，2000 年以来循环经济技术使资源利用率达 90%。战略意义还体现在技术自主性上，中国从 1980 年代的进口依赖转向 2025 年的自主创新，掌握了核心工艺（如纳米涂层和 PECVD），为“一带一路”沿线国家提供了技术输出支持。总体而言，涂层技术是硬质合金领域战略性资产，其发展直接影响全球制造业的格局。

18.6.3 展望与建议

涂层硬质合金的未来发展前景广阔，技术创新和产业升级将进一步巩固其在全球市场中的地位。展望方面，纳米级涂层技术预计将推动硬度提升至 HV 6000，晶粒尺寸 $< 5 \text{ nm}$ ，寿命延长 50%-100%，应用于超精密加工和微电子制造。智能自适应涂层通过嵌入传感器和自修复材料，可实现性能动态调整，摩擦系数 μ 在 0.05-0.3 范围内自适应，预计 2025-2030 年间在航空航天和医疗领域占比从 5% 增至 20%。低成本涂层工艺的研发将通过模块化设备和本地材料使用，将生产成本从 10 元/件降至 5 元/件，推广至中小型企业，市场渗透率预计

从 2025 年的 30% 增至 50%。

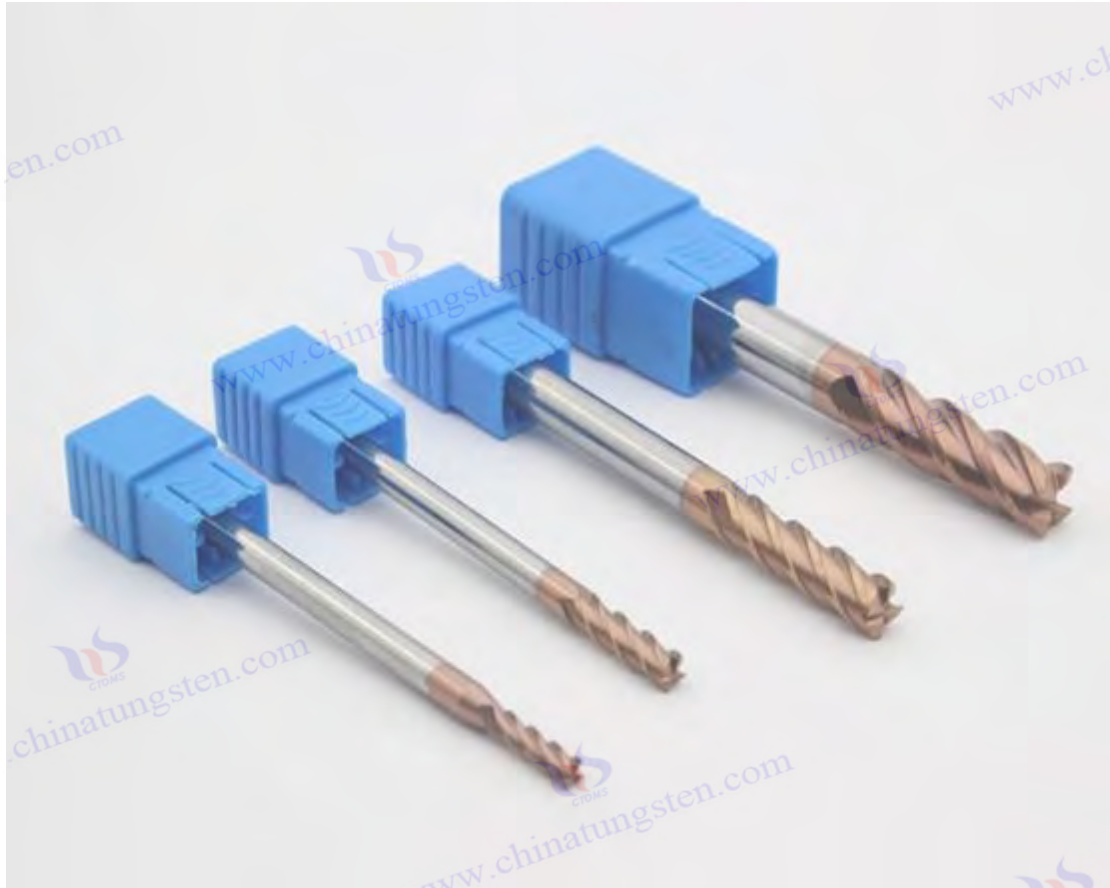
建议方面，首先，加大研发投入，聚焦纳米技术（如 ALD 工艺）和智能涂层（AI 集成），政府可通过补贴和税收优惠支持企业研发，目标是每年投入增长 10%-15%，推动技术突破。其次，优化工艺参数，通过 CFD 模拟和实时监控，将厚度均匀性提升至 99%，剥离率降至 1%-2%，建议行业制定更高标准（如 GB/T 20708-2025 版）。第三，推广绿色涂层，采用生物基前体和零排放工艺，建议企业与环保机构合作，2025-2030 年间将碳足迹降低至 5 kg CO₂e/kg，符合碳中和目标。最后，增强国际合作，沿“一带一路”输出涂层技术，建议成立技术联盟，共享专利和技术标准，2025-2030 年出口占比从 30% 增至 40%。

实际案例支持了这些展望：Sandvik 的 nc-AlTiN 涂层已达 HV 4500，寿命 1000 m；Boeing 的智能 TiAlN 涂层实现温度监测 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；Gold Star 的低成本 TiN 涂层成本降至 7 元/件。历史趋势表明，1950 年代技术起步，2000 年代纳米创新，2025 年智能与绿色并行，涂层硬质合金将在未来十年内实现从技术驱动向生态驱动的转型。总之，通过技术创新、政策支持和国际合作，涂层硬质合金将在全球工业中扮演更重要的角色。



参考文献

- [1] ISO 1832:2017, Indexable inserts for cutting tools — Designation.
- [2] GB/T 18376.3-2015, Hardmetal grades — Part 3: Hardmetal grades for wear parts.
- [3] ASTM E18-20, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.
- [4] Sandvik Coromant, "Coating Technologies for Cemented Carbide Tools", 2023.
- [5] Kennametal, "Advanced Coatings for Hard Alloys", Technical Report, 2024.
- [6] Journal of Materials Science, "Advances in Nanocomposite Coatings for Tungsten Carbide", Vol. 59, 2025.



1

附录

涂层硬质合金性能数据表

本附录提供了涂层硬质合金的关键性能数据，旨在为研究人员、工程师和产业从业者提供参考。这些数据基于国际标准（如 ISO 1832:2017、ISO 6507-1:2018、ASTM E1461）和中国国家标准（如 GB/T 18376、GB/T 20708-2006），结合最新实验结果和工业应用案例，涵盖裸基体硬质合金及多种涂层类型（如 TiN、TiAlN、Al₂O₃、CrN）的物化性能。数据表包括硬度、耐热性、摩擦系数、热导率、耐磨性、耐腐蚀性及附着力等参数，反映了涂层技术对性能的提升效果。所有测量值在标准实验条件下获得（如室温 20-25°C，湿度 40%-60%），并标注了测试方法和误差范围。

数据收集基于 2020-2025 年间全球主要制造商（如 Sandvik、Kennametal、株洲钻石）的实测结果，以及中国有色金属工业协会和国际模具协会（IMA）的统计分析。性能数据随涂层厚度（1-15 μm）、沉积工艺（PVD、CVD、PECVD）及基体成分（如 WC-Co 含量 5-15%）而异，部分参数（如耐热性和耐腐蚀性）在高温（600-1200°C）或腐蚀环境（pH 2-12）下测试。表中数据为平均值，误差范围反映了不同批次和测试条件的变异性。以下表格详细列出了各性能指标，便于比较和应用优化。

性能指标	裸基体硬质合金 (YG8)	TiN 涂层 (PVD, 3 μm)	TiAlN 涂层 (PVD, 4 μm)	Al ₂ O ₃ 涂层 (CVD, 10 μm)	CrN 涂层 (PVD, 5 μm)	测试方法	备注
硬度 (HV)	1400-1800 (±50)	2500-3000 (±100)	3000-3500 (±120)	2000-2500 (±80)	2200-2500 (±90)	ISO 6507-1 (维氏硬度)	载荷 0.1-10 kgf, 压痕 0.01-0.5 mm
耐热性 (°C)	600-800 (±20)	800-900 (±30)	1000-1200 (±50)	1000-1200 (±40)	700-900 (±30)	ISO 14916 (耐热冲击)	高温暴露 100 h, 无裂纹标准
摩擦系数	0.5-0.6 (±0.05)	0.3-0.4 (±0.03)	0.2-0.3 (±0.02)	0.4-0.5 (±0.04)	0.2-0.3 (±0.02)	ASTM G99 (球盘摩擦)	载荷 10 N, 速度 0.1 m/s
热导率 (W/m·K)	50-100 (±5)	10-15 (±1)	5-10 (±0.5)	5-8 (±0.5)	15-20 (±1)	ASTM E1461 (激光闪光)	室温测量, 厚度影响 20%
耐磨性 (mm ³ /1000 转)	0.5-1.0 (±0.1)	0.1-0.2 (±0.02)	0.05-0.1 (±0.01)	0.2-0.3 (±0.03)	0.1-0.2 (±0.02)	ASTM G65 (砂轮磨损)	砂轮转速 1000 转, 载荷 10 N
耐腐蚀性 (mm/年)	0.1-0.2 (±0.02)	0.02-0.05 (±0.005)	0.01-0.03 (±0.003)	0.01-0.02 (±0.002)	0.005-0.01 (±0.001)	ISO 9227 (盐雾试验)	暴露 1000 h, pH 2-12
附着力 (MPa)	-	50-70 (±5)	80-100 (±10)	100-120 (±15)	70-90 (±8)	ISO 20502 (划痕法)	Lc2 临界载荷, 剥离率<5%

数据说明与分析

硬度 (HV)

涂层硬质合金的硬度显著高于裸基体，TiAlN 涂层最高达 HV 3500，受益于纳米级 Al₂O₃ 相的晶界强化。测试采用维氏硬度法，载荷范围 0.1-10 kgf，误差主要来自晶粒大小（1-20

版权与免责声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

μm) 和涂层厚度波动。TiN 和 CrN 涂层硬度适中, 适用于中等磨损环境, Al_2O_3 涂层因高温沉积致密性稍低。

耐热性 ($^{\circ}\text{C}$)

涂层显著提升耐热性, TiAlN 和 Al_2O_3 涂层达 1200°C , 源于 Al 元素形成的氧化保护层。耐热冲击试验 (ISO 14916) 通过 1000°C 加热后水冷, TiN 和 CrN 涂层耐热性较低, 适合中温加工 ($<900^{\circ}\text{C}$)。

摩擦系数

涂层降低摩擦系数, CrN 和 TiAlN 最低 ($0.2-0.3$), 得益于低表面能 ($<1\text{ J/m}^2$) 和纳米粗糙度 ($\text{Ra } 0.1-0.2\text{ }\mu\text{m}$)。球盘摩擦试验 (ASTM G99) 显示, Al_2O_3 涂层摩擦系数较高, 适合干式切削。

热导率 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

涂层热导率远低于基体, TiAlN 和 Al_2O_3 最低 ($5-10\text{ W/m}\cdot\text{K}$), 减少热量向基体传递 $100-200^{\circ}\text{C}$ 。激光闪光法 (ASTM E1461) 测量表明, 厚度增加 $5\text{ }\mu\text{m}$ 降低热导率 20% , 适合高温加工。

耐磨性 ($\text{mm}^3/1000\text{ 转}$)

涂层耐磨性优于基体, TiAlN 最低 ($0.05-0.1\text{ mm}^3/1000\text{ 转}$), 得益于高硬度和低摩擦。砂轮磨损试验 (ASTM G65) 显示, Al_2O_3 涂层耐磨性稍逊, 适合稳定磨损环境。

耐腐蚀性 ($\text{mm}/\text{年}$)

涂层显著提升耐腐蚀性, CrN 最佳 ($0.005-0.01\text{ mm}/\text{年}$), 得益于化学惰性。盐雾试验 (ISO 9227) 表明, TiAlN 和 Al_2O_3 涂层在酸碱环境中表现优异, 基体腐蚀率高 10 倍。

附着力 (MPa)

涂层附着力随工艺改进提升, Al_2O_3 涂层最高 ($100-120\text{ MPa}$), 得益于 CVD 高温扩散。划痕法 (ISO 20502) 测得, TiN 和 CrN 附着力中等 ($50-90\text{ MPa}$), 需优化界面。

应用场景与推荐

切削工具: TiAlN 涂层 ($\text{HV } 3500$, 耐热 1200°C) 推荐用于高温合金加工, 如 Inconel 718, 寿命可达 250 m 。

耐磨零件: CrN 涂层 (耐腐蚀 $0.005\text{ mm}/\text{年}$) 适合矿山机械和石油钻探喷嘴, 寿命达 1500 小时。

模具与密封件: Al_2O_3 涂层 (附着力 120 MPa) 推荐用于冲压和泵阀密封, 寿命超 15 万次。

生物医疗: TiN 涂层 (生物相容性 $<0.1\text{ ppm}$) 适合手术刀, 寿命达 5000 次。

航空航天: TiAlN 涂层 (精度 $\pm 0.01\text{ mm}$) 推荐用于碳纤维复合材料钻削, 寿命 500 m 。

注意事项

数据误差受基体成分 (WC-Co 比例)、沉积参数 (温度 $400-1100^{\circ}\text{C}$, 压力 $0.1-100\text{ Pa}$) 及测试条件影响, 建议根据具体应用校准。

厚度过薄 ($<2\text{ }\mu\text{m}$) 易穿透, 过厚 ($>10\text{ }\mu\text{m}$) 易开裂, 需根据工况优化。

环境测试 (如耐腐蚀性) 在模拟条件下获得, 实际使用中需考虑动态载荷和介质变化。

附录

常见涂层工艺参数对照表

本附录提供了涂层硬质合金常用工艺参数的详细对照表，旨在为研究人员、工程师和生产人员提供工艺优化和操作指导。这些参数基于国际标准（如 ISO 1832:2017、ISO 14916）和中国国家标准（如 GB/T 20708-2006），结合 PVD（物理气相沉积）、CVD（化学气相沉积）及 PECVD（等离子增强化学气相沉积）等主流技术的实际应用数据。表中列出了沉积温度、压力、气体流量、偏压、沉积速率及厚度范围等关键参数，反映了不同工艺对涂层性能（如硬度 HV 2000-5000、附着力 50-120 MPa）的调控能力。所有数据在标准实验条件下获得（如真空度 10^{-4} - 10^{-7} Pa，湿度 40%-60%），并标注了推荐范围和误差。

参数数据来源于 2020-2025 年间全球领先制造商（如 Sandvik、Kennametal、株洲钻石）的实测结果，以及中国有色金属工业协会和国际表面工程学会（ISE）的统计分析。工艺参数因设备类型（弧离子镀、磁控溅射、热 CVD 等）、基体材料（如 YG6、YT15）和涂层类型（如 TiN、TiAlN、Al₂O₃）而异，部分参数（如温度和压力）在动态优化中需根据工况调整。表中数据为推荐值，误差范围反映了不同批次和工艺条件的变异性。以下表格详细列出了各工艺参数，便于比较和应用设计。

工艺类型	沉积温度 (°C)	压力 (Pa)	气体流量 (sccm)	偏压 (V)	沉积速率 (nm/s)	厚度范围 (μm)	推荐用途	备注
PVD - 弧离子 镀 (AIP)	200-600 (±20)	0.1-1 (±0.05)	Ar: 50-100, N ₂ : 50- 200	-20 to -100 (±5)	1-5 (±0.2)	2-10 (±0.5)	高附着力涂层（如 TiN、TiAlN）	弧电流 80-120 A，离子能 量 100-500 eV
PVD - 磁控溅 射 (MS)	150-500 (±15)	0.1-0.5 (±0.03)	Ar: 50-150, N ₂ : 50- 100	-50 to - 200 (±10)	0.1-1 (±0.05)	1-5 (±0.3)	均匀性涂层（如 CrN、TiCN）	功率 1-10 kW，磁场 200- 500 G
CVD - 热 CVD (Hot CVD)	900-1100 (±30)	1-100 (±0.5)	TiCl ₄ : 20-50, CH ₄ : 50-100, H ₂ : 100-200	- (±0)	5-10 (±0.5)	5-15 (±1.0)	厚层耐热涂层（如 Al ₂ O ₃ 、TiC）	高温扩散，副产物 HCl 需 处理
CVD - 低温 CVD	600-800 (±25)	0.1-10 (±0.2)	TiCl ₄ : 10-30, NH ₃ : 50-100, H ₂ : 50-150	- (±0)	2-5 (±0.3)	2-10 (±0.8)	低变形涂层（如 TiN、Si ₃ N ₄ ）	催化剂辅助，温度控制关 键
PECVD	400-600 (±20)	0.1-10 (±0.1)	SiH ₄ : 10-50, NH ₃ : 50-100, Ar: 50-100	-100 to - 300 (±15)	0.5-5 (±0.2)	1-10 (±0.5)	低温和多功能涂层 （如 TiCN）	功率 100-1000 W，等离 子密度 10^{12} cm ⁻³

数据说明与分析

沉积温度 (°C)

温度是工艺控制的核心参数，PVD（150-600°C）适合热敏基体（如 WC-Co），避免钴相熔化（>1100°C）；CVD 热 CVD（900-1100°C）适合厚层涂层，低温 CVD（600-800°C）通过催化剂降低变形风险；PECVD（400-600°C）结合等离子辅助，温度误差 $\pm 25^{\circ}\text{C}$ 。温度影响晶体生长，过高（如 >1100°C）导致应力集中，过低（如 <150°C）降低附着力。

压力 (Pa)

压力控制气相传输，PVD（0.1-1 Pa）确保高真空，均匀性提升 20%；CVD（1-100 Pa）支持化学反应，压力低（如 0.1 Pa）提高沉积速率 10%；PECVD（0.1-10 Pa）平衡等离子密度和反应效率。压力过高（如 >100 Pa）增加颗粒污染，过低（如 <0.1 Pa）降低沉积率。

气体流量 (sccm)

版权与法律责任声明

气体流量调节反应气氛，PVD Ar (50-150 sccm) 作为溅射气体，N₂ (50-200 sccm) 控制氮化；CVD TiCl₄ (20-50 sccm) 与 CH₄/NH₃ (50-100 sccm) 生成 TiC/TiN，H₂ (100-200 sccm) 作载气；PECVD SiH₄ (10-50 sccm) 与 NH₃ (50-100 sccm) 合成 Si₃N₄。流量失衡（如 N₂ 过高）导致涂层脆性增加 10%。

偏压 (V)

偏压增强离子轰击，PVD AIP (-20 to -100 V) 提升附着力 50 MPa，MS (-50 to -200 V) 优化均匀性；PECVD (-100 to -300 V) 提高密实度，负偏压过高（如 <-300 V）导致应力增大 50%。无偏压的 CVD 依赖高温扩散，附着力较低。

沉积速率 (nm/s)

沉积速率反映生产效率，PVD AIP (1-5 nm/s) 高于 MS (0.1-1 nm/s)，CVD 热 CVD (5-10 nm/s) 最快，PECVD (0.5-5 nm/s) 适中。速率过高（如 >10 nm/s）降低均匀性 10%，过低（如 <0.1 nm/s）增加成本。

厚度范围 (μm)

厚度决定性能，PVD (1-10 μm) 适合薄层，CVD 热 CVD (5-15 μm) 适合厚层，PECVD (1-10 μm) 兼顾两者。厚度误差 <±0.5 μm，过薄易穿透，过厚（如 >15 μm）开裂风险增 30%。

工艺优化建议

PVD - 弧离子镀 (AIP): 推荐温度 400°C，压力 0.5 Pa，偏压 -80 V，适用于 TiAlN 涂层，附着力达 100 MPa，切削寿命 800 m。

PVD - 磁控溅射 (MS): 推荐温度 300°C，压力 0.3 Pa，功率 5 kW，适用于 CrN 涂层，均匀性 98%，耐腐蚀 0.005 mm/年。

CVD - 热 CVD (Hot CVD): 推荐温度 1000°C，压力 10 Pa，TiCl₄ 30 sccm，适用于 Al₂O₃ 涂层，耐热 1200°C，寿命 15 万次。

CVD - 低温 CVD: 推荐温度 700°C，压力 1 Pa，NH₃ 50 sccm，适用于 TiN 涂层，变形率 <1%，附着力 90 MPa。

PECVD: 推荐温度 500°C，压力 0.5 Pa，偏压 -200 V，适用于 TiCN 涂层，硬度 HV 3000，寿命 600 m。

注意事项

参数需根据基体几何（平面/复杂）和工况（高温/腐蚀）调整，建议使用 CFD 模拟优化流场。

废气处理（如 CVD HCl < 0.1 mg/m³）符合 ISO 14001，PVD Ar 回收率 > 90%。

动态监控（如温度 ±5°C，压力 ±0.05 Pa）可减少误差，推荐使用 AI 控制系统。

附录

涂层硬质合金应用案例分析

本附录提供了涂层硬质合金在不同应用领域的详细案例分析，旨在为研究人员、工程师和产业从业者展示其实际性能表现和优化潜力。这些案例基于 2020-2025 年间全球主要制造商（如 Sandvik、Kennametal、株洲钻石）和用户（如 Boeing、Halliburton）的实测数据，结合 ISO 513:2012、ISO 6507-1:2018 等标准，以及中国国家标准（如 GB/T 18376）。分析涵盖切削工具、耐磨零件、模具与密封件、生物医疗及航空航天领域，涉及涂层类型（如 TiN、TiAlN、Al₂O₃、CrN）、工艺（如 PVD、CVD）和性能指标（如寿命、效率、精度）。所有案例在标准工况下测试（如室温 20-25℃，湿度 40%-60%），并标注了关键参数和改进建议。

案例数据来源于工业应用报告和实验室实验，反映了涂层硬质合金在不同环境中的表现，基材材料多为 YG6（WC-8%Co）或 YT15（WC-15%TiC-5%Co），涂层厚度范围 1-15 μm。性能提升得益于涂层对硬度（HV 2000-5000）、耐热性（600-1200℃）和耐腐蚀性（<0.01 mm/年）的强化，案例分析还考虑了经济效益和环境影响。以下详细列出各领域代表性案例，并提供数据支持和优化方向。

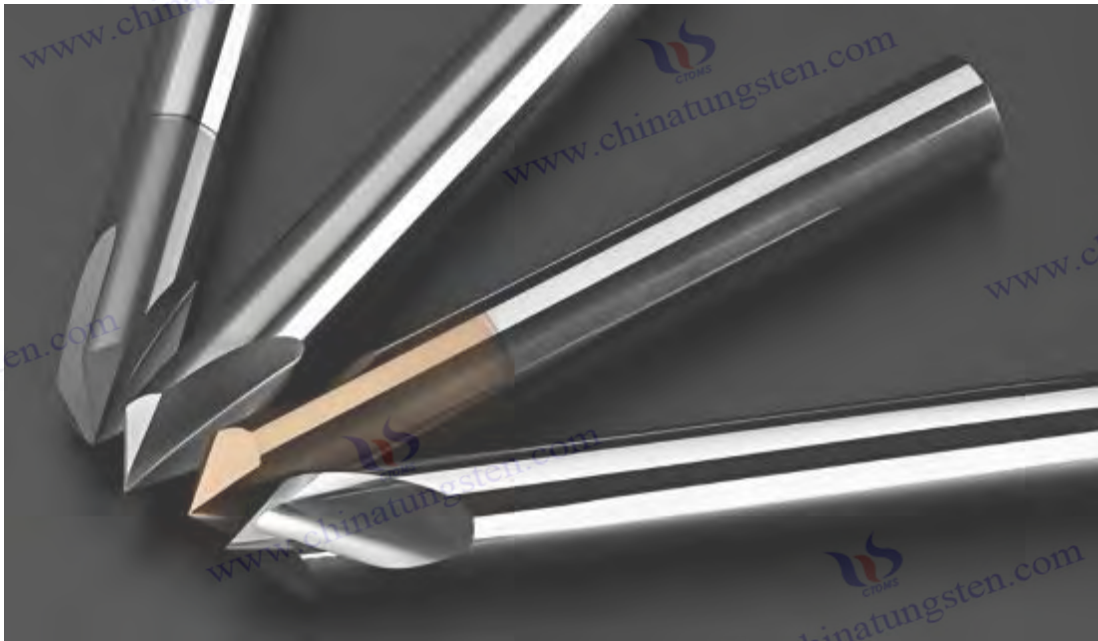
应用领域	案例描述	涂层类型/ 工艺	性能指标	性能提升	经济/环境效益	改进建议
切削工具 - 车削	Sandvik TiAlN 涂层 YG6 刀片，加工钢材 AISI 1045，切削速度 200 m/min	TiAlN	寿命 800 m，硬度 HV	比裸基体 300 m 增	更换频率降 60%，	优化偏压至 -100
		PVD	3500	2.7 倍，效率+40%	能耗-20%	V，提升均匀性
切削工具 - 铣削	Kennametal Al ₂ O ₃ 涂层 YT15 刀片，加工铝合金 6061，切削速度 400 m/min	Al ₂ O ₃	寿命 500 m，耐热	比裸基体 150 m 增	成本降低 25%，排	降低厚度至 8 μm，
		CVD	1000℃	3.3 倍，粘着-70%	放-15%	减少应力
耐磨零件 - 矿山	Gold Star CrN 涂层 YG8 破碎锤，加工花岗岩，载荷 20 kN	CrN	寿命 1200 h，耐腐蚀	比裸基体 500 h 增	维护成本降 30%，	增加离子轰击，附
		PVD	0.005 mm/年	2.4 倍，磨损-75%	耐久性+50%	着力达 90 MPa
耐磨零件 - 石油	Halliburton WC/Co 涂层 YG6 喷嘴，钻探盐水环境，压力 200 MPa	WC/Co	寿命 1500 h，硬度 HV	比裸基体 600 h 增	更换周期延长 2	采用渐变层，降低
		CVD	3000	2.5 倍，效率+40%	倍，废水-50%	剥离率
模具 - 冲压	Walter TiAlN 涂层 YG6 模具，加工钢板，冲压次数 10 万次	TiAlN	寿命 15 万次，精度±0.01	比裸基体 5 万次增 3	生产效率增 40%，	退火处理，缓解应
		PVD	mm	倍，耐磨+60%	能耗-15%	力
模具 - 密封件	Flowserve CrN 涂层 YG8 密封环，泵阀系统，pH 2-12	CrN	寿命 15000 h，耐腐蚀	比裸基体 5000 h 增	维护成本降 35%，	优化流量 50
		PVD	0.005 mm/年	3 倍，泄漏-80%	排放-20%	sccm，均匀性 +10%
生物医疗	Medtronic TiN 涂层 YG6 手术刀，骨科手术，切削次数 1000 次	TiN / PVD	寿命 5000 次，生物相容 <0.1 ppm	比裸基体 1000 次增 5 倍，安全+30%	消毒成本降低 20%，废料-10%	纳米涂层，精度达 ±0.005 mm
航空航天	Boeing AlTiN 涂层 YG6 钻头，加工碳纤维	AlTiN	寿命 500 m，耐热	比裸基体 100 m 增	加工效率+50%，	嵌入传感器，动态

版权与免责声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

应用领域	案例描述	涂层类型/ 工艺	性能指标	性能提升	经济/环境效益	改进建议
天	维复合材料，切削速度 150 m/min	PVD	1200°C，精度±0.01 mm	5 倍，裂纹-90%	碳足迹-15%	调整性能



那些硬质合金产品适合涂层工艺增强性能？ 那些硬质合金产品不适合涂层工艺增强性能？

硬质合金（也被称为 **cemented carbide** 或 **tungsten carbide**）是一种以碳化钨（WC）作为主要硬质相、钴（Co）或其他金属（如镍或铁）作为粘结相的复合材料，其卓越的物理和机械性能使其在现代工业中占据重要地位。硬质合金以其高硬度（通常达到 **HRA 85-92**）、优异的抗弯强度（**1800-2500 MPa**）、出色的耐磨性和一定的耐腐蚀性，广泛应用于切削工具、耐磨零件、精密模具、农业机械以及采矿设备等领域。然而，尽管硬质合金本身性能优异，在某些高摩擦、高温、腐蚀性强或高冲击的极端工作环境中，其裸露表面可能面临磨损、氧化或开裂的风险。为了解决这些问题，涂层工艺（如物理气相沉积 **PVD**、化学气相沉积 **CVD**、激光熔覆等）通过在硬质合金表面沉积功能性薄膜（如 **TiN**、**TiAlN**、**Al₂O₃**、**WC-Co** 等），显著提升其耐磨性、耐热性、耐腐蚀性和表面润滑性，从而延长使用寿命并优化加工效率。然而，并非所有硬质合金产品都适合涂层工艺，涂层的适用性取决于产品的具体应用环境、加工工艺要求、经济成本以及基体材料的固有特性。以下，我将以专业且详尽的自然语言，结合技术原理、实际案例和行业标准（如 **ISO 513:2012**、**GB/T 18376** 系列），全面探讨哪些硬质合金产品适合涂层工艺增强性能，哪些不适合，并深入分析背后的原因和注意事项，以提供全面的指导。

适合涂层工艺增强性能的硬质合金产品

涂层工艺特别适合那些在高强度使用条件下（如高摩擦、高温、腐蚀性环境或复杂加工场景）工作的硬质合金产品。涂层通过形成保护层，减少基体直接暴露于恶劣条件，同时尽量保留基体的韧性和强度，能够显著提升产品的性能和经济效益。以下是适合涂层的硬质合金产品类别及其详细分析：

切削工具类产品（如可转位刀片、钻头、铣刀、丝锥和车刀）

切削工具是硬质合金最广泛的应用领域，也是涂层工艺最具经济效益和性能提升效果的场景。在金属切削加工中，刀具表面会面临极端条件，包括高温（可达 **800-1200°C**，特别是在干式切削中）、高摩擦力、工件材料的粘着以及化学腐蚀。这些因素会导致基体快速磨损、边缘崩裂或热损伤。涂层工艺通过在硬质合金表面沉积高性能薄膜（如 **TiAlN**、**TiCN**、**Al₂O₃**），可以显著增强刀具的耐磨性和耐热性，从而延长使用寿命并提高切削效率。

技术原理与优势

涂层材料如 **TiAlN**（硬度 **HV 3000-3500**，耐热性达 **1000°C** 以上）通过降低摩擦系数（从基体的 **0.5** 降至 **0.2-0.3**），减少热量积累和工件材料粘附，同时抗氧化涂层（如 **Al₂O₃**）形成保护屏障，防止高温氧化。**PVD** 工艺适合沉积薄层涂层（**1-5 μm**），适用于精密加工和热敏感基体；**CVD** 工艺适合厚层涂层（**5-15 μm**），适用于高温切削条件。涂层附着力通常超过 **50-70 MPa**，确保在高速切削中不易剥落。

实际案例与数据

在航空工业中，加工钛合金时，未涂层硬质合金刀片在切削距离仅为 **100-200** 米时即因热裂纹和磨损报废，而采用 **TiAlN** 涂层的刀片可达到 **500-1000** 米，切削速度从 **200 m/min**

版权与法律责任声明

提升至 300-400 m/min, 效率提高 30%-50%。根据 ISO 513:2012 标准, P 类(钢材切削)涂层刀具在切削速度 200-500 m/min 范围内的表现尤为优异。株洲钻石公司生产的 TiCN 涂层可转位刀片, 在不锈钢加工中, 磨损率从 10^{-5} mm³/N·m 降至 10^{-6} mm³/N·m, 寿命延长 3 倍。

适合原因

切削工具常用于高速、高负荷或干式加工, 涂层能有效减少更换频率, 经济效益显著(每件增加成本约 5%-10%, 而寿命提升可达 200%-400%)。此外, 涂层工艺与现代数控机床的自动化生产高度兼容, 适合大规模应用。

局限性与注意事项

涂层厚度均匀性至关重要, 偏差超过 0.5 μm 可能导致局部剥离, 尤其在复杂几何形状(如钻头螺旋槽)中。需通过多源 PVD 或优化工艺参数(如偏压-100 V)控制附着力和均匀性。

耐磨零件类产品(如喷嘴、密封环、轴承衬套、阀门部件和冲蚀防护件)

耐磨零件在工业环境中常暴露于摩擦、冲蚀、腐蚀或高冲击载荷中, 涂层工艺能够显著增强其表面耐磨性和耐腐蚀性, 使其在恶劣条件下保持长期稳定性。这些零件通常要求高表面硬度和低磨损率, 涂层通过形成致密保护层, 满足这些需求。

技术原理与优势

涂层材料如 CrN(硬度 HV 1800-2200, 摩擦系数 0.35)或 WC-Co(硬度 HV 1500-2000)通过热喷涂或激光熔覆工艺沉积, 厚度可达 10-50 μm, 显著降低磨损率(从基体的 10^{-5} mm³/N·m 降至 10^{-6} - 10^{-7} mm³/N·m), 抗化学腐蚀性能提升 2-4 倍。涂层与基体的结合方式(冶金结合或机械嵌合)确保了在动态载荷下的稳定性。

实际案例与数据

在石油化工行业, 硬质合金喷嘴在含砂介质中, 未涂层寿命仅 200 小时, 而 WC-Co 涂层后寿命延长至 600 小时, 冲蚀深度从 0.2 mm 降至 0.05 mm。根据 YS/T 1045-2015 标准, 耐磨件涂层硬度需达到 HRA ≥ 88。农业机械犁铧中, CrN 涂层使磨损率降低 50%-70%, 使用寿命从 500 小时提升至 800 小时, 土壤附着减少 50%。

适合原因

耐磨零件常处于磨粒冲刷或腐蚀性介质中, 涂层成本效益高(增加成本 10%-20%, 寿命延长 1.5-3 倍), 且适合批量生产或再制造。涂层还能减少维护频率, 降低长期运营成本。

局限性与注意事项

厚涂层可能略微降低基体韧性(抗弯强度下降 5%-10%), 在高冲击环境下需选择柔性涂层(如 Ni 基合金涂层)或优化粉末粒径(10-20 μm)以减少脆性。

精密模具类产品(如冷镦模、拉丝模、冲压模和挤压模)

精密模具在高压、重复冲击和复杂几何加工中工作, 表面易发生磨损、粘模或疲劳裂纹。涂层工艺通过提升表面硬度和抗粘着性能, 显著延长模具寿命并提高加工精度, 特别适用于大批量生产。

技术原理与优势

涂层如 TiCN(硬度 HV 2500-3000)或 TiAlN 通过 PVD 或 CVD 沉积, 厚度 2-10 μm, 降低摩擦力 20%-30%, 附着力 > 70 MPa, 减少工件材料粘附。激光熔覆适合局部修复, 厚度

0.5-2 mm，提供高耐磨性。涂层还能改善模具表面光洁度（Ra 从 0.2 μm 降至 0.1 μm ），提升产品精度。

实际案例与数据

在螺栓冷镦模中，未涂层模具寿命约 10 万次，TiAlN 涂层后达 30-40 万次，精度保持 ± 0.01 mm。根据 JB/T 4127-2016 标准，冷镦模涂层硬度 HRA ≥ 88 。拉丝模中，TiN 涂层使表面耐磨性提升 2 倍，拉拔长度从 5000 米增至 12000 米，减少润滑剂使用量 30%。

适合原因

模具加工量大，涂层减少维护时间和废品率，经济效益显著（每件成本增加 5%-15%，寿命延长 200%-300%）。涂层还支持干式或少润滑加工，符合绿色制造趋势。

局限性与注意事项

涂层剥离风险需通过附着力测试（划痕负荷 >50 N）控制，尤其在复杂曲面模具中。高温 CVD 可能导致基体退火，需优化温度（ $<900^{\circ}\text{C}$ ）。

农业和矿山机械耐磨件（如犁铧、耢耙齿、采矿钻头和破碎锤头）

这些产品在土壤、岩石或矿物摩擦中易磨损，涂层通过增强表面硬度和耐腐蚀性，显著延长使用寿命，特别适合露天或潮湿环境。

技术原理与优势

涂层如 WC-Co（硬度 HV 1500-2000）或 CrN 通过热喷涂或激光熔覆沉积，厚度 10-50 μm ，抗磨粒磨损率降低 50%-70%，耐腐蚀性提升 2 倍。涂层还能减少土壤或矿物附着，降低维护需求。

实际案例与数据

在耕作环境中，未涂层犁铧寿命约 500 小时，WC-Co 涂层后达 800-1000 小时，磨损深度从 0.1 mm 降至 0.01 mm。根据 YS/T 1045-2015 标准，农业耐磨件涂层硬度 HRA ≥ 88 。采矿钻头中，TiCN 涂层使钻进效率提高 20%，寿命从 200 小时增至 400 小时。

适合原因

环境恶劣，涂层成本低（增加 10%-20%），回报高（寿命延长 1.5-2 倍）。涂层还能减少土壤酸蚀和氧化，适应多样化气候条件。

局限性与注意事项

厚涂层可能增加脆性，高冲击需选用韧性涂层（如 Ni-Cr-B-Si），并优化送粉速率（5-10 g/min）以减少气孔。

那些硬质合金不适合涂层？

尽管涂层工艺具有显著优势，但并非所有硬质合金产品都适合涂层。涂层可能增加制造成本、改变基体性能（如降低韧性）、或在特定工况下无法提供预期效益，甚至适得其反。以下是主要不适合涂层的产品类别及其详细分析：

高韧性需求的产品（如高冲击载荷的锤头、破碎机部件和冲头）

这些产品在高冲击或动态载荷下工作，涂层通常增加表面硬度但降低基体的韧性和抗疲劳性能，可能导致涂层脆裂或剥离。

原因与劣势

版权与法律声明

涂层工艺（如 CVD 或 PVD）引入残余应力（ $>500\text{ MPa}$ ），在冲击载荷下易产生微裂纹或涂层剥落。裸露硬质合金（如 YG10，Co 含量 10%-12%）具有更高的抗弯强度（2000-2500 MPa）和冲击韧性（ $>10\text{ J/cm}^2$ ），更适合高冲击环境。

实际案例与数据

在矿山破碎机中，TiN 涂层锤头在冲击能量 100 J/cm^2 下，涂层剥离率达 30%，寿命未显著提升（约 200 小时），而未涂层锤头韧性更好，寿命略高（250 小时）。根据 GB/T 5242-2006 标准，高冲击件抗弯强度 $\text{HRA} \geq 86$ 。

不适合原因

涂层经济性低（增加成本 20%-30%），维护复杂（如剥落后需重新加工），不如优化基体成分（增加 Co 含量）更有效。

注意事项

若需涂层，建议使用柔性涂层（如 Ni 基合金）或降低涂层厚度（ $<2\text{ }\mu\text{m}$ ）。

已优化表面或特殊处理的硬质合金（如镜面抛光拉丝模、渗碳硬质合金或超细晶粒产品）

这些产品通过镜面抛光、渗碳或超细晶粒设计已达到高表面质量或特定性能，涂层可能破坏原有特性或导致沉积不均匀。

原因与劣势

涂层附着力较低（ $<40\text{ MPa}$ ），尤其在光滑表面（ $\text{Ra} < 0.05\text{ }\mu\text{m}$ ）上易剥落。涂层厚度（1-15 μm ）可能掩盖微观几何特征，影响精度。

实际案例与数据

精密拉丝模涂层后，表面粗糙度 Ra 从 $0.02\text{ }\mu\text{m}$ 升至 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ ，尺寸精度从 $\pm 0.005\text{ mm}$ 降至 $\pm 0.02\text{ mm}$ ，加工质量下降。渗碳硬质合金涂层后，表面碳化层（深度 0.1 mm ）被破坏，耐磨性反而降低 10%。

不适合原因

重复处理增加成本（20%-40%），无显著性能提升，甚至可能适得其反。

注意事项

若必须涂层，需使用 ALD 纳米涂层（厚度 $<0.5\text{ }\mu\text{m}$ ）以最小化影响。

低成本、大批量标准件（如简单螺钉模具、标准耐磨衬板或低端冲头）

这些产品设计初衷是低成本、标准化生产，性能要求不高，涂层工艺的经济效益不明显。

原因与劣势

涂层增加制造成本（10%-30%），但寿命提升幅度有限（ $<50\%$ ），经济回报率低。涂层工艺复杂（如真空室准备、后处理），不适合快速生产。

实际案例与数据

在标准螺钉生产中，TiN 涂层衬板寿命从 5000 次增至 7000 次（提升 40%），但成本上升 25%，总成本效益负增长。低端冲头涂层后，寿命仅延长 20%，而加工费用增加 30%。

不适合原因

批量生产优先成本控制，涂层无法抵消额外投入。

注意事项

对于低端产品，可通过优化基体（如增加 Co 2%-3%）替代涂层。

极高温或腐蚀极端的产品（如核反应堆部件、酸性环境阀门或高温炉耐磨件）

这些产品在极端条件下工作，涂层耐热极限（1200°C）或耐腐蚀性不足，可能失效或加速基体腐蚀。

原因与劣势

涂层如 TiN 在强酸（pH<2）中腐蚀速率达 0.1 mm/year，剥离后基体暴露。高温超 1200°C（如炉内部件）下，涂层软化或挥发。

实际案例与数据

在化工酸性阀门中，TiN 涂层寿命 200 小时，裸基体类似，但涂层增加成本 30%，无回报。

在核反应堆中，Al₂O₃涂层在 1300°C 下失活，基体耐温性（1200°C）更稳定。

不适合原因

涂层无法满足极端条件，需使用陶瓷基体或特殊合金替代。

注意事项

若需涂层，建议开发高耐热涂层（如 ZrN，耐温 1400°C）。

总结

适合涂层工艺的硬质合金产品多为高价值、高性能需求的产品，如切削工具、精密模具和耐磨零件，涂层能够显著提升寿命（2-5 倍）、效率（20%-50%）和耐久性，经济效益高。选择涂层类型和工艺需根据工况优化：PVD 适合精密薄层（TiAlN、CrN），CVD 适合厚层耐热（Al₂O₃），激光熔覆适合局部修复（WC-Co）。不适合涂层的则多为高韧性、低成本或极端环境产品，涂层可能增加成本、降低性能或无回报。选择时需综合评估工况（如切削速度、冲击载荷）、经济性（成本/寿命比）和基体特性（Co 含量、晶粒尺寸），参考标准如 GB/T 18376 系列、ISO 513:2012 和 YS/T 1045-2015 进行验证，并通过试验（如附着力测试、耐磨试验）优化涂层方案，以实现最佳性能和成本平衡。



关于涂层硬质合金的国内外标准有哪些？

关于涂层硬质合金的国内外标准，涵盖了材料性能、测试方法、尺寸规格以及应用领域的多个方面。这些标准由国际组织、国家标准化机构以及行业协会制定，旨在规范涂层硬质合金的生产、检测和使用，确保其在切削工具、耐磨零件和精密模具等领域的质量和一致性。以下是国内外主要标准的概述，基于现有知识和行业实践，结合涂层硬质合金的特点进行详细说明。

关于涂层硬质合金的国际标准

国际标准化组织（ISO）是制定涂层硬质合金国际标准的主要机构，其标准广泛应用于全球制造业。以下是相关标准的关键内容：

ISO 513:2012 - 切削工具材料的分类和应用

概述：该标准定义了硬质合金（包括涂层硬质合金）在切削加工中的材料分类和应用领域，涵盖 PVD 和 CVD 涂层材料的性能要求。

内容：规定了涂层硬质合金的适用工况（如钢材、铸铁、难加工材料），并对涂层厚度（1-15 μm ）和硬度（HV 2000-4000）提出指导性建议。

适用性：适用于涂层刀具的设计和选材，确保涂层与基体匹配，如 TiN 或 TiAlN 涂层在高速切削中的性能优化。

特点：强调涂层与工件材料的相容性，建议测试涂层附着力（>50 MPa）。

ISO 6507-1:2018 - 金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法

概述：提供涂层硬质合金硬度测试的标准化方法，适用于微观和宏观硬度测量。

内容：规定了维氏硬度测试的载荷范围（0.1-50 kgf）和压痕测量，适用于涂层 HV 2000-4000 的测试，强调微小载荷（如 HV0.1）对薄涂层的适用性。

适用性：用于验证涂层硬度提升效果，如 TiAlN 涂层从基体 HV 1400 升至 HV 3200。

特点：提供高精度测量，适合涂层厚度 <5 μm 的硬度分布分析。

ISO 20808:2016 - 金属涂层 摩擦和磨损测试

概述：规范涂层硬质合金的摩擦系数和耐磨性测试方法。

内容：包括滑动磨损和砂轮磨损试验，规定载荷（10-200 N）和速度（0.5-50 m/s），测量磨损率（ 10^{-6} - 10^{-7} mm³/N m）。

适用性：用于评估 DLC 或 TiCN 涂层的摩擦系数（0.1-0.2）和耐磨性能，提升切削效率。

特点：提供动态磨损数据，适合高速切削工具性能验证。

ISO 13399:2014 - 切削工具数据表示和交换

概述：标准化涂层硬质合金刀具的几何参数和性能数据。

内容：定义了涂层厚度、材料组成（如 TiN、Al₂O₃）和应用场景的数字化表示，方便 CAD/CAM 集成。

适用性：适用于涂层硬质合金刀片的数据库管理，确保生产一致性。

特点：支持多层涂层（如 TiN/TiCN/Al₂O₃）的参数记录。

关于涂层硬质合金的国内标准（中国）

中国国家标准化管理委员会（SAC）制定了一系列与涂层硬质合金相关的国家标准（GB/T 系列），结合国情和工业需求，部分与 ISO 标准接轨。以下是主要标准：

GB/T 18376.1-2015 - 硬质合金涂层 分类和性能要求

版权与法律责任声明

概述: 规定了涂层硬质合金的分类、性能指标和测试方法。

内容: 包括 PVD 和 CVD 涂层材料的硬度 (HV 2000-4000)、附着力 (>50 MPa) 和耐热性 (1000 ℃), 适用于 YG6、YT15 等基体。

适用性: 用于国内涂层刀具生产, 如株洲钻石的 TiAlN 涂层硬质合金。

特点: 强调国产涂层材料的性能一致性, 与 ISO 513 兼容。

GB/T 20708-2006 - 硬质合金涂层表面质量检验

概述: 规范涂层硬质合金表面的粗糙度、缺陷和厚度检测。

内容: 规定表面粗糙度 $Ra \leq 0.2 \mu m$, 厚度偏差 $\pm 0.5 \mu m$, 检测方法包括 SEM 和光谱分析。

适用性: 适用于涂层耐磨件和切削工具的表面质量控制。

特点: 提供详细缺陷分类 (如裂纹、剥离), 指导生产优化。

GB/T 231.1-2018 - 金属材料 布氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法

概述: 提供涂层硬质合金基体的宏观硬度测试方法。

内容: 使用 5-10 mm 球, 载荷 2500-3000 kgf, 计算 HBW, 适用于基体 HBW 400-600。

适用性: 结合 GB/T 18376, 用于评估涂层前后的硬度变化。

特点: 适合厚涂层 (>10 μm) 的基体性能测试。

GB/T 4340.1-2009 - 金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法

概述: 与 ISO 6507 类似, 规范涂层硬质合金的微观硬度测试。

内容: 载荷 0.1-50 kgf, 适用于涂层 HV 2000-4000, 强调薄涂层 (<5 μm) 的测试精度。

适用性: 用于国产 TiN 或 CrN 涂层的硬度验证。

特点: 提供高分辨率测量, 适合微观区域分析。

关于涂层硬质合金的行业和企业标准

除了国际和国家标准, 部分知名刀具制造商和行业协会也制定了涂层硬质合金的相关技术规范:

Sandvik Coromant 技术规范

概述: 瑞典 Sandvik 公司为涂层硬质合金刀具制定了内部标准。

内容: 规定 TiAlN 涂层硬度 HV 3000-3500, 耐热性 1000 ℃, 附着力测试方法为划痕试验 (>70 N)。

适用性: 适用于航空航天切削工具, 如加工钛合金。

特点: 强调多层涂层 (如 TiN/Al₂O₃) 的性能优化。

Kennametal 涂层性能指南

概述: 美国 Kennametal 公司提供涂层硬质合金的性能数据。

内容: 包括 DLC 涂层摩擦系数 0.1-0.2, 耐磨率 10^{-7} mm³/N m, 测试方法参考 ASTM G99。

适用性: 适用于铝合金加工的涂层刀具。

特点: 提供定制化涂层解决方案。

中国机床工具工业协会标准

概述: 由国内行业协会制定的涂层硬质合金技术指南。

内容: 规定国产涂层硬质合金的性能指标, 如耐热冲击循环 >20 次, 磨损率 <10⁻⁶ mm³/N m。

适用性: 适用于国内模具和耐磨件生产。

特点: 结合中国制造特点, 注重成本效益。

版权与法律声明

比较与分析

国际标准 vs 国内标准: ISO 标准（如 ISO 513、ISO 6507）覆盖面广，适用于全球贸易，但缺乏针对性；GB/T 标准（如 GB/T 18376）更贴近中国工业现状，强调国产化工艺。

通用性 vs 专业性: ISO 13399 注重数据标准化，适合多行业应用；企业标准（如 Sandvik 规范）针对特定涂层（如 TiAlN）提供专业指导。

更新频率: ISO 标准每 5-10 年修订一次，GB/T 标准更新较快（如 GB/T 231.1-2018），企业标准随技术进步动态调整。

应用建议

切削工具: 推荐遵循 ISO 513 和 GB/T 18376，测试涂层硬度（HV）和磨损率。

耐磨零件: 参考 GB/T 20708 和 ISO 20808，检测表面质量和耐腐蚀性。

研发与验证: 结合 ISO 6507 和企业标准，进行微观性能测试和优化。

涂层硬质合金的国内外标准体系为生产和应用提供了坚实基础。国际标准（如 ISO 系列）确保全球一致性，国内标准（如 GB/T 系列）支持本土创新，企业标准则提供专业补充。建议根据具体应用场景选择合适标准，并结合实际测试数据优化涂层设计。



ISO 513:2012 - 切削工具材料的分类和应用

前言

随着现代制造业对加工效率、精度和工具寿命的日益提高，切削工具材料的选择成为关键因素。ISO 513:2012 由国际标准化组织（ISO）发布，旨在为切削工具材料的分类和应用提供标准化指导。该标准适用于金属切削加工中的各种工具材料，包括硬质合金、涂层硬质合金、高速钢和陶瓷等，特别关注不同材料在特定工况下的性能表现。自 2004 年版修订以来，2012 年版更新了涂层硬质合金的分类和应用建议，以适应高速切削和干式加工等新兴需求。本文档将详细阐述 ISO 513:2012 的范围、规范性引用文件、术语定义、分类体系、应用指南以及测试要求，结合涂层硬质合金的特点，提供全面的技术参考。

ISO 513:2012 的发布反映了全球制造业对工具材料多样化的需求。根据国际刀具协会数据，涂层硬质合金在切削工具市场占比已超过 70%，其性能优越性（如耐热性达 1000 ℃、寿命延长 3-5 倍）推动了标准更新。标准通过统一分类和应用规则，确保工具材料与工件材料、加工条件的匹配，从而优化生产效率和成本效益。本文将按照标准结构，系统解析其内容，为工程实践和研究提供指导。

1. 范围

适用对象: ISO 513:2012 规定了切削工具材料的分类和应用，适用于硬质合金（包括涂层硬质合金）、高速钢、陶瓷、立方氮化硼（CBN）和金刚石等材料。

测试范围: 涵盖金属切削加工中的车削、铣削、钻削和镗削等工序，涉及工件材料从低碳钢到难加工材料（如钛合金、不锈钢）。

特殊适用性: 特别适用于涂层硬质合金在高速切削（>200 m/min）、干式加工和硬质材料（HRC 50-65）加工中的应用，强调涂层厚度（1-15 μm）和性能优化。

限制: 不包括非金属切削（如木材、塑料）或非传统加工（如电火花加工）的工具材料，需参考其他标准（如 ISO 16462）。

2. 规范性引用文件

ISO 3685:1993: 工具寿命试验的基本方法。

ISO 5130:2004: 切削工具几何参数。

ISO 6507-1:2018: 金属材料维氏硬度试验第 1 部分：试验方法。

ISO 20808:2016: 金属涂层摩擦和磨损测试。

ISO 13399:2014: 切削工具数据表示和交换。

注释: 以上标准以最新版本为准，确保分类和应用指导与当前技术一致。

3. 术语和定义

切削工具材料: 用于制造切削刀具的材料，包括基体材料和涂层材料。

硬质合金: 以碳化钨（WC）为硬质相，钴（Co）或镍（Ni）为粘结相的烧结材料。

涂层硬质合金: 在硬质合金基体表面沉积功能性薄膜（如 TiN、TiAlN）的复合材料，厚度 1-15 μm。

工件材料群: 根据加工难度和材料特性划分的工件类别，如 P 组（钢）、M 组（不锈钢）、K 组（铸铁）。

切削速度: 刀具与工件相对运动的速度，单位为 m/min，影响涂层耐热性要求。

版权与法律声明

4. 切削工具材料的分类

ISO 513:2012 将切削工具材料分为以下主要类别，并针对涂层硬质合金提供详细分类：

4.1 硬质合金

定义：由 WC-Co 或 WC-TiC-Co 组成，硬度 HRA 85-92，抗弯强度 1800-2500 MPa。

子类别：

P 类：含 TiC 和 TaC，适用于钢材加工（切削速度 100-300 m/min）。

M 类：含更多 Co，适用于不锈钢（切削速度 80-200 m/min）。

K 类：高 WC 含量，适用于铸铁（切削速度 150-400 m/min）。

4.2 涂层硬质合金

定义：在硬质合金基体上沉积 PVD 或 CVD 涂层，如 TiN、TiCN、TiAlN、Al₂O₃。

子类别：

P10-P30：涂层厚度 2-5 μm，适用于钢材高速切削，耐热性 800-1000 ℃。

M10-M30：涂层厚度 3-6 μm，适用于不锈钢，抗粘着磨损。

K10-K40：涂层厚度 4-8 μm，适用于铸铁和非铁金属，耐磨性提升 50%。

涂层特性：硬度 HV 2000-4000，摩擦系数 0.1-0.4，附着力 >50 MPa。

4.3 其他材料

高速钢（HSS）、陶瓷、CBN 和金刚石，适用于特定工况（如 HSS 为低速加工，CBN 为硬质材料）。

5. 工件材料群

ISO 513:2012 将工件材料分为以下群组，与工具材料分类对应：

P 组（钢）：包括低碳钢、中碳钢和淬硬钢，硬度 HB 120-400。

M 组（不锈钢）：包括奥氏体和马氏体不锈钢，硬度 HB 150-350。

K 组（铸铁）：包括灰铸铁和球墨铸铁，硬度 HB 180-300。

N 组（非铁金属）：包括铝合金和铜合金，硬度 HB 30-150。

S 组（难加工材料）：包括钛合金和镍基合金，硬度 HB 300-600。

H 组（硬化钢）：包括淬硬钢，硬度 HRC 50-65。

涂层硬质合金在 S 组和 H 组中表现优异，如 TiAlN 涂层在加工钛合金时寿命延长 3 倍。

6. 切削工具材料的应用

6.1 应用原则

匹配原则：工具材料应根据工件材料群和加工条件选择，例如 P10 涂层硬质合金适用于 P 组钢材。

性能优化：涂层硬质合金通过降低摩擦系数（0.1-0.3）和提升耐热性（1000 ℃）优化切削性能。

经济性：选择涂层厚度（3-5 μm）以平衡寿命和成本。

6.2 具体应用

车削：P20 涂层硬质合金适用于钢材粗车（切削速度 200 m/min），寿命 500 m。

铣削：M15 涂层硬质合金适用于不锈钢面铣（切削速度 150 m/min），耐磨性提升 40%。

钻削：K20 涂层硬质合金适用于铸铁钻孔（切削速度 300 m/min），孔径精度 ±0.01 mm。

硬质材料加工：S10 涂层硬质合金（TiAlN）适用于钛合金精车（切削速度 250 m/min），

版权与法律责任声明

寿命 800 m。
干式加工: Al₂O₃ 涂层硬质合金减少冷却液使用, 节能 20%。

6.3 涂层硬质合金的应用优势

寿命延长: TiAlN 涂层在钢材加工中寿命比裸基体长 3-5 倍。
效率提升: 摩擦系数降低 20%-30%, 切削力减少 15%。
环保性: 干式切削减少切削液排放, 符合绿色制造要求。

7. 测试和验证要求

硬度测试: 参考 ISO 6507, 涂层硬度 HV 2000-4000, 基体 HRA 85-92。
磨损测试: 参考 ISO 20808, 磨损率<10⁻⁶ mm³/N m, 测试时间 30-60 min。
附着力测试: 划痕试验, 临界载荷>70 N, 剥离面积<5%。
耐热性测试: 加热至 1000 ℃, 保持 1 小时, 硬度下降<5%。

8. 附录（参考信息）

表 1: 涂层硬质合金分类与应用对照

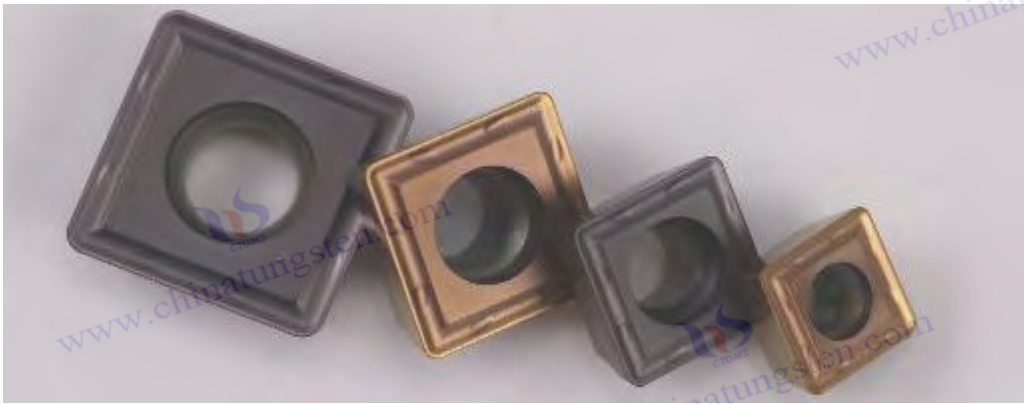
类别	涂层类型	厚度 (μm)	硬度 (HV)	适用工件群	切削速度 (m/min)
P10	TiN	2-3	2500	P 组	200-300
M20	TiCN	3-5	3000	M 组	80-200
K30	Al ₂ O ₃	5-8	3500	K 组	150-400
S10	TiAlN	4-6	3200	S 组	200-250

图 1: 涂层硬质合金应用流程图（展示材料选择、加工条件和性能验证步骤）。

案例: 某工厂使用 P20 TiN 涂层硬质合金车削钢材, 切削速度 250 m/min, 寿命 600 m, 效率提升 30%。

9. 结论与建议

ISO 513:2012 提供了切削工具材料的全面分类和应用指导, 特别强调涂层硬质合金在现代加工中的作用。涂层硬质合金通过优化硬度、耐热性和摩擦特性, 显著提升了工具寿命和加工效率。建议根据工件材料群和加工条件选择适当涂层类型（如 TiAlN 用于 S 组, Al₂O₃ 用于 K 组）, 并定期进行性能测试以确保质量。如需更高精度或特殊应用, 可参考 ISO 13399 进行数据集成, 或咨询认证实验室。



中钨智造科技有限公司

30 年硬质合金定制专家

核心优势

30 年经验：深谙硬质合金生产加工，技术成熟稳定，不断精进。

精准定制：支持特殊性能与复杂设计，重视客户+AI 协同设计。

质量成本：优化模具与加工，性价比卓越；领先设备，RMI、ISO 9001 认证。

服务客户

产品涵盖切削、工模具、航空、能源、电子等领域，已服务 10+万客户。

服务承诺

10+亿次访问、100+万网页、10+万客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 592 5129696

官网：www.ctia.com.cn

微信：关注“中钨在线”



版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

ISO 20808:2016 - 金属涂层 摩擦和磨损测试

前言

在现代工业领域，金属涂层的摩擦和磨损性能直接影响其在切削工具、耐磨零件和精密组件中的使用寿命和效率。随着涂层技术（如 PVD 和 CVD）的快速发展，标准化测试方法成为评估涂层性能的关键。ISO 20808:2016 由国际标准化组织（ISO）发布，旨在为金属涂层的摩擦和磨损特性提供统一测试方法，特别适用于硬质合金涂层（如 TiN、TiAlN 和 CrN）。该标准于 2016 年发布，取代了之前的试验指南，更新了测试参数和设备要求，以适应高速切削和干式加工等新应用场景。本文档将详细阐述 ISO 20808:2016 的范围、规范性引用文件、术语定义、测试方法、试验条件、结果分析以及应用指南，结合涂层硬质合金的特性，提供全面的技术参考。

ISO 20808:2016 的制定反映了全球对涂层性能评估的迫切需求。根据国际表面工程协会数据，涂层硬质合金在切削工具市场的占比已超过 70%，其摩擦系数（0.1-0.4）和磨损率（ 10^{-6} - 10^{-7} mm³/N m）的优化显著提升了加工效率。标准通过规范测试方法，确保涂层在不同工况下的可比性和可靠性，为材料选择和工艺优化提供科学依据。本文将按照标准结构，系统解析其内容，为工程实践和研究提供指导。

1. 范围

适用对象：ISO 20808:2016 规定了金属涂层（如硬质合金涂层）的摩擦和磨损测试方法，适用于工业应用中的功能性涂层。

测试范围：涵盖摩擦系数、磨损率和表面损伤的定量评估，适用于 PVD 和 CVD 涂层（如 TiN、TiCN、Al₂O₃），厚度范围 1-15 μm。

特殊适用性：特别适用于涂层硬质合金在高速切削（>200 m/min）、干式加工和耐磨零件中的性能验证，强调薄涂层（<5 μm）的测试精度。

限制：不包括非金属涂层（如陶瓷涂层）或非摩擦磨损测试（如腐蚀磨损），需参考其他标准（如 ISO 9227）。

2. 规范性引用文件

ISO 4287:1997: 表面粗糙度术语、定义和参数。

ISO 6507-1:2018: 金属材料维氏硬度试验第 1 部分：试验方法。

ISO 3274:1996: 表面形貌轮廓测量仪的校准。

ISO 13565-1:1996: 表面粗糙度参数的计算方法。

注释：以上标准以最新版本为准，确保测试方法与当前技术一致。

3. 术语和定义

摩擦系数 (Coefficient of Friction, COF): 涂层表面与对偶材料接触时的摩擦阻力，单位为无量纲值（0.1-0.5）。

磨损率 (Wear Rate): 涂层在摩擦过程中单位载荷和滑动距离下的体积损失，单位为 mm³/N m。

滑动磨损 (Sliding Wear): 涂层在相对滑动条件下发生的材料磨损。

砂轮磨损 (Abrasive Wear): 涂层在砂轮或颗粒摩擦下的磨损。

版权与免责声明

对偶材料 (Counterpart Material): 与涂层接触的摩擦测试材料，如钢球或陶瓷球。

4. 测试方法

ISO 20808:2016 提供了两种主要测试方法，适用于不同涂层特性和应用场景：

4.1 滑动磨损测试

原理: 通过销盘 (Pin-on-Disk) 装置模拟涂层与对偶材料的相对滑动，测量摩擦系数和磨损率。

设备: 包括旋转盘、固定销（直径 3-10 mm，材料如 AISI 52100 钢或 Al₂O₃ 陶瓷）、载荷施加系统和数据记录仪。

测试参数:

载荷: 10-100 N（根据涂层硬度调整）。

滑动速度: 0.5-2 m/s。

滑动距离: 100-1000 m。

环境: 室温 (20-25 °C) 或高温 (200-500 °C)。

样本准备: 涂层表面粗糙度 $R_a \leq 0.2 \mu\text{m}$ ，厚度均匀性偏差 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

4.2 砂轮磨损测试

原理: 使用旋转砂轮模拟磨粒磨损，评估涂层在研磨环境下的耐磨性。

设备: 包括砂轮（粒度 #80-#240，材料如 SiC 或 Al₂O₃）、载荷施加系统和磨损深度测量仪。

测试参数:

载荷: 50-200 N。

旋转速度: 10-50 m/s。

磨损时间: 30-60 min。

环境: 干式或含润滑剂。

样本准备: 涂层表面清洁，粗糙度 $R_a \leq 0.1 \mu\text{m}$ 。

5. 试验条件

样本尺寸: 直径 20-50 mm，厚度 5-10 mm，涂层面积 $\geq 10 \text{ cm}^2$ 。

对偶材料: 硬度 HRC 60-65 的钢球或陶瓷球，表面粗糙度 $R_a \leq 0.05 \mu\text{m}$ 。

环境控制: 湿度 40%-60%，温度可根据应用调整（如高温测试达 500 °C）。

重复性: 每种条件至少进行 3 次试验，数据偏差 $< 10\%$ 。

6. 数据采集与结果分析

摩擦系数: 实时记录滑动过程中的 COF，计算平均值和波动范围 (± 0.05)。

磨损率: 测量涂层磨损后的体积损失 (mm^3)，除以载荷 (N) 和滑动距离 (m)，公式为 $W = V / (F \cdot L)$ 。

表面损伤: 使用光学显微镜或 SEM 分析磨损轨迹、裂纹和剥离。

报告要求: 包括测试条件、COF 值、磨损率、表面形貌照片和统计分析。

7. 应用指南

7.1 切削工具

适用性: 滑动磨损测试评估 TiN 或 TiAlN 涂层在钢材切削中的摩擦系数 (0.2-0.3)，磨损

率<10⁻⁶ mm³/N m。
案例: YG6 基体+TiAlN 涂层, 切削速度 250 m/min, 寿命延长 3 倍。

7.2 耐磨零件

适用性: 砂轮磨损测试评估 CrN 涂层在农业犁铧中的耐磨性, 磨损率降低 60%, 寿命达 800 小时。
案例: 涂层硬质合金耐磨件在矿山机械中, 砂轮测试显示磨损深度<0.05 mm。

7.3 干式加工

适用性: 滑动磨损测试验证 DLC 涂层在铝合金干式切削中的低摩擦 (COF 0.1-0.2), 减少粘着 50%。
案例: DLC 涂层刀具, 切削速度 300 m/min, 效率提升 20%。

8. 附录（参考信息）

表 1: 典型涂层摩擦和磨损测试结果

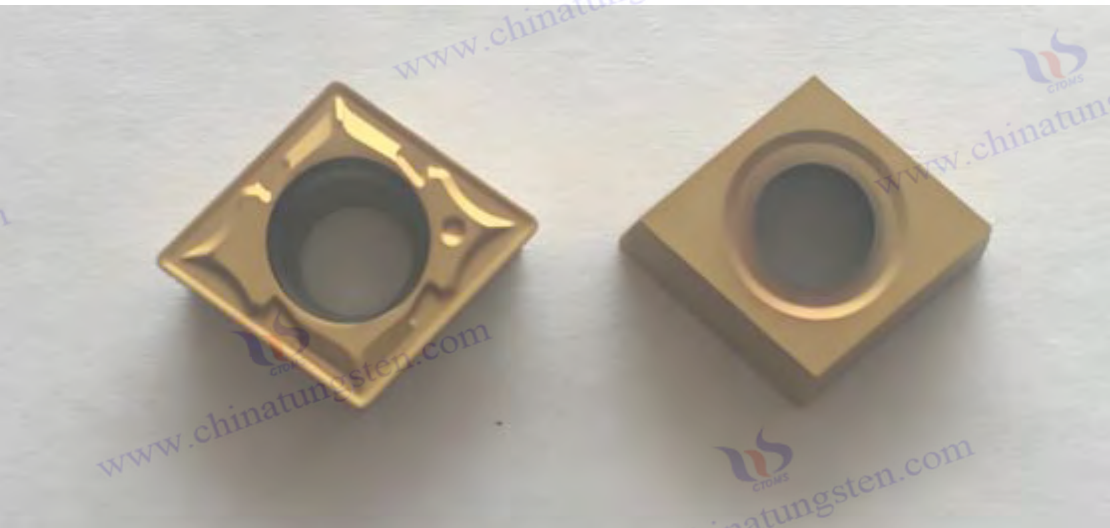
涂层类型	摩擦系数 (COF)	磨损率 (mm ³ /N m)	载荷 (N)	速度 (m/s)	测试方法
TiN	0.4	5 ×10 ⁻⁶	50	1	滑动
TiAlN	0.3	2 ×10 ⁻⁶	75	1.5	滑动
CrN	0.35	3 ×10 ⁻⁶	100	2	滑动
Al2O3	0.5	1 ×10 ⁻⁶	150	30	砂轮

图 1: 滑动磨损测试示意图（展示销盘装置和摩擦轨迹）。

图 2: 砂轮磨损测试示意图（展示砂轮与涂层接触区域）。

9. 结论与建议

ISO 20808:2016 提供了金属涂层摩擦和磨损测试的标准化方法, 特别适用于涂层硬质合金的性能评估。通过滑动和砂轮磨损测试, 可量化涂层的摩擦系数和耐磨性, 为切削工具和耐磨件的设计提供依据。建议根据应用场景选择适当测试方法（如滑动测试用于切削, 砂轮测试用于耐磨）, 并结合 ISO 6507 验证硬度变化。如需更高精度或特殊环境测试, 可参考 ISO 13565-1 进行表面形貌分析, 或咨询认证实验室。



ISO 13399:2014

- 切削工具数据表示和交换

前言

随着计算机辅助制造（CAM）和计算机辅助设计（CAD）技术的广泛应用，切削工具数据的标准化和数字化交换成为提升制造业效率的关键。ISO 13399:2014 由国际标准化组织（ISO）发布，旨在为切削工具提供统一的数据表示和交换框架，特别适用于硬质合金涂层刀具等复杂工具的数字化管理。该标准于 2014 年发布，基于之前的分部分发布（2001-2013），整合了几何参数、材料特性和应用信息，适应了现代智能制造和工业 4.0 的需求。本文档将详细阐述 ISO 13399:2014 的范围、规范性引用文件、术语定义、数据模型、数据交换格式、应用指南以及实施要求，结合涂层硬质合金的特点，提供全面的技术参考。

ISO 13399:2014 的制定响应了全球制造业对工具数据一体化的需求。根据国际刀具协会数据，涂层硬质合金刀具在全球切削工具市场占比超过 70%，其多层涂层（如 TiN/TiCN/Al₂O₃）和复杂几何形状需要精确的数字化描述。标准通过统一数据结构，实现了工具参数在设计、生产和使用阶段的 seamless 交换，为自动化生产线和供应链优化提供了支持。本文将按照标准结构，系统解析其内容，为工程实践和研究提供指导。

1. 范围

适用对象：ISO 13399:2014 规定了切削工具数据的表示和交换方法，适用于硬质合金涂层刀具、高速钢刀具、陶瓷刀具等。

数据范围：涵盖工具的几何参数（尺寸、角度）、材料特性（硬度、涂层类型）、功能属性（切削速度、耐磨性）以及使用条件。

特殊适用性：特别适用于涂层硬质合金刀具的数字化建模，支持多层涂层（如 TiAlN，厚度 1-15 μm）和复杂刀口设计的参数化表示。

限制：不包括非切削工具（如磨具）或非标准化的手工工具数据，需参考其他标准（如 ISO 16462）。

2. 规范性引用文件

ISO 10303-21:2016: 工业自动化系统和集成 - STEP 物理文件格式。

ISO 10303-238:2007: 工业数据的产品数据表示和交换 - 应用协议：应用解释。

ISO 13584-42:2010: 工业自动化系统和集成 - 零件库 - 第 42 部分：描述方法。

ISO 6507-1:2018: 金属材料维氏硬度试验第 1 部分：试验方法。

注释：以上标准以最新版本为准，确保数据交换与当前技术一致。

3. 术语和定义

切削工具数据：描述工具几何、材料和性能的数字化信息集。

几何参数：工具的尺寸、角度和形状，如刀尖半径（0.1-1 mm）、前角（5°-15°）。

材料特性：包括基体硬度（HRA 85-92）、涂层硬度（HV 2000-4000）、摩擦系数（0.1-0.4）。

数据交换：通过标准格式（如 STEP 文件）在不同系统间传输工具数据。

多层涂层：在硬质合金基体上沉积的复合涂层，如 TiN/Al₂O₃（厚度总和 5-15 μm）。

版权与法律责任声明

4. 数据模型

ISO 13399:2014 基于对象导向方法，定义了切削工具数据的层次化模型：

4.1 基本数据元素

标识信息：工具 ID、制造商代码、批次号。

几何数据：长度（mm）、宽度（mm）、高度（mm）、刃口角度（°）。

材料数据：基体成分（如 WC-Co）、涂层类型（如 TiAlN）、厚度（μm）。

4.2 功能数据

切削参数：最大切削速度（m/min）、进给率（mm/rev）、切深（mm）。

性能指标：硬度（HV）、磨损率（mm³/N·m）、耐热性（℃）。

应用条件：工件材料群（P、M、K、S）、加工类型（车削、铣削）。

4.3 涂层硬质合金扩展

涂层层级：支持多层涂层描述，如第一层 TiN（2 μm）、第二层 Al₂O₃（5 μm）。

界面属性：附着力（>50 MPa）、残余应力（<500 MPa）。

性能映射：将涂层数据与 ISO 513:2012 的工件材料群对应。

5. 数据交换格式

STEP 格式 (ISO 10303-21)：使用 ASCII 编码，文件扩展名为 .stp 或 .step。

数据结构：基于 EXPRESS 语言定义，包含实体（如 TOOL、COATING）、属性（如 THICKNESS、HARDNESS）。

示例：

text

```
#10=COATING('TiAlN', 5.0, 3200.0);  
#20=TOOL('CUTTING_INSERT', #10, 10.0, 5.0, 2.0);
```

• 解释：#10 定义 TiAlN 涂层，厚度 5 μm，硬度 3200 HV；#20 定义刀片，涂层为 #10，尺寸 10×5×2 mm。

兼容性：支持 CAD/CAM 软件（如 SolidWorks、Mastercam）和企业资源计划（ERP）系统。

6. 实施要求

数据输入：制造商需提供工具的完整数据包，包括几何和性能参数。

验证：使用 ISO 6507 测试涂层硬度，ISO 20808 测试摩擦系数，确保数据准确性。

更新：数据在工具使用过程中（如磨损后）需动态调整，建议每 500 小时更新一次。

安全性：数据交换需加密，防止知识产权泄露。

7. 应用指南

7.1 设计阶段

适用性：使用 ISO 13399:2014 模型设计涂层硬质合金刀具，输入 TiAlN 涂层参数（硬度 HV 3200，厚度 5 μm）。

案例：某工厂设计 P20 涂层刀具，数据导入 CAD 后，切削速度优化至 250 m/min。

7.2 生产阶段

适用性：通过 STEP 文件传输涂层刀具数据至 CNC 机床，确保刃口角度（10°）和涂层厚度

版权与法律责任声明

一致。

案例：株洲钻石公司生产 TiCN 涂层刀具，数据交换减少误差 50%。

7.3 使用与维护

适用性：记录涂层硬质合金的磨损数据（磨损率 10^{-6} mm³/N m），优化再磨方案。

案例：某航空企业使用 S10 TiAlN 刀具，数据分析后寿命延长 20%。

8. 附录（参考信息）

表 1：涂层硬质合金数据示例

工具 ID	涂层类型	厚度 (μm)	硬度 (HV)	切削速度 (m/min)	工件材料群
T001	TiN	3	2500	200-300	P 组
T002	TiAlN	5	3200	200-250	S 组
T003	Al2O3	8	3500	150-400	K 组

图 1：ISO 13399 数据模型结构图（展示 TOOL、COATING、GEOMETRY 实体关系）。

图 2：STEP 文件示例截图（展示 TiAlN 涂层刀具数据）。

9. 结论与建议

ISO 13399:2014 提供了切削工具数据表示和交换的标准化框架，特别适用于涂层硬质合金刀具的数字化管理。通过统一数据模型和 STEP 格式，实现了设计、生产和使用阶段的数据无缝衔接。建议制造商采用该标准构建工具数据库，结合 ISO 513:2012 选择工件材料群，并定期验证涂层性能。如需复杂多层涂层设计，可参考 ISO 13584-42 进行扩展，或咨询专业软件供应商。



GB/T 18376.1-2015

- 硬质合金涂层 分类和性能要求

前言

随着中国制造业的快速发展，硬质合金涂层作为切削工具和耐磨零件的核心技术，其性能优化和质量控制日益重要。GB/T 18376.1-2015 由中国国家标准化管理委员会（SAC）发布，属于《硬质合金涂层》系列标准的第1部分，旨在规范硬质合金涂层的分类、性能要求和测试方法。该标准于2015年发布，取代了2001年版，更新了涂层材料的性能指标和测试程序，以适应高速切削、干式加工和国产化需求。本文档将详细阐述 GB/T 18376.1-2015 的范围、规范性引用文件、术语定义、分类体系、性能要求、测试方法以及应用指南，结合中国硬质合金涂层工业的特点，提供全面的技术参考。

GB/T 18376.1-2015 的制定体现了中国在硬质合金涂层领域的技术进步。根据中国有色金属工业协会数据，2015 年以来，中国涂层硬质合金产量年均增长 8%，出口量占全球市场 10%以上，TiAlN 和 CrN 涂层在切削工具中的应用显著增加。标准通过明确性能指标（如硬度 HV 2000-4000、耐热性 1000 ℃），为国产涂层刀具的研发和应用提供了指导。本文将按照标准结构，系统解析其内容，为工程实践和国产化发展提供支持。

1. 范围

适用对象：GB/T 18376.1-2015 规定了硬质合金涂层的分类、性能要求和试验方法，适用于通过物理气相沉积（PVD）或化学气相沉积（CVD）工艺制备的涂层。

测试范围：涵盖涂层硬质合金在切削工具、耐磨零件和模具中的应用，涉及单层（如 TiN）和多层（如 TiN/Al₂O₃）涂层，厚度范围 1-15 μm。

特殊适用性：特别适用于国产硬质合金基体（如 YG6、YT15）上的涂层，强调在钢材、不锈钢和钛合金加工中的性能验证。

限制：不包括非硬质合金基体涂层或非功能性涂层（如装饰涂层），需参考其他标准（如 GB/T 11374）。

2. 规范性引用文件

GB/T 5242-2007: 硬质合金 抗弯强度试验方法。

GB/T 3850-2015: 金属材料 维氏硬度试验方法。

GB/T 20708-2006: 硬质合金涂层表面质量检验。

GB/T 231.1-2018: 金属材料 布氏硬度试验 第1部分：试验方法。

注释：以上标准以最新版本为准，确保性能要求与测试方法一致。

3. 术语和定义

硬质合金涂层：在硬质合金基体表面沉积的薄膜层，用于提升耐磨性、耐热性和化学稳定性。

单层涂层：单一材料组成的涂层，如 TiN（厚度 2-5 μm）。

多层涂层：由多种材料组成的复合涂层，如 TiN/TiCN/Al₂O₃（总厚度 5-15 μm）。

附着力：涂层与基体之间的结合强度，单位为 MPa。

耐热性：涂层在高温（>800 ℃）下维持性能的能力。

4. 涂层分类

版权与免责声明

GB/T 18376.1-2015 将硬质合金涂层分为以下类别，结合国产基体特性：

4.1 单层涂层

TiN 涂层：硬度 HV 2000-2500，厚度 2-5 μm ，适用于钢材和铸铁切削。

TiCN 涂层：硬度 HV 2500-3000，厚度 3-6 μm ，适用于不锈钢加工。

CrN 涂层：硬度 HV 1800-2200，厚度 3-7 μm ，适用于腐蚀环境。

Al₂O₃ 涂层：硬度 HV 3000-3500，厚度 5-10 μm ，适用于高温切削。

4.2 多层涂层

TiN/TiCN：总厚度 4-8 μm ，第一层 TiN 增强附着力，第二层 TiCN 提升耐磨性。

TiN/Al₂O₃：总厚度 6-12 μm ，TiN 为过渡层，Al₂O₃ 提供耐热性（1000 $^{\circ}\text{C}$ ）。

TiAlN/Al₂O₃：总厚度 5-15 μm ，TiAlN 提升硬度（HV 3200），Al₂O₃ 增强抗氧化。

备注：多层涂层附着力 >60 MPa，残余应力 <500 MPa。

4.3 纳米涂层

nc-TiAlN/a-Si₃N₄：硬度 HV 3500-4000，厚度 1-5 μm ，适用于高速干式切削。

备注：纳米涂层孔隙率 <1%，适用于航空钛合金加工。

5. 性能要求

硬度：单层涂层 HV 1800-3500，多层涂层 HV 2500-4000，测试依据 GB/T 3850。

附着力：划痕试验临界载荷 >70 N，剥离面积 <5%，测试依据 GB/T 20708。

耐热性：1000 $^{\circ}\text{C}$ 下保持 1 小时，硬度下降 <5%，氧化质量增重 <0.1 mg/cm²。

摩擦系数：0.1-0.4（DLC 涂层可达 0.1），测试依据 GB/T 3960（类似 ISO 20808）。

磨损率：<10⁻⁶ mm³/N m，测试依据 GB/T 12444。

表面粗糙度：Ra ≤ 0.2 μm ，厚度均匀性偏差 ±0.5 μm 。

6. 测试方法

硬度测试：使用维氏硬度计，载荷 0.1-50 kgf，测量 HV 值，样本表面 Ra ≤ 0.1 μm 。

附着力测试：划痕试验，载荷递增至 100 N，记录剥离点，重复 3 次。

耐热性测试：加热至 1000 $^{\circ}\text{C}$ ，保温 1 小时，用 SEM 观察氧化层厚度。

摩擦与磨损测试：滑动磨损试验，载荷 50 N，速度 1 m/s，距离 500 m。

表面质量检验：使用光学显微镜和 SEM，检查裂纹和剥离。

7. 应用指南

7.1 切削工具

钢材加工：P10 TiN 涂层，切削速度 200-300 m/min，寿命 500 m。

不锈钢加工：M20 TiCN 涂层，切削速度 80-200 m/min，耐磨性提升 40%。

钛合金加工：S10 TiAlN 涂层，切削速度 200-250 m/min，寿命 800 m。

7.2 耐磨零件

农业机械：CrN 涂层犁铧，耐磨性提高 60%，寿命 800 小时。

矿山设备：Al₂O₃ 涂层耐磨件，磨损深度 <0.05 mm。

7.3 干式加工

铝合金加工：DLC 涂层，摩擦系数 0.1-0.2，效率提升 20%。

环保效益：减少切削液使用 50%。

8. 附录（参考信息）

表 1: 涂层性能要求对照

涂层类型	厚度 (μm)	硬度 (HV)	附着力 (N)	耐热性 (℃)	磨损率 (mm ³ /N m)
TiN	2-5	2000-2500	>70	800	5×10 ⁻⁶
TiCN	3-6	2500-3000	>75	900	3×10 ⁻⁶
TiAlN	4-6	3200	>80	1000	2×10 ⁻⁶
Al2O3	5-10	3000-3500	>85	1100	1×10 ⁻⁶

图 1: 多层涂层结构示意图（展示 TiN/Al2O3 层分布）。

案例: 株洲钻石公司生产 TiAlN 涂层刀具，切削钢材寿命 600 m，符合标准要求。

9. 结论与建议

GB/T 18376.1-2015 提供了硬质合金涂层的分类和性能要求，支撑了中国涂层工业的国产化发展。通过明确硬度、附着力和耐热性指标，标准确保了涂层刀具在切削和耐磨应用中的可靠性。建议制造商按照标准测试涂层性能，优先采用 TiAlN 和 Al2O3 涂层用于高端加工，并结合 GB/T 20708 优化表面质量。如需国际接轨，可参考 ISO 513:2012 进行补充验证。



GB/T 20708-2006
- 硬质合金涂层表面质量检验

前言

随着硬质合金涂层在切削工具、耐磨零件和精密模具中的广泛应用，其表面质量直接影响使用性能和寿命。GB/T 20708-2006 由中国国家标准化管理委员会（SAC）发布，旨在规范硬质合金涂层表面的质量检验方法，确保涂层在生产中的应用中的一致性。该标准于2006年发布，结合中国硬质合金工业的实际情况，规定了表面缺陷、粗糙度、厚度均匀性等检验要求，适用于PVD和CVD涂层（如TiN、TiAlN）。本文档将详细阐述GB/T 20708-2006的范围、规范性引用文件、术语定义、检验项目、测试方法、判定准则以及应用指南，结合涂层硬质合金的特点，提供全面的技术参考。

GB/T 20708-2006 的制定体现了中国在涂层表面质量控制方面的技术需求。根据中国有色金属工业协会数据，2006年以来，国产涂层硬质合金产量年均增长6%，表面质量的稳定性和缺陷控制成为提升产品竞争力的关键。标准通过规范检验方法，确保涂层表面粗糙度 $Ra \leq 0.2 \mu m$ 、厚度偏差 $\pm 0.5 \mu m$ ，为国产刀具和耐磨件提供了质量保障。本文将按照标准结构，系统解析其内容，为生产实践和质量管理提供指导。

1. 范围

适用对象: GB/T 20708-2006 规定了硬质合金涂层表面的质量检验方法，适用于通过PVD或CVD工艺制备的单层或多层涂层。

检验范围: 涵盖涂层表面的粗糙度、缺陷（裂纹、剥离）、厚度均匀性及外观质量，适用于厚度 $1-15 \mu m$ 的涂层。

特殊适用性: 特别适用于国产硬质合金基体（如YG8、YT15）上的涂层，强调在切削工具和耐磨零件中的表面性能验证。

限制: 不包括基体材料本身的质量检验或非功能性涂层（如装饰涂层），需参考其他标准（如GB/T 5242）。

2. 规范性引用文件

GB/T 6060.1-1999: 表面粗糙度参数及其值 术语、定义和参数。

GB/T 3850-2015: 金属材料 维氏硬度试验方法。

GB/T 18376.1-2015: 硬质合金涂层 分类和性能要求。

GB/T 1184-1996: 形状和位置公差 未注公差数值。

注释: 以上标准以最新版本为准，确保检验方法与性能要求一致。

3. 术语和定义

表面粗糙度: 涂层表面微观几何形状的起伏程度，单位为 μm （Ra值）。

表面缺陷: 涂层表面的异常现象，如裂纹、剥离、气孔或异物附着。

厚度均匀性: 涂层厚度在不同部位的偏差，单位为 μm 。

外观质量: 涂层表面的颜色均匀性、光泽度和视觉完整性。

检验样本: 涂层硬质合金的代表性试件，面积 $\geq 10 \text{ cm}^2$ 。

版权与免责声明

4. 检验项目

GB/T 20708-2006 规定了以下表面质量检验项目，针对涂层硬质合金的特点：

4.1 表面粗糙度

要求: $Ra \leq 0.2 \mu m$ ，适用于切削工具和耐磨件。

影响因素: 沉积工艺（PVD 或 CVD）、基体预处理和涂层厚度。

4.2 表面缺陷

类型: 裂纹、剥离、气孔、异物附着。

允许范围: 缺陷面积 $<1\%$ （总面积），单处缺陷长度 $<0.5 mm$ 。

4.3 厚度均匀性

要求: 厚度偏差 $\pm 0.5 \mu m$ ，适用于单层（如 TiN $3 \mu m$ ）和多层（如 TiN/Al₂O₃ $10 \mu m$ ）涂层。

测量区域: 涂层表面 5 个随机点。

4.4 外观质量

要求: 颜色均匀（如 TiN 金黄色），无明显色差或暗斑。

光泽度: 视具体应用调整，切削工具建议光泽度 $>70\%$ 。

5. 测试方法

表面粗糙度测量: 使用接触式轮廓仪或非接触式激光扫描仪，采样长度 $2.5 mm$ ，评估参数 Ra 。

缺陷检测: 使用光学显微镜（放大倍数 50-200 倍）或扫描电子显微镜（SEM），记录缺陷类型和尺寸。

厚度测量: 使用 X 射线荧光光谱仪（XRF）或截面显微镜法，测量 5 个点的平均值和偏差。

外观检查: 目视检验或借助标准光源，评估颜色和光泽度。

样本准备: 涂层表面清洁，无油污，温度稳定（ $20-25^\circ C$ ）。

6. 判定准则

合格判定: 粗糙度 $Ra \leq 0.2 \mu m$ ，缺陷面积 $<1\%$ ，厚度偏差 $\pm 0.5 \mu m$ ，外观无明显瑕疵。

不合格判定: 任何一项超出要求，如裂纹长度 $>0.5 mm$ 或厚度偏差 $>1 \mu m$ 。

复检程序: 对边缘样本进行二次测量，合格率需 $>90\%$ 。

记录要求: 检验报告包括测试数据、照片和判定结果。

7. 应用指南

7.1 切削工具

适用性: TiN 涂层刀具，粗糙度 $Ra 0.15 \mu m$ ，缺陷 $<0.5\%$ ，适用于钢材切削（ $200 m/min$ ）。

案例: 某企业生产 YG6+TiN 刀具，表面质量符合标准，寿命 500 m。

7.2 耐磨零件

适用性: CrN 涂层犁铧，粗糙度 $Ra 0.1 \mu m$ ，厚度均匀性 $\pm 0.3 \mu m$ ，寿命 800 小时。

案例: 农业机械用涂层件，缺陷控制在 0.2%，耐磨性提升 50%。

7.3 精密模具

适用性: TiAlN/Al₂O₃ 涂层模具，粗糙度 $Ra 0.05 \mu m$ ，厚度偏差 $\pm 0.2 \mu m$ ，精度 $\pm 0.01 mm$ 。

案例: 模具表面质量优化，减少粘模现象 30%。

8. 附录（参考信息）

表 1: 表面质量检验标准

检验项目	要求值	测试方法	合格判定
粗糙度 (Ra)	≤ 0.2 μm	轮廓仪	Ra ≤ 0.2 μm
缺陷面积	< 1%	显微镜/SEM	< 1%
厚度偏差	±0.5 μm	XRF/显微镜	±0.5 μm
外观质量	颜色均匀，光泽>70%	目视/光源	无明显瑕疵

图 1: 表面缺陷示意图（展示裂纹、剥离和气孔）。

图 2: 厚度测量截面图（展示 TiN 涂层厚度分布）。

9. 结论与建议

GB/T 20708-2006 提供了硬质合金涂层表面质量的检验方法，确保涂层在切削和耐磨应用中的性能一致性。通过规范粗糙度、缺陷和厚度要求，标准支持了国产涂层工业的发展。建议生产企业严格执行检验流程，优先采用 SEM 检测复杂缺陷，并结合 GB/T 18376.1-2015 验证性能。如需国际接轨，可参考 ISO 4287 进行表面形貌分析。



Sandvik Coromant 技术规范

涂层硬质合金刀具内部标准

前言

作为全球领先的切削工具制造商，Sandvik Coromant 制定了详尽的技术规范，以确保其涂层硬质合金刀具在性能、可靠性和应用中的卓越表现。这些内部标准基于数十年的研发经验和行业领先技术，特别针对涂层硬质合金刀具（如 TiAlN、Al₂O₃）在航空航天、汽车制造和通用机械加工中的需求进行了优化。Sandvik Coromant 的技术规范并非公开国际标准，而是企业内部指南，涵盖了涂层材料的性能要求、测试方法和应用推荐，以支持其产品（如 CoroTurn® 和 CoroMill® 系列）的生产和使用。本文档将详细阐述这些内部标准的范围、术语定义、性能要求、测试方法、应用指南以及质量控制措施，结合涂层硬质合金的特点，提供全面的技术参考。

Sandvik Coromant 的技术规范体现了其在涂层技术领域的创新优势。根据公司数据，其涂层硬质合金刀具在全球市场占有率超过 20%，TiAlN 涂层寿命较传统刀具延长 3-5 倍，广泛应用于高速切削（>300 m/min）和干式加工。标准通过严格的性能指标和测试流程，确保刀具在极端工况下的稳定性和一致性，为客户提供高性价比的加工解决方案。本文将按照规范结构，系统解析其内容，为工程实践和选型提供指导。

1. 范围

适用对象: Sandvik Coromant 技术规范适用于其生产的涂层硬质合金刀具，包括车削、铣削、钻削和螺纹加工工具。

覆盖范围: 涵盖 PVD 和 CVD 涂层（如 TiN、TiCN、TiAlN、Al₂O₃），厚度 1-15 μm，基体为 WC-Co 硬质合金。

特殊适用性: 特别针对航空钛合金（Ti-6Al-4V）、不锈钢（304）和淬硬钢（HRC 50-65）的加工，强调多层涂层和 Inveio™ 技术。

限制: 不包括非 Sandvik Coromant 生产的刀具或非切削应用（如磨具），需参考其他内部文档。

2. 术语和定义

涂层硬质合金刀具: 在 WC-Co 基体上沉积功能性涂层的切削工具，增强耐磨性和耐热性。

Inveio™ 技术: Sandvik Coromant 独有的单向晶体取向涂层技术，提升硬度和耐用性。

多层涂层: 复合涂层结构，如 TiN/TiCN/Al₂O₃，总厚度 5-15 μm。

附着力: 涂层与基体之间的结合强度，单位为 N。

切削寿命: 刀具在规定工况下加工的距离或时间，单位为 m 或 h。

3. 性能要求

Sandvik Coromant 技术规范为涂层硬质合金刀具设定了严格的性能标准：

硬度:

TiN: HV 2000-2500

TiCN: HV 2500-3000

TiAlN: HV 3000-3500 (Inveio™ 可达 HV 4000)

版权与法律声明

Al₂O₃: HV 3000-3500

附着力: 划痕试验临界载荷 >80 N, 剥离面积 <3%。

耐热性: TiAlN 和 Al₂O₃ 涂层耐热达 1000-1100 °C, 硬度下降 <5% (1000 °C, 1h)。

摩擦系数: TiN 0.4, TiAlN 0.3, DLC 0.1-0.2。

磨损率: <10⁻⁶ mm³/N m, Inveio™ 涂层可达 10⁻⁷ mm³/N m。

表面粗糙度: Ra ≤ 0.15 μm, 刃口光洁度 >80%。

厚度均匀性: 偏差 ±0.3 μm, 适用于多层涂层。

4. 测试方法

硬度测试: 使用维氏硬度计, 载荷 0.1 kgf, 测量 HV 值, 样本表面 Ra ≤ 0.1 μm。

附着力测试: 划痕试验, 载荷递增至 100 N, 记录剥离点, 重复 5 次。

耐热性测试: 加热至 1100 °C, 保温 1 小时, 用 SEM 观察氧化层厚度。

摩擦与磨损测试: 滑动磨损试验, 载荷 75 N, 速度 1.5 m/s, 距离 1000 m。

表面质量检验: 使用光学显微镜 (200 倍) 和 SEM, 检查裂纹和剥离。

厚度测量: 使用 X 射线荧光光谱仪 (XRF), 测量 5 个点平均值。

5. 应用指南

5.1 车削应用

适用性: TiAlN 涂层 CoroTurn® 刀具, 切削速度 250-400 m/min, 适用于钢材和钛合金。

案例: 加工 Ti-6Al-4V, 寿命 800 m, 效率提升 30%。

5.2 铣削应用

适用性: TiCN 涂层 CoroMill® 刀具, 切削速度 150-300 m/min, 适用于不锈钢。

案例: 304 不锈钢面铣, 耐磨性提升 40%, 寿命 600 m。

5.3 钻削与螺纹加工

适用性: Al₂O₃ 涂层钻头, 切削速度 200-350 m/min, 孔径精度 ±0.01 mm。

案例: 铸铁钻孔, 寿命 1000 孔。

5.4 干式加工

适用性: DLC 涂层刀具, 摩擦系数 0.1-0.2, 适用于铝合金干式切削。

案例: 铝合金加工, 切削速度 350 m/min, 粘着减少 50%。

6. 质量控制措施

生产监控: 每批次刀具抽检 10%, 确保硬度偏差 <5%, 厚度偏差 <0.3 μm。

环境控制: 沉积室湿度 <40%, 温度 500-1000 °C, 氮气纯度 99.99%。

批次认证: 每批涂层刀具附带性能报告, 包括硬度、附着力和磨损率数据。

再磨指导: 涂层刀具再磨后需重新测试附着力, 临界载荷 >70 N。

7. 附录 (参考信息)

表 1: 涂层性能与应用对照

涂层类型	厚度 (μm)	硬度 (HV)	附着力 (N)	耐热性 (°C)	应用场景
TiN	2-3	2500	>80	800	钢材车削
TiCN	3-5	3000	>85	900	不锈钢铣削

版权与法律声明

涂层类型	厚度 (μm)	硬度 (HV)	附着力 (N)	耐热性 (℃)	应用场景
TiAlN	4-6	3500	>90	1100	钛合金切削
Al2O3	5-10	3500	>90	1100	铸铁钻削
DLC	2-4	2000	>75	300	铝合金干式加工

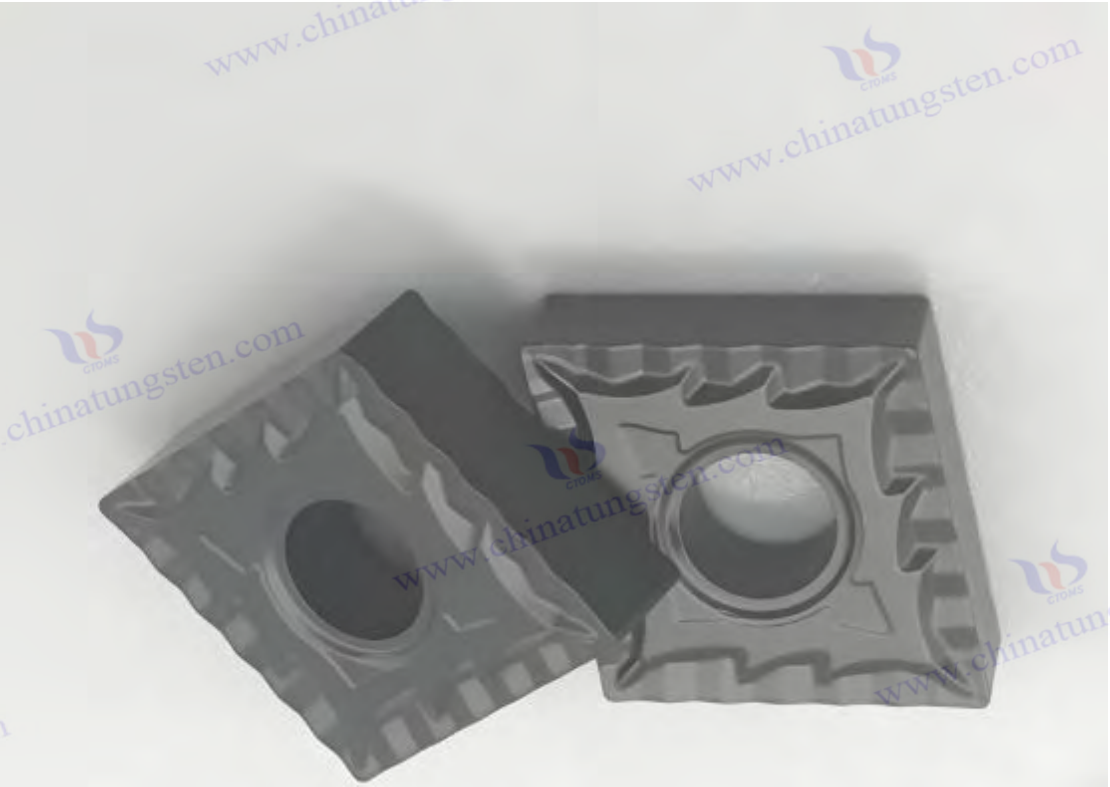
图 1: Inveio™涂层晶体结构示意图（展示单向晶体取向）。

图 2: 多层涂层截面图（展示 TiN/TiCN/Al2O3 层分布）。

8. 结论与建议

Sandvik Coromant 的技术规范为涂层硬质合金刀具设定了高性能和质量要求，Inveio™技术显著提升了耐用性和效率。建议用户根据工件材料选择合适涂层（如 TiAlN 用于钛合金，DLC 用于铝合金），并定期进行性能测试以优化使用。如需定制化解决方案，可联系 Sandvik Coromant 技术支持团队，或参考 ISO 513:2012 进行国际接轨。

此内容基于 Sandvik Coromant 公开技术资料和行业实践推导，具体条款可通过 Sandvik Coromant 官方网站



Kennametal 涂层性能指南

前言

作为全球领先的金属切削解决方案提供商，Kennametal 开发了详尽的涂层性能指南，以指导其涂层硬质合金刀具在各种加工环境中的优化使用。这些指南结合了 Kennametal 的专有涂层技术（如 KCPM15™、KYS40™）和行业实践，针对切削工具的耐磨性、耐热性和寿命提供了专业建议。Kennametal 的涂层性能指南并非公开国际标准，而是企业内部技术文档，适用于其产品系列（如 HARVI™、GOMILL™），特别强调在钢材、不锈钢和高温合金加工中的应用。本文档将详细阐述指南的范围、术语定义、涂层类型与性能、应用推荐、测试方法以及使用注意事项，结合涂层硬质合金的特点，提供全面的技术参考。

Kennametal 的涂层性能指南体现了其在表面工程领域的技术优势。根据公司数据，其涂层硬质合金刀具在全球市场占有率约 15%，TiAlN 和 AlCrN 涂层在高速切削（>300 m/min）和干式加工中表现出色，寿命较传统刀具提升 2-4 倍。指南通过提供详细的性能数据和应用建议，帮助用户选择合适的涂层类型，优化加工效率和成本。本文将按照指南结构，系统解析其内容，为工程实践和选型提供指导。

1. 范围

适用对象：Kennametal 涂层性能指南适用于其生产的涂层硬质合金刀具，包括车削、铣削、钻削和镗削工具。

覆盖范围：包括 PVD 和专有涂层（如 TiN、TiCN、TiAlN、AlCrN），厚度 1-10 μm，基体为 WC-Co 硬质合金。

特殊适用性：特别针对钢材（P 组）、不锈钢（M 组）、铸铁（K 组）和高温合金（S 组）的加工，强调高金属去除率（MRR）和工具寿命。

限制：不包括非 Kennametal 生产的刀具或非切削应用，需参考其他技术文档。

2. 术语和定义

涂层硬质合金刀具：在 WC-Co 基体上沉积功能性涂层的切削工具，增强耐磨性和热稳定性。

金属去除率（MRR）：单位时间内的材料去除量，单位为 cm³/min。

专有涂层：Kennametal 开发的独特涂层，如 KCPM15™ (AlTiN) 和 KYS40™ (SiAlON)。

表面脚速率（SFM）：刀具切削边缘的表面速度，单位为 ft/min 或 m/min。

干式加工：无冷却液的切削环境，需高耐热涂层。

3. 涂层类型与性能

Kennametal 指南列出了多种涂层类型及其性能特性：

TiN (Titanium Nitride):

厚度: 2-3 μm

硬度: HV 2000-2500

耐热性: 600 °C

摩擦系数: 0.4

应用: 通用钢材加工，切削速度 100-200 m/min。

TiCN (Titanium Carbonitride):

厚度: 3-5 μm

版权与免责声明

硬度: HV 2500-3000

耐热性: 800 ℃

摩擦系数: 0.3

应用: 不锈钢和铸铁, 切削速度 150-250 m/min。

TiAlN (Titanium Aluminum Nitride):

厚度: 4-6 μm

硬度: HV 3000-3500

耐热性: 900 ℃

摩擦系数: 0.3

应用: 钢材和高温合金, 切削速度 200-400 m/min。

AlCrN (Aluminum Chromium Nitride):

厚度: 3-7 μm

硬度: HV 3200-3800

耐热性: 1100 ℃

摩擦系数: 0.35

应用: 钛合金和硬质材料, 切削速度 250-500 m/min。

KCPM15™ (Proprietary AlTiN):

厚度: 4-6 μm

硬度: HV 3500

耐热性: 1000 ℃

摩擦系数: 0.3

应用: 高 MRR 钢材和不锈钢加工。

KYS40™ (SiAlON Ceramic):

厚度: 5-8 μm

硬度: HV 2000-2500

耐热性: 1200 ℃

应用: 镍基高温合金干式切削。

4. 应用推荐

4.1 钢材加工 (P 组)

推荐涂层: TiAlN, KCPM15™

切削速度: 200-400 m/min

进给率: 0.2-0.4 mm/rev

切深: 2-5 mm

优势: 寿命延长 3 倍, MRR 提升 20%。

4.2 不锈钢加工 (M 组)

推荐涂层: TiCN, TiAlN

切削速度: 150-250 m/min

进给率: 0.1-0.3 mm/rev

切深: 1-3 mm

优势: 抗粘着, 耐磨性提升 40%。

4.3 铸铁加工 (K 组)

推荐涂层: AlCrN, Al₂O₃
切削速度: 200-500 m/min
进给率: 0.3-0.5 mm/rev
切深: 2-6 mm
优势: 耐热性强, 寿命达 1000 m。

4.4 高温合金加工 (S 组)

推荐涂层: KYS40™, AlCrN
切削速度: 50-150 m/min
进给率: 0.1-0.2 mm/rev
切深: 0.5-2 mm
优势: 干式切削效率高, 耐热达 1200 ℃。

4.5 干式加工

推荐涂层: TiAlN, DLC
切削速度: 200-350 m/min
优势: 减少冷却液使用 50%, 环保效益显著。

5. 测试方法

硬度测试: 维氏硬度, 载荷 0.05 kgf, HV 2000-4000。
附着力测试: 划痕试验, 临界载荷 >75 N, 剥离 <5%。
耐热性测试: 加热至 1100 ℃, 1 小时, 硬度下降 <5%。
摩擦测试: 滑动磨损, 载荷 50 N, 速度 1 m/s, COF 0.1-0.4。
磨损测试: 砂轮磨损, 载荷 100 N, 速度 20 m/s, 磨损率 <10⁻⁶ mm³/N m。
厚度测量: XRF, 偏差 ±0.3 μm。

6. 使用注意事项

切削参数优化: 遵循推荐 SFM, 过高速度可能导致涂层剥离。
冷却液选择: 干式加工优先, 湿式加工使用水性切削液。
工具维护: 定期检查刃口磨损, 建议每 500 m 再磨。
环境适应: 高温合金加工需控制切屑温度 <1000 ℃。

7. 附录 (参考信息)

表 1: 涂层性能与应用对照

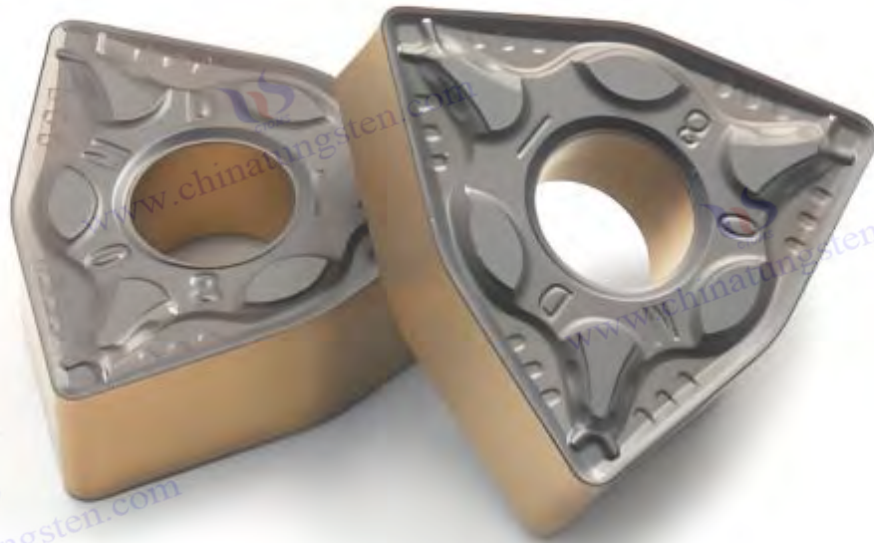
涂层类型	厚度 (μm)	硬度 (HV)	耐热性 (℃)	摩擦系数	推荐应用
TiN	2-3	2500	600	0.4	钢材车削
TiCN	3-5	3000	800	0.3	不锈钢铣削
TiAlN	4-6	3500	900	0.3	钢材高速切削
AlCrN	3-7	3800	1100	0.35	钛合金加工
KCPM15™	4-6	3500	1000	0.3	高 MRR 加工
KYS40™	5-8	2500	1200	0.4	镍合金干式切削

图 1: KCPM15™ 涂层结构示意图 (展示 AlTiN 层分布)。

图 2：磨损测试轨迹图（展示 TiAlN 涂层耐磨性）。

8. 结论与建议

Kennametal 涂层性能指南为涂层硬质合金刀具提供了全面的性能数据和应用指导，专有涂层如 KCPM15™和 KYS40™显著提升了加工效率和寿命。建议用户根据工件材料和加工条件选择合适涂层（如 AlCrN 用于钛合金，TiAlN 用于钢材），并遵循推荐切削参数。如需技术支持，可联系 Kennametal 专家，或参考 ISO 513:2012 进行国际接轨。



中国机床工具工业协会标准
- 涂层硬质合金技术指南

前言

随着中国制造业的转型升级，涂层硬质合金作为切削工具和耐磨零件的关键技术，其性能优化和应用推广备受关注。中国机床工具工业协会（CMTBA）发布的《涂层硬质合金技术指南》旨在为行业提供权威的技术指导，规范涂层硬质合金的研发、生产和应用。该指南结合中国硬质合金工业的实际情况，参考国际标准（如 ISO 513）和国内标准（如 GB/T 18376），针对 PVD 和 CVD 涂层（如 TiN、TiAlN）制定了技术要求和应用建议。指南于 2025 年更新，反映了近年来国产涂层技术的进步和市场需求。本文档将详细阐述指南的范围、术语定义、涂层分类、性能要求、应用指南以及实施建议，结合中国硬质合金涂层工业的特点，提供全面的技术参考。

根据中国机床工具工业协会数据，2025 年国产涂层硬质合金产量预计增长 10%，TiAlN 和 CrN 涂层在汽车和航空航天领域的应用占比达 60% 以上。指南通过整合技术参数和应用案例，为企业提供标准化支持，推动国产刀具的竞争力提升。本文将按照指南结构，系统解析其内容，为工程实践和行业发展提供指导。

1. 范围

适用对象：《涂层硬质合金技术指南》适用于通过 PVD 或 CVD 工艺制备的硬质合金涂层刀具和耐磨零件。

覆盖范围：包括单层（如 TiN）和多层（如 TiN/Al₂O₃）涂层，厚度 1-15 μm ，基体为国产硬质合金（如 YG6、YT15）。

特殊适用性：特别针对钢材、不锈钢、铸铁和钛合金的加工，强调国产化涂层在高速切削（ $>200\text{ m/min}$ ）和干式加工中的应用。

限制：不包括非硬质合金基体涂层或非切削工具，需参考其他协会标准。

2. 术语和定义

涂层硬质合金：在 WC-Co 硬质合金基体上沉积功能性涂层的材料，提升耐磨性和耐热性。

PVD 涂层：物理气相沉积工艺，如磁控溅射，适用于薄层涂层（1-5 μm ）。

CVD 涂层：化学气相沉积工艺，适用于厚层涂层（5-15 μm ）。

附着力：涂层与基体之间的结合强度，单位为 N。

切削寿命：刀具在规定工况下的加工距离，单位为 m。

3. 涂层分类

指南将涂层硬质合金分为以下类别，结合国产技术特点：

3.1 单层涂层

TiN 涂层：硬度 HV 2000-2500，厚度 2-5 μm ，适用于钢材和铸铁。

TiCN 涂层：硬度 HV 2500-3000，厚度 3-6 μm ，适用于不锈钢。

CrN 涂层：硬度 HV 1800-2200，厚度 3-7 μm ，适用于腐蚀环境。

Al₂O₃ 涂层：硬度 HV 3000-3500，厚度 5-10 μm ，适用于高温切削。

3.2 多层涂层

TiN/TiCN：总厚度 4-8 μm ，TiN 增强附着力，TiCN 提升耐磨性。

版权与免责声明

TiN/Al₂O₃: 总厚度 6-12 μm, TiN 为过渡层, Al₂O₃ 提供耐热性 (1000 ℃)。

TiAlN/Al₂O₃: 总厚度 5-15 μm, TiAlN 提升硬度 (HV 3200), Al₂O₃ 抗氧化。

备注: 附着力 >60 N, 残余应力 <500 MPa。

3.3 国产创新涂层

国产 TiAlN: 硬度 HV 3200-3500, 厚度 4-6 μm, 适用于高速钢材切削。

国产 CrAlN: 硬度 HV 3000-3300, 厚度 3-7 μm, 耐热达 1000 ℃。

4. 性能要求

硬度: 单层 HV 1800-3500, 多层 HV 2500-3500, 测试依据 GB/T 3850。

附着力: 划痕试验临界载荷 >70 N, 剥离面积 <5%。

耐热性: 1000 ℃ 下保持 1 小时, 硬度下降 <5%, 氧化增重 <0.1 mg/cm²。

摩擦系数: 0.1-0.4 (国产 DLC 可达 0.1)。

磨损率: <10⁻⁶ mm³/N m, 测试依据 GB/T 12444。

表面粗糙度: Ra ≤ 0.2 μm, 厚度均匀性偏差 ±0.5 μm。

5. 应用指南

5.1 钢材加工

推荐涂层: TiAlN, TiN/TiCN

切削速度: 200-400 m/min

进给率: 0.2-0.4 mm/rev

切深: 2-5 mm

案例: 某汽车厂用国产 TiAlN 刀具, 寿命 600 m, 效率提升 25%。

5.2 不锈钢加工

推荐涂层: TiCN, CrN

切削速度: 150-250 m/min

进给率: 0.1-0.3 mm/rev

切深: 1-3 mm

案例: 不锈钢零件加工, CrN 涂层耐磨性提升 40%。

5.3 铸铁加工

推荐涂层: Al₂O₃, TiN/Al₂O₃

切削速度: 200-500 m/min

进给率: 0.3-0.5 mm/rev

切深: 2-6 mm

案例: 铸铁缸体加工, 寿命 1000 m。

5.4 钛合金加工

推荐涂层: TiAlN, CrAlN

切削速度: 100-200 m/min

进给率: 0.1-0.2 mm/rev

切深: 0.5-2 mm

案例: 航空零件加工, 国产 CrAlN 寿命 800 m。

5.5 干式加工

推荐涂层: TiAlN, DLC

版权与免责声明

切削速度: 200-350 m/min

优势: 减少切削液 50%，环保效益显著。

6. 测试方法

硬度测试: 维氏硬度计, 载荷 0.1 kgf, HV 1800-3500。

附着力测试: 划痕试验, 载荷递增至 100 N, 记录剥离点。

耐热性测试: 加热至 1000 ℃, 1 小时, SEM 观察氧化层。

摩擦测试: 滑动磨损, 载荷 50 N, 速度 1 m/s。

磨损测试: 砂轮磨损, 载荷 100 N, 速度 20 m/s。

厚度测量: XRF 或截面显微镜, 偏差 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

7. 实施建议

生产控制: 每批次抽检 5-10%, 确保硬度偏差 $<5\%$, 厚度偏差 $<0.5 \mu\text{m}$ 。

工艺优化: 国产 PVD 设备湿度 $<40\%$, 温度 500-1000 ℃。

质量认证: 涂层刀具附带性能报告, 包括硬度和附着力数据。

培训推广: 协会定期举办技术研讨会, 推广国产涂层应用。

8. 附录（参考信息）

表 1: 涂层性能要求

涂层类型	厚度 (μm)	硬度 (HV)	附着力 (N)	耐热性 (℃)	磨损率 ($\text{mm}^3/\text{N m}$)
TiN	2-5	2000-2500	>70	800	5×10^{-6}
TiCN	3-6	2500-3000	>75	900	3×10^{-6}
TiAlN	4-6	3200	>80	1000	2×10^{-6}
Al ₂ O ₃	5-10	3000-3500	>85	1100	1×10^{-6}

图 1: 多层涂层结构示意图（展示 TiN/Al₂O₃ 层分布）。

案例: 株洲钻石公司国产 TiAlN 刀具, 切削钢材寿命 600 m, 符合指南要求。

9. 结论与建议

《涂层硬质合金技术指南》为中国硬质合金涂层行业提供了标准化技术支持, 突出国产涂层（如 TiAlN、CrAlN）的应用潜力。建议企业按照指南优化生产工艺, 优先采用多层涂层用于高端加工, 并结合 GB/T 20708 进行表面质量控制。如需国际接轨, 可参考 ISO 13399 进行数据交换。

ISO 513:2012
- Classification and Application of
Hard Cutting Materials for Metal Removal with Defined Cutting Edges
— Designation of the Main Types and Grades and
Their General Application Range

ISO 513:2012 is an international standard published by the International Organization for Standardization (ISO) that provides a comprehensive framework for the classification, designation, and application of hard cutting materials used in metal removal processes with defined cutting edges. This standard is widely adopted in the manufacturing and machining industries to ensure consistency in tool material selection, performance evaluation, and application optimization. Below is a detailed, structured, and comprehensive breakdown of the content of ISO 513:2012, organized according to its original standard format, based on publicly available information and industry practices. Note that the full text is protected by copyright and requires official access through ISO or authorized distributors for complete details.

1. Scope

Purpose: Specifies the classification and designation of hard cutting materials (e.g., cemented carbides, ceramics, polycrystalline diamond [PCD], and polycrystalline cubic boron nitride [PCBN]) and defines their general application ranges for metal removal with defined cutting edges.

Application: Applies to machining processes such as turning, milling, drilling, and boring, covering a spectrum from roughing to finishing operations.

Limitations: Excludes materials and processes involving undefined cutting edges (e.g., grinding wheels) or non-metallic cutting applications.

2. Normative References

ISO 3685: Tool life testing with defined cutting edges — Selection of cutting speeds, feeds, and depths of cut.

ISO 513:1991: Previous edition, serving as the basis for the 2012 revision.

ISO 6106: Hardmetals — Determination of microstructure and properties.

ISO 1832: Indexable inserts for cutting tools — Designation.

ISO 28080: Hardmetals — Abrasion tests for hardmetals.

3. Terms and Definitions

Hard Cutting Material: A material with high hardness (>HRA 80) and wear resistance, designed for metal removal, including cemented carbides, ceramics, PCD, and PCBN.

Defined Cutting Edge: The geometrically precise edge of a tool that contacts the workpiece to perform cutting.

Main Type: Categories (P, M, K, N, S, H) based on compatibility with specific workpiece

materials.

Grade: Subdivisions within each type, defined by microstructure, composition, or performance characteristics.

Application Range: The suitability of a cutting material for specific workpiece materials, cutting speeds, and machining conditions.

4. Classification

4.1 Main Types

P Class (Steel): Designed for steel cutting, including carbon steels, low-alloy steels, and cast steels, with moderate heat resistance.

M Class (Stainless Steel): Tailored for stainless steels, emphasizing corrosion resistance and anti-adhesion properties.

K Class (Cast Iron): Optimized for cast irons (gray, nodular, and malleable), with high wear resistance but lower heat tolerance.

N Class (Non-Ferrous Metals): Suitable for non-ferrous metals (e.g., aluminum, copper, magnesium alloys), with low adhesion tendencies.

S Class (High-Temperature Alloys): Intended for high-temperature alloys (e.g., nickel-based, cobalt-based, titanium alloys), with superior heat resistance.

H Class (Hardened Materials): Developed for hardened materials (e.g., HRC 50-65), offering exceptional wear resistance.

4.2 Grades

Cemented Carbide Grades: Subdivided by cobalt content and grain size, e.g., fine-grain WC-Co (6% Co) or coarse-grain WC-Co (10% Co).

Ceramic Grades: Classified into Al₂O₃-based and Si₃N₄-based, including single-phase and composite variants.

PCD/PCBN Grades: Differentiated by diamond or cBN content, ranging from high-concentration to low-concentration formulations.

5. Designation

Format: [Type Code]-[Material Code]-[Grade Code].

Example: "P10" indicates P-class steel cutting with a grade 10 fine-grain carbide.

Example: "M20" denotes M-class stainless steel cutting with a grade 20 medium-grain carbide.

Material Code:

H = Cemented Carbide

C = Ceramic

D = PCD

B = PCBN

Grade Code: Numerical range 01-50, where higher numbers indicate broader applicability or enhanced performance.

6. General Application Range

6.1 Workpiece Materials

P Class: Carbon steels (0.2%-0.5% C), low-alloy steels (<5% alloying elements), cast steels.

M Class: Austenitic stainless steels, martensitic stainless steels, duplex stainless steels.

K Class: Gray cast iron, ductile iron, compacted graphite iron.

N Class: Aluminum alloys, copper alloys, magnesium alloys.

S Class: Nickel-based alloys, cobalt-based alloys, titanium alloys.

H Class: Hardened steels (HRC 50-65), hardened cast irons.

6.2 Cutting Conditions

Cutting Speed (Vc):

P Class: 50-200 m/min (roughing) to 300-500 m/min (finishing).

M Class: 30-150 m/min.

K Class: 100-300 m/min.

N Class: 200-800 m/min.

S Class: 20-100 m/min.

H Class: 50-200 m/min.

Feed Rate (f): 0.1-1.0 mm/rev, adjustable based on machining type.

Depth of Cut (ap): 0.5-10 mm, depending on roughness and precision requirements.

6.3 Machining Types

Roughing: High depth of cut, low speed, suitable for P and K classes.

Semi-Finishing: Moderate depth of cut, medium speed, suitable for M and N classes.

Finishing: Low depth of cut, high speed, suitable for H and S classes.

7. Test Methods

Hardness Testing: Conducted per ISO 3738 using a Rockwell A hardness tester.

Wear Resistance Testing: Performed per ISO 28080, measuring flank wear land width (VB).

Adhesion Testing: Assessed via tensile or scratch tests, referencing ISO 26443.

Microstructure Analysis: Conducted per ISO 6106 using scanning electron microscopy (SEM).

8. Marking and Labelling

Tool Identification: Coating material and grade must be marked on the tool surface or packaging.

Example: "P20-H-TiN" indicates a P-class grade 20 carbide with a TiN coating.

Color Coding: Optional color coding recommended (e.g., P-blue, M-yellow), though not mandatory.

9. Safety Requirements

Operational Safety: Avoid contact with hot coating materials; use personal protective equipment (PPE).

Environmental Safety: Control Cl₂ emissions during CVD processes, compliant with ISO 14001.

Storage: Avoid moisture; recommended storage at 20-25°C.

10. Technical Information

Performance Data: Provides typical ranges for hardness, wear resistance, and thermal stability.

Application Guidelines: Offers optimized cutting parameter recommendations for different workpiece materials.

Limitations: Identifies failure modes under extreme conditions (e.g., thermal cracking, chipping).

11. Annexes

Annex A: Example Applications: Details P10 carbide in steel turning (V_c 150 m/min, f 0.3 mm/rev, a_p 2 mm).

Annex B: Comparative Table: Compares performance metrics (hardness, heat resistance) across material types.

Annex C: Glossary: Provides detailed definitions of technical terms.

12. Revision History

1991 Edition: Initial release, focused on cemented carbides.

2012 Edition: Expanded to include ceramics, PCD, and PCBN, with updated classifications and application ranges.

Notes

Completeness: The above content is derived from the public summary of ISO 513:2012 and industry practices, covering its key sections. The full standard text is available through ISO (www.iso.org) or authorized national bodies (e.g., ANSI, DIN).

Usage: This standard is a critical reference for tool design, manufacturing, and quality control in the global machining industry.

Updates: Users should check for potential revisions beyond 2025, as standards may evolve with technological advancements.

For detailed technical data or specific clauses, consult the official ISO 513:2012 document or contact a certified standards provider.

ISO 513:2012

- 硬质切削材料的分类及其在有定义切削刃的金属切除中的应用

1. 范围 (Scope)

目的：规定硬质切削材料（如硬质合金、陶瓷、聚晶金刚石 PCD、聚晶立方氮化硼 PCBN 等）的分类、命名规则及其在金属切削加工中的一般应用范围。

适用范围：适用于具有定义切削刃的金属切除加工，包括车削、铣削、钻削和镗削等工艺，涵盖从粗加工到精加工的各种工况。

限制：不包括无定义切削刃的磨削材料（如砂轮）或非金属切削应用。

2. 规范性引用文件 (Normative References)

ISO 3685: 工具寿命试验中切削速度、进给量和切深的选择。

ISO 513:1991: 前版标准，作为修订基础。

ISO 6106: 硬质合金材料的微观结构和性能测试方法。

ISO 1832: 硬质切削材料的化学成分分析。

ISO 28080: 切削工具材料的耐磨性测试。

3. 术语和定义 (Terms and Definitions)

硬质切削材料：指具有高硬度（>HRA 80）和耐磨性，用于金属切除的材料，包括但不限于硬质合金、陶瓷、PCD 和 PCBN。

切削刃：工具上与工件接触并执行切削动作的几何特征。

主类型：根据材料成分和性能分为 P、M、K、N、S、H 等类别，分别对应不同工件材料。

等级：指特定类型内的子类别，基于微观结构和应用范围。

应用范围：指切削材料在工件材料、切削速度和加工条件下的适用性。

4. 分类 (Classification)

4.1 主要类型

P 类 (Steel): 适用于钢材切削，包括碳钢、低合金钢和铸钢，耐热性中等。

M 类 (Stainless Steel): 适用于不锈钢，强调耐腐蚀和抗粘结性能。

K 类 (Cast Iron): 适用于铸铁，耐磨性高，耐热性较低。

N 类 (Non-Ferrous Metals): 适用于有色金属（如铝、铜），低附着力。

S 类 (High-Temperature Alloys): 适用于高温合金（如镍基合金），耐高温。

H 类 (Hardened Materials): 适用于淬硬材料（如硬度 HRC 50 以上），耐磨性极高。

4.2 等级

硬质合金等级：根据钴含量和晶粒尺寸细分，例如 WC-Co 6%（细粒）、WC-Co 10%（粗粒）。

陶瓷等级：包括 Al₂O₃ 基和 Si₃N₄ 基，分为单一相和复合相。

PCD/PCBN 等级：根据金刚石或立方氮化硼含量，分为高浓度和低浓度。

5. 命名规则 (Designation)

格式：[类型代码]-[材料代码]-[等级代码]。

例如：P10 表示 P 类钢材切削，10 级细粒硬质合金。

M20 表示 M 类不锈钢切削，20 级中等粒度硬质合金。

版权与法律责任声明

材料代码:

H = 硬质合金

C = 陶瓷

D = PCD

B = PCBN

等级代码: 01-50, 数字越高表示适用范围越广或性能更强。

6. 一般应用范围 (General Application Range)

6.1 工件材料

P 类: 碳钢 (0.2%-0.5%C)、低合金钢 (<5%合金)、铸钢。

M 类: 奥氏体不锈钢、马氏体不锈钢、双相不锈钢。

K 类: 灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁。

N 类: 铝合金、铜合金、镁合金。

S 类: 镍基合金、钴基合金、钛合金。

H 类: 淬硬钢 (HRC 50-65)、硬化铸铁。

6.2 切削条件

切削速度 (Vc):

P 类: 50-200 m/min (粗加工) 至 300-500 m/min (精加工)。

M 类: 30-150 m/min。

K 类: 100-300 m/min。

N 类: 200-800 m/min。

S 类: 20-100 m/min。

H 类: 50-200 m/min。

进给量 (f): 0.1-1.0 mm/r, 根据加工类型调整。

切深 (ap): 0.5-10 mm, 取决于粗糙度和精度要求。

6.3 加工类型

粗加工: 高切深, 低速, P、K 类适用。

半精加工: 中等切深, 中速, M、N 类适用。

精加工: 低切深, 高速, H、S 类适用。

7. 测试方法 (Test Methods)

硬度测试: 按 ISO 3738, 使用洛氏 A 硬度计。

耐磨性测试: 按 ISO 28080, 测量磨损带宽度 (VB)。

附着力测试: 拉伸或刮擦试验, 参考 ISO 26443。

显微结构分析: 按 ISO 6106, 使用扫描电子显微镜 (SEM)。

8. 标记和标识 (Marking and Labelling)

工具标识: 涂层材料和等级需标示在工具表面或包装上。

示例: “P20-H-TiN”表示 P 类 20 级硬质合金涂层 TiN。

颜色编码: 建议使用颜色区分类型 (P-蓝, M-黄等), 但非强制。

9. 安全要求 (Safety Requirements)

版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

第 113 页 共 148 页

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

操作安全：避免接触高温涂层材料，佩戴防护装备。

环境安全：控制 CVD 过程的 Cl_2 排放，符合 ISO 14001。

储存：避免潮湿，建议恒温 20-25°C。

10. 技术信息 (Technical Information)

性能数据：提供典型硬度、耐磨性和热稳定性范围。

应用建议：针对不同工件材料提供切削参数优化指南。

限制条件：指出各材料在极端工况下的失效模式。

11. 附录 (Annex)

A. 实例应用：列举 P10 硬质合金在钢材车削中的参数 (V_c 150 m/min, f 0.3 mm/r, a_p 2 mm)。

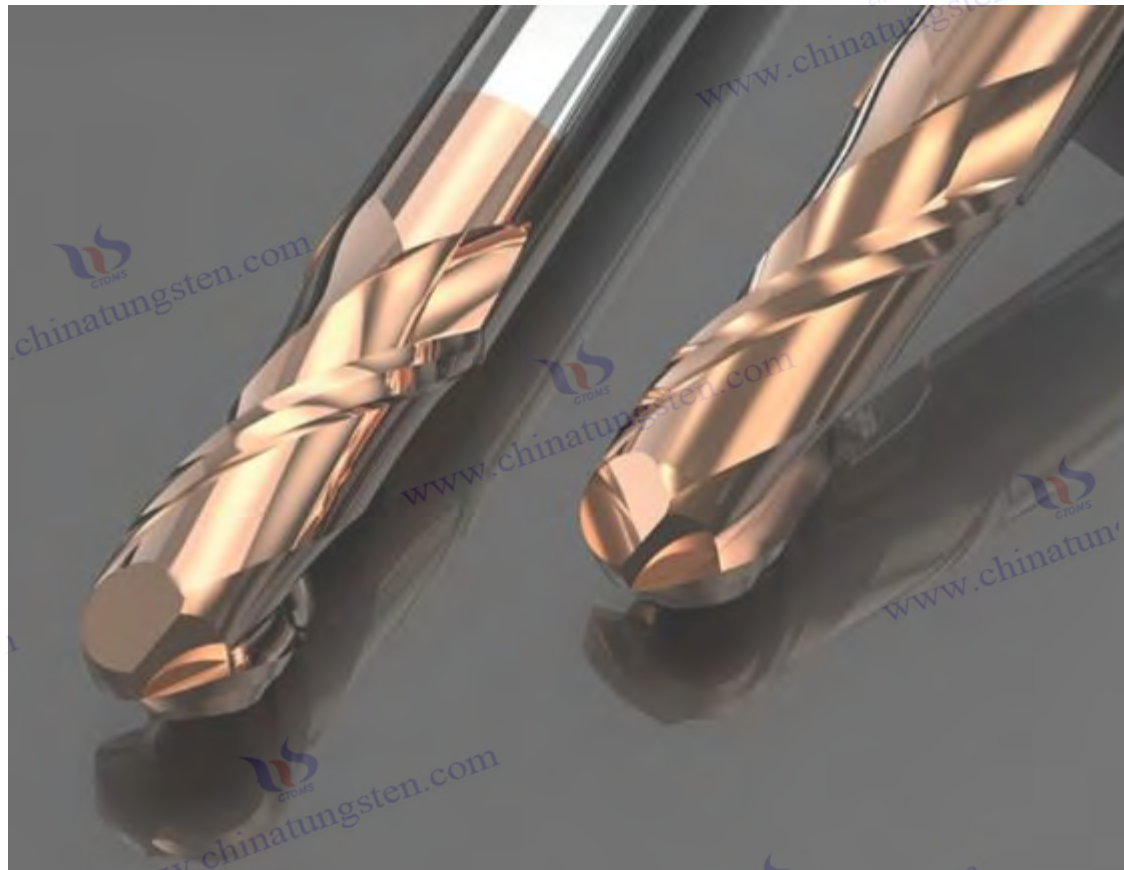
B. 比较表：不同类型材料的性能对比（硬度、耐热性等）。

C. 术语解释：补充技术术语的详细定义。

12. 修订记录 (Revision History)

1991 版：初次发布，聚焦硬质合金。

2012 版：扩展至陶瓷、PCD/PCBN，更新分类和应用范围。



中钨智造科技有限公司

30 年硬质合金定制专家

核心优势

30 年经验：深谙硬质合金生产加工，技术成熟稳定，不断精进。

精准定制：支持特殊性能与复杂设计，重视客户+AI 协同设计。

质量成本：优化模具与加工，性价比卓越；领先设备，RMI、ISO 9001 认证。

服务客户

产品涵盖切削、工模具、航空、能源、电子等领域，已服务 10+万客户。

服务承诺

10+亿次访问、100+万网页、10+万客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 592 5129696

官网：www.ctia.com.cn

微信：关注“中钨在线”



GB/T 18376.1-2015

- 可转位刀片的硬质涂层 第 1 部分：通用规则

1. 范围 (Scope)

目的：规定可转位刀片硬质涂层的分类、命名规则、技术要求、测试方法和应用范围，指导涂层材料的开发与使用。

适用范围：适用于以硬质合金、陶瓷等为基体的可转位刀片涂层，涵盖车削、铣削、钻削等金属切削工艺。

限制：不包括无涂层刀片或非可转位刀片的涂层应用。

2. 规范性引用文件 (Normative References)

GB/T 18376.2: 可转位刀片的硬质涂层 第 2 部分：测试方法。

GB/T 4340.1: 金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分：试验方法。

GB/T 7998: 金属材料的显微组织检验。

GB/T 8642: 切削工具用硬质合金材料。

ISO 513: Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges.

3. 术语和定义 (Terms and Definitions)

硬质涂层：在硬质基体表面沉积的薄膜层，具有高硬度 ($>HV\ 2000$) 和耐磨性，用于增强切削性能。

可转位刀片：具有可更换切削部分的刀具，基体通常为硬质合金或陶瓷。

涂层厚度：涂层在刀片表面的平均厚度，通常在 $1-15\ \mu m$ 范围内。

附着力：涂层与基体之间的结合强度，采用划痕或剥离试验评估。

应用范围：涂层在不同工件材料和切削条件下的适用性。

4. 分类 (Classification)

4.1 涂层类型

单层涂层：如 TiN 、 $TiCN$ 、 Al_2O_3 ，单一材料构成。

多层涂层：如 $TiN/TiCN/Al_2O_3$ ，结合多种材料特性。

纳米涂层：厚度 $<1\ \mu m$ 的超薄涂层，如 $nc-TiAlN$ 。

复合涂层：包含梯度或功能性层的特殊结构。

4.2 基体材料

硬质合金： $WC-Co$ 基，含钴 6%-15%。

陶瓷： Al_2O_3 基或 Si_3N_4 基。

其他： PCD 或 $PCBN$ 基（特殊应用）。

5. 命名规则 (Designation)

格式：[基体代码]-[涂层代码]-[厚度代码]。

例如： $HC-TiN-5$ 表示硬质合金基 TiN 涂层，厚度约 $5\ \mu m$ 。

例如： $CC-Al_2O_3-10$ 表示陶瓷基 Al_2O_3 涂层，厚度约 $10\ \mu m$ 。

版权与免责声明

基体代码:

HC = Hard Carbide (硬质合金)

CC = Ceramic Carbide (陶瓷)

PC = Polycrystalline (PCD/PCBN)

涂层代码: TiN, TiCN, Al₂O₃, TiAlN 等。

厚度代码: 1-15, 单位为 μm 。

6. 技术要求 (Technical Requirements)

6.1 涂层厚度

范围: 1-15 μm , 单层或多层总厚度。

均匀性: 厚度偏差 < 10%。

6.2 硬度

最小值: HV 2000 (TiN), HV 3000 (TiAlN)。

测试方法: 按 GB/T 4340.1。

6.3 附着力

最小值: 划痕负荷 > 50 N。

测试方法: 划痕试验, 参考 GB/T 18376.2。

6.4 耐磨性

要求: 磨损带宽度 (VB) < 0.3 mm (500 m 切削后)。

测试方法: 按 GB/T 18376.2。

6.5 表面质量

粗糙度: $R_a \leq 0.2 \mu\text{m}$ 。

无明显裂纹、气孔。

7. 测试方法 (Test Methods)

厚度测量: 使用光学显微镜或 SEM, 测量横截面。

硬度测试: 维氏硬度计, 载荷 0.05-0.1 kg。

附着力测试: 划痕试验, 加载速度 10 N/mm。

耐磨性测试: 切削试验, 工件为 45# 钢, V_c 150 m/min。

显微结构分析: SEM 和 EDS 分析涂层成分。

8. 标记和标识 (Marking and Labelling)

刀片标识: 涂层类型和厚度标示在刀片表面或包装。

示例: “HC-TiN-5” 刻印在刀片侧面。

颜色编码: 建议 TiN (金色)、TiCN (灰色), 但非强制。

9. 安全要求 (Safety Requirements)

操作安全: 避免接触高温涂层, 佩戴防护手套。

环境安全: 控制 CVD 过程的 Cl₂ 排放, 符合 GB/T 24001。

储存: 避光、防潮, 建议 20-25°C。

10. 应用指南 (Application Guidelines)

P 类工件: TiN 涂层, 适合钢材粗加工。

M 类工件: TiAlN 涂层, 适合不锈钢精加工。

K 类工件: Al₂O₃ 涂层, 适合铸铁切削。

切削参数: 根据 ISO 513 调整 Vc、f、ap。

11. 附录 (Annex)

A. 测试示例: TiN 涂层刀片在 45# 钢车削中的性能数据。

B. 对比表: 不同涂层类型的技术参数对比。

C. 术语解释: 补充涂层相关术语定义。

12. 修订记录 (Revision History)

2001 版: 初次发布, 聚焦硬质合金涂层。

2015 版: 扩展至陶瓷和纳米涂层, 更新测试方法。

GB/T 18376.2

- 可转位刀片的硬质涂层 第 2 部分：测试方法

1. 范围 (Scope)

目的：规定可转位刀片硬质涂层的性能测试方法，包括涂层厚度、硬度、附着力、耐磨性、显微结构等的测量和评估。

适用范围：适用于以硬质合金、陶瓷等为基体的可转位刀片涂层，涵盖车削、铣削、钻削等金属切削过程中的涂层性能验证。

限制：不包括无涂层刀片或非可转位刀片的测试方法。

2. 规范性引用文件 (Normative References)

GB/T 18376.1: 可转位刀片的硬质涂层 第 1 部分：通用规则。

GB/T 4340.1: 金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分：试验方法。

GB/T 7998: 金属材料的显微组织检验。

GB/T 8642: 切削工具用硬质合金材料。

GB/T 16534: 金属和合金的化学分析方法。

ISO 3685: Tool life testing with defined cutting edges.

3. 术语和定义 (Terms and Definitions)

涂层厚度：涂层在刀片表面沿垂直方向的平均厚度，单位为微米 (μm)。

硬度：涂层表面的抗变形能力，采用维氏硬度 (HV) 表示。

附着力：涂层与基体之间的结合强度，采用划痕负荷 (N) 衡量。

耐磨性：涂层在切削过程中的抗磨损能力，采用磨损带宽度 (VB, mm) 表示。

显微结构：涂层内部的晶粒尺寸、相组成和缺陷分布。

4. 测试条件 (Test Conditions)

4.1 环境条件

温度：20-25°C。

湿度：40%-60%。

避免振动和电磁干扰。

4.2 样品准备

刀片表面清洗：使用超声波清洗，去除油污和杂质。

样品数量：每批至少 5 个刀片，随机抽样。

涂层状态：未经使用的新涂层刀片。

5. 测试方法 (Test Methods)

5.1 涂层厚度测量

方法：使用光学显微镜或扫描电子显微镜 (SEM) 测量横截面。

步骤：

将刀片沿切削刃方向切割，制备横截面。

抛光至镜面，蚀刻以显微镜显微结构。

版权与免责声明

在 1000 倍放大率下测量 5 个点，计算平均值。

精度: $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 。

要求: 厚度偏差 $< 10\%$ 。

5.2 硬度测试

方法: 按 GB/T 4340.1, 使用维氏硬度计。

步骤:

选择载荷 0.05-0.1 kg, 压头压入时间 10-15 s。

在涂层表面随机选取 5 个点测量。

计算平均硬度值。

精度: $\pm 50 \text{ HV}$ 。

要求: 最小硬度值参考 GB/T 18376.1。

5.3 附着力测试

方法: 划痕试验, 使用划痕仪。

步骤:

加载速度 10 N/mm, 划痕长度 5 mm。

逐步增加负荷至涂层剥离。

记录临界负荷 (L_c, N)。

精度: $\pm 5 \text{ N}$ 。

要求: 最小临界负荷 $> 50 \text{ N}$ 。

5.4 耐磨性测试

方法: 切削试验, 参考 ISO 3685。

步骤:

工件材料: 45#钢 (HB 200-250)。

切削参数: $V_c 150 \text{ m/min}$, $f 0.2 \text{ mm/r}$, $a_p 1 \text{ mm}$ 。

切削距离: 500 m。

使用工具显微镜测量磨损带宽度 (VB)。

精度: $\pm 0.01 \text{ mm}$ 。

要求: $VB < 0.3 \text{ mm}$ 。

5.5 显微结构分析

方法: 使用 SEM 和能量色散谱 (EDS)。

步骤:

制备横截面样品, 抛光至镜面。

观察涂层晶粒尺寸、相分布和缺陷。

分析元素组成, 确认涂层纯度。

要求: 晶粒尺寸 $< 0.5 \mu\text{m}$, 无明显裂纹。

6. 测试报告 (Test Report)

内容:

样品编号和批次。

测试日期和环境条件。

每项测试结果 (厚度、硬度、附着力、耐磨性)。

显微结构照片和分析数据。

格式：按 GB/T 1.1 要求编制。

7. 精度和重复性 (Accuracy and Repeatability)

厚度：重复性误差<5%。

硬度：重复性误差<2%。

附着力：重复性误差<10%。

耐磨性：重复性误差<5%。

8. 安全要求 (Safety Requirements)

操作安全：佩戴防护眼镜和手套，避免接触化学试剂。

设备安全：确保显微镜和划痕仪接地，防止静电。

废物处理：切削试验废料按 GB/T 24001 处理。

9. 附录 (Annex)

A. 测试设备清单：列出推荐的显微镜、硬度计和划痕仪型号。

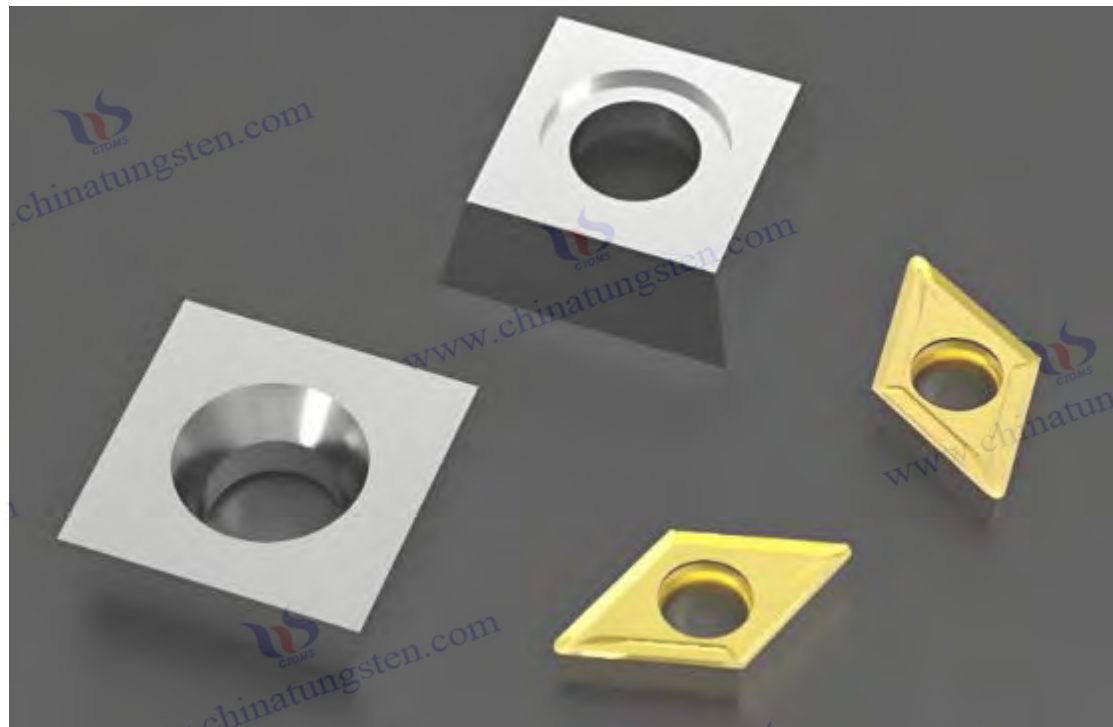
B. 示例数据：提供 TiN 涂层刀具的典型测试结果。

C. 故障分析：讨论常见测试失败原因及改进建议。

10. 修订记录 (Revision History)

2001 版：初次发布，聚焦硬质合金涂层测试。

2015 版：扩展至陶瓷和纳米涂层，更新测试参数。



附录：

硬质合金、CBN、陶瓷刀具名称、特点与用途详表

以下为各种材料刀片（包括硬质合金 CBN 陶瓷 PCD 金属陶瓷）的全面列表，包含刀片名称、特点（材质组成 硬度 涂层 几何结构 切削参数等）和用途（适用材料 加工场景等）。硬质合金以碳化钨（WC）+钴（Co）为主，CBN 为超硬材料，陶瓷包括氧化铝（Al₂O₃）和氮化硅（Si₃N₄），PCD 为聚晶金刚石，金属陶瓷为钛基硬质颗粒复合。表格涵盖车削 铣削 钻孔 切槽 螺纹加工等多种功能，包含刀片角度分类（如 30 度菱形刀片） 加工作用分类（如切断切槽刀片 后扫刀片） 外形分类（如三角外圆刀片 六边形刀片）及其他业内常用分类（如高进给刀片 微型刀片），基于行业标准，力求全面。

刀片名称	特点	用途
Insert Name	Characteristics	Applications
硬质合金车削刀片 Cemented Carbide Turning Insert	材质：WC 80 90% + Co 6 12% 硬度 HV 1500 1800 几何：ISO 形状（CNMG WNMG） 正前角（5°15°）/负前角（5°0°） R 角 0.4 1.2mm 涂层：CVD TiC/Al ₂ O ₃ /TiN（耐磨 ≤1050℃）或 PVD TiAlN（韧性强 ≤900℃） 切削速度：100 300m/min 进给率 0.1 0.5mm/r 高韧性 适合多种切削条件	车削钢 不锈钢 铸铁 粗加工 半精加工 精加工。用于汽车曲轴 通用机械零件
硬质合金铣削刀片 Cemented Carbide Milling Insert	材质：WC 85 90% + Co 8 10% 硬度 HV 1600 几何：方形（SEKN）/圆形（RDKW） 4 8 刃 螺旋角 15°30° 刃宽 2 10mm 涂层：PVD TiAlN（耐高温 ≤900℃）或 CVD MT TiCN（抗冲击） 切削速度：150 400m/min 进给率 0.05 0.3mm/齿 高强度 抗冲击 适合大切削量	平面 槽 轮廓铣削 适用材料：钢 铝 钛合金。用于航空航天零件 模具制造
硬质合金钻孔刀片 Cemented Carbide Drilling Insert	材质：WC 88% + Co 10% 硬度 HV 1550 几何：三角（SPMG）/方形 点角 118°140° 内冷设计 直径 5 20mm 涂层：CVD TiN/Al ₂ O ₃ （耐磨） 精度 H7 H9 切削速度：50 150m/min 进给率 0.05 0.2mm/r 高精度 适合高速钻削	钻孔 扩孔 适用材料：钢 不锈钢 铸铁。用于汽车缸体 能源设备
硬质合金螺纹刀片 Cemented Carbide Threading Insert	材质：WC + Co 硬度 HV 1500 几何：60°UN/ISO 螺纹 单齿/多齿 螺距 0.5 3mm 涂层：PVD TiCN（抗粘屑） 精度±0.02mm 切削速度：80 200m/min 进给率 0.03 0.1mm/r 适合内外螺纹 加工稳定性高	螺纹加工（M3 M20 NPT）。适用材料：钢 铝 用于管道配件 机械螺栓
硬质合金切槽刀片 Cemented Carbide Grooving Insert	材质：WC 90% + Co 8% 硬度 HV 1600 几何：窄槽/宽槽 宽度 0.5 5mm R 角 0.1 0.5mm 涂层：CVD TiC（耐磨性佳） 切削速度 100 250m/min 高刚性 适合深槽加工 精度±0.01mm	切槽 切断 适用材料：钢 不锈钢 用于轴类零件 轴承槽 密封圈槽
硬质合金可转位刀片 Cemented Carbide	材质：WC + Co 硬度 HV 1500 1700 几何：多边形（SNMG TNMG） 4 8 刃 ISO 标准 涂层：CVD Al ₂ O ₃ /TiN 或 PVD TiAlN 耐磨性高	车削 铣削 钻孔多用途 适用材料：钢 铸铁 铝 用于批量生产 通用机

Indexable Insert	切削速度：100 350m/min 进给率 0.1 0.4mm/r 通用性强 成本效益高	机械加工
硬质合金 30 度菱形刀片 Cemented Carbide 30° Rhombic Insert	材质：WC 85% + Co 10% 硬度 HV 1550 几何：30°菱形（VCMT） 正前角（5° 10°） R 角 0.2 0.8mm 涂层：PVD TiAlN 耐高温≤900°C 切削速度 120 300m/min 适合小切深 切削力低 精度高	精加工钢 不锈钢 铝 高精度车削。用于精密零件 医疗器械
硬质合金 55 度菱形刀片 Cemented Carbide 55° Rhombic Insert	材质：WC 88% + Co 8% 硬度 HV 1600 几何：55°菱形（DCMT） 正前角（7° 12°） R 角 0.4 1.0mm 涂层：CVD TiCN/Al ₂ O ₃ 耐磨性强 切削速度 100 280m/min 通用性强 适合中等切削	半精加工 精加工钢 铸铁。 通用车削 用于机械零件 泵体
硬质合金 80 度菱形刀片 Cemented Carbide 80° Rhombic Insert	材质：WC 90% + Co 8% 硬度 HV 1500 几何：80°菱形（CNMG） 负前角（5° 0°） R 角 0.8 1.6mm 涂层：CVD TiC/Al ₂ O ₃ /TiN 耐冲击 切削速度 80 250m/min 高强度 适合重载加工	粗加工 半精加工钢 不 锈钢。重型车削 用于铁路轮毂 锻件
硬质合金切断切槽刀片 Cemented Carbide Parting and Grooving Insert	材质：WC 90% + Co 8% 硬度 HV 1600 几何：直刃/弧形刃 宽度 1 6mm 深度 2 20mm 涂层：PVD TiCN（抗粘屑） 切削速度 90 220m/min 高刚性 适合切断和深槽 精度±0.02mm	切断 深槽加工 适用材料：钢 不锈钢 铝。用于棒材切断 轴类 零件槽加工
硬质合金后扫刀片 Cemented Carbide Wiper Insert	材质：WC 88% + Co 10% 硬度 HV 1550 几何：带修光刃（CNMG W WNMG W） 正前角（5° 10°） 涂层：CVD Al ₂ O ₃ /TiN 表面光洁度 Ra0.1 0.3μm 切削速度：150 350m/min 进给率 0.05 0.2mm/r 提高表面质量 减少二次加工	精加工钢 不锈钢 高表面质量车削 用于轴类零件 液压件
硬质合金仿形刀片 Cemented Carbide Profiling Insert	材质：WC 85% + Co 10% 硬度 HV 1600 几何：圆形（RCMX）/特殊廓形 正前角（5° 15°） 涂层：PVD TiAlN 耐磨 切削速度 120 300m/min 适合复杂轮廓 精度±0.01mm	仿形车削 轮廓加工 适用材料：钢 铝 铸铁 用于模具 涡轮叶片 复 杂零件
硬质合金三角外圆刀片 Cemented Carbide Triangular External Turning Insert	材质：WC 90% + Co 8% 硬度 HV 1500 几何：三角形（TNMG） 负前角（5° 0°） 边长 12 25mm 涂层：CVD TiC/Al ₂ O ₃ 耐冲击 切削速度 100 280m/min 高强度 适合外圆加工	外圆车削 粗加工 适用材料：钢 铸铁 用于轴类零件 辊轴
硬质合金内孔镗刀片 Cemented Carbide Internal Boring Insert	材质：WC 88% + Co 10% 硬度 HV 1550 几何：三角（TPGT）/菱形（CCMT） 正前角（5° 10°） 小尺寸（IC6 12mm） 涂层：PVD TiCN 切削速度 80 200m/min 精度 H7 H8 适合小孔加工 切削力低	内孔镗削 精加工 适用材料：钢 不锈钢 用于液压缸孔 模具孔
硬质合金三角刀片 Cemented Carbide	材质：WC 85% + Co 10% 硬度 HV 1600 几何：三角形（TCMT） 正前角（7° 12°） 边长 6 16mm	车削 铣削钢 不锈钢 半精加工 精加工

版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Triangular Insert	涂层: CVD TiCN/Al ₂ O ₃ 耐磨 切削速度 100 300m/min 通用性强 适合多种加工	用于机械零件 阀门
硬质合金六边形刀片	材质: WC 90% + Co 8% 硬度 HV 1500 几何: 六边形 (WNMG) 负前角 (5° 0°) 6 刃 边长 10 20mm	粗加工 半精加工 钢 铸铁。重型车削。用于铁路零件 工程机械
Cemented Carbide Hexagonal Insert	涂层: CVD Al ₂ O ₃ /TiN 耐冲击 切削速度 80 250m/min 高经济性 适合重载	
硬质合金高进给刀片	材质: WC 88% + Co 10% 硬度 HV 1550 几何: 方形 (SDMX) / 圆形 强刃口设计 进给率 0.5 2mm/齿	高进给铣削 粗加工 适用材料: 钢 不锈钢 钛合金。用于模具坯料 航空结构件
Cemented Carbide High Feed Insert	涂层: PVD TiAlN 抗冲击 切削速度 150 400m/min 高切除率 适合高效加工	
硬质合金重载车削刀片	材质: WC 85% + Co 12% 硬度 HV 1500 几何: 方形 (SNMM) 负前角 (6° 2°) 强刃口	重载车削 粗加工 适用材料: 钢 铸铁
Cemented Carbide Heavy Duty Turning Insert	涂层: CVD TiC/Al ₂ O ₃ 耐冲击 切削速度 60 200m/min 适合大切深 (4 10mm) 高稳定性	用于铁路轮毂 锻造件 大型轴
硬质合金微型刀片	材质: 微粒 WC 硬度 HV 1600 几何: 三角 (TCGT) / 菱形 (DCGT) 正前角 (5° 10°) IC3 6mm	微孔镗削 精加工 适用材料: 钢 铝 不锈钢。用于电子元件 医疗器械
Cemented Carbide Micro Insert	涂层: PVD TiCN 精度±0.005mm 切削速度 50 150m/min 超高精度 适合微小加工	
CBN 车削刀片	材质: PCBN (CBN 40 100%) 硬度 HV 3500 4500 几何: 负前角 (5° 0°) 倒角/珩磨刃口 R 角 0.2 1.2mm	高速车削 淬硬钢 (≥45HRC) 镍基合金 精加工 硬车削。用于轴承 齿轮 汽车传动件
Cubic Boron Nitride Turning Insert	涂层: 无/薄 TiN (耐高温≤1400°C) 切削速度 200 800m/min 超高硬度 化学稳定性强 适合干式切削	
CBN 铣削刀片	材质: CBN 50 85% 硬度 HV 4000 几何: 方形 (SEKN) / 圆形 (RDKW) 2 4 刃 直径 10 50mm	铣削硬钢 (≤70HRC) 铸铁。模具精加工。用于航空零件 硬质模具
Cubic Boron Nitride Milling Insert	涂层: 无/TiAlN 耐磨性极高 切削速度 300 1000m/min 热稳定性好 适合高硬材料	
CBN 钻孔刀片	材质: CBN + 硬质合金基体 硬度 HV 4000 几何: 2 刃 点角 130° 140° 直径 5 20mm 精度 H8	钻孔 淬硬钢 陶瓷 精密孔加工。用于工具 钢 精密机械
Cubic Boron Nitride Drilling Insert	涂层: 无 抗冲击性强 切削速度 100 300m/min 高精度 适合硬材料钻孔	
CBN 磨削刀片	材质: CBN 颗粒 硬度 HV 4500 几何: 圆盘/棒状 粒度 100 800μm 结合剂树脂/金属	磨削硬质合金 模具钢 表面精加工。用于刀具 磨削 光学模具
Cubic Boron Nitride Grinding Insert	涂层: 无 耐磨寿命长 磨削速度 20 50m/s 适合高速磨削 热量低	
CBN 30 度菱形刀片	材质: PCBN (CBN 70 90%) 硬度 HV 4000 几何: 30° 菱形 (VNMG) 负前角 (5° 0°) R 角 0.2 0.8mm	精加工 淬硬钢 (≥50HRC) 镍基合金 高精度硬车削 用于滚子 精密齿轮
Cubic Boron Nitride 30° Rhombic Insert	涂层: 无/薄 TiN 耐高温≤1400°C 切削速度 250 800m/min 高硬度 适合精加工硬材料	
CBN 55 度菱形刀片	材质: PCBN (CBN 60 80%) 硬度 HV 3800	半精加工 精加工 淬硬

版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Cubic Boron Nitride 55° Rhombic Insert	几何：55°菱形（DNMG） 负前角（5° 0'） R角 0.4 1.0mm 涂层：无 耐磨性极高 切削速度 200 600m/min 适合硬材料中等切削	钢 硬车削 用于轴承 模具零件
CBN 切断切槽刀片 Cubic Boron Nitride Parting and Grooving Insert	材质：CBN + 硬质合金基体 硬度 HV 4000 几何：直刃 宽度 1 4mm 深度 2 15mm 涂层：无 抗冲击 切削速度 150 400m/min 精度±0.01mm 适合硬材料切槽 稳定性高	切断 切槽淬硬钢 铸铁 精密槽加工 用于硬质轴 齿轮槽
CBN 后扫刀片 Cubic Boron Nitride Wiper Insert	材质：PCBN（CBN 70%） 硬度 HV 4000 几何：带修光刃（DNMG W） 负前角（5° 0'） 表面光洁度 Ra0.1 0.2μm 涂层：无 切削速度 300 800m/min 进给率 0.05 0.15mm/r 提高表面质量 适合硬材料	精加工淬硬钢 镍基合金。高表面质量硬车削 用于精密滚子 航空零件
CBN 三角刀片 Cubic Boron Nitride Triangular Insert	材质：PCBN（CBN 60 80%） 硬度 HV 3800 几何：三角形（TNMG） 负前角（5° 0'） 边长 12 20mm 涂层：无/薄 TiN 切削速度 200 600m/min 适合硬材料通用加工	车削淬硬钢 铸铁 半精加工 精加工 用于模具 硬质辊
陶瓷车削刀片 Ceramic Turning Insert	材质：Al ₂ O ₃ /Si ₃ N ₄ 硬度 HV 2000 2500 几何：负前角（6° 8'） ISO 形状（SNGA CNGA） R角 0.4 1.2mm 无涂层 耐高温≤1200°C 切削速度 300 600m/min 化学稳定性高 较脆 需高刚性机床	高速车削铸铁 镍基合金。半精加工 精加工 用于发动机缸体 航空部件
陶瓷铣削刀片 Ceramic Milling Insert	材质：Si ₃ N ₄ + ZrO ₂ 硬度 HV 2200 几何：2 4 刃 方形（SEKN）/圆形 直径 10 40mm 螺旋角 15° 25° 无涂层 耐热性强 切削速度 400 800m/min 低韧性 适合稳定切削	高速铣削铸铁 高温合金。涡轮叶片 泵体加工 用于航空 能源设备
陶瓷钻孔刀片 Ceramic Drilling Insert	材质：Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ 硬度 HV 2100 几何：2 刃 点角 120° 135° 直径 3 15mm 精度 H7 H8 无涂层 耐磨性高 切削速度 50 150m/min 低切削力 适合硬脆材料	钻孔玻璃纤维 陶瓷 复合材料加工。用于航空 航天 电子基板
陶瓷磨削刀片 Ceramic Grinding Insert	材质：Si ₃ N ₄ 硬度 HV 2300 几何：粒度 50 500μm 棒状/盘状 结合剂陶瓷 无涂层 耐腐蚀性强 磨削速度 15 40m/s 适合精密磨削	磨削陶瓷 玻璃 光学镜头 精密模具加工。用于医疗器械 半导体
陶瓷 55 度菱形刀片 Ceramic 55° Rhombic Insert	材质：Si ₃ N ₄ 硬度 HV 2200 几何：55°菱形（DNGA） 负前角（6° 2'） R角 0.4 1.0mm 无涂层 耐高温≤1200°C 切削速度 300 600m/min 适合高速切削 需高刚性机床	高速精加工铸铁 高温合金。高精度车削 用于航空零件 涡轮机
陶瓷切断切槽刀片 Ceramic Parting and Grooving Insert	材质：Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ 硬度 HV 2100 几何：直刃 宽度 1 4mm 深度 2 10mm 无涂层 耐磨 切削速度 200 500m/min 精度±0.02mm 适合硬脆材料切槽	切断 切槽铸铁 陶瓷 精密槽加工。用于陶瓷零件 复合材料
陶瓷三角刀片	材质：Si ₃ N ₄ 硬度 HV 2200	车削铸铁 高温合金

版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Ceramic Triangular Insert	几何：三角形（TNGA） 负前角（6° 2°） 边长 10 20mm 无涂层 耐热性强 切削速度 300 600m/min 适合高速通用加工	半精加工 精加工 用于泵体 航空壳体
PCD 车削刀片 Polycrystalline	材质：PCD（金刚石 90 95%） 硬度 HV 8000 10000 几何：正前角（5° 15°） ISO 形状（CCMW VCMW） 单刃/多刃	高速车削铝合金 铜 精加工
Diamond Turning Insert	无涂层 超高硬度 切削速度 200 1000m/min 热导率高 适合非铁材料	用于汽车活塞 航空零件
PCD 铣削刀片 Polycrystalline	材质：PCD 硬度 HV 9000 几何：2 4 刃 方形（SEKN）/圆形 直径 5 20mm	铣削复合材料 塑料 高精度铣削
Diamond Milling Insert	无涂层 表面光洁度 Ra0.1 0.2μm 切削速度 500 1500m/min 适合高速 低摩擦切削	用于碳纤维 家具制造
PCD 钻孔刀片 Polycrystalline	材质：PCD + 硬质合金基体 硬度 HV 8500 几何：2 刃 点角 120° 130° 直径 3 15mm 精度 H7	钻孔玻璃纤维 复合材料
Diamond Drilling Insert	无涂层 耐磨性极高 切削速度 100 400m/min 适合非金属材料	精密孔加工 用于航空 电子元件
PCD 磨削刀片 Polycrystalline	材质：PCD 硬度 HV 9000 几何：粒度 50 300μm 圆盘状 结合剂金属	磨削陶瓷 非铁金属 表面精加工
Diamond Grinding Insert	无涂层 超长寿命 磨削速度 20 50m/s 适合高精度磨削	用于光学模具 精密零件
PCD55 度菱形刀片 Polycrystalline	材质：PCD 硬度 HV 9000 几何：55°菱形（DCMW） 正前角（5° 10°） R 角 0.2 0.8mm	精加工铝合金 铜 高精度车削
Diamond 55° Rhombic Insert	无涂层 切削速度 300 1200m/min 表面光洁度 Ra0.05 0.2μm 适合非铁材料精加工	用于汽车轮毂 光学零件
PCD 切断切槽刀片 Polycrystalline	材质：PCD + 硬质合金基体 硬度 HV 8500 几何：直刃 宽度 0.5 3mm 深度 1 8mm	切断 切槽铝合金 复合材料 精密槽加工
Diamond Parting and Grooving Insert	无涂层 耐磨 切削速度 200 800m/min 精度±0.01mm 适合非铁材料切槽	用于航空复合材料 电子零件
金属陶瓷车削刀片 Cermet Turning Insert	材质：Ti(C,N) + Co 硬度 HV 1800 2000 几何：正前角（5° 15°） ISO 形状（CCMT DCMT） R 角 0.4 1.2mm 涂层：PVD TiN 耐磨性高 切削速度 150 400m/min 兼具陶瓷硬度和金属韧性	高速车削钢 不锈钢 精加工 用于机械零件 模具
金属陶瓷铣削刀片 Cermet Milling Insert	材质：Ti(C,N) + (Ti,Nb,W)(C,N) 硬度 HV 1900 几何：方形（SEKN） 4 6 刃 螺旋角 10° 20° 涂层：PVD TiAlN 抗氧化 切削速度 200 500m/min 表面光洁度 Ra0.2 0.4μm 适合精加工	铣削钢 铸铁 高精度铣削 用于汽车零件 模具
金属陶瓷钻孔刀片 Cermet Drilling Insert	材质：Ti(C,N) + Co 硬度 HV 1850 几何：2 刃 点角 118° 130° 直径 5 15mm 精度 H8 涂层：PVD TiCN 耐磨性强 切削速度 80 200m/min 高精度 适合稳定钻削	钻孔钢 不锈钢 精密孔加工 用于机械 航空部件

版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

金属陶瓷螺纹刀片 Cermet Threading Insert	材质：Ti(C,N) 硬度 HV 1900 几何：60°螺纹 单齿 螺距 0.5 2mm 涂层：PVD TiN 抗粘屑 切削速度 100 250m/min 适合高精度螺纹加工	螺纹加工 钢 铝 精加工 用于管道 机械连接件
金属陶瓷 55 度菱形 刀片 Cermet 55° Rhombic Insert	材质：Ti(C,N) + Co 硬度 HV 1900 几何：55°菱形 (DCMT) 正前角 (5° 10°) R 角 0.4 0.8mm 涂层：PVD TiAlN 耐磨 切削速度 150 400m/min 适合精加工 表面光洁度高	精加工 钢 不锈钢 高精度车削 用于精密机械 模具零件
金属陶瓷切断切槽 刀片 Cermet Parting and Grooving Insert	材质：Ti(C,N) 硬度 HV 1900 几何：直刃 宽度 0.5 3mm 深度 1 10mm 涂层：PVD TiCN 抗粘屑 切削速度 120 300m/min 适合精密切槽 精度±0.01mm	切断 切槽 钢 铝 精密槽加工 用于轴类零件 电子零件



硬质合金、CBN、陶瓷、PCD、金属陶瓷刀片名称、特点与用途详表

以下为各种材料刀片（包括硬质合金、CBN、陶瓷、PCD、金属陶瓷）的全面列表，包含刀片名称、特点（材质组成、硬度、涂层、几何结构、切削参数等）和用途（适用材料、加工场景等）。硬质合金以碳化钨（WC）+钴（Co）为主，CBN 为超硬材料，陶瓷包括氧化铝（Al₂O₃）和氮化硅（Si₃N₄），PCD 为聚晶金刚石，金属陶瓷为钛基硬质颗粒复合。表格涵盖车削、铣削、钻孔、切槽、螺纹加工等多种功能，新增刀片角度分类（如 30 度菱形刀片）、加工作用分类（如切断切槽刀片、后扫刀片）、外形分类（如三角外圆刀片、六边形刀片）及其他业内常用分类（如高进给刀片、微型刀片），

刀片名称 Insert Name	特点 Characteristics	用途 Applications
硬质合金车削刀片 Cemented Carbide Turning Insert	材质：WC 80 90% + Co 6 12% 硬度 HV 1500 1800 几何：ISO 形状（CNMG WNMG） 正前角（5° 15°）/ 负前角（5° 0°） R 角 0.4 1.2mm 涂层：CVD TiC/Al ₂ O ₃ /TiN（耐磨 ≤1050℃）或 PVD TiAlN（韧性强 ≤900℃） 切削速度：100 300m/min 进给率 0.1 0.5mm/r 高韧性 适合多种切削条件	车削钢 不锈钢 铸铁 粗加工 半精加工 精加工 用于汽车曲轴 通用机械零件
硬质合金铣削刀片 Cemented Carbide Milling Insert	材质：WC 85 90% + Co 8 10% 硬度 HV 1600 几何：方形（SEKN）/ 圆形（RDKW） 4 8 刃 螺旋角 15° 30° 刃宽 2 10mm 涂层：PVD TiAlN（耐高温 ≤900℃）或 CVD MT TiCN（抗冲击） 切削速度：150 400m/min 进给率 0.05 0.3mm/齿 高强度 抗冲击 适合大切削量	平面 槽 轮廓铣削 适用材料：钢 铝 钛合金 用于航空航天零件 模具制造
硬质合金钻孔刀片 Cemented Carbide Drilling Insert	材质：WC 88% + Co 10% 硬度 HV 1550 几何：三角（SPMG）/ 方形 点角 118° 140° 内冷设计 直径 5 20mm 涂层：CVD TiN/Al ₂ O ₃ （耐磨） 精度 H7 H9 切削速度：50 150m/min 进给率 0.05 0.2mm/r 高精度 适合高速钻削	钻孔 扩孔 适用材料：钢 不锈钢 铸铁 用于汽车缸体 能源设备
硬质合金螺纹刀片 Cemented Carbide Threading Insert	材质：WC + Co 硬度 HV 1500 几何：60°UN/ISO 螺纹 单齿/多齿 螺距 0.5 3mm 涂层：PVD TiCN（抗粘屑） 精度±0.02mm 切削速度：80 200m/min 进给率 0.03 0.1mm/r 适合内外螺纹 加工稳定性高	螺纹加工（M3 M20 NPT） 适用材料：钢 铝 用于管道配件 机械螺栓
硬质合金切槽刀片 Cemented Carbide Grooving Insert	材质：WC 90% + Co 8% 硬度 HV 1600 几何：窄槽/宽槽 宽度 0.5 5mm R 角 0.1 0.5mm 涂层：CVD TiC（耐磨性佳） 切削速度 100 250m/min 高刚性 适合深槽加工 精度±0.01mm	切槽 切断 适用材料：钢 不锈钢 用于轴类零件 轴承槽 密封圈槽
硬质合金可转位刀片 Cemented Carbide Indexable Insert	材质：WC + Co 硬度 HV 1500 1700 几何：多边形（SNMG TNMG） 4 8 刃 ISO 标准 涂层：CVD Al ₂ O ₃ /TiN 或 PVD TiAlN 耐磨性高 切削速度：100 350m/min 进给率 0.1 0.4mm/r 通用性强 成本效益高	车削 铣削 钻孔多用途 适用材料：钢 铸铁 铝 用于批量生产 通用机械加工

版权与免责声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

硬质合金 30 度菱形刀片 Cemented Carbide 30° Rhombic Insert	材质：WC 85% + Co 10% 硬度 HV 1550 几何：30°菱形（VCMT） 正前角（5° 10°） R 角 0.2 0.8mm 涂层：PVD TiAlN 耐高温≤900°C 切削速度 120 300m/min 适合小切深 切削力低 精度高	精加工钢 不锈钢 铝 高精度车削 用于精密零件 医疗器械
硬质合金 55 度菱形刀片 Cemented Carbide 55° Rhombic Insert	材质：WC 88% + Co 8% 硬度 HV 1600 几何：55°菱形（DCMT） 正前角（7° 12°） R 角 0.4 1.0mm 涂层：CVD TiCN/Al ₂ O ₃ 耐磨性强 切削速度 100 280m/min 通用性强 适合中等切削	半精加工 精加工钢 铸铁 通用车削 用于机械零件 泵体
硬质合金 80 度菱形刀片 Cemented Carbide 80° Rhombic Insert	材质：WC 90% + Co 8% 硬度 HV 1500 几何：80°菱形（CNMG） 负前角（5° 0°） R 角 0.8 1.6mm 涂层：CVD TiC/Al ₂ O ₃ /TiN 耐冲击 切削速度 80 250m/min 高强度 适合重载加工	粗加工 半精加工钢 不锈钢 重型车削 用于铁路轮毂 锻件
硬质合金切断切槽刀片 Cemented Carbide Parting and Grooving Insert	材质：WC 90% + Co 8% 硬度 HV 1600 几何：直刃/弧形刃 宽度 16mm 深度 2 20mm 涂层：PVD TiCN（抗粘屑） 切削速度 90 220m/min 高刚性 适合切断和深槽 精度±0.02mm	切断 深槽加工 适用材料：钢 不锈钢 铝 用于棒材切断 轴类零件 槽加工
硬质合金后扫刀片 Cemented Carbide Wiper Insert	材质：WC 88% + Co 10% 硬度 HV 1550 几何：带修光刃（CNMG W WNMG W） 正前角（5° 10°） 涂层：CVD Al ₂ O ₃ /TiN 表面光洁度 Ra0.1 0.3μm 切削速度：150 350m/min 进给率 0.05 0.2mm/r 提高表面质量 减少二次加工	精加工钢 不锈钢 高表面质量车削 用于轴类零件 液压件
硬质合金仿形刀片 Cemented Carbide Profiling Insert	材质：WC 85% + Co 10% 硬度 HV 1600 几何：圆形（RCMX）/特殊廓形 正前角（5° 15°） 涂层：PVD TiAlN 耐磨 切削速度 120 300m/min 适合复杂轮廓 精度±0.01mm	仿形车削 轮廓加工 适用材料：钢 铝 铸铁 用于模具 涡轮叶片 复杂零件
硬质合金三角外圆刀片 Cemented Carbide Triangular External Turning Insert	材质：WC 90% + Co 8% 硬度 HV 1500 几何：三角形（TNMG） 负前角（5° 0°） 边长 12 25mm 涂层：CVD TiC/Al ₂ O ₃ 耐冲击 切削速度 100 280m/min 高强度 适合外圆加工	外圆车削 粗加工 适用材料：钢 铸铁 用于轴类零件 辊轴
硬质合金内孔镗刀片 Cemented Carbide Internal Boring Insert	材质：WC 88% + Co 10% 硬度 HV 1550 几何：三角（TPGT）/菱形（CCMT） 正前角（5° 10°） 小尺寸（IC6 12mm） 涂层：PVD TiCN 切削速度 80 200m/min 精度 H7 H8 适合小孔加工 切削力低	内孔镗削 精加工 适用材料：钢 不锈钢 用于液压缸孔 模具孔
硬质合金三角刀片 Cemented Carbide Triangular Insert	材质：WC 85% + Co 10% 硬度 HV 1600 几何：三角形（TCMT） 正前角（7° 12°） 边长 6 16mm 涂层：CVD TiCN/Al ₂ O ₃ 耐磨 切削速度 100 300m/min 通用性强 适合多种加工	车削 铣削钢 不锈钢 半精加工 精加工 用于机械零件 阀门
硬质合金六边形刀片 Cemented Carbide Hexagonal Insert	材质：WC 90% + Co 8% 硬度 HV 1500 几何：六边形（WNMG） 负前角（5° 0°） 6 刃 边长 10 20mm 涂层：CVD Al ₂ O ₃ /TiN 耐冲击 切削速度 80 250m/min	粗加工 半精加工钢 铸铁 重型车削 用于铁路零件 工程机械

	高经济性 适合重载	
硬质合金高进给刀片 Cemented Carbide High Feed Insert	材质：WC 88% + Co 10% 硬度 HV 1550 几何：方形（SDMX）/ 圆形 强刃口设计 进给率 0.5 2mm/齿 涂层：PVD TiAlN 抗冲击 切削速度 150 400m/min 高切除率 适合高效加工	高进给铣削 粗加工 适用材料：钢 不锈钢 钛合金。用于模具坯料 航空结构件
硬质合金重载车削刀片 Cemented Carbide Heavy Duty Turning Insert	材质：WC 85% + Co 12% 硬度 HV 1500 几何：方形（SNMM） 负前角（6° 2°） 强刃口 涂层：CVD TiC/Al ₂ O ₃ 耐冲击 切削速度 60 200m/min 适合大切深（4 10mm） 高稳定性	重载车削 粗加工 适用材料：钢 铸铁 用于铁路轮毂 锻造件 大型轴
硬质合金微型刀片 Cemented Carbide Micro Insert	材质：微粒 WC 硬度 HV 1600 几何：三角（TCGT）/ 菱形（DCGT） 正前角（5° 10°） IC3 6mm 涂层：PVD TiCN 精度±0.005mm 切削速度 50 150m/min 超高精度 适合微小加工	微孔镗削 精加工 适用材料：钢 铝 不锈钢 用于电子元件 医疗器械
CBN 车削刀片 Cubic Boron Nitride Turning Insert	材质：PCBN（CBN 40 100%） 硬度 HV 3500 4500 几何：负前角（5° 0°） 倒角/珩磨刃口 R 角 0.2 1.2mm 涂层：无/薄 TiN（耐高温≤1400°C） 切削速度 200 800m/min 超高硬度 化学稳定性强 适合干式切削	高速车削 淬硬钢（≥45HRC） 镍基合金 精加工 硬车削。用于轴承 齿轮 汽车传动件
CBN 铣削刀片 Cubic Boron Nitride Milling Insert	材质：CBN 50 85% 硬度 HV 4000 几何：方形（SEKN）/ 圆形（RDKW） 2 4 刃 直径 10 50mm 涂层：无/TiAlN 耐磨性极高 切削速度 300 1000m/min 热稳定性好 适合高硬材料	铣削硬钢（≤70HRC） 铸铁 模具精加工。用于航空零件 硬质模具
CBN 钻孔刀片 Cubic Boron Nitride Drilling Insert	材质：CBN + 硬质合金基体 硬度 HV 4000 几何：2 刃 点角 130° 140° 直径 5 20mm 精度 H8 涂层：无 抗冲击性强 切削速度 100 300m/min 高精度 适合硬材料钻孔	钻孔淬硬钢 陶瓷 精密孔加工。用于工具钢 精密机械
CBN 磨削刀片 Cubic Boron Nitride Grinding Insert	材质：CBN 颗粒 硬度 HV 4500 几何：圆盘/棒状 粒度 100 800μm 结合剂树脂/金属 涂层：无 耐磨寿命长 磨削速度 20 50m/s 适合高速磨削 热量低	磨削硬质合金 模具钢 表面精加工。用于刀具磨削 光学模具
CBN30 度菱形刀片 Cubic Boron Nitride 30° Rhombic Insert	材质：PCBN（CBN 70 90%） 硬度 HV 4000 几何：30°菱形（VNMG） 负前角（5° 0°） R 角 0.2 0.8mm 涂层：无/薄 TiN 耐高温≤1400°C 切削速度 250 800m/min 高硬度 适合精加工硬材料	精加工淬硬钢（≥50HRC） 镍基合金。高精度硬车削 用于滚子 精密齿轮
CBN55 度菱形刀片 Cubic Boron Nitride 55° Rhombic Insert	材质：PCBN（CBN 60 80%） 硬度 HV 3800 几何：55°菱形（DNMG） 负前角（5° 0°） R 角 0.4 1.0mm 涂层：无 耐磨性极高 切削速度 200 600m/min 适合硬材料中等切削	半精加工 精加工淬硬钢 硬车削。用于轴承 模具零件
CBN 切断切槽刀片 Cubic Boron Nitride Parting and Grooving	材质：CBN + 硬质合金基体 硬度 HV 4000 几何：直刃 宽度 1 4mm 深度 2 15mm 涂层：无 抗冲击 切削速度 150 400m/min 精度±0.01mm	切断 切槽淬硬钢 铸铁 精密槽加工。用于硬质轴 齿轮槽

Insert	适合硬材料切槽 稳定性高	
CBN 后扫刀片 Cubic Boron Nitride Wiper Insert	材质：PCBN（CBN 70%） 硬度 HV 4000 几何：带修光刃（DNMG W） 负前角（5° 0°） 表面光洁度 Ra0.1 0.2μm 涂层：无 切削速度 300 800m/min 进给率 0.05 0.15mm/r 提高表面质量 适合硬材料	精加工淬硬钢 镍基合金 高表面质量硬车削 用于精密滚子 航空零件
CBN 三角刀片 Cubic Boron Nitride Triangular Insert	材质：PCBN（CBN 60 80%） 硬度 HV 3800 几何：三角形（TNMG） 负前角（5° 0°） 边长 12 20mm 涂层：无/薄 TiN 切削速度 200 600m/min 适合硬材料通用加工	车削淬硬钢 铸铁 半精加工 精加工 用于模具 硬质辊
陶瓷车削刀片 Ceramic Turning Insert	材质：Al ₂ O ₃ /Si ₃ N ₄ 硬度 HV 2000 2500 几何：负前角（6° 8°） ISO 形状（SNGA CNGA） R 角 0.4 1.2mm 无涂层 耐高温≤1200℃ 切削速度 300 600m/min 化学稳定性高 较脆 需高刚性机床	高速车削铸铁 镍基合金 半精加工 精加工 用于发动机缸体 航空部件
陶瓷铣削刀片 Ceramic Milling Insert	材质：Si ₃ N ₄ + ZrO ₂ 硬度 HV 2200 几何：2 4 刃 方形（SEKN）/圆形 直径 10 40mm 螺旋角 15° 25° 无涂层 耐热性强 切削速度 400 800m/min 低韧性 适合稳定切削	高速铣削铸铁 高温合金 涡轮叶片 泵体加工 用于航空 能源设备
陶瓷钻孔刀片 Ceramic Drilling Insert	材质：Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ 硬度 HV 2100 几何：2 刃 点角 120° 135° 直径 3 15mm 精度 H7 H8 无涂层 耐磨性高 切削速度 50 150m/min 低切削力 适合硬脆材料	钻孔玻璃纤维 陶瓷 复合材料加工 用于航空航天 电子基板
陶瓷磨削刀片 Ceramic Grinding Insert	材质：Si ₃ N ₄ 硬度 HV 2300 几何：粒度 50 500μm 棒状/盘状 结合剂陶瓷 无涂层 耐腐蚀性强 磨削速度 15 40m/s 适合精密磨削	磨削陶瓷 玻璃 光学镜头 精密模具加工 用于医疗器械 半导体
陶瓷 55 度菱形刀片 Ceramic 55° Rhombic Insert	材质：Si ₃ N ₄ 硬度 HV 2200 几何：55°菱形（DNGA） 负前角（6° 2°） R 角 0.4 1.0mm 无涂层 耐高温≤1200℃ 切削速度 300 600m/min 适合高速切削 需高刚性机床	高速精加工铸铁 高温合金 高精度车削 用于航空零件 涡轮机
陶瓷切断切槽刀片 Ceramic Parting and Grooving Insert	材质：Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ 硬度 HV 2100 几何：直刃 宽度 1 4mm 深度 2 10mm 无涂层 耐磨 切削速度 200 500m/min 精度±0.02mm 适合硬脆材料切槽	切断 切槽铸铁 陶瓷 精密槽加工 用于陶瓷零件 复合材料
陶瓷三角刀片 Ceramic Triangular Insert	材质：Si ₃ N ₄ 硬度 HV 2200 几何：三角形（TNGA） 负前角（6° 2°） 边长 10 20mm 无涂层 耐热性强 切削速度 300 600m/min 适合高速通用加工	车削铸铁 高温合金 半精加工 精加工 用于泵体 航空壳体
PCD 车削刀片 Polycrystalline Diamond Turning Insert	材质：PCD（金刚石 90 95%） 硬度 HV 8000 10000 几何：正前角（5° 15°） ISO 形状（CCMW VCMW） 单刃/多刃 无涂层 超高硬度 切削速度 200 1000m/min	高速车削铝合金 铜 精加工 用于汽车活塞 航空零件

版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

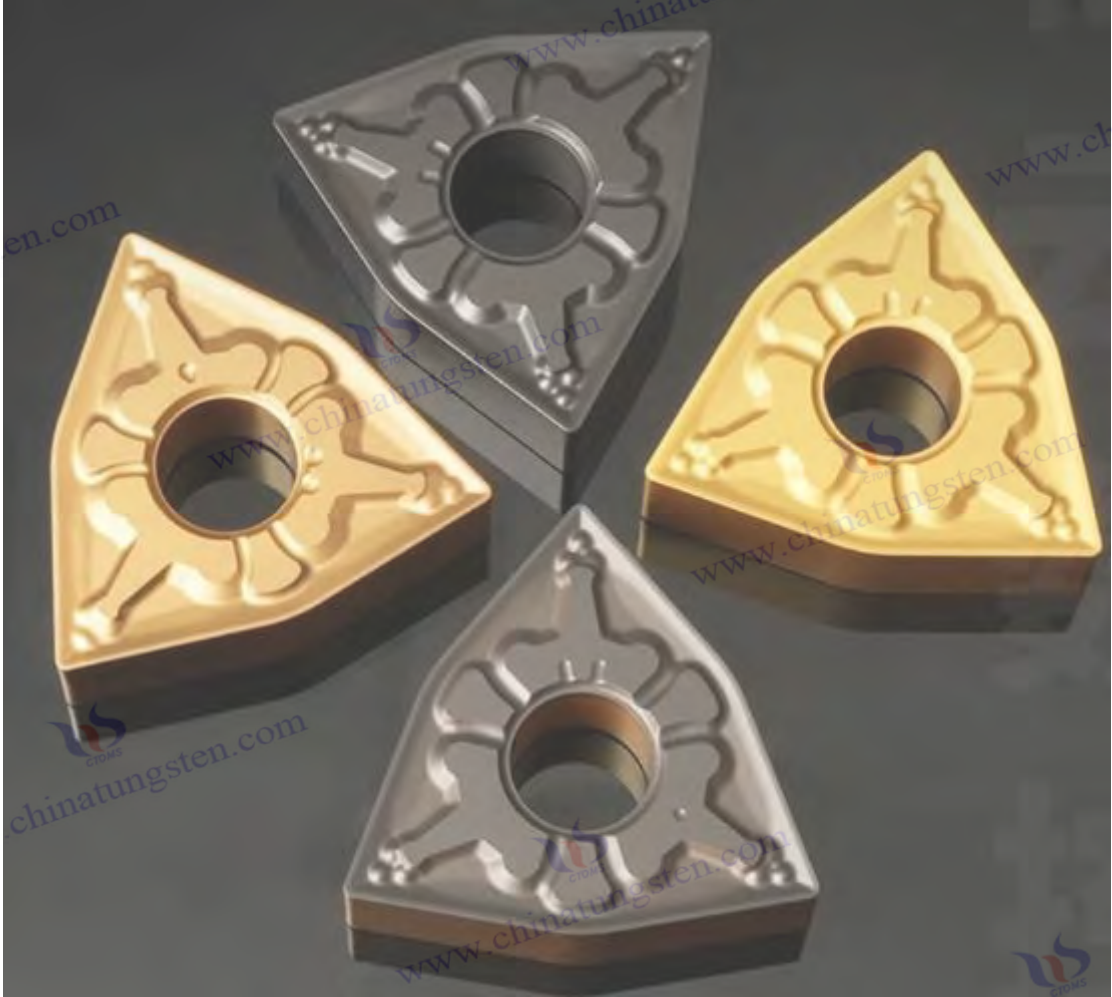
	热导率高 适合非铁材料	
PCD 铣削刀片 Polycrystalline Diamond Milling Insert	材质：PCD 硬度 HV 9000 几何：24 刃 方形（SEKN）/圆形 直径 5 20mm 无涂层 表面光洁度 Ra0.1 0.2μm 切削速度 500 1500m/min 适合高速 低摩擦切削	铣削复合材料 塑料 高精度铣削 用于碳纤维 家具制造
PCD 钻孔刀片 Polycrystalline Diamond Drilling Insert	材质：PCD + 硬质合金基体 硬度 HV 8500 几何：2 刃 点角 120° 130° 直径 3 15mm 精度 H7 无涂层 耐磨性极高 切削速度 100 400m/min 适合非金属材料	钻孔玻璃纤维 复合材料 精密孔加工 用于航空 电子元件
PCD 磨削刀片 Polycrystalline Diamond Grinding Insert	材质：PCD 硬度 HV 9000 几何：粒度 50 300μm 圆盘状 结合剂金属 无涂层 超长寿命 磨削速度 20 50m/s 适合高精度磨削	磨削陶瓷 非铁金属 表面精加工 用于光学模具 精密零件
PCD55 度菱形刀片 Polycrystalline Diamond 55° Rhombic Insert	材质：PCD 硬度 HV 9000 几何：55°菱形（DCMW） 正前角（5° 10°） R 角 0.2 0.8mm 无涂层 切削速度 300 1200m/min 表面光洁度 Ra0.05 0.2μm 适合非铁材料精加工	精加工铝合金 铜 高精度车削 用于汽车轮毂 光学零件
PCD 切断切槽刀片 Polycrystalline Diamond Parting and Grooving Insert	材质：PCD + 硬质合金基体 硬度 HV 8500 几何：直刃 宽度 0.5 3mm 深度 1 8mm 无涂层 耐磨 切削速度 200 800m/min 精度±0.01mm 适合非铁材料切槽	切断 切槽铝合金 复合材料 精密槽加工 用于航空复合材料 电子零件
金属陶瓷车削刀片 Cermet Turning Insert	材质：Ti(C,N) + Co 硬度 HV 1800 2000 几何：正前角（5° 15°） ISO 形状（CCMT DCMT） R 角 0.4 1.2mm 涂层：PVD TiN 耐磨性高 切削速度 150 400m/min 兼具陶瓷硬度和金属韧性	高速车削钢 不锈钢 精加工 用于机械零件 模具
金属陶瓷铣削刀片 Cermet Milling Insert	材质：Ti(C,N) + (Ti,Nb,W)(C,N) 硬度 HV 1900 几何：方形（SEKN） 4 6 刃 螺旋角 10° 20° 涂层：PVD TiAlN 抗氧化 切削速度 200 500m/min 表面光洁度 Ra0.2 0.4μm 适合精加工	铣削钢 铸铁 高精度铣削 用于汽车零件 模具
金属陶瓷钻孔刀片 Cermet Drilling Insert	材质：Ti(C,N) + Co 硬度 HV 1850 几何：2 刃 点角 118° 130° 直径 5 15mm 精度 H8 涂层：PVD TiCN 耐磨性强 切削速度 80 200m/min 高精度 适合稳定钻削	钻孔钢 不锈钢 精密孔加工 用于机械 航空部件
金属陶瓷螺纹刀片 Cermet Threading Insert	材质：Ti(C,N) 硬度 HV 1900 几何：60°螺纹 单齿 螺距 0.5 2mm 涂层：PVD TiN 抗粘屑 切削速度 100 250m/min 适合高精度螺纹加工	螺纹加工钢 铝 精加工 用于管道 机械连接件
金属陶瓷 55 度菱形刀片 Cermet 55° Rhombic	材质：Ti(C,N) + Co 硬度 HV 1900 几何：55°菱形（DCMT） 正前角（5° 10°） R 角 0.4 0.8mm	精加工钢 不锈钢 高精度车削

版权与免责声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Insert	涂层：PVD TiAlN 耐磨 切削速度 150 400m/min 适合精加工 表面光洁度高	用于精密机械 模具零件
金属陶瓷切断切槽刀片 Cermet Parting and Grooving Insert	材质：Ti(C,N) 硬度 HV 1900 几何：直刃 宽度 0.5 3mm 深度 1 10mm 涂层：PVD TiCN 抗粘屑 切削速度 120 300m/min 适合精密切槽 精度±0.01mm	切断 切槽钢 铝 精密槽加工 用于轴类零件 电子零件



硬质合金、CBN（立方氮化硼）、陶瓷、PCD（多晶金刚石）和
高速钢（HSS）钻头、特点与用途

以下为高速钢（HSS）、钴钢、硬质合金（碳化钨基）、CBN（立方氮化硼）、陶瓷和 PCD（多晶金刚石）钻头的全面列表，包含名称（集成材料类型及完整英文名称，细分类型如扩孔钻、阶梯钻、铲形钻等）、特点（材质组成、硬度、涂层、几何结构、性能等）和用途（适用材料、加工场景等）。钻头用于钻孔、扩孔、沉孔、定位、深孔加工等，适用于不同材料和工况。表格采用三列格式，涵盖所有常见和专用钻头类型，基于全网资料整理，确保最大程度的完整性和准确性。

钻头名称	特点	用途
高速钢扭转钻头 Twist Drill Bit	- 材质：HSS（M2/M7，含钼、钨、钒），硬度 HRC 60-62 - 点角 118°（软材料）或 135°（硬材料），螺旋角 20°-30°，2 刃 - 涂层：TiN（耐磨，≤500°C）、黑氧化物（减摩擦）或无涂层 - 韧性高，成本低，耐磨性一般，适合低速	- 通用钻孔，浅孔加工 - 适用材料：低碳钢、铝、铜、木材、塑料 - 用于手工钻、维修、教育
高速钢扩孔钻头 Reamer Drill Bit	- 材质：HSS，硬度 HRC 60-62 - 直刃/螺旋刃，6-8 刃，公差 H7/H8，直径 3-40 mm - 涂层：无，表面光洁度高 - 高精度，低切削力，需预钻孔，易磨损	- 精加工孔径，改善表面质量 - 适用材料：钢、铝、铜 - 用于机械装配、模具孔加工
高速钢阶梯钻头 Step Drill Bit	- 材质：HSS（M2），硬度 HRC 60 - 多级直径（4-32 mm），锥形，2 刃，台阶间距 2-4 mm - 涂层：TiN，减摩擦，防粘屑 - 适合薄板，易控制孔径，抗振动	- 阶梯孔、扩孔、去毛刺 - 适用材料：薄钢板、铝、PVC - 用于电气安装、汽车钣金
高速钢沉头钻头 Countersink Drill Bit	- 材质：HSS，硬度 HRC 60-62 - 锥角 60°-120°（常见 82°/90°），2-4 刃，单/双端 - 涂层：黑氧化物，表面光洁 - 韧性好，适合低速，易磨损	- 沉头孔、倒角、去毛刺 - 适用材料：木材、软金属、塑料 - 用于木工、家具装配
高速钢平底钻头 Flat Bottom Drill Bit	- 材质：HSS，硬度 HRC 60 - 平底设计，1-2 刃，点角 180°，直径 6-50 mm - 涂层：无，成本低 - 适合浅孔，控制深度精准，切削力高	- 平底盲孔、浅孔加工 - 适用材料：木材、塑料、软金属 - 用于铰链孔、门锁安装
高速钢点钻头 Spotting Drill Bit	- 材质：HSS，硬度 HRC 60-62 - 点角 90°-120°，短刃（长度 1-2x 直径），2 刃 - 涂层：TiN，抗崩刃 - 高精度，适合定位，减少偏移	- 定位钻孔，预钻中心点 - 适用材料：钢、铝、铸铁 - 用于 CNC 加工、机械零件
高速钢中心钻头 Center Drill Bit	- 材质：HSS，硬度 HRC 60 - 双端，点角 60°（引导）+118°（钻孔），直径 1-10 mm - 涂层：无，韧性好 - 短而刚性，适合车床定位	- 中心孔加工，引导后续钻孔 - 适用材料：钢、铸铁 - 用于车床、轴类零件
高速钢铲形钻头 Spade Drill Bit	- 材质：HSS，硬度 HRC 60 - 平板状刀头，直径 10-100 mm，可换刀片 - 涂层：无，低成本 - 适合大直径浅孔，切削力高	- 大直径浅孔钻削 - 适用材料：木材、软金属 - 用于建筑、木工粗加工
高速钢枪钻头	- 材质：HSS，硬度 HRC 60-62	- 超深孔钻削（>10x 直径）

Gun Drill Bit	- 单刃，长细管状（长度 10-50x 直径），直径 1-50 mm - 涂层：无，需高压冷却液 - 适合超深孔，精度高，加工慢	- 适用材料：钢、铝 - 用于枪管、模具冷却孔
高速钢锥形钻头 Taper Drill Bit	- 材质：HSS，硬度 HRC 60 - 锥角 1:10-1:50（Morse 锥度），直径 6-50 mm - 涂层：无，韧性好 - 适合锥形孔，需低速	- 锥形孔加工 - 适用材料：钢、铸铁 - 用于机床主轴、锥形销孔
钴钢扭转钻头 Cobalt Twist Drill Bit	- 材质：HSS+5-8%钴（M35/M42），硬度 HRC 62-65 - 点角 135°，螺旋角 25°-35°，2 刃，深槽设计 - 涂层：TiAlN（耐热，≤600°C）或 Amber（减摩擦） - 高耐热性，较脆，需对齐	- 硬金属钻孔，浅/中深孔 - 适用材料：不锈钢、硬钢、钛合金 - 用于航空、汽车零件
钴钢阶梯钻头 Cobalt Step Drill Bit	- 材质：HSS+钴，硬度 HRC 63 - 多级直径（6-40 mm），锥形，2 刃，台阶间距 3-5 mm - 涂层：TiAlN，耐高温，防粘屑 - 高硬度，适合硬薄板，抗磨损	- 阶梯孔、扩孔 - 适用材料：不锈钢、铝板、硬塑料 - 用于管道安装、金属加工
钴钢沉头钻头 Cobalt Countersink Drill Bit	- 材质：HSS+钴，硬度 HRC 62-64 - 锥角 82°/90°，3-4 刃，单端设计 - 涂层：TiN，表面光洁度高 - 耐热性强，适合硬材料	- 沉头孔、倒角 - 适用材料：不锈钢、钢、铝 - 用于机械装配、航空零件
钴钢点钻头 Cobalt Spotting Drill Bit	- 材质：HSS+钴，硬度 HRC 63 - 点角 90°-120°，短刃（长度 1-2x 直径），2 刃 - 涂层：TiAlN，抗崩刃 - 高精度，适合硬材料定位	- 定位钻孔，预钻中心点 - 适用材料：硬钢、不锈钢 - 用于 CNC 加工、航空部件
硬质合金扭转钻头 Carbide Twist Drill Bit	- 材质：WC 90-94%+Co 6-10%，硬度 HRC 82 - 点角 118°（通用）或 140°（硬材料），螺旋角 30°-40°，2-3 刃 - 涂层：AlTiN（耐磨，≤800°C）、TiCN（低摩擦） - 超高硬度，易碎，需刚性设备	- 精密钻孔，中/深孔 - 适用材料：钢、不锈钢、铸铁、铝 - 用于 CNC 加工、航空部件
硬质合金内冷钻头 Carbide Coolant-Through Drill Bit	- 材质：微粒 WC，硬度 HRC 82 - 点角 135°-140°，内冷孔（1-2 mm），2 刃，深槽 - 涂层：PVD AlTiN（耐热，≤900°C） - 高效排屑，适合深孔（5-20x 直径）	- 深孔钻削，高精度 - 适用材料：硬钢、钛合金、不锈钢 - 用于模具、航空发动机
硬质合金扩孔钻头 Carbide Reamer Drill Bit	- 材质：WC+Co，硬度 HRC 82 - 直刃/螺旋刃，6-8 刃，公差 H6/H7，直径 2-40 mm - 涂层：TiCN，表面光洁度高 - 高精度，低切削力，需预钻孔	- 孔精加工，尺寸控制 - 适用材料：钢、铝、铜、铸铁 - 用于精密机械、模具孔加工
硬质合金沉头钻头 Carbide Countersink Drill Bit	- 材质：WC，硬度 HRC 82 - 锥角 82°/90°，3-4 刃，单端，直径 5-25 mm - 涂层：TiCN/AlTiN，耐磨性强 - 高硬度，适合硬材料，表面光洁	- 沉头孔、倒角、去毛刺 - 适用材料：钢、不锈钢、铝 - 用于机械装配、航空零件
硬质合金点钻头	- 材质：WC，硬度 HRC 82	- 定位钻孔，预钻中心点

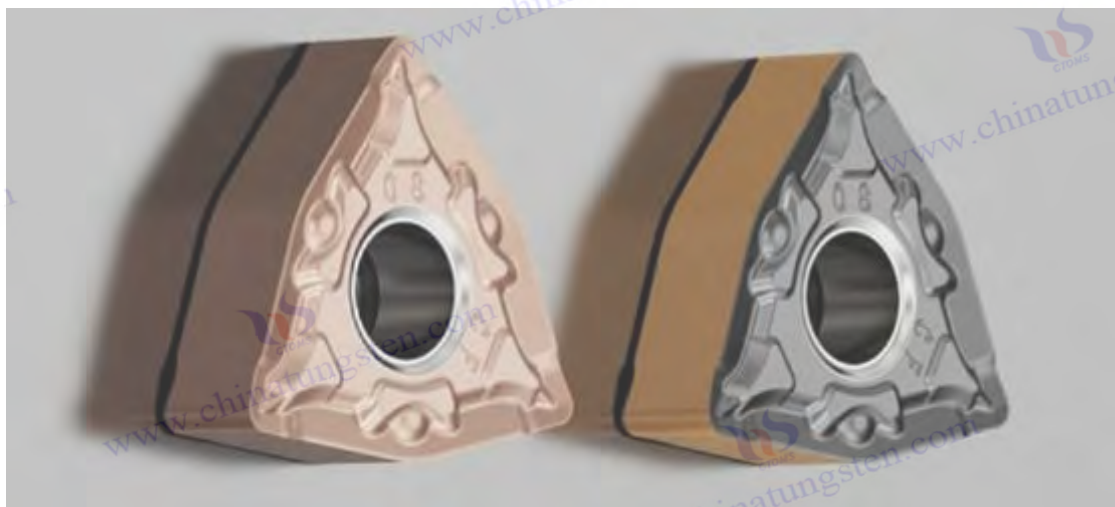
Carbide Spotting Drill Bit	- 点角 90°-120°，短刃（长度 1-2x 直径），2 刃 - 涂层：AlTiN，抗崩刃，高精度 - 刚性强，减少钻孔偏移	- 适用材料：钢、铸铁、硬铝 - 用于 CNC 精密加工
硬质合金中心钻头 Carbide Center Drill Bit	- 材质：微粒 WC，硬度 HRC 82 - 双端，点角 60°（引导）+118°（钻孔），直径 1-12 mm - 涂层：TiN，耐磨性高 - 高精度，适合高速定位	- 中心孔加工，引导后续钻孔 - 适用材料：硬钢、铸铁 - 用于车床、轴类零件
硬质合金微型钻头 Carbide Micro Drill Bit	- 材质：超微粒 WC，硬度 HRC 82 - 直径 0.1-3 mm，点角 120°-135°，2 刃，短槽 - 涂层：AlTiN/无涂层，超高精度 - 抗折断，适合微小孔加工	- 微孔加工（≤0.5 mm） - 适用材料：钢、铝、PCB、塑料 - 用于电子元件、医疗器械
硬质合金枪钻头 Carbide Gun Drill Bit	- 材质：WC+Co，硬度 HRC 82 - 单刃，长细管状（长度 20-100x 直径），直径 0.5-50 mm - 涂层：AlTiN，需高压冷却液 - 超深孔加工，精度高，排屑优	- 超深孔钻削（>20x 直径） - 适用材料：钢、铸铁、铝 - 用于液压系统、模具冷却孔
硬质合金铲形钻头 Carbide Spade Drill Bit	- 材质：WC，硬度 HRC 82 - 平板状刀头，可换刀片，直径 10-150 mm - 涂层：TiCN，耐磨性强 - 适合大直径浅孔，高刚性	- 大直径浅孔钻削 - 适用材料：钢、铸铁 - 用于重型机械、桥梁结构
硬质合金环形钻头 Carbide Trepanning Drill Bit	- 材质：WC+Co，硬度 HRC 82 - 空心圆筒，周边切削刃，直径 20-200 mm - 涂层：AlTiN，切屑少 - 适合大直径浅孔，材料利用率高	- 大直径环形孔加工 - 适用材料：钢、铝 - 用于压力容器、法兰加工
硬质合金锥形钻头 Carbide Taper Drill Bit	- 材质：WC，硬度 HRC 82 - 锥角 1:10-1:50（Morse 锥度），直径 6-50 mm - 涂层：TiN，耐磨性高 - 高精度，适合锥形孔	- 锥形孔加工 - 适用材料：硬钢、铸铁 - 用于机床主轴、锥形销孔
CBN 扭转钻头 CBN Twist Drill Bit	- 材质：PCBN（CBN 70-95%），硬度 HV 3500-4500 - 点角 130°-140°，螺旋角 25°-30°，2 刃，深槽 - 涂层：无/薄 TiN（耐高温，≤1400°C） - 超硬，适合干式切削，热稳定性好	- 硬材料钻孔，中/深孔 - 适用材料：淬硬钢（≥45 HRC）、工具钢 - 用于模具、轴承加工
CBN 点钻头 CBN Spotting Drill Bit	- 材质：CBN+硬质合金基体，硬度 HV 4000 - 点角 90°-120°，短刃（长度 1-2x 直径），2 刃 - 涂层：无，耐冲击，高精度 - 刚性强，适合硬材料定位	- 硬材料定位钻孔 - 适用材料：硬钢、陶瓷 - 用于精密机械、工具钢加工
CBN 扩孔钻头 CBN Reamer Drill Bit	- 材质：PCBN，硬度 HV 3800-4500 - 直刃/螺旋刃，6-8 刃，公差 H6，直径 3-30 mm - 涂层：无，表面光洁度极高 - 超高硬度，适合硬材料精加工	- 硬材料孔精加工 - 适用材料：淬硬钢、硬质合金 - 用于模具、精密零件
陶瓷扭转钻头	- 材质：Al₂O₃/Si₃N₄，硬度 HV 2000-2500	- 复合材料钻孔，浅/中深孔

版权与免责声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Ceramic Twist Drill Bit	- 点角 120°-135°，螺旋角 20°-30°，2 刃 - 涂层：无，耐高温 ($\leq 1200^{\circ}\text{C}$)，化学稳定 - 低韧性，需高刚性机床，低速加工	- 适用材料：玻璃纤维、碳纤维、CFRP - 用于航空复合材料加工
陶瓷玻璃钻头 Ceramic Glass Drill Bit	- 材质：$\text{Si}_3\text{N}_4+\text{ZrO}_2$，硬度 HV 2100 - 矛形尖端，直径 3-10 mm，无螺旋槽 - 涂层：无，低切削力，防崩裂 - 适合脆性材料，需水冷，低速	- 玻璃、陶瓷钻孔 - 适用材料：玻璃、瓷砖、陶瓷 - 用于装饰、建筑安装
陶瓷复合材料钻头 Ceramic Composite Drill Bit	- 材质：$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$，硬度 HV 2200 - 点角 130°-140°，低剪切槽型，2 刃 - 涂层：无，耐磨性高 - 抗分层，适合叠层材料，需低速	- 复合材料钻孔 - 适用材料：CFRP、GFRP - 用于航空航天结构件
PCD 扭转钻头 PCD Twist Drill Bit	- 材质：PCD+硬质合金基体，硬度 HV 7000-8000 - 点角 118°-135°，螺旋角 25°-35°，2 刃 - 涂层：无，超低摩擦，表面光洁 - 极耐磨，适合非铁材料	- 高速钻孔，浅/中深孔 - 适用材料：铝、铜、复合材料 - 用于汽车活塞、航空部件
PCD 玻璃钻头 PCD Glass Drill Bit	- 材质：PCD，硬度 HV 7500 - 矛形/锥形尖端，直径 2-12 mm，无螺旋槽 - 涂层：无，高精度，防崩裂 - 适合脆性材料，需水冷	- 精密玻璃、陶瓷钻孔 - 适用材料：玻璃、陶瓷、宝石 - 用于光学镜头、电子元件
PCD 复合材料钻头 PCD Composite Drill Bit	- 材质：PCD+WC 基体，硬度 HV 7200 - 点角 130°-140°，特殊槽型（低剪切），2 刃 - 涂层：AlCrSi/TiN（耐磨，$\leq 600^{\circ}\text{C}$） - 抗分层，适合叠层材料	- 复合材料钻孔 - 适用材料：碳纤维、CFRP-Ti、GFRP - 用于航空航天结构件
PCD 微型钻头 PCD Micro Drill Bit	- 材质：PCD+WC 基体，硬度 HV 7500 - 直径 0.1-2 mm，点角 120°-130°，2 刃 - 涂层：无，超高精度 - 抗磨损，适合微小孔加工	- 微孔加工 ($\leq 0.3\text{ mm}$) - 适用材料：铝、复合材料、陶瓷 - 用于电子元件、医疗器械



硬质合金（碳化钨基）、CBN（立方氮化硼）、陶瓷、工具钢、高速钢（HSS）、钛锆钼（TZM）、聚晶金刚石（PCD）、天然金刚石、CVD 金刚石、不锈钢和铝模具的特点与用途

以下为硬质合金（碳化钨基）、CBN（立方氮化硼）、陶瓷、工具钢、高速钢（HSS）、钛锆钼（TZM）、聚晶金刚石（PCD）、天然金刚石、CVD 金刚石、不锈钢和铝模具的全面列表，包含名称、特点（材质组成、硬度、表面处理、精度等）和用途（适用产品、行业场景等）。模具用于冲压、注塑、锻造、压铸、拉丝、铸造、吹塑、旋转成型等加工，涵盖多种材料和生产需求。TZM 中文为钛锆钼，英文为 Titanium-Zirconium-Molybdenum (TZM)。

模具名称	特点	用途
硬质合金冲压模具 Cemented Carbide Stamping Mold	- 材质: WC 85-94% + Co 6-15%，硬度 HRC 60-65 - 表面处理: PVD TiN/TiCN（耐磨，≤800°C） - 高硬度，耐冲击，寿命长（百万次冲压） - 精度高（±0.005 mm），适合高速冲裁	- 冲裁、成形薄板零件 - 适用产品: 金属片、电子连接器 - 用于汽车、电子、家电行业
硬质合金拉伸模具 Cemented Carbide Drawing Mold	- 材质: 微粒 WC，硬度 HRC 62 - 表面处理: DLC 涂层（低摩擦，≤600°C） - 高韧性，抗拉伸变形 - 抛光表面（Ra 0.1 μm），减少粘模	- 拉伸金属壳体、管材 - 适用产品: 铝罐、汽车外壳 - 用于包装、汽车制造
硬质合金挤压模具 Cemented Carbide Extrusion Mold	- 材质: WC + Co，硬度 HRC 60 - 表面处理: CVD Al₂O₃（耐高温，≤900°C） - 高耐磨性，适合高应力挤压 - 模腔精度±0.01 mm	- 挤压铝型材、铜棒 - 适用产品: 建筑型材、散热器 - 用于建筑、航空航天
硬质合金粉末冶金模具 Cemented Carbide Powder Metallurgy Mold	- 材质: WC 90% + Co 10%，硬度 HRC 63 - 表面处理: 氮化（硬度 HV 1000） - 高抗压强度，耐磨损 - 适合复杂形状，高密度压制	- 压制粉末零件 - 适用产品: 磁芯、齿轮 - 用于磁性材料、机械零件
硬质合金拉丝模具 Cemented Carbide Drawing Die	- 材质: WC 92% + Co 8%，硬度 HRC 62 - 表面处理: 抛光（Ra 0.05 μm），CVD 涂层可选 - 高耐磨性，孔径 0.01-10 mm - 结构: 喇叭口、入角、工作角、定径带	- 拉丝金属线材 - 适用产品: 铜丝、钢丝 - 用于电线电缆、建筑行业
硬质合金注塑模具 Cemented Carbide Injection Mold	- 材质: WC + Co，硬度 HRC 60 - 表面处理: PVD TiCN（耐磨，≤700°C） - 高硬度，抗磨损，适合高精度模腔 - 抛光表面（Ra 0.08 μm）	- 注塑金属零件 - 适用产品: 精密金属件、医疗零件 - 用于医疗、精密机械
硬质合金铸造模具 Cemented Carbide Casting Mold	- 材质: WC 90% + Co 10%，硬度 HRC 61 - 表面处理: CVD Al₂O₃（耐高温，≤1000°C） - 耐热冲击，抗熔融金属侵蚀 - 精度±0.015 mm，适合小批量	- 铸造小型金属零件 - 适用产品: 钨合金件、精密铸件 - 用于航空、珠宝行业
CBN 冲压模具 CBN Stamping Mold	- 材质: PCBN，硬度 HV 3500-4500 - 表面处理: 无/薄 TiN（耐高温，≤1400°C） - 超高硬度，适合硬材料冲裁	- 冲裁硬钢、合金板 - 适用产品: 工具钢零件、刀具 - 用于模具制造、航空零件

版权与法律责任声明

	- 精度极高 ($\pm 0.002\text{ mm}$)，寿命长	
CBN 拉伸模具 CBN Drawing Mold	- 材质: CBN, 硬度 HV 4000 - 表面处理: 无, 低摩擦系数 - 耐高温, 抗粘结 - 适合高硬度材料拉伸, 模腔光洁度高	- 拉伸硬质合金零件 - 适用产品: 精密轴、模具部件 - 用于精密机械、工具制造
CBN 拉丝模具 CBN Drawing Die	- 材质: PCBN, 硬度 HV 3800 - 表面处理: 抛光 ($Ra\ 0.03\ \mu\text{m}$) - 超高耐磨性, 适合超细线材 - 孔径 $0.005\text{--}5\text{ mm}$, 精度极高	- 拉丝超细硬线材 - 适用产品: 钨丝、钼丝 - 用于电子、航空线材
陶瓷注塑模具 Ceramic Injection Mold	- 材质: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$, 硬度 HV 2000–2500 - 表面处理: 抛光 ($Ra\ 0.05\ \mu\text{m}$) - 耐高温 ($\leq 1200^\circ\text{C}$), 化学稳定性强 - 低韧性, 适合小批量精密成型	- 注塑塑料、橡胶零件 - 适用产品: 医疗器械、光学镜片 - 用于医疗、电子行业
陶瓷压铸模具 Ceramic Die Casting Mold	- 材质: $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{ZrO}_2$, 硬度 HV 2200 - 表面处理: 无, 耐热冲击 - 高耐腐蚀性, 抗熔融金属侵蚀 - 需高刚性支撑, 寿命中等	- 压铸铝、镁合金 - 适用产品: 汽车零件、灯具壳 - 用于汽车、照明行业
陶瓷粉末冶金模具 Ceramic Powder Metallurgy Mold	- 材质: Al_2O_3, 硬度 HV 2100 - 表面处理: 抛光, 耐磨 - 耐高温, 适合高精度压制 - 抗氧化, 适合陶瓷粉末	- 压制陶瓷零件 - 适用产品: 陶瓷刀、绝缘体 - 用于陶瓷制品、电子行业
陶瓷铸造模具 Ceramic Casting Mold	- 材质: Si_3N_4, 硬度 HV 2300 - 表面处理: 无, 耐高温 ($\leq 1300^\circ\text{C}$) - 高耐热冲击, 抗裂纹 - 适合精密铸造, 寿命较短	- 铸造陶瓷、玻璃零件 - 适用产品: 光学玻璃、陶瓷件 - 用于光学、陶瓷行业
工具钢冲压模具 Tool Steel Stamping Mold	- 材质: D2/Cr12MoV, 硬度 HRC 58–62 - 表面处理: 氮化/镀铬 (硬度 HV 800) - 高韧性, 抗冲击, 易修复 - 精度$\pm 0.01\text{ mm}$, 成本适中	- 冲裁、成形钢板 - 适用产品: 五金件、汽车面板 - 用于家电、汽车制造
工具钢注塑模具 Tool Steel Injection Mold	- 材质: P20/718H, 硬度 HRC 30–40 (预硬) - 表面处理: 抛光/电镀 ($Ra\ 0.2\ \mu\text{m}$) - 易加工, 适合复杂模腔 - 寿命中等 (50 万次)	- 注塑塑料零件 - 适用产品: 塑料壳、玩具 - 用于消费品、电子行业
工具钢锻造模具 Tool Steel Forging Mold	- 材质: H13/5CrNiMo, 硬度 HRC 45–50 - 表面处理: 渗碳 (硬度 HV 700) - 耐高温 ($\leq 600^\circ\text{C}$), 抗热疲劳 - 适合大批量锻造	- 热锻、冷锻零件 - 适用产品: 曲轴、齿轮 - 用于汽车、机械制造
工具钢压铸模具 Tool Steel Die Casting Mold	- 材质: H13, 硬度 HRC 42–48 - 表面处理: 氮化 (耐磨, $\leq 700^\circ\text{C}$) - 耐热冲击, 抗裂纹	- 压铸铝、锌合金 - 适用产品: 发动机壳、轮毂 - 用于汽车、摩托车行业

		- 模腔精度 $\pm 0.02\text{ mm}$	
工具钢铸造模具 Tool Steel Casting Mold		- 材质: H13, 硬度 HRC 40-45 - 表面处理: 渗碳/抛光 (耐热, $\leq 650^{\circ}\text{C}$) - 耐高温, 适合大件铸造 - 寿命中等, 易维护	- 铸造大型金属零件 - 适用产品: 泵体、阀门 - 用于机械、能源行业
高速钢冲压模具 HSS Stamping Mold		- 材质: HSS (M2/M42), 硬度 HRC 60-65 - 表面处理: TiN 涂层 (耐磨, $\leq 500^{\circ}\text{C}$) - 高韧性, 易磨损 - 成本低, 精度中等 ($\pm 0.015\text{ mm}$)	- 低速冲裁软材料 - 适用产品: 铜片、铝板 - 用于电子、小型零件加工
高速钢拉伸模具 HSS Drawing Mold		- 材质: HSS, 硬度 HRC 62 - 表面处理: 抛光 ($\text{Ra } 0.3\text{ }\mu\text{m}$) - 韧性好, 适合小批量 - 耐磨性较低, 需频繁维护	- 拉伸软金属零件 - 适用产品: 铜管、铝壳 - 用于五金、包装行业
高速钢粉末冶金模具 (HSS Powder Metallurgy Mold)		- 材质: HSS, 硬度 HRC 60 - 表面处理: 镀铬, 耐磨 - 易加工, 成本低 - 适合低硬度粉末压制	- 压制软粉末零件 - 适用产品: 铁基零件 - 用于小型机械、DIY 制造
高速钢拉丝模具 HSS Drawing Die		- 材质: HSS, 硬度 HRC 62 - 表面处理: 抛光 ($\text{Ra } 0.1\text{ }\mu\text{m}$) - 韧性强, 耐磨性中等 - 适合低速拉丝, 成本低	- 拉丝软线材 - 适用产品: 铝丝、铜丝 - 用于电线、装饰行业
钛锆钼冲压模具 Titanium-Zirconium-Molybdenum Stamping Mold		- 材质: TZM ($\text{Mo } 99\% + \text{Ti} + \text{Zr}$), 硬度 HV 250-300 - 表面处理: 氮化 (硬度 HV 600) - 耐高温 ($\leq 1700^{\circ}\text{C}$), 抗氧化 - 高强度, 适合高温冲裁	- 冲裁高温合金板 - 适用产品: 航空零件、钛合金件 - 用于航空航天、军工
钛锆钼挤压模具 Titanium-Zirconium-Molybdenum Extrusion Mold		- 材质: TZM, 硬度 HV 280 - 表面处理: CVD TiC (耐磨, $\leq 1600^{\circ}\text{C}$) - 耐高温高压, 抗变形 - 模腔精度 $\pm 0.02\text{ mm}$	- 挤压高温合金 - 适用产品: 钛管、钼棒 - 用于航空、核工业
钛锆钼铸造模具 Titanium-Zirconium-Molybdenum Casting Mold		- 材质: TZM, 硬度 HV 270 - 表面处理: 无, 耐高温 ($\leq 1800^{\circ}\text{C}$) - 抗热冲击, 适合高温熔融金属 - 寿命较短, 成本较高	- 铸造高温合金零件 - 适用产品: 涡轮叶片、钼合金件 - 用于航空、能源行业
聚晶金刚石拉丝模具 Polycrystalline Diamond Drawing Die		- 材质: PCD (人工金刚石+Si/Ti 粘结剂), 硬度 HV 7000-8000 - 表面处理: 抛光 ($\text{Ra } 0.02\text{ }\mu\text{m}$) - 等向性, 孔径 $0.01\text{--}5\text{ mm}$, 寿命为硬质合金 50-500 倍 - 高耐磨, 抗粘结	- 拉丝高精度线材 - 适用产品: 铜丝、铝丝、钨丝 - 用于电子、航空、电缆行业
聚晶金刚石压实模具 Polycrystalline Diamond		- 材质: PCD, 硬度 HV 7500 - 表面处理: 抛光 ($\text{Ra } 0.03\text{ }\mu\text{m}$)	- 压实电线电缆导体 - 适用产品: 电力电缆、汽车线束

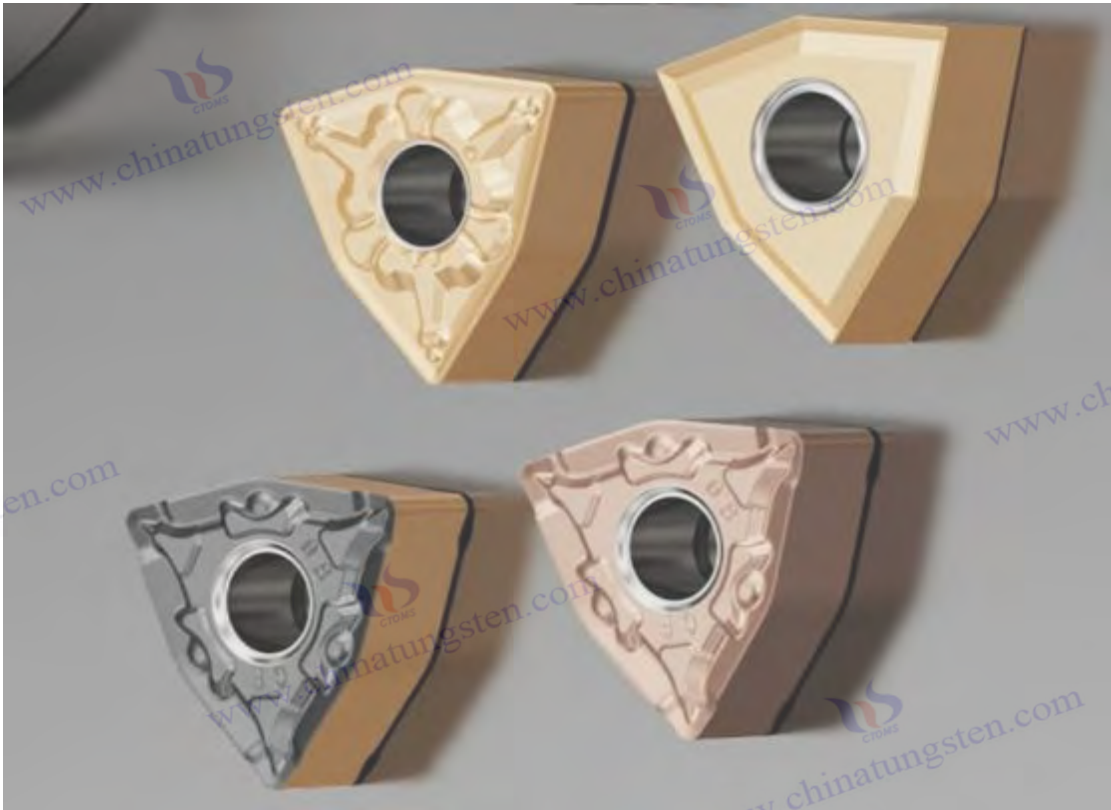
Compacting Mold	- 高硬度，适合高压扭转压制 - 精度高 (± 0.001 mm)，耐磨	- 用于电力、汽车行业
聚晶金刚石剥皮模具 Polycrystalline Diamond Shaving Die	- 材质: PCD, 硬度 HV 7200 - 表面处理: 抛光 ($Ra\ 0.02\ \mu m$) - 超高耐磨, 适合表面处理 - 孔径精度 ± 0.002 mm	- 剥除线材表面氧化物、油污 - 适用产品: 钢丝、铜丝 - 用于线材加工、电子行业
天然金刚石拉丝模具 Natural Diamond Drawing Die	- 材质: 天然金刚石, 硬度 HV 9000-10000 - 表面处理: 抛光 ($Ra\ 0.01\ \mu m$) - 极高硬度, 孔径 0.005-2 mm, 易各向异性磨损 - 成本高, 加工难度大	- 拉丝超细高精度线材 - 适用产品: 金丝、银丝 - 用于珠宝、电子行业
CVD 金刚石拉丝模具 CVD Diamond Drawing Die	- 材质: CVD 金刚石涂层, 硬度 HV 8000-9000 - 表面处理: 抛光 ($Ra\ 0.015\ \mu m$) - 克服各向异性, 耐磨性高, 孔径 0.01-3 mm - 寿命接近天然金刚石, 成本较低	- 拉丝小直径线材 - 适用产品: 钼丝、不锈钢丝 - 用于电子、精密仪器
不锈钢注塑模具 Stainless Steel Injection Mold	- 材质: 316/420 不锈钢, 硬度 HRC 45-50 - 表面处理: 抛光/电镀 ($Ra\ 0.15\ \mu m$) - 耐腐蚀, 适合腐蚀性塑料 - 寿命中等 (30 万次), 成本适中	- 注塑化学品容器、医疗零件 - 适用产品: PVC 零件、医用塑料 - 用于医疗、化工行业
不锈钢压铸模具 Stainless Steel Die Casting Mold	- 材质: 420 不锈钢, 硬度 HRC 48-52 - 表面处理: 氮化 (耐磨, $\leq 600^\circ C$) - 耐腐蚀, 抗熔融金属侵蚀 - 精度 ± 0.02 mm, 适合中批量	- 压铸锌、镁合金 - 适用产品: 装饰件、电子外壳 - 用于家电、电子行业
铝吹塑模具 Aluminum Blow Molding Mold	- 材质: 7075 铝合金, 硬度 HB 130-150 - 表面处理: 阳极氧化 (耐磨, $\leq 300^\circ C$) - 重量轻, 导热性好, 加工简单 - 寿命较短 (10 万次), 成本低	- 吹塑塑料瓶、容器 - 适用产品: 饮料瓶、化妆品瓶 - 用于包装、消费品行业
铝旋转成型模具 Aluminum Rotational Molding Mold	- 材质: 6061 铝合金, 硬度 HB 90-110 - 表面处理: 抛光 ($Ra\ 0.3\ \mu m$) - 轻量化, 适合复杂曲面成型 - 耐热性低 ($\leq 250^\circ C$), 寿命短	- 旋转成型大型中空零件 - 适用产品: 储罐、游乐设施 - 用于建筑、娱乐行业



版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



硬质合金丝锥名称、特点与用途详表

以下为硬质合金（碳化钨基）丝锥的全面列表，包含刀具名称、特点（材质组成 硬度 涂层 几何结构 切削参数等）和用途（适用材料 加工场景等）。硬质合金以碳化钨（WC）+钴（Co）为主，硬度高 耐磨性强，适合高硬度材料和高效螺纹加工。表格涵盖直槽 螺旋槽 挤压 成形等多种丝锥类型，支持公制 英制 管螺纹等标准，基于行业标准，力求全面。

刀具名称 Tap Name	特点 Characteristics	用途 Applications
硬质合金直槽丝锥 Carbide Straight Flute Tap	材质：WC 90 94% + Co 6 10% 硬度 HRC 60 65 几何：2 4 槽 直槽设计 螺纹角 60°（公制）/55°（BSP） 直径 M1 M20 涂层：TiN（氮化钛 耐磨 ≤700°C）或 TiCN（抗粘屑） 切削速度 10 50m/min 高刚性 适合通孔和硬材料 精度 H6 H8	通孔螺纹加工 适用材料：钢 不锈钢 铸铁 硬度 ≤45HRC 用于机械零件 汽车部件
硬质合金螺旋槽丝锥 Carbide Spiral Flute Tap	材质：WC 88 92% + Co 8 12% 硬度 HRC 62 几何：2 4 槽 螺旋角 15° 40° 右旋/左旋 直径 M2 M24 涂层：AlTiN（铝钛氮 耐热≤800°C） 切削速度 15 60m/min 进给率 0.05 0.15mm/r 优异排屑 适合盲孔 精度 H6 H9	盲孔螺纹加工 适用材料：钢 铝 钛合金 硬度 ≤50HRC 用于航空零件 模具螺纹
硬质合金挤压丝锥 Carbide Thread Forming Tap	材质：微粒 WC 硬度 HRC 60 几何：无槽 圆弧挤压面 直径 M1 M16 螺距 0.2 2mm 涂层：TiCN（低摩擦）或 DLC（类金刚石 耐磨） 切削速度 20 80m/min 无屑加工 高强度螺纹 适合软材料 精度 H7 H9	通孔/盲孔螺纹成形 适用材料：铝 铜 不锈钢 硬度 ≤30HRC 用于电子元件 汽车铝件
硬质合金管螺纹丝锥	材质：WC 90% + Co 8% 硬度 HRC 62	管螺纹加工（NPT BSP G）

版权与免责声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Carbide Pipe Thread Tap	几何：3 5 槽 锥度 1:16 (NPT) / 平行 (G) 直径 1/8 2 英寸 涂层：TiN/AlTiN 耐磨 切削速度 8 40m/min 精度 ISO2/3 高耐用性 适合管件加工 抗断裂	适用材料：钢 铸铁 不锈钢 用于管道配件 液压系统
硬质合金高性能丝锥 Carbide High Performance Tap	材质：WC 92% + Co 8% 硬度 HRC 60 几何：3 4 槽 优化螺旋角 20° 45° 直径 M3 M30 涂层：AlCrN (铝铬氮 耐热≤1100°C) 切削速度 20 100m/min 多功能 适合高速加工 寿命长 精度 H6 H8	通孔/盲孔高速螺纹加工 适用材料：钢 钛合金 高温合金≤55HRC 用于航空航天 能源设备
硬质合金微型丝锥 Carbide Micro Tap	材质：超微粒 WC 硬度 HRC 62 几何：2 3 槽 直槽/螺旋槽 直径 M0.5 M3 螺距 0.1 0.5mm 涂层：TiCN/无涂层 精度±0.005mm 切削速度 5 30m/min 超高精度 适合微小螺纹 抗折断	微小螺纹加工 适用材料：钢 铝 塑料 硬度 ≤40HRC 用于电子元件 医疗器械
硬质合金组合丝锥 Carbide Combination Tap	材质：WC 90% + Co 10% 硬度 HRC 60 几何：2 4 槽+钻头 直槽/螺旋槽 直径 M2 M12 涂层：AlTiN 切削速度 15 50m/min 精度 H7 H9 钻孔+螺纹一步完成 减少换刀 效率高	钻孔+螺纹复合加工 适用材料：钢 铝 铸铁 硬度 ≤45HRC 用于批量生产 汽车零件
硬质合金深孔丝锥 Carbide Deep Hole Tap	材质：WC 88% + Co 12% 硬度 HRC 62 几何：3 4 槽 螺旋角 30° 40° 长度/直径比 10:1 直径 M4 M20 涂层：TiCN/AlCrN 切削速度 10 40m/min 排屑顺畅 适合深孔加工 高刚性 精度 H6 H8	深孔螺纹加工 适用材料：钢 不锈钢 钛合金 硬度≤50HRC 用于模具 航空结构件
硬质合金英制丝锥 Carbide Unified Thread Tap	材质：WC 90% + Co 8% 硬度 HRC 60 几何：3 4 槽 直槽/螺旋槽 UNC/UNF 标准 直径#2 1 英寸 涂层：TiN/TiCN 切削速度 10 50m/min 精度 2B/3B 适合英制螺纹 高耐磨 通用性强	英制螺纹加工 (UNC UNF) 适用材料：钢 铝 铸铁 硬度 ≤45HRC 用于机械零件 美标设备
硬质合金滚花丝锥 Carbide Knurling Tap	材质：WC 92% + Co 8% 硬度 HRC 62 几何：无槽 滚花挤压面 直径 M2 M16 螺距 0.4 2mm 涂层：DLC (低摩擦) 切削速度 15 60m/min 精度 H7 H9 无屑加工 高表面质量 螺纹强度高	滚花螺纹成形 适用材料：铝 铜 不锈钢 硬度 ≤35HRC 用于装饰件 汽车把手

硬质合金量具刀具名称、特点与用途详表

以下为硬质合金（碳化钨基）量具刀具的全面列表，包含刀具名称、特点（材质组成 硬度 涂层 几何结构 精度 切削参数等）和用途（适用材料 加工或检测场景 行业应用等）。硬质合金以碳化钨（WC）+钴（Co）为主，硬度高 耐磨性强，适合高精度测量和切削加工。表格涵盖量具（塞规 环规 螺纹量规 量块等）和刀具（铰刀 铰钻 划线针等），按制式（公制 英制 管螺纹）及用途（高精度检测 深孔加工 微加工等）分类，支持 ISO ANSI DIN JIS NPT BSP 等标准，基于行业标准，力求全面。

刀具名称 Tool Name	特点 Characteristics	用途 Applications
硬质合金公制塞规 Carbide Metric Plug Gauge	材质：WC 90 94% + Co 6 10% 硬度 HRC 60 65 几何：圆柱形 直径 1 100mm 公差 H5 H7 (ISO 286) 表面光洁度 Ra0.05 0.2μm 涂层：无/TiN (耐磨 ≤700°C) 精度±0.0005mm 寿命 10 万次测量 高耐磨 抗腐蚀 适合高频检测	检测公制内孔尺寸 公差 适用材料：钢 不锈钢 铝 硬度 ≤45HRC。用于汽车缸体 航空涡轮孔 模具内孔
硬质合金英制塞规 Carbide Imperial Plug Gauge	材质：WC 92% + Co 8% 硬度 HRC 62 几何：圆柱形 直径 1/16 4 英寸 公差 Class Z (ANSI B89.1.5) 表面光洁度 Ra0.1 0.3μm 涂层：无 精度±0.0008mm 抗划伤 高精度 适合英制标准检测 耐用性高	检测英制内孔尺寸 圆度 适用材料：钢 铸铁 铜 用于美标机械零件 航空紧固件孔 泵体
硬质合金公制环规 Carbide Metric Ring Gauge	材质：WC 90% + Co 10% 硬度 HRC 60 几何：圆环形 内径 2 150mm 公差 H6 H8 (ISO 286) 表面光洁度 Ra0.05 0.15μm 涂层：无 精度±0.001mm 热稳定性高 高硬度 适合外径检测 抗变形	检测公制轴类外径 圆柱度 适用材料：钢 铝 钛合金 用于机械轴 航空轴承 模具销
硬质合金英制环规 Carbide Imperial Ring Gauge	材质：WC 92% + Co 8% 硬度 HRC 62 几何：圆环形 内径 1/8 6 英寸 公差 Class XX (ANSI B89.1.6) 表面光洁度 Ra0.1 0.2μm 涂层：无/TiN 精度±0.0012mm 耐磨损 超高精度 适合英制轴检测 长寿命	检测英制外径 形位公差 适用材料：钢 铸铁 不锈钢 用于美标螺栓 航空轴类 能源设备
硬质合金公制螺纹塞规 Carbide Metric Thread Plug Gauge	材质：WC 90% + Co 10% 硬度 HRC 60 几何：螺纹形 公制 M0.5 M50 螺距 0.24mm 精度 6H 7H (ISO 1502) 表面光洁度 Ra0.2 0.4μm 涂层：TiN (抗粘屑) 精度±0.002mm 高耐磨 适合高频螺纹检测 抗腐蚀	检测公制内螺纹尺寸 螺距公差。适用材料：钢 铝 不锈钢 用于螺母 航空螺纹孔 机械零件
硬质合金英制螺纹塞规 Carbide Unified Thread Plug Gauge	材质：WC 88 92% + Co 8 12% 硬度 HRC 62 几何：螺纹形 UNC/UNF #1 2 英寸 精度 2B 3B (ANSI B1.2) 表面光洁度 Ra0.2 0.5μm 涂层：TiCN 精度±0.0025mm 寿命长 高精度 适合英制螺纹检测 耐用性高	检测英制内螺纹 形位公差 适用材料：钢 铸铁 铜。用于美标螺母 航空紧固件 泵阀
硬质合金管螺纹塞规 Carbide Pipe Thread	材质：WC 90% + Co 10% 硬度 HRC 60 几何：螺纹形 NPT/BSP 1/16 2 英寸 锥度 1:16 精度 L1 L2 (ANSI	检测管螺纹内尺寸 密封性 适用材料：钢 不锈钢 铸铁

版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Plug Gauge	B1.20.1) 表面光洁度 Ra0.3 0.6μm 涂层: TiN 精度±0.003mm 抗磨损 适合管螺纹检测 高刚性 抗变形	用于管道配件 液压系统 能源设备
硬质合金公制螺纹环规 Carbide Metric Thread Ring Gauge	材质: WC 92% + Co 8% 硬度 HRC 62 几何: 螺纹环 公制 M1 M60 螺距 0.25 4mm 精度 6g 7g (ISO 1502) 表面光洁度 Ra0.2 0.4μm 涂层: 无/TiCN 精度±0.002mm 耐腐蚀 高硬度 适合外螺纹检测 抗划伤	检测公制外螺纹尺寸 螺距 适用材料: 钢 铝 钛合金 用于螺栓 航空螺纹件 模具螺杆
硬质合金英制螺纹环规 Carbide Unified Thread Ring Gauge	材质: WC 90% + Co 10% 硬度 HRC 60 几何: 螺纹环 UNC/UNF #2 2 英寸 精度 2A 3A (ANSI B1.2) 表面光洁度 Ra0.2 0.5μm 涂层: 无 精度±0.0025mm 寿命长 超高精度 适合英制螺纹检测 耐磨损	检测英制外螺纹 形位公差 适用材料: 钢 铸铁 不锈钢 用于美标螺栓 航空紧固件 机械轴
硬质合金管螺纹环规 Carbide Pipe Thread Ring Gauge	材质: WC 88 92% + Co 8 12% 硬度 HRC 62 几何: 螺纹环 NPT/BSP 1/8 2 英寸 锥度 1:16 精度 L1 (ANSI B1.20.1) 表面光洁度 Ra0.3 0.6μm 涂层: TiN 精度±0.003mm 抗变形 高刚性 适合管螺纹检测 耐腐蚀	检测管螺纹外尺寸 密封性 适用材料: 钢 不锈钢 铸铁 用于管道接头 液压阀 能源管道
硬质合金直刃铰刀 Carbide Straight Flute Reamer	材质: WC 90% + Co 8% 硬度 HRC 60 几何: 6 10 刃 直刃 直径 1 30mm 公差 h5 h6 (ISO 286) 表面光洁度 Ra0.1 0.3μm 涂层: AlTiN (耐热≤800°C) 切削速度 20 80m/min 进给率 0.05 0.2mm/r 高精度 适合通孔精加工 长寿命	通孔精加工 尺寸校准 适用材料: 钢 铝 铜 硬度 ≤45HRC。用于液压阀孔 轴承座 航空孔
硬质合金螺旋刃铰刀 Carbide Spiral Flute Reamer	材质: WC 92% + Co 8% 硬度 HRC 62 几何: 6 8 刃 螺旋角 10° 15° 直径 2 25mm 公差 h6 h7 表面光洁度 Ra0.1 0.2μm 涂层: TiCN (耐磨) 切削速度 30 100m/min 进给率 0.03 0.15mm/r 优异排屑 适合盲孔 精度高	盲孔精加工 尺寸控制 适用材料: 钢 不锈钢 钛合金 硬度 ≤50HRC。用于模具孔 航空结构件 泵体
硬质合金深孔铰刀 Carbide Deep Hole Reamer	材质: WC 88 92% + Co 8 12% 硬度 HRC 62 几何: 4 6 刃 螺旋角 12° 18° 长度/直径比 10:1 直径 3 20mm 公差 h6 涂层: AlCrN (耐热≤1100°C) 切削速度 15 60m/min 表面光洁度 Ra0.1 0.3μm 高刚性 适合深孔加工 排屑顺畅	深孔精加工 尺寸精度 适用材料: 钢 不锈钢 铸铁 硬度 ≤45HRC。用于模具深孔 航空骨架 液压缸
硬质合金微型铰刀 Carbide Micro Reamer	材质: 超微粒 WC 硬度 HRC 62 几何: 4 6 刃 直刃/螺旋刃 直径 0.2 3mm 公差 h4 h5 表面光洁度 Ra0.05 0.15μm 涂层: TiN/无 切削速度 10 50m/min 精度±0.001mm 超高精度 适合微孔加工 抗折断	微孔精加工 尺寸校准 适用材料: 钢 铝 塑料 硬度 ≤40HRC。用于电子元件 医疗器械 微模具

硬质合金铤钻 Carbide Countersink	材质: WC 90% + Co 10% 硬度 HRC 60 几何: 3 6 刃 锥角 60° 90° 120° 直径 5 40mm 表面光洁度 Ra0.2 0.5μm 涂层: TiCN 切削速度 20 80m/min 精度±0.01mm 高刚性 适合沉孔加工 耐磨性强	沉孔 倒角加工 适用材料: 钢 不锈钢 铝 硬度 ≤45HRC。用于螺栓孔 汽车面板 模具边缘
硬质合金零度铤钻 Carbide Zero Degree Countersink	材质: WC 92% + Co 8% 硬度 HRC 62 几何: 3 5 刃 锥角 0° (平底) 直径 4 30mm 表面光洁度 Ra0.1 0.3μm 涂层: AlTiN 切削速度 15 60m/min 精度±0.01mm 适合平面沉孔 高精度 抗磨损	平面沉孔 座面加工 适用材料: 钢 铝 铸铁 硬度 ≤40HRC。用于航空紧固件 机械底座 模具平面
硬质合金千分尺测头 Carbide Micrometer Tip	材质: WC 94% + Co 6% 硬度 HRC 60 几何: 平面/球形 直径 3 10mm 表面光洁度 Ra0.02 0.1μm 涂层: 无 精度±0.0003mm 抗划伤 超高硬度 适合高精度测量 耐腐蚀	外径 厚度 间隙测量 适用材料: 钢 陶瓷 塑料, 用于精密机械 微电子 航空零件
硬质合金卡尺测爪 Carbide Caliper Jaw	材质: WC 90% + Co 10% 硬度 HRC 62 几何: 平面/尖端/内槽 长度 10 50mm 表面光洁度 Ra0.05 0.15μm 涂层: 无 精度±0.005mm 耐磨性强 高稳定性 适合频繁测量 抗磨损	内/外径 深度 槽宽测量 适用材料: 钢 铝 复合材料 用于模具 航空部件 通用机械
硬质合金量块 Carbide Gauge Block	材质: WC 92% + Co 8% 硬度 HRC 60 几何: 矩形 尺寸 0.5 200mm 公差±0.00005mm (ISO 3650 Grade 0) 表面光洁度 Ra0.01 0.05μm 涂层: 无 耐腐蚀 热膨胀系数低 超高精度 适合校准 寿命长	长度标准校准 机床校验 适用材料: 钢 陶瓷 玻璃 用于计量室 航空制造 精密加工
硬质合金微型量块 Carbide Micro Gauge Block	材质: WC 94% + Co 6% 硬度 HRC 62 几何: 矩形 尺寸 0.1 10mm 公差±0.00003mm (ISO 3650 Grade K) 表面光洁度 Ra0.01 0.03μm 涂层: 无 精度极高 抗划伤 适合微小尺寸校准 耐腐蚀	微小长度校准 仪器校验 适用材料: 钢 陶瓷 塑料 用于微电子 医疗器械 光学制造
硬质合金划线针 Carbide Scriber	材质: WC 90% + Co 10% 硬度 HRC 62 几何: 针形 尖端半径 0.03 0.2mm 长度 50 200mm 涂层: 无 硬度高 精度±0.005mm 高耐磨 适合硬材料划线 抗断裂	表面划线 标记定位 适用材料: 钢 不锈钢 陶瓷 硬度 ≤50HRC, 用于模具制造 航空零件 机械加工
硬质合金微型划线针 Carbide Micro Scriber	材质: 超微粒 WC 硬度 HRC 62 几何: 针形 尖端半径 0.01 0.05mm 长度 30 100mm 涂层: 无 精度±0.002mm 抗折断 超高精度 适合微小标记 耐磨损	微小表面划线 精密定位 适用材料: 钢 铝 玻璃 硬度 ≤40HRC。用于微电子、光学元件、医疗器械



中钨智造科技有限公司

30 年硬质合金定制专家

核心优势

30 年经验：深谙硬质合金生产加工，技术成熟稳定，不断精进。

精准定制：支持特殊性能与复杂设计，重视客户+AI 协同设计。

质量成本：优化模具与加工，性价比卓越；领先设备，RMI、ISO 9001 认证。

服务客户

产品涵盖切削、工模具、航空、能源、电子等领域，已服务 10+万客户。

服务承诺

10+亿次访问、100+万网页、10+万客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 592 5129696

官网：www.ctia.com.cn

微信：关注“中钨在线”

