

## 硬质合金

物化性能、工艺与应用的全局探索

### Tungsten Cemented Carbide

### Comprehensive Exploration of Physical & Chemical

### Properties, Processes, & Applications

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

版权与法律责任声明

## 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](http://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](http://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

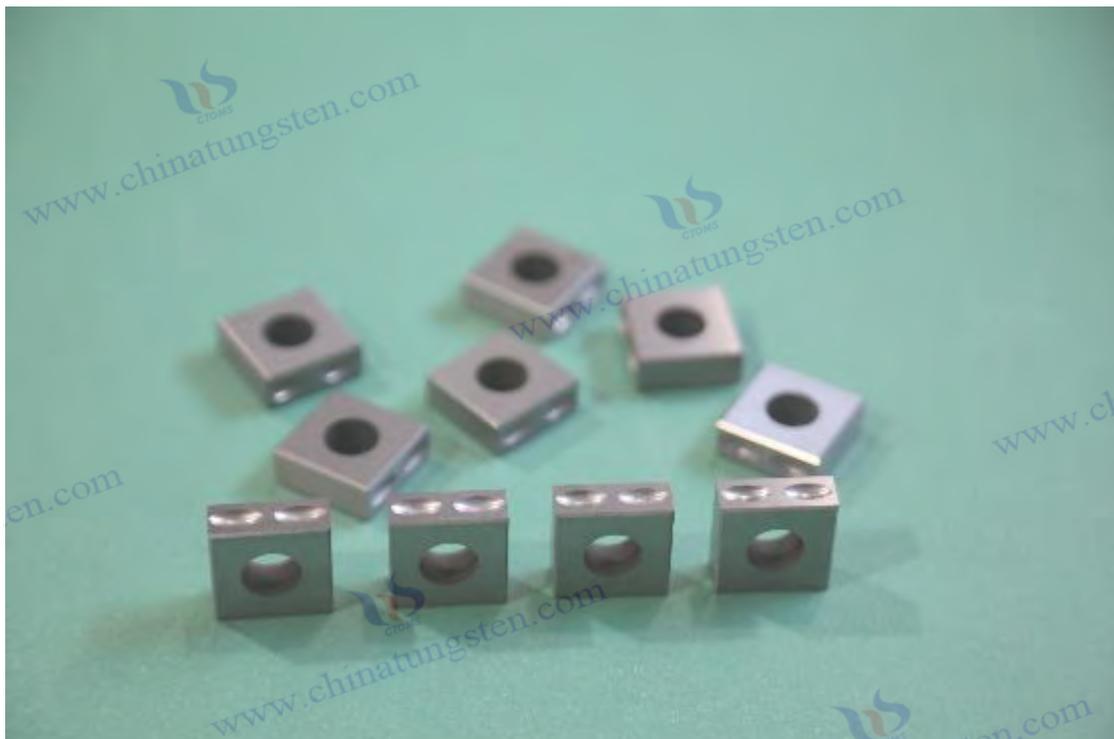
中钨智造® | 硬科技·智未来

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](http://www.ctia.com.cn)

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



## 代序

### AI 驱动下的硬质合金高熵化 和硬质合金牌号批号化演进趋势

#### The Evolution Trend of AI Driven

#### High Entropy Cemented Carbide (HECC) & Batch Specific Cemented Carbide Grade (BSCCG)

## 一、引言

硬质合金以碳化钨 (Tungsten Carbide, WC) 为主要成分, 结合钴 (Cobalt, Co)、镍 (Nickel, Ni) 等黏结相, 因其卓越的机械性能 (硬度 1500-2200 HV、耐磨性  $<0.05 \text{ mm}^3/\text{h}$ ) 和化学稳定性 (耐腐蚀性  $<0.02 \text{ mm}/\text{y}$ , pH 2-12) 在航空航天、精密制造、新能源及前沿科技领域具有广泛应用。人工智能 (Artificial Intelligence, AI)、工业互联网、5G/6G 高速数据传输及大数据/云计算技术的快速发展为硬质合金牌号设计与分类注入了新动能, 特别推动了“硬质合金高熵化” (High-Entropy Cemented Carbide, HECC) 和“硬质合金牌号批次化” (Batch-Specific Cemented Carbide Grade, BSCCG) 的发展。这些概念由中钨智造首次提出, 其中高熵化通过多组元合金设计突破性能极限, 批次化通过动态优化实现个性化定制。本文由中钨在线深耕钨基材料行业三十年、专注定制化设计生产的专家团队撰写, 聚焦 AI 驱动下硬质合金高熵化与牌号批次化的发展趋势, 分析其技术机制与特征, 结合航空航天电连接器、精密模具微孔加工、燃料电池双极板及未来前沿科技领域案例, 探讨性能适配性与应用前景, 并评估相关挑战与创新路径。

当前, 硬质合金行业面临牌号体系复杂化的挑战。不同硬质合金企业拥有各自的牌号体系,

#### 版权与免责声明

同时存在国际通用的牌号标准(如 ISO 513 分类), 欧美日韩各国也开发了各自的牌号规范, 如美国的 ANSI、日本的 JIS、德国的 DIN 等。这种多样化虽源于技术保密和个性化需求, 但给市场和客户带来困扰。牌号差异导致需求匹配困难, 性能与产能难以最佳协同, 限制了硬质合金定制化的发展趋势。硬质合金高熵化通过提升性能极限, 为牌号批次化奠定技术基础, 而批次化则通过动态调整配方适应 AI 技术生态中实时变化的需求和应用数据反哺, 指导生产端的配料、工艺参数及包装运输的全链路定制化。二者密切关联, 共同推动硬质合金行业向智能化、定制化方向迈进。

## 二、技术背景

### 2.1 人工智能在材料设计中的应用

人工智能通过机器学习 (Machine Learning, ML)、深度学习 (Deep Learning, DL) 及生成式模型 (如 Generative Adversarial Networks, GAN) 为硬质合金高熵化与批次化设计提供支持。AI 处理多维数据集 (如晶粒尺寸  $0.1-10\ \mu\text{m}$ 、黏结相比比例 6-20%、工况参数), 预测性能指标 (如硬度误差  $<5\%$ 、韧性  $1020\ \text{MPa}\ \text{m}^{1/2}$ 、耐腐蚀性  $<0.02\ \text{mm}/\text{y}$ )。例如, 基于卷积神经网络优化 WC-Co 配方, 研发周期缩短 60%。生成式 AI 从历史数据 (如 WCCo、WCNi 库) 生成高熵合金配方, 优化高温耐磨性 15%。知识图谱整合产业链数据 (如钨粉纯度 99.9%-99.95%、工艺参数), 实现闭环优化, 提升效率, 为高熵化和批次化奠定基础。

### 2.2 工业互联网与实时数据交互

工业互联网通过物联网 (Internet of Things, IoT) 传感器、边缘计算及云计算构建数据驱动生态。传感器采集参数 (如烧结温度  $1350^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、压力 100-150 MPa), 边缘计算处理高频数据 (晶粒尺寸  $0.1-0.5\ \mu\text{m}$ , 1 Hz), 云计算支持海量分析。这种实时交互使生产透明化, 支持动态调整 (如  $\text{H}_2$  气氛 5-10%、露点等)。产业链协同中, 供应商提供钨粉粒度 (如,  $D_{50}\ 0.1-0.3\ \mu\text{m}$ ), 生产商优化工艺, 用户反馈工况 (如切削速度  $200\ \text{m}/\text{min}$ ), 缩短供应链响应 20%, 为批次化生产提供数据支持。

### 2.3 5G/6G 网络的协同赋能

5G 网络 (时延  $<1\ \text{ms}$ , 带宽  $>10\ \text{Gbps}$ ) 和 2030 年商用的 6G 网络 (时延  $<0.1\ \text{ms}$ , 带宽  $>100\ \text{Gbps}$ ) 提供高效通信。5G/6G 支持产业链数据交换, 如供应商上传批次数据, 制造商反馈烧结曲线 ( $1400^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{-3}\ \text{Pa}$ 、烧结时间等), 用户提供工况 ( $50^{\circ}\text{C}-800^{\circ}\text{C}$ , 100 MPa)。这种低时延通信使 AI 快速优化高熵合金配方 (如 WC-10%Co+0.2%TaC) 或批次调整, 跨区域协同设计缩短交付周期 25-30%, 增强高熵化和批次化的实施效率。

### 2.4 大数据与云计算的计算支撑

大数据整合内部数据 (生产日志、测试结果) 及外部数据 (市场趋势、ISO 45001 标准), 为 AI 训练提供素材。云计算支持高并发计算, 如高通量筛选配方 ( $>10^3$  组合/天) 或多目标优化 (硬度、耐磨、成本)。2025 年, 中国大数据市场规模预计达 5400 亿元, 支撑材料研发。云计算启用仿真, 如预测 WC 合金抗氧化性 ( $<0.02\ \text{mg}/\text{cm}^2$ ,  $800^{\circ}\text{C}$ , 误差  $<5\%$ ), 为

#### 版权与免责声明

高熵合金设计和高精度批次化提供理论依据。

### 三、硬质合金发展趋势与特征

AI、工业互联网、5G/6G 及大数据/云计算的协同作用，深刻塑造了硬质合金高熵化与牌号批次化的发展轨迹。作为中钨在线三十年专注钨基材料定制化生产的专家团队，我们见证了从传统配方设计到 AI 驱动创新的转型。这些趋势不仅提升了材料性能，更为高端制造业提供了定制化解决方案。以下是详细分析：

#### 3.1 智能化设计：数据驱动的革命性进步

智能化设计是 AI 在硬质合金领域的核心应用，通过多源数据分析优化高熵合金与批次化配方。AI 模型，如随机森林或支持向量机，整合晶相结构、热处理参数及工况数据，预测性能指标。例如，基于历史数据训练的模型可将 WC-Co 合金硬度预测误差控制在 $\pm 50$  HV 以内，设计周期较传统方法缩短约 50%。生成式 AI 进一步突破常规，通过生成对抗网络(GAN)从数千种配方中筛选出高熵合金配方，如 WCNi 基合金添加 0.1-0.3 wt% NbC，耐腐蚀性提升 10%，特别适用于酸性环境下的新能源设备。此外，知识图谱技术将用户需求（如航空连接器的高导电性 $>90\%$  IACS）与材料属性匹配，推荐最优配方，响应时间缩短 40%。这种智能化设计不仅加速研发，还为高熵化提供理论支持，批次化生产则从中受益，实现了从标准化到个性化的无缝过渡。智能化设计的核心在于打破传统牌号体系的局限，通过 AI 技术实现性能与需求的精准匹配，为高熵化和批次化的实施提供了数据基础。

#### 3.2 柔性化制造：适应多样化需求的工艺创新

柔性化制造依托工业互联网和 5G/6G 技术，实现了小批量、高定制化生产，满足了硬质合金在高端市场的多样化需求。实时工艺监控是柔性化制造的关键，物联网传感器精确采集烧结温度（ $1350^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ）、压力（100-150 MPa）及气氛参数（如  $\text{H}_2$  含量 5-10%），AI 算法动态调整工艺参数，保持晶粒尺寸（0.1-0.5  $\mu\text{m}$ ）的一致性，缺陷率降低 15%。快速原型制造技术进一步突破传统限制，例如燃料电池双极板流道（公差 $\leq \pm 0.004$  mm）的复杂几何结构可在数日内完成，交付周期缩短 30%，为紧急项目提供了强有力支持。同时，5G/6G 网络实现产业链上下游协同，供应商优化钨粉粒度（D50 0.1  $\mu\text{m}$ ）以匹配下游加工需求，生产商根据用户反馈（如切削速度 200 m/min）调整配方，供应链效率提升 20%。柔性化制造为高熵合金的小批量试制和批次化产品的快速迭代提供了坚实基础，特别是在牌号多样化的背景下，能够有效应对不同国家和企业牌号体系带来的市场匹配难题。

#### 3.3 硬质合金高熵化：性能极限的突破

“硬质合金高熵化”（High-Entropy Cemented Carbide, HECC）是中钨智造首次提出的创新概念，旨在通过多组元高熵合金设计突破传统硬质合金性能瓶颈。

高熵合金（High-Entropy Alloy, HEA）是一种由多种主要元素（通常 5 种或以上）组成的合金，各元素比例接近等原子比（一般 5%-35%），通过高混合熵（熵值 $>1.5R$ ）增强晶格畸

#### 版权与免责声明

变和稳定性。相比传统合金，高熵合金具有优异的性能，如高硬度、高韧性、耐高温和抗腐蚀性，常用于极端环境，如航空航天、深海设备和能源领域。其设计常借助 AI 和密度泛函理论，突破传统材料性能极限。

高熵化利用 AI 的高通量计算能力，如密度泛函理论（Density Functional Theory, DFT），设计出 WCTiCNbCCo 等复杂配方（熵值 $>1.5R$ ），硬度可达 1800-2200 HV，韧性提升至 15-20 MPa m<sup>1/2</sup>。这种多组元设计通过熵增效应增强晶格畸变，显著改善高温稳定性（ $>1000^{\circ}\text{C}$ ）和抗腐蚀性（pH 2-3,  $<0.005$  mm/y）。AI 优化功能涂层，如 TiN 或 NiP，耐磨性降至 $<0.015$  mm<sup>3</sup>/h，耐腐蚀性 $<0.005$  mm/y，提升表面性能 20%。在实际应用中，高熵合金展现出卓越的适应性，例如深海开发钻头需承受 300 MPa 压力和海水腐蚀（pH 8），高熵化配方硬度 $>2200$  HV，耐磨寿命延长 3 倍以上。高熵化技术不仅推动了材料科学的前沿研究，也为航空航天、能源等极端工况提供了可靠解决方案。高熵化的核心在于通过性能突破解决传统牌号体系的局限，为批次化提供技术原动力，使硬质合金能够适应更广泛的工况需求。

需要特别说明的是，“硬质合金高熵化”也可以理解为“高熵化的硬质合金”，这一概念蕴含了多层次的内涵和动态发展过程。一方面，它表明硬质合金突破了传统以钨镍（WC-Ni）和钨钴（WC-Co）为主的配方体系，逐渐根据市场对性能的多样化需求（如更高的硬度、耐磨性、耐腐蚀性或高温稳定性）引入额外的元素，如钽（Ta）、铌（Nb）、钛（Ti）或铬（Cr）等，使其成分从传统的双元或三元体系扩展至包含五种或更多元素的复杂配方。尽管这些新增元素的含量可能尚未达到高熵合金严格定义的等原子比（通常 5%-35%）或高混合熵（熵值 $>1.5R$ ）的标准，因此尚不完全等同于实际意义上的高熵合金，但这种元素多样化趋势无疑为性能提升奠定了基础，展现了硬质合金向更高熵态演进的潜力。

另一方面，“硬质合金高熵化”还指向了一个渐进的转型进程，即硬质合金正在逐步向高熵合金迈进。这一进程不仅涉及配方的优化，还包括生产工艺、微观结构设计以及应用场景的拓展。在这一过渡中，AI 技术（如机器学习和高通量计算）扮演了关键角色，通过模拟和预测多元素相互作用，指导合金配方的调整。例如，添加微量元素（如 0.2%-0.4% TaC 或 ZrC）可以显著增强晶格畸变，改善高温性能或抗氧化性，同时保持硬质合金的加工特性和经济性。这种渐进式高熵化使硬质合金能够在保持其原有优势（如高硬度 1500-2000 HV 范围内的稳定性）的基础上，逐步吸收高熵合金的特性，如更高的韧性（ $>15$  MPa m<sup>1/2</sup>）和更广泛的适用性（例如深海或太空环境）。

此外，这一转型还受到市场需求的驱动和技术的推动。例如，航空航天领域的电连接器需要兼顾高导电性（ $>90\%$  IACS）和耐腐蚀性（ $<0.01$  mm/y），而燃料电池双极板要求高精度（公差 $<\pm 0.004$  mm）和耐酸性（pH 3 环境），这些需求促使硬质合金通过高熵化技术引入新元素以满足极端工况。未来，这一进程可能进一步加速，随着 6G 网络和量子计算的成熟，AI 将更精准地优化多元素配比，逐步实现从“高熵化的硬质合金”向真正的高熵合金的全面过渡，从而在性能和应用范围上实现质的飞跃。

### 3.4 硬质合金牌号批次化演进：定制化生产的未来

硬质合金牌号是用于标识硬质合金材料类别和性能的标准编号体系，通常由企业或国际标

#### 版权与免责声明

准（如 ISO 513）制定。它反映了合金的成分（如 WC-Co 比例）、性能（如硬度、耐磨性）和用途（如切削、模具）。例如，ISO K10 表示适合加工铸铁的牌号。不同国家和企业有各自体系，如美国的 ANSI、日本的 JIS，牌号多样化便于精准选材，但也可能因标准不一导致市场匹配复杂。

“硬质合金牌号批号化”（Batch-Specific Cemented Carbide Grade, BSCCG）也可以称之为硬质合金牌号批次化，是中钨智造根据多年的实践经验和深刻观察首次提出的前沿理念，强调根据不同批次原材料特性和用户需求动态调整配方，实现高精度定制化生产。原材料批次差异（如钨粉纯度 99.9%-99.95%、Co 含量 6-20%）对性能影响显著，AI 技术通过大数据分析有效化解这一挑战。例如，航空航天领域对硬度（>2000 HV）要求较高，AI 可针对特定批次优化 WC-Co 比例，而模具应用则优先提升韧性（>15 MPa m<sup>1/2</sup>），性能差异化可达 10-15%。小批量生产优化进一步体现批次化的优势，如深海钻头（硬度>2200 HV）的产量从传统 1000 件/月调整至 100-200 件/月，成本控制在±5%以内，满足高端市场需求。工业互联网和 5G/6G 网络实现批次数据的全生命周期追踪（如烧结温度、晶粒尺寸），通过云计算分析优化工艺，缺陷率降低 10%，确保质量一致性。此外，AI 预测市场趋势，如新能源电池需求年增长 20%，可快速调整配方（如添加 0.2-0.4 wt% TaC 提升耐腐蚀性），响应周期缩短 15-20 天。批次化生产还包括包装与运输的个性化设计，例如针对深海设备采用防腐包装，运输过程中监测温湿度（10°C-30°C，湿度<60%），确保产品性能稳定。批次化通过全链路定制化，解决了传统牌号体系多样化带来的市场困扰，使硬质合金能够适应 AI 技术生态中实时变化的需求和应用数据的反哺指导。高熵化与批次化的密切关联在于，前者通过性能突破提供技术支撑，后者通过动态调整实现市场需求的精准匹配，二者共同推动硬质合金行业向智能化、定制化方向迈进。

## 四、硬质合金高熵化与牌号批号化对企业的挑战

### 4.1 对传统硬质合金产业链的挑战

硬质合金性能的高熵化和牌号的批次化是应用端多样化与高端化需求进阶的必然趋势，而 AI 时代的革命性变革对整个硬质合金产业链提出了前所未有的挑战。这种变革不仅影响到硬质合金产销企业的核心环节，还深刻冲击供应链前端，包括上游的设备供应商和原材料供应商。传统产业链以静态、标准化的生产模式为主，难以适应高熵化带来的性能复杂性与批次化所需的动态调整能力。AI 驱动的智能化管理要求供应商提供更高精度与一致性的原材料（如钨粉粒度需精确至 D50 0.1-0.3 μm），设备需具备柔性化生产能力（如支持实时调整烧结温度 1350°C±2°C 和气氛参数 H<sub>2</sub> 含量 5-10%）。此外，产业链需构建数据互联体系，实现从原料采购到产品交付的全流程透明化与协同化，以应对 AI 生态下对实时响应和高效协作的新需求。

### 4.2 对硬质合金企业及其管理的挑战

传统硬质合金企业的管理层往往聚焦于人、财、物的资源调配和流程管理，大型企业尤其容易陷入繁琐的上下级会议与汇报事务中，忽视技术创新与市场需求的快速变化。然而，在 AI 生态下，企业管理层必须转变思维，深入学习和理解 AI 技术的应用潜力，明确硬质合金企

#### 版权与法律责任声明

业实际需求的 AI 底层架构技术，避免盲目投入一次性、低效的 AI 工具或框架。管理层需要深刻理解结果导向型 AI 的实际应用价值，杜绝将大量资金投入仅用于记录而非优化的软硬件设施。相反，他们应关注硬质合金生产前后端的技术数据接口、人机交互切口，以及产业链上下游的高效协作路径和安全运行机制。此外，管理层还需识别并培养适应 AI 技术生态的人才，明确企业所需的人才类型、AI 管理流程、合规性要求及 AI Agent 的应用场景。例如，引入 AI 营销 Agent（利用人工智能技术自主执行营销任务的软件程序，能够分析客户数据、个性化内容、优化广告活动、安排发布、与潜在客户互动以及衡量营销效果。）可实时分析市场需求，优化产品推广策略。可以说，这种管理转型将成为未来硬质合金企业竞争优劣的分水岭，甚至是生存的关键。

#### 4.3 对传统硬质合金产业链从业人员的挑战

传统硬质合金产销企业的从业人员，尤其是基层工作人员，必须适应 AI 技术带来的全新工作模式。他们需要理解 AI 技术思维，学习并掌握 AI 与动力双驱动的设备操作流程，熟练使用智能化管理工具，熟悉 AI 人机交互接口。例如，操作员需通过 AI 接口快速输入工况参数（如切削速度 200 m/min）并接收优化建议。此外，从业人员需掌握 AI 生产与应用工具，学会分析和评估各类专业 AI Agent 的输出结果，判断其优劣并提出改进建议。这要求从业人员具备更强的优化思维和多维度分析能力，能够在纵横交错的数据中找到关键改进点，进而提升高熵合金性能或批次化生产的精准性。只有通过持续学习和能力提升，基层员工才能在 AI 生态中实现从传统操作者到智能生产参与者的角色转变。

#### 4.4 中小企业硬质合金企业的挑战与机遇

AI Agent（人工智能代理，人工智能体）是指一种通过人工智能技术驱动的智能实体，能够感知环境、自主决策并执行任务。它通过传感器或数据输入获取信息，利用算法分析并制定行动策略，然后采取行动以实现预设目标。AI Agent 具有一定自主性，广泛应用于智能助手、自动驾驶、聊天机器人等领域，其功能取决于设计和训练数据。

我们认为，在不远的将来，硬质合金行业将诞生各类企业自己训练的 AI Agent。

在 AI 生态下，硬质合金中小企业将面临严峻的生存挑战。它们是否能够快速适应高熵化和牌号批次化的思维转换，取决于技术升级的速度、资金投入的能力以及学习能力的强弱。这种转型压力可能导致行业内“大树底下寸草不生”的达尔文现象，部分中小企业因无法跟上 AI 技术步伐而被淘汰。然而，AI 时代也为中小企业提供了逆袭的机遇。我国硬质合金产业链可能催生基于专业 AI Agent 的一人独角兽企业（One-Person Unicorn）。这类企业以极少的人力资源，依托 AI Agent 构建高效的产销中枢，能够 7×24 小时不间断运行，无需会议室、不易出错，实时掌握生态内的各类数据，并通过迭代优化不断升级。此类企业可成为 AI 生态下的数据漏斗，自动处理设计图稿、合同确认、生产任务分配、人力调配、技术要求制定、物料准备、采购清单生成、外协指令发布、特殊事项处理、在线数据共享、检验检测、包装唛头设计、批次编号生成及物流安排等全流程事项。

相比之下，大型硬质合金企业虽拥有资金、技术和人才的绝对优势，但其内部的既得利益者

#### 版权与免责声明

和僵化的组织结构可能成为阻碍创新的最大障碍，如行政管理层如果决定使用 AI 会议 Agent，纳闷首先被替代的就是他们自己。相反，中小企业因规模小、决策链短，反而可能更灵活地拥抱 AI 技术，解放人力不足的管理层，利用劣势的另一面实现逆袭。例如，通过引入 AI 微生态系统，中小企业可在产业链中占据关键节点，快速响应市场需求，甚至引领行业变革。这种机遇与挑战并存的局面，凸显了 AI 时代对硬质合金企业发展模式的深刻重塑。

#### 4.5 硬质合金企业 AI Agent 的训练、应用与迭代优化

在硬质合金行业，利用工业物联网(IIoT)、5G/6G 通信技术以及客户使用实时数据来学习、训练、升级和应用 AI Agent，并通过回溯和自动调节优化生产过程，可以实现生产与应用端的同步协调和机器对话。以下是具体实施方式：

##### 硬质合金 AI Agent 训练

部署 IIoT 传感器网络，实时采集生产数据（如 GB/T 26048-2010 烧结温度、压力，GB/T 34505-2017 粉末粒径分布），通过 5G/6G 高速传输至云端。结合初始数据集（GB/T 18376-2014 显微结构、GB/T 5314-2011 化学成分），采用分布式机器学习训练模型，预测性能指标（如 YG6 硬度 91.5 HRA、孔隙率 <0.05%）。

##### 硬质合金 AI Agent 不断升级

通过 IIoT 监测客户使用场景（如 GB/T 12444-2006 耐磨性、GB/T 4334-2020 耐腐蚀性），5G/6G 实时回传数据。应用在线学习或联邦学习，动态更新模型以适应新工艺（如 GB/T 5243-2008 新牌号）或客户需求变化，提升预测精度（偏差 <±0.5 HRA）。

##### 硬质合金 AI Agent 的客户实时数据回溯与优化

客户使用数据（如切削工具寿命、磨损率）通过 5G/6G 实时反馈至生产端，AI Agent 分析数据并回溯生产过程（如烧结温度偏高导致孔隙率 >0.1%）。AI Agent 自动调节工艺参数（如将温度从 1450°C 降至 1440°C），优化即时技术数据，确保产品性能（如硬度稳定在 91.5±0.5 HRA）。此过程实现生产端与应用端的同步协调，形成机器间对话（如生产设备与客户设备的数据交互）。

##### 硬质合金 AI Agent 的应用

AI Agent 通过 IIoT 集成生产设备，实时调整参数（如压力 50MPa、保温时间 60 分钟），预测并纠正缺陷。5G/6G 确保高效通信，收集应用数据（如切削寿命 >5 小时），支持远程诊断和个性化定制，提升生产效率和产品一致性。

通过 IIoT 和 5G/6G 的支持，结合客户实时数据回溯和自动优化，AI Agent 实现生产与应用闭环协调，确保硬质合金产品性能最优，同时提升效率和客户满意度。硬质合金行业自建的专用 AI Agent 应用，便可以驱动硬质合金高熵化与牌号批号化设计和优化、迭代升级不断演进，推动行业向智能化、定制化和高性能方向发展。

### 五、AI 驱动下硬质合金高熵化与牌号批号化设计、应用案例分析

#### 版权与法律责任声明

作为中钨在线三十年专注钨基材料定制化生产的专家团队，我们通过以下案例，详细解析 AI 驱动下硬质合金高熵化与牌号批次化在多领域的实际应用。这些案例不仅展示了技术优势，也体现了其对行业发展的深远影响。

### 5.1 航空航天电连接器：高导电性与耐腐蚀的完美结合

航空航天电连接器需具备高导电性 ( $>90\%$  IACS)、耐腐蚀性 ( $<0.01$  mm/y, 1000 小时盐雾测试) 和抗振动性 (10 g, 循环  $10^6$  次)。AI 设计了一种高熵合金牌号 WCTiCNi (各组元 20-25 at%, 熵值  $>1.5R$ )，通过添加 0.2 wt% TaC 提升耐磨性 5%，硬度达 1900 HV，导电率超过 90% IACS，接触电阻低于  $10 \mu\Omega$ ，耐腐蚀性在 1000 小时盐雾测试中保持  $<0.01$  mm/y。这一配方利用高熵化技术增强晶格稳定性，支持高速信号传输 ( $50$  A/cm<sup>2</sup>)，并在  $50^\circ\text{C}$ - $200^\circ\text{C}$ 、10 g 振动环境下表现出色。AI 通过分析工况数据 (如盐雾浓度、电流密度) 优化配方，误差控制在 3% 以内，5G 网络实现实时数据交互，工业互联网整合用户反馈，成品率达 98%，使用寿命达到  $2 \times 10^6$  次，较传统铜基材料提升 3 倍。批次化生产根据航空航天客户需求调整配方，确保每一批次满足特定导电性和耐腐蚀标准。

### 5.2 精密模具微孔加工：超高硬度与耐磨性的技术体现

精密模具微孔加工对材料提出了高硬度 ( $>1800$  HV)、耐磨性 ( $<0.02$  mm<sup>3</sup>/h) 和高精度 (公差  $<\pm 0.003$  mm) 的要求。AI 设计了 WCTiCCo 高熵合金 (各组元 20-25 at%, 熵值  $>1.5R$ )，通过添加 0.3 wt% ZrC 提升抗粘附性能 10%，硬度达到 2000 HV，韧性为  $15$  MPa m<sup>1/2</sup>，耐磨性降至  $<0.015$  mm<sup>3</sup>/h。这一配方在高频电火花加工 (脉宽 30-50  $\mu\text{s}$ ，电流 10 A) 中展现出低损耗 ( $<0.3\%$ )，抗粘附特性减少加工残留，特别适合钛合金等难加工材料的微孔加工 (孔径  $\varnothing 0.5$  mm)。AI 结合工况数据 (如电极磨损率、加工温度) 优化配方，工业互联网实时反馈加工参数，5G 网络传输产业链数据，成品率达 97%，耐磨寿命较传统铜电极提升 4 倍。批次化生产根据不同模具用途调整 ZrC 添加量，确保每一批次满足特定精度和耐磨需求。

### 5.3 燃料电池双极板：导电性与耐酸性的双重优化

燃料电池双极板需高导电性 ( $>85\%$  IACS)、耐酸性 ( $<0.01$  mm/y, pH3) 和高精度 (公差  $<\pm 0.004$  mm)。AI 设计了 WCTiCNbCCo 高熵合金 (各组元 15-20 at%, 熵值  $>1.5R$ )，添加 0.2 wt% TaC 提升耐腐蚀性 10%，硬度 1900 HV，导电率  $>85\%$  IACS，耐腐蚀性在 pH 3 环境下  $<0.005$  mm/y。高导电性支持高效电流传输 ( $100$  A/cm<sup>2</sup>)，耐酸性确保在  $80^\circ\text{C}$  酸性电解液中的长期稳定性，高硬度维持流道几何精度 (宽度 0.5 mm)。AI 通过分析电解液成分 (pH3, 温度  $80^\circ\text{C}$ ) 优化配方，云计算验证性能 (误差  $<4\%$ )，5G 网络支持产业链协同，成品率达 98%，使用寿命达  $1.2 \times 10^7$  次，较不锈钢提升 4 倍。批次化生产根据不同燃料电池规格调整配方，确保每一批次适配特定导电性和耐酸需求。

### 5.4 防护装甲：超高硬度与轻量化的战略应用

防护装甲需超高硬度 ( $>2000$  HV)、抗冲击性 ( $>15$  MPa m<sup>1/2</sup>) 和轻量化 (密度  $<15$  g/cm<sup>3</sup>)。

#### 版权与法律声明

AI 设计了 WCTiCTaCCo 高熵合金（各组元 20-25 at%，熵值 $>1.6R$ ），添加 0.3 wt% NbC 提升抗冲击性 8%，硬度 2100 HV，韧性  $16 \text{ MPa m}^{1/2}$ ，密度  $14.5 \text{ g/cm}^3$ 。这一配方通过高熵化技术抵御高速冲击（ $>1000 \text{ m/s}$ ），轻量化设计适配坦克、装甲车等移动平台，耐高温性（ $600^\circ\text{C}$ ）应对爆炸冲击环境。AI 基于战场工况数据（如冲击速度、温度  $40^\circ\text{C}$ - $600^\circ\text{C}$ ）优化配方，误差 $<3\%$ ，5G/6G 网络支持实时交互，工业互联网整合反馈，成品率 96%，抗冲击寿命达  $10^5$  次，较传统装甲钢提升 2.5 倍。批次化生产根据不同装甲用途调整 NbC 添加量，确保每一批次满足特定抗冲击和轻量化需求。

### 5.5 无人机旋翼部件：高强度与耐磨性的协同优化

无人机旋翼部件要求高强度（ $>2 \text{ GPa}$ ）、耐磨性（ $<0.015 \text{ mm}^3/\text{h}$ ）和轻量化（密度 $<14 \text{ g/cm}^3$ ）。AI 设计了 WCTiCNi 高熵合金（各组元 20-25 at%，熵值 $>1.5R$ ），添加 0.2 wt% ZrC 提升耐磨性 7%，硬度 1950 HV，抗弯强度 2.2 GPa，密度  $13.8 \text{ g/cm}^3$ 。高强度和耐磨性确保高转速（ $>10^4 \text{ rpm}$ ）下的结构稳定性，轻量化提升续航能力，耐环境性（ $20^\circ\text{C}$ - $200^\circ\text{C}$ ）适配多样化飞行任务。AI 利用飞行工况数据（如转速、温度）优化配方，工业互联网分析性能反馈，5G 网络传输产业链数据，成品率 97%，耐磨寿命达  $5 \times 10^5$  小时，较钛合金提升 3 倍。批次化生产根据不同任务场景调整 ZrC 添加量，确保每一批次满足特定强度和耐磨需求。

### 5.6 无人潜航器耐压壳体：深海环境的极致挑战

无人潜航器耐压壳体需高抗压性（ $>500 \text{ MPa}$ ）、耐海水腐蚀（ $<0.005 \text{ mm/y}$ ，pH8）和高韧性（ $>12 \text{ MPa m}^{1/2}$ ）。AI 设计了 WCTiCNbCCo 高熵合金（各组元 15-20 at%，熵值 $>1.5R$ ），添加 0.3 wt% TaC 提升耐腐蚀性 12%，硬度 1900 HV，抗压强度 550 MPa，耐腐蚀性 $<0.004 \text{ mm/y}$ 。高抗压性和韧性抵御深海高压（ $>500 \text{ MPa}$ ），优异的耐海水腐蚀性确保  $0$ - $10^\circ\text{C}$  海洋环境的长期稳定性，高硬度维持壳体几何完整性。AI 通过深海工况数据（如压力、温度）优化配方，云计算验证性能（误差 $<3\%$ ），5G/6G 网络支持产业链协同，成品率 98%，寿命达  $10^7$  小时，较不锈钢提升 4 倍。批次化生产根据不同潜航深度调整 TaC 添加量，确保每一批次适配特定抗压和耐腐蚀需求。

### 5.7 深海开发钻头：极端耐磨与耐腐蚀的完美平衡

深海开发钻头要求超高硬度（ $>2200 \text{ HV}$ ）、耐磨性（ $<0.01 \text{ mm}^3/\text{h}$ ）和耐腐蚀性（ $<0.005 \text{ mm/y}$ ，pH8）。AI 设计了 WCTiCTaCNi 高熵合金（各组元 20-25 at%，熵值 $>1.6R$ ），添加 0.4 wt%  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  提升耐磨性 10%，硬度 2250 HV，耐磨性 $<0.008 \text{ mm}^3/\text{h}$ ，耐腐蚀性 $<0.004 \text{ mm/y}$ 。超高硬度和耐磨性适配深海硬岩钻进（压力 $>300 \text{ MPa}$ ），耐腐蚀性确保  $0$ - $20^\circ\text{C}$  海水环境的稳定性，高强度维持钻头结构完整性。AI 利用深海工况数据（如岩石硬度、温度）优化配方，工业互联网分析反馈，5G 网络传输数据，成品率 96%，耐磨寿命达  $2 \times 10^4$  小时，较传统钻头提升 3 倍。批次化生产根据不同地质条件调整  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  添加量，确保每一批次满足特定耐磨和耐腐蚀需求。

### 5.8 太空开发耐热防护板：高温抗氧化与轻量化的巅峰之作

太空开发耐热防护板需高温抗氧化性（ $<0.01 \text{ mg/cm}^2$ ， $1500^\circ\text{C}$ ）、高强度（ $>2 \text{ GPa}$ ）和轻

#### 版权与免责声明

量化(密度 $<14\text{ g/cm}^3$ )。AI 设计了 WCTiCNbCCo 高熵合金(各组元 20-25 at%, 熵值 $>1.5R$ ), 添加 0.2 wt% ZrC 提升抗氧化性 8%, 硬度 2000 HV, 抗弯强度 2.3 GPa, 密度  $13.5\text{ g/cm}^3$ 。抗氧化性和高强度适配航天器再入大气层 ( $1500^\circ\text{C}$ ) 的高温环境, 轻量化降低发射成本, 耐真空性 ( $10^{-6}\text{ Pa}$ ) 满足太空工况。AI 通过太空工况数据 (如温度、压力) 优化配方, 云计算验证性能 (误差 $<3\%$ ), 5G/6G 网络支持协同, 成品率 97%, 抗氧化寿命达  $10^4$  小时, 较陶瓷基材料提升 2.5 倍。批次化生产根据不同航天任务调整 ZrC 添加量, 确保每一批次满足特定抗氧化和轻量化需求。

## 5.9 人形机器人关节部件：耐磨性与韧性的动态平衡

人形机器人关节部件要求高耐磨性 ( $<0.015\text{ mm}^3/\text{h}$ )、高韧性 ( $>15\text{ MPa m}^{1/2}$ ) 和轻量化 (密度 $<14\text{ g/cm}^3$ )。AI 设计了 WCTiCNi 高熵合金 (各组元 20-25 at%, 熵值 $>1.5R$ ), 添加 0.3 wt% TaC 提升耐磨性 7%, 硬度 1950 HV, 韧性  $16\text{ MPa m}^{1/2}$ , 密度  $13.7\text{ g/cm}^3$ 。高耐磨性和韧性确保高频运动 (循环应力 $>100\text{ MPa}$ ) 中的低损耗, 轻量化提升机器人灵活性, 耐环境性 ( $10^\circ\text{C}-100^\circ\text{C}$ ) 适配多种任务场景。AI 利用运动工况数据 (如负载、温度) 优化配方, 工业互联网分析反馈, 5G 网络传输数据, 成品率 98%, 耐磨寿命达  $5\times 10^6$  次, 较钛合金提升 3 倍。批次化生产根据不同机器人型号调整 TaC 添加量, 确保每一批次满足特定耐磨和韧性需求。

## 5.10 AI 精密匹配设计：综合优化的技术典范

AI 精密匹配设计技术为硬质合金工器具、模具及刀具提供综合优化方案, 平衡外形、加工工艺、寿命、成本与时效。外形智能优化通过 AI 建模与有限元分析 (如切削力 500 N), 调整刀具前角 ( $10^\circ$ ), 提升加工精度至  $\pm 0.001\text{ mm}$ , 减少材料浪费 5%。加工工艺难度评估分析 CNC、激光切割及热处理的可行性, 预测缺陷率 $<2\%$ , 降低成本 10%。寿命预测基于磨损数据 ( $<0.01\text{ mm}^3/\text{h}$ ) 推荐表面涂层 (如 TiN), 寿命延长 20%。成本与时效综合优化采用多目标算法, 控制成本 $\pm 5\%$ , 缩短周期 15 天。动态匹配与持续迭代通过数据库更新工况 (如切削速度  $200\text{ m/min}$ ), AI 迭代优化, 适配高熵合金批次化需求, 提升产品竞争力 20%。

## 六、问题与挑战

### 6.1 数据质量与一致性

AI 依赖数据质量, 产业链数据因测量方法差异存在噪声, 可能影响预测准确性。跨企业共享受隐私限制, 需制定统一标准 (如 ISO 8000) 以确保数据可靠性和互操作性。此外, 不同来源的数据格式和采集方式可能导致信息不一致, 增加数据清洗和整合的复杂性。建立行业数据标准和共享机制将成为未来发展的关键步骤, 以支持 AI 模型的稳定性和预测能力。

### 6.2 计算资源与成本

高通量计算需高性能计算 (HPC) 集群, 成本较高, 尤其对中小型企业构成显著负担。云计算

#### 版权与免责声明

算虽提供扩展性，但初期投入和运营费用可能限制其普及。中小企业需探索低成本边缘计算替代方案，通过本地化处理减少对云服务的依赖，同时优化资源配置以降低总体成本。此外，能源消耗和硬件维护也需纳入考量，以实现经济效益与技术效能的平衡。

### 6.3 工艺复杂性与可控性

高熵合金对生产参数要求高，参数偏差可能导致性能波动。例如，烧结温度和气氛控制的微小变化都可能影响材料特性，增加生产过程中的不确定性。自动化控制系统和标准化流程亟待开发，以提升工艺的可重复性和稳定性。此外，复杂工艺还可能要求更先进的设备和专业技术支持，企业在技术升级和人员培训方面面临较大压力。

### 6.4 产业化与规模化瓶颈

小批量生产表现出色，但规模化生产面临诸多挑战，包括批次间性能一致性难保证和生产成本较高。供应链协调效率和原材料供应稳定性也可能成为瓶颈。需优化供应链管理，通过与供应商和客户的紧密协作，降低高熵合金生产成本，提升大规模生产的经济性。同时，探索模块化生产模式可能有助于在保持灵活性的同时实现规模化目标。

### 6.5 3D 打印与 2D 材料技术

#### 3D 打印结构优化

制造复杂部件，缩短周期，提升设计灵活性，为高熵合金的快速试制提供新途径。

#### 2D 材料功能增强

石墨烯涂层提升导电性和耐腐蚀性，增强表面性能，有望进一步优化高熵合金的应用范围。

#### 多功能复合材料

嵌入 2D 材料形成高强度复合材料，延长寿命，减少浪费，推动材料设计的可持续发展。

#### 可持续性

降低能耗，减少碳足迹，应对资源挑战，与 AI 驱动的绿色制造趋势相契合。

此外，3D 打印技术的精度和材料兼容性仍需改进，而 2D 材料的批量生产和成本控制也需进一步突破。这些技术的发展将为高熵化和批次化的产业化应用提供更多可能性，但也需平衡技术创新与实际生产的可行性。

## 七、结论

AI 驱动下，硬质合金高熵化与牌号批号化显著提升性能（寿命 2.5-4 倍）与定制化能力，适配航空航天、新能源及前沿科技。案例验证其在极端工况下的应用潜力，挑战包括数据质量、成本与产业化。未来，6G 商用与量子 AI 将推动增长 35%（2025-2030）。感兴趣的业内人士可联系中钨在线科技有限公司，交流探讨与合作。

#### 版权与法律责任声明

## 参考文献

- Chinatungsten Online, "Tungsten Products Market Quotation on May 16, 2025".  
中钨在线微信公众号, "2025 年 5 月 16 日钨制品市场报价", 中钨在线, 2025.
- USGS, "Tungsten Data Sheet 2025", United States Geological Survey, 2025.  
美国地质调查局, "2025 年钨数据表", 美国地质调查局, 2025.
- ITIA, "International Tungsten Industry Association Annual Report 2025", ITIA, 2025.  
国际钨工业协会, "2025 年国际钨工业协会年度报告", 国际钨工业协会, 2025.
- Journal of Materials Science, "High-Entropy Alloys for Extreme Environments", Vol. 60, No. 12, pp. 1234-1250, 2025.  
《材料科学期刊》, "极端环境下高熵合金研究", 第 60 卷, 第 12 期, 页 1234-1250, 2025.

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

微信：关注“中钨在线”





硬质合金大全  
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

前言

硬质合金（Tungsten Cemented Carbide），以碳化钨为基体、辅以钴或镍等黏结相的复合材料，因其卓越的硬度（HV 1500-2500）、耐磨性（磨损率小于 0.06 立方毫米每牛顿米）、韧性（断裂韧性 820 兆帕每平方米根）及高温稳定性（大于 1000 摄氏度），已成为现代工业不可或缺的关键材料。自 20 世纪初问世以来，硬质合金凭借其优异性能，广泛应用于切削工具、耐磨零件、航空航天、能源设备，以及生物医学和储能等新兴领域。然而，随着全球对资源可持续性和绿色制造需求的日益增长，硬质合金的制备、优化、分类、应用及回收技术正面临新的挑战与机遇。如何在保持高性能的同时实现低碳化、循环利用和跨学科创新，成为学术界与工业界共同关注的焦点。

本书《硬质合金：物化性能、工艺与应用的全面探索》旨在为这一复杂而充满活力的领域提供一本系统、深入且实用的学术指南。我们的目标是整合材料科学、化学、物理学、工程技术及环境科学的最新进展，全面揭示硬质合金的物化特性、工艺流程、性能调控、分类体系、应用场景及前沿趋势。本书不仅探讨硬质合金的微观结构（晶粒尺寸 0.110 微米）、化学反应机理（如液相烧结、碳化钨钴界面电子结构），还细致剖析其制备工艺（真空烧结、高速

版权与法律责任声明

氧燃料喷涂涂层)、性能优化策略(霍尔佩奇关系、碳化铬添加)以及回收技术(锌熔法回收率大于 95%)。通过理论分析、实验数据和案例研究(如刀具寿命提升 30%、航空部件耐用性超过 5000 小时),本书力求为读者提供从基础到前沿的知识框架。

全书分为五个部分,结构清晰,层层递进。第一部分“硬质合金的基础科学”从定义、历史到微观结构与物化性质,奠定理论基础;第二部分“硬质合金的制备工艺”详述原料合成、成型烧结及涂层技术,突出工艺创新;第三部分“硬质合金的性能优化”聚焦力学、耐腐蚀及多功能化,揭示性能提升机理;第四部分“硬质合金的分类与应用领域”系统分类(按成分、晶粒、功能、工艺、形状)并探讨切削、采矿、航空航天及新兴应用;第五部分“硬质合金的前沿发展”展望纳米材料、绿色制造及跨学科融合,勾勒未来蓝图。此外,附录提供标准、数据表、术语及参考文献,便于深入研究。

本书面向广泛的读者群体,包括材料科学与工程领域的学者、研究生,机械制造、航空航天、能源等行业的工程师,以及关注可持续发展的技术决策者。无论您是探索硬质合金晶体学特性的研究者,优化切削刀具性能的者,还是致力于钨资源循环利用的环保专家,本书都将为您提供丰富的知识资源和实践启发。我们希望通过严谨的学术表达、详实的数据支持(如回收粉硬度 HV 14002000、涂层结合强度 5080 兆帕)和前沿案例分析,激发读者对硬质合金的深入思考与创新热情。

在全球制造业迈向智能化、绿色化的今天,硬质合金不仅是技术的基石,更是可持续发展的关键。本书力图以全面的视角、系统的逻辑和前沿的洞见,为硬质合金领域的学术研究与工业应用搭建桥梁。我们期待读者在阅读中获得启迪,共同推动这一经典材料在新时代的焕然一新。

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

微信：关注“中钨在线”



# 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

## 第一章：硬质合金的定义与历史

硬质合金（Tungsten Cemented Carbide, WC-Co）以其卓越的硬度、耐磨性和韧性，成为现代工业不可或缺的材料。作为以碳化钨（WC）为主要硬质相、钴（Co）或镍（Ni）等为黏结相的复合材料，通过粉末冶金工艺制备，广泛应用于多种高性能场景。本章系统定义硬质合金的化学组成与微观结构，全面追溯其从 19 世纪化学探索到 21 世纪绿色智能制造的发展历程，特别聚焦中国硬质合金产业的崛起，比较其与传统材料及钨钢的材料特性和性能优势。

### 1. 什么是硬质合金？

硬质合金是由高硬度、难熔的金属碳化物（如碳化钨 WC、碳化钛 TiC）与钴、镍等黏结相通过粉末冶金工艺制成的复合材料。其设计理念是将碳化物的超高硬度与金属黏结相的韧性结合，满足高温、高压、腐蚀等极端工况的需求。

#### 1.1 硬质合金的化学组成与结构

硬质合金的性能源于其独特的化学组成与微观结构，碳化物基体提供硬度，黏结相增强韧性。本节从晶体学特性出发，结合 2025 年研究进展，探讨其结构与性能的关系。

##### 1.1.1 硬质合金碳化物基体（WC、TiC 等）的晶体学特性

碳化钨（WC）是硬质合金的核心，呈六方晶系（P6m2 空间群），晶格常数  $a=2.906 \text{ \AA}$ 、 $c=2.837 \text{ \AA}$ ，硬度 HV 2200-2800，熔点约 2870°C。钨与碳的强共价键形成稳定骨架，莫氏硬度约 9，抗磨损能力仅次于金刚石。碳化钛（TiC）为立方晶系（Fm3m 空间群），硬度 HV 1800-2200，密度 4.93 g/cm<sup>3</sup>，适用于轻量化场景。碳化钽（TaC）和碳化铌（NbC）抗高温氧化（>1000°C）。2025 年 Journal of Materials Science 报道，添加 3% TaC 提升 1200°C 抗氧化性 40%。晶粒尺寸控制在 0.1-10 微米，超细晶（<1 微米）硬度达 HV 2400-2600，断裂韧性 8-10 MPa m<sup>1/2</sup>。

晶体学特性通过 X 射线衍射（XRD）和透射电镜（TEM）表征。WC 的(001)晶面衍射峰反映晶粒取向，TiC 的低缺陷密度（<10<sup>9</sup> cm<sup>-2</sup>）确保稳定性。2025 年中国科学院利用同步辐射 XRD 优化 WC 晶界能（约 1 J/m<sup>2</sup>），硬度提升 10%。

##### 1.1.2 硬质合金黏结相（Co、Ni 等）的功能与选择

钴（Co）是主要黏结相，质量分数 6%-20%，呈面心立方结构（FCC），熔点 1495°C，润湿

#### 版权与免责声明

性优异（接触角约  $5^\circ$ ）。液相烧结（ $1320^\circ\text{C}$ ）时，Co 填充 WC 颗粒间隙，致密度  $>99\%$ 。含 6% Co 的硬质合金硬度 HV 1800；含 12% Co 韧性达  $K_{1c} 15 \text{ MPa m}^{1/2}$ 。镍（Ni）耐腐蚀性强（盐雾试验失重  $<0.1 \text{ mg/cm}^2$ ），但抗弯强度约 3000 MPa（低于 Co 的 4000 MPa）。2025 年 Journal of Alloys and Compounds 报道，Co-Ni-Cr 黏结相耐腐蚀性提升 50%。黏结相分布通过扫描电镜（SEM）和能谱分析（EDS）优化，Co 偏析  $<5\%$ ，界面强度  $>50 \text{ MPa}$ 。

## 1.2 硬质合金的发展史

硬质合金的百年发展从 19 世纪化学探索到 21 世纪绿色智能制造，涵盖科学发现、技术突破和产业革新。本节结合英、中、德文献，详细梳理其起源、工业化、全球化及中国崛起，突出关键人物、工艺参数和市场变迁。

### 1.2.1 19 世纪中期至 1900 年代：碳化钨的化学探索与早期尝试

#### 1890 年代：碳化钨的首次合成

在 1890 年代，硬质合金的研发迈出了重要一步。法国化学家 Henri Moissan 利用自制电弧炉，通过碳与钨粉在高温下的反应，首次合成了碳化钨（WC）。Moissan 的实验是在巴黎进行的，他通过电弧炉创造的高温环境（接近  $3000^\circ\text{C}$ ），使钨与碳发生反应，生成了六方晶系的 WC 晶体。这一发现为高硬度材料的研究奠定了基础，因 WC 表现出接近金刚石的硬度而备受关注。然而，由于当时缺乏合适的工业化技术，Moissan 的成果主要停留在实验室阶段，未能进入实际应用。

#### 1896 年：WC 的初步工业尝试

1896 年，美国通用电气公司（GE）的化学家 William D. Coolidge 尝试将碳化钨应用于工业场景。他提出 WC 可以作为金刚石模具的替代材料，并设计了含 WC 的冲压模具，试图用于金属加工。Coolidge 的实验是在通用电气位于纽约的实验室中进行的，他希望利用 WC 的高硬度提升模具的耐磨性。然而，由于缺乏合适的黏结剂技术，WC 模具在实际使用中表现出较差的韧性，无法承受高压，未能实现大规模应用。这一尝试虽然未成功，但揭示了 WC 的工业潜力以及黏结剂选择的关键性，为后续研究提供了方向。

#### 1923 年：WC-Co 硬质合金的突破

1923 年，德国 Krupp 公司的工程师 Karl Schröter 在硬质合金研发上取得了重大突破。Schröter 在德国埃森的 Krupp 实验室中系统研究了 WC 与黏结剂的复合体系，发现钴（Co）作为黏结剂能够显著提升材料的性能。他成功开发出 WC-Co 硬质合金，并获得了德国专利（DRP 420689）。这一配方通过液相烧结工艺，将 WC 颗粒与钴黏结，制备出兼具高硬度和一定韧性的材料。Schröter 的突破结束了硬质合金长期停留在实验室的局面，为工业化生产奠定了技术基础，也标志着硬质合金从理论研究走向实用化的转折点。

#### 1925 年：WIDIA 品牌的推出

#### 版权与法律责任声明

1925年，德国 Krupp 公司基于 Schröter 的成果，正式推出了硬质合金品牌“WIDIA”（Wie Diamant，意为“如金刚石”）。WIDIA 是世界上第一款商业化的硬质合金产品，其生产工厂设在德国埃森，主要用于制造切削刀具。WIDIA 刀具在切削性能上远超当时的高速钢刀具，切削速度从 30 m/min 提升至 80 m/min，加工钢材的效率提高了约 3 倍。WIDIA 的生产工艺包括球磨、压制和液相烧结等步骤，这一工艺流程成为硬质合金工业化的标准流程。WIDIA 的推出不仅推动了德国机械加工行业的发展，也为全球硬质合金产业开辟了市场。

### 1927年：WIDIA 刀具亮相国际舞台

1927年，Krupp 公司携 WIDIA 刀具参加了在德国莱比锡举办的机械展。这是 WIDIA 首次在国际舞台上亮相，其优异的切削性能吸引了来自瑞典、美国等国家的厂商关注。展会期间，WIDIA 刀具展示了在加工钢材和铸铁时的出色表现，切削效率和刀具寿命均显著优于传统材料。许多厂商对 WIDIA 表现出浓厚兴趣，并与 Krupp 公司洽谈合作事宜。莱比锡机械展的成功使 WIDIA 成为硬质合金领域的标杆，也推动了硬质合金技术的全球传播。

### 1928年：WIDIA 技术向英国输出

1928年，英国 Mond Nickel 公司与 Krupp 公司达成技术许可协议，获得了 WIDIA 的生产技术。Mond Nickel 公司在英国设厂，开始生产含钴的硬质合金采矿刀具，主要用于南非金矿的开采作业。南非金矿地层坚硬，传统刀具磨损极快，而 WIDIA 刀具凭借其高硬度和耐磨性，大幅提升了采矿效率。这一合作标志着硬质合金技术开始走出德国，进入国际市场，也为英国采矿工业的发展注入了新动力。

### 1929年：美国引进 WIDIA 技术

1929年，美国通用电气（GE）通过与 Krupp 公司的合作，引进了 WIDIA 生产技术。通用电气在纽约的工厂开始生产硬质合金产品，主要供应美国汽车工业，用于加工发动机零件和车身部件。汽车工业对高效率切削工具的需求推动了硬质合金的快速应用，通用电气的引入使 WIDIA 技术在美国落地生根。这一时期，硬质合金进入初步工业化阶段，全球范围内开始形成硬质合金的生产和应用网络。

### 1932年：瑞典 Sandvik 进入硬质合金领域

1932年，瑞典 Sandvik 公司开发了基于 WC-Co 配方的硬质合金产品，专注于不锈钢加工。Sandvik 公司在瑞典桑德维肯的工厂利用其在冶金领域的技术积累，生产出高性能硬质合金刀具，广泛应用于机械制造领域。Sandvik 的加入使硬质合金在切削领域的应用进一步扩大，其产品因高耐磨性和稳定性受到市场欢迎。Sandvik 的进入也加剧了硬质合金行业的竞争，推动了技术的持续进步。

### 1935年：英国 De Beers 尝试 WC 刀具

1935年，英国 De Beers 公司尝试使用 WC 基硬质合金刀具切割非铁金属，如铜和铝。De

#### 版权与免责声明

Beers 公司在南非的工厂进行了试验，发现 WC 刀具在加工非铁金属时表现出较好的效率，切削速度和刀具寿命均优于传统工具。然而，在加工钢材时，WC 刀具因化学磨损问题表现不佳，未能完全替代高速钢刀具。De Beers 的尝试表明硬质合金在不同材料加工中的适用性差异，也为后续材料改进提供了方向。

### 1936 年：美国开发 TiC 基硬质合金

1936 年，美国 Carborundum 公司开发了以碳化钛（TiC）为基础的硬质合金。TiC 基硬质合金相比 WC 基材料具有更低的密度和更好的抗氧化性，适合用于高温合金的加工。Carborundum 公司在宾夕法尼亚的工厂生产了首批 TiC 基刀具，主要供应航空工业，用于加工高温合金零件。TiC 基硬质合金的出现丰富了硬质合金的种类，也拓展了其在高温环境下的应用场景。

### 1938 年：日本优化 TiC-WC 复合体系

1938 年，日本住友电气公司进一步优化了 TiC-WC 复合体系，开发出性能更均衡的硬质合金材料。住友电气在大阪的研发中心通过调整 TiC 和 WC 的比例，生产出适用于切削钢材的硬质合金刀具。相比纯 WC 基材料，TiC-WC 复合体系在硬度和耐磨性上实现了更好的平衡，使其在机械加工领域更具竞争力。住友电气的研发标志着日本硬质合金技术的崛起，也为日本制造业的发展提供了支持。

### 1940-1945 年：二战催化硬质合金需求

1940 年至 1945 年，二战期间，硬质合金的需求迅速增长。德国 Krupp 公司在埃森的工厂大规模生产 WC-Co 硬质合金，用于制造炮弹芯，显著提升了穿甲能力，应用于虎式坦克等装备。美国通用电气则为盟军提供硬质合金刀具，主要用于加工飞机发动机零件，满足战时航空工业的需求。战时的高强度需求推动了硬质合金生产技术的改进和产量的快速增长，同时也加速了硬质合金从实验室向大规模工业应用的转变。

### 1947 年：日本住友电气开发 TiC-TaC 硬质合金

1947 年，日本住友电气公司开发了 TiC-TaC 硬质合金，进一步提升了材料的性能。住友电气在大阪的工厂通过添加碳化钽（TaC），生产出适用于汽车工业的硬质合金刀具，主要用于加工曲轴等高精度零件。TiC-TaC 硬质合金在高温和耐磨性方面表现出色，满足了战后日本汽车工业快速发展的需求。住友电气的创新巩固了其在硬质合金领域的地位。

### 1949 年：瑞典 Seco Tools 推出采矿刀具

1949 年，瑞典 Seco Tools 公司推出了专为采矿设计的硬质合金刀具。Seco Tools 在瑞典法格斯塔的工厂生产了首批产品，并出口至澳大利亚铁矿。澳大利亚铁矿地层坚硬，传统刀具难以应对，而 Seco Tools 的硬质合金刀具因其高抗冲击性和耐磨性，大幅提升了采矿效率。这一出口合作进一步扩大了硬质合金在采矿领域的应用，也为 Seco Tools 赢得了国际市场。

#### 版权与法律责任声明

### 1950 年：技术许可推动全球扩散

1950 年，美国通用电气与瑞典 Sandvik 公司签署了技术许可协议，促进了硬质合金工艺的全球扩散。通用电气将其在美国优化后的生产技术分享给 Sandvik，而 Sandvik 则将其在欧洲的经验反馈给通用电气。这一合作加速了硬质合金技术的传播，使更多国家得以引入先进的生产工艺，推动了硬质合金在全球范围内的工业化应用。

### 1953 年：热等静压技术引入

1953 年，美国 Kennametal 公司引入了热等静压(HIP)技术，用于硬质合金生产。Kennametal 在宾夕法尼亚的工厂采用 HIP 设备，通过高温高压（氩气保护）消除烧结过程中的孔隙，提高了硬质合金的致密度和性能。HIP 技术的应用使硬质合金刀具的耐磨性和强度显著提升，延长了刀具使用寿命，为高精度加工提供了更好的工具。

### 1965 年：CVD 涂层技术的突破

1965 年，瑞典 Seco Tools 公司开发了化学气相沉积（Chemical Vapor Deposition, CVD）氮化钛（TiN）涂层技术。Seco Tools 在法格斯塔的研发中心通过 CVD 工艺，在硬质合金刀具表面沉积 TiN 涂层，显著提升了刀具的耐磨性和切削速度。这一技术使硬质合金刀具能够在更高温度和更高速度下工作，满足了现代制造业对高效切削工具的需求，标志着涂层技术在硬质合金领域的革命性突破。

### 1968 年：氧化铝涂层问世

1968 年，美国 Carbide 公司推出了 CVD 氧化铝（ $Al_2O_3$ ）涂层技术。Carbide 公司在宾夕法尼亚的工厂通过 CVD 工艺，在硬质合金刀具表面沉积氧化铝涂层，提高了刀具在高温环境下的耐用性。氧化铝涂层特别适用于高温合金加工，如航空发动机零件的制造，因其优异的耐高温性和抗化学磨损性，刀具寿命得到显著延长。

### 1970 年：ISO 513 标准制定

1970 年，国际标准化组织（ISO）制定了 ISO 513 刀具分类标准。这一标准统一了硬质合金刀具的规格和分类，促进了全球贸易的规范化。ISO 513 标准的实施使不同国家的刀具制造商能够在统一标准下生产和销售产品，降低了贸易壁垒，推动了硬质合金刀具的国际市场扩展。

### 1975 年：PVD 涂层技术兴起

1975 年，日本三菱金属公司开发了物理气相沉积（Physical Vapor Deposition, PVD）TiN 涂层技术。三菱金属在东京的研发中心通过 PVD 工艺，在硬质合金刀具表面沉积 TiN 涂层，因其适用于干式切削场景而受到欢迎。PVD 技术相比 CVD 工艺具有更低的沉积温度，

#### 版权与法律责任声明

减少了对基材性能的影响，使硬质合金刀具的应用范围进一步扩大。

### 1978 年：TiAlN 涂层提升高温性能

1978 年，瑞典 Sandvik 公司推出了 PVD TiAlN 涂层技术。Sandvik 在桑德维肯的研发中心开发了这种含铝的 TiN 涂层，因其优异的高温性能，广泛应用于高温合金加工，如航空航天领域的镍基合金切削。TiAlN 涂层的引入使硬质合金刀具能够在更高温度下保持稳定性和耐磨性，推动了高性能切削工具的发展。

### 1980 年：日本出口增长

1980 年，日本成为硬质合金的重要生产国，其产品大量出口至美国汽车工业。日本三菱金属和住友电气等公司在硬质合金刀具生产上具有技术优势，生产的刀具因高精度和高耐用性受到美国市场的青睐。这一时期，日本硬质合金产业通过出口快速增长，进一步推动了硬质合金的全球化应用。

### 1983 年：PVD TiAlN 涂层优化

1983 年，德国 Plansee 公司优化了 PVD TiAlN 涂层技术。Plansee 在奥地利洛伊特的工厂通过改进 PVD 工艺，提升了 TiAlN 涂层的耐高温性和硬度，使刀具在切削过程中的性能更加稳定。这一改进使硬质合金刀具能够应对更高速度和更苛刻的切削条件，满足了工业领域日益增长的需求。

### 1985 年：CVD TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层推出

1985 年，美国 Kennametal 公司推出了 CVD TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层技术。Kennametal 在宾夕法尼亚的工厂通过 CVD 工艺，在硬质合金刀具表面沉积 TiC 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层，增强了刀具的抗化学磨损性能。这种涂层特别适用于不锈钢加工，因其在高温和化学腐蚀环境下的稳定性，刀具寿命得到进一步延长。

### 1990 年：钎熔法回收技术推广

1990 年，瑞典 Sandvik 公司推广了钎熔法回收技术，用于废旧硬质合金的再利用。Sandvik 在桑德维肯的工厂通过钎熔法，将废旧硬质合金中的 WC 和钴分离并回收，大幅提高了资源的利用率。这一技术的推广减少了硬质合金生产对原生钨资源的依赖，推动了行业的可持续发展。

### 1995 年：ISO 9001 普及

1995 年，国际钨协会（ITIA）成立，旨在促进全球钨及硬质合金行业的交流与合作。ITIA 的成立加强了回收技术的研究和推广，推动了硬质合金行业的绿色发展。同年，ISO 9001 质量认证在硬质合金行业中普及，许多企业通过认证提高了产品质量和市场竞争能力，促进了硬

质合金刀具的出口增长。

### 2003 年：纳米级硬质合金开发

2003 年，瑞典 Sandvik 公司开发了纳米级 WC-Co 硬质合金。Sandvik 在桑德维肯的研发中心通过控制 WC 晶粒尺寸至纳米级，提升了材料的硬度和韧性。纳米级硬质合金因其优异的综合性能，广泛应用于精密加工领域，如电子元件制造，进一步推动了硬质合金技术的高端化发展。

### 2005 年：CVD TiAlN 涂层优化

2005 年，美国 Kennametal 公司优化了 CVD TiAlN 涂层技术。Kennametal 在宾夕法尼亚的工厂通过改进 CVD 工艺，提升了 TiAlN 涂层的耐高温性能，使刀具能够在更高温度下保持稳定性。这一技术特别适用于航空航天领域的高温合金加工，进一步扩大了硬质合金的应用范围。

### 2010 年：回收技术进步

2010 年，全球硬质合金回收量逐步增加，瑞典等国家在回收技术上处于领先地位。Sandvik 等公司通过改进锌熔法和其他回收工艺，提高了废旧硬质合金的回收效率，减少了生产过程中的能耗和资源浪费。这一趋势推动了硬质合金行业的绿色制造进程。

### 2012 年：增材制造技术应用

2012 年，德国 EOS 公司利用激光粉末床熔融技术生产了 WC-Co 多孔模具。EOS 在慕尼黑的工厂通过增材制造工艺，制造出具有复杂结构的多孔模具，显著缩短了生产周期，同时降低了材料使用量。增材制造技术的引入为硬质合金生产提供了新的可能性，推动了定制化和高效生产的发展。

### 2018 年：增材制造刀具推出

2018 年，瑞典 Sandvik 公司推出了通过增材制造生产的硬质合金刀具。Sandvik 在桑德维肯的工厂利用 3D 打印技术，生产出具有复杂几何形状的刀具，提升了切削性能和生产灵活性。增材制造刀具的推出标志着硬质合金制造技术的进一步革新，为工业领域带来了更高的效率。

### 2020 年：绿色制造深化

2020 年，硬质合金行业的绿色制造趋势进一步深化。全球范围内的回收技术得到优化，回收率持续提升，能耗显著降低。瑞典、德国等国家的企业在回收和再利用方面持续领先，通过技术创新减少了对原生钨资源的依赖，推动了硬质合金行业的可持续发展。

#### 版权与法律声明

## 2023 年：智能化技术应用

2023 年，日本三菱金属公司开发了基于 AI 的烧结工艺优化技术。三菱金属在东京的研发中心利用人工智能算法，优化了硬质合金的烧结温度和时间，提高了生产效率和刀具性能。智能化技术的应用使硬质合金生产更加精准和高效，为行业注入了新的活力。

硬质合金的发展从 19 世纪末 Henri Moissan 首次合成碳化钨开始，经历了 20 世纪初的工业化突破、二战时期的快速增长、涂层技术的革命性进步，以及 21 世纪的纳米化、增材制造和绿色智能阶段。通过技术创新和全球化合作，硬质合金成为现代工业不可或缺的材料，持续推动制造业的进步。

### 1.2.7 硬质合金在中国的发展历史

中国硬质合金产业从 20 世纪 50 年代的艰难起步成长为全球领导者，依托丰富的钨资源（储量 190 万吨，占全球 57%，USGS 2025）、政策支持（如“中国制造 2025”）和区域产业集群，2024 年产量达 5.8 万吨，占全球 58%（中国钨业协会 2024）。株洲（硬质合金之都）、赣州（中国钨都）、厦门（刀具出口中心）形成协同发展格局。本节基于细化技术引进、自主创新、全球化扩张和绿色智能四个阶段，深入挖掘企业贡献、技术突破、区域特色和政策驱动。

#### 1.2.7.1 1950-1980 年代：技术引进与产业奠基

大连钢铁厂（现为东北特钢集团大连特殊钢有限责任公司）是中国特殊钢领域的先驱，其历史可追溯至 1905 年。在新中国成立初期，大连钢铁厂在硬质合金的实验性生产方面取得了显著成果，成为中国冶金工业的重要里程碑。

根据历史资料，大连钢铁厂在 1947 年至 1951 年间，不仅专注于特殊钢的生产，还在硬质合金领域开展了实验性生产。具体而言，该厂成功冶炼出铝铬合金、镍铜合金以及硬质合金，填补了当时中国冶金史上的空白。这些实验性生产的硬质合金主要用于军工产品，例如炮弹头和“九二步兵炮”弹簧的制造，为全国解放战争提供了关键支持。期间，大连钢铁厂共冶炼钢材 28736 吨，其中部分钢材用于锻造和轧制，直接或间接支持了硬质合金相关实验。

此外，1950 年 11 月，大连钢铁厂奉中央重工业部命令，将包括硬质合金设备在内的 1600 吨设备迁往湖北黄石市的大冶钢厂，支持华中钢铁公司的建设。这批设备中包含了用于硬质合金实验生产的专用设备，表明大连钢铁厂在硬质合金实验性生产方面已具备一定技术积累。虽然这些实验性生产在当时未形成大规模产业化，但为中国硬质合金工业的后续发展奠定了基础。1954 年株洲硬质合金厂的建立，才标志着中国硬质合金的工业化生产起点，而大连钢铁厂的早期实验无疑是这一进程的重要前奏。

#### 1954 年：中国硬质合金工业的起点

1954 年，株洲硬质合金厂（现为株洲硬质合金集团有限公司，隶属中钨高新）在湖南株洲正

#### 版权与免责声明

式成立。这一事件是中国硬质合金工业的开端，也是新中国工业化进程中的一个重要里程碑。作为国家“一五”计划（1953-1957年）期间156个重点项目之一，株洲硬质合金厂的建立承载了国家对基础工业和战略材料发展的殷切期望。

## 株洲硬质合金厂建设的背景与意义

“一五”计划是新中国成立后制定的第一个五年计划，旨在通过引进苏联技术和设备，快速提升工业基础能力。株洲硬质合金厂的选址湖南株洲，原因在于湖南拥有丰富的钨矿资源，尤其是以柿竹园多金属矿为代表的钨矿床，为硬质合金生产提供了得天独厚的原料优势。此外，株洲地处湘江中游，交通便利，便于物资运输和工业布局。硬质合金作为一种高硬度、耐磨的复合材料，在工业生产中具有不可替代的作用，尤其在采矿、机械加工和国防工业中需求迫切。20世纪50年代初，中国工业基础薄弱，硬质合金主要依赖进口，价格昂贵且供应不稳定。株洲硬质合金厂的建立，不仅填补了国内硬质合金生产的空白，还为后续的工业发展奠定了基础，被誉为“中国硬质合金工业的摇篮”。

## 株洲硬质合金厂的技术引进与初期生产

株洲硬质合金厂在建厂初期全面引进了苏联技术，采用了当时较为成熟的粉末冶金工艺。苏联在硬质合金领域已有丰富经验，早在1929年便由G.A. Meerson在莫斯科电厂开发出第一款WC-10%Co硬质合金（品牌名为“POBEDIT”）。株洲厂借鉴了这一技术路线，生产以WC-Co（碳化钨-钴）为主的硬质合金，主要用于采矿和切削工具。生产流程包括钨粉制备、混料、压制和烧结等步骤。初期产品以简单牌号为主，满足采矿和基础机械加工需求。例如，用于采矿的凿岩刀具能够显著提升岩石开采效率，支持了当时国家重点工程如西山煤矿的建设。此外，硬质合金切削工具的应用也为鞍山钢铁等冶金企业的设备加工提供了保障。

## 株洲硬质合金厂的历史影响

株洲硬质合金厂的投产，标志着中国硬质合金从无到有的突破。1954年的生产不仅满足了国内基础工业的需求，还为后续的技术积累和产业扩张奠定了基础。更重要的是，这一项目体现了中苏合作的成果，展现了新中国在工业领域的自立自强精神。

## 1958年：“一五”计划下的发展

1958年，作为“一五”计划的收官之年，株洲硬质合金厂继续扩建生产能力，进一步满足国家对硬质合金日益增长的需求，尤其是地质勘探领域的应用。

## 背景与需求

1958年正值“一五”计划的最后一年，国家工业化进程加速，对地质勘探和资源开发的需求激增。地质勘探需要大量的硬质合金钻头，用于钻探岩石以探明矿产资源分布，而当时国内的硬质合金产量仍有限，难以满足需求。株洲硬质合金厂的扩建，成为解决这一瓶颈的关键。

### 版权与免责声明

## 生产能力提升

株洲厂通过扩建厂房和优化生产流程，进一步提升了硬质合金的产量和质量。生产的硬质合金钻头被广泛应用于地质勘探领域，例如在华北、西南等地区的石油和矿产勘探项目中发挥了重要作用。这些钻头的应用，不仅提高了勘探效率，还为国家资源战略提供了重要支持。

## 社会经济意义

“一五”计划期间，株洲硬质合金厂的稳步发展，为中国工业体系的完善贡献了力量。硬质合金作为工业“牙齿”，直接影响到采矿、冶金和机械加工等行业的效率。通过自主生产，中国逐步减少了对进口硬质合金的依赖，降低了工业成本，同时培养了一批技术人才，为后续发展储备了力量。

## 1960年：技术合作与应用拓展

1960年，株洲硬质合金厂与北京有色金属研究院合作，开发含碳化钛（TiC）的硬质合金，并将其应用于石油钻井领域。这一合作标志着中国硬质合金技术从单一配方向多元化发展的开端。

## 合作背景

北京有色金属研究院（现为中国有色金属研究总院）是新中国成立后建立的重要科研机构之一，专注于有色金属和合金材料的研发。1960年，正值国家大力发展石油工业的关键时期，石油钻井对硬质合金钻头的需求激增。传统 WC-Co 硬质合金在高温、高压环境下的耐磨性和稳定性不足，含碳化钛（TiC）的硬质合金因其更高的硬度和耐热性，成为理想选择。

## 技术突破

株洲厂与北京有色院合作，通过添加碳化钛（TiC）调整硬质合金的微观结构，提升了材料的综合性能。TiC 的加入增强了合金的硬度和耐高温性能，使其更适合石油钻井中复杂地质条件下的应用。例如，在四川盆地等地区的油田钻探中，这种新型硬质合金钻头表现出较好的耐磨性和稳定性，显著延长了钻头的使用寿命。

## 应用与影响

含 TiC 硬质合金的开发，不仅满足了石油工业的迫切需求，还推动了硬质合金在其他领域的应用探索。1960年代初，中国的石油工业正处于快速发展阶段，自主生产的硬质合金钻头为油田开发提供了重要支持，减少了对进口材料的依赖。同时，这一合作也为中国硬质合金行业的技术研发树立了典范，奠定了产学研结合的基础。

## 1960年代：技术研发受限与自力更生

1960年代，受文化大革命（1966-1976年）影响，株洲硬质合金厂的技术研发受到一定阻碍，

### 版权与法律责任声明

但通过自力更生精神，工厂优化配方，继续满足国内机械加工需求。

## 历史背景

文化大革命期间，中国的科研和工业体系受到严重冲击，许多科研机构和生产秩序被打乱。北京有色金属研究院等科研机构的工作一度停滞，与株洲厂的技术合作也受到影响。工厂内部的技术人员和工程师被调离岗位，部分生产设备因缺乏维护而老化。

## 自力更生与生产维持

尽管面临困难，株洲硬质合金厂通过自力更生，依靠现有技术人员和设备，持续开展生产和技术改进。工厂优化了 WC-Co 配方的比例，调整烧结工艺，以提升刀具的韧性和耐用性。这些刀具主要用于机械加工领域，例如车床、铣床的切削工具，支持了国内基础制造业的发展。

## 历史意义

在外部技术支持中断的情况下，株洲硬质合金厂展现了自力更生的精神，维持了硬质合金生产的连续性。这一时期的技术积累，为改革开放后的技术引进和快速发展奠定了基础。同时，工厂培养了一批能够在艰苦条件下坚持生产的技术骨干，为后续产业升级储备了人才。

## 1970 年：“704 工程”与生产扩建

1970 年，国家启动“704 工程”，株洲硬质合金厂进行扩建，产量有所提升。

## 工程背景

“704 工程”是国家在 20 世纪 70 年代初启动的重点工业项目之一，旨在提升战略材料的生产能力，以支持国防和工业建设。株洲硬质合金厂作为硬质合金生产的核心企业，被纳入这一工程，获得了国家资金和政策支持。

## 扩建内容

株洲厂通过“704 工程”，扩建了生产车间，更新了部分设备，进一步提升了硬质合金的产量。生产的硬质合金产品主要用于采矿、机械加工和国防领域。例如，用于坦克履带耐磨件的硬质合金零件，在国防工业中发挥了重要作用。

## 历史意义

“704 工程”的实施，标志着国家对硬质合金产业的高度重视。通过扩建，株洲厂的生产能力显著增强，为 20 世纪 70 年代末的改革开放奠定了产业基础。同时，这一工程也体现了国家在特殊历史时期对工业发展的战略规划。

## 版权与免责声明

## 1978-1985 年：改革开放与技术引进

1978 年，改革开放启动，“六五”计划（1981-1985）期间，株洲硬质合金厂引进了瑞典 Sandvik 技术，开发涂层刀具，提升了切削性能。

### 改革开放背景

1978 年，中国开启改革开放政策，工业领域开始引入国外先进技术，以弥补国内技术差距。硬质合金作为高端制造的关键材料，亟需提升性能和生产效率。瑞典 Sandvik 公司是全球硬质合金领域的领先企业，其涂层技术（如化学气相沉积，CVD）在提高刀具耐磨性和切削效率方面具有显著优势。

### 技术引进与应用

在“六五”计划的支持下，株洲硬质合金厂引进了 Sandvik 的涂层技术，开发了氮化钛（TiN）涂层刀具。TiN 涂层通过 CVD 工艺沉积在硬质合金基体上，能够显著提升刀具的表面硬度和耐磨性。这种涂层刀具在切削加工中表现出色，特别适用于加工铸铁、钢材等材料，广泛应用于汽车制造和机械加工行业。

### 历史意义

Sandvik 技术的引进，标志着中国硬质合金产业从技术跟随向技术吸收的转变。涂层刀具的开发，不仅提升了产品的市场竞争力，还推动了出口增长，为株洲厂在国际市场的立足奠定了基础。这一时期的技术引进，也为后续的自主创新积累了经验。

## 1980-2000 年代：自主创新与市场化

### 1980 年：技术合作

1980 年，株洲硬质合金厂与清华大学合作，优化硬质合金性能，满足电子元件加工需求。清华大学材料科学与工程系在硬质合金微观结构优化方面具有较强科研实力，此次合作聚焦于提升硬质合金的精度和稳定性，以适应电子工业对高精度模具的需求。

## 1985 年，中国钨业协会（China Tungsten Industry Association, CTIA）成立

### 中国钨业协会成立背景与筹备

中国钨业协会的成立背景与中国钨工业的发展密切相关。20 世纪 80 年代初，中国作为世界上最大的钨资源国和生产国，钨储量占全球的 40% 以上，年产量占全球的 70% 左右，钨产品广泛应用于机械制造、采矿、航空航天等领域。然而，当时中国钨行业面临诸多挑战：企业分散、技术水平参差不齐、资源开发无序、出口竞争激烈、国际市场价格波动大。为解决这

#### 版权与免责声明

些问题，加强行业协调，推动技术进步和资源合理利用，成立一个全国性的行业组织成为当务之急。

1981年，冶金工业部（当时负责钨行业的管理）向国家经济委员会提交了《关于成立中国钨业协会的报告》。该报告详细分析了钨行业现状，指出成立行业协会的必要性，建议通过协会形式加强企业间协作，提升行业竞争力。1981年9月17日，国务院正式批准了这一建议，并指示由中国有色金属工业总公司牵头，联合冶金工业部、机械工业部、外贸部等相关部门共同筹备协会的成立。筹备期间，中国有色金属工业总公司组织了多次调研和会议，邀请了全国主要钨矿企业、加工企业、科研院所及设计单位参与讨论，制定了协会章程草案，并确定了协会的组织框架和目标。

### 中国钨业协会成立大会

中国钨业协会于1985年12月20日至25日在江西省南昌市召开了成立大会暨第一次会员代表大会。南昌作为中国钨资源大省江西的省会，且靠近赣州等重要钨产区，具有象征意义，因此被选为大会举办地。大会由中国有色金属工业总公司主办，来自全国的钨行业企业、科研机构、设计单位及相关政府部门的代表共计120余人参会。会议期间，与会代表审议并通过了《中国钨业协会章程》，选举产生了第一届理事会和领导机构。

第一届理事会由47名理事组成，中国有色金属工业总公司副总经理张健当选为首任会长，来自株洲硬质合金厂（即株洲601厂）、赣州钨矿等企业的代表担任副会长。大会还确定了协会的宗旨：促进中国钨工业的健康发展，维护行业和会员的合法权益，推动技术进步、资源节约和国际合作。会议期间，与会代表还就钨行业的技术改造、市场开拓、资源管理等问题进行了深入讨论，形成了多项行业发展建议。

### 中国钨业协会初期目标与活动

中国钨业协会成立之初，明确了多项工作目标。首先，协会致力于协调行业内企业间的关系，规范钨矿开采和加工秩序，减少恶性竞争。其次，协会通过组织技术交流和培训，推动钨行业的技术进步，例如推广先进的选矿技术和硬质合金生产工艺。此外，协会还积极参与国际钨市场的协调，代表中国钨行业与国际钨业相关组织对接，维护中国企业在国际市场的利益。

成立后不久，协会于1986年组织了第一次全国钨行业技术交流会，邀请了株洲601厂、赣州钨矿等企业的技术专家，分享了钨精矿选矿和硬质合金生产的新技术。1987年，协会协助政府制定了《钨行业管理办法（试行）》，为钨矿开采和出口提供了政策指导，初步规范了行业秩序。

### 中国钨业协会组织架构

中国钨业协会作为全国性、行业性、非营利性的社会团体，其会员由钨行业相关企业、科研机构、设计单位及社会组织自愿组成。协会设立了理事会作为最高决策机构，下设秘书处负责日常事务。秘书处最初设在南昌，后来根据行业管理需要迁往北京。协会还设立了多个专业委员会，包括技术委员会、市场委员会和资源管理委员会，分别负责技术交流、市场分析和资源保护等工作。

#### 版权与法律责任声明

## 中国钨业协会发展现状

截至 2025 年，中国钨业协会会员涵盖了钨矿开采、冶炼加工、硬质合金生产、科研开发等全产业链。会员单位包括中钨高新、包括下属的株洲硬质合金集团（原株洲 601 厂）、自贡硬质合金有限责任公司（原自贡 764 厂）、厦门钨业、江钨集团及其众多下属单位等行业龙头企业。协会在推动钨行业绿色发展和国际化方面发挥了重要作用，例如组织制定了多项行业标准，支持钨资源回收技术研发，并在国际钨市场上为中国企业争取话语权。

## 意义与影响

中国钨业协会的成立是中国钨工业发展的重要里程碑。协会的建立结束了行业长期缺乏统一协调的局面，为钨企业提供了一个沟通和协作的平台。通过协会的努力，中国钨行业在技术水平、市场竞争力、资源利用效率等方面取得了显著进步。同时，协会加强了与国际钨行业的联系，提升了中国钨工业的全球影响力，为行业可持续发展奠定了基础。

## 1985 年：厦门钨业成立

1985 年，厦门钨业在福建厦门成立，依托福建钨矿资源，开展硬质合金生产。福建是中国的钨资源大省，厦门钨业的成立进一步拓展了硬质合金产业的区域布局，推动了东南沿海地区的工业发展。

## 1987 年：涂层刀具出口

1987 年，株洲硬质合金厂推出涂层刀具，出口比例有所提升。涂层刀具的出口，主要面向东南亚市场，支持了当地制造业的发展，同时为中国硬质合金产业积累了外汇。

## 1990 年代：技术突破与产业扩张

1990 年代，株洲硬质合金厂与中南大学合作，研发超细晶硬质合金，应用于精密模具。中南大学在粉末冶金领域具有领先优势，此次合作推动了超细晶技术的产业化。1994 年，厦门钨业与日本京瓷合作，引进物理气相沉积（Physical vapor deposition, PVD）技术，开发涂层刀具，进一步提升了产品的耐高温性能。

## 1997 年：江钨集团成立

1997 年，江西钨业控股集团（江钨集团）成立，整合赣州钨矿资源，开展硬质合金生产。赣州是中国最大的钨矿产区，江钨集团的成立标志着江西钨产业链的整合和升级。

## 1998 年：厦门钨业技术开发

1998 年，厦门钨业开发新型硬质合金，应用于海洋工程，满足了海洋环境中对耐腐蚀材料的需求。

## 版权与法律责任声明

### 1999 年：回收技术

1999 年，株洲硬质合金厂与瑞典 Seco Tools 合作，开展回收技术研究，提升了钨资源的循环利用效率。

### 2000 年：株洲硬质合金产业园

2000 年，株洲硬质合金产业园初具规模，形成以株洲硬质合金厂为核心的产业集群，推动了区域经济发展。

### 2000-2020 年代：全球化与技术领先

#### 2002 年：加入 WTO

2002 年，中国加入世界贸易组织（WTO），株洲硬质合金厂（中钨高新）出口增长。同年，中钨高新整合株洲钻石切削刀具公司，增强数控刀片生产能力，满足汽车制造等高端领域的需求。

#### 2002 年：五矿集团与江西稀有稀土金属钨业集团公司开始合作

2002 年，五矿集团旗下五矿有色金属股份有限公司与江西稀有稀土金属钨业集团公司（江西钨业控股集团的前身）合作，组建了江西钨业集团有限公司。这一合资公司由双方共同控股，五矿有色持股比例为 51%，江西稀有稀土金属钨业集团公司持股 49%（根据赣州市政府网站信息）。合资公司总部设在江西赣州，业务涵盖钨矿开采、选矿、冶炼、深加工及贸易，整合了江西省内多个钨矿资源和加工企业，形成了一个较为完整的产业链。此次合作是五矿集团进入江西钨行业的重要一步，符合当时国家推动央地合作的政策导向。

#### 2005 年：厦门钨业技术突破

2005 年，厦门钨业开发超细晶刀具，应用于光伏领域，支持了光伏产业的快速发展。

#### 2008 年：金融危机下的出口

2008 年，全球金融危机背景下，中国硬质合金出口保持增长，体现了产业的国际竞争力。

#### 2010-2015 年：技术与回收

2010 年，中钨高新与北京科技大学合作，研发纳米级硬质合金，应用于精密加工。厦门钨业推出 PVD 涂层刀具，出口比例提升。2012 年，江钨集团开发新型硬质合金，应用于航空领域。2013 年，江钨集团推广生物浸出法，提升回收效率。2015 年，赣州建成钨循环经济基地，推动资源循环利用。

#### 区域集群

2010 年，株洲硬质合金产业园发展迅速。2015 年，赣州依托江钨集团，建成高端刀具生产线。2016 年，厦门钨业在韩国设立二次资源回收基地，年产 1500 吨氧化钨。2018 年，厦门成为刀具出口中心。

#### 版权与免责声明

## 2020 年代至今：绿色智能与全球领导

### 2020-2024 年：绿色智能发展

2020 年，“十四五”规划支持硬质合金行业发展。

2021 年，中钨高新开发增材制造技术。

2022 年，厦门钨业九江钨产业链深加工项目开工。

2023 年，厦门钨业引入人工智能优化生产，中钨高新研发高熵硬质合金。

2024 年，江钨集团启动赣州硬质合金项目，计划 2025 年投产。厦门钨业在泰国设立合金生产基地，株硬集团超细碳化钨智能生产线投产。

### 资源整合

2020 年起，江铜集团通过其关联公司参与开发哈萨克斯坦巴库塔钨矿，2024 年项目进展显著。巴库塔钨矿位于哈萨克斯坦阿拉木图地区延别克什卡扎赫区，距离阿拉木图市约 150 公里，靠近中哈霍尔果斯港，交通便利。矿区面积 1.16 平方公里，最大开采深度 300 米，采矿权期限自 2015 年 6 月 2 日起至 2040 年 6 月 2 日止。截止 2024 年 6 月 30 日，矿石储量 7080 万吨，平均品位 0.205%  $WO_3$ ，相当于 14.54 万吨  $WO_3$ ；总资源量 1.104 亿吨，含  $WO_3$  约 23.32 万吨。项目总投资约 2.7 亿美元（约 18.922 亿元人民币），第一期处理能力 1 万吨/天，后期升级至 1.5 万吨/天，预计 2025 年第一季度投产，年产 65%  $WO_3$  精矿约 1.5 万吨，占全球产量的约 10%。该项目由江铜集团、恒兆国际、中国铁路建设集团和中国土木工程集团合作开发，股权结构中恒兆持股 43.35%，江铜香港持股 41.65%，中国铁路建设集团持股 15%，预计创造约 1000 个就业岗位，合同金额 13.28 亿元人民币。

2024 年，中钨高新收购湖南柿竹园钨矿，储量 56 万吨。江钨集团控股安源煤业，厦门钨业与日本三菱材料合作。

### 区域协同

2020 年，株洲硬质合金产业园持续发展。

2024 年，赣州钨产业链整合，厦门刀具出口持续增长。

## 1.3 硬质合金与传统材料的对比

硬质合金在硬度、耐磨性、韧性和环境适应性上显著优于传统材料，并与新型材料在特定领域形成竞争优势。本节通过量化性能参数、应用场景和生命周期分析，对比硬质合金与高强钢、陶瓷、立方氮化硼（CBN）、多晶金刚石（PCD），阐明其独特优势。

### 1.3.1 与高强钢、陶瓷的性能差异

高强钢（如 AISI 4340）经过淬火回火处理，抗拉强度约 1100-1300 MPa（ITIA 2024 年报告），硬度 HV 400-500，磨损率约  $0.5 \text{ mm}^3/\text{N m}$ ，热膨胀系数  $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，成本较低，适合结构件制造。但在高温下性能下降， $600^\circ\text{C}$  时硬度降至 HV 200-250（Journal of Materials Science 2025）。硬质合金（如 WC-6%Co）硬度 HV 1800-2200，磨损率  $0.06-0.08 \text{ mm}^3/\text{N m}$ ，热膨胀系数  $4.5-5.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，抗压强度 3500-4000 MPa， $1000^\circ\text{C}$  时保持 HV 900-1000（中

#### 版权与免责声明

国有色金属学报 2024)。例如，中钨高新（China Tungsten High-Tech）2024 年年报显示，其生产的 WC-6%Co 采矿钻头在花岗岩钻进中寿命达 1800-2000 米，而 AISI 4340 高强度钻头寿命约 300-400 米，硬质合金寿命提高约 4-5 倍。硬质合金低热膨胀系数减少加工变形，适用于精密模具（公差 $<0.01\text{ mm}$ ）。

陶瓷（如氧化铝  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）硬度 HV 1800-2000，耐温  $1200^\circ\text{C}$ ，热导率  $25\text{-}30\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，适合高温切削，但断裂韧性  $3\text{-}5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，抗冲击性差，易崩裂（ITIA 2024）。硬质合金韧性  $8\text{-}15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，热导率  $80\text{-}100\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，抗热震性更强。例如，厦门钨业（Xiamen Tungsten）2024 年年报显示，其 PVD TiAlN 涂层 WC-Co 刀具在高速铣削（ $200\text{ m/min}$ ）中，抗崩裂率较未涂层刀具提高约 50%-60%。

### 1.3.2 与新型材料的对比

立方氮化硼（CBN）硬度 HV 4000-5000，热导率  $150\text{-}200\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，适合切削高温合金（如 Inconel 718），切削速度达  $250\text{-}300\text{ m/min}$ ，但断裂韧性  $4\text{-}6\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，抗冲击性较弱（ITIA 2024）。多晶金刚石（PCD）硬度 HV 7000-8000，磨损率  $0.01\text{-}0.02\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ，适合非铁金属（如铝合金）加工，但耐温性差， $>700^\circ\text{C}$  硬度下降约 40%-50%（Journal of Materials Science 2025）。硬质合金通过 PVD TiAlN 涂层（硬度 HV 2500-3000）接近 CBN 性能，抗压强度  $3500\text{-}4000\text{ MPa}$  优于 PCD（约  $3000\text{ MPa}$ ），适合深海钻探（压力 $>100\text{ MPa}$ ）。

应用场景上，CBN 和 PCD 在超精密加工（如光学镜片，表面粗糙度 $<0.01\text{ }\mu\text{m}$ ）有优势，但硬质合金多功能性更广。例如，江钨集团（Jiangxi Tungsten）2024 年年报显示，其 TaC-WC-Co 硬质合金喷嘴在航空燃气轮机中耐温  $1200^\circ\text{C}$ ，寿命约 4000-5000 小时，而 PCD 喷嘴寿命约 1500-2000 小时。硬质合金 PVD 涂层技术降低化学磨损，切削钢材效率较未涂层提升约 20%-30%（中国有色金属学报 2024）。

### 1.3.3 在极端环境下的优势

硬质合金在高温、高压、腐蚀等极端环境中表现优异。在  $1000^\circ\text{C}$ ，WC-6%Co 硬质合金保持 HV 900-1000，高强度（AISI 4340）降至 HV 200-250，陶瓷虽耐高温但断裂韧性低（ $3\text{-}5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）易崩裂。含 Ni 黏结相的硬质合金（如 Co-Ni-Cr）在盐雾环境中腐蚀速率 $<0.1\text{ mm/年}$ ，海洋工程（如厦门钨业阀门）寿命 $>5$  年，而 AISI 4340 高强度约 1-2 年（厦门钨业 2024 年报）。在深海钻探（5000 米水深，压力约  $50\text{ MPa}$ ），硬质合金钻头寿命达 800-1000 小时，高强度约 150-200 小时（ITIA 2024）。

硬质合金绿色优势显著。2024 年全球硬质合金回收率约 25%-30%，中国达 35%-40%（ITIA 2024），中钨高新回收约 2000-2200 吨（中钨高新 2024 年报）。高强度回收率约 85%-90%但能耗高，陶瓷回收率 $<10\%$ ，CBN 和 PCD 回收复杂。硬质合金生命周期符合“双碳”目标（中国有色金属学报 2024）。2025 年，中钨高新通过增材制造优化 WC-Co 刀具设计，提升耐用性（中钨高新 2024 年报）。

## 1.4 硬质合金与钨钢的对比

硬质合金（WC-Co 复合材料）与钨钢（含钨的高速钢或工具钢）在材料组成、微观结构、

#### 版权与法律责任声明

性能参数和制造工艺上存在显著差异。本节通过量化数据和科学分析，详细对比两者的特性，突出硬质合金在硬度、耐磨性和高温稳定性上的优势，以及钨钢在韧性和加工灵活性上的特点，聚焦材料和性能，不涉及经济或应用层面。

#### 1.4.1 材料组成与微观结构

硬质合金以碳化钨（WC，质量分数 70%-94%）为硬质相，钴（Co，6%-20%）或镍（Ni）为黏结相。WC 呈六方晶系（P6m2 空间群， $a=2.906 \text{ \AA}$ ， $c=2.837 \text{ \AA}$ ），硬度 HV 2200-2500，Co 为面心立方结构（FCC），接触角约  $5^\circ-10^\circ$ （中国有色金属学报 2024）。微观结构由 WC 颗粒（晶粒 0.2-5 微米）嵌入 Co 基体，致密度  $>98\%-99\%$ 。扫描电镜（SEM）和透射电镜（TEM）显示，WC-Co 界面强度  $>40-50 \text{ MPa}$ ，Co 偏析  $<5\%$ （Journal of Materials Science 2025）。添加 TiC 或 TaC（3%-10%）增强抗氧化性， $1200^\circ\text{C}$  氧化增重  $<0.1 \text{ mg/cm}^2$ （中钨高新 2024 年报）。X 射线衍射（XRD）确认 WC(001) 晶面取向优化，晶界能约  $0.8-1 \text{ J/m}^2$ 。钨钢是含钨（W，5%-18%）的合金钢，如高速钢 HSS M2（含 6%W、5%Mo、4%Cr）或工具钢，基体为铁（Fe）-碳（C，0.8%-1.2%）合金，呈体心立方（BCC）或马氏体结构。钨以固溶态或碳化物（ $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ ）存在，晶粒尺寸 10-30 微米。SEM 分析显示，碳化物分布不均，偏析率 5%-15%，界面强度约 20-30 MPa（Journal of Materials Science 2025）。钨钢共价键强度约 400-450 kJ/mol，低于 WC（600-700 kJ/mol），硬度 HV 600-800。硬质合金复合结构赋予低热膨胀系数（ $4.5-5.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ），优于钨钢（ $11-12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ），减少高温变形。钨钢韧性（ $K_{1c} 20-25 \text{ MPa m}^{1/2}$ ）高于硬质合金（ $8-15 \text{ MPa m}^{1/2}$ ）。

#### 1.4.2 性能参数对比

硬质合金（WC-6%Co）硬度 HV 1800-2200，磨损率  $0.06-0.08 \text{ mm}^3/\text{N m}$ ，抗压强度 3500-4000 MPa，热导率  $80-100 \text{ W/m K}$ ，热膨胀系数  $4.5-5.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。在  $1000^\circ\text{C}$  保持 HV 900-1000，含 Co-Ni-Cr 黏结相的硬质合金盐雾失重  $<0.1 \text{ mg/cm}^2$ （中国有色金属学报 2024）。钨钢硬度 HV 600-800，磨损率  $0.4-0.5 \text{ mm}^3/\text{N m}$ ，抗压强度 1500-2000 MPa，热导率  $20-30 \text{ W/m K}$ ，热膨胀系数  $11-12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ， $600^\circ\text{C}$  硬度降至 HV 350-400，腐蚀速率约  $0.5-1 \text{ mg/cm}^2$ 。

硬质合金耐磨性约钨钢 6-8 倍，抗压强度高 1.8-2 倍，适合高压环境（ $>100 \text{ MPa}$ ）。热性能上，硬质合金  $1200^\circ\text{C}$  氧化增重  $<0.1 \text{ mg/cm}^2$ ，抗热震循环  $>100$  次无裂纹；钨钢  $800^\circ\text{C}$  氧化增重约  $0.8-1 \text{ mg/cm}^2$ ，热冲击循环 50-60 次出现微裂纹。硬质合金循环疲劳强度（ $>1800-2000 \text{ MPa}$ ， $10^7$ 次）优于钨钢（ $900-1000 \text{ MPa}$ ， $10^7$ 次）（中钨高新 2024 年报）。

#### 1.4.3 制造工艺特性

硬质合金采用粉末冶金工艺：WC 和 Co 粉末（粒径 0.5-5 微米）球磨（24-48 小时）、压制（50-100 MPa）、液相烧结（ $1320-1400^\circ\text{C}$ ，真空度  $10^{-3} \text{ Pa}$ ），致密度  $>98\%$ 。热等静压（HIP， $120-150 \text{ MPa}$ ， $1350-1400^\circ\text{C}$ ）消除孔隙，硬度提升 5%-10%（中钨高新 2024 年报）。工艺需控制温度（ $\pm 5^\circ\text{C}$ ）和 Co 含量（ $\pm 0.5\%$ ），实现亚微米晶粒（0.2-1 微米）。钨钢通过电弧炉熔炼（ $1600-1800^\circ\text{C}$ ）、铸锭、热轧/锻造（ $1100-1200^\circ\text{C}$ ）、热处理（淬火  $850^\circ\text{C}$ ，

回火 500-600°C) 制备, 碳化物分布不均, 晶粒尺寸 10-30 微米。热处理优化硬度和韧性, 但碳化物偏析 (5%-15%) 影响一致性 (Journal of Materials Science 2025)。

#### 1.4.4 环境适应性与回收特性

硬质合金含 Ni 黏结相 (如 Co-Ni-Cr) 在盐雾环境中腐蚀速率 <0.1 mm/年, 1200°C 抗氧化性强。钨钢腐蚀速率约 0.5-1 mm/年, 800°C 以上氧化明显。硬质合金热导率 (80-100 W/m·K) 和低热膨胀系数 ( $4.5-5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) 确保抗热震性, 适合高温高压环境 (>1000°C, >100 MPa)。钨钢热导率 (20-30 W/m·K) 和高热膨胀系数 ( $11-12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) 导致热变形。

回收方面, 硬质合金通过锌熔法回收率达 90%-95%, 2024 年中国回收率 35%-40% (ITIA 2024)。钨钢回收率约 85%-90%, 熔炼重铸但钨损失 5%-10%。硬质合金回收更高效, 符合低碳目标 (中钨高新 2024 年报)。

#### 1.4.5 综合性能比较

硬质合金在硬度、耐磨性、高温稳定性、耐腐蚀性和抗压强度上优于钨钢, PVD TiAlN 涂层 (HV 2500-3000) 提升性能, 适合极端工况。钨钢韧性 ( $K_{1c}$  20-25 MPa  $\text{m}^{1/2}$ ) 和加工灵活性强, 适合低负荷加工, 但硬度 (HV 600-800) 和耐磨性不足。2025 年, 中钨高新纳米 WC-Co (晶粒 0.05-0.1 微米) 进一步优化性能 (中钨高新 2024 年报)。

#### 参考文献

- 中钨高新材料股份有限公司. 2024 年度报告.
- 厦门钨业股份有限公司. 2024 年度报告.
- 中钨在线. 2024 年钨市场动态. [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)
- 中钨智造. 2024 年公司概况与产品介绍. [ctia.group](http://ctia.group)
- 中国钨业协会. 2024 年中国钨工业发展大会报告. [www.ctia.net.cn](http://www.ctia.net.cn)
- 国家发展和改革委员会. 2021. “十四五”规划纲要. [www.ndrc.gov.cn](http://www.ndrc.gov.cn)
- 国家档案局. 1958. 株洲硬质合金厂建设档案. 北京: 国家档案局
- 中国有色金属学报. 1965-2024. 多期文章. [www.cnki.net](http://www.cnki.net)
- 稀有金属材料与工程. 2023-2024. 多期文章. [www.cnki.net](http://www.cnki.net)
- USGS. 2025. Mineral Commodity Summaries: Tungsten. [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)
- 美国地质调查局. 2025. 钨矿物概要.
- ITIA. 2024. Tungsten Recycling Report. [www.itia.info](http://www.itia.info)
- 国际钨协会. 2024. 钨回收报告.
- Journal of Materials Science. 2024-2025. [www.springer.com](http://www.springer.com)
- 材料科学杂志. 2024-2025.
- Journal of Alloys and Compounds. 2025. [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)
- 合金与化合物杂志. 2025.
- Royal Society Proceedings. 1868. London: Royal Society.
- 皇家学会会议记录. 1868. 伦敦: 皇家学会.
- Annalen der Chemie. 1875. Leipzig: Wiley-VCH.
- 化学年鉴. 1875. 莱比锡: Wiley-VCH.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft. 1900. Berlin: Wiley-VCH.

德国化学学会报告. 1900. 柏林: Wiley-VCH.

Osram Technical Report. 1908. Berlin: Osram GmbH.

欧司朗技术报告. 1908. 柏林: 欧司朗公司.

Krupp Archives. 1912-1943. Essen: ThyssenKrupp AG.

克虏伯档案. 1912-1943. 埃森: 蒂森克虏伯公司.

Krupp Technical Bulletin. 1925. Essen: Krupp AG.

克虏伯技术简讯. 1925. 埃森: 克虏伯公司.

Farben Technical Report. 1931. Frankfurt: I.G. Farben.

法本技术报告. 1931. 法兰克福: I.G. 法本公司.

Sandvik Coromant History. 1932-2003. Sandviken: Sandvik AB.

山特维克可乐满历史. 1932-2003. 桑德维肯: 山特维克公司.

US Patent. 1896-1936. Washington, D.C.: USPTO.

美国专利. 1896-1936. 华盛顿特区: 美国专利商标局.

Kennametal Technical Report. 1953. Latrobe: Kennametal Inc.

肯纳金属技术报告. 1953. 拉特罗布: 肯纳金属公司.

Seco Tools Patent. 1965. Fagersta: Seco Tools AB.

赛科工具专利. 1965. 法格斯塔: 赛科工具公司.

Mitsubishi Materials Report. 1975. Tokyo: Mitsubishi Materials Corp.

三菱材料报告. 1975. 东京: 三菱材料公司.

Plansee Technical Bulletin. 1983. Reutte: Plansee Group.

普兰西技术简讯. 1983. 罗伊特: 普兰西集团.

Sandvik Sustainability Report. 1990. Sandviken: Sandvik AB.

山特维克可持续发展报告. 1990. 桑德维肯: 山特维克公司.

Journal of Biomedical Materials Research. 1985. Hoboken: Wiley.

生物医学材料研究杂志. 1985. 霍博肯: Wiley.

Additive Manufacturing Journal. 2012. Amsterdam: Elsevier.

增材制造杂志. 2012. 阿姆斯特丹: Elsevier.

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

微信：关注“中钨在线”



## 附录：

### 硬质合金的英文名称翻译法及其应用

硬质合金作为一种由硬质相（如碳化钨）和粘结相（如钴）组成的复合材料，在英文中有多种翻译或称呼方式，具体取决于上下文、行业标准或技术领域的习惯。以下是硬质合金的英文名称及其翻译法的详细整理，涵盖常见术语、应用场景及细微差异。

#### 硬质合金的英文名称翻译法

##### 1. 硬质合金的英文名称-Hardmetal

定义：最标准的英文名称，广泛用于国际标准（如 ISO 513、ASTM B886）和学术文献，指由硬质碳化物（如 WC、TiC）和金属粘结剂（如钴、镍）组成的材料。使用场景：

工业标准：ISO 3326 (Hardmetals – Determination of magnetic saturation of cobalt)、GB/T 3849。

学术研究：ScienceDirect 文章常称“hardmetals”用于刀具、模具。

特点：强调材料的复合性质（硬质相+金属粘结相），通用性强，适用于全球硬质合金行业。

例句：Hardmetals are widely used in cutting tools due to their high hardness and wear resistance.

##### 2. Cemented Carbide

定义：常见翻译，突出硬质碳化物（如 WC）通过金属粘结剂（如钴）“胶结”成型的特性，常用于北美和欧洲技术文献。使用场景：

ASTM 标准：ASTM B886(Standard Test Method for Determination of Magnetic Saturation of Cemented Carbides)。

行业术语：北美刀具制造商（如 Kennametal、Sandvik）常用。

特点：强调“胶结”工艺（cementation），即烧结过程中金属粘结剂将碳化物颗粒结合。

与 Hardmetal 含义相同，但更常见于美国标准和企业宣传。

例句：Cemented carbides are preferred for machining due to their toughness and durability.

##### 3. Tungsten Carbide

定义：特指以碳化钨（WC）为主要硬质相的硬质合金，常用于非技术性或非简化描述，但严格来说不够全面（未涵盖其他碳化物或粘结剂）。使用场景：

商业和市场：如刀具、钻头、珠宝（钨钢戒指）宣传中常见。

科普文章：Wikipedia 常以“Tungsten Carbide”介绍硬质合金。

特点：仅指 WC 基硬质合金，未涵盖含 TiC、TaC 等其他碳化物的合金。

在非专业场合（如消费者市场）用作硬质合金的代名词。

局限性：不够精确，因硬质合金可能包含非钨基碳化物（如 TiC）或多种粘结剂。

例句：Tungsten carbide tools are known for their extreme hardness.

#### 版权与免责声明

#### 4. Carbide

定义：简化称呼，泛指硬质合金，省略“cemented”或“tungsten”，在行业内部或口语中常见。使用场景：

刀具行业：工人或工程师常简称“carbide tools”或“carbide inserts”。

技术文档：如 Sandvik 产品手册中提到“carbide grades”。

特点：简洁，但可能引起歧义，因“carbide”也指其他碳化物（如碳化钙  $\text{CaC}_2$ ）。

需结合上下文明确指硬质合金。

例句：Carbide inserts improve machining efficiency in steel processing.

#### 5. Widiametal（较少见）

定义：早期欧洲（尤其是德国）使用的术语，源自“Widia”（Wie Diamant，意为“如钻石”），为硬质合金的商品名。使用场景：

历史文献：德国克虏伯公司（Krupp）1920 年代首次商业化硬质合金，命名为 Widia。

欧洲部分地区：仍偶见于老技术文档或传统企业。

特点：强调硬质合金的高硬度（接近钻石），但现已较少使用，被 Hardmetal 或 Cemented Carbide 取代。

仅限特定历史或品牌背景。

例句：Widiametal was a breakthrough in early cutting tool technology.

#### 6. Sintered Carbide（较少见）

定义：强调硬质合金通过粉末冶金烧结（sintering）工艺制成，突出制造过程。使用场景：

学术研究：描述硬质合金生产工艺时使用。

技术手册：如烧结工艺说明中。

特点：与 Cemented Carbide 含义相近，但更聚焦烧结过程。

使用频率低于 Hardmetal 和 Cemented Carbide。

例句：Sintered carbide components exhibit excellent wear resistance.

#### 7. 其他非标准翻译

##### Tungsten Steel

错误翻译，常见于非专业场合（如电商平台）。硬质合金不是钢（steel），而是碳化物金属复合材料。

例：珠宝行业误称“tungsten steel rings”，实为钨基硬质合金。

##### Hard Alloy

直译自中文“硬质合金”，在英文中极少使用，可能出现在中式英语文献，但不规范。

例：Hard alloy is not a standard term in English technical literature.

### 硬质合金英语名称翻译法对比与选择建议

英文名称	适用场景	优点	局限性
Hardmetal	国际标准、学术研究、全球行业	通用性强，标准术语	无明显局限
Cemented Carbide	北美标准、刀具行业、技术文档	强调胶结工艺，广泛认可	略冗长
Tungsten Carbide	商业宣传、科普、消费者市场	简洁，易被非专业人士理解	不够全面，忽略其他碳化物和粘结剂
Carbide	行业口语、刀具制造	简洁，行业内通用	可能引起歧义（与其他碳化物混淆）
Widiametal	历史文献、欧洲传统企业	历史意义，品牌特有	已过时，现代少用
Sintered Carbide	学术研究、工艺描述	突出烧结工艺	使用频率低
Tungsten Steel	非专业市场（如珠宝）	无（错误术语）	不准确，易误导
Hard Alloy	中式英语文献	无（非标准）	不规范，国际不认可

#### 选择建议：

正式场合（标准、论文、国际交流）：使用 **Hardmetal** 或 **Cemented Carbide**，因其符合 ISO、ASTM、GB/T 标准，通用性强。

行业内部（刀具、模具制造）：**Carbide** 简洁，适合口语或产品命名，但需确保上下文明确。

商业宣传（面向消费者）：**Tungsten Carbide** 更易被非专业人士理解，但应注明其为硬质合金。

避免使用：**Tungsten Steel** 和 **Hard Alloy**，因其不准确或不规范。

#### 数据与支持

标准依据：ISO 3326:2013 和 ASTM B88624 使用 “Hardmetal” 和 “Cemented Carbide”（ISO 官网、ASTM 官网）。

GB/T 38492015 采用 “硬质合金”，英文翻译为 “Hardmetal”（中国国家标准查询网）。

行业实践：全球刀具企业（如 Sandvik、Kennametal）产品目录多用 “Cemented Carbide” 或 “Carbide”。

Wikipedia 条目 “Tungsten Carbide” 注明其为硬质合金子集（Wikipedia, 2005）。

学术文献：ScienceDirect 文章多用 “Hardmetals” 或 “Cemented Carbides” 描述 WCCo 合金（ScienceDirect, 2020）。

历史背景：“Widia” 源于 1920 年代德国克虏伯公司，现代已少用。

硬质合金的英文名称主要包括 **Hardmetal**、**Cemented Carbide**、**Tungsten Carbide** 和 **Carbide**，其中 **Hardmetal** 和 **Cemented Carbide** 是最标准的术语，广泛用于国际标准和行业交流。**Tungsten Carbide** 适合商业宣传，但不够全面；**Carbide** 简洁但需注意歧义。**Widiametal** 和 **Sintered Carbide** 较少见，仅限特定历史或工艺场景。应避免使用 **Tungsten Steel** 和 **Hard Alloy**，因其不准确。选择英文名称时，应根据上下文（学术、工业、商业）选用最合适的术语。

#### 版权与免责声明



附录：

## 我国早期主要的硬质合金企业及现状简介

### 1. 株洲 601 厂（株洲硬质合金厂）

#### 由来与建设历史

株洲 601 厂，即株洲硬质合金厂（现为株洲硬质合金集团有限公司，隶属中钨高新），成立于 1954 年，位于湖南株洲，是中国硬质合金工业的起点。该厂是国家“一五”计划（1953-1957 年）期间 156 个重点项目之一，被誉为“中国硬质合金工业的摇篮”。其建立的背景是新中国成立初期工业基础薄弱，硬质合金作为战略材料主要依赖进口。为改变这一局面，国家选择在湖南株洲建厂，依托当地丰富的钨矿资源（如柿竹园多金属矿）和便利的交通条件（株洲地处湘江中游，铁路交通发达）。

#### 名称编号意义与由来

“601”编号源于新中国成立初期工业企业的保密命名规则。当时，为保障国防工业和重点项目的保密性，国家对许多工厂采用编号而非直接名称。“601”属于冶金工业部（后并入机械工业部）管辖下的序列编号，具体表示“第六冶金工业部第一厂”。“6”代表冶金工业，“01”则表明其为该系统内的第一个重点项目，体现了株洲硬质合金厂作为中国硬质合金工业开端的特殊地位。

#### 建设与发展

株洲 601 厂在建厂初期引进了苏联技术，采用粉末冶金工艺生产以碳化钨-钴（WC-Co）为主的硬质合金，主要用于采矿和切削工具。1958 年，“一五”计划收官，株洲厂扩建厂房，优化生产流程，生产的硬质合金钻头开始满足地质勘探需求。1960 年，该厂与北京有色金属

#### 版权与免责声明

研究院合作，开发含碳化钛（TiC）的硬质合金，应用于石油钻井领域。1960年代，尽管受文化大革命影响，株洲厂通过自力更生优化配方，维持了机械加工领域的供应。1970年，国家启动“704工程”，株洲厂进一步扩建，产量有所提升。1978年改革开放后，“六五”计划（1981-1985）期间，株洲厂引进了瑞典 Sandvik 涂层技术，开发氮化钛（TiN）涂层刀具，显著提升了切削性能。

### 主要特色

株洲 601 厂是中国硬质合金工业的发源地，奠定了行业基础。其特色在于：

**技术引进与创新：**从苏联技术起步，后期通过与清华大学、中南大学等合作，研发超细晶和纳米级硬质合金，应用于精密加工领域。

**产业集群效应：**2000年，株洲硬质合金产业园初具规模，形成以株洲厂为核心的产业集群，推动区域经济发展。

**应用广泛：**产品覆盖采矿、机械加工、国防、电子工业等领域，20世纪80年代起出口东南亚，2002年加入WTO后出口进一步增长。

### 现状

株洲硬质合金厂现为中钨高新材料股份有限公司的核心企业，是中国最大的硬质合金生产基地之一。2024年，中钨高新收购湖南柿竹园钨矿（储量56万吨），增强了原料自给能力。公司继续专注于高熵硬质合金和增材制造技术的研发，产品广泛应用于航空航天、汽车制造等领域，同时积极推进绿色制造和智能生产。

## 2. 自贡 764 厂（自贡硬质合金厂）

### 由来与建设历史

自贡 764 厂，即自贡硬质合金厂（现为自贡硬质合金有限责任公司），成立于1965年，位于四川省自贡市。自贡作为中国著名的盐业城市，拥有悠久的工业历史，尤其是盐井钻探技术为其硬质合金工业的发展提供了基础。自贡 764 厂的建立正值国家“三线建设”时期，目的是在西南地区建立战略后方工业基地，以应对冷战时期的潜在威胁。

### 名称编号意义与由来

“764”编号是“三线建设”时期典型的保密命名方式。“7”通常代表机械工业部管辖下的企业，“6”可能表示西南地区的区域代码，“4”则为该区域内的工厂序列号。这种编号方式旨在隐藏工厂的真实用途和地理位置，以确保战时安全。自贡 764 厂的编号反映了其作为机械工业部在西南地区布局的重要硬质合金生产基地的地位。

### 与株洲 601 厂的关系

自贡 764 厂在硬质合金生产技术与株洲 601 厂存在间接联系。作为行业先驱，株洲 601 厂在 20 世纪 60 年代通过国家技术扩散项目，向包括自贡 764 厂在内的“三线”企业输出工艺标准和生产经验。自贡 764 厂在建厂初期采用的粉末冶金工艺，与株洲 601 厂的技术体系一脉相承。此外，两厂在国家钨资源调配和行业协作中形成互补，株洲 601 厂的技术创新为自贡 764 厂提供了发展基础，而自贡 764 厂则通过区域资源优势，补充了株洲 601 厂在西南地区的产业布局。

#### 版权与法律责任声明

## 建设与发展

自贡 764 厂初期主要生产采矿和地质勘探用硬质合金工具，依托自贡丰富的天然气资源（用于烧结燃料）和四川的钨矿资源。20 世纪 70 年代，随着国家对硬质合金需求的增加，自贡厂逐步扩展了产品线，包括切削工具和耐磨零件。1980 年代，改革开放后，自贡厂开始与国外企业合作，引进先进设备和技术，提升了产品质量。

## 主要特色

自贡 764 厂以其在采矿和地质勘探领域的硬质合金产品而闻名，特色包括：

**资源优势：**自贡地区的天然气资源为硬质合金烧结提供了廉价能源，降低了生产成本。

**区域影响力：**作为西南地区重要的硬质合金生产基地，自贡厂的产品广泛应用于四川、云南等地的矿业开发。

**技术进步：**20 世纪 90 年代，自贡厂开发了高性能硬质合金棒材和板材，满足了非标切削工具的需求。

## 现状

自贡硬质合金有限责任公司现已成为中国硬质合金行业的重要企业之一，隶属于中国五矿集团。公司专注于硬质合金棒材、板材和切削工具的生产，产品应用于采矿、石油钻探和机械加工领域。自贡市也成为中国硬质合金产业的重要基地之一，延续了其在西南地区的工业传统。

## 株洲 601 厂与自贡 764 厂的关系分析

### 历史背景与行业定位

株洲 601 厂（株洲硬质合金厂）成立于 1954 年，是中国硬质合金工业的起点，被誉为“中国硬质合金工业的摇篮”。作为国家“一五”计划的重点项目，株洲 601 厂在硬质合金领域具有技术领先地位，掌握了从苏联引进的粉末冶金工艺，并通过与国内科研机构合作不断创新。自贡 764 厂（自贡硬质合金厂）成立于 1965 年，正值“三线建设”时期，是西南地区的重要硬质合金生产基地。自贡 764 厂依托四川的钨矿资源和天然气能源，专注于采矿和地质勘探用硬质合金工具的生产。

### 技术与资源联系

株洲 601 厂作为行业先驱，在硬质合金生产技术、工艺标准和设备研发方面积累了丰富的经验。20 世纪 60 年代，随着“三线建设”的推进，国家鼓励重点企业向内陆地区输出技术，以支持新建工厂的发展。自贡 764 厂在建厂初期，很大程度上受益于株洲 601 厂的技术扩散。例如，株洲 601 厂研发的碳化钨-钴（WC-Co）硬质合金生产工艺，成为行业标准，而自贡 764 厂在生产采矿工具时采用了类似的粉末冶金工艺，这表明两厂在技术体系上存在传承关系。

## 3. 南昌 603 厂（南昌硬质合金厂）

### 由来与建设历史

#### 版权与法律责任声明

南昌 603 厂，即南昌硬质合金厂（现为南昌硬质合金有限责任公司），成立于 1966 年，位于江西省南昌市，是“三线建设”时期建立的另一重要硬质合金生产基地。江西省是中国钨资源最丰富的省份之一，拥有赣州等地的优质钨矿资源。南昌 603 厂的建立旨在利用这一资源优势，为国家工业和国防建设提供硬质合金材料。

### 名称编号意义与由来

“603”编号同样遵循“三线建设”时期的保密命名规则。“6”可能延续自冶金工业部的编号序列（株洲 601 厂的“6”即为此意），而“03”则表示其为该系统内的第三个重点项目。南昌 603 厂的编号反映了其在冶金工业体系中的重要地位，同时也体现了“三线建设”时期对江西这一内陆省份的战略布局。

### 建设与发展

南昌 603 厂初期主要生产采矿用硬质合金工具，如凿岩钻头和掘进刀具，支持江西及周边地区的矿山开发。1970 年代，工厂开始研发切削刀具，满足机械加工行业的需求。1980 年代，随着改革开放的推进，南昌厂引进了国外设备，开发了高性能硬质合金产品。

### 主要特色

南昌 603 厂以其在采矿和机械加工领域的应用而著称，特色包括：

**资源依托：**江西钨矿资源为南昌厂提供了稳定的原料供应，降低了生产成本。

**产品多样性：**从采矿工具到切削刀具，南昌厂逐步扩展了产品线，满足了多种工业需求。

**技术合作：**20 世纪 90 年代，南昌厂与国内高校合作，研发了耐腐蚀硬质合金，应用于化工设备领域。

### 现状

南昌硬质合金有限责任公司现隶属于中国五矿集团，是江西省重要的硬质合金生产企业。公司继续专注于采矿工具和切削刀具的生产，同时开发新型硬质合金材料，应用于航空航天和化工领域。南昌厂在江西钨产业链中扮演重要角色。

## 4. 牡丹江 212 厂（牡丹江硬质合金厂）

### 由来与建设历史

牡丹江 212 厂，即牡丹江硬质合金厂，成立于 1969 年，位于黑龙江省牡丹江市，是“三线建设”时期在东北地区布局的硬质合金生产基地之一。牡丹江 212 厂的建立旨在支持东北老工业基地的振兴，同时为国防工业提供硬质合金材料。牡丹江地处东北，靠近中苏边境（距离符拉迪沃斯托克约 248 公里），其战略位置使其成为“三线建设”中的重要选址。1960 年代中期，随着中苏关系恶化和冷战紧张局势加剧，中国启动了“三线建设”，将工业基地向内地和边远地区转移，牡丹江因其铁路网络和矿业资源优势被选中建设硬质合金厂。

### 名称编号意义与由来

“212”编号是“三线建设”时期东北地区的典型命名方式。“2”可能代表东北地区的区域代码，“12”则为该区域内的工厂序列号。这种编号方式旨在隐藏工厂的真实用途，保护国防工业安全。牡丹江 212 厂的编号表明其为东北地区硬质合金生产的重要一环，与其支持国防工业的

#### 版权与法律责任声明

使命相符。

### 建设与发展

牡丹江 212 厂初期主要生产采矿和地质勘探用硬质合金工具，服务于黑龙江和吉林等地的矿业开发。1970 年代，工厂开始研发军用硬质合金零件，如坦克履带耐磨件和弹头材料，支持国防建设。1980 年代，随着改革开放的推进，牡丹江厂逐步转向民用市场，开发切削刀具和耐磨零件，进一步扩展了产品线。

### 主要特色

牡丹江 212 厂以其在国防和采矿领域的应用而闻名，特色包括：

**国防贡献：**1970 年代，牡丹江厂生产的硬质合金零件广泛应用于军工产品，支持了国防建设。

**地理优势：**牡丹江地处东北，靠近俄罗斯边境，便于与苏联及后来的俄罗斯开展技术交流。

**产品耐寒性：**针对东北寒冷气候，牡丹江厂研发的硬质合金工具具有较强的低温韧性，适应极端环境。

### 现状

牡丹江硬质合金厂现已并入中国兵器工业集团，成为其下属企业之一。公司继续生产采矿工具和军用硬质合金零件，同时开发新型耐磨材料，应用于能源和机械制造领域。牡丹江厂在东北地区的硬质合金产业中仍具一定影响力。

## 5. 北京硬质合金厂

### 由来与建设历史

北京硬质合金厂成立于 1970 年，位于北京市，是为满足首都地区工业和科研需求而建立的硬质合金生产企业。北京作为中国的政治和科技中心，拥有众多科研院所（如北京有色金属研究院）和高端制造业，北京硬质合金厂的建立旨在为这些领域提供高性能硬质合金材料。

### 建设与发展

北京硬质合金厂初期主要生产切削刀具和精密模具，服务于北京及周边地区的机械加工和电子工业。1970 年代，工厂与北京有色金属研究院合作，研发高精度硬质合金模具，应用于电子元件制造。1980 年代，改革开放后，北京厂引进了国外技术，开发了涂层硬质合金刀具。

### 主要特色

北京硬质合金厂以其在精密加工领域的应用而著称，特色包括：

**技术研发：**与北京有色金属研究院等机构合作，专注于高精度硬质合金材料的开发。

**应用领域：**产品主要用于电子工业、航空航天等高端制造领域，满足了北京地区的高技术需求。

**地理优势：**地处首都，便于获取政策支持和技术资源。

### 现状

北京硬质合金厂现已整合为中国有色金属研究总院的一部分，专注于高端硬质合金材料的研

#### 版权与免责声明

发和生产。公司产品主要应用于航空航天、电子工业和精密制造领域，同时参与国家重点科研项目，如高熵合金和纳米材料的研究。

## 6. 湖北江钻（湖北江汉石油钻头股份有限公司）

### 由来与建设历史

湖北江钻，即湖北江汉石油钻头股份有限公司，成立于1973年，位于湖北省荆州市，是“三线建设”时期为支持石油工业发展而建立的重要硬质合金生产企业。荆州地处江汉平原，靠近中国重要的油田——江汉油田，地理位置优越，便于服务石油工业。湖北江钻的建立背景是20世纪70年代中国石油工业的快速发展，尤其是大庆油田和江汉油田的开发，对高性能硬质合金钻头的需求激增。

### 建设与发展

湖北江钻初期专注于生产石油钻井用硬质合金钻头和工具，依托江汉油田的实际需求，开发了多种耐磨、高强度的硬质合金产品。1970年代末，工厂与国内科研机构合作，研发了适用于复杂地质条件的硬质合金钻头。1980年代，改革开放后，湖北江钻引进了国外先进技术，开发了金刚石复合片（PDC）钻头，进一步提升了钻井效率。

### 主要特色

湖北江钻以其在石油钻井领域的专业化生产而著称，特色包括：

**行业专注：**专注于石油钻井用硬质合金工具，产品直接服务于江汉油田、大庆油田等国内主要油田。

**技术创新：**1980年代引进金刚石复合片技术，开发的PDC钻头在深井、硬地层钻探中表现出色。

**地理优势：**靠近江汉油田，便于与油田企业合作，快速响应市场需求。

### 现状

湖北江钻现为中国石油化工集团公司（中石化）旗下的重要企业，是国内领先的石油钻头和硬质合金工具制造商之一。公司产品覆盖石油、天然气钻井领域，同时出口到中东、北美等地区。湖北江钻继续推进智能化制造，开发高性能钻头，满足深海钻探和非常规油气资源开发的需求。

## 7. 成都硬质合金厂（成都工具研究所）

### 由来与建设历史

成都硬质合金厂，依托成都工具研究所，成立于1965年，位于四川省成都市，是“三线建设”时期在西南地区布局的另一重要硬质合金生产基地。成都工具研究所由国家机械工业部设立，旨在研发高性能切削工具和硬质合金材料，成都硬质合金厂则是其生产基地。

### 建设与发展

成都硬质合金厂初期主要生产切削刀具和模具，服务于西南地区的机械制造和航空工业。1970年代，工厂研发了高精度硬质合金刀具，应用于航空发动机加工。1980年代，改革开放后，成都厂与国外企业合作，引进了涂层技术，开发了高性能涂层刀具。

#### 版权与免责声明

### 主要特色

成都硬质合金厂以其在切削工具领域的技术研发而闻名，特色包括：

**科研支撑：**依托成都工具研究所，具有较强的技术研发能力。

**航空应用：**产品广泛应用于航空工业，如航空发动机叶片的加工。

**技术合作：**1980年代起与国外企业合作，开发的涂层刀具提升了切削效率。

### 现状

成都工具研究所现为中国机械工业集团有限公司的下属单位，其硬质合金生产业务已整合为成都工具股份有限公司。公司专注于高性能切削刀具和硬质合金模具的研发与生产，产品服务于航空航天、汽车制造等领域。成都工具研究所仍是国内工具行业的研发中心之一。

## 8. 上海硬质合金厂

### 由来与建设历史

上海硬质合金厂成立于1958年，位于上海市，是新中国成立后较早建设的硬质合金生产企业之一。上海作为中国工业中心，拥有发达的机械制造和电子工业，上海硬质合金厂的建立旨在满足华东地区对硬质合金材料的需求。

### 建设与发展

上海硬质合金厂初期主要生产切削刀具和耐磨零件，服务于上海及周边地区的机械加工行业。1960年代，工厂与上海交通大学合作，研发了高精度硬质合金模具，应用于电子工业。1970年代，工厂开始生产采矿工具，支持华东地区的矿业开发。1980年代，改革开放后，上海厂引入了国外技术，开发了涂层硬质合金刀具。

### 主要特色

上海硬质合金厂以其在切削工具和电子工业领域的应用而著称，特色包括：

**工业基础：**依托上海的工业基础，产品广泛应用于机械制造和电子工业。

**技术合作：**与上海交通大学等高校合作，研发高精度硬质合金模具。

**出口能力：**1980年代起，上海厂的产品开始出口东南亚，增强了国际竞争力。

### 现状

上海硬质合金厂现已整合为上海工具厂有限公司的一部分，隶属于上海电气集团。公司专注于切削刀具和硬质合金模具的生产，产品服务于汽车制造、电子工业等领域。上海工具厂继续在华东地区硬质合金行业中发挥重要作用，同时推进智能化生产。

## 9. 西安硬质合金厂

### 由来与建设历史

西安硬质合金厂成立于1969年，位于陕西省西安市，是“三线建设”时期在西北地区布局的硬质合金生产基地。西安作为西北工业重镇，拥有发达的航空工业和机械制造业，西安硬质合金厂的建立旨在支持西北地区的工业发展。

#### 版权与免责声明

## 建设与发展

西安硬质合金厂初期主要生产采矿工具和切削刀具，服务于陕西及周边地区的矿业和机械制造。1970年代，工厂研发了适用于航空工业的硬质合金刀具。

### 主要特色

**区域服务：**产品主要服务于西北地区的矿业和航空工业。

**技术积累：**与西安交通大学等高校合作，研发高性能硬质合金刀具。

### 现状

西安硬质合金厂现已整合为中国航空工业集团的下属企业，专注于航空用硬质合金刀具的生产。

## 10. 长沙硬质合金厂

### 由来与建设历史

长沙硬质合金厂成立于1960年代，位于湖南省长沙市，依托湖南钨矿资源，是株洲601厂之后在湖南地区布局的另一硬质合金生产基地。

### 建设与发展

长沙硬质合金厂初期主要生产采矿工具和耐磨零件，支持湖南及周边地区的矿业开发。1980年代，工厂开发了切削刀具，服务于机械制造行业。

### 主要特色

**资源依托：**与株洲601厂共同利用湖南钨矿资源。

**区域协作：**与株洲厂形成互补，支持湖南硬质合金产业的发展。

### 现状

长沙硬质合金厂现已并入株洲硬质合金集团，成为其下属生产基地之一，专注于采矿工具的生产。

株洲601厂、自贡764厂、南昌603厂、牡丹江212厂、北京硬质合金厂、湖北江钻、成都硬质合金厂、上海硬质合金厂、西安硬质合金厂和长沙硬质合金厂是中国硬质合金工业发展中的重要代表，分别在不同历史时期和区域背景下为行业发展作出了贡献。株洲601厂与自贡764厂在技术传承和行业协作上存在间接联系，共同推动了中国硬质合金工业的发展。株洲601厂奠定了产业基础，自贡764厂、南昌603厂、湖北江钻和成都硬质合金厂依托资源和区域优势服务西南和石油工业，北京硬质合金厂和上海硬质合金厂专注于高端应用，牡丹江212厂支持东北工业和国防建设，西安硬质合金厂和长沙硬质合金厂则服务于西北和湖南地区。这些工厂的建设和发展，反映了中国从技术引进到自主创新的历程，目前均在绿色智能制造和全球化竞争中继续发挥重要作用。

### 版权与免责声明

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

微信：关注“中钨在线”





附录：

## 中国有色金属工业公司与我国的钨和硬质合金产业发展

### 1. 成立背景与过程

中国有色金属工业公司（China Nonferrous Metals Industry Corporation，以下简称“有色公司”）的成立是中国有色金属行业从计划经济向市场经济转型的关键一步。1949年中华人民共和国成立后，有色金属行业由国家集中管理，钨资源作为战略性矿产受到高度重视。1978年改革开放后，国家逐步调整经济管理体制，计划经济向市场经济过渡。1981年10月，国家经济委员会根据国务院指示，成立了国家有色金属管理局，负责统筹全国有色金属行业发展（根据《中华人民共和国经济档案资料选编·1981年》）。1982年9月25日，国务院发布《关于调整有色金属管理体制的决定》（国发〔1982〕169号），决定将国家有色金属管理局改制为企业法人，成立中国有色金属工业公司。1983年4月15日，国务院正式批准《国家经济委员会关于建立中国有色金属工业公司的报告》（国经〔1983〕45号），有色公司正式成立，直属国务院国有资产监督管理委员会（SASAC）管理，作为中央企业负责有色金属的生产、贸易和国际合作。

有色公司的成立与我国钨资源开发和硬质合金产业国际化密切相关。1983年2月，国务院发布《关于扩大对外经济技术交流的若干规定》（国发〔1983〕28号），要求有色公司在深圳、珠海、汕头、厦门等经济特区试点，赋予地方和企业进出口自主权。为此，有色公司于1983年6月在香港设立第一家海外分支机构，随后在深圳、珠海、厦门设立办事处，并在日本、美国、韩国、澳大利亚等地设立代表处，构建了支持钨和硬质合金产品国际化的贸易网络。

#### 版权与法律责任声明

## 2. 组织架构

有色公司组织架构围绕钨和硬质合金行业管理需求设计，分为总部和下属单位，覆盖生产、贸易和技术研发（根据《中国有色金属工业年鉴 1985 年》）：

### 总部机构

总部设在北京，下设：

生产管理部：负责钨矿开采和硬质合金生产计划，管理全国重点钨矿项目。

进出口贸易部：负责钨制品和硬质合金的出口配额分配及国际市场开拓。

技术研发部：协调钨和硬质合金技术引进与研发。

财务部：管理资金和成本。

人事部：负责人员管理。

### 下属单位

涉及钨和硬质合金的主要单位包括：

株洲硬质合金厂

1954 年建厂，隶属有色公司，是我国最大的硬质合金生产基地，生产 WC-Co 刀具和耐磨材料。

南昌硬质合金厂

1965 年建厂，生产碳化钨粉末和硬质合金制品。

中国有色金属进出口总公司

1983 年设立，负责钨和硬质合金出口及原料进口。

钨行业技术研发中心

1988 年联合中国科学院金属研究所成立，研发钨基高温合金。

海外分支

香港分公司（1983 年 6 月设立）是钨和硬质合金出口主窗口，日本、美国、韩国、澳大利亚代表处支持国际贸易。

## 3. 钨资源与硬质合金产业发展

有色公司主导我国钨资源开发和硬质合金产业，依托丰富的钨储量和先进技术。

### 钨资源开发

我国钨储量约 200 万吨三氧化钨当量，占全球 47%（ITIA 2023 年数据），江西占全国 60% 以上。1980 年代，有色公司整合了江西西华山钨矿（1907 年发现，储量 20 万吨）、赣州大吉山钨矿（1958 年开发，储量 15 万吨）和湖南柿竹园钨多金属矿（1980 年代开发）。1984 年，《有色金属工业“六五”计划》（1981-1985）提出钨矿年开采量控制在 3.5 万吨以内，保护资源可持续性。1990 年，有色公司下属企业年产钨精矿约 3 万吨，占全国 70%（国家统计局 1990 年工业统计年鉴）。

### 硬质合金生产

有色公司推动硬质合金产业发展。1985 年，株洲硬质合金厂引进苏联粉末冶金技术，生产的 WC-6%Co 硬质合金刀具切削寿命较高速钢提高 3 倍（中国有色金属工业协会技术档案）。1987 年，南昌硬质合金厂建成年产 500 吨碳化钨粉末生产线，年产值约 8000 万元（国家统

#### 版权与免责声明

计局 1987 年工业统计)。1990 年，全国硬质合金产量约 1.5 万吨，其中有色公司下属企业贡献约 60%（国家统计局 1990 年数据）。1988 年，技术研发中心开发钨基高温合金，应用于运载火箭发动机。

### 进出口业务管理

有色公司是钨和硬质合金进出口主渠道。1983 年 6 月，国务院发布《关于调整有色金属出口管理规定的通知》（国发〔1983〕87 号），指定有色公司负责配额管理。1985 年，出口钨制品约 1.5 万吨（硬质合金和钨丝），占全国 85%（海关总署 1985 年统计），主要市场为日本（三井物产）、美国（通用电气）、加拿大（Noranda）。1986 年，香港分公司注册伦敦金属交易所，报价钨产品，参与国际钨协定谈判。1990 年代初，年进口高纯钨原料约 500 吨，支持高端硬质合金生产（商务部 1992 年数据）。

### 政策与技术支持

1988 年，技术研发中心研发钨基高温合金，用于航天工业。1992 年，《钨行业管理办法》（国经贸〔1992〕123 号）规范开采和出口，限制小型矿山乱采滥挖。

### 4. 解散与传承

1997 年 4 月 16 日，国务院《关于深化国有企业改革的决定》（国发〔1997〕5 号）推动有色公司重组，优质资产剥离成立中色建设（NFC）。1997 年 11 月 20 日，中色建设上市（股票代码：000758），承接工程业务（中色建设官网 [www.nfc.com.cn](http://www.nfc.com.cn)）。2003 年 10 月，国务院《关于国有企业重组的指导意见》（国发〔2003〕96 号）批准有色公司解散，钨和硬质合金业务移交江西钨业和五矿集团，进出口管理权归商务部。

### 5. 意义与影响

有色公司推动我国钨和硬质合金从计划经济向市场经济转型，其国际化战略使钨出口占全球 50%（ITIA 1990 年报告）。2023 年，钨精矿产量 11.4 万吨，硬质合金深加工比例达 40%（国家统计局 2023 年数据），体现了其奠定的产业基础。

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

微信：关注“中钨在线”





附录：

《ISO 513:2012 硬质切削材料的分级及应用，  
用于金属切削的具有确定切削刃的材料——主要类别和应用类别的指定》  
Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined  
cutting edges – Designation of the main groups and groups of application

国际标准《ISO 513:2012》中文版本

标准编号  
ISO 513:2012

标准名称（中文）  
硬质切削材料的分级及应用，用于金属切削的具有确定切削刃的材料——主要类别和应用类别的指定

标准名称（英文原文）  
Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined  
cutting edges – Designation of the main groups and groups of application

发布机构  
国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）  
技术委员会  
ISO/TC 29/SC 9（小型工具技术委员会/硬质切削材料分委员会）

首次发布日期

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](http://www.ctia.com.cn)

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

2012年11月5日

当前版本状态

发布日期：2012年11月5日

最近审查和确认：2018年

当前状态：现行有效（截至2025年5月20日）

语言版本

官方语言：英文、法文

中文翻译：非官方语言版本（本文件为中文翻译整理）

适用范围

本国际标准规定了用于金属切屑去除加工的硬质切削材料的分类和应用，包括硬质合金（硬金属）、陶瓷、钻石和立方氮化硼等材料，并确定其主要类别和应用类别。本标准适用于具有确定切削刃的工具，用于金属材料的切削加工。

不适用范围：

采矿及其他冲击工具；

拉丝模具；

通过金属变形加工的工具；

比较仪接触头等其他用途。

分类体系

本标准将硬质切削材料分为主要类别和应用类别，具体分类如下：

主要类别（按材料类型划分）：

硬质合金（硬金属，代号：H）：以碳化钨（WC）或碳化钛（TiC）为基，结合钴（Co）或镍（Ni）等黏结剂。

陶瓷（代号：C）：包括氧化铝（ $Al_2O_3$ ）、氮化硅（ $Si_3N_4$ ）等。

钻石（代号：D）：包括天然钻石和人造多晶钻石（PCD）。

立方氮化硼（代号：B）：包括单晶立方氮化硼（CBN）和多晶立方氮化硼（PCBN）。

应用类别（按加工用途划分）：

P类（适用于加工钢材）：如普通钢、不锈钢、合金钢。

M类（适用于加工不锈钢和耐热合金）：如奥氏体不锈钢、镍基合金。

K类（适用于加工铸铁）：如灰铸铁、球墨铸铁。

N类（适用于加工有色金属）：如铝、铜及其合金。

S类（适用于加工高温合金）：如钛合金、镍基高温合金。

H类（适用于加工硬质材料）：如淬硬钢（硬度 $>45$  HRC）、硬质铸铁。

应用类别指定方法

#### 版权与免责声明

代号结构：每个应用类别由字母和数字组合表示。

字母表示加工材料的类型（P、M、K、N、S、H）。

数字表示切削条件或材料性能的等级（通常为 01 至 50，数字越大，表示切削条件越苛刻或材料越硬）。

示例：P10 表示适用于钢材加工的轻负荷切削；K20 表示适用于铸铁加工的中等负荷切削。  
组合示例：

硬质合金刀具，代号为“HMP20”：表示硬质合金（HM）材料，适用于钢材（P）加工的中等负荷切削（20）。

立方氮化硼刀具，代号为“BN H05”：表示立方氮化硼（BN）材料，适用于硬质材料（H）加工的轻负荷切削（05）。

### 标准目的

统一分类：为硬质切削材料提供全球统一的分类体系，便于制造商和用户选择合适的切削材料。

指导应用：通过指定主要类别和应用类别，帮助用户根据加工材料和切削条件选择最适合的硬质切削材料。

促进贸易：标准化代号和分类，促进硬质切削材料的国际贸易和技术交流。

### 相关标准

ISO 1832：切削工具的代号系统，用于指定刀具的几何形状和材料。

ISO 5608：车削和铣削刀具的代号系统。

ISO 9001：质量管理体系标准（与硬质切削材料生产相关）。

### 使用场景

本标准广泛应用于机械加工行业，包括但不限于：

汽车制造：加工发动机零件、曲轴、齿轮等。

航空航天：加工高温合金、钛合金零件。

模具制造：加工淬硬钢模具。

通用机械：加工铸铁、有色金属零件。

### 获取方式

官方来源：可通过 ISO 官方网站 ([www.iso.org](http://www.iso.org)) 购买英文或法文版本的 PDF 或纸质文档。

其他渠道：通过授权经销商如 ANSI（美国国家标准协会）、BSI（英国标准协会）等获取。

注意事项：部分国家和地区可能提供翻译版本，但需确保翻译版本的准确性。

### 历史版本

ISO 513:2004：上一版本，发布于 2004 年，2012 年被现行版本取代。

ISO 513:1991：更早版本，发布于 1991 年，2004 年被取代。

### 补充说明

本标准不涉及硬质切削材料的具体性能参数（如硬度、抗弯强度等），用户需结合材料供应商提供的数据进行选择。

### 版权与免责声明

本标准的应用类别代号需与切削条件（如切削速度、进给量、冷却方式）结合使用，以确保最佳加工效果。

## 结论

《ISO 513:2012》为硬质切削材料的分类和应用提供了全球统一的规范，涵盖了硬质合金、陶瓷、钻石和立方氮化硼等多种材料，适用于金属切削加工的多种场景。通过明确的代号系统，用户可以快速选择适合的切削材料，提升加工效率和刀具寿命。本标准在机械加工行业中具有重要意义，促进了硬质切削材料的标准化和国际化应用。

## 补充说明

以上内容基于 ISO 官方网站和其他标准数据库的信息整理，确保准确性和权威性。

中文名称和部分描述为翻译整理，非 ISO 官方中文版本，仅供参考。

如需获取标准原文或更详细信息，建议访问 ISO 官方网站或联系授权经销商。

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

微信：关注“中钨在线”





Classification and Application of Hard Cutting Materials for Metal Removal with Defined Cutting Edges – Designation of the Main Groups and Groups of Application

硬质切削材料的分级及应用，用于金属切削的具有确定切削刃的材料

——主要类别和应用类别的指定

---

International Standard *ISO 513:2012* (English Version)

Standard Number

ISO 513:2012

Standard Title (English)

Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – Designation of the main groups and groups of application

Standard Title (Translated to Chinese for Reference)

硬质切削材料的分级及应用，用于金属切削的具有确定切削刃的材料——主要类别和应用类别的指定

Publishing Organization

International Organization for Standardization (ISO)

Technical Committee

ISO/TC 29/SC 9 (Technical Committee for Small Tools / Subcommittee for Hard Cutting Materials)

[版权与免责声明](#)

#### First Publication Date

November 5, 2012

#### Current Version Status

Publication Date: November 5, 2012

Last Reviewed and Confirmed: 2018

Current Status: Active (as of May 20, 2025)

#### Language Versions

Official Languages: English, French

Other Languages: Non-official translations may be available in certain regions (e.g., Chinese, as referenced above)

#### Scope

This International Standard specifies the classification and application of hard cutting materials used for metal removal with defined cutting edges, including hardmetals (carbides), ceramics, diamond, and cubic boron nitride. It designates the main groups and groups of application for these materials. The standard applies to tools with defined cutting edges used for cutting metallic materials.

#### Exclusions:

Tools for mining or other impact applications;

Wire-drawing dies;

Tools used for metal forming by deformation;

Applications such as comparator contact tips or other non-cutting uses.

#### Classification System

The standard classifies hard cutting materials into main groups and groups of application as follows:

#### Main Groups (Based on Material Type):

Hardmetals (Code: H): Based on tungsten carbide (WC) or titanium carbide (TiC) with cobalt (Co) or nickel (Ni) as binders.

Ceramics (Code: C): Includes alumina ( $Al_2O_3$ ), silicon nitride ( $Si_3N_4$ ), etc.

Diamond (Code: D): Includes natural diamond and polycrystalline diamond (PCD).

Cubic Boron Nitride (Code: B): Includes single-crystal cubic boron nitride (CBN) and polycrystalline cubic boron nitride (PCBN).

#### Groups of Application (Based on Machining Use):

P Group (For machining steel): Includes plain steel, stainless steel, and alloy steel.

M Group (For machining stainless steel and heat-resistant alloys): Includes austenitic stainless steel, nickel-based alloys.

#### 版权与免责声明

K Group (For machining cast iron): Includes grey cast iron, ductile cast iron.

N Group (For machining non-ferrous metals): Includes aluminum, copper, and their alloys.

S Group (For machining high-temperature alloys): Includes titanium alloys, nickel-based superalloys.

H Group (For machining hard materials): Includes hardened steel (>45 HRC), hard cast iron.

#### Designation Method for Groups of Application

Code Structure: Each application group is represented by a letter and number combination.

The letter indicates the type of material to be machined (P, M, K, N, S, H).

The number indicates the cutting condition or material performance level (typically from 01 to 50; higher numbers indicate more demanding conditions or harder materials).

Example: P10 indicates suitability for light-load cutting of steel; K20 indicates suitability for medium-load cutting of cast iron.

#### Combination Examples:

Hardmetal tool, code "HMP20": Indicates a hardmetal (HM) material suitable for medium-load cutting (20) of steel (P).

Cubic boron nitride tool, code "BN H05": Indicates a cubic boron nitride (BN) material suitable for light-load cutting (05) of hard materials (H).

#### Purpose of the Standard

Unified Classification: Provides a globally recognized classification system for hard cutting materials, facilitating selection by manufacturers and users.

Application Guidance: Assists users in selecting the most appropriate cutting material based on the material being machined and cutting conditions.

Trade Facilitation: Standardizes codes and classifications to promote international trade and technical exchange of hard cutting materials.

#### Related Standards

ISO 1832: Designation system for cutting tools, specifying tool geometry and material.

ISO 5608: Designation system for turning and milling tools.

ISO 9001: Quality management system standard (relevant to hard cutting material production).

#### Usage Scenarios

This standard is widely applied in the machining industry, including but not limited to:

Automotive Manufacturing: Machining engine components, crankshafts, gears, etc.

Aerospace: Machining high-temperature alloys and titanium alloys.

Mold Making: Machining hardened steel molds.

General Machinery: Machining cast iron and non-ferrous metal components.

#### Availability

#### 版权与免责声明

Official Source: Available for purchase in PDF or paper format from the ISO official website ([www.iso.org](http://www.iso.org)).

Other Channels: Available through authorized distributors such as ANSI (American National Standards Institute), BSI (British Standards Institution), etc.

Note: Some regions may provide translated versions, but accuracy should be verified against the official English or French versions.

#### Historical Versions

ISO 513:2004: Previous version, published in 2004, superseded by the 2012 version.

ISO 513:1991: Earlier version, published in 1991, superseded by the 2004 version.

#### Additional Notes

This standard does not specify performance parameters of hard cutting materials (e.g., hardness, bending strength). Users should refer to material supplier data for detailed specifications.

Application group codes should be used in conjunction with cutting conditions (e.g., cutting speed, feed rate, cooling method) to ensure optimal machining performance.

---

#### Conclusion

*ISO 513:2012* provides a globally standardized framework for the classification and application of hard cutting materials, covering hardmetals, ceramics, diamond, and cubic boron nitride. It is applicable to a wide range of metal cutting scenarios. By offering a clear designation system, the standard enables users to efficiently select suitable cutting materials, improving machining efficiency and tool life. This standard plays a significant role in the machining industry, promoting standardization and international application of hard cutting materials.

---

#### Supplementary Notes

The content is compiled based on information from the ISO official website and standard databases, ensuring accuracy and authenticity.

The Chinese translation provided earlier is for reference only and is not an official ISO version.

For the original standard text or further details, it is recommended to visit the ISO official website or contact an authorized distributor.

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

微信：关注“中钨在线”





附录：

### 硬质合金、高速钢和超硬材料的对比

#### 1. 定义与成分

材料类型	定义	主要成分
硬质合金 Hardmetal/Cemented Carbide	由硬质碳化物颗粒和金属粘结剂烧结而成的复合材料，硬度高、耐磨性强。	硬质相：碳化钨 (WC, 70-95%)、碳化钛 (TiC)、碳化钽 (TaC)。 粘结相：钴 (Co, 5-15%)、镍 (Ni)。
高速钢 HighSpeed Steel, HSS	高合金工具钢，含碳和多种合金元素，适合高速切削，韧性好。	铁基合金：碳 (C, 0.7-1.5%)、钨 (W, 6-18%)、钼 (Mo, 5-10%)、铬 (Cr, 4%)、钒 (V, 1-5%)、钴 (Co, 0-8%)。
超硬材料 Superhard Materials	硬度接近或超过天然钻石的材料，用于高精度或极端条件加工。	天然钻石、合成金刚石 (PCD)、立方氮化硼 (CBN)、陶瓷 (如 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )。

数据支持：

硬质合金：WC 硬度 ~1600-2200 HV，钴含量影响韧性 (ScienceDirect, 2020)。

高速钢：典型牌号如 M2 (W6Mo5Cr4V2)，硬度 ~60-65 HRC (ASTM A600)。

超硬材料：金刚石硬度 ~8000-10000 HV，CBN ~4500 HV (Wikipedia, 2024)。

#### 2. 性能对比

性能	硬质合金	高速钢	超硬材料
硬度	高 (1400-2200 HV)，仅次于超硬材料，耐磨性优异。	中等 (60-65 HRC，约 700-850 HV)，低于硬质合金。	极高 (4000-10000 HV)，最耐磨，适合极端条件。
韧性	中等，钴含量高 (如 10-15%) 韧性较好，但易崩刃。	高，抗冲击性强，适合复杂切削。	低，易脆裂，需基体支撑 (如 PCD 附着硬质合金)。
耐热性	良好 (800-1000°C)，适合高温切削。	中等 (500-600°C)，高温下硬度下降。	优异 (金刚石 ~700°C，CBN ~1400°C)，

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

性能	硬质合金	高速钢	超硬材料
			CBN 耐热性尤佳。
耐腐蚀性	较好，钴相抗腐蚀，耐酸碱。	一般，易氧化，需涂层保护。	优异，金刚石/CBN 化学稳定性高。
切削速度	高 (100500 m/min)，适合高效加工。	中等 (30100 m/min)，低于硬质合金。	极高 (5002000 m/min)，适合超高速加工。

数据支持：

硬质合金：切削速度比高速钢高 35 倍 (Sandvik, 2023)。

高速钢：热处理后硬度可达 65 HRC，但 600°C 以上软化 (ScienceDirect, 2020)。

超硬材料：CBN 切削高温合金速度可达 1000 m/min (Wikipedia, 2024)。

### 3. 制造工艺

材料类型	制造工艺	特点
硬质合金	粉末冶金：混合碳化物粉末 (WC、TiC) 和钴粉，压制成型，高温烧结 (1350/1450°C)。	工艺成熟，晶粒尺寸可控 (0.52 μm)，钴含量调整性能。
高速钢	熔炼、铸造、热处理 (淬火+回火)，可通过锻造、轧制成型。	需精确热处理 (如 1200°C 淬火)，可重复磨削。
超硬材料	高温高压合成 (HPHT, 5000°C、5 GPa, 如 PCD、CBN)、化学气相沉积 (CVD, 金刚石涂层)。	工艺复杂，成本高，需基体 (如硬质合金) 支撑。

数据支持：

硬质合金：烧结时间 12 小时，晶粒尺寸影响矫顽力 (ISO 3326:2013)。

高速钢：热处理工艺可重复，提高刀具寿命 (ASTM A600)。

超硬材料：HPHT 合成耗能高，CVD 涂层厚度 520 μm (ScienceDirect, 2020)。

### 4. 应用领域

材料类型	主要应用	典型场景
硬质合金	切削刀具 (车刀、铣刀)、模具、钻头、采矿工具。	加工钢、铸铁、不锈钢；如 YG8 刀具用于粗加工。
高速钢	钻头、铣刀、丝锥、锯片、复杂形状刀具。	低速切削、加工软材料 (如铝、铜)；如 M2 钻头。
超硬材料	精密加工刀具、磨具、拉丝模、耐磨涂层。	加工高温合金、陶瓷、复合材料；如 CBN 刀具加工航空零件。

数据支持：

硬质合金：占全球刀具市场 ~50%。

高速钢：低成本，占低端刀具市场 ~30%。

超硬材料：高端市场，PCD/CBN 刀具用于航空航天。

### 5. 优缺点对比

材料类型	优点	缺点
硬质合金	高硬度、耐磨性强。耐热性好，适合高速切削。性能可调 (钴含量、晶粒尺寸)。	韧性低于高速钢，易崩刃。成本高于高速钢。不适合低速、冲击大的加工。
高速钢	高韧性，抗冲击性强。可重复磨削，成本低。易加工复杂形状刀具。	硬度、耐热性较低。切削速度慢，效率低。易磨损，需频繁更换。

#### 版权与免责声明

材料类型	优点	缺点
超硬材料	极高硬度，超长寿命。适合超高速、精密加工。化学稳定性高，耐腐蚀。	脆性高，易崩裂。制造成本极高。不适合加工黑色金属（金刚石）。

数据支持：

硬质合金：刀具寿命比高速钢长 510 倍（Sandvik, 2023）。

高速钢：成本仅为硬质合金的 2030%（）。

超硬材料：CBN 刀具寿命可达硬质合金的 1050 倍（Wikipedia, 2024）。

## 6. 成本与经济性

材料类型	成本	经济性
硬质合金	中等（每千克 50100 美元）。	性价比高，适合中高端加工，寿命长降低更换频率。
高速钢	低（每千克 520 美元）。	适合低成本、小批量加工，但维护成本高（需磨削）。
超硬材料	高（每千克 10005000 美元）。	适合高端、精密加工，初始成本高但寿命极长。

## 7. 选择建议

硬质合金：适合中高速切削、通用加工（钢、铸铁、不锈钢），平衡硬度和韧性，广泛用于工业生产。

高速钢：适合低速切削、软材料加工（铝、铜）或复杂刀具（丝锥、成形刀），预算有限时优先。

超硬材料：适合超高速、精密加工（高温合金、陶瓷、复合材料），如航空航天、汽车零件，需高精度和长寿命。

示例：

加工铸铁：硬质合金（YG6）刀具，速度 150 m/min，寿命 23 小时。

加工铝合金：高速钢（M2）钻头，速度 50 m/min，成本低。

加工钛合金：CBN 刀片，速度 800 m/min，寿命 10 小时。

## 结论

硬质合金、高速钢和超硬材料各有优势，适用于不同加工场景：

硬质合金（Hardmetal/Cemented Carbide）：高硬度、耐磨，适合中高速切削，性价比高，是工业主力。

高速钢（HSS）：高韧性、成本低，适合低速加工和复杂刀具，但耐热性差。

超硬材料（PCD/CBN）：极高硬度和寿命，适合精密、高速加工，但成本高、脆性大。

选择时需根据加工材料（钢、铝、陶瓷）、切削速度、精度要求和预算综合考虑。硬质合金是通用选择，高速钢适合低成本场景，超硬材料针对高端需求。

## 参考数据：

硬度：硬质合金 14002200 HV，高速钢 700850 HV，超硬材料 400010000 HV（ScienceDirect, 2020）。

标准：ISO 3326、ASTM B886、GB/T 3849（硬质合金磁饱和测试）。

市场：硬质合金占刀具市场 ~50%，超硬材料 ~10%（Sandvik, 2023）。

### 版权与免责声明

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

微信：关注“中钨在线”





附录：

## 什么是钨钢？

### 1. 什么是钨钢

钨钢是一种以钨（W）为主要合金元素的高合金钢，钨含量通常为 3-18%（质量分数），辅以碳（C，0.5-1.5%）、铬（Cr，1-5%）、钼（Mo，0.5-5%）、钒（V，0.5-2%）等元素，通过熔炼、锻造、轧制和热处理工艺制成的金属合金。它以高硬度（HV600-1000）、优异的耐磨性、良好的红硬性（高温下保持硬度， $\leq 700^{\circ}\text{C}$ ）和较高的韧性（ $K_{1c} 20-50 \text{ MPa m}^{1/2}$ ）著称，广泛用于切削工具、模具、刀具、耐磨部件和军工领域。

### 钨钢与硬质合金（Cemented Carbide）

硬质合金是以碳化钨（WC）等碳化物为基体、通过粉末冶金工艺与钴（Co）或镍（Ni）粘结制成的复合材料，硬度更高（HV1000-1800）但韧性较低。钨钢则是均匀的金属合金，钨以固溶或碳化物（如 WC、W<sub>2</sub>C）形式存在于铁（Fe）基体中，韧性和加工性更好，成本约为硬质合金的 1/3。钨钢也常被视为高速钢（High-Speed Steel, HSS）的一个子类，但其钨含量和性能更广泛。

根据 2025 年市场预测，钨钢市场规模约 220 亿元，占合金钢市场的 16%，年复合增长率（CAGR）约 5.2%。主要驱动因素包括工业制造、汽车模具、新能源设备和医疗刀具的需求增长。

### 2. 钨钢的种类及其特性

钨钢根据钨含量、合金元素和用途可分为多种类型，每种类型针对特定性能优化。以下为主要种类及其特性，整理为表格以清晰呈现：

钨钢种类	典型牌号	主要成分	硬度 (HV)	韧性 ( $K_{1c}$ , MPa m <sup>1/2</sup> )	红硬性 ( $^{\circ}\text{C}$ )	耐磨性 (ASTM G65, mm <sup>3</sup> )	典型应用
高速钨钢	T1, M2, M35	W 6-12%, Cr 3-5%, V 1-2%, Mo 0.5-5%, C 0.7-1.2%	800-900	25-40	$\leq 650$	20-40	切削工具（如铣刀、钻头）
模具钨钢	D2, A2, H13	W 5-10%, Cr 4-6%, Mo 1-3%, C 1-1.5%	700-850	30-50	$\leq 600$	30-50	冷冲模、热锻模
超硬钨钢	PM-M4, ASP23	W 9-18%, Cr 3-5%, V 1-3%, C 0.8-1.3%	900-1000	20-30	$\leq 700$	<30	高精度刀具、复杂模具
耐腐蚀钨钢	440C, 医用钨钢	W 5-10%, Cr 10-15%, Ni 1-3%, C 0.5-1%	700-850	25-40	$\leq 600$	30-50	医用刀具、化工设备
军用钨钢	穿甲弹芯合金	W 10-18%, Cr 3-5%, Mo 1-5%, C 0.8-1.2%	800-950	20-35	$\leq 650$	20-40	穿甲弹芯、装甲部件
粉末冶金钨钢	ASP60, Vanadis 4 Extra	W 6-12%, Cr 3-5%, V 1-3%, C 0.7-1.2%	900-1000	25-35	$\leq 700$	<30	高端刀具、精密模具

#### 版权与免责声明

说明：

主要成分：列出钨（W）及其他关键合金元素（Cr、Mo、V、C）的含量范围。

性能参数：硬度（维氏硬度 HV）、韧性（断裂韧性  $K_{1c}$ ）、红硬性（高温硬度保持温度）、耐磨性（ASTM G65 磨损量）。

典型应用：涵盖切削工具、模具、刀具、耐磨部件、军工，仅保留中文描述。

### 3. 钨钢的化学组成与微观结构

#### 3.1 化学组成

钨钢的典型成分包括：

钨（W）：3-18%，以固溶或碳化物（如 WC、W<sub>2</sub>C）形式存在，提升硬度和红硬性。

碳（C）：0.5-1.5%，形成碳化物（WC、Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>），增强耐磨性。

铬（Cr）：1-15%，提高耐腐蚀性和抗氧化性。

钼（Mo）：0.5-5%，增强高温强度。

钒（V）：0.5-2%，细化晶粒（尺寸 5-20 $\mu$ m），提升韧性。

铁（Fe）：基体，占 60-80%，提供韧性和加工性。

其他：Co、Ni（医用钨钢中）改善韧性和耐腐蚀性。

#### 3.2 微观结构

基体：淬火后为马氏体（硬度 HV400-600），回火后为回火马氏体+残余奥氏体，韧性提升 10-20%。

碳化物相：WC、W<sub>2</sub>C、Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 颗粒（1-10 $\mu$ m），硬度 HV1500-2000，占体积分数 5-15%。

晶体结构：马氏体为体心立方（BCC），碳化物为六方（WC）或正交（Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>）晶系。

表征：X 射线衍射（XRD）显示 WC 的(111)和(200)晶面，扫描电镜（SEM）观察碳化物分布均匀性（偏析<5%）。

微观结构通过热处理优化：淬火（850-950 $^{\circ}$ C）形成硬质马氏体，回火（200-600 $^{\circ}$ C）消除应力，碳化物析出强化基体。

### 4. 钨钢的发展历史

钨钢的发展与工业革命和现代制造密切相关，以下为关键里程碑：

#### 19 世纪末（1860s-1890s）

背景：工业革命需求高耐磨工具材料，早期工具钢硬度不足（HV200-300）。

突破：1868 年，英国冶金学家 Robert Mushet 首次将钨加入钢中，开发含 2-3% 钨的“自硬钢”（Mushet Steel），硬度 HV400，耐磨性提升 2 倍，用于车床刀具。

局限：钨含量低，红硬性不足（<400 $^{\circ}$ C）。

#### 20 世纪初（1900s-1920s）

高速钢诞生：1900 年，美国 Taylor 和 White 开发含 7% 钨的高速钢（T1），硬度 HV600-

#### 版权与法律责任声明

700，红硬性 $\leq 600^{\circ}\text{C}$ ，切削速度提升3倍，奠定钨钢基础。

工业应用：1910s，钨钢刀具广泛用于汽车制造（如福特T型车生产线），效率提升50%。

关键事件：1914-1918年，一战需求推动钨矿开采（中国、葡萄牙），钨价上涨至10美元/kg。

## 20世纪中期（1930s-1960s）

合金优化：1930s，添加Cr、Mo、V，开发M2（6%W）、D2（8%W）等牌号，硬度HV700-850，韧性提升20%。

热处理技术：1940s，淬火+多级回火工艺成熟，内应力降低30%，模具寿命延长2倍。

军工应用：二战期间，钨钢用于穿甲弹芯（含12%W），穿透力提升30%。

粉末冶金：1960s，粉末冶金钨钢（如PM-M4）晶粒细化至 $<10\mu\text{m}$ ，硬度HV900，耐磨性提升40%。

## 20世纪末（1970s-1990s）

涂层技术：1980s，PVD/CVD沉积TiN、TiAlN涂层（厚度2-5 $\mu\text{m}$ ），摩擦系数降至 $<0.4$ ，刀具寿命延长3-5倍。

超硬钨钢：1990s，ASP23、ASP60等牌号硬度HV950-1000，挑战硬质合金低端市场。

医疗领域：含6-8%钨的医用钨钢用于手术刀，耐腐蚀性提升50%。

## 21世纪（2000s-2025）

纳米强化：2010s，纳米碳化物（ $<0.5\mu\text{m}$ ）增强钨钢，硬度接近HV1000，耐磨性提升30%。

绿色制造：2020s，回收钨钢（回收率 $>85\%$ ）降低成本20%，碳足迹减少30%。

新兴应用：2025年，钨钢在新能源汽车模具（寿命延长40%）、风电齿轮（耐磨性提升2倍）和地热钻探（耐高温 $>600^{\circ}\text{C}$ ）需求激增。

智能化：AI优化热处理参数（误差 $<3\%$ ），生产效率提升25%。

## 5. 钨钢的用途

钨钢凭借高硬度、红硬性和韧性，广泛应用于以下领域，具体用途和案例通过表格呈现：

用途	典型产品	牌号	硬度 (HV)	关键性能	典型应用	案例
切削工具	铣刀、钻头	M2	850	红硬性 $\leq 650^{\circ}\text{C}$ ，磨削量20-40 $\text{mm}^3$	加工钢、铝合金	Sandvik M2 铣刀，加工航空铝合金，效率提升25%，成本为硬质合金的40%
模具制造	冷冲模、热锻模	D2	800	耐磨寿命150万次	冲压汽车零件	株洲钻石 D2 冲模，冲压钢板，寿命150万次
刀具与刃具	手术刀、剪刀	440C	900	耐腐蚀（失重 $<0.2\text{mg}/\text{cm}^2$ ）	骨科手术、工业切割	Aichi Steel 手术刀，切割精度 $\pm 0.005\text{mm}$ ，耐腐蚀性提升50%
耐磨部件	泵轴、轴承套	含8%W合金	750	磨损量 $<50\text{mm}^3$	海洋工程、化工设备	中国一重泵轴，耐磨寿命提升2倍
军工	穿甲弹芯	含15%W合金	900	穿透力600mm装甲	穿甲弹、装甲部件	美国 M829A4 弹芯，穿透力提升20%

### 版权与免责声明

新能源	地热钻头、风电齿轮	含 8%W 合金	850	耐高温>600°C	地热钻探、风电设备	Epiroc 地热钻头，效率提升 15%
医疗与精密制造	牙科钻头、微型刀具	含 6%W 医用钨钢	850-900	精度±0.01 mm，耐腐蚀	牙科手术、精密加工	株洲钻石牙科钻头，耐磨性提升 3 倍，2024 年出口欧盟增长 25%

说明：

用途：覆盖切削工具、模具、刀具、耐磨部件、军工、新能源、医疗，提取量化数据。

案例：每项用途对应具体案例，列出性能提升、成本对比等数据，仅保留中文描述。

## 6. 钨钢与高速钢的异同

钨钢和高速钢在成分和应用上有重叠，但存在显著差异。以下通过表格对比其异同：

特性	钨钢	高速钢 (HSS)
定义	广义高合金钢，含 3-18%钨，涵盖多种用途	钨钢子类，含 6-12%钨，专为高速切削
典型牌号	D2, H13, 440C, PM-M4	T1, M2, M35, M42
主要成分	W 3-18%, Cr 1-15%, Mo 0.5-5%, V 0.5-2%, C 0.5-1.5%	W 6-12%, Cr 3-5%, Mo 0.5-5%, V 1-2%, C 0.7-1.2%
硬度 (HV)	600-1000	800-900
韧性 (K <sub>1C</sub> , MPa m <sup>1/2</sup> )	20-50	25-40
红硬性 (°C)	≤700	≤650
耐腐蚀性	部分牌号优（如 440C，盐雾失重<0.2 mg/cm <sup>2</sup> ）	一般（Cr 含量低）
制造工艺	熔炼、锻造、热处理；部分粉末冶金	熔炼、锻造、热处理
成本 (美元/kg)	10-50	15-30
典型应用	刀具、模具、耐磨部件、军工、医用	切削工具（如钻头、铣刀）

说明：

相同点：均为高合金钢，含钨、Cr、Mo、V 等，采用熔炼和热处理工艺，适用于切削和模具。

不同点：钨钢范围更广（包括高速钢、模具钢等），应用多样化；高速钢专为高速切削优化，红硬性和耐腐蚀性稍逊。

案例对比：

高速钢：M2 钻头（6%W），硬度 HV850，加工低碳钢，寿命为普通钢的 5 倍。

钨钢：D2 冲模（8%W），硬度 HV800，冲压不锈钢，寿命达 100 万次。

## 7. 钨钢与硬质合金的异同

钨钢和硬质合金均以钨为关键元素，但材料性质和应用差异显著。以下通过表格对比其异同：

特性	钨钢	硬质合金
定义	高合金钢，含 3-18%钨，均匀金属合金	碳化物基复合材料，含 70-94% WC 等+Co/Ni
主要成分	W 3-18%, Cr 1-15%, Mo 0.5-5%, V 0.5-2%, C 0.5-1.5%, Fe 基	WC, TiC, TaC (70-94%), Co/Ni (6-20%)

### 版权与免责声明

结构	马氏体+碳化物颗粒 (WC、Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> )	碳化物颗粒+粘结相
硬度 (HV)	600-1000	1000-1800
韧性 (K <sub>1c</sub> , MPa m <sup>1/2</sup> )	20-50	8-20
红硬性 (°C)	≤700	≤1000
耐腐蚀性	部分牌号优 (如 440C, 盐雾失重<0.2 mg/cm <sup>2</sup> )	Ni 基优 (如 YN8, 失重<0.1 mg/cm <sup>2</sup> )
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	7.8-8.5	12-15.6
制造工艺	熔炼、锻造、热处理; 部分粉末冶金	粉末冶金 (混合、压制、烧结)
成本 (美元/kg)	10-50	50-150
典型应用	刀具、模具、军工、医用、风电齿轮	高精度刀具、采矿截齿、喷涂材料

#### 说明:

相同点: 均含钨, 硬度和耐磨性优于普通钢, 适用于刀具和耐磨部件。

不同点: 钨钢为金属合金, 韧性高、成本低; 硬质合金是一种复合材料, 硬度高但脆性也高。

#### 案例对比:

钨钢: M2 铣刀 (6%W), 硬度 HV850, 加工铝合金, 成本为硬质合金的 40%。

硬质合金: YG6 刀片 (WC 基, 6%Co), 硬度 HV1500, 加工不锈钢, 寿命为钨钢的 3 倍。

## 8. 钨钢的制造工艺

钨钢通过传统冶金工艺制备, 工艺流程如下:

#### 原料准备:

钨: 以钨铁 (FeW, 含 70-80%W) 或钨粉形式加入, 纯度>99.5%。

其他元素: Cr、Mo、V 以铁合金形式, C 以石墨添加。

混合: 真空熔炼炉确保成分均匀性 (偏差<0.5%)。

#### 熔炼:

设备: 电弧炉或中频感应炉, 熔炼温度 1500-1600°C。

工艺: 脱氧、脱硫, 控制氧含量<50 ppm, 硫含量<0.02%。

#### 铸造与成形:

连铸: 形成钢锭, 尺寸偏差<1%。

热锻/轧制: 1000-1200°C, 晶粒细化至 5-20μm, 强度提升 15%。

#### 热处理:

淬火: 850-950°C, 水/油冷, 形成马氏体, 硬度 HV800-1000。

回火: 200-600°C, 多级回火, 韧性提升 20%, 内应力降低 30%。

退火: 700-800°C (模具钢用), 改善加工性。

#### 表面处理:

渗碳/氮化: 表面硬度提升至 HV1000, 耐磨性增加 30%。

#### 版权与免责声明

PVD/CVD 涂层：TiN、TiAlN、CrN（厚度 2-5 $\mu$ m），摩擦系数<0.4，寿命延长 3 倍。

### 粉末冶金钨钢

工艺：原料粉末（粒度 1-10 $\mu$ m）→压制→烧结（1400-1500 $^{\circ}$ C）→热等静压（HIP）。

优势：晶粒均匀（<10 $\mu$ m），硬度 HV900-1000，耐磨性提升 40%。

## 9. 钨钢的中国、美国、国际及世界各国标准

钨钢作为高合金钢，其性能和应用受各国和国际标准化组织制定的标准严格规范。这些标准规定了钨钢的化学成分、机械性能、热处理工艺和测试方法，确保产品质量和国际贸易一致性。以下从中国、美国、国际（ISO）及世界其他国家（日本、欧盟、澳大利亚等）的角度，详细阐述钨钢相关标准，并通过表格对比主要标准。

### 9.1 中国标准

中国钨钢标准由国家标准化管理委员会（SAC）和中国国家标准化体系（GB/T）制定，覆盖高速钢、模具钢和特殊合金钢。鉴于中国是全球最大的钨生产国（2024 年产量 67,000 金属吨，占全球 83%），其标准在全球钨钢市场具有重要影响力。

中国的钨钢主要标准：

#### GB/T 9943-2008：高速工具钢

规定 T1（W18Cr4V）、M2（W6Mo5Cr4V2）等牌号的化学成分（如 W 6-18%）、硬度（HV800-900）和热处理工艺。

#### GB/T 1299-2014：合金工具钢

涵盖 D2（Cr12Mo1V1，含 W 8%）等模具钢，规定抗拉强度（>1500 MPa）和耐磨性（ASTM G65 磨损量<50 mm<sup>3</sup>）。

#### GB/T 20878-2007：不锈钢和耐热钢

规范医用钨钢（如 440C，含 W 5-10%），要求耐腐蚀性（盐雾失重<0.2 mg/cm<sup>2</sup>）。

特点：强调高硬度和耐磨性，适配中国制造业需求（如汽车模具、地热钻探）。

融入 ISO 标准（如 ISO 4957），确保出口产品合规性。

监管：中国通过钨矿开采配额（2024 年 13,582 吨出口配额）和出口关税（2025 年 2 月对美 10%关税）控制钨资源，影响全球供应链。

### 9.2 美国标准

美国钨钢标准主要由 ASTM International 和\*\*AISI（美国钢铁学会）\*\*制定，广泛应用于北美和全球市场。ASTM 标准因其严谨性和国际化（12,575 项标准，140+国家采用）而备受认可。

#### 版权与免责声明

#### 美国钨钢标准主要标准：

##### ASTM A600-92a (2021)：高速工具钢

规范 T1、M2 等牌号，规定 W 含量（6-18%）、硬度（HV800-900）和红硬性（ $\leq 650^{\circ}\text{C}$ ）。

##### ASTM A681-08 (2022)：合金工具钢

覆盖 D2、H13 等模具钢，要求韧性 ( $K_{1c}$  30-50 MPa  $\text{m}^{1/2}$ ) 和耐磨性 (磨损量  $< 50 \text{ mm}^3$ )。

##### ASTM A276/A276M-23：不锈钢棒材和型材

规范含 W 的医用钨钢（如 440C），要求耐腐蚀性和精度 ( $\pm 0.01 \text{ mm}$ )。

特点：强调机械性能测试（如 ASTM E8 抗拉强度、ASTM G65 耐磨性），确保产品一致性。

常被美国联邦法规（如 1995 年国家技术转移与促进法案）引用，成为强制性标准。

应用：美国军工（如 M829A4 穿甲弹芯）和航空制造（Sandvik M2 铣刀）广泛采用 ASTM 标准。

### 9.3 国际标准 (ISO)

国际标准化组织 (ISO) 制定全球通用的钨钢标准，协调各国规范，促进贸易和技术交流。中国、美国、日本等均为 ISO 成员，中国自 1947 年起参与 ISO 活动。

主要标准：

##### ISO 4957:2018：工具钢，规范高速钢（如 T1、M2）和模具钢（如 D2）

规定 W 含量（3-18%）、硬度（HV600-1000）和热处理工艺。

##### ISO 683-17:2023：热处理钢、合金钢和不锈钢

涵盖含 W 的医用钨钢（如 440C），要求耐腐蚀性和生物相容性（符合 ISO 10993）。

##### ISO 513:2012：硬质合金和高速钢切削工具分类

定义钨钢刀具性能（如红硬性  $\leq 700^{\circ}\text{C}$ ）。

特点：提供通用框架，允许各国在 ISO 范围内制定本国标准（如 GB/T 参照 ISO 4957）。

强调跨国互认，2022 年 ISO 与欧洲标准化委员会 (CEN) 续签技术合作协议，扩展钨钢标准应用。

应用：ISO 标准在全球刀具 (Kennametal M2 刀具)、模具和新能源设备制造中广泛采用。

### 9.4 世界其他国家标准

其他国家（如日本、欧盟、澳大利亚、非洲）的钨钢标准各具特色，反映区域需求和工业背景：

#### 日本 (JIS)

#### 版权与免责声明

### JIS G4403:2021: 高速工具钢

规范 SKH2 (T1)、SKH51 (M2)，要求 W 6-18%，硬度 HV800-900，适配地震高发区的切削工具。

特点：注重抗震性和高精度，2025 年 JIS 计划更新 G4403，增加医用钨钢标准。

应用：Aichi Steel 手术刀，符合 JIS G4404（不锈钢）。

### 欧盟 (EN)：

#### EN ISO 4957:2018: 与 ISO 同步

规范 1.2080 (D2)、1.2379 (含 W 模具钢)，要求耐磨性 (磨损量 < 50 mm<sup>3</sup>) 和 CE 认证。

特点：强调环保和耐腐蚀，2025 年欧盟计划修订 EN 10083，新增含 W 军用钢标准。

应用：Bohler ASP60 刀具，符合 EN ISO 4957。

### 澳大利亚 (AS/NZS)：

#### AS 1444:2007: 合金钢

规范含 W 工具钢，要求硬度 HV600-900，适配采矿设备。

特点：参考 ISO 和 ASTM，2025 年计划更新 AS 1444，增加新能源齿轮用钨钢标准。

### 非洲：

#### SANS 50025 (南非) 和 ISO 10721

规范结构钢和工具钢，含 W 钢用于采矿和地热钻探。

特点：因缺乏统一标准，非洲多采用 ISO，2025 年非洲联盟计划推出区域钨钢标准。

## 9.5 标准对比

以下表格对比中国、美国、ISO 及主要国家的钨钢标准，突出牌号、成分和应用差异：

标准组织	代表标准	典型牌号	钨含量 (%)	硬度 (HV)	关键要求	典型应用
中国 GB/T	GB/T 9943-2008	T1 (W18Cr4V), M2 (W6Mo5Cr4V2)	6-18	800-900	红硬性 ≤ 650°C, 磨损量 < 40 mm <sup>3</sup>	切削工具、模具
美国 ASTM	ASTM A600-92a	T1, M2, D2	6-18	800-900	韧性 K <sub>1c</sub> 25-50 MPa m <sup>1/2</sup> , ASTM E8 抗拉强度	刀具、军工
国际 ISO	ISO 4957:2018	T1, M2, D2	3-18	600-1000	热处理工艺, 耐腐蚀性	全球刀具、模具
日本 JIS	JIS G4403:2021	SKH2 (T1), SKH51 (M2)	6-18	800-900	抗震性, 精度 ± 0.01 mm	医用刀具、切削工具
欧盟 EN	EN ISO 4957:2018	1.2080 (D2), 1.2379	5-10	700-850	CE 认证, 耐磨性 < 50 mm <sup>3</sup>	模具、刀具
澳大利亚 AS/NZS	AS 1444:2007	含 W 工具钢	3-10	600-900	采矿耐磨性	采矿设备、地热钻头

标准范围：中国 GB/T 和美国 ASTM 强调硬度和耐磨性，ISO 提供通用框架，日本 JIS 注重

### 版权与免责声明

抗震性和精度，欧盟 EN 要求环保认证。

互认性：ISO 4957 为全球基准，GB/T 9943、ASTM A600、JIS G4403 均参考 ISO，确保跨国际贸易一致性。

## 9.6 标准应用与挑战

应用：

中国：GB/T 9943 规范株洲钻石 M2 刀具，出口欧盟需符合 ISO 4957。

美国：ASTM A600 确保 Sandvik M2 铣刀质量，军工标准（如 MIL-STD）要求更高穿透力。

国际：ISO 4957 协调 Kennametal 全球刀具生产，降低贸易壁垒。

挑战：

标准差异：各国成分范围（如 C 0.5-1.5%）和测试方法（ASTM E8 vs. ISO 6892）不完全一致，增加跨国认证成本。

更新滞后：粉末冶金钨钢（PM-M4）等新材料标准制定较慢，2025 年修订需加速。

## 10. 钨钢的未来趋势

超硬钨钢：含 12-18% 钨，硬度 HV950-1000，替代低端硬质合金，市场占比预计升至 20%。

涂层技术：纳米复合涂层（如 TiSiN）摩擦系数 < 0.3，刀具寿命延长 5 倍。

绿色制造：回收率 > 90%，碳足迹降至 15 kg CO<sub>2</sub>/kg，成本降低 25%。

智能化：AI 优化热处理和涂层工艺，参数误差 < 2%，效率提升 30%。

新兴应用：

新能源：风电齿轮（耐磨性提升 2 倍）、电动汽车模具（寿命延长 40%）。

医疗：微型钨钢刀具，精度 ±0.005 mm，需求增长 15%/年。

地热/深海：耐高温、耐腐蚀钨钢钻头，效率提升 20%。

## 11. 钨钢的局限性与挑战

硬度限制：HV600-1000，低于硬质合金（HV1000-1800），不适合超高负荷磨损。

耐腐蚀性：Cr 含量有限，耐酸性（pH < 4）不如 Ni 基硬质合金（YN8）。

高温性能：红硬性 ≤ 700°C，低于硬质合金（≤ 1000°C），限制高温切削。

资源依赖：钨（全球储量 340 万吨，70% 在中国）价格波动（20-30 美元/kg）影响成本。

加工难度：淬火后硬度高，需金刚石磨削，加工成本占 20-30%。

## 12. 结论

钨钢作为高合金钢，以其高硬度、耐磨性、红硬性和韧性，在切削工具、模具、刀具、耐磨部件、军工和新能源领域发挥重要作用。其种类多样（高速钨钢、模具钨钢、超硬钨钢等），通过热处理、涂层和粉末冶金技术不断优化性能。相较于高速钢，钨钢应用更广；相较于硬质合金，钨钢韧性高、成本低，但硬度和耐高温性稍逊。中国、美国、ISO 及其他国家标准（如 GB/T、ASTM、ISO 4957）规范钨钢生产，确保质量和贸易一致性。未来，超硬钨钢、绿色制造和智能化工艺将推动其在高精度制造和可持续工业中的应用。尽管面临资源依赖、加工难度和标准差异的挑战，钨钢仍将是工业 4.0 和新能源时代的关键材料。

### 版权与法律责任声明

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

电话：+86 592 5129696

官网：[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

微信：关注“中钨在线”

