

什么是硬质合金模具

中钨智造科技有限公司
CTIA GROUP LTD

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](#)

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，致力于在互联网时代推动钨钼材料的智能化、集成化和柔性化设计与制造。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设计制造能力、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、钼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技术与客户协同设计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、设计与生产服务，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、高比重合金的设计与制造，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。



版权与法律责任声明

目录

第一章 硬质合金模具概述

- 1.1 硬质合金模具的定义
 - 1.1.1 硬质合金模具的化学组成定义
 - 1.1.2 硬质合金模具与传统模具的区别
 - 1.1.3 硬质合金模具的结构组成
 - 1.1.3.1 WC 硬质相与 Co 粘结相的组成关系
 - 1.1.3.2 添加剂与微观结构对整体性能的影响
- 1.2 硬质合金模具的发展历程
 - 1.2.1 早期钨钴硬质合金模具的出现与应用
 - 1.2.2 细晶与超细晶硬质合金模具的技术突破
 - 1.2.3 多元添加剂硬质合金模具的发展阶段
- 1.3 硬质合金模具的基本特点
- 1.4 硬质合金模具的应用领域
 - 1.4.1 金属塑性成形领域中的应用
 - 1.4.2 粉末冶金与陶瓷成型领域中的应用
 - 1.4.3 塑料与橡胶精密成型领域中的应用
 - 1.4.4 特种材料加工领域中的应用
- 1.5 硬质合金模具与其他材料模具的比较
 - 1.5.1 硬质合金模具与高速钢模具的性能对比
 - 1.5.2 硬质合金模具与陶瓷模具的性能对比
 - 1.5.3 硬质合金模具与合金钢模具的性能对比

第二章 硬质合金模具的特性

- 2.1 硬质合金模具的物理特性
 - 2.1.1 硬质合金模具的密度
 - 2.1.2 硬质合金模具的热膨胀系数
 - 2.1.3 硬质合金模具的热导率
 - 2.1.4 硬质合金模具的比热容
 - 2.1.5 硬质合金模具的电导率
 - 2.1.6 硬质合金模具的磁性能
- 2.2 硬质合金模具的力学特性
 - 2.2.1 硬质合金模具的硬度与弹性模量
 - 2.2.2 硬质合金模具的抗弯强度与压缩强度
 - 2.2.3 硬质合金模具的断裂韧性与脆性-韧性转变温度
 - 2.2.3.1 WC 晶粒尺寸对硬质合金模具断裂韧性的影响
 - 2.2.3.2 Co 含量对硬质合金模具韧性的调控机制
 - 2.2.4 硬质合金模具的高温力学性能与热稳定性
- 2.3 硬质合金模具的耐磨特性
 - 2.3.1 磨粒磨损机制
 - 2.3.2 粘着磨损与疲劳磨损行为

版权与免责声明

- 2.3.3 WC 晶粒尺寸、Co 含量及添加剂对硬质合金模具耐磨性的影响
 - 2.3.3.1 细晶与超细晶硬质合金模具的磨损优势
 - 2.3.3.2 TaC、NbC 等晶粒生长抑制剂的作用
- 2.4 硬质合金模具的化学稳定性与抗氧化性能
 - 2.4.1 高温氧化动力学与氧化产物相组成
 - 2.4.2 在酸碱介质及成型介质中硬质合金模具的腐蚀行为
 - 2.4.3 抗氧化涂层与表面改性提升硬质合金模具的化学稳定性
 - 2.4.3.1 PVD/CVD 涂层体系在硬质合金模具中的应用
 - 2.4.3.2 硬质合金模具的涂层附着力与高温保护寿命
- 2.5 硬质合金模具的热疲劳与热冲击特性
 - 2.5.1 热循环条件下的裂纹萌生与扩展机制
 - 2.5.2 材料成分对硬质合金模具热疲劳寿命的影响
- 2.6 中钨智造硬质合金模具 MSDS

第三章 硬质合金模具的设计与结构

- 3.1 硬质合金模具设计的基本原则
 - 3.1.1 材料-结构-性能一体化设计理念
 - 3.1.2 服役条件下的可靠性设计原则
- 3.2 硬质合金模具的形状与结构优化设计
 - 3.2.1 硬质合金模具强度与刚度的设计
 - 3.2.2 硬质合金模具的温度分布与热应力分析
 - 3.2.3 成型精度与公差设计
 - 3.2.3.1 尺寸链分析与公差分配
 - 3.2.3.2 脱模斜度与表面粗糙度优化
- 3.3 硬质合金模具的冷却系统设计
 - 3.3.1 冷却通道设计与优化
 - 3.3.2 热交换与温控系统在硬质合金模具中的应用
 - 3.3.2.1 直通式与随形冷却通道对比
 - 3.3.2.2 冷却介质选择与流动模拟
- 3.4 硬质合金模具的导向与定位系统设计
 - 3.4.1 导向柱与导套的硬质合金选材
 - 3.4.2 定位精度与重复定位误差控制

第四章 硬质合金模具的制造工艺

- 4.1 硬质合金模具的原材料选择与准备
 - 4.1.1 WC 粉末、Co 粉末及添加剂的性能要求
 - 4.1.2 原料纯度、粒度与氧含量控制
- 4.2 硬质合金模具的粉末冶金工艺
 - 4.2.1 粉末的混合与成形
 - 4.2.1.1 湿磨混合工艺参数优化
 - 4.2.1.2 喷雾造粒与压制成形技术
 - 4.2.2 烧结过程对硬质合金模具性能的影响

版权与免责声明

- 4.2.2.1 液相烧结机理与烧结制度控制
- 4.2.2.2 真空烧结与热等静压（HIP）工艺
- 4.3 硬质合金模具的加工技术
 - 4.3.1 精密铣削与磨削技术
 - 4.3.1.1 金刚石刀具与CBN刀具的应用
 - 4.3.1.2 表面粗糙度与尺寸精度控制
 - 4.3.2 电火花加工在硬质合金模具中的应用
 - 4.3.2.1 EDM工艺参数对表面质量的影响
 - 4.3.2.2 电极材料选择与损耗控制
 - 4.3.3 激光与超声波加工硬质合金模具
 - 4.3.3.1 激光切割与激光表面改性
 - 4.3.3.2 超声辅助磨削的加工效率提升
- 4.4 硬质合金模具的表面处理与涂层技术
 - 4.4.1 TiN、TiC等涂层在硬质合金模具中的应用
 - 4.4.2 PVD与等离子喷涂技术在硬质合金模具中的应用
 - 4.4.2.1 涂层沉积工艺参数优化
 - 4.4.2.2 涂层与基体界面结合强度

第五章 硬质合金模具的性能评估与优化

- 5.1 硬质合金模具的性能评价标准
 - 5.1.1 中国钨合金光栅标准
 - 5.1.2 国际钨合金光栅标准
 - 5.1.3 欧美日韩等国的钨合金光栅标准
- 5.2 硬质合金模具的磨损与疲劳性能评估
 - 5.2.1 硬质合金模具的耐磨性测试方法
 - 5.2.1.1 磨损试验标准与设备
 - 5.2.1.2 磨损量与磨损率定量表征
 - 5.2.2 疲劳寿命与抗冲击性能的评估
 - 5.2.2.1 循环加载试验方法
 - 5.2.2.2 冲击韧性与断裂行为分析
- 5.3 硬质合金模具的热性能分析
 - 5.3.1 热稳定性与热疲劳性能分析
 - 5.3.2 硬质合金模具的温度场与热应力分析
 - 5.3.2.1 有限元模拟方法
 - 5.3.2.2 热应力分布与裂纹预测
- 5.4 硬质合金模具的质量控制与检测技术
 - 5.4.1 显微结构与表面质量的检测方法
 - 5.4.2 模具精度与公差控制技术
 - 5.4.2.1 三坐标测量与光学检测
 - 5.4.2.2 无损检测技术的应用
- 5.5 硬质合金模具的生命周期管理与性能优化
 - 5.5.1 服役过程性能退化监测

版权与免责声明

5.5.2 性能优化途径与再制造技术

第六章 硬质合金模具的应用

- 6.1 硬质合金模具在注塑成型中的应用
 - 6.1.1 注塑模具的硬质合金材料选择与应用
 - 6.1.1.1 高耐磨注塑模具的硬质合金选型
 - 6.1.1.2 光学级与精密结构件注塑中的表现
 - 6.1.2 硬质合金模具在高精度注塑中的表现
 - 6.1.2.1 尺寸稳定性与表面质量控制
 - 6.1.2.2 模具寿命与生产效率提升
- 6.2 硬质合金模具在压铸中的应用
 - 6.2.1 压铸模具的设计要求与硬质合金模具的优势
 - 6.2.2 高温合金压铸中硬质合金模具的性能
 - 6.2.2.1 硬质合金模具在铝合金与锌合金压铸中的应用
 - 6.2.2.2 硬质合金模具的高温抗软化与抗热裂性能
- 6.3 硬质合金模具在冷、热锻造中的应用
 - 6.3.1 锻模设计的硬质合金材料选择
 - 6.3.2 硬质合金模具在高温环境下的表现与优化
 - 6.3.2.1 热锻模的热疲劳抵抗能力
 - 6.3.2.2 表面处理对锻造寿命的延长
- 6.4 硬质合金模具在粉末冶金成型中的应用
 - 6.4.1 粉末冶金模具的硬质合金材料特性
 - 6.4.2 硬质合金模具的耐磨性与耐腐蚀性能
 - 6.4.2.1 粉末压制模具的致密化过程
 - 6.4.2.2 脱模阻力与模具寿命分析
- 6.5 硬质合金模具在特种制造工艺中的应用
 - 6.5.1 激光成型与增材制造中的硬质合金模具应用
 - 6.5.2 3D 打印技术中硬质合金模具的挑战与解决方案

第七章 硬质合金模具的失效分析与维修

- 7.1 硬质合金模具的失效模式与机制
 - 7.1.1 硬质合金模具的磨损失效
 - 7.1.1.1 磨粒磨损与粘着磨损的微观机制
 - 7.1.1.2 磨损形貌特征与影响因素
 - 7.1.2 硬质合金模具的疲劳与热裂纹失效分析
 - 7.1.2.1 热疲劳裂纹的萌生与扩展路径
 - 7.1.2.2 机械疲劳与复合疲劳机制
 - 7.1.3 腐蚀与化学反应导致的硬质合金模具失效
 - 7.1.3.1 成型介质引起的化学腐蚀
 - 7.1.3.2 高温氧化与脱碳失效
- 7.2 硬质合金模具的失效诊断与检测方法
 - 7.2.1 无损检测技术在硬质合金模具失效分析中的应用

版权与免责声明

- 7.2.1.1 超声、涡流与磁粉检测方法
- 7.2.1.2 X射线与工业CT在内部缺陷检测中的作用
- 7.3 硬质合金模具的维修与再生技术
 - 7.3.1 焊接与修补技术的应用
 - 7.3.1.1 硬质合金专用焊接材料与工艺
 - 7.3.1.2 焊后热处理与性能恢复
 - 7.3.2 硬质合金模具的表面处理与重修复技术
 - 7.3.2.1 激光熔覆与电刷镀修复
 - 7.3.2.2 涂层剥离与重新涂覆工艺
- 7.4 硬质合金模具的使用寿命延长策略与技术
 - 7.4.1 合理选材与设计优化
 - 7.4.2 表面强化与润滑技术
 - 7.4.3 服役条件控制与维护规范

第八章 硬质合金模具的市场竞争与未来发展

- 8.1 硬质合金模具的同类竞品分析
 - 8.1.1 高速钢模具与硬质合金模具的优劣势对比
 - 8.1.2 陶瓷模具与硬质合金模具的优劣势对比
 - 8.1.3 合金钢模具与硬质合金模具的差异性分析
 - 8.1.4 复合材料模具的崛起与硬质合金模具的竞争关系
 - 8.1.5 未来新型材料（如碳化硅、超硬合金等）与硬质合金模具的竞争态势
- 8.2 硬质合金模具如何应对当下高钨价情况
 - 8.2.1 高钨价对硬质合金模具生产成本的影响
 - 8.2.2 钨在硬质合金中的含量及其对成本的影响
 - 8.2.3 钨价格波动对硬质合金模具供应链的挑战与调整策略
 - 8.2.4 提高硬质合金模具性价比的技术途径
 - 8.2.5 高钨价下硬质合金模具生产商如何通过材料创新应对成本压力
 - 8.2.6 高钨价背景下，如何优化硬质合金模具的生产工艺以降低成本
- 8.3 2025年以来的高钨价对硬质合金模具行业的冲击、影响与转型建议
 - 8.3.1 高钨价的市场影响与产业链压力
 - 8.3.2 钨资源供应链的紧张与硬质合金模具企业的应对策略
 - 8.3.3 高钨价下的硬质合金模具行业转型：向高附加值产品转型
 - 8.3.4 环保与资源节约：硬质合金模具行业如何实现绿色转型
 - 8.3.5 国际市场对高钨价的反应与硬质合金模具的出口前景
- 8.4 硬质合金模具行业的未来趋势与发展方向
 - 8.4.1 高性能硬质合金模具的发展趋势：从传统材料到智能材料
 - 8.4.2 创新与研发：硬质合金模具在自动化、精密化方向的技术进步
 - 8.4.3 硬质合金模具在新兴工业的应用前景
 - 8.4.4 未来硬质合金模具的定制化与个性化生产趋势

附录 硬质合金模具术语表

参考文献

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

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！

采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



版权与法律责任声明

第一章 硬质合金模具概述

1.1 硬质合金模具的定义

硬质合金模具是指以硬质合金材料作为主要构成要素，用于实现材料成形加工的专用工具。在工业制造领域中，这种模具通过粉末冶金工艺制备而成，主要服务于金属塑性成形、粉末压制以及拉伸等工艺过程。硬质合金模具的出现源于材料科学的进步，它将高硬度颗粒与金属粘结相相结合，形成一种复合材料体系，从而适应多种成形作业的要求。这种模具在实际应用中能够支持批量生产，并帮助维持加工过程的稳定运行。

1.1.1 硬质合金模具的化学组成定义

硬质合金模具的化学组成以硬质相和粘结相为基本框架。硬质相主要采用碳化钨（WC），这种成分赋予材料较高的硬度和耐磨特性。粘结相则以钴（Co）为主，通过液相烧结方式将硬质相颗粒紧密连接起来，形成均匀的微观结构。在特定配方中，还可以引入少量其他碳化物成分，例如碳化钛（TiC）或碳化钽（TaC），以便根据加工条件对材料的综合性能进行调节。整体而言，硬质合金的化学组成比例会依据模具的具体用途进行优化，从而在硬度与韧性之间形成合理的匹配。这种组成方式使得硬质合金模具在微观层面呈现出颗粒分布均匀、相界面结合良好的特点，为后续的成形作业提供材料基础。

1.1.2 硬质合金模具与传统模具的区别

硬质合金模具与传统模具在材料选择和性能表现上存在一定差异。传统模具通常以工具钢或合金钢为主要原料，这些材料在机加工阶段具有较好的可加工性，便于制备复杂几何形状。相比之下，硬质合金模具采用复合材料体系，其硬质相含量较高，因此在耐磨性能方面表现出相应特点。传统模具在长期使用过程中可能出现表面磨损或尺寸变化，而硬质合金模具则能够在类似条件下保持相对稳定的工作状态。在热环境影响下，传统模具的强度可能随温度升高而有所调整，硬质合金模具则呈现出较低的热膨胀系数，这有助于减小成形件的尺寸波动。此外，两种模具在成本结构上也有所不同：传统模具的初始制备费用一般较低，而硬质合金模具的材料投入相对较高，但其在生产周期内的综合表现能够适应高频次作业的需求。总体来看，这些差异源于材料体系的不同选择，使得硬质合金模具在特定成形场景中成为一种可供参考的选项。

1.1.3 硬质合金模具的结构组成

硬质合金模具的结构组成一般分为工作部分、支撑部分以及辅助系统三个主要层面。工作部分直接与被加工材料接触，通常由硬质合金材料制成，承担主要的成形、挤压或拉伸任务，其表面经过精密研磨以确保轮廓准确。支撑部分则多采用钢制本体，提供整体的刚度和强度支撑，避免工作部分在受力过程中发生过度变形。在许多设计方案中，硬质合金以镶块或嵌件的形式安装于钢制模具基体之内，这种组合方式既发挥了硬质合金的性能优势，又便于整体结构的装配与维护。辅助系统包括冷却通道、顶出机构以及定位元件等，这些部件共同确保模具在循环作业中维持温度均衡和动作协调。冷却通道的设计有助于控制模具温度分布，

版权与免责声明

减少热应力积累；顶出机构则负责将成形件平稳取出，降低损伤风险。整个结构布局需要考虑应力分布和热传导路径，以适应不同成形工艺的节奏要求。通过这样的结构安排，硬质合金模具能够在工业生产线上实现持续运行，并支持多种产品规格的切换。

1.1.3.1 WC 硬质相与 Co 粘结相的组成关系

在硬质合金模具的材料体系中，碳化钨硬质相与钴粘结相通过特定的组成方式相互结合，形成复合结构。碳化钨颗粒作为硬质相，提供主要的承载能力，而钴相则围绕这些颗粒分布，起到连接作用。这种关系体现在烧结过程中，钴相在高温下呈现液态，包裹碳化钨颗粒并促进致密化。颗粒的尺寸和分布会影响钴相的流动路径，进而影响整体微观组织的均匀程度。钴相的含量调节能够改变硬质相颗粒之间的间距，形成不同的连接网络。

碳化钨硬质相的晶体结构与钴粘结相的界面结合是组成关系的核心部分。碳化钨颗粒通常呈现棱柱状或不规则形态，其表面与钴相形成良好润湿界面。这种界面特性有助于应力在两相之间传递，避免局部集中。钴相在冷却后可能存在不同晶型分布，这与碳化钨颗粒的尺寸和烧结条件相关联。颗粒较大的碳化钨往往对应较宽的钴相区域，而细小颗粒则使钴相分布更为分散，形成更紧密的网络结构。

两种相的组成比例关系还体现在烧结过程中的相变行为上。钴相能够溶解少量钨和碳元素，这会调整其自身的晶格参数和力学响应。碳化钨颗粒在液相钴中的溶解与析出过程，影响最终的颗粒尺寸和形状。这样的动态平衡使得硬质相与粘结相在微观层面实现相互适应，从而支持模具在成形作业中的反复加载。整体而言，这种组成关系通过控制颗粒间距和界面状态，来协调材料的综合行为。

在实际模具设计中，工程师根据加工对象的特性调整碳化钨与钴的组成匹配，以适应不同的作业节奏。这种调整涉及颗粒制备、混合比例以及烧结参数的优化，最终形成适合特定成形要求的微观组织。通过这样的方式，硬质合金模具能够在多种工业场景中发挥相应作用。

1.1.3.2 添加剂与微观结构对整体性能的影响

添加剂的引入为硬质合金模具的微观结构提供了调节手段，这些物质通常以少量形式参与材料制备过程。常见添加剂如其他碳化物类型，能够在烧结阶段影响碳化钨颗粒的生长行为，使颗粒尺寸分布趋于均匀。微观结构的变化主要表现为颗粒边界的调整和粘结相区域的形态改变，这些改变进一步关联到材料的整体响应特性。

微观结构中的颗粒尺寸和分布状况与添加剂的作用密切相关。当添加剂抑制颗粒异常生长时，整体组织呈现出更为一致的特征，粘结相则以较薄层形式分布在颗粒之间。这种结构安排有助于在受力过程中分散载荷，避免单一区域的过度应力。添加剂还可能改变粘结相的晶体类型比例，这会影响到材料的变形能力和能量吸收方式，从而在不同成形条件下表现出相应的行为差异。

添加剂对微观结构的影响延伸到界面特性和相稳定性方面。某些添加剂能够促进颗粒与粘结

相之间的界面优化，减少缺陷的形成。微观结构的均匀性提升后，模具在循环作业中的响应更为平稳，表面磨损模式也趋于可控。这样的结构特征使得硬质合金模具在处理多种材料时，能够维持相对稳定的工作轮廓。

1.2 硬质合金模具的发展历程

硬质合金模具的发展历程反映了材料科学与制造技术相互促进的过程。从最初的简单应用到后续的性能优化，这种模具经历了多个阶段的演进。每一次技术调整都围绕着加工需求的变化展开，使其逐渐适应更广泛的工业成形场景。随着工艺的完善，硬质合金模具的结构和组成方式也在不断调整，以满足不同生产条件下的作业要求。

1.2.1 早期钨钴硬质合金模具的出现与应用

早期钨钴硬质合金模具的出现源于粉末冶金技术的初步发展。当时研究人员将碳化钨粉末与钴粉末混合，通过压制和烧结工艺制备出复合材料块体，并将其加工成模具工作部件。这种组合方式首次将高硬度颗粒与金属粘结相结合，形成适合成形作业的工具。在初期阶段，这种模具主要应用于金属丝的拉拔以及简单粉末压制工艺，帮助实现材料在室温或较低温度下的塑性变形。

随着生产实践的积累，早期钨钴硬质合金模具开始在拉伸模和冲压模领域得到应用。钨钴体系的组成特点使模具表面能够承受一定的摩擦作用，从而在连续作业中维持工作轮廓的相对稳定。相比当时常见的钢制模具，钨钴硬质合金模具在处理硬质材料时表现出较低的磨损速率，这促使其在电缆制造和小型五金件生产中逐步推广。模具的设计多采用整体或简单镶嵌结构，便于当时的机械加工条件进行装配和更换。

在应用过程中，早期钨钴硬质合金模具的性能表现与烧结工艺的控制水平密切相关。烧结温度和保温时间的调整影响了钴相的分布均匀性，进而关系到模具在反复加载下的行为。一些生产企业开始根据具体产品形状定制模具尺寸，使其适应不同规格的成形件。这一阶段的实践为后续材料改进积累了经验，也让工业界认识到硬质合金在模具领域的潜在价值。

早期阶段的应用还推动了相关设备和工艺的配套发展。模具安装方式从简单固定逐步过渡到可调节结构，以适应生产线节奏的变化。通过这些应用，钨钴硬质合金模具在工业制造中确立了一定的位置，并为材料体系的进一步优化奠定了基础。

1.2.2 细晶与超细晶硬质合金模具的技术突破

细晶与超细晶硬质合金模具的技术突破主要体现在碳化钨颗粒尺寸的控制上。通过改进粉末制备方法和抑制颗粒生长技术，研究人员实现了碳化钨晶粒从微米级向亚微米甚至更小尺度的转变。这种晶粒细化使硬质相分布更为密集，粘结相层厚度相应减小，从而改变了材料的微观组织特征。

在技术实现方面，细晶硬质合金模具的制备涉及球磨工艺的优化和添加抑制剂的使用。这些

措施有助于减少烧结过程中的晶粒长大现象,使最终模具的工作部分呈现出均匀的细小颗粒结构。超细晶体系则进一步降低了平均晶粒尺寸,这种模具在处理高强度材料时,能够以较为平稳的方式传递应力,减少局部变形风险。

细晶与超细晶硬质合金模具的应用范围逐步扩展到精密冲压和复杂形状拉伸领域。模具表面经过精细研磨后,能够形成光滑的工作轮廓,这有助于提高成形件的表面质量。技术突破还体现在模具寿命的延长方面,在连续生产线上,这种模具表现出相对一致的磨损特征,便于生产计划的安排。

这一阶段的发展还促进了模具结构设计的调整。细晶材料较高的硬度特性促使工程师在支撑部分采用更合理的钢基体配合,以平衡整体刚度。超细晶模具则在某些高精度作业中展现出良好的尺寸保持能力,支持多品种小批量生产模式的切换。通过这些技术进步,硬质合金模具的适用场景得到拓展,并在工业成形领域中扮演更灵活的角色。

1.2.3 多元添加剂硬质合金模具的发展阶段

多元添加剂硬质合金模具的发展阶段以引入多种碳化物或金属元素为特征,这些添加剂在材料配方中发挥调节作用。常见添加组分包括钛、钽或铌的碳化物,它们与钨钴基体共同作用,影响烧结过程中的相行为和晶粒演化。这种多元体系的出现使硬质合金模具的组成更加多样化,能够根据不同成形条件进行针对性调整。

在发展过程中,多元添加剂的配比优化成为研究重点。添加剂的种类和含量会改变粘结相的润湿特性以及硬质相的界面状态,从而形成具有特定微观特征的组织结构。一些配方侧重于提升材料的抗热疲劳能力,另一些则关注改善断裂韧性,这些调整使模具在高温成形或高频冲击作业中表现出相应的适应性。

多元添加剂硬质合金模具的应用推动了涂层技术与基体材料的结合。在某些设计中,模具工作表面增加薄层保护,以进一步减少与被加工材料的交互作用。结构上,这种模具往往采用模块化镶块形式,便于局部更换和维护,支持生产线的高效运行。

这一阶段还体现了制造工艺与材料开发的协同进步。热等静压和真空烧结等技术的应用,有助于降低材料内部的气孔率,使多元添加剂体系的性能得到更充分的发挥。随着工业需求的多样化,硬质合金模具的开发逐渐形成系列化产品,以适应从常规拉伸到精密成形的不同要求。通过持续的配方探索,这种模具在材料成形领域中的作用得到进一步体现。

1.3 硬质合金模具的基本特点

硬质合金模具的基本特点体现在材料组成与结构设计的结合方面。这种模具以碳化钨为主要硬质相,通过钴或其他金属作为粘结相,形成复合体系。材料体系使模具在加工过程中呈现出较高的硬度水平,同时在一定范围内保持相应的韧性表现。结构上,工作部分多采用硬质合金材料,而支撑部分则与钢制基体配合,形成整体稳定的配置。

版权与法律责任声明

模具的耐磨特性是其在成形作业中表现出的一个方面。硬质相颗粒的均匀分布有助于减少表面在摩擦作用下的物质流失，使工作轮廓在较长作业周期内保持相对一致。热膨胀系数较低的特点使模具在温度变化环境中尺寸变动较小，这在精密成形过程中有助于控制产品的几何精度。导热性能也使热量能够在模具内部相对均匀地传递，减少局部过热现象的出现。

在机械性能方面，硬质合金模具能够承受一定的压缩载荷和循环应力。粘结相的存在为硬质相提供了一定的缓冲作用，使材料在受力时表现出一定的变形能力，而不至于发生脆性断裂。表面经过研磨处理后，模具与被加工材料之间的接触状态较为平稳，这有助于降低成形过程中的附加阻力。整体结构设计还考虑了应力分布的均衡性，以适应不同作业节奏的要求。

硬质合金模具的加工适应性体现在其能够支持多种成形方式的切换。模具的几何形状可以根据产品规格进行调整，镶嵌式结构便于局部维护和更换。这些特点使硬质合金模具在工业生产中成为一种可供选择的工具，通过合理的配置来配合不同的制造流程。随着材料制备技术的进步，其基本特点也在持续优化，以适应更多样化的生产场景。

1.4 硬质合金模具的应用领域

硬质合金模具的应用领域覆盖了多个材料成形加工场景。其材料体系和结构特点使其适合在需要承受摩擦和载荷的环境中工作。在不同工业部门中，这种模具根据具体工艺要求进行设计和调整，支持批量或连续生产作业。应用范围的扩展也反映了制造技术对模具性能的多样化需求。

1.4.1 金属塑性成形领域中的应用

金属塑性成形领域中，硬质合金模具常用于拉伸、挤压和冲压等工艺过程。在拉伸作业中，模具的工作部分与金属材料直接接触，通过逐步减径的方式实现线材或管材的成形。硬质合金的表面特性有助于维持稳定的摩擦状态，使金属流动较为均匀，减少表面缺陷的产生。模具的设计通常采用锥形或阶梯形通道，以适应不同变形量的要求。

在挤压成形过程中，硬质合金模具承受较高的单位压力。工作镶块安装在钢制外套内，形成复合结构以分散载荷。这种配置使模具能够在处理铝合金、铜合金等材料时保持工作尺寸的相对稳定。冲压作业中，硬质合金模具多用于制造小型精密零件，模具的刃口或凹模部分经过精细加工，确保冲裁边缘的清晰度。循环作业时，模具的热管理通过冷却通道得到辅助，以控制温度分布。

金属塑性成形中的应用还涉及模具的模块化设计。不同规格的产品可以通过更换硬质合金工作部件来实现快速切换，这在汽车零部件和电子元件生产中较为常见。模具的安装精度影响成形件的尺寸一致性，因此定位元件的设计需要与硬质合金部分的刚度相匹配。通过这些应用方式，硬质合金模具支持了金属材料在室温或温热条件下的高效成形。

在实际生产线上，硬质合金模具的应用促进了工艺参数的优化。操作人员根据材料流动行为调整模具间隙和润滑条件，以获得预期的产品形状。这种实践经验反过来也为模具结构的进

一步完善提供了参考，使其在金属塑性成形领域中持续发挥作用。

1.4.2 粉末冶金与陶瓷成型领域中的应用

粉末冶金领域中，硬质合金模具主要服务于粉末压制和烧结前的成形环节。模具的工作腔体由硬质合金材料构成，能够承受粉末在高压下的致密化过程。压制时，上下冲头与凹模配合，将松散粉末转化为具有一定形状和密度的坯体。硬质合金的刚度特性有助于维持腔体尺寸的稳定，减少粉末在流动中产生的密度梯度。

陶瓷成型作业中，硬质合金模具常用于干压或等静压成形工艺。模具表面光洁度较高，使陶瓷粉料在成型后易于脱模，降低坯体表面损伤的风险。在生产电子陶瓷或结构陶瓷部件时，模具的几何精度直接关系到最终产品的尺寸公差。一些复杂形状的陶瓷件采用分体式硬质合金模具，便于装配和拆卸。

粉末冶金与陶瓷成型中的应用还包括模具的温度控制设计。部分工艺需要在加热条件下进行，硬质合金模具的热稳定性使腔体在温度变化时保持较低的膨胀量。这种模具的支撑结构通常与加热装置兼容，确保整体作业的连续性。在多腔模具设计中，硬质合金镶块的均匀分布有助于各腔体受力一致，提高生产效率。

这些领域中的应用推动了模具表面处理技术的结合。例如，通过抛光或特定涂层调整模具与粉料之间的摩擦特性，以优化脱模过程。实际使用中，模具的维护周期根据粉末种类和压制参数进行安排，以保持工作表面的状态。随着粉末冶金和陶瓷工业的发展，硬质合金模具在这些领域的配置方式也在逐步丰富，支持更多产品类型的成形加工。

1.4.3 塑料与橡胶精密成型领域中的应用

塑料与橡胶精密成型领域中，硬质合金模具主要用于注塑、挤出和压缩成型等工艺过程。在注塑成型中，模具的型腔和型芯部分采用硬质合金材料制成，能够承受熔融塑料在高压下的流动冲击。硬质合金表面经过精密抛光处理，使塑料熔体在填充过程中保持平稳流动，减少表面流痕或气泡的形成。模具的冷却通道设计与硬质合金部分的导热特性相配合，帮助控制型腔温度分布，从而缩短冷却时间并提高生产节拍。

橡胶精密成型作业中，硬质合金模具常应用于热压硫化或注压成型。模具工作表面与橡胶材料直接接触，其耐磨和耐热特性使模具在反复加热加压循环中维持轮廓稳定性。一些精密橡胶密封件或电子封装部件的生产采用分体式硬质合金镶块结构，便于复杂形状的脱模和尺寸控制。模具的定位系统确保上下模合模精度，减少飞边产生。

在塑料与橡胶精密成型中，硬质合金模具的应用还体现在多腔模具的设计上。多个硬质合金型腔均匀布置在钢制模板内，支持同时生产多个相同或不同规格的产品。这种配置方式提高了单位时间的产量，同时保持各腔体成形条件的相对一致性。实际生产过程中，操作人员根据塑料或橡胶的流动行为调整模具温度和压力参数，以适应不同材料配方的要求。

版权与免责声明

随着精密成型技术的发展，硬质合金模具在这一领域的使用逐渐扩展到光学部件和医疗器械相关产品的制造。模具的尺寸保持能力和表面质量支持高公差要求的成形作业。通过合理的结构安排和维护实践，硬质合金模具在塑料与橡胶精密成型领域中为稳定生产提供了支持。

1.4.4 特种材料加工领域中的应用

特种材料加工领域中，硬质合金模具应用于某些高性能合金或复合材料的成形环节。这些材料往往具有较高的强度或特殊流动特性，模具需要承受相应的载荷和摩擦作用。在挤压或拉伸工艺中，硬质合金工作部分帮助实现材料的逐步变形，同时维持通道尺寸的稳定。模具的支撑结构与硬质合金镶块结合，形成能够分散应力的整体配置。

在特种材料粉末压制过程中，硬质合金模具的腔体设计适应粉料的高压致密化要求。工作表面特性减少粉料与模具之间的粘附现象，便于坯体完整取出。一些涉及温热成形的应用中，硬质合金模具的热稳定性使型腔在温度变化时保持较低的尺寸变动，支持工艺参数的控制。

特种材料加工中的应用还包括模具的模块化组合形式。不同硬质合金成分的镶块可根据材料特性进行选配，便于生产线上的快速调整。这种方式在小批量、多品种生产中体现出灵活性。模具的辅助系统如顶出机构和加热元件与硬质合金部分协调工作，确保作业过程的连续性。

通过在特种材料加工领域的实践，硬质合金模具的结构和组成得到进一步验证。其应用方式根据加工对象的具体要求进行优化，支持工业生产中对新型材料的成形需求。随着相关工艺的进步，这种模具在该领域的配置也在不断丰富。

1.5 硬质合金模具与其他材料模具的比较

硬质合金模具与其他材料模具的比较主要围绕材料体系、性能表现和适用场景展开。不同模具材料的选择取决于加工对象的特性、生产批量以及经济因素。硬质合金模具在某些方面表现出与传统模具材料的差异，这些差异源于其复合材料构成方式。在实际工程中，通过对比分析可以为具体应用提供参考依据。

1.5.1 硬质合金模具与高速钢模具的性能对比

硬质合金模具与高速钢模具在硬度水平和耐磨表现上存在差异。硬质合金模具的硬质相含量较高，使其在摩擦环境下表面物质流失速率相对较低，而高速钢模具在机加工阶段具有较好的可加工性，便于制备复杂几何形状。在连续作业中，硬质合金模具的工作轮廓保持时间通常较长，高速钢模具则可能需要更频繁的维护以恢复刃口状态。

热性能方面，硬质合金模具的热膨胀系数较低，这在温度波动环境中有助于减小尺寸变化，而高速钢模具在较高温度下强度保留能力有其自身特点。两种模具的韧性表现也不同，高速钢模具在冲击载荷下可能表现出一定的缓冲能力，硬质合金模具则通过粘结相调节来适应循环应力。成本结构上，高速钢模具的初始制备费用一般较低，硬质合金模具的材料投入相对较高，但在长周期生产中表现出不同的综合表现。

版权与免责声明

结构设计对比显示，硬质合金模具常采用镶块形式与钢基体配合，而高速钢模具多为整体结构。这种差异影响装配和维护的便利性。在精密成形场景中，硬质合金模具的尺寸稳定性为产品公差控制提供一种选择，高速钢模具则在一般加工条件下仍有广泛应用。通过这些性能方面的比较，工程人员可以根据作业条件选择合适的模具材料。

1.5.2 硬质合金模具与陶瓷模具的性能对比

硬质合金模具与陶瓷模具在脆性程度和耐磨特性上有所不同。硬质合金模具通过金属粘结相提供一定的韧性支持，而陶瓷模具主要依靠离子键或共价键结合，整体呈现较高的硬度但断裂敏感性相对明显。在高温环境下，陶瓷模具的化学稳定性较强，硬质合金模具则在机械载荷下的响应方式有其特点。

导热性能对比方面，硬质合金模具能够较快地传递热量，这有助于控制模具温度分布，而陶瓷模具的导热系数通常较低，可能需要在结构中增加辅助冷却措施。两种模具的加工难度存在差异，陶瓷模具的成形和烧结工艺有其特定要求，硬质合金模具则通过粉末冶金路线制备。表面处理，硬质合金模具与被加工材料的接触摩擦行为相对平稳，陶瓷模具在某些无润滑条件下也有应用。

在应用场景中，硬质合金模具适合承受循环机械应力的场合，陶瓷模具则在特定化学环境或极高温作业中展现适应性。模具寿命的表现与加工对象和工艺参数相关，两种材料体系均有各自的优化空间。通过性能对比可以看出，硬质合金模具与陶瓷模具在不同成形领域中形成互补关系，为工业生产提供多样化的工具选择。

1.5.3 硬质合金模具与合金钢模具的性能对比

硬质合金模具与合金钢模具在耐磨性和刚度表现上存在一定差异。硬质合金模具的复合体系使表面在摩擦作用下表现出较低的磨损速率，而合金钢模具通过热处理工艺获得良好的综合力学性能，便于大尺寸模具的制备。在长期作业中，硬质合金模具的工作部分尺寸变化相对缓慢，合金钢模具则可能通过表面硬化处理来延长使用周期。

热膨胀和导热特性方面，硬质合金模具的数值一般较低，这在精密成形中有助于维持几何精度，而合金钢模具的热响应与其合金成分和热处理状态相关。韧性对比显示，合金钢模具在较大冲击或弯曲载荷下有较好的吸收能力，硬质合金模具则依靠粘结相分布来协调硬质相的行为。结构上，硬质合金模具多采用嵌件形式，合金钢模具常为整体或堆焊结构，这影响了维修更换的便利程度。

成本与适用性对比中，合金钢模具的初始投入和加工周期通常具有优势，硬质合金模具则在高频次或高磨损场景中体现不同的综合表现。在实际选择过程中，工程人员会综合考虑生产批量、产品精度要求以及维护条件。通过这些方面的比较，硬质合金模具与合金钢模具在材料成形领域中各自占据相应的位置，并根据具体需求进行合理配置。

第二章 硬质合金模具的特性

硬质合金模具的特性主要围绕其材料体系的物理、机械以及加工相关表现展开。这些特性源于碳化钨硬质相与钴粘结相的复合结构，以及可能的多元添加剂调节。在工业成形应用中，这些特性影响模具的工作稳定性、尺寸控制和热管理方式。随着材料配方的优化，硬质合金模具的特性逐步适应多样化的加工条件。

2.1 硬质合金模具的物理特性

硬质合金模具的物理特性包括密度、热膨胀系数和热导率等方面，这些参数共同作用于模具在成形过程中的响应行为。物理特性的表现与硬质相颗粒尺寸、粘结相含量及烧结工艺相关。在实际工程中，了解这些特性有助于进行模具设计和工艺参数匹配，以支持稳定的生产作业。

2.1.1 硬质合金模具的密度

硬质合金模具的密度主要由碳化钨和钴的组成比例影响。碳化钨的密度较高，而钴的密度相对较低，因此整体密度随粘结相含量的增加而呈现相应变化。在钨钴体系中，密度数值通常处于较高范围，这使得模具整体质量较大，在安装和搬运时需要考虑支撑结构的承载能力。

密度特性影响模具的惯性表现和振动响应。在高速成形作业中，较高的密度有助于维持结构的稳定性，减少因外部扰动引起的位移。不同牌号的硬质合金模具通过调整碳化钨颗粒分布和粘结相比例，实现密度范围的调节，以适应特定产品的重量平衡要求。工程人员在模具基体设计时，往往结合钢制支撑部分来优化整体质量分布。

在粉末冶金制备过程中，烧结致密化程度直接关系到最终密度值。均匀的微观组织有助于接近理论密度，减少内部孔隙对性能的潜在影响。这种物理特性使硬质合金模具在精密成形领域中提供可靠的刚性基础，支持产品尺寸的控制。

通过对密度特性的综合考虑，硬质合金模具能够在多种工业场景中实现合理的配置。其在材料成形过程中的表现也为后续的结构优化提供参考。

2.1.2 硬质合金模具的热膨胀系数

硬质合金模具的热膨胀系数数值一般处于较低水平，这与碳化钨硬质相的低膨胀特性相关。钴粘结相的引入会使整体热膨胀系数发生一定调整，但仍保持在相对稳定的范围内。在温度变化环境中，这种特性有助于减小模具工作部分的尺寸变动，从而支持成形件的精度控制。

热膨胀系数的影响体现在模具与被加工材料之间的匹配上。当作业温度波动时，较低的膨胀系数可以减少因热应力导致的界面不协调。在精密拉伸或冲压工艺中，这一特点有助于维持模具通道或型腔的轮廓稳定性，降低产品公差超差的风险。

不同组成体系的硬质合金模具，其热膨胀系数会随添加剂种类和含量呈现细微变化。工程师

版权与法律责任声明

在设计多材料组合模具时，需要考虑各部分热膨胀的协调性，以避免装配间隙或应力集中。实际应用中，通过合理控制作业温度范围，可以进一步发挥这一物理特性的优势。

硬质合金模具的热膨胀系数特性使其在循环加热冷却的成形过程中表现出相对平稳的行为。这种表现为工业生产线的连续运行提供支持，并为模具寿命的延长创造条件。

2.1.3 硬质合金模具的热导率

硬质合金模具的热导率处于中等偏高范围，能够促进热量在模具内部的传递。碳化钨颗粒和钴共同构成导热通道，颗粒尺寸和分布均匀性对热导率数值有一定影响。在成形作业中，较高的热导率有助于快速分散接触区域产生的热量，减少局部温度梯度。

热导率特性在冷却系统设计中发挥作用。模具内部的冷却通道可以借助这一物理性能实现更均匀的温度场分布，从而缩短循环时间并提高生产效率。在处理热塑性材料或温热成形工艺时，良好的热传导使模具表面温度保持在适宜区间，降低热疲劳风险。

粘结相含量和微观结构调整能够对热导率进行一定范围的调节。细晶或超细晶体系的热导率表现与粗晶体系存在差异，工程人员根据具体工艺需求选择合适牌号。实际作业中，表面处理和润滑条件也会间接影响热量传递效率。

硬质合金模具的热导率特性支持其在多种成形领域中的应用。通过与辅助冷却措施的结合，这一物理性能有助于维持模具工作的连续性和产品品质的稳定性。随着材料技术的进步，热导率的优化方向也在持续探索中。

2.1.4 硬质合金模具的比热容

硬质合金模具的比热容反映了材料在温度变化过程中吸收或释放热量的能力。这一物理特性主要由碳化钨硬质相和钴粘结相的组成比例影响。碳化钨本身的比热容数值相对较低，而钴相的引入会使整体比热容呈现相应调整。在室温条件下，典型钨钴体系的比热容处于一定范围内，随着钴含量的增加，比热容数值往往有所上升。

比热容特性在成形作业的热管理中发挥作用。当模具与高温材料接触时，较低的比热容意味着材料温度升高所需热量相对较少，这有助于快速达到热平衡状态。在循环过程中，这种特性与冷却系统配合，能够影响模具温度场的建立和恢复速度。细晶或超细晶硬质合金的比热容表现与粗晶体系存在细微差异，工程师在选择牌号时会考虑这一因素与工艺节奏的匹配。

温度升高时，硬质合金模具的比热容通常呈现逐渐增加的趋势，这与材料内部晶格振动和相行为相关。多元添加剂的加入也会对比热容产生调节作用，使其在特定温度区间内的响应发生变化。在精密成形或温热加工中，合理的比热容水平有助于减少热应力积累，维持模具结构的稳定性。

通过对比热容特性的了解，硬质合金模具的设计可以更好地适应不同作业环境的热负荷。实

际应用中，这一物理参数与热导率、热膨胀系数等共同作用，为生产过程的温度控制提供参考依据。

2.1.5 硬质合金模具的电导率

硬质合金模具的电导率体现了材料传导电流的能力，其数值与微观结构和组成密切相关。碳化钨硬质相本身导电性能有限，而钴粘结相作为金属相形成导电网络，使整体电导率达到一定水平。钴含量的增加通常会提升电导率，因为粘结相提供了更多电子传导路径。在典型钨钴体系中，电导率处于中等范围，低于纯金属但高于许多陶瓷材料。

电导率特性在某些特殊加工场合中受到关注，例如涉及电火花或电化学辅助的成形工艺。较低的电阻率有助于减少接触区域的能量损耗，并影响电流在模具内部的分布情况。晶粒尺寸和分布均匀性也会对电导率产生影响，细小均匀的颗粒结构往往对应更稳定的导电行为。

添加其他碳化物成分时，电导率可能发生调整。某些添加剂会改变界面状态或粘结相的电子结构，从而使整体电导率在一定范围内变化。在模具设计中，电导率与热导率有时存在关联，二者共同影响能量传递方式。实际作业条件下，表面状态和温度变化也会对电导率的表现产生一定作用。

硬质合金模具的电导率特性为其在工业应用中的多样化配置提供了一种物理基础。通过合理的材料选择，这一参数能够与具体工艺要求相适应，支持稳定的成形作业。

2.1.6 硬质合金模具的磁性能

硬质合金模具的磁性能主要来源于钴粘结相的铁磁性特征。在室温下，含有钴的硬质合金通常表现出一定的磁响应，能够被磁铁吸引，其磁性强度随钴含量增加而相应变化。碳化钨硬质相本身磁性较弱，整体磁性能由粘结相的含量、分布以及固溶情况共同影响。

磁性能在质量控制和材料表征中具有实际意义。通过测量磁饱和或矫顽力等参数，可以间接评估粘结相的状态和碳含量水平。这种非破坏性检测方式有助于判断烧结过程是否达到预期组织特征。在生产实践中，磁性能数据为牌号一致性和批次稳定性提供参考。

不同组成体系的硬质合金模具，其磁性能存在差异。引入镍等其他粘结元素时，磁性可能减弱或转变为顺磁行为。温度升高到一定范围后，钴相会发生从铁磁到顺磁的转变，居里温度点与合金具体配方相关。在常温作业环境中，磁性能保持相对稳定，不会对常规成形过程产生显著干扰。硬质合金模具的磁性能特性体现了其材料体系的复合特征。这一物理方面与机械性能、热性能相互关联，为工程人员在模具开发和应用中提供多维度考量。通过对磁性能的了解，可以更好地优化材料制备工艺，并在实际生产中实现可靠的质量管理。

2.2 硬质合金模具的力学特性

硬质合金模具的力学特性主要体现在其抵抗变形、承受载荷以及在受力条件下保持完整性的

能力上。这些特性源于碳化钨硬质相与钴粘结相的复合结构，以及烧结过程中形成的微观组织。在实际成形作业中，力学特性直接关系到模具在循环加载下的工作表现和使用稳定性。随着材料体系的优化，力学性能参数能够根据不同加工需求进行一定范围的调节，以适应工业生产的多样化要求。

2.2.1 硬质合金模具的硬度与弹性模量

硬质合金模具的硬度主要来源于碳化钨硬质相的高硬度特征，粘结相的含量和分布对其整体硬度数值产生调节作用。在钨钴体系中，硬度随硬质相比例增加而相应上升，而钴相的存在则在一定程度上平衡硬度与韧性的关系。硬度特性使模具表面在与被加工材料接触时，能够抵抗磨粒磨损和黏着磨损，从而维持工作轮廓的相对稳定。

弹性模量反映了硬质合金模具抵抗弹性变形的能力，其数值通常处于较高范围，这与碳化钨晶体的刚性结构相关。弹性模量较高意味着在承受载荷时，模具的变形量相对较小，这在精密成形工艺中有助于控制产品的几何尺寸。粘结相的含量增加会使弹性模量有所降低，因为金属相的模量低于硬质相。微观结构中颗粒尺寸的细化也会对弹性模量产生影响，细晶组织往往对应更为均匀的应力分布。

在工程实践中，硬度和弹性模量的匹配需要根据具体作业条件进行考虑。较高硬度与适度弹性模量的组合有助于模具在反复加载过程中保持形状稳定性，同时减少局部应力集中。

2.2.2 硬质合金模具的抗弯强度与压缩强度

硬质合金模具的抗弯强度体现了材料在弯曲载荷作用下抵抗断裂的能力，这一特性与粘结相的桥接作用以及硬质相颗粒的均匀分布密切相关。在模具结构中，抗弯强度较高的区域能够更好地承受非均匀载荷，例如在冲压或挤压作业的边缘部位。钴含量在一定范围内的调整可以优化抗弯强度，使材料在受力时表现出一定的塑性变形能力，而不立即发生脆性破坏。

压缩强度是硬质合金模具的重要力学指标之一，其数值较高，适合承受成形过程中常见的单向或多向压力。碳化钨硬质相提供主要的承载骨架，粘结相则通过界面结合传递应力，避免颗粒间产生过大间隙。较高的压缩强度使模具在高压粉末压制或金属挤压等工艺中维持腔体尺寸的稳定，减少因载荷导致的塑性塌陷。

抗弯强度与压缩强度的协调关系影响模具整体的承载能力。在实际设计中，工程师常常通过调整烧结参数和添加剂来平衡这两种强度指标，使模具在复杂应力状态下表现出相对平稳的行为。微观裂纹的萌生与扩展也与这些强度参数相关，均匀的组织结构有助于延缓损伤积累。这样的力学特性组合为硬质合金模具在长期循环作业中的应用提供了基础。

2.2.3 硬质合金模具的断裂韧性与脆性-韧性转变温度

硬质合金模具的断裂韧性描述了材料抵抗裂纹扩展的能力，这一特性主要依赖于钴粘结相的塑性变形和裂纹偏转机制。较高的断裂韧性有助于模具在受到冲击或疲劳载荷时，避免裂纹

快速扩展导致的突发失效。粘结相层厚度和分布状态对断裂韧性有显著影响，适量的钴相能够形成有效的韧化网络，而过低或过高的含量则会使韧性表现发生变化。

脆性-韧性转变温度反映了硬质合金模具在不同温度环境下力学行为的变化趋势。在较低温度区间，材料可能更多地表现出脆性特征，而随着温度升高到一定范围，粘结相的流动性增加，韧性行为逐渐显现。这一转变温度与合金组成、晶粒尺寸以及残余应力状态相关，不同牌号的硬质合金模具其转变温度区间存在差异。

在工业应用中，断裂韧性与脆性-韧性转变温度的综合考虑有助于选择适合作业温度范围的材料体系。对于室温或中温成形工艺，较高的断裂韧性可以提高模具对偶然过载的容忍度。在高温成形场合，则需要关注转变温度是否与工艺温度相匹配，以维持稳定的力学响应。微观结构的优化，如细化晶粒或引入多元添加剂，能够在一定程度上改善韧性表现，同时调整转变温度区间。

2.2.3.1 WC 晶粒尺寸对硬质合金模具断裂韧性的影响

硬质合金模具的断裂韧性与碳化钨晶粒尺寸存在密切关联。晶粒尺寸的变化会改变裂纹在材料内部的扩展路径和能量消耗方式。当碳化钨晶粒处于较细状态时，单位体积内的晶界数量增多，裂纹在传播过程中需要频繁发生偏转或桥接，这在一定程度上消耗更多断裂能量，从而使整体断裂韧性呈现相应提升。细晶组织中的粘结相分布更为均匀，裂纹尖端应力集中得到一定缓解，有助于延缓裂纹的快速扩展。

随着碳化钨晶粒尺寸增大，硬质相颗粒间的间距相应增加，粘结相区域可能形成较宽的连续层。在这种情况下，裂纹有时会沿较大颗粒边界或穿过粘结相区域扩展，能量消耗机制发生改变，断裂韧性数值可能出现一定范围的波动。粗晶结构在承受冲击载荷时，局部应力分布相对集中，裂纹萌生后的扩展阻力可能降低。实际微观观察显示，晶粒尺寸分布的均匀性比单一平均尺寸更能影响韧性表现，不均匀的晶粒会形成局部弱区，增加韧性分散性。

晶粒尺寸对断裂韧性的影响还体现在与烧结工艺的交互作用中。细化晶粒通常需要配合抑制剂使用和优化球磨参数，这会同时调整粘结相的固溶程度和界面结合状态，进一步调控韧性行为。在模具工作部分的设计中，工程师根据成形工艺的载荷类型选择合适晶粒尺寸范围，以平衡断裂韧性与其他力学指标。细晶硬质合金模具在精密冲压等循环应力环境中表现出相对稳定的韧性响应，而在某些高冲击场合则需综合考虑晶粒尺寸的匹配。

通过控制碳化钨晶粒尺寸，硬质合金模具的断裂韧性可以在一定区间内进行调节。这种调节为适应不同工业成形条件提供了材料层面的灵活性，并在长期生产实践中支持模具结构的可靠性。

2.2.3.2 Co 含量对硬质合金模具韧性的调控机制

钴含量对硬质合金模具韧性的调控主要通过改变粘结相的体积比例和分布形态实现。钴作为粘结相，在烧结过程中形成液相包裹碳化钨颗粒，并在冷却后构成连续或半连续网络。当钴

含量处于较低水平时，粘结相层较薄，裂纹扩展时塑性变形区有限，整体韧性表现相对较低。随着钽含量适度增加，粘结相区域扩大，裂纹尖端能够发生更大范围的塑性变形和桥接，从而消耗更多断裂能量，提升材料韧性。

调控机制还涉及钽相与碳化钨界面的结合状态。适宜的钽含量促进良好润湿界面形成，减少界面缺陷，这有助于应力从硬质相向粘结相有效传递，避免局部脆性断裂。钽相中固溶的钨和碳元素会改变其晶体结构和屈服行为，进一步影响韧化效果。在较高钽含量区间，粘结相可能形成较厚的连续层，虽然韧性继续改善，但硬度等其他性能会相应下降，形成性能权衡关系。

微观结构层面，钽含量调控还通过影响碳化钨颗粒的生长行为间接作用于韧性。较高钽含量在烧结时提供更多液相环境，可能导致晶粒 coarsening，改变裂纹偏转频率。实际合金设计中，钽含量的选择往往结合晶粒尺寸控制和添加剂使用，以实现韧性的优化匹配。不同成形工艺对韧性的需求不同，例如高频冲击作业倾向于较高钽含量以增强能量吸收能力，而精密拉伸则需适中钽含量维持综合平衡。

钽含量对韧性的调控体现了硬质合金材料体系的复合特性。通过系统调整这一参数，硬质合金模具能够在多种作业条件下表现出适应性的韧性行为，为工业生产中的稳定运行提供力学基础。

2.2.4 硬质合金模具的高温力学性能与热稳定性

硬质合金模具的高温力学性能表现为其在 elevated 温度环境下维持强度、硬度和韧性的能力。随温度升高，粘结相的软化使整体硬度和强度逐渐降低，但碳化钨硬质相仍能提供主要承载作用，使材料在一定温度区间内保持可用性能。高温下弹性模量和压缩强度会出现一定衰减，而断裂韧性在某些温度范围内可能因粘结相流动性增加而有所改善，形成复杂的温度依赖关系。

热稳定性反映了硬质合金模具抵抗长期高温暴露后性能退化的能力。良好的热稳定性意味着材料在循环加热冷却过程中，微观组织如晶粒生长、相分离或孔隙演化得到有效控制。多元添加剂的引入能够稳定界面结构，减少高温下的扩散行为，从而延长性能保持时间。在温热成形或高温挤压工艺中，热稳定性较高的模具能够维持工作轮廓的准确性，减少因热疲劳导致的表面损伤。

高温力学性能与热稳定性的关联还体现在热应力管理上。较低的热膨胀系数与适中的热导率相结合，有助于减小温度梯度引起的内应力，避免裂纹萌生。实际应用中，模具温度控制系统与材料高温特性的匹配非常关键，不同牌号的硬质合金在高温下的力学响应曲线存在差异，需根据具体工艺温度范围进行选配。

通过高温性能的优化，硬质合金模具在处理需要加热辅助的成形作业时表现出较好的适应性。这种特性支持了其在工业生产中的持续应用，并为材料体系的进一步改进提供了方向。

版权与免责声明

2.3 硬质合金模具的耐磨特性

硬质合金模具的耐磨特性主要来源于碳化钨硬质相的高硬度以及与粘结相形成的复合结构。这种特性使模具表面在与被加工材料发生相对滑动或冲击时，能够抵抗磨粒磨损、黏着磨损和表面疲劳磨损。硬质相颗粒均匀分布形成致密保护层，减少了材料在摩擦作用下的物质转移，从而延长工作表面的使用周期。

耐磨特性与微观组织密切相关。细晶或超细晶结构中晶界密度较高，裂纹扩展和磨损坑形成受到抑制，表面磨损模式更为均匀。钴粘结相的含量和分布影响耐磨行为的平衡，适量粘结相提供一定缓冲作用，避免硬质相在高应力下发生脆性剥落。表面粗糙度和润滑条件也会对实际耐磨表现产生影响，光洁表面结合适当润滑能够进一步降低摩擦系数。

在不同成形工艺中，耐磨特性表现出针对性优势。在金属拉伸或挤压过程中，硬质合金模具的工作通道能够长时间维持尺寸精度，减少因磨损导致的产品尺寸波动。在粉末压制和塑料注塑领域，耐磨表面有助于降低脱模阻力并保持型腔清晰度。实际生产中，耐磨性能的监测通常通过表面形貌分析和尺寸测量进行，以指导维护周期的安排。

硬质合金模具的耐磨特性是其在工业成形领域广泛应用的重要基础之一。通过材料组成和表面处理的优化，这一特性能够与具体作业环境相适应，支持长期稳定生产。

2.3.1 磨粒磨损机制

硬质合金模具在成形作业中与被加工材料发生相对运动时，磨粒磨损是常见的一种表面损伤形式。这种机制主要表现为硬质颗粒或表面凸起对模具工作面的微观切削或犁沟作用。碳化钨硬质相的高硬度特性使模具表面能够抵抗大多数磨粒的嵌入和切削，但在长时间连续作业中，部分硬质磨粒仍会造成浅层材料移除，形成细微划痕。

磨粒磨损的发生与接触压力、相对速度以及磨粒硬度相关。当被加工材料中含有氧化物或硬质夹杂物时，这些颗粒在界面处反复作用，使模具表面出现微观凹坑或沟槽。粘结相区域相对较软，在磨粒作用下可能优先发生塑性流动，随后硬质相颗粒失去支撑而脱落，形成磨损链式反应。均匀的微观组织有助于延缓这一过程，因为晶界能够阻挡磨粒的连续切削路径。

在实际生产环境中，磨粒磨损机制还受到润滑条件的影响。良好润滑可以减少磨粒与模具表面的直接接触，从而降低磨损速率。模具表面经过精密研磨后，初始粗糙度较低，这在一定程度上抑制了磨粒的嵌入起点。随着作业循环的进行，表面形貌逐渐演化，磨损速率也呈现出初期缓慢、中期稳定、后期加速的特点。

2.3.2 粘着磨损与疲劳磨损行为

粘着磨损在硬质合金模具与被加工材料紧密接触时较为常见。这种机制源于界面处原子或分子间的局部结合，当两表面分离时，较软一方或粘结相区域的材料发生转移，形成黏着点撕裂。钴粘结相的存在使模具表面在高温或高压条件下更容易出现局部软化，增加粘着倾向，

随后在反复运动中造成表面材料剥离。

疲劳磨损则表现为模具表面在循环应力作用下产生微裂纹并逐渐扩展直至材料脱落。这种行为与接触疲劳密切相关，特别是在冲压或挤压工艺中，交变载荷使表面或亚表面积累残余应力，最终形成点蚀或剥落坑。裂纹通常从粘结相与硬质相界面或表面缺陷处萌生，沿着晶界或穿过颗粒扩展。

粘着磨损与疲劳磨损常常相互促进。粘着引起的表面粗糙化会加剧局部应力集中，从而加速疲劳裂纹的形成；而疲劳剥落产生的硬质碎屑又会作为磨粒，进一步引发磨粒磨损，形成复合损伤模式。在高温成形环境中，粘着倾向增强，同时疲劳裂纹扩展速率也可能加快。

实际应用中，通过优化表面处理、选择合适润滑剂以及控制作业参数，可以减缓这两种磨损行为的发生。硬质合金模具的复合结构特性使其在合理配置下能够以相对平稳的方式应对粘着与疲劳磨损，支持长时间连续生产。

2.3.3 WC 晶粒尺寸、Co 含量及添加剂对硬质合金模具耐磨性的影响

碳化钨晶粒尺寸、钴含量以及添加剂共同影响硬质合金模具的耐磨性能。这些因素通过改变微观组织、界面状态和相分布来调节磨损过程中的能量消耗和损伤积累方式。在材料设计中，工程师根据具体成形条件对这些参数进行综合平衡，以获得适宜的耐磨表现。

2.3.3.1 细晶与超细晶硬质合金模具的磨损优势

细晶与超细晶硬质合金模具在磨损过程中表现出一定的组织优势。较小的碳化钨晶粒尺寸增加了单位面积内的晶界数量，这些晶界能够有效阻挡裂纹和磨损坑的连续扩展，使表面损伤分布更为均匀。细晶结构中粘结相层较薄且分布致密，减少了软相区域的优先磨损，从而延缓硬质相颗粒的暴露和脱落。

超细晶模具的表面在摩擦作用下更容易形成平滑的磨损形貌，而不是出现较大的剥落区。这种均匀磨损特征有助于维持模具工作轮廓的长期稳定性，特别适合精密成形和长周期连续作业。在相同接触条件下，细晶体系的磨损速率往往相对较低，因为更高的晶界密度增强了对磨粒切削路径的干扰能力。

细晶与超细晶结构的优势还体现在疲劳磨损抵抗方面。较小晶粒使应力分布更加分散，减少局部应力集中点，从而降低循环加载下裂纹萌生的概率。实际生产实践中，这种模具在处理高硬度材料或含磨粒介质时，能够以较为一致的表面状态支持生产节奏的稳定。

2.3.3.2 TaC、NbC 等晶粒生长抑制剂的作用

TaC、NbC 等晶粒生长抑制剂在硬质合金模具制备中主要通过抑制碳化钨颗粒在烧结过程中的异常长大来发挥作用。这些添加剂在液相烧结阶段部分溶解于钴相或分布于碳化钨颗粒表面，形成扩散阻挡层，降低晶粒合并和粗化的速率，从而保持较小的平均晶粒尺寸。

版权与免责声明

抑制剂的作用机制还包括改善界面能和相稳定性。TaC 或 NbC 的加入能够优化粘结相与硬质相之间的润湿特性，减少界面缺陷，这间接提升了材料在磨损过程中的抗剥落能力。适量添加这些抑制剂后，微观组织更加均匀，硬质相颗粒分布致密，有助于形成稳定的耐磨表面层。

在耐磨性能方面，添加抑制剂的硬质合金模具通常表现出较低的磨损速率和更均匀的表面演化。抑制剂种类和含量的选择需要与基础钨钴体系相匹配，过量添加可能导致脆性相生成或韧性下降，而合理配比则能在保持韧性的同时增强耐磨特性。

这些晶粒生长抑制剂的应用丰富了硬质合金模具的材料调控手段。通过它们的引入，模具的微观结构得到优化，并在实际成形作业中支持更稳定的耐磨表现，为多样化工业需求提供技术支持。

2.4 硬质合金模具的化学稳定性与抗氧化性能

硬质合金模具的化学稳定性与抗氧化性能是其在各种成形环境中保持表面完整性和长期工作能力的重要方面。这些性能主要取决于材料中碳化钨硬质相与钴粘结相的相互作用，以及可能引入的多元添加剂。在实际工业应用中，化学稳定性和抗氧化能力影响模具在高温作业或接触腐蚀性介质时的表面状态和尺寸保持能力。通过材料组成和表面处理的优化，这类性能可以根据不同工艺条件进行一定调节。

2.4.1 高温氧化动力学与氧化产物相组成

硬质合金模具在高温环境下会发生缓慢的氧化过程，其动力学行为表现为氧化速率随温度和暴露时间的变化。氧化初期主要以表面吸附氧和轻微氧化层形成为主，随着温度升高，钴粘结相优先发生氧化反应，形成相应的氧化物，而碳化钨颗粒则在较高温度下逐步参与反应。氧化层厚度随时间呈现抛物线或近似线性增长趋势，这与氧扩散通过氧化层的速率相关。

氧化产物的相组成通常包括钴的氧化物以及钨的复合氧化物。在不同温度区间，生成的氧化相种类和比例存在差异，低温段以钴氧化物为主，而较高温度下可能出现钨酸盐类化合物或混合氧化层。这些氧化产物在结构上呈现多孔或致密特征，影响后续氧气的进一步扩散。氧化层的相组成还与周围气氛中的氧分压和材料中残留碳含量有关，碳的存在有时会形成保护性碳化物过渡层，减缓氧化进程。

在成形作业中，高温氧化动力学直接关系到模具表面光洁度的保持。氧化层剥落或疏松会增加表面粗糙度，进而影响成形件的质量。工程人员在选择材料时，会考虑氧化起始温度和氧化速率，以匹配工艺温度范围。通过控制作业气氛或缩短高温暴露时间，可以在一定程度上抑制氧化反应的发生。

2.4.2 在酸碱介质及成型介质中硬质合金模具的腐蚀行为

硬质合金模具在接触酸碱介质或成型介质时，会发生不同程度的腐蚀行为。钴粘结相作为相对活泼的金属组分，在酸性环境中可能优先溶解，导致硬质相颗粒失去支撑而松动脱落。这

种选择性腐蚀会使表面出现微观孔隙或粗化现象，影响模具的尺寸精度和表面质量。

在碱性介质中，腐蚀速率一般较低，但长时间暴露仍可能引起表面轻微蚀刻或钝化层形成。成型介质如塑料熔体、橡胶硫化剂或粉末中的添加剂，有时会释放出腐蚀性组分，与模具表面发生化学或电化学反应。腐蚀行为还与介质温度、浓度和流动状态相关，流动介质会加速腐蚀产物的移除，从而维持较高的腐蚀速率。

腐蚀过程往往呈现局部特征，晶界或粘结相富集区成为优先腐蚀部位。微观结构均匀性较高的材料，其腐蚀行为更为均匀，减少了点蚀或缝隙腐蚀的风险。

2.4.3 抗氧化涂层与表面改性提升硬质合金模具的化学稳定性

抗氧化涂层与表面改性技术为提升硬质合金模具的化学稳定性提供了有效途径。这些方法通过在模具工作表面形成保护层，阻挡氧气或腐蚀介质与基体的直接接触，从而延长表面在恶劣环境中的使用时间。表面改性还包括渗层处理或离子注入等方式，改变近表面区域的化学组成和结构状态。

涂层或改性层与基体材料的相容性是提升化学稳定性的关键因素。良好的匹配能够减少热膨胀失配引起的涂层开裂，并维持长期保护效果。在工业应用中，这些技术根据具体工艺温度和介质类型进行选配，支持模具在高温成形或腐蚀性环境中的稳定运行。

2.4.3.1 PVD/CVD 涂层体系在硬质合金模具中的应用

PVD 和 CVD 涂层体系在硬质合金模具中得到广泛应用，主要用于形成氮化物、碳化物或氧化物保护层。PVD 技术通过物理气相沉积在较低温度下制备致密涂层，适合精密模具表面处理，避免基体发生组织变化。常见涂层如 TiN、TiAlN 或 CrN，具有较高的硬度和化学惰性，能够有效阻挡氧化和轻微腐蚀。

CVD 涂层则在较高温度下进行沉积，形成的涂层与基体结合更为牢固，厚度控制范围较广，适用于承受较高载荷的模具工作部位。TiC、TiCN 等 CVD 涂层在金属成形和粉末压制模具中表现出良好的耐磨与抗氧化协同效果。多层涂层体系通过不同材料交替沉积，形成梯度结构，进一步提升抗剥落能力和保护寿命。

在塑料与橡胶精密成型领域，PVD/CVD 涂层有助于减少熔体粘附和化学反应。在特种材料加工中，这些涂层体系支持模具在温热条件下的长期使用。通过涂层成分和工艺参数的优化，可以根据不同成形介质调整保护性能。

2.4.3.2 硬质合金模具的涂层附着力与高温保护寿命

硬质合金模具涂层的附着力取决于界面结合强度和残余应力状态。良好的附着力表现为涂层在机械载荷和热循环作用下不易发生鼓泡或剥离。影响附着力的因素包括基体表面预处理、涂层沉积参数以及材料热膨胀系数的匹配程度。适当的界面过渡层能够缓解应力集中，提高

结合可靠性。

高温保护寿命反映了涂层在 elevated 温度下维持完整性和阻挡作用的时间。在高温氧化环境中，涂层通过形成致密氧化亚层或阻挡氧扩散来延长保护周期。涂层厚度、致密度和相稳定性共同影响保护寿命的长短，多层梯度设计通常能够获得更长的有效保护时间。

实际应用中，涂层附着力与高温保护寿命需要综合评估。定期检测涂层完整性有助于提前发现潜在失效风险，并安排维护。工程人员根据工艺温度范围和作业循环次数选择合适的涂层体系，以实现化学稳定性的优化。通过这些表面改性措施，硬质合金模具在各种成形环境中的工作可靠性得到进一步提升。

2.5 硬质合金模具的热疲劳与热冲击特性

硬质合金模具在成形作业中常常经历反复的加热与冷却过程，这使其热疲劳与热冲击特性成为影响长期工作稳定性的重要因素。这些特性主要与材料内部的热应力分布、微观组织演化以及相界面结合状态相关。在循环温度变化环境下，模具表面和内部可能积累残余应力，进而引发损伤行为。通过材料组成和结构设计的优化，硬质合金模具的热疲劳与热冲击抵抗能力可以根据不同工艺温度范围进行一定调节，以适应工业生产的连续作业要求。

2.5.1 热循环条件下的裂纹萌生与扩展机制

在热循环条件下，硬质合金模具的裂纹萌生通常起始于表面或近表面区域。温度急剧变化导致的热膨胀与收缩不均匀使表面产生拉应力或压应力，当这些应力超过材料局部屈服极限时，微裂纹便在粘结相富集区或硬质相颗粒界面处形成。反复循环使微裂纹逐渐积累能量，萌生位置多集中在表面缺陷、晶界或残留应力集中点。

裂纹扩展机制表现为沿晶界或穿过粘结相的混合路径。在热循环早期，裂纹以缓慢方式延伸，主要通过粘结相的塑性变形吸收部分能量。随着循环次数增加，裂纹尖端应力场增强，扩展速率逐渐加快。碳化钨硬质相颗粒在裂纹路径中起到阻挡作用，而钴粘结相则可能发生局部软化或氧化，促进裂纹沿界面偏转或桥接。高温下氧化层的形成有时会加剧表面裂纹的萌生，因为氧化产物体积变化会引入附加应力。

在实际成形工艺中，热冲击强度较大的场合（如快速加热的温热挤压）更容易引发较明显的裂纹网络。冷却速率过快时，表面与心部的温度梯度增大，进一步推动裂纹向深度方向发展。微观组织均匀性较高的材料，其裂纹扩展路径更为曲折，能量消耗增加，从而延缓整体损伤进程。工程人员在模具设计时，常常通过合理布置冷却通道和控制加热速率来减轻热循环对裂纹行为的促进作用。

2.5.2 材料成分对硬质合金模具热疲劳寿命的影响

材料成分对硬质合金模具热疲劳寿命的影响主要通过改变粘结相比例、硬质相晶粒尺寸以及添加剂种类来实现。钴含量的增加通常会提升材料的塑性变形能力，使其在热循环中更好地

吸收热应力，从而延长裂纹萌生前的寿命周期。较高钴含量使粘结相网络更为连续，有助于缓解局部应力集中，但同时可能降低高温强度，需要在不同工艺条件下进行平衡。

碳化钨晶粒尺寸的细化对热疲劳寿命表现出积极作用。细晶和超细晶结构中晶界密度较高，能够更有效地分散热应力，减少单一裂纹的快速扩展倾向。细小晶粒还使微观组织更为均匀，降低因晶粒尺寸差异引起的应力梯度，从而提高材料在反复温度变化下的损伤容忍度。

多元添加剂如 TaC、NbC 等晶粒生长抑制剂的引入，进一步调控热疲劳行为。这些添加剂稳定碳化钨颗粒尺寸，同时优化界面结合状态，使材料在高温循环中保持较好的相稳定性，减少因扩散或相变导致的组织劣化。添加剂含量和种类不同时，对热疲劳寿命的改善程度存在差异，合理配比能够在保持其他力学性能的同时提升循环寿命。

在实际应用中，材料成分的优化需要结合具体成形工艺的温度区间和循环频率进行。工程师通过调整基础钨钴比例与添加元素，开发出适应不同热负荷条件的硬质合金牌号。这种成分调控方式为延长模具在热循环作业中的使用时间提供了材料层面的支持，并在工业生产中帮助维持稳定的成形质量。

2.6 中钨智造硬质合金模具 MSDS

中钨智造科技有限公司作为钨制品领域的专业制造商，其硬质合金模具产品主要基于碳化钨与钴等金属粘结相的复合材料体系。材料安全数据表（MSDS）针对此种固态硬质合金模具提供安全使用、贮存和处理的相关指导信息。

硬质合金模具的主要成分包括碳化钨（WC）作为硬质相，以及钴（Co）或其他金属作为粘结相，具体比例根据不同牌号和应用需求进行调整。产品外观为金属灰色固体，具有较高密度，通常在 11.0 至 15.5 g/cm³ 范围内。材料无明显气味，在常温常压下化学性质稳定，不易发生自燃或爆炸。熔点和沸点较高，在一般工业温度范围内不会发生相态变化。硬质合金模具不属于易燃固体。

在健康危害方面，硬质合金模具成品在正常使用时对人体无显著毒性。

防火与灭火措施中，硬质合金模具本身不构成火灾隐患。

操作与防护方面，建议在通风良好的环境中进行模具安装、调试或维护作业。操作人员应穿戴工作服、防护手套和安全鞋。运输过程中，产品属于一般货物，无特殊危险品分类要求，但需防止剧烈碰撞导致破损。废弃硬质合金模具属于可回收金属材料，建议交由专业回收企业处理，以实现资源再利用。

中钨智造硬质合金模具的 MSDS 强调，在正常工业使用条件下，产品安全性较高。用户可根据具体作业场景，结合当地职业安全法规，进一步优化防护措施。通过遵循 MSDS 中的指导，硬质合金模具在金属塑性成形、粉末冶金、塑料橡胶成型等领域的应用过程中，能够有效控制潜在风险，支持安全生产和环境保护。

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！

采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

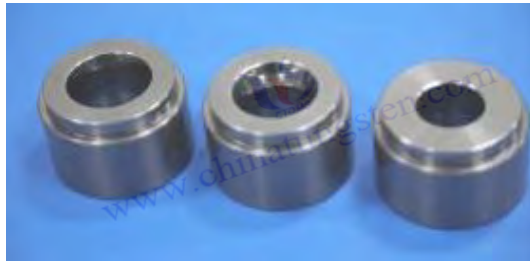
中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



版权与法律责任声明

第三章 硬质合金模具的设计与结构

3.1 硬质合金模具设计的基本原则

硬质合金模具设计的基本原则围绕材料选择、结构布局 and 性能匹配展开。这些原则旨在确保模具在承受载荷、温度变化和摩擦作用时，能够维持几何精度和表面完整性。设计过程中需要综合考虑加工对象的材料特性、生产批量、作业节奏以及经济因素，从而形成合理的整体方案。在实际工程中，基本原则指导设计师从概念阶段到详细图纸的各个环节进行系统决策。

3.1.1 材料-结构-性能一体化设计理念

材料-结构-性能一体化设计理念强调在硬质合金模具开发过程中，将材料选择、结构形式和预期性能作为相互关联的整体进行考虑。硬质合金材料的物理和力学特性为结构设计提供基础，而结构布局又反过来影响材料性能的发挥。例如，工作部分采用硬质合金镶块时，需要根据其硬度、弹性模量和耐磨特性来确定支撑钢体的刚度和配合公差，确保整体结构在受力时应力分布均匀。

一体化设计要求在早期阶段就对硬质合金的晶粒尺寸、钴含量和添加剂体系进行针对性选择，使材料微观组织与模具几何形状相适应。结构设计中，冷却通道的布置、顶出机构的布局以及定位元件的安装位置，都需要与硬质合金部分的热导率、热膨胀系数和断裂韧性相匹配。这种理念避免了材料与结构之间的脱节现象，使模具在服役过程中能够充分发挥复合材料的优势。

在性能层面，一体化设计注重硬度与韧性、耐磨性与热稳定性的平衡。通过有限元分析等手段，设计师可以模拟不同结构方案下材料的应力场和温度场分布，进而优化硬质合金镶块的形状、厚度及安装方式。这种方法有助于减少局部应力集中，延长模具的工作周期。在精密成形领域，一体化理念还体现在表面处理与基体材料的协同上，通过 PVD 或 CVD 涂层与硬质合金基体的结合，进一步提升整体性能表现。

实际应用中，材料-结构-性能一体化设计推动了模具从传统经验设计向模型驱动设计的转变。不同牌号的硬质合金与钢基体的组合方案经过反复验证后，形成系列化设计模板，为后续类似产品的快速开发提供参考。这种设计理念在金属塑性成形、粉末冶金和塑料橡胶精密成型等领域中，均表现出较好的适应性。

3.1.2 服役条件下的可靠性设计原则

服役条件下的可靠性设计原则以模具在实际工作环境中的长期稳定运行为核心目标。设计时需要充分分析服役过程中的载荷类型、温度范围、介质特性以及循环频率等因素，并据此制定相应的结构安全裕度。可靠性设计强调预防性措施，例如在高应力区域增加过渡圆角、合理布置加强筋，或采用分体式镶块结构以便局部更换，从而降低整体失效风险。

可靠性原则要求对硬质合金模具进行服役条件模拟，包括热-力耦合分析和疲劳寿命评估。

版权与免责声明

通过这些分析，可以预测裂纹萌生位置、磨损演化规律以及热疲劳损伤积累过程，并据此调整材料成分或结构参数。例如，在高温成形场合，设计需考虑热膨胀匹配和冷却系统的有效性，以减少热应力引起的变形或开裂。在高频冲击作业中，则需重点关注断裂韧性和抗弯强度的匹配，确保模具能够承受循环载荷而不发生突发失效。

可靠性设计还包括可维护性和可更换性考虑。硬质合金工作部分常采用压配、螺栓固定或热套等方式与钢基体连接，便于在磨损或损伤后进行局部维修，而无需整体报废。这种模块化思想延长了模具的整体使用寿命，同时降低了生产停机时间。设计过程中，设计师还会参考历史服役数据和故障模式分析，持续改进结构细节，使新设计方案的可靠性逐步提升。

在实际工程实践中，可靠性设计原则与质量管理体系相结合。通过工艺控制、检测标准和使用跟踪，形成从设计到服役的全生命周期管理。这种原则在不同应用领域中表现出灵活性，例如在精密塑料成型中强调尺寸稳定性，在粉末冶金压制中则侧重高压承载能力。通过持续遵循服役条件下的可靠性设计，硬质合金模具能够在工业生产线上以稳定、经济的模式支持多种成形作业。

3.2 硬质合金模具的形状与结构优化设计

硬质合金模具的形状与结构优化设计旨在通过合理的几何构型和组合方式，使模具在服役过程中更好地发挥材料性能，同时满足成形工艺的精度和效率要求。优化设计过程综合考虑强度、刚度、热行为以及精度控制等因素，通过模拟分析和结构调整，实现材料利用率与模具寿命的平衡。在实际工程中，形状与结构优化能够适应不同成形对象的复杂程度，支持从简单拉伸到精密多腔成形的多种作业场景。

3.2.1 硬质合金模具强度与刚度的设计

硬质合金模具的强度与刚度设计以确保模具在承受成形载荷时不发生过度变形或失效为目标。强度设计主要关注硬质合金工作部分和钢制支撑结构的承载能力，通过计算最大工作压力、弯曲应力和剪切应力，确定合理的壁厚和过渡圆角尺寸。硬质合金镶块通常安装在钢基体内，形成复合受力体系，钢体提供整体刚性支撑，而合金部分承担直接接触区域的高应力。

刚度设计注重控制模具在加载过程中的弹性变形量。在高压粉末压制或金属挤压工艺中，型腔或通道的刚度不足可能导致尺寸波动，因此需要通过增加加强筋、优化支撑柱分布或调整镶块嵌入深度来提升整体刚性。有限元分析方法常用于模拟不同结构方案下的应力分布和变形云图，帮助设计师识别高应力集中区域并进行局部加强。

强度与刚度的匹配还涉及材料性能的利用。硬质合金的高压缩强度适合承受垂直载荷，而其较高的弹性模量则为刚度控制提供有利条件。在设计中，常常采用过盈配合或热套装配方式，确保硬质合金镶块与基体紧密结合，避免装配间隙导致的刚度损失。不同成形工艺对强度和刚度的要求存在差异，例如精密冲压模具侧重刃口区域的刚度，而拉伸模具则更关注通道的均匀承载能力。

通过强度与刚度优化，硬质合金模具能够在循环作业中维持结构完整性，减少因变形引起的成形缺陷。这种设计方式为模具的长周期稳定运行提供了力学基础，并在实际生产中支持产品几何精度的保持。

3.2.2 硬质合金模具的温度分布与热应力分析

硬质合金模具的温度分布与热应力分析是结构优化设计中的关键环节。温度分布主要受成形材料热量传递、冷却系统布局以及模具材料热导率的影响。在注塑或温热挤压工艺中，型腔表面温度较高，而远离接触区的部位温度相对较低，形成一定的温度梯度。合理的冷却通道设计能够使温度场趋于均匀，减少局部过热区域。

热应力分析关注因温度变化引起的膨胀与收缩差异所产生的内应力。硬质合金与钢基体的热膨胀系数存在差异，在热循环过程中可能在界面处产生剪切应力。通过有限元热-力耦合模拟，可以预测热应力集中位置，并据此调整镶块厚度、过渡结构或冷却孔间距，以降低应力峰值。优化后的结构有助于延长模具在反复加热冷却条件下的使用寿命，减少热疲劳裂纹的萌生风险。

温度分布优化还包括加热元件与冷却系统的协同布置。在需要预热的模具中，加热棒或油道的位置需与硬质合金工作部分的位置相匹配，确保热量均匀传入。在冷却阶段，冷却介质的流速和路径设计影响降温速率，过快或过慢的冷却都可能加剧热应力。实际设计中，常常采用瞬态热分析方法评估不同工艺参数下的温度演化过程，为结构改进提供数据支持。

通过温度分布与热应力分析，硬质合金模具的结构设计能够更好地适应服役环境的热负荷。这种优化方式使模具在多种成形工艺中保持尺寸稳定性和表面完整性，为高质量产品成形提供条件。

3.2.3 成型精度与公差设计

成型精度与公差设计是硬质合金模具形状与结构优化的重要内容之一。其目标是通过合理的尺寸控制和结构安排，使成形件的几何参数符合设计要求。公差设计需要在模具制造精度、材料热膨胀、磨损储备以及装配误差之间进行综合平衡，以实现经济与精度的统一。

3.2.3.1 尺寸链分析与公差分配

尺寸链分析通过建立封闭的尺寸链关系，识别各组成环节对最终成型精度的累积影响。在硬质合金模具中，尺寸链通常包括硬质合金镶块的加工尺寸、钢基体的配合尺寸、定位元件的公差以及装配间隙等环节。通过最坏情况法或统计公差分析方法，可以计算出各环节公差对总公差的贡献程度，并据此进行公差分配。

公差分配原则是在满足成型精度要求的前提下，尽量放宽非关键尺寸的公差，以降低制造成本。硬质合金工作部分的尺寸公差一般控制较严，因为其影响成形件的形状和尺寸，而钢基体部分的公差则可适当放宽。尺寸链分析还考虑温度变化引起的尺寸变动，通过引入热补偿

系数对室温公差进行修正，确保模具在工作温度下的实际精度。

在多腔模具或复杂结构模具中，尺寸链分析显得尤为重要。各腔体之间的位置关系和对称性需要通过公差分配来保证一致性。实际设计中，常常借助计算机辅助公差分析软件进行模拟验证，优化公差分配方案，减少因累积误差导致的装配困难或成型偏差。

3.2.3.2 脱模斜度与表面粗糙度优化

脱模斜度设计是保证成形件顺利脱模、减少表面损伤的重要措施。在硬质合金模具中，型腔或通道的脱模斜度需要根据材料收缩率、表面摩擦特性和成形压力进行选择。适当的斜度能够降低脱模力，同时避免成形件在脱模过程中发生刮伤或变形。斜度数值一般在一定范围内选取，过小可能导致脱模困难，过大则会影响产品形状精度。

表面粗糙度优化影响模具与成形材料之间的摩擦行为和成形件表面质量。硬质合金工作表面通常经过精密研磨或抛光处理，使粗糙度达到较低水平，从而减少粘着和划痕的产生。在塑料或橡胶成型中，低表面粗糙度有助于改善熔体流动性和脱模性能；在金属拉伸模具中，合理的粗糙度则能控制润滑剂的保持能力。

优化过程中，表面粗糙度与脱模斜度需要协同考虑。较低的粗糙度结合适当斜度，可以显著降低脱模阻力。在实际设计中，通过表面处理工艺（如抛光、涂层或纹理加工）对粗糙度进行控制，并根据不同成形介质的特性调整参数。这种优化方式使硬质合金模具在保证成型精度的同时，提升了生产过程的顺利性和产品表面品质。

通过形状与结构优化设计，硬质合金模具能够在强度、热行为和精度控制等方面达到较好的综合表现。这种优化过程为工业成形作业提供了可靠的工具支持，并在实际应用中不断完善。

3.3 硬质合金模具的冷却系统设计

硬质合金模具的冷却系统设计是确保模具温度场均匀、成形周期合理以及产品质量稳定的关键环节。在成形作业过程中，冷却系统通过有效移除成形材料传递给模具的热量，控制模具表面与内部的温度分布，从而减少热应力积累、降低热疲劳风险，并维持模具的尺寸稳定性。合理的冷却系统设计需要与硬质合金镶块的位置、钢基体的结构以及具体成形工艺的热负荷特点相匹配，支持模具在连续或循环作业中的可靠运行。

3.3.1 冷却通道设计与优化

冷却通道设计主要围绕通道的布局、截面形状、尺寸和位置展开，以实现热量的高效传递和温度场的均匀分布。通道通常布置在硬质合金工作部分附近或钢基体内部，距离型腔表面保持适当距离，既保证足够的冷却效果，又避免因通道过近导致局部强度下降。通道截面多采用圆形或异形设计，圆形通道加工方便，而异形通道则能更好地适应复杂型腔轮廓，提高冷却覆盖面积。

优化过程注重通道间距、并联与串联方式的选择。合理的间距可以避免相邻通道之间的热干扰，同时确保模具各区域冷却速率接近。并联通道有利于均匀冷却，而串联通道则适合温度梯度较大的场合，通过调节介质流速实现分区控温。在设计阶段，工程师常常利用数值模拟方法评估不同通道方案下的温度分布云图和热应力情况，并据此调整通道直径、弯曲半径和入口出口位置，以减少死区和短路现象。

对于带有硬质合金镶块的模具，冷却通道优化还需考虑镶块与基体界面处的热传导路径。通道尽量靠近硬质合金工作面，但需保留足够的壁厚以维持结构刚度。在多腔模具中，各腔体冷却通道的独立性或连通性根据生产节拍要求进行配置，以保证所有型腔温度一致性。这种优化设计使冷却系统能够适应不同成形材料的热物性参数，支持生产效率的提升。

3.3.2 热交换与温控系统在硬质合金模具中的应用

热交换与温控系统在硬质合金模具中的应用旨在实现模具温度的精确控制和快速响应。系统通过循环流动的冷却介质与模具进行热交换，将多余热量带走，同时需要在需要预热时提供加热功能。温控系统通常包括温度传感器、控制器和执行机构，能够根据工艺要求实时调节介质温度和流量，维持模具在设定温度区间内稳定运行。

在实际应用中，热交换效率影响成形周期和产品品质。高效的热交换可以缩短冷却时间，减少成形件的内应力和翘曲变形。对于硬质合金模具而言，由于其热导率处于中等水平，温控系统设计需充分考虑材料导热特性，避免温度波动过大导致的尺寸变化或表面缺陷。现代温控设备多采用闭环控制方式，根据模具表面或内部测点反馈数据自动调整参数，提高温度控制的精度和稳定性。

温控系统的集成还体现在与模具结构的协同设计上。传感器安装位置需靠近关键成形区域，以便准确捕捉温度变化。加热与冷却功能的切换支持模具在不同工艺阶段的温度需求，例如塑料注塑中的快速冷却或粉末成形中的温控保持。这种应用方式使硬质合金模具在精密成形领域中能够更好地满足高重复性生产的要求。

3.3.2.1 直通式与随形冷却通道对比

直通式冷却通道与随形冷却通道在结构形式和冷却效果上存在明显差异。直通式通道加工工艺简单，通常采用钻孔或铣削方式制备，通道走向为直线或简单折线，适用于形状规则、型腔较浅的硬质合金模具。其优点在于制造成本较低、密封性易于保证，但冷却均匀性相对有限，在复杂曲面或深腔区域容易形成温度热点或冷却死区。

随形冷却通道则根据型腔或工作面的几何形状进行设计，通道路径紧贴成形表面，实现近距离均匀冷却。这种通道形式多通过增材制造或精密加工技术实现，能够显著改善温度分布的均匀性，减少热应力集中，提高成形件的尺寸一致性和表面质量。在带有硬质合金镶块的模具中，随形通道可以更好地适应镶块轮廓，使冷却效果覆盖整个工作区域。

对比来看，直通式通道适合批量较大、形状简单的生产场景，而随形通道更适用于精密要求

高、形状复杂的成形作业。虽然随形通道的加工难度和成本较高，但其在缩短冷却时间和提升产品质量方面的优势较为突出。在实际设计中，工程师常常根据产品结构复杂程度、生产节拍和经济性综合选择两种通道形式，或采用混合布置方式以实现性能与成本的平衡。

3.3.2.2 冷却介质选择与流动模拟

冷却介质的选择影响热交换效率、系统腐蚀风险和运行成本。常用介质包括水、油、压缩空气以及专用冷却液。水具有较高的比热容和热导率，成本低廉，适合大多数塑料和橡胶成型工艺；油类介质则在较高温度场合表现出更好的热稳定性，适用于温热金属成形或需要精确温控的场景。压缩空气主要用于局部快速冷却或吹扫，而专用冷却液可根据具体工艺调整防锈和润滑性能。

流动模拟是优化冷却介质行为的重要手段。通过计算流体力学（CFD）方法，可以模拟介质在通道内的速度场、压力分布、湍流程度和热传递情况。模拟结果帮助设计师识别流动死区、涡流或压力损失过大的部位，并据此调整通道直径、弯头形式或入口流量分配。对于硬质合金模具而言，流动模拟还能评估不同介质物性参数对温度场的影响，为介质类型和流速的选择提供定量依据。

在实际应用中，介质选择需综合考虑模具材料相容性、环保要求和维护便利性。水基介质需注意防锈处理，以减少对钢基体或硬质合金界面的腐蚀风险；油基介质则需关注密封性能和高温氧化问题。流动模拟与实际测试相结合，能够不断完善冷却系统设计，使硬质合金模具在不同成形条件下实现高效、稳定的温度控制。

通过冷却系统设计与优化，硬质合金模具能够在热管理方面达到较高的水平，支持精密、连续的工业成形生产。

3.4 硬质合金模具的导向与定位系统设计

硬质合金模具的导向与定位系统设计是确保模具在开合模过程中运动平稳、合模精度稳定以及成形件尺寸一致的关键环节。该系统通过精确引导模具各部件的相对运动，并限制多余自由度，来减少振动、偏移和累积误差。在实际成形作业中，良好的导向与定位设计能够延长模具使用寿命，降低产品废品率，并支持高节拍连续生产。设计过程需要综合考虑载荷类型、运动速度、温度变化以及硬质合金材料的力学特性，使导向和定位元件与工作部分形成协调统一的结构体系。

3.4.1 导向柱与导套的硬质合金选材

导向柱与导套的硬质合金选材需根据其服役条件下的摩擦、磨损和承载特点进行针对性选择。导向柱通常承受轴向和径向载荷，表面需具备较高的硬度和耐磨性，因此多采用中等钨含量的钨钴系硬质合金。这种选材能够在保持足够韧性的同时，提供良好的抗磨粒磨损和粘着磨损能力，适合在反复滑动接触中维持尺寸稳定性。柱体表面经过精密磨削和抛光处理，进一步降低摩擦系数，减少运行过程中的发热和卡滞风险。

版权与法律责任声明

导套作为与导向柱配合的部件，其内孔表面直接承受滑动摩擦，选材时常选用细晶或超细晶硬质合金牌号。细小碳化钨晶粒使导套表面组织更为致密，在长期循环运动中表现出较低的磨损速率和较为均匀的磨损形貌。导套外圈一般与钢基体采用过盈配合或热套方式固定，以确保整体刚度。硬质合金导套的内孔直径公差控制严格，与导向柱形成合理的配合间隙，既保证导向精度，又避免因间隙过小导致的干摩擦升温。

在高精度或高温成形场合，导向柱与导套有时采用添加 TaC、NbC 等晶粒生长抑制剂的硬质合金材料，以进一步提升高温尺寸稳定性和抗热疲劳能力。选材过程中，还需考虑两种元件材料的热膨胀系数匹配，避免温度变化时配合间隙发生过大波动。对于不同成形工艺，选材方案存在差异：金属塑性成形模具的导向系统侧重高承载能力，而塑料精密成型模具则更注重低摩擦和耐腐蚀性能。通过合理的硬质合金选材，导向柱与导套能够在复杂服役条件下保持良好的运动平稳性和使用寿命。

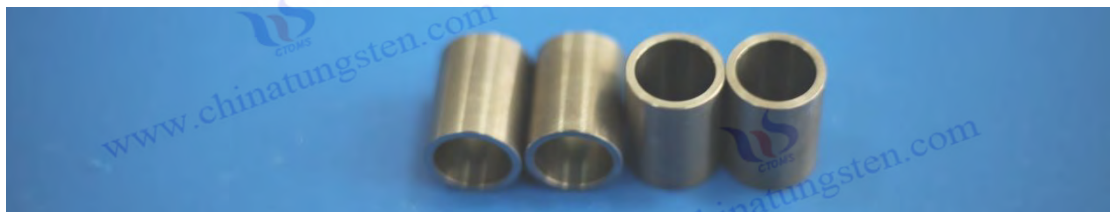
3.4.2 定位精度与重复定位误差控制

定位精度与重复定位误差控制是硬质合金模具导向系统设计中的核心目标之一。定位精度指模具在合模状态下各部件相对位置的准确程度，而重复定位误差则反映多次开合模循环后位置偏差的波动范围。控制这些误差需要从结构设计、制造工艺和装配调整三个层面协同进行。

在结构设计层面，采用锥面定位、平面定位或销孔组合定位等方式，根据模具尺寸和精度要求选择合适的形式。硬质合金定位元件常以镶块形式嵌入钢基体中，其工作面经过高精度研磨，确保接触面积和表面粗糙度满足要求。定位元件的布置位置需避开高应力区，同时考虑热膨胀对定位间隙的影响，通过预留补偿量或采用浮动结构减少温度变化引起的误差放大。

制造与装配阶段，硬质合金元件的加工精度影响最终定位效果。导向柱与导套的圆度、直线度和同轴度需严格控制，配合间隙一般保持在微米级范围。装配时采用专用工装进行同轴校准，并通过多次试合模测量实际定位误差，必要时进行微量修磨或垫片调整。重复定位误差还与模具刚度相关，整体结构刚度不足会使定位元件在载荷作用下产生微小弹性变形，进而增加误差累积。

在实际生产中，定位精度与重复定位误差还受到作业条件的影响。温度波动、润滑状态和模具磨损都会导致误差逐渐增大，因此设计时需预留一定的磨损储备量，并结合定期检测和维护制度进行动态控制。对于精密成形模具，重复定位误差通常控制在较小范围内，以保证成形件尺寸的一致性。通过这些控制措施，硬质合金模具的导向与定位系统能够在长期循环作业中维持稳定的精度水平，支持高质量产品的批量生产。



中钨智造硬质合金模具

版权与法律责任声明

第四章 硬质合金模具的制造工艺

4.1 硬质合金模具的原材料选择与准备

硬质合金模具的原材料选择与准备是制造工艺的基础，影响最终产品的微观结构和综合性能。原材料的品质、配比和预处理质量影响了粉末在后续混合、成形和烧结过程中的行为。合理的原料准备能够减少缺陷形成，提高材料致密度，并为模具提供稳定的性能基础。在实际生产中，原料选择需根据模具的具体应用场景和性能指标进行针对性配置。

4.1.1 WC 粉末、Co 粉末及添加剂的性能要求

WC 粉末作为硬质合金模具的主要硬质相，其性能要求主要体现在纯度、粒度和晶体形态上。WC 粉末需要具有较高的化学纯度，以减少杂质对烧结过程和最终组织的影响。粒度分布应均匀，平均粒径根据细晶或粗晶体系的要求控制在适当范围，颗粒形状以近球形或轻微棱角状为宜，便于后续混合和致密化。WC 粉末的比表面积和流动性也需满足成形工艺的需求，以保证粉末在压制过程中均匀填充。

Co 粉末作为粘结相，其性能要求侧重于纯度、粒度和表面活性。钴粉末纯度较高时，能够在烧结过程中形成良好的液相润湿效果，促进硬质相颗粒的紧密结合。粒度一般较细，以利于在混合阶段均匀分散于 WC 颗粒周围。Co 粉末的氧含量和碳含量需要控制在较低水平，避免烧结时形成不利于性能的相结构。

添加剂如 TaC、NbC、TiC 等晶粒生长抑制剂，其性能要求包括适宜的粒度和化学活性。这些添加剂的粒径需与主体粉末相匹配，以便在混合和烧结过程中均匀分布并发挥抑制晶粒长大的作用。添加剂的纯度影响其在液相中的溶解行为和界面调控效果，过高的杂质含量可能导致局部组织缺陷。在配方设计中，添加剂的种类和加入量根据目标微观结构和性能指标进行优化，以实现硬质相与粘结相的良好协调。

4.1.2 原料纯度、粒度与氧含量控制

原料纯度、粒度与氧含量的控制是确保硬质合金模具材料质量的关键环节。纯度控制主要通过原料供应商筛选和入厂检测实现，WC 和 Co 粉末中的金属杂质和非金属杂质需控制在规定范围内，以避免烧结过程中形成脆性相或降低界面结合强度。粒度控制采用激光粒度分析仪等设备进行检测，确保粉末粒度分布符合设计要求，不同批次粉末的粒度一致性影响材料组织的均匀性。

氧含量控制尤为重要，因为过高的氧含量会在烧结前或烧结过程中与碳发生反应，影响合金的碳平衡和相组成。原料准备阶段通常采用氢气还原或真空处理方式降低氧含量，同时在混合过程中添加适量碳黑进行碳调节。氧含量过低或过高都会导致烧结体出现孔隙、脱碳或渗碳现象，进而影响硬度和韧性等力学性能。

在原料准备过程中，还需注意粉末的储存和运输条件，避免吸湿、氧化或污染。不同原料的

版权与免责声明

混合比例需精确称量，并记录批次信息以实现可追溯性。通过原料纯度、粒度与氧含量控制，硬质合金模具的制造工艺能够获得稳定的起始条件，为后续工序提供高质量粉末基础。

4.2 硬质合金模具的粉末冶金工艺

硬质合金模具的粉末冶金工艺是将原料粉末转化为具有一定形状和致密度的坯体或最终部件的核心过程。该工艺包括粉末混合、成形、脱脂和烧结等主要步骤，通过参数优化实现粉末颗粒的重排、致密化和相界面结合。粉末冶金工艺的优势在于能够制备形状复杂、性能均匀的硬质合金部件，同时适应不同规格模具的生产需求。

4.2.1 粉末的混合与成形

粉末的混合与成形是粉末冶金工艺中连接原料准备与后续烧结的重要环节。混合过程使 WC、Co 及添加剂粉末实现均匀分散，为成形提供成分一致的混合料。成形则通过施加压力将松散粉末转化为具有一定强度的坯体，坯体形状接近最终模具部件的几何轮廓。混合与成形参数的优化影响坯体的密度均匀性和缺陷控制水平。

4.2.1.1 湿磨混合工艺参数优化

湿磨混合工艺通过在液体介质中进行球磨，实现粉末的破碎、分散和均匀混合。工艺参数优化主要包括球磨时间、球料比、转速、介质种类和添加剂用量。适当延长球磨时间能够细化颗粒并促进均匀分布，但时间过长可能导致过度粉碎和污染。球料比和转速的匹配影响研磨效率和能量输入，需要根据粉末初始粒度进行调整，以避免颗粒团聚或引入过多杂质。

介质种类通常选择乙醇或丙酮等有机溶剂，既能降低粉末氧化，又能改善流动性。混合过程中可加入少量成型剂或分散剂，进一步提高混合料的均匀性和后续成形性能。湿磨结束后，通过过滤、干燥和筛分等步骤获得流动性良好的混合粉末。优化后的湿磨工艺能够显著提高粉末成分均匀性，减少硬质相与粘结相的偏析，为压制成形提供优质原料。

4.2.1.2 喷雾造粒与压制成形技术

喷雾造粒技术是将湿磨后的浆料通过雾化干燥制备成球形或近球形颗粒的过程。该技术改善了粉末的流动性和充填性，减少成形过程中的架桥现象和密度梯度。造粒参数包括浆料浓度、雾化压力、进风温度和收粉方式，这些参数的优化能够控制造粒颗粒的粒径分布和强度，使其适合自动压制设备的使用。

压制成形技术是将造粒粉末置于模具腔体内，通过单向或双向压制形成坯体。压力大小、加压速率和保压时间是主要工艺参数。适当的压力能够实现较高的坯体密度，同时避免层裂或弹性后效现象。双向压制有助于改善高度方向的密度均匀性，特别适合厚度较大的硬质合金模具部件。

在实际生产中，喷雾造粒与压制成形技术常常结合使用。造粒粉末良好的流动性使自动压机

版权与免责声明

能够实现稳定充填和一致压制，而精密模具的设计则保证了坯体形状的准确性。通过这些技术的优化，硬质合金模具的粉末成形阶段能够获得密度均匀、强度适宜的坯体，为后续脱脂和烧结工序奠定良好基础。

4.2.2 烧结过程对硬质合金模具性能的影响

烧结过程是硬质合金模具制造工艺中最为关键的环节之一，它直接影响了材料的致密度、微观组织结构以及最终的力学性能和使用可靠性。通过高温下的扩散、溶解-析出和致密化作用，松散的粉末坯体转变为具有一定强度和硬度的致密体。烧结参数的合理控制能够减少孔隙、优化晶粒尺寸和相分布，从而使硬质合金模具在成形作业中表现出良好的耐磨性、韧性和尺寸稳定性。

烧结过程对性能的影响主要体现在密度提升、晶粒生长控制和界面结合质量等方面。适当的烧结温度和保温时间有助于液相充分流动，填充颗粒间隙，提高整体致密度。温度过高或保温时间过长可能导致晶粒异常长大，降低材料的韧性；而温度不足则会造成烧结不足，残留较多孔隙，影响强度和硬度。冷却速率也会影响粘结相的晶型分布和残余应力状态，进而关系到模具的断裂韧性和热疲劳抵抗能力。

在实际制造中，烧结工艺还与模具的几何形状和尺寸相关。大型或复杂形状的硬质合金模具部件需要更加均匀的温度场，以避免因局部温度差异导致的变形或裂纹。烧结后的收缩率预测和补偿设计也是重要环节，通过前期试验数据调整坯体尺寸，使最终尺寸接近设计要求。烧结过程的稳定控制为硬质合金模具提供一致的材料基础，支持其不同工业成形领域中的可靠应用。

4.2.2.1 液相烧结机理与烧结制度控制

液相烧结机理是硬质合金模具制造的核心原理之一。在烧结温度达到钴的熔点附近时，钴相转变为液态，润湿并包裹碳化钨颗粒，通过毛细作用促进颗粒重排和溶解-析出过程。液相的流动填充了颗粒间的空隙，使坯体快速致密化，同时部分碳化钨溶解于液相钴中，在冷却阶段重新析出，形成良好的界面结合。

烧结制度控制主要包括升温速率、最高烧结温度、保温时间和冷却速率等参数的优化。升温速率需控制适当，避免坯体内部气体快速逸出导致开裂；最高烧结温度一般设定在钴液相出现并充分流动的区间，以实现最佳致密化效果。保温时间根据模具尺寸和成分进行调整，过短可能烧结不足，过长则易引起晶粒粗化。冷却速率影响粘结相的相变行为，缓慢冷却有助于减少残余应力。

工艺控制中还需注意炉内气氛的管理，以维持适宜的碳势，防止脱碳或渗碳现象。不同牌号的硬质合金模具，其烧结制度存在差异，细晶体系通常需要较低温度和较短保温时间以抑制晶粒生长，而添加多元抑制剂的体系则可适当放宽温度窗口。通过烧结制度控制，液相烧结过程能够形成均匀的微观组织，使硬质合金模具获得理想的硬度、韧性和耐磨性能平衡。

版权与免责声明

4.2.2.2 真空烧结与热等静压（HIP）工艺

真空烧结是硬质合金模具制造中广泛采用的工艺，它通过低压环境去除粉末中的吸附气体和挥发性杂质，促进致密化过程。真空条件有助于减少氧化反应，保持材料纯净度，同时改善液相相对硬质相的润湿效果，提高烧结体的密度和力学性能。在真空炉中，温度和真空度需协同控制，以避免钴的过度挥发或碳损失。

热等静压（HIP）工艺是在烧结后或同步进行的加压致密化技术，它利用高温高压的惰性气体介质对烧结体施加各向同性的压力，进一步消除残留闭孔，提高材料的致密度和均匀性。HIP 工艺特别适合大型或对内部缺陷敏感的硬质合金模具部件，能够显著降低孔隙率，提升断裂韧性和疲劳寿命。

真空烧结与 HIP 工艺的结合形成了高效的致密化路线。先进行真空烧结获得初步致密的坯体，再通过 HIP 处理消除微观缺陷，能够获得接近理论密度的材料。这种组合工艺在精密模具制造中表现出明显优势，使硬质合金部件的微观组织更加均匀，表面和内部性能差异减小。在实际生产中，工艺参数如 HIP 温度、压力和保温时间需根据材料成分和模具形状进行优化，以实现性能与成本的合理平衡。

4.3 硬质合金模具的加工技术

硬质合金模具的加工技术是在烧结后对材料进行精密成形和表面处理的重要工序。由于硬质合金材料硬度高、脆性较大，传统切削加工难度较高，因此需要采用专用刀具和工艺参数，以获得准确的几何形状和良好的表面质量。加工技术影响模具的工作轮廓精度、表面粗糙度和装配配合性能，是保证最终使用效果的关键环节。

4.3.1 精密铣削与磨削技术

精密铣削与磨削技术是硬质合金模具加工的主要方法，用于实现复杂型腔、通道和安装面的精确成形。铣削主要用于去除较大余量，成型粗加工轮廓；磨削则用于精加工和表面精整，提高尺寸精度和表面质量。两种工艺常常结合使用，先铣削后磨削，以平衡加工效率和最终精度。

加工过程中需要严格控制切削参数，包括切削速度、进给量和切削深度，以减少刀具磨损和工件表面损伤。硬质合金材料的高硬度要求采用低速大切深或高速小切深的策略，同时配合充足的冷却润滑，以降低加工热量对材料组织的影响。精密设备如数控加工中心和坐标磨床为这些工艺提供了稳定平台，支持复杂形状模具的高精度加工。

4.3.1.1 金刚石刀具与 CBN 刀具的应用

金刚石刀具与 CBN（立方氮化硼）刀具是加工硬质合金模具的理想选择。金刚石刀具具有极高的硬度和热导率，适合对硬质合金进行高速铣削和精磨，能够有效降低切削力和表面粗糙度。聚晶金刚石（PCD）刀具在加工非铁金属结合的硬质合金时表现出良好的耐磨性，适用

于型腔和通道的精加工。

CBN 刀具则以其高温硬度和化学稳定性见长，特别适合硬质合金的磨削和半精加工。在高温切削区，CBN 刀具能够保持锋利刃口，减少粘刀和崩刃现象。两种刀具的选用需根据加工阶段和模具形状特点进行匹配，金刚石刀具多用于最终精整，CBN 刀具则常用于较高余量去除阶段。

刀具几何参数（如前角、后角和刃口钝圆半径）的优化能够进一步提升加工质量。实际应用中，刀具寿命监测和及时更换是保证加工一致性的重要措施。通过金刚石和 CBN 刀具的应用，硬质合金模具的加工效率和表面质量得到显著改善，满足精密成形对模具精度的要求。

4.3.1.2 表面粗糙度与尺寸精度控制

表面粗糙度与尺寸精度控制是硬质合金模具加工技术的核心指标。表面粗糙度影响模具与成形材料之间的摩擦行为和脱模性能，通常要求工作表面达到较低的粗糙度数值，以减少粘着和磨损。精密磨削和抛光工艺是实现低粗糙度的主要手段，通过逐步减小磨粒粒度，获得镜面级表面效果。

尺寸精度控制涉及多道工序的累积误差管理。加工过程中采用在线测量或离线检测相结合的方式，及时反馈尺寸偏差并调整工艺参数。硬质合金材料的低热膨胀系数有助于尺寸稳定性，但加工热量和残余应力仍可能引起微小变形，因此需要合理的夹持方式和应力释放处理。

在多工序加工中，基准统一和工艺路线优化能够有效减少误差传递。最终检验采用三坐标测量机等设备验证关键尺寸和形位公差。通过表面粗糙度与尺寸精度控制，硬质合金模具能够满足高精度成形作业的要求，支持产品几何尺寸的稳定性和表面质量的提升。

4.3.2 电火花加工在硬质合金模具中的应用

电火花加工（EDM）是硬质合金模具制造中重要的非接触式精密加工方法，尤其适用于加工传统切削难以处理的复杂型腔、深孔、窄槽以及硬质合金高硬度区域。EDM 利用脉冲放电产生的瞬时高温使材料局部熔化或气化，从而实现材料去除。该工艺不受材料硬度的限制，能够加工出高精度轮廓和细微结构，在硬质合金模具的精加工阶段发挥重要作用。

在硬质合金模具制造流程中，EDM 常用于烧结后硬质合金镶块的型腔成型、冷却通道的精加工以及复杂曲面的加工。加工过程中，模具与电极之间充满工作液，脉冲电源提供能量，通过控制放电参数实现材料逐层去除。EDM 的优势在于能够加工高硬度材料，同时保持较高的形状精度和较好的重复性，特别适合小批量、多品种的精密模具生产。

应用中，EDM 工艺需要与模具结构特点相结合。对于带有硬质合金工作部分的复合模具，EDM 主要针对硬质合金区域进行加工，而钢基体部分则可采用常规切削方式。这种组合加工方式提高了整体制造效率，并减少了合金材料的加工难度。通过合理的工艺路线安排，EDM 能够有效补充精密铣削和磨削的不足，支持合金模具达到更高的几何复杂度和表面质量要求。

版权与免责声明

4.3.2.1 EDM 工艺参数对表面质量的影响

EDM 工艺参数对硬质合金模具的表面质量具有显著影响，主要参数包括峰值电流、脉冲宽度、脉冲间隔、电压和伺服进给速度等。峰值电流较大时，放电能量高，材料去除速率加快，但表面容易形成较大的熔坑和再铸层，导致表面粗糙度升高。适当降低峰值电流并配合较短脉冲宽度，能够减小单个放电坑的尺寸，使表面更加平整均匀。

脉冲宽度和间隔的匹配影响放电稳定性和表面形貌。较短脉冲宽度有利于减少热影响区深度，降低表面微裂纹的产生风险；而合理的脉冲间隔则保证了消电离时间，避免连续放电引起的局部过热。电压参数主要控制放电间隙大小，较高电压可提高加工效率，但可能增大表面粗糙度。伺服进给系统的稳定控制能够维持恒定的放电间隙，减少短路和开路现象，进一步改善表面质量。

在硬质合金模具加工中，工作液的选择和循环过滤也对表面质量产生作用。洁净的工作液能够及时带走蚀除物，减少二次放电对表面的损伤。通过优化上述工艺参数，EDM 加工后的硬质合金表面可以达到较低的粗糙度水平，同时控制再铸层厚度和微裂纹深度，满足精密成形对模具表面性能的要求。

4.3.2.2 电极材料选择与损耗控制

电极材料的选择直接关系到 EDM 加工的效率、精度和成本控制。常用电极材料包括石墨、铜和铜钨合金等。石墨电极具有良好的导电性和加工成形性，损耗较低，适合大面积粗加工和中加工；铜电极导热性好，放电稳定性高，常用于精加工阶段，能够获得较好的表面质量；铜钨合金电极结合了铜的导电性和钨的高熔点，在加工硬质合金时表现出较低的电极损耗和较高的耐蚀性。

电极损耗控制是 EDM 工艺中的重要课题。电极损耗主要来源于放电过程中电极材料的熔化和气化，损耗率与峰值电流、脉冲宽度以及极性设置密切相关。正极性加工（工件接正极）通常用于粗加工以提高去除率，而反极性加工则有利于降低电极损耗，适用于精加工。电极形状设计中的补偿量预留、旋转或摆动辅助运动等措施，能够进一步均衡电极各部位的损耗，维持加工精度的稳定性。

在硬质合金模具加工实践中，常常采用多电极策略：粗加工使用耐损耗的石墨电极，精加工则更换铜或铜钨电极以保证最终精度。通过实时监测电极损耗并动态补偿电极进给量，可以将尺寸误差控制在较小范围内。这种电极材料选择与损耗控制方法，使 EDM 在硬质合金模具制造中实现了效率与精度的平衡。

4.3.3 激光与超声波加工硬质合金模具

激光与超声波加工技术为硬质合金模具的制造提供了高效、精密的补充手段。这些非传统加工方法在处理高硬度、脆性材料时具有独特优势，能够实现微细结构加工、表面改性或辅助传统加工，提升整体制造水平。

版权与免责声明

4.3.3.1 激光切割与激光表面改性

激光切割技术利用高能量密度激光束对硬质合金进行局部熔化或气化，实现无接触、高精度切割。激光切割适用于硬质合金薄片、复杂外形轮廓或窄槽加工，具有热影响区小、切割速度快和边缘质量较好的特点。通过调整激光功率、切割速度和辅助气体类型，可以控制切割缝宽度和表面氧化程度，满足模具部件的精密下料或修整要求。

激光表面改性则通过激光熔覆、激光淬火或激光纹理化等方式改善硬质合金模具表面的性能。激光熔覆可以在模具工作表面形成一层高硬度、耐磨或抗氧化的合金层，进一步提升表面耐磨性和化学稳定性。激光纹理化能够在表面形成规则微结构，优化润滑剂保持能力和摩擦特性，减少成形过程中的粘着现象。

在实际应用中，激光加工参数需根据硬质合金的热导率和吸收率进行优化，以避免表面裂纹或残余应力过大。激光加工与传统机械加工的结合，能够实现复杂模具的高效制造，支持硬质合金模具在精密成形领域的应用。

4.3.3.2 超声辅助磨削的加工效率提升

超声辅助磨削是将超声振动叠加到传统磨削运动中的复合加工技术，能够显著提高硬质合金模具的加工效率和表面质量。超声振动使磨粒与工件表面产生周期性分离和冲击，减少磨削力、降低磨削温度，并改善磨屑排出条件，从而延长砂轮寿命并提高材料去除率。

在硬质合金模具加工中，超声辅助磨削特别适合精密型腔、深孔和曲面磨削。振动频率和振幅的优化能够有效降低磨削过程中的粘附和堵塞现象，使表面粗糙度得到改善，同时减少亚表面损伤。相比传统磨削，超声辅助方式在相同加工条件下可显著缩短加工时间，提升生产效率。

工艺参数控制包括超声功率、振动方向、磨削深度和进给速度等。合理的参数匹配能够平衡加工效率与表面完整性，避免因振动过强导致的微裂纹产生。超声辅助磨削与金刚石或CBN砂轮结合使用，进一步发挥了硬质合金高硬度材料的加工潜力。

通过激光与超声波加工技术的应用，硬质合金模具的制造工艺体系更加完善。这些先进加工方法与传统粉末冶金、精密切削和EDM工艺相互补充，为高性能硬质合金模具的生产提供了技术保障。

4.4 硬质合金模具的表面处理与涂层技术

硬质合金模具的表面处理与涂层技术是提升模具综合性能的重要手段。通过在合金基体表面形成一层或多层保护膜，可以显著改善模具的耐磨性、抗氧化能力、减摩性能以及抗粘着特性，同时一定程度上延长模具的使用寿命。表面处理与涂层技术与基体材料特性密切配合，在不改变合金核心力学性能的前提下，进一步优化模具在成形作业中的表面行为。不同涂层体系和沉积方法的选择需根据具体成形工艺、接触介质和工作温度范围进行合理匹配。

版权与免责声明

4.4.1 TiN、TiC 等涂层在硬质合金模具中的应用

TiN 和 TiC 涂层是硬质合金模具表面处理中较为常用的涂层类型。TiN 涂层呈现金黄色，具有较高的硬度和良好的化学稳定性，在金属塑性成形和塑料精密成型模具中应用广泛。TiN 涂层能够有效降低模具与成形材料之间的摩擦系数，减少粘着磨损，同时在一定温度范围内保持较好的抗氧化性能，使模具表面在连续作业中维持较为光滑的状态。

TiC 涂层以其极高的硬度和优异的耐磨特性著称，特别适合承受较高接触压力和磨粒磨损的场合，例如粉末冶金压制模具和金属挤压模具的工作表面。TiC 涂层与硬质合金基体的成分相近，界面相容性较好，能够形成稳定的结合，在高载荷条件下不易发生剥落。实际应用中，TiC 涂层有助于减少表面材料流失，维持模具型腔或通道的几何精度。

除单一涂层外，TiN/TiC 多层或梯度涂层体系也被用于硬质合金模具。这些复合涂层结合了 TiN 的低摩擦特性和 TiC 的高硬度优势，通过层间过渡设计缓解应力集中，提高涂层整体的韧性和附着力。在塑料与橡胶成型模具中，此类涂层还能改善脱模性能，降低成形件表面缺陷的发生概率。通过合理选用 TiN、TiC 等涂层，硬质合金模具的表面性能得到针对性增强，适应了不同工业成形场景的需求。

4.4.2 PVD 与等离子喷涂技术在硬质合金模具中的应用

PVD（物理气相沉积）和等离子喷涂技术是硬质合金模具表面涂层制备的两种主要方法。PVD 技术包括磁控溅射、弧离子镀等工艺，能够在较低温度下沉积致密、均匀且结合良好的薄涂层，特别适合精密硬质合金模具的表面改性。等离子喷涂则以较高沉积速率著称，适用于制备较厚涂层或复杂成分的陶瓷-金属复合涂层，在大型模具或需要较高耐磨储备的场合具有优势。

PVD 涂层在硬质合金模具中常用于形成纳米级或微米级保护层，具有表面光洁度高、尺寸影响小和涂层均匀性好的特点。等离子喷涂则可灵活调整涂层成分和厚度，适合在硬质合金镶块表面形成耐磨或隔热涂层。两种技术常常根据模具结构和服役条件组合使用，例如先采用 PVD 沉积过渡层，再通过等离子喷涂增加功能层厚度，以实现性能梯度设计。

在实际生产中，这两种表面处理技术与硬质合金基体的表面预处理（如清洗、离子刻蚀或微砂喷）紧密结合，以确保涂层质量的一致性。PVD 与等离子喷涂的应用丰富了硬质合金模具的表面工程手段，使模具能够在更高的工作温度、更强的摩擦环境或更复杂的介质条件下保持稳定性能。

4.4.2.1 涂层沉积工艺参数优化

涂层沉积工艺参数优化是获得高质量涂层的关键步骤，主要参数包括沉积温度、气压、偏压、功率或喷涂电流、送粉速率以及沉积时间等。对于 PVD 工艺，适当的基体偏压能够增强离子轰击效果，提高涂层致密度和与基体的结合强度；沉积温度需控制在硬质合金基体不发生明显组织变化的范围内，同时保证涂层原子具有足够的迁移能力。

等离子喷涂工艺中，喷枪功率、喷涂距离、送粉速率和载体气体流量影响熔滴飞行状态和涂层孔隙率。较高的功率可使喷涂材料充分熔化，但过高温度可能导致涂层氧化或相变；合理的喷涂距离和角度能够改善涂层均匀性和结合质量。沉积时间和多道喷涂策略的优化有助于控制涂层厚度，避免内应力积累过大。

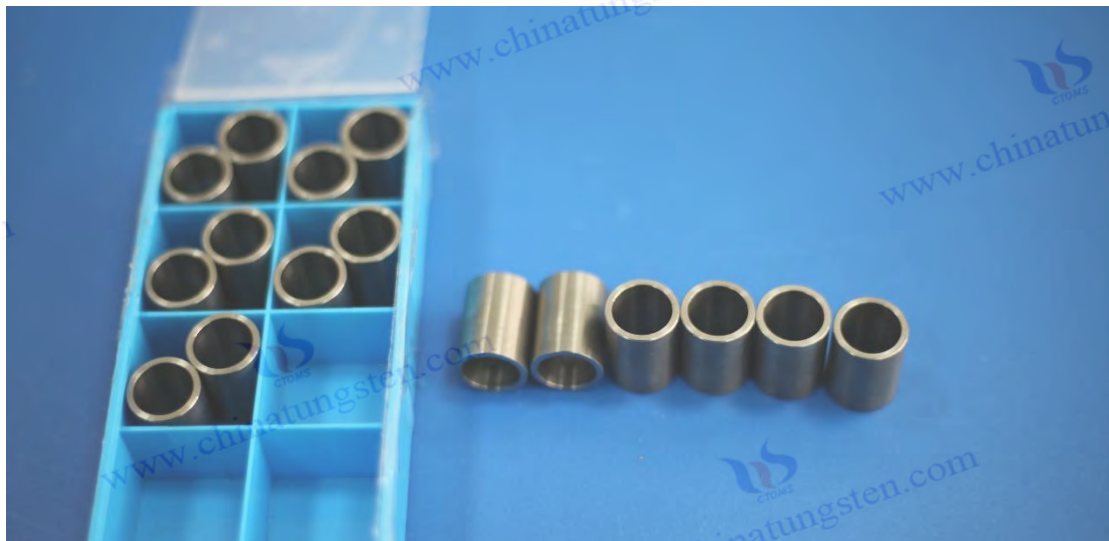
工艺参数优化通常结合正交试验、模拟分析和实际涂层性能检测进行。通过调整参数，可以在涂层硬度、残余应力、表面粗糙度和结合强度之间实现较好的平衡。对于不同牌号的硬质合金模具，沉积参数需进行针对性调整，以适应基体表面状态和热膨胀特性。优化后的工艺参数使涂层在硬质合金模具上的性能表现更加稳定，支持长期服役条件下的表面保护需求。

4.4.2.2 涂层与基体界面结合强度

涂层与基体界面结合强度是影响硬质合金模具表面处理效果的核心指标之一。良好的界面结合能够防止涂层在成形作业中因摩擦、冲击或热循环作用发生剥落或开裂。结合强度主要受界面清洁度、化学相容性、机械互锁和残余应力状态等因素影响。

PVD 工艺中，通过基体表面离子刻蚀去除氧化层和污染物，并形成微观粗糙表面，可以显著增强机械咬合和原子扩散结合。过渡层的设计（如 Ti 或 Cr 过渡层）能够缓解硬质合金基体与功能涂层之间的成分和热膨胀差异，降低界面应力集中。等离子喷涂工艺则依靠高温熔滴在基体表面的铺展和快速凝固形成结合，基体预热和表面粗化处理有助于提高结合面积和冶金结合程度。

界面结合强度的评价通常采用划痕试验、压痕试验或拉伸试验等方法。实际服役条件下，结合强度还与工作温度、接触介质和循环次数相关。较高的界面结合强度使涂层能够在反复加载和温度变化环境中保持完整性，从而有效发挥其耐磨、抗氧化和减摩作用。通过优化界面设计和沉积工艺，硬质合金模具的涂层与基体能够形成可靠的结合关系，支持模具在多种成形领域中的稳定应用。



中钨智造硬质合金模具

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！

采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

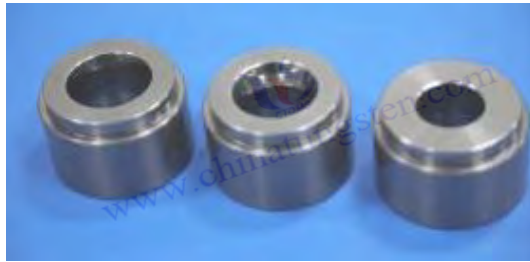
中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



版权与法律责任声明

第五章 硬质合金模具的性能评估与优化

5.1 硬质合金模具的性能评价标准

硬质合金模具的性能评价标准为材料选择、质量控制和性能验证提供了统一依据。这些标准涵盖硬度、密度、强度、耐磨性、断裂韧性以及微观组织等多个方面，通过规定的试验方法和验收指标，确保不同批次和牌号模具的一致性。评价标准体系包括国家标准、行业标准以及国际通用规范，在实际应用中常常相互参照，以适应全球化的生产和贸易需求。

5.1.1 中国钨合金光栅标准

中国针对硬质合金及相关钨基材料的性能评价建立了较为完善的标准化体系，主要通过国家标准（GB/T）和行业标准（如YS/T、JB/T等）对硬质合金模具的各项性能进行规范。这些标准对材料的化学成分、物理性能、力学性能以及试验方法做出了明确规定，例如密度测量、硬度测试、抗弯强度或横向断裂强度、断裂韧性以及耐磨性评价等。

在硬质合金模具领域，中国标准强调材料纯度控制、晶粒尺寸分布以及烧结体致密度的要求，同时规定了相应的取样和试验方法。硬质合金制品的标志、包装、运输和贮存也有专门标准予以规范，以保证产品在流通过程中的质量稳定性。此外，针对特定应用如拉伸模、冲压模等，还涉及耐磨性分级和使用性能的间接评价指标。

这些标准由相关主管部门组织制定和修订，体现了国内硬质合金产业的生产实践和技术水平。在性能评估过程中，企业通常按照国家标准进行出厂检验，并结合用户需求进行补充验证。中国标准体系为硬质合金模具的国产化生产和质量管理提供了基础框架，支持模具在金属塑性成形、粉末冶金以及精密成型等领域的可靠应用。

5.1.2 国际钨合金光栅标准

国际上，硬质合金材料的性能评价主要遵循ISO（国际标准化组织）等机构制定的通用标准。这些标准对硬质合金的分类、试验方法和性能指标进行了系统规范，为全球范围内的材料选型和质量对比提供了统一语言。

ISO标准体系中，硬质合金的分类常依据应用场景和性能平衡进行划分，例如按照被加工材料类型（钢、不锈钢、铸铁等）或性能等级（硬度与韧性的匹配）进行标识。性能评价方面，涉及硬度测试、压缩强度、横向断裂强度、断裂韧性以及磨损试验等标准化方法。国际标准还对尺寸公差、微观组织检验以及涂层性能评价做出了相应规定。

在合金模具的性能评估中，国际标准强调试验条件的可重复性和结果的可比性。例如，硬度测试采用特定载荷和压头，耐磨性评价则通过规定条件的摩擦磨损试验进行量化。这些标准广泛应用于国际贸易和技术交流中，帮助制造商和用户在不同地区间实现性能指标的对接。

通过国际标准，硬质合金模具的性能评价能够超越地域限制，形成更为客观和科学的评估体

版权与免责声明

系。这类标准在优化材料配方和工艺参数时，也为企业提供了重要的参考依据。

5.1.3 欧美日韩等国的钨合金光栅标准

欧美日韩等国家和地区在硬质合金性能评价方面形成了各具特色的标准化体系，这些标准与国际标准相互补充，并在各自工业体系中得到广泛应用。

在美国，ASTM（美国材料与试验协会）标准是硬质合金性能评价的重要组成部分，涵盖硬度测试、横向断裂强度、矫顽力测量以及磨损性能评价等方法。ASTM 标准注重试验程序的详细性和结果的统计处理，适用于高精度模具的性能验证。在欧洲，DIN/EN/ISO 相结合的标准体系较为常见，强调压缩强度、断裂韧性和尺寸公差控制，适合精密工程应用。

日本的 JIS 标准在硬质合金领域具有较高的精细化特点，对材料牌号、化学成分、力学性能以及表面质量提出了具体要求，特别注重在精密成形模具中的应用一致性。韩国的 KS 标准则与 JIS 标准存在一定对应关系，同时结合本国产业特点进行调整，在耐磨性和高温性能评价方面有相应规范。

这些国家和地区的标准在性能指标设定上各有侧重，例如欧美标准可能更关注断裂韧性和疲劳性能，而日韩标准则在硬度和耐磨性的精细分级上体现出较高精度。在全球供应链中，硬质合金模具的性能评估常常需要同时满足多套标准的要求，通过交叉验证确保产品兼容性。

欧美日韩等国的标准体系为硬质合金模具的国际化生产提供了多样化的评价工具。企业在进行性能优化时，可根据目标市场和应用场景，灵活参照相应标准进行测试和改进，从而提升模具的综合竞争能力。

通过上述性能评价标准体系，硬质合金模具的性能评估与优化工作能够建立在科学、规范的基础上。随着材料技术和测试手段的进步，这些标准也在持续更新，以适应工业成形领域对更高精度和更长寿命模具的需求。实际操作中，建议结合具体模具类型和服役条件，选择适宜的标准组合进行全面评价。

5.2 硬质合金模具的磨损与疲劳性能评估

硬质合金模具的磨损与疲劳性能评估是衡量其在实际成形作业中长期可靠性的重要内容。这些评估通过标准化试验方法和定量指标，系统分析模具在摩擦、循环载荷以及冲击作用下的损伤行为和寿命特征。磨损评估重点关注表面物质流失规律，而疲劳评估则侧重于材料在反复加载下的裂纹萌生与扩展特性。通过科学评估，可以为材料配方优化、结构设计改进和表面处理方案提供数据支持，帮助延长模具使用周期并降低生产成本。

5.2.1 硬质合金模具的耐磨性测试方法

硬质合金模具的耐磨性测试方法旨在模拟实际成形过程中的摩擦与磨损环境，量化材料抵抗表面损伤的能力。测试通常在控制的试验条件下进行，通过对比不同牌号或处理状态的模具

材料，获得可靠的耐磨性能数据。这些方法为材料选型和工艺验证提供了客观依据。

5.2.1.1 磨损试验标准与设备

磨损试验标准主要参考国际和国家相关规范，例如采用往复滑动磨损、销盘磨损或磨粒磨损试验方法。常见标准包括 ISO 28079、GB/T 系列以及 ASTM 相关规范，这些标准对试验条件、试样制备、加载方式和结果报告格式做出了明确规定。

试验设备主要有销盘式摩擦磨损试验机、往复式磨损试验机和磨粒喷射试验装置等。销盘试验机通过固定销试样与旋转盘对磨，模拟模具与被加工材料之间的连续滑动摩擦；往复式设备则更接近冲压或拉伸过程中的间歇接触状态。磨粒磨损试验设备可引入标准磨粒介质，模拟含有硬质夹杂物的成形环境。

试验过程中，需严格控制载荷、滑动速度、润滑条件以及环境温度等参数，以保证结果的可重复性。对于硬质合金模具，通常采用块状或环状试样，试验前需对表面进行精密研磨以确保初始状态一致。设备配备高精度电子天平和表面形貌仪，用于实时或阶段性测量磨损情况。

5.2.1.2 磨损量与磨损率定量表征

磨损量与磨损率的定量表征是耐磨性评估的核心内容。磨损量一般通过质量损失法或体积损失法进行测量。质量损失法使用高精度天平记录试验前后试样的质量变化，适用于磨损量较小的精密评估；体积损失法则通过表面轮廓仪或三维形貌扫描仪测量磨痕深度和宽度，计算出磨损体积，更直观地反映表面损伤程度。

磨损率通常以单位滑动距离或单位时间的磨损体积来表示，例如 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 或 mg/h 等单位。这种归一化表征方式便于不同试验条件下的结果对比。硬质合金模具的磨损率还可进一步分为稳态磨损率和初始磨损率，初期阶段磨损速率较高，随后进入相对平稳的稳态阶段。

在评估报告中，常常结合表面形貌分析和磨损机制观察，对磨损量和磨损率进行综合解读。例如，磨粒磨损主导时表面呈现犁沟特征，而粘着磨损则可能出现材料转移层。通过这些定量与定性相结合的特征方法，能够准确判断硬质合金模具在不同成形介质下的耐磨表现，为表面处理方案的优化提供参考。

5.2.2 疲劳寿命与抗冲击性能的评估

疲劳寿命与抗冲击性能的评估重点考察硬质合金模具在循环应力和突发载荷作用下的损伤容忍能力。这些评估有助于预测模具在长期生产中的失效模式，并为结构设计和材料改进提供指导。

5.2.2.1 循环加载试验方法

循环加载试验方法主要采用三点或四点弯曲疲劳试验、压缩疲劳试验以及模拟实际服役条件

的复合加载试验。试验在专用疲劳试验机上进行，通过设定最大应力、最小应力、应力比和加载频率，模拟模具在成形过程中的反复受力状态。

试验通常采用阶梯加载或恒幅加载方式，直至试样发生断裂或达到预设循环次数。疲劳寿命以循环次数(N)表示，常用S-N曲线(应力-寿命曲线)来描述不同应力水平下的寿命分布。对于硬质合金模具，还需关注高温疲劳和热-力耦合疲劳试验，以反映实际温热成形条件下的性能表现。

数据处理中，常采用威布尔分布等统计方法分析寿命分散性，并结合断口形貌观察确定裂纹萌生位置和扩展路径。通过循环加载试验，可以获得硬质合金模具在不同应力水平下的安全工作范围，为模具设计中的强度裕度选择提供依据。

5.2.2.2 冲击韧性分析与断裂行为分析

冲击韧性评估主要通过夏比冲击试验或落锤冲击试验进行。试验使用带有缺口的硬质合金试样，在规定温度下测量吸收的冲击能量，以量化材料抵抗突发载荷的能力。硬质合金模具的冲击韧性受钴含量、晶粒尺寸和微观组织均匀性影响，试验结果为材料优化改性提供方向。

断裂行为分析结合冲击试验后的断口观察和断裂韧性测试(例如单边缺口梁法或压痕法)共同开展。扫描电子显微镜用于观察断口形貌，区分脆性断裂、韧性断裂或混合断裂模式。裂纹扩展路径分析可以揭示硬质相与粘结相在断裂过程中的作用机制。

在评估中，冲击韧性与断裂行为数据常常与疲劳寿命结果相互印证。例如，较高冲击韧性的材料在循环加载中可能表现出更好的裂纹阻滞能力。通过这些评估方法，能够全面了解硬质合金模具在冲击和疲劳共同作用下的性能特征，为优化材料组成和表面处理提供科学支撑。

通过系统的磨损与疲劳性能评估，硬质合金模具的性能优化工作能够建立在可靠的试验数据基础上。这种评估体系在实际生产中帮助企业持续改进模具质量，提升其在各种成形领域的适应性和经济性。

5.3 硬质合金模具的热性能分析

硬质合金模具的热性能分析是评价其在成形作业中温度变化环境下工作稳定性的重要内容。热性能涉及材料对温度的响应能力，包括热稳定性、热疲劳抵抗以及温度分布和热应力行为。这些分析通过试验测量与数值模拟相结合的方式，揭示模具在加热、保温和冷却循环过程中的热行为特征，为材料选择、结构优化和工艺参数调整提供依据。在实际工业应用中，热性能分析有助于减少因温度相关因素导致的模具变形、开裂或寿命缩短等问题，支持模具在不同成形工艺条件下的可靠运行。

5.3.1 热稳定性与热疲劳性能分析

硬质合金模具的热稳定性分析主要考察材料在持续高温或温度波动环境中保持组织结构和

性能的能力。分析内容包括高温下的硬度保留率、强度变化趋势以及微观组织演化情况。通过高温保温试验，可以观察碳化钨晶粒是否发生明显长大、粘结相是否出现偏析或氧化层是否过度生长等现象。热稳定性较好的材料能够在较宽温度范围内维持较为稳定的力学性能，避免因长期高温暴露导致的软化或脆化。

热疲劳性能分析重点研究模具在反复加热与冷却循环作用下的损伤积累规律。试验通常采用感应加热或电阻加热结合强制冷却的方式，模拟实际成形过程中的温度循环。分析指标包括裂纹萌生循环次数、裂纹扩展速率以及表面氧化程度等。影响热疲劳性能的主要因素有热膨胀系数、热导率、粘结相含量以及晶粒尺寸。较低的热膨胀系数和较高的热导率有助于减小温度梯度，从而降低热应力水平，延长热疲劳寿命。

在性能分析过程中，还需结合断口观察和金相检验，判断热疲劳裂纹的起源位置和扩展路径。典型裂纹多起始于表面或硬质相与粘结相界面处，并沿晶界或穿过粘结相区域发展。通过对比不同牌号硬质合金在相同热循环条件下的表现，可以为材料体系的优化提供方向，例如调整钴含量或引入晶粒生长抑制剂以改善热疲劳抵抗能力。

5.3.2 硬质合金模具的温度场与热应力分析

硬质合金模具的温度场与热应力分析旨在量化模具在实际服役过程中的温度分布特征和由此产生的内应力状态。这些分析能够预测潜在的失效风险，并指导冷却系统设计和结构改进。温度场分析关注热量输入、传导和散失的动态过程，而热应力分析则重点考察因温度不均匀引起的膨胀差异所产生的应力分布。

分析通常结合试验测量与数值模拟进行。试验中可在模具关键部位布置热电偶或红外测温仪，记录实际生产条件下的温度变化曲线，为模拟模型提供边界条件验证。热应力分析则需要考虑材料的热物性参数，包括热膨胀系数、热导率、比热容以及弹性模量随温度的变化关系。这些参数的准确获取是保证分析结果可靠性的基础。

通过温度场与热应力分析，可以识别模具中的高温热点、冷却死区以及高应力集中区域，为后续的结构优化提供针对性建议。在温热成形或高温挤压工艺中，此类分析尤为重要，能够帮助工程师合理布置冷却通道、调整加热参数或优化镶块厚度，以实现温度场均匀化和热应力最小化。

5.3.2.1 有限元模拟方法

有限元模拟方法是硬质合金模具温度场与热应力分析的主要技术手段。它将模具几何模型离散为有限数量的单元，通过求解热传导方程和热-弹性方程，获得温度分布和应力场云图。常用的商用有限元软件如 ANSYS、ABAQUS 或 COMSOL 等，能够处理复杂的几何形状和多物理场耦合问题。

模拟过程一般分为前处理、求解和后处理三个阶段。前处理阶段需建立准确的几何模型、定义材料热物性参数、施加边界条件（如对流换热系数、热流密度或接触热阻）和划分高质量

网格。网格在温度梯度较大的区域需适当加密，以提高计算精度。

求解阶段可采用稳态或瞬态热分析方法。对于循环作业的模具，瞬态分析能够模拟多个加热-冷却周期的温度演化过程。热应力分析则在温度场结果的基础上，施加相应的约束条件，计算热膨胀引起的应力分布。模拟中还可引入相变、辐射或接触非线性等高级模型，以更接近实际服役条件。

后处理阶段通过云图、曲线和数据提取等方式，直观展示温度场和应力场的分布特征。参数敏感性分析可以进一步探讨冷却介质流速、通道布局或材料成分变化对热性能的影响，为设计优化提供定量指导。有限元模拟方法的优势在于能够在物理样机制造前预测潜在问题，显著降低试验成本和开发周期。

5.3.2.2 热应力分布与裂纹预测

热应力分布分析重点关注模具不同区域的应力类型、大小和方向。典型热应力包括表面拉应力、心部压应力以及界面处的剪切应力。在加热阶段，型腔表面因温度升高较快而产生压应力；冷却阶段则因表面收缩更快而转为拉应力。反复的拉-压应力转换是热疲劳裂纹萌生的主要驱动力。

高应力集中区域通常出现在几何突变处（如尖角、薄壁过渡区）、冷却通道出口附近以及硬质合金镶块与钢基体的结合界面。模拟结果可以直观显示这些区域的 Von Mises 等效应力水平，并与材料的屈服强度或疲劳极限进行对比，评估安全裕度。

裂纹预测基于热应力分析结果，结合断裂力学原理进行。常用方法包括最大主应力准则、应变能密度准则或疲劳损伤累积模型。通过计算应力强度因子或损伤变量随循环次数的变化，可以预测裂纹萌生位置、初始扩展方向和临界裂纹长度。表面涂层或残余应力引入等因素也可纳入模型，以评估其对裂纹扩展的抑制作用。

5.4 硬质合金模具的质量控制与检测技术

硬质合金模具的质量控制与检测技术贯穿制造全过程，旨在确保材料性能、几何精度和表面质量符合设计要求。通过系统化的检测手段和控制方法，可以及时发现潜在缺陷，减少批次间差异，并为后续工艺改进提供数据支持。质量控制体系通常包括原材料检验、过程监控和成品验证三个主要阶段，结合统计过程控制等管理工具，实现模具质量的稳定性和一致性。

5.4.1 显微结构与表面质量的检测方法

显微结构检测是评价硬质合金模具材料内在质量的重要手段，主要采用光学显微镜和扫描电子显微镜（SEM）进行观察。光学显微镜用于检查碳化钨晶粒大小、分布均匀性和粘结相连续性，通过金相试样制备和腐蚀后可清晰显示两相组织特征。扫描电子显微镜则能够提供更高分辨率的图像，结合能谱分析（EDS）识别局部成分偏析、孔隙或夹杂物等缺陷。

表面质量检测重点关注工作表面的粗糙度、完整性和微观形貌。常用设备包括表面粗糙度仪和白光干涉仪，能够定量测量 Ra、Rz 等参数，并生成三维表面形貌图。扫描电子显微镜还可用于观察表面微裂纹、再铸层或涂层完整性。对于涂层模具，截面金相分析能够直观显示涂层厚度、界面结合状态以及可能的脱层现象。

检测过程中，需按照标准取样方案进行，关键部位和一般部位分别检验，以全面反映模具质量状况。检测结果与工艺参数记录相结合，便于追溯缺陷成因并优化制造过程。通过这些显微结构与表面质量检测方法，硬质合金模具的内在组织和外在表面状态能够得到有效监控，确保产品满足成形作业的性能要求。

5.4.2 模具精度与公差控制技术

模具精度与公差控制技术是保证硬质合金模具几何尺寸和形位公差达到设计指标的关键环节。精度控制贯穿设计、加工和装配全过程，通过合理的公差分配和过程监控，减少累积误差对最终成型件质量的影响。公差控制需考虑硬质合金的低热膨胀特性、加工残余应力以及装配配合要求，形成从坯体到成品的完整精度链。

5.4.2.1 三坐标测量与光学检测

三坐标测量机（CMM）是模具精度检测的核心设备，能够高精度地获取空间坐标数据，实现复杂曲面、孔系位置度和形位公差的测量。测量时采用接触式或非接触式探头，根据编程路径自动采集关键尺寸，并与理论模型进行比对，生成偏差报告和彩色偏差云图。三坐标测量适用于硬质合金镶块、型腔轮廓和定位基准面的精密检验，测量精度可达微米级。

光学检测技术作为补充手段，具有非接触、高速和适合大面积测量的特点。激光扫描仪和光学影像测量仪能够快速获取表面点云数据，特别适合复杂自由曲面和薄壁结构的检测。光学检测还可用于模具装配后的合模间隙和对中性检查，避免接触测量可能带来的表面损伤。

两种检测技术常常结合使用：三坐标测量提供高精度基准数据，光学检测实现快速全场扫描。通过数据融合和统计分析，可以全面掌握模具的尺寸一致性和公差满足情况，为精度控制和过程改进提供可靠依据。

5.4.2.2 无损检测技术的应用

无损检测技术在硬质合金模具质量控制中发挥重要作用，能够在不破坏模具结构的前提下发现内部和表面缺陷。常见方法包括超声波检测、涡流检测、磁粉检测和 X 射线检测等。

超声波检测适合检查硬质合金内部的孔隙、夹杂和裂纹，通过声波反射信号判断缺陷位置和大小。涡流检测对表面和近表面缺陷敏感，适用于涂层质量和表面裂纹的快速筛查。X 射线或工业 CT 检测能够提供模具内部的三维缺陷分布图像，适合复杂结构模具的内部质量验证。

无损检测技术的选择需根据模具材料特性、缺陷类型和检测灵敏度要求进行。对于硬质合金

模具，检测前通常需要进行表面清洁和耦合剂选择，以提高信号质量。检测结果结合验收标准进行评级，并作为过程质量记录的重要组成部分。通过无损检测的应用，可以及早发现制造过程中的潜在问题，减少成品返工和使用风险。

5.5 硬质合金模具的生命周期管理与性能优化

硬质合金模具的生命周期管理以全寿命周期视角对模具从设计、制造、使用、维护到报废再制造的全过程进行系统规划。通过性能监测和持续优化，实现模具利用率的最大化和综合成本的最小化。生命周期管理强调数据驱动决策，将服役数据反馈到设计和制造环节，形成闭环改进机制。

5.5.1 服役过程性能退化监测

服役过程性能退化监测通过定期或在线检测手段跟踪模具在使用中的状态变化。监测内容包括表面磨损量、型腔尺寸变化、裂纹扩展情况以及温度响应特征等。常用方法有定期停机测量、模具表面复印技术以及嵌入式传感器实时监测。

表面磨损监测可采用激光扫描或光学轮廓仪定期测量关键区域的磨损深度和形貌变化，结合生产批次记录建立磨损曲线。尺寸退化监测重点关注成形件的关键尺寸波动，通过统计过程控制图判断模具精度保持能力。裂纹监测则采用渗透检测或声发射技术，及早发现表面或亚表面损伤。

监测数据经过整理分析后，形成模具健康状态评估报告。根据退化趋势，可以提前安排维护或更换计划，避免突发失效导致的生产中断。通过长期服役过程性能退化监测，企业能够积累丰富的现场数据，为后续模具设计和材料优化提供真实服役条件下的参考依据。

5.5.2 性能优化途径与再制造技术

硬质合金模具的性能优化途径主要包括材料改性、结构优化、表面处理升级和工艺参数调整等。材料改性可通过调整钴含量、细化晶粒或添加抑制剂来改善韧性与耐磨性的平衡。结构优化借助有限元分析调整镶块厚度、冷却通道布局和应力集中区域的几何特征。表面处理升级则采用新型涂层体系或激光改性技术，进一步提升耐磨和抗疲劳性能。

再制造技术是延长模具生命周期的重要手段，主要包括表面修复、尺寸恢复和性能恢复等工艺。对于磨损严重的模具，可采用激光熔覆或等离子喷涂技术在工作表面重新沉积耐磨层；对于发生局部损伤的部位，可通过精密焊接或镶块更换进行修复。再制造过程中需对基体进行无损检测，确保修复区域与原基体结合良好，并通过后续热处理释放残余应力。

再制造后的模具需进行全面性能验证，包括尺寸精度、表面质量和模拟服役试验，确保其性能达到或接近新模具水平。通过再制造技术，硬质合金模具的材料利用率得到显著提高，综合使用成本降低，同时减少了资源消耗和环境影响。

版权与免责声明

第六章 硬质合金模具的应用

6.1 硬质合金模具在注塑成型中的应用

硬质合金模具在注塑成型中的应用主要体现在需要承受较高注射压力、频繁开合模循环以及对表面质量和尺寸精度要求场合。硬质合金通常以镶块形式嵌入钢制模具基体中，承担型腔、型芯或滑块等直接与塑料熔体接触的部分。这种组合结构既发挥了硬质合金的耐磨和耐热优势，又利用钢基体的韧性和加工便利性，形成合理的综合性能配置。在注塑生产中，硬质合金模具能够支持工程塑料、玻璃纤维增强塑料以及光学级材料的高效成形。

6.1.1 注塑模具的硬质合金材料选择与应用

注塑模具的硬质合金材料选择需要根据塑料种类、填充物含量、成型温度和生产批量进行综合考虑。材料选型的核心是在硬度、耐磨性与韧性之间取得平衡，同时兼顾热导率和热膨胀系数，以适应注塑过程的热循环特点。

6.1.1.1 高耐磨注塑模具的硬质合金选型

高耐磨注塑模具通常用于加工含有玻璃纤维、碳纤维或其他磨粒填料的工程塑料。这些塑料熔体在流动过程中对模具表面产生强烈的磨粒磨损，因此需要选用硬质相含量较高、晶粒较细的钨钴系硬质合金。细晶或超细晶牌号能够提供较高的表面硬度和均匀的组织结构，减少磨损速率并维持型腔轮廓的长期稳定性。

在选型时，还需考虑钴含量的适度控制，以保证一定的韧性，避免模具在高注射压力下发生脆性损伤。对于高填充材料成形，常常选用添加 TaC 或 NbC 等晶粒生长抑制剂的硬质合金体系，进一步提升耐磨性能和抗热疲劳能力。这种选型方案使硬质合金镶块在玻璃纤维增强尼龙、PBT 等材料的注塑生产中表现出较低的表面磨损速率和较长的维护周期。

6.1.1.2 光学级与精密结构件注塑中的表现

在光学级注塑和精密结构件生产中，硬质合金模具需要满足极高的表面光洁度和尺寸稳定性要求。光学级模具通常选用中等钴含量、晶粒细小且组织均匀的硬质合金材料，经过精密抛光后可获得镜面级表面质量，显著减少塑料制品的光学缺陷，如雾度、流痕或焊缝痕迹。

精密结构件注塑对模具的重复定位精度和热尺寸稳定性有较高要求。硬质合金较低的热膨胀系数有助于减少温度变化引起的型腔尺寸波动，保证多腔模具各腔体成形条件的一致性。在实际应用中，硬质合金镶块与钢基体的热膨胀匹配设计，以及合理的冷却通道布置，能够有效控制模具温度场均匀性，从而提升精密结构件的尺寸合格率和表面质量。

6.1.2 硬质合金模具在高精度注塑中的表现

硬质合金模具在高精度注塑中的表现主要体现在能够长时间维持型腔精度和表面状态，支持

高节拍、零缺陷生产。其材料特性和结构设计使模具在反复热循环和注射压力作用下保持良好的工作性能。

6.1.2.1 尺寸稳定性与表面质量控制

硬质合金模具的尺寸稳定性得益于材料较低的热膨胀系数和较高的刚度。在注塑过程中，模具温度虽然会周期性波动，但硬质合金工作部分尺寸变化较小，能够有效控制成形件的壁厚、公差和形位精度。配合精密冷却系统，模具各区域温度分布更为均匀，进一步减少因热应力导致的变形。

表面质量控制方面，硬质合金经过精密研磨和抛光后可达到极低的表面粗糙度。配合适当的涂层处理，能够显著降低塑料熔体对型腔表面的粘附倾向，减少脱模力并改善制品表面光洁度。在玻璃纤维增强材料注塑中，硬质合金模具的耐磨特性使型腔表面长时间保持光滑状态，避免因模具磨损导致的产品外观缺陷。

6.1.2.2 模具寿命与生产效率提升

硬质合金模具在高精度注塑中的寿命通常显著优于传统钢制模具，尤其在加工高填充或高腐蚀性塑料时表现更为突出。较低的磨损速率减少了型腔尺寸超差和表面损伤的频率，延长了模具的整体维护周期，从而提高了设备开动率和生产效率。

生产效率的提升还体现在缩短冷却时间和减少废品率方面。硬质合金良好的热导率有助于快速均匀散热，使成形周期得到优化。同时，稳定的模具精度降低了调试时间和试模次数，支持多品种、小批量的高精度生产模式。在实际注塑生产线中，采用硬质合金模具的企业往往能够在保证产品质量的前提下实现更高的单位时间产量和更低的综合生产成本。

通过在注塑成型领域的应用实践，硬质合金模具以其特有的材料优势，为精密塑料制品的生产提供了可靠的技术支撑。随着塑料材料和注塑工艺的不断发展，硬质合金模具的应用形式和性能优化方向也在持续演进。

6.2 硬质合金模具在压铸中的应用

硬质合金模具在压铸领域主要用于承受较高注射压力和反复热循环的场合。压铸过程中，熔融金属以较高速度充填型腔，对模具表面产生强烈的冲刷和热冲击。硬质合金以镶块形式嵌入钢制模具基体，能够有效抵抗金属液的冲蚀和高温作用，提高模具在批量生产中的稳定性和使用寿命。在铝合金、锌合金等有色金属压铸中，硬质合金模具的应用日益广泛，成为提升生产效率和产品精度的重要选择。

6.2.1 压铸模具的设计要求与硬质合金模具的优势

压铸模具的设计要求主要包括良好的耐热疲劳性能、高表面硬度、优异的尺寸稳定性以及便于脱模的结构设计。模具需承受反复的快速加热与冷却，同时抵抗高温金属液的冲刷和粘附。

版权与免责声明

型腔表面应具有较低的粗糙度，以减少成形件表面缺陷并便于脱模。

硬质合金模具在压铸中的优势体现在多个方面。其较高的硬度和耐磨性能够显著降低型腔表面在金属液冲刷下的磨损速率，维持型腔轮廓的长期精度。较低的热膨胀系数有助于减少温度变化引起的尺寸波动，保证压铸件的尺寸一致性。硬质合金良好的热导率也有利于热量快速传递，配合合理的冷却系统，能够缩短压铸周期并降低热应力积累。

与传统热作模具钢相比，硬质合金镶块在高磨损区域的使用能够延长模具整体寿命，减少频繁修模次数。在复杂结构压铸模具中，硬质合金可针对性地应用于浇口、溢流槽和型腔高应力部位，形成局部强化设计。这种组合应用方式既发挥了硬质合金的性能优势，又保持了模具整体的韧性和加工便利性。

6.2.2 高温合金压铸中硬质合金模具的性能

高温合金压铸对模具材料提出了更高的耐热和抗软化要求。硬质合金模具在这一领域能够适应较高的工作温度范围，通过材料组成和表面处理的优化，表现出较好的综合性能。

6.2.2.1 硬质合金模具在铝合金与锌合金压铸中的应用

在铝合金压铸中，硬质合金模具主要用于型腔、滑块和型芯等直接接触熔融铝液的部分。铝合金熔体温度一般在 650 - 750°C 左右，硬质合金能够抵抗铝液的粘附和冲刷，减少型腔表面逐渐形成的铝合金沉积层。细晶硬质合金镶块在长时间生产中表现出较低的磨损速率，有助于维持压铸件表面光洁度和尺寸精度。

锌合金压铸的工作温度相对较低，但锌液的流动性强，对模具表面的冲蚀作用明显。硬质合金模具在此类应用中能够有效控制表面粗糙度的增长，延长模具维护间隔。在多腔压铸模具中，硬质合金镶块的均匀磨损特性还有利于各腔体压铸件的一致性，提高整体生产合格率。

实际应用中，硬质合金镶块与钢基体的配合设计需充分考虑热膨胀差异，通过合理的过盈量或过渡结构减少界面应力。在铝合金和锌合金压铸生产线中，硬质合金模具的应用显著提升了模具寿命和产品表面质量，支持较高节拍的稳定生产。

6.2.2.2 硬质合金模具的高温抗软化与抗热裂性能

硬质合金模具的高温抗软化性能主要来源于碳化钨硬质相的高熔点和稳定性。在较高温度下，粘结相虽有一定软化，但硬质相仍能保持主要的承载能力，使整体硬度下降幅度相对有限。这种特性使模具在铝合金压铸的反复热循环中能够维持较高的表面硬度，减少因软化导致的塑性变形。

抗热裂性能是硬质合金模具在压铸应用中的另一重要优势。较低的热膨胀系数和适中的热导率有助于减小模具内部的温度梯度，从而降低热应力水平。合理的钴含量和细晶组织进一步增强了材料对热疲劳裂纹的抵抗能力，延缓裂纹的萌生和扩展。

版权与免责声明

在实际压铸过程中，硬质合金模具的抗热裂表现还与冷却系统设计密切相关。均匀的冷却能够进一步减小表面与内部的温差，减少热裂风险。通过材料选型和工艺优化的结合，硬质合金模具在高温合金压铸中能够以较稳定的状态支持长期连续生产。

6.3 硬质合金模具在冷、热锻造中的应用

硬质合金模具在冷锻和热锻领域用于承受高单位压力和反复冲击载荷的场合。冷锻模具主要利用硬质合金的高硬度和高压缩强度，而热锻模具则更注重材料的热稳定性和抗热疲劳性能。硬质合金通常以镶块或整体形式应用于锻模的工作部分，能够显著提高模具在高负荷环境下的寿命。

6.3.1 锻模设计的硬质合金材料选择

锻模设计的硬质合金材料选择需根据锻造工艺类型、锻件材料和变形温度进行匹配。冷锻模具一般选用高硬度、低钴含量的细晶或超细晶硬质合金，以获得优异的耐磨性和抗压性能，适合高强度钢件或有色金属的冷挤压和冷锻成形。

热锻模具则倾向于中等钴含量、添加晶粒生长抑制剂的硬质合金体系，以平衡高温强度和韧性。材料选择时需考虑锻造温度下的软化趋势和热膨胀特性，确保硬质合金镶块与钢基体在高温下的配合稳定性。对于大型锻模，硬质合金常用于高磨损区域，如凹模工作面和凸模端部，形成局部强化设计。在锻模结构设计中，硬质合金镶块的安装方式（如过盈配合、热套或机械固定）需充分考虑应力分布和热应力释放。合理的材料选择能够使锻模在高循环次数下保持型腔精度，减少锻件尺寸波动和表面缺陷。

6.3.2 硬质合金模具在高温环境下的表现与优化

硬质合金模具在高温锻造环境下的表现主要取决于其热稳定性、抗热疲劳能力和表面保护措施。通过持续的材料和工艺优化，这种模具能够在较高温度下维持较好的工作性能。

6.3.2.1 热锻模的热疲劳抵抗能力

热锻模的热疲劳抵抗能力是评价其高温表现的核心指标。硬质合金模具在反复加热与冷却过程中，较低的热膨胀系数能够有效减小热应力幅值，而适中的热导率有助于快速均衡温度分布，减少局部过热或急冷现象。细晶组织和合理的粘结相分布进一步增强了材料对热疲劳裂纹的阻滞作用。裂纹通常从表面开始萌生，均匀的微观结构能够延长裂纹扩展前的循环次数。在实际热锻生产中，配合合理的预热和冷却制度，硬质合金热锻模能够承受较高的循环次数，维持型腔表面的完整性。

6.3.2.2 表面处理对锻造寿命的延长

表面处理是延长硬质合金锻造模具寿命的重要手段。常用的表面处理包括PVD涂层（如TiN、TiAlN）、激光熔覆和渗碳渗氮等工艺。这些处理能够在模具工作表面形成高硬度、耐高温氧

化的保护层，显著降低与锻件材料之间的粘着和磨损。

涂层不仅减少了表面物质流失，还能在一定程度上缓解热应力对基体的直接作用。激光表面改性则可形成梯度硬化层，提高表面硬度和抗热裂能力，同时保持心部韧性。通过表面处理与基体材料的协同作用，硬质合金锻造模具的寿命得到明显延长，维护频率降低，支持锻造生产的连续性和经济性。

硬质合金模具在压铸和锻造领域的应用，体现了其在高负荷、高温环境中的适应能力。随着锻压和压铸工艺的不断发展，硬质合金模具的材料选择、结构设计和表面优化技术也在持续进步，为金属成形工业提供更为可靠的工具支持。

6.4 硬质合金模具在粉末冶金成型中的应用

硬质合金模具在粉末冶金成型中承担粉末压制、成形和部分烧结前工序的关键作用。粉末冶金工艺需要在高压下将松散粉末致密化成具有一定形状和强度的坯体，模具需承受较高的单位压力并抵抗粉末颗粒的磨粒磨损。硬质合金以镶块或整体形式应用于凹模、上下冲头等直接接触粉末的工作部位，能够有效维持型腔尺寸精度和表面质量，支持高密度、高精度粉末冶金制品的生产。

6.4.1 粉末冶金模具的硬质合金材料特性

粉末冶金模具的硬质合金材料特性主要体现在高硬度、高压压缩强度和良好的耐磨性等方面。碳化钨硬质相提供主要的承载能力和抗磨损能力，而适量的钴粘结相则赋予材料一定的韧性，使其在高压压制过程中不易发生脆性断裂。细晶或超细晶硬质合金体系因晶粒尺寸小、组织均匀，在粉末压制中表现出更高的表面硬度和较低的磨损速率。

这类材料的低热膨胀系数有助于减少压制过程中因局部发热导致的尺寸变化，保证坯体尺寸的一致性。较高的弹性模量使模具在高压下保持较小的弹性变形，减少型腔壁的胀大现象。材料选择时，通常根据粉末种类、压制压力和坯体复杂程度，选用不同钴含量和晶粒度的硬质合金牌号，以实现硬度与韧性的合理匹配。

6.4.2 硬质合金模具的耐磨性与耐腐蚀性能

硬质合金模具在粉末冶金成型中的耐磨性与耐腐蚀性能是影响模具寿命和坯体质量的关键因素。粉末颗粒在高压下的流动和摩擦会对模具表面产生持续的磨粒磨损，而部分粉末中的添加剂或残留水分可能引起轻微腐蚀作用。

6.4.2.1 粉末压制模具的致密化过程

在粉末压制模具的致密化过程中，硬质合金模具的工作表面直接承受粉末的重新排列、塑性变形和颗粒破碎产生的压力。较高的压缩强度使模具能够维持型腔尺寸的稳定，避免因高压导致的塑性塌陷或弹性回弹过大。均匀的微观组织有助于压力在型腔内均匀传递，减少坯体

密度梯度的形成，提高致密化效果。

随着压制压力的增加，粉末与模具表面的摩擦作用增强。硬质合金的高硬度特性能够有效抵抗粉末颗粒的嵌入和切削，保持型腔表面光洁度。在多级压制或浮动模设计中，硬质合金镶块的耐磨性确保了各阶段压力传递的稳定性，支持高密度坯体的成形。

6.4.2.2 脱模阻力与模具寿命分析

脱模阻力是粉末冶金成型中影响生产效率和坯体完整性的重要因素。硬质合金模具较低的表面粗糙度能够减少粉末与型腔壁之间的机械咬合和粘附，从而降低脱模力，减少坯体在脱模过程中产生的裂纹或层裂现象。适当的表面处理或涂层进一步改善了脱模性能，使脱模过程更为平稳。

模具寿命主要受累积磨损、疲劳损伤和偶尔发生的粘粉现象影响。硬质合金的高耐磨性使型腔表面在数万次压制循环后仍能保持较好的轮廓精度，显著延长了模具的使用周期。在实际生产中，通过定期监测型腔尺寸变化和表面状态，可以提前安排维护计划，进一步提升模具的整体寿命和生产连续性。

6.5 硬质合金模具在特种制造工艺中的应用

硬质合金模具在特种制造工艺中的应用不断扩展，特别是在需要高精度、复杂结构或特殊材料成形的场合。其材料特性能适应多种非传统成形方式，为先进制造技术提供可靠的工具支持。

6.5.1 激光成型与增材制造中的硬质合金模具应用

激光成型与增材制造中，硬质合金模具常用于辅助成形、支撑结构或后续精加工工序。在激光选区熔化或激光熔覆过程中，硬质合金模具可作为基板或成形平台，承受高温激光作用下的热冲击。其较高的热稳定性和抗软化能力使模具在反复激光扫描中保持尺寸稳定性，减少因热变形导致的成形误差。

在增材制造的后处理阶段，硬质合金模具还可用于精密校形或表面精整工序。其高硬度特性适合对增材制造件进行局部挤压或校正，保证最终产品的几何精度。在某些复合制造流程中，硬质合金模具与激光加工结合，能够实现高精度金属零部件的快速成形与精修一体化。

6.5.2 3D 打印技术中硬质合金模具的挑战与解决方案

3D 打印技术中硬质合金模具面临的主要挑战包括复杂曲面加工难度大、热应力集中以及与打印材料之间的界面匹配问题。硬质合金的高硬度使传统机械加工困难，而打印过程中产生的残余应力可能导致模具局部变形或涂层剥落。

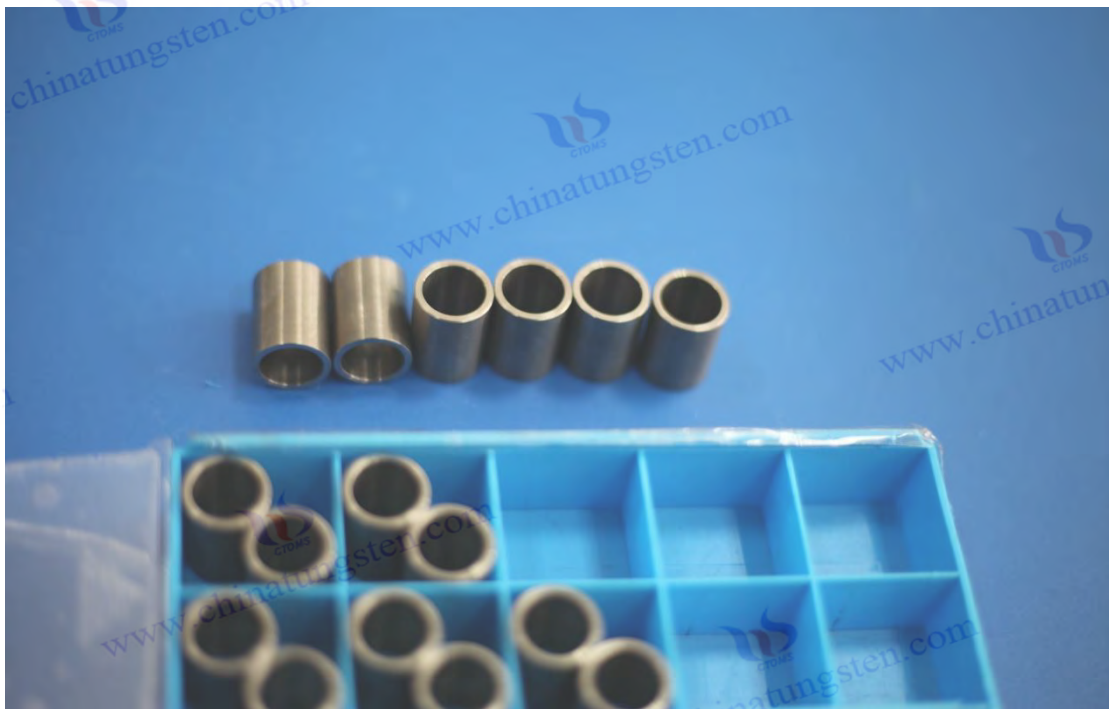
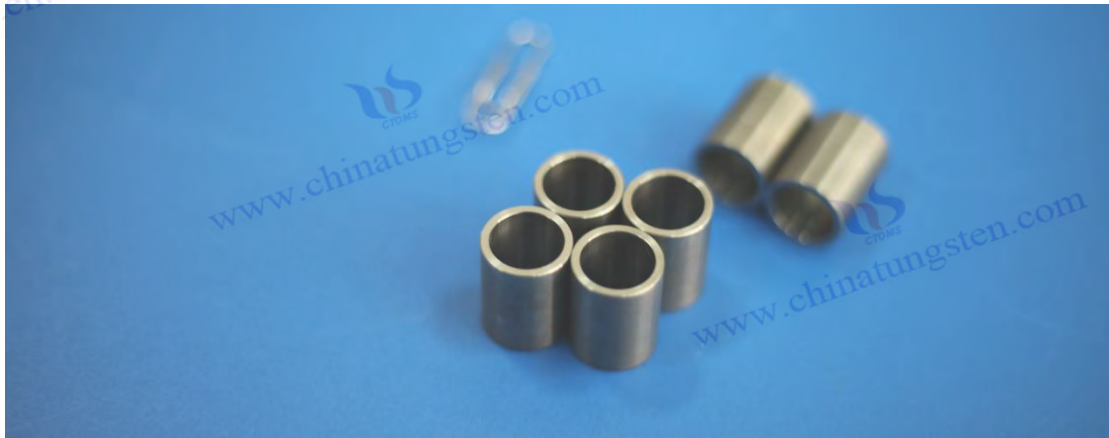
解决方案主要从材料改性、结构优化和表面处理三个方面展开。采用细晶或添加多元抑制剂

版权与法律责任声明

的硬质合金材料，能够提升模具的韧性和抗热裂能力。结构设计上，通过有限元模拟优化支撑结构和冷却通道布局，减少热应力集中区域。表面处理方面，应用 PVD 多层涂层或激光表面改性技术，能够增强模具与打印材料的相容性，降低粘附和磨损。

此外，模块化设计使硬质合金工作部分便于更换，降低了整体维护成本。通过这些针对性解决方案，硬质合金模具在 3D 打印相关工艺中的适应性得到提升，支持复杂结构件的高精度成形。

硬质合金模具在粉末冶金和特种制造工艺中的应用，充分展示了其在高压、高精度和复杂环境下的综合优势。随着先进制造技术的持续发展，硬质合金模具的材料体系、结构形式和表面工程技术也将不断优化，以满足更多特种成形工艺的需求。



中钨智造硬质合金模具

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！

采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



版权与法律责任声明

第七章 硬质合金模具的失效分析与维修

7.1 硬质合金模具的失效模式与机制

硬质合金模具的失效模式主要包括磨损失效、疲劳与热裂纹失效以及腐蚀与化学反应导致的失效。这些模式往往相互影响，在实际服役过程中呈现复合特征。失效机制的分析有助于区分不同工况下的主导损伤类型，为材料改进、结构优化和使用条件调整提供依据。

7.1.1 硬质合金模具的磨损失效

磨损失效是硬质合金模具在成形作业中最常见的失效形式之一，主要表现为工作表面材料逐渐流失，导致型腔或通道尺寸超差和表面质量下降。磨损失效的发生与被加工材料的性质、接触压力、相对运动速度以及润滑条件密切相关。

7.1.1.1 磨粒磨损与粘着磨损的微观机制

磨粒磨损的微观机制主要表现为硬质颗粒或被加工材料中的硬质相对模具表面的微观切削和犁沟作用。当接触界面存在硬度高于硬质合金的颗粒时，这些颗粒在压力和滑动作用下嵌入或刮擦表面，使碳化钨失去粘结相支撑后发生脱落，形成连续的磨痕。微观上，磨粒磨损常导致表面出现平行沟槽和微小凹坑，磨损速率与磨粒硬度、尖锐程度和载荷大小成正比。

粘着磨损的微观机制则源于模具表面与被加工材料在局部高温和高压下的原子或分子间结合。当两表面相对运动时，粘着点发生剪切撕裂，较软的粘结相或被加工材料发生转移，随后在循环作用下形成表面剥落或材料堆积。粘着磨损常伴随局部氧化或相变，使表面出现不规则的撕裂痕迹和转移层。两种磨损机制常常同时存在并相互促进：磨粒磨损增加表面粗糙度，进一步加剧粘着倾向，而粘着产生的硬质碎屑又作为新磨粒加速磨粒磨损。

7.1.1.2 磨损形貌特征与影响因素

磨损失效后的表面形貌特征因机制不同而呈现差异。磨粒磨损主导时，表面多表现为方向一致的犁沟、微裂纹和颗粒脱落坑；粘着磨损则常出现鳞片状剥落、材料粘附瘤和表面撕裂痕迹。在复合磨损情况下，表面形貌呈现混合特征，既有沟槽又有局部材料堆积。

影响磨损形貌和速率的主要因素包括：接触压力、滑动速度、温度、润滑状态以及粉末或熔体的化学组成。高压力和高速度会加速磨粒切削和粘着形成；高温环境促进氧化和软化，使粘着倾向增加；润滑不足或润滑剂选择不当会显著提高摩擦系数，加剧两种磨损机制。模具材料本身的晶粒尺寸、钴含量和表面处理状态也影响磨损行为，细晶组织和适当涂层能够有效延缓磨损形貌的恶化。

7.1.2 硬质合金模具的疲劳与热裂纹失效分析

疲劳与热裂纹失效是硬质合金模具在循环载荷和温度变化环境中常见的损伤形式。这类失效

通常表现为表面或亚表面裂纹的产生与扩展，最终导致模具局部崩块或整体失效。

7.1.2.1 热疲劳裂纹的萌生与扩展路径

热疲劳裂纹的萌生主要源于反复加热与冷却过程中产生的热应力循环。模具表面因温度变化更快，在加热阶段产生压应力，冷却阶段转为拉应力，这种交变应力使表面或近表面区域首先出现微裂纹。裂纹萌生位置多集中在几何突变处、表面缺陷或硬质相与粘结相界面。

裂纹扩展路径通常沿晶界或穿过粘结相区域发展，呈现网状或放射状分布。在高温环境下，氧化层体积变化会进一步加剧裂纹扩展，使裂纹向深度方向延伸。扩展速率受温度梯度大小、循环频率和材料韧性影响，较低的热膨胀系数和均匀的微观组织能够有效延缓裂纹的扩展。

7.1.2.2 机械疲劳与复合疲劳机制

机械疲劳主要由反复的机械载荷引起，如注塑或锻造过程中的周期性压力和冲击。裂纹多从表面应力集中点或内部微观缺陷处萌生，沿着最大剪应力方向扩展。机械疲劳裂纹扩展速率与应力幅值和循环次数密切相关，较高应力水平会显著缩短疲劳寿命。

复合疲劳机制则是热疲劳与机械疲劳共同作用的结果。在实际成形工艺中，模具同时承受温度循环和机械载荷，两种应力场相互叠加，使裂纹萌生和扩展更为迅速。复合疲劳常表现为裂纹网络的形成和局部崩块，失效过程呈现明显的加速特征。通过分析复合疲劳机制，可以为模具设计中的应力缓解措施和材料韧化改性提供方向。

7.1.3 腐蚀与化学反应导致的硬质合金模具失效

腐蚀与化学反应导致的失效主要发生在模具与成型介质长期接触的场所。这类失效会改变表面化学组成，降低材料性能，并加速其他失效模式的发生。

7.1.3.1 成型介质引起的化学腐蚀

成型介质引起的化学腐蚀主要表现为粘结相的选择性溶解。塑料、橡胶或粉末中的添加剂、残留水分或分解产物可能与钴粘结相发生反应，导致粘结相逐渐流失，硬质相颗粒失去支撑后发生松动和脱落。腐蚀形貌常呈现蜂窝状或点蚀特征，表面粗糙度显著增加。

在酸性或碱性介质环境中，腐蚀速率会进一步加快。粉末冶金成型中的某些有机添加剂或压铸中的熔融金属也可能引发轻微的界面反应，影响模具表面完整性。腐蚀失效往往与磨损失效叠加，形成腐蚀-磨损复合损伤，使模具寿命明显缩短。

7.1.3.2 高温氧化与脱碳失效

高温氧化与脱碳失效主要发生在温热成形或高温压铸环境中。高温下，钴粘结相和碳化钨表面易与空气中的氧发生反应，形成氧化层。氧化层结构疏松，易于剥落，导致表面材料持续

损失和粗糙度增加。

脱碳失效则是由于高温下碳元素与氧或成型介质中的活性组分反应，导致材料表层碳含量降低，硬质相稳定性下降，硬度显著降低。脱碳区域的组织脆化会加速裂纹萌生，使模具在较低载荷下发生失效。高温和氧化气氛是加速这类失效的主要外部因素，通过控制作业气氛、缩短高温暴露时间或采用抗氧化涂层，可以有效缓解高温氧化与脱碳失效。通过对上述失效模式与机制的系统分析，可以为硬质合金模具的合理使用、维护和改进提供科学依据。在后续维修工作中，针对不同失效类型采取相应的修复措施，能够最大限度地恢复模具性能并延长其服役周期。

7.2 硬质合金模具的失效诊断与检测方法

硬质合金模具的失效诊断与检测方法是准确判断损伤类型、程度和位置的重要手段。通过多种检测技术的综合应用，可以在不破坏模具整体结构或仅进行最小损伤的情况下，获得内部和表面缺陷信息，为后续维修决策提供可靠依据。失效诊断通常采用无损检测与局部破坏性检验相结合的方式，并结合服役历史记录进行综合分析，以提高诊断的准确性和针对性。

7.2.1 无损检测技术在硬质合金模具失效分析中的应用

无损检测技术在硬质合金模具失效分析中发挥关键作用，能够快速、全面地检测表面和内部缺陷，而不影响模具的继续使用或后续修复。这些技术根据不同缺陷类型和检测深度选择合适的手段，形成互补的检测体系。

7.2.1.1 超声、涡流与磁粉检测方法

超声检测适用于硬质合金模具内部缺陷的探测，通过超声波在材料中的传播和反射信号，可以识别孔隙、夹杂、裂纹以及分层等缺陷。脉冲反射法或穿透法常用于检测不同深度的损伤，特别适合查找热疲劳裂纹的扩展深度和机械疲劳裂纹的起始位置。检测前需对表面进行适当耦合处理，以保证信号的清晰度和准确性。

涡流检测主要用于表面和近表面缺陷的快速筛查，对硬质合金模具的涂层完整性、表面微裂纹和脱碳层有较好的敏感性。通过涡流探头在模具表面扫描，可以检测导电性能的变化，判断是否存在腐蚀坑或粘结相流失区域。该方法操作简便、检测速度快，适合大面积巡检。

磁粉检测则适用于能够被磁化的硬质合金区域或钢基体与硬质合金结合界面，主要用于发现表面开口裂纹和近表面缺陷。干粉法或湿粉法根据现场条件选择，在荧光磁粉辅助下可以显著提高微小裂纹的可视性。这三种方法结合使用，能够覆盖从表面到一定深度的缺陷检测需求，为磨损、疲劳和腐蚀失效的早期诊断提供支持。

7.2.1.2 X射线与工业CT在内部缺陷检测中的作用

X射线检测通过射线穿透模具后在胶片或数字探测器上成像，能够直观显示内部孔隙、夹杂

版权与免责声明

和较大裂纹的分布情况。该方法对硬质合金模具的烧结缺陷和焊接修复区域有较好的检测效果，可用于评估内部致密性和修复质量。

工业 CT（计算机断层扫描）技术则提供三维内部结构成像，能够精确重建模具内部的缺陷位置、尺寸和形态。相比传统 X 射线，工业 CT 可以实现无死角检测，特别适合复杂几何形状的硬质合金镶块和多层结构模具。它能够清晰显示热疲劳裂纹网络、磨损导致的亚表面损伤以及腐蚀引起的内部孔洞，为失效机制的深入分析提供高分辨率数据。

在实际失效诊断中，X 射线常用于初步筛查，而工业 CT 则用于重点部位的精细分析。两种技术结合，能够全面掌握模具内部损伤状态，为维修方案的制定提供科学依据，同时也为预防类似失效提供重要的参考数据。

7.3 硬质合金模具的维修与再生技术

硬质合金模具的维修与再生技术旨在恢复损伤部位的几何精度、表面质量和力学性能，延长模具整体使用寿命。维修过程需要根据失效类型、损伤程度和模具结构特点选择合适的方法，既要保证修复质量，又要控制修复成本。通过专业维修，可以使多数损伤模具重新达到或接近新模具的使用性能。

7.3.1 焊接与修补技术的应用

焊接与修补技术是硬质合金模具修复中最常用的方法之一，特别适合局部崩块、裂纹和磨损严重的区域。通过专用焊接材料和工艺，可以实现缺陷部位的填充和性能恢复，同时尽量减少对周边基体的热影响。

7.3.1.1 硬质合金专用焊接材料与工艺

硬质合金专用焊接材料主要包括钴基合金焊丝、镍基合金焊条以及含有碳化钨颗粒的复合焊材。这些材料与硬质合金基体具有较好的成分相容性，能够形成可靠的冶金结合。焊接工艺通常采用钨极氩弧焊、等离子弧焊或激光焊接，以精确控制热输入，减少热影响区范围。

焊接前需对损伤区域进行清理、开坡口和预热处理，以降低裂纹敏感性。焊接参数（如电流、焊接速度和保护气体流量）需根据硬质合金牌号和损伤面积进行优化，确保焊缝致密、无气孔和裂纹。激光焊接因热输入小、精度高，在精密硬质合金模具的局部修补中应用日益增多，能够实现微小区域的高质量修复。

7.3.1.2 焊后热处理与性能恢复

焊后热处理是保证焊接修复质量和性能恢复的关键步骤。适当的退火或回火处理可以释放焊接残余应力，改善焊缝与基体的组织匹配，恢复材料的韧性和硬度。热处理温度和保温时间需严格控制，避免硬质合金发生晶粒长大或脱碳现象。

性能恢复还包括焊后表面精加工和涂层重新施加。通过精密磨削或抛光恢复型腔轮廓精度，并根据原模具要求重新施加耐磨或抗氧化涂层。修复后的模具需进行全面检测，包括尺寸精度、表面质量、无损检测和模拟服役试验，确保修复区域的性能达到使用要求。

通过焊接与修补技术的合理应用，硬质合金模具的局部损伤能够得到有效修复，大幅延长模具的使用周期，降低企业生产成本。在实际维修工作中，结合失效分析结果制定个性化修复方案，能够使维修后的模具在原有工况下继续稳定运行。

7.3.2 硬质合金模具的表面处理与重修复技术

硬质合金模具的表面处理与重修复技术是恢复损伤表面性能、延长模具使用寿命的重要手段。当模具工作表面出现严重磨损、腐蚀或涂层剥落时，通过先进的表面修复技术可以重新建立高性能保护层，恢复或提升原有的耐磨性、抗氧化能力和表面质量。这些技术在不更换整个模具的前提下，实现局部或整体性能的再生，具有显著的经济效益。

7.3.2.1 激光熔覆与电刷镀修复

激光熔覆技术利用高能量激光束将合金粉末快速熔化并与硬质合金基体形成冶金结合，形成一层致密、耐磨或抗高温氧化的熔覆层。该技术热影响区小、稀释率低，能够精确控制熔覆层的厚度、成分和组织结构。在硬质合金模具修复中，激光熔覆常用于型腔高磨损区域或裂纹修复后表面强化，可选用含有碳化钨颗粒的镍基或钴基合金粉末，以匹配基体硬度和热膨胀特性。

电刷镀修复则是一种便携式、选择性电沉积技术，适用于模具局部磨损或尺寸超差部位的尺寸恢复和表面强化。通过专用电刷镀溶液和电源设备，可以在常温下快速沉积镍、铬或复合镀层，沉积速率较高且镀层与基体结合良好。电刷镀特别适合精密模具的现场修复或复杂曲面修复，能够精确控制镀层厚度，恢复型腔原始尺寸并改善表面硬度和耐磨性。

两种技术常常结合使用：激光熔覆用于较厚修复层和性能强化，电刷镀用于最终尺寸精修和表面平整。修复后需进行精密磨削或抛光，以确保表面粗糙度和几何精度达到使用要求。

7.3.2.2 涂层剥离与重新涂覆工艺

当硬质合金模具原有涂层出现剥落、开裂或磨损失效时，需要先进行涂层剥离处理。常用剥离方法包括化学剥离、机械喷砂和激光清洗等。化学剥离通过专用溶液选择性溶解旧涂层，同时尽量减少对硬质合金基体的损伤；机械喷砂和激光清洗则适用于需要精确控制剥离深度的场合，能够清除残留涂层和表面氧化物，为重新涂覆提供清洁、活化的基体表面。

重新涂覆工艺主要采用 PVD（物理气相沉积）或 CVD（化学气相沉积）技术，根据模具服役条件选择 TiN、TiAlN、CrN 或 多层梯度涂层体系。涂覆前需对基体进行离子刻蚀或微砂处理，以增强界面结合强度。沉积参数（如温度、偏压、气体流量）需严格优化，确保新涂层具有良好的致密度、附着力和均匀性。

版权与免责声明

重新涂覆后，模具需进行性能验证，包括涂层厚度测量、结合强度测试和模拟服役试验。通过涂层剥离与重新涂覆工艺，硬质合金模具的表面性能能够得到有效恢复，甚至在某些情况下超越原始涂层水平，支持模具在更高要求的工况下继续使用。

7.4 硬质合金模具的使用寿命延长策略与技术

硬质合金模具的使用寿命延长策略与技术从设计、制造、使用和维护多个环节入手，通过系统性措施减少失效发生，最大限度发挥模具的性能潜力。这些策略强调预防为主、综合治理，能够显著降低模具更换频率和生产成本。

7.4.1 合理选材与设计优化

合理选材是延长模具寿命的基础。根据具体成形工艺和服役条件，选择适宜的硬质合金牌号，包括晶粒度、钴含量和添加剂种类。对于高磨损工况，优先选用细晶或超细晶体系；对于热循环频繁的场所，则需兼顾韧性和热稳定性。材料选型时还应考虑与钢基体的热膨胀匹配，避免界面应力过大。

设计优化包括结构强化和应力缓解措施。通过有限元分析优化镶块厚度、过渡圆角和冷却通道布局，减少应力集中区域。模块化设计使高磨损部位便于局部更换，降低整体维修难度。合理的脱模斜度、表面粗糙度控制和润滑结构设计，也能有效减少摩擦损伤和脱模阻力，从而延长模具工作寿命。

7.4.2 表面强化与润滑技术

表面强化技术通过物理、化学或复合方法提高模具工作表面的硬度、耐磨性和抗疲劳能力。常见手段包括 PVD/CVD 涂层、激光表面改性、渗氮或渗碳处理等。多层梯度涂层能够在保持结合强度的同时，提供优异的耐磨和抗氧化性能。激光熔覆或激光纹理化则可形成具有自润滑或减摩功能的表面微结构。

润滑技术在延长模具寿命中发挥重要辅助作用。根据成形介质和温度范围，选择合适的固体润滑剂、油基或水基润滑剂，并通过模具表面微孔或纹理结构实现润滑剂的均匀保持和持续供给。合理的润滑方案能够显著降低摩擦系数，减少粘着磨损和热生成，从而延缓磨损和热疲劳的发生。

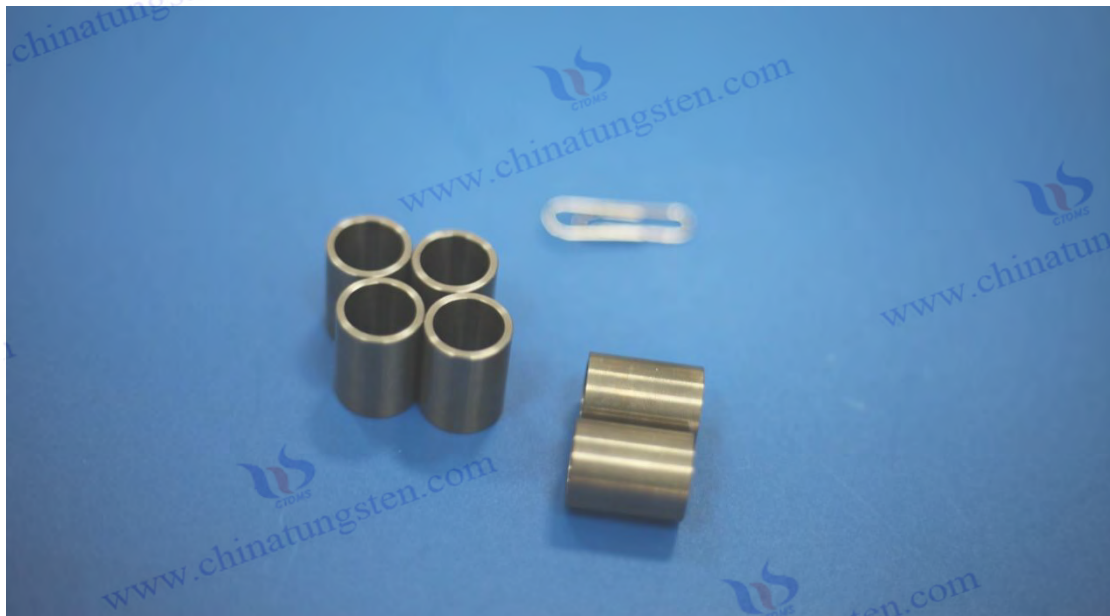
7.4.3 服役条件控制与维护规范

服役条件控制是延长模具寿命的关键外部因素。合理控制成形温度、压力、速度和循环频率，避免过高热负荷或机械冲击。优化冷却系统设计，保持模具温度场均匀，减少热应力波动。严格控制成型介质的成分和清洁度，降低腐蚀性物质对模具表面的影响。

维护规范包括定期清洁、表面检查、尺寸监测和润滑补充等制度。建立模具使用档案，记录生产批次、磨损情况和维修历史，通过趋势分析提前预测失效风险。定期进行无损检测和表

面形貌扫描，及时发现早期裂纹或磨损迹象，并在损伤扩大前进行修复。

通过上述使用寿命延长策略与技术的综合实施，硬质合金模具能够在各种成形工艺中实现更长的稳定服役周期，显著提升生产效率和经济效益。在实际应用中，企业可根据自身生产特点，建立适合的模具全生命周期管理制度，不断优化选材、设计和维护方案。



中钨智造硬质合金模具

第八章 硬质合金模具的市场竞争与未来发展

8.1 硬质合金模具的同类竞品分析

硬质合金模具的主要竞品包括高速钢模具、陶瓷模具、合金钢模具以及新兴的复合材料模具和新型超硬材料。这些竞品在不同成形工艺中展现出各自的优势，与硬质合金模具形成差异化竞争关系。硬质合金模具以其高硬度、耐磨性和综合性能平衡，在中高端精密成形领域保持较强竞争力。

8.1.1 高速钢模具与硬质合金模具的优劣势对比

高速钢模具与硬质合金模具在性能表现和应用场景上存在显著差异。高速钢模具具有良好的可加工性和较高的韧性，易于制造复杂几何形状的模具，且初始制备成本相对较低。在承受一定冲击载荷的场合，高速钢模具表现出较好的抗断裂能力，适合中小批量生产或需要频繁修整的模具。

硬质合金模具则在硬度和耐磨性方面具有明显优势，能够在长时间连续作业中保持工作表面的稳定性和几何精度，特别适合高磨损、高精度或高节拍的生产环境。但硬质合金模具的脆性相对较大，加工难度较高，且整体成本高于高速钢模具。在实际应用中，高速钢模具更适用于一般精度要求或冲击载荷较大的场合，而硬质合金模具则在追求长寿命和高尺寸稳定性的场景中更具竞争力。

8.1.2 陶瓷模具与硬质合金模具的优劣势对比

陶瓷模具以极高的硬度和良好的耐高温、耐腐蚀性能为主要特点，在某些高温或化学环境较为苛刻的成形工艺中具有应用价值。其化学稳定性强，热膨胀系数较低，在无润滑或高纯度成形条件下表现出较低的粘附倾向。

与陶瓷模具相比，硬质合金模具在韧性和抗机械冲击能力上具有一定优势，能够更好地适应反复加载和热循环应力。陶瓷模具的脆性通常较高，在复杂应力状态下容易发生突然断裂，而硬质合金通过粘结相的调节，可以在硬度与韧性之间实现较为合理的平衡。因此，在需要同时兼顾强度、可靠性和使用寿命的成形作业中，硬质合金模具往往成为更稳妥的选择。

8.1.3 合金钢模具与硬质合金模具的差异性分析

合金钢模具通过合理的热处理工艺能够获得良好的综合力学性能，韧性较高，且大尺寸模具的制造相对容易，成本优势较为明显。其可加工性强，便于实现复杂结构的加工，在一般工业成形领域应用广泛。

硬质合金模具与合金钢模具的差异主要体现在耐磨性和长期尺寸稳定性方面。硬质合金在长时间作业中表面磨损速率较低，能够维持更高的几何精度，适合高频次或高精度生产需求。而合金钢模具在硬度达到一定水平后，仍可能因长期摩擦出现较明显的磨损，需要更频繁的

维护。在高温或高单位压力的环境下，硬质合金模具的性能保持能力通常优于合金钢模具，但其制造成本和加工难度也相应增加。

8.1.4 复合材料模具的崛起与硬质合金模具的竞争关系

近年来，复合材料模具（包括纤维增强树脂基复合材料、金属基复合材料等）在轻量化、高效成形领域逐渐显现竞争力。这种模具具有密度较低、设计自由度较高和一定减振能力的特点，在某些塑料或复合材料成形工艺中能够有效降低设备负荷和能耗。

硬质合金模具与复合材料模具的竞争关系主要体现在应用场景的分化上。复合材料模具在低压力、快速成型或大型部件生产中具有一定优势，而硬质合金模具在高压、高精度和长寿命要求较高的场合仍保持明显主导地位。随着复合材料性能的不不断提升，二者在部分中低端市场可能形成一定替代关系，但在高端精密成形和耐磨损领域，硬质合金模具凭借其材料稳定性和耐久性依然具有较强竞争力。

8.1.5 未来新型材料（如碳化硅、超硬合金等）与硬质合金模具的竞争态势

未来新型材料如碳化硅（SiC）、立方氮化硼（CBN）基超硬合金以及其他先进陶瓷基材料正在快速发展。这些材料在硬度、耐高温性能和化学稳定性方面可能在某些极端工况下超越传统硬质合金。例如，碳化硅基材料在高温氧化环境中的稳定性较好，而部分超硬合金在超高硬度成形场合展现出独特的应用潜力。

然而，目前新型材料仍面临韧性相对不足、加工难度较大和制造成本较高的问题。硬质合金模具经过长期工业实践验证，在材料体系的成熟度、性价比以及硬度与韧性的综合平衡上仍具有明显优势。未来竞争态势预计将呈现分化格局：在常规金属塑性成形、粉末冶金和塑料精密成型领域，硬质合金模具将继续保持主流地位；在极端高温、高速摩擦或特殊化学介质环境中，新型材料可能逐步形成局部替代。

硬质合金产业需通过持续的成分优化、结构创新、表面工程技术和智能化应用，进一步提升自身性能，以积极应对新型材料的挑战并巩固市场地位。

通过对各类竞品的系统分析可以看出，硬质合金模具在当前市场竞争中仍保持较强的综合竞争力。未来发展方向应聚焦于差异化优势的强化、与其他材料的协同应用以及面向高端制造需求的持续创新，以适应工业成形领域不断变化的技术和市场要求。

8.2 硬质合金模具如何应对当下高钨价情况

当前钨价处于高位运行。根据中钨在线等专业平台 2026 年 3 月底的市场信息，国内钨精矿（黑钨精矿 $\geq 55\%$ ）价格维持在较高水平，市场供需呈现紧平衡态势，国际钨价也保持坚挺。这种高钨价环境对硬质合金模具的生产成本和供应链带来明显压力，同时也促使企业加快成本控制和技术优化步伐。

8.2.1 高钨价对硬质合金模具生产成本的影响

高钨价直接推高硬质合金模具的生产成本。硬质合金的主要成分是碳化钨（WC），其原料来源于钨精矿、仲钨酸铵（APT）和钨粉等环节。钨原料在硬质合金生产成本中占比极高，通常达到70%-90%，其中碳化钨粉在合金总成本中的占比约70%左右。当钨价大幅上涨时，原材料成本迅速增加，导致硬质合金镶块和整体模具的制造成本显著上升。

对于下游模具制造企业而言，成本压力主要体现在两个方面：一是直接材料成本上升，压缩了毛利率空间；二是成本传导难度不同。高端精密模具因技术含量和附加值较高，价格传导相对顺畅，而中低端通用模具面临激烈的市场竞争，提价空间有限，部分中小企业利润被严重挤压，甚至出现亏损。这种成本结构变化迫使企业重新评估产品定价策略和生产计划。

8.2.2 钨在硬质合金中的含量及其对成本的影响

钨在硬质合金中的含量通常占绝大部分。在典型的钨钴系硬质合金中，碳化钨（WC）的重量占比一般在80%-94%，钴粘结相占比6%-20%。具体到不同应用领域，切削工具类硬质合金中钨含量较高，而耐磨模具或冲击载荷较大的场合，钴含量会适当增加以提升韧性。

由于钨是硬质合金中最主要的成本构成部分，其价格波动对总体成本的影响极为敏感。以刀具类硬质合金为例，钨原料（含碳化钨粉）在直接材料成本中占比可达80%左右。当钨价上涨10%时，刀片类合金的生产成本可能需要上调7%以上才能维持原有利润水平。钴虽然占比相对较低，但其价格也受市场影响，进一步放大了成本压力。

因此，钨含量的高低直接影响了模具对钨价波动的敏感程度。降低钨含量或优化配方虽能在一定程度上缓解成本压力，但必须兼顾硬度、耐磨性和韧性的平衡，避免产品性能下降。

8.2.3 钨价格波动对硬质合金模具供应链的挑战与调整策略

钨价格波动给硬质合金模具供应链带来多重挑战。首先是原料采购难度加大，钨精矿和碳化钨粉供应偏紧时，企业面临锁价困难和库存成本上升的问题；其次是下游传导不畅，中低端模具市场竞争激烈，成本无法及时转嫁，导致供应链上下游利润分配失衡；此外，价格高位还可能刺激替代材料的研究，长期来看对硬质合金模具的市场份额形成潜在威胁。

针对这些挑战，行业可采取以下调整策略：

- 加强供应链协同与长单锁定：**与上游钨矿和冶炼企业签订长期供货协议，稳定原料价格和供应量；同时推动产业链上下游信息共享，共同应对价格波动。
- 加快再生钨资源利用：**提高废旧硬质合金的回收率，通过熔铸法、电解法等工艺回收碳化钨和钴，降低对原生钨资源的依赖。目前再生钨利用成本显著低于原生料，是应对高钨价的有效途径之一。
- 优化材料配方与工艺：**适当降低钨含量或采用细晶、梯度结构设计，在保证性能的前提下减少钨用量；同时通过添加晶粒生长抑制剂等手段，提升材料综合性能，减

少单位产品对钨的消耗。

4. **推进产品结构升级**：重点发展高端精密模具和涂层强化产品，提高附加值，增强成本传导能力；同时拓展新兴应用领域（如光伏、3C 精密结构件），分散市场风险。
5. **强化内部成本控制与数字化管理**：通过精益生产、智能化制造降低加工能耗和废品率；建立价格风险预警机制，合理安排采购和库存计划。

面对高钨价环境，硬质合金模具产业需从“被动应对”转向“主动适应”，通过技术创新、资源循环和产业链协同，逐步化解成本压力，并在竞争中保持长期优势。未来，随着钨资源战略价值的提升和下游高端制造需求的增长，行业有望在挑战中实现高质量发展。

8.2.4 提高硬质合金模具性价比的技术途径

在高钨价背景下，提高硬质合金模具的性价比成为企业维持竞争力的关键。性价比提升的核心是在保证或改善模具性能的前提下，降低单位使用成本。以下是主要技术途径：

1. **材料结构优化设计** 采用梯度结构或复合结构硬质合金模具，在高磨损的工作表面使用较高钨含量的细晶材料，而在支撑区域采用较低钨含量的材料，形成性能梯度。这种设计既保证了表面耐磨性，又减少了整体钨用量，从而降低材料成本。
2. **再生硬质合金的规模化应用** 通过高效回收废旧硬质合金，采用锌熔法或选择性溶解工艺提取碳化钨和钴，再生料可替代部分原生钨原料。目前再生硬质合金的性能已接近原生材料，在中高端模具中逐步推广应用，能够显著降低原料成本。
3. **表面强化技术升级** 采用先进 PVD/CVD 多层涂层或激光熔覆技术，在硬质合金基体表面形成高性能保护层，延长模具使用寿命。这样可以在保持基体钨含量不变的情况下，通过延长单套模具的使用周期，间接提高性价比。
4. **模块化与镶块化设计** 将高磨损部位设计为可更换的硬质合金镶块，钢基体重复使用。只有磨损严重的镶块需要更换，显著降低单次成形周期的模具成本。
5. **精密成形与少切削加工** 推广近净成形技术（如精密压制+低收缩烧结），减少后续机械加工余量，降低加工能耗和材料浪费，从而整体降低制造成本。

通过上述技术途径，硬质合金模具能够在高钨价环境下实现性能不下降甚至提升，同时有效控制成本，提升市场竞争力。

8.2.5 高钨价下硬质合金模具生产商如何通过材料创新应对成本压力

材料创新是硬质合金模具生产商应对高钨价压力的核心手段之一。创新方向主要围绕“减钨增效”和“性能补偿”展开：

1. **低钨高性能合金体系开发** 研究开发钨含量较低（例如 75%-85%）但综合性能不下降的新型硬质合金。通过优化晶粒尺寸分布、引入多种碳化物（如 TiC、TaC、NbC）固溶强化，以及调整粘结相成分（钴+镍复合粘结），在降低钨用量的同时维持或提升硬度和耐磨性。
2. **细晶与超细晶技术深化** 进一步细化碳化钨晶粒至亚微米甚至纳米级，显著提高单位

体积内晶界数量，增强材料强度和韧性。这样可以在降低整体钨含量的条件下，仍然满足高耐磨模具的使用要求。

3. **功能梯度材料（FGM）应用** 采用粉末分层装填或喷雾造粒梯度技术，制备内外性能不同的硬质合金模具。工作表面保持高钨、高硬度，而内部或支撑部分降低钨含量，减少贵金属用量，实现成本与性能的优化匹配。
4. **新型粘结相与添加剂体系** 探索部分替代钴的粘结相如铁镍系、钴镍复合系，并引入稀土元素或纳米增强相，进一步改善材料的综合性能，减少对高价钨原料的依赖。
5. **再生料与原生料混合配方** 建立稳定的再生钨原料质量评价体系，将高品质再生碳化钨粉按一定比例与原生粉混合使用，在严格控制性能的前提下大幅降低原料成本。

通过持续的材料创新，生产商能够在高钨价环境下保持硬质合金模具的核心竞争力，同时为下游用户提供更具性价比的产品。

8.2.6 高钨价背景下，如何优化硬质合金模具的生产工艺以降低成本

高钨价背景下，生产工艺优化是降低硬质合金模具制造成本的直接有效途径。重点可从以下几个方面展开：

1. **粉末制备与混合工艺优化** 采用高效湿磨和喷雾造粒技术，改善粉末流动性与均匀性，减少后续压制和烧结过程中的废品率。同时优化球磨介质和工艺参数，降低能耗和粉末损耗。
2. **烧结工艺的精准控制** 推广真空烧结与热等静压（HIP）组合工艺，提高烧结致密度，减少后续机械加工余量。通过精确控制升温速率、保温时间和冷却速率，降低能源消耗，并减少因烧结缺陷导致的报废率。
3. **近净成形技术应用** 发展精密注射成形（PIM）、凝胶注模或 3D 打印辅助成形等近净成形工艺，使硬质合金坯体接近最终形状，显著减少机加工量和材料浪费。
4. **加工工艺的智能化升级** 采用高速精密磨削、激光加工和电火花复合加工技术，提高加工效率和精度，降低单件加工时间和刀具损耗。引入数字化制造系统，实现加工参数的自适应优化。
5. **质量过程控制强化** 建立全流程质量系统，通过在线检测和统计过程控制，及早发现并消除工艺波动，减少不合格品率，从而降低整体制造成本。
6. **能源与辅料节约措施** 优化炉窑结构和保温材料，降低烧结能耗；合理回收冷却液和磨削液，实现资源循环利用。

通过上述生产工艺的系统优化，硬质合金模具生产商能够在高钨价环境下有效控制制造成本，同时保持或提升产品品质，实现从“高成本粗放生产”向“高效精益制造”的转变。在高钨价的持续影响下，硬质合金模具行业需将成本压力转化为创新动力，通过材料创新、工艺优化和产业链协同，逐步构建更具韧性和竞争力的产业发展模式。

8.3 2025 年以来的高钨价对硬质合金模具行业的冲击、影响与转型建议

2025 年以来，国际国内钨价出现显著上涨。根据中钨在线等专业平台数据，2026 年 4 月 1

日，65%黑钨精矿价格报 98.5 万元/标吨，较年初涨 114.1%。65%白钨精矿价格报 98.4 万元/标吨，较年初涨 114.4%。仲钨酸铵（APT）价格报 147 万元/吨，较年初涨 119.4%。欧洲 APT 价格报 2800-3150 美元/吨度（折合人民币 171.3-192.7 万元/吨），较年初涨 223.4%。钨粉价格报 2350 元/公斤，较年初涨 117.6%。碳化钨粉价格报 2290 元/公斤，较年初涨 120.2%。70 钨铁价格报 140 万元/吨，较年初涨 115.4%。欧洲钨铁价格报 320-330 美元/千克钨（折合人民币 154.8-159.7 万元/吨），较年初涨 136.4%。废钨棒材价格报 1080 元/公斤，较年初涨 80.0%。废钨钻头价格报 1050 元/公斤，较年初涨 81.0%。这种高钨价格对硬质合金模具行业形成了多维度冲击，同时也为行业转型升级提供了重要窗口。

8.3.1 高钨价的市场影响与产业链压力

高钨价直接导致硬质合金模具的生产成本大幅攀升。碳化钨粉作为硬质合金的主要原料，其成本在模具制造总成本中占比通常达到 70%-90%。钨价上涨使原材料采购费用急剧增加，中下游模具企业普遍面临毛利率压缩甚至亏损的风险。

产业链压力主要体现在三个层面：一是上游钨矿和冶炼企业因价格高位而获益，但产能扩张受资源指标和环保约束限制，供给紧张局面短期难以缓解；二是中游硬质合金生产企业原料成本压力最大，部分中小企业因资金链紧张出现减产或停产；三是下游模具用户（注塑、压铸、锻造等成形企业）采购成本上升，部分低端应用场景开始探索替代材料，导致硬质合金模具的市场需求出现结构性分化。高钨价还加剧了库存管理和价格传导的难度，中小模具企业议价能力较弱，成本转嫁困难，进一步放大了产业链整体压力。

8.3.2 钨资源供应链的紧张与硬质合金模具企业的应对策略

钨资源供应链紧张主要源于供给端约束和需求端增长的双重作用。2025 年以来，国内钨矿开采总量控制指标收紧，部分主产区指标显著下降，出口管制政策也对国际供应链产生影响。同时，新能源、3C 电子、航空航天及军工领域对硬质合金的需求持续增长，进一步推高了资源紧张程度。

硬质合金模具企业的应对策略可从以下方面展开：一是加强与上游大型钨企的战略合作，签订中长期供货协议并锁定部分原料价格，降低价格波动风险；二是大力发展再生钨资源利用，通过熔渣法、电解法等技术提高废旧硬质合金回收率，目前再生料成本显著低于原生钨，是缓解供应链压力的有效途径；三是建立价格风险预警机制，优化采购节奏和库存管理，采用期货套期保值等金融工具对冲原料价格波动；四是推动产业链上下游协同，共同开展技术研发和成本分担，增强供应链整体韧性。

8.3.3 高钨价下的硬质合金模具行业转型：向高附加值产品转型

高钨价环境下，硬质合金模具行业需加速向高附加值产品转型，以提升单位产品利润空间和抗风险能力。转型重点包括：开发高性能梯度结构、细晶/超细晶以及多层涂层强化模具，提高产品技术含量和使用寿命；拓展高端精密成形领域（如光学级注塑模具、航空航天精密锻模、新能源汽车电池壳精密模具等），这些领域对模具精度和稳定性要求高，附加值显著

高于传统产品；推动模块化、智能化模具设计，实现快速更换和在线监测，降低用户综合使用成本。同时，企业应加大研发投入，探索低钨高性能合金体系和新型复合材料应用，通过材料创新减少对原生钨的依赖，实现从“规模竞争”向“技术竞争”的转变。高附加值转型不仅能够缓解成本压力，还将帮助企业在国际高端市场占据更有利位置。

8.3.4 环保与资源节约：硬质合金模具行业如何实现绿色转型

高钨价背景下，环保与资源节约已成为行业绿色转型的重要驱动力。绿色转型路径主要包括：大力推广废旧硬质合金回收再利用，建立完善的“城市矿山”回收体系，提高再生钨利用比例，减少原生资源消耗；优化生产工艺，采用低能耗烧结技术和近净成形技术，降低单位产品能耗和碳排放；加强全生命周期管理，从设计阶段就考虑材料的循环利用和易拆解回收特性，推动模具模块化设计。

此外，企业需严格遵守环保法规，加大废水、废气和固废处理投入，实现清洁生产。同时，通过数字化和智能化手段实现生产过程的精准控制，减少资源浪费。绿色转型不仅有助于应对资源约束和环保压力，还能提升企业社会形象和国际市场竞争力，为行业可持续发展奠定基础。

8.3.5 国际市场对高钨价的反应与硬质合金模具的出口前景

国际市场对高钨价的反应较为敏感。欧美、日韩等主要进口国在感受到成本压力后，加快了供应链多元化布局和替代材料研发步伐，同时部分国家加大了对本国钨矿资源的勘探和开发力度。国际下游用户对硬质合金模具的价格敏感度上升，部分订单出现向低成本地区转移的趋势。

硬质合金模具的出口前景总体呈现分化态势：高端精密模具因技术壁垒较高、性能优势明显，仍具有较强的国际竞争力，出口量有望保持稳定甚至增长；中低端通用模具则面临价格竞争压力，出口增速可能放缓。为抓住出口机遇，国内企业应加强国际认证和品牌建设，重点拓展“一带一路”沿线新兴市场，同时通过技术合作和本地化生产降低关税和物流成本，提升出口产品的性价比。

总体而言，2025 年以来的高钨价对硬质合金模具行业既是挑战也是机遇。行业需以创新驱动和绿色转型为抓手，加快结构调整和升级步伐，在应对成本压力的同时实现高质量发展。未来，随着钨资源战略价值的进一步凸显和下游高端制造需求的增长，硬质合金模具产业有望在挑战中实现新的突破。

8.4 硬质合金模具行业的未来趋势与发展方向

随着全球制造业向高端化、智能化和绿色化方向转型，硬质合金模具行业正处于重要的升级期。未来发展趋势将围绕材料性能提升、技术创新应用、新兴领域拓展以及生产模式变革展开。行业需把握技术进步和市场需求的变化，通过持续创新实现从传统制造向先进制造的转变，在全球竞争中保持优势地位。

版权与法律责任声明

8.4.1 高性能硬质合金模具的发展趋势：从传统材料到智能材料

高性能硬质合金模具的发展正在从传统材料体系向智能材料方向演进。传统硬质合金主要依靠调整钨钴比例和晶粒尺寸来平衡硬度与韧性，而未来高性能模具将更多采用功能梯度材料（FGM）、纳米增强相和多尺度复合结构。通过在不同区域设计不同的微观组织，实现表面高硬度耐磨、心部高韧性抗冲击的性能梯度分布，显著提升模具的综合服役性能。

智能材料趋势体现在自感知、自适应和自修复能力的引入。未来硬质合金模具可能集成嵌入式传感器，实现温度、应力和磨损状态的实时监测；通过表面智能涂层或相变材料，在不同工况下自动调整摩擦特性和热响应行为。这些技术将使模具从“被动工具”转变为“主动智能部件”，进一步延长使用寿命并提高成形过程的稳定性。

8.4.2 创新与研发：硬质合金模具在自动化、精密化方向的技术进步

创新与研发是推动硬质合金模具向自动化和精密化方向发展的核心动力。在自动化方面，行业正加快模具的模块化、快速更换和数字化集成设计。智能模具系统可与数控设备、机器人和工业物联网实现无缝对接，支持自动对中、在线检测和自适应调整，大幅缩短模具更换时间和调试周期，提高生产线整体柔性。

精密化技术进步体现在多个层面：采用超细晶和纳米晶硬质合金，结合精密近净成形和激光/电火花复合加工，实现亚微米级几何精度；发展多轴联动精密磨削和抛光技术，使模具表面粗糙度达到纳米级水平，满足光学级和医疗级产品的成形需求；通过有限元模拟和数字孪生技术，在设计阶段精准预测模具的应力场、温度场和寿命，实现“一次设计、多次优化”的精密化研发模式。

这些创新不仅提升了模具的制造精度和使用性能，还显著降低了人工依赖和生产周期，为高端制造业的自动化升级提供了有力支撑。

8.4.3 硬质合金模具在新兴工业的应用前景

硬质合金模具在新兴工业领域展现出广阔的应用前景。在新能源汽车领域，硬质合金模具广泛应用于动力电池壳体精密冲压、电机铁芯叠片成形以及碳纤维复合材料构件压制等关键工序，对模具的精度和耐磨性提出了更高要求。在航空航天领域，硬质合金模具用于高温合金叶片锻造、钛合金结构件成形以及复合材料铺层成形，支持轻量化、高可靠性零部件的生产。

在3C电子和光伏产业中，硬质合金模具被用于超薄手机中框、精密连接器和光伏硅片切割辅助模具等领域，需求量持续增长。医疗器械和生物工程领域对生物相容性和超高精度成形的需求，也为高性能硬质合金模具提供了新的增长点。此外，在半导体封装、增材制造后处理以及氢能装备制造等前沿领域，硬质合金模具正逐步发挥重要作用。

随着新兴工业的快速发展，硬质合金模具的应用将从传统金属成形向多材料复合成形、高精度微细成形和极端环境成形方向扩展，市场空间有望进一步扩大。

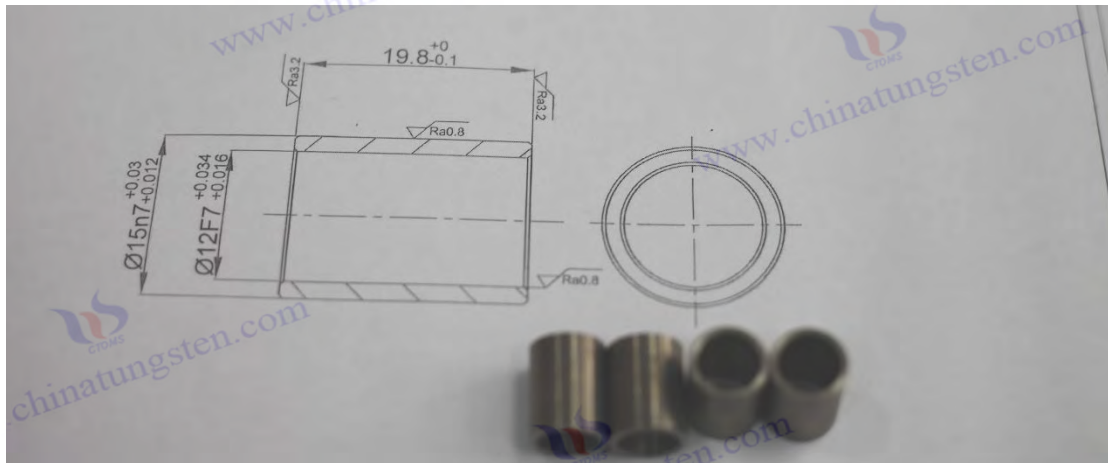
版权与法律责任声明

8.4.4 未来硬质合金模具的定制化与个性化生产趋势

未来硬质合金模具的生产将呈现明显的定制化与个性化趋势。传统标准化模具难以满足下游用户对不同材料、不同工艺和不同批量的多样化需求，而定制化生产能够根据具体成形对象、产量规模和精度要求，提供针对性的材料选型、结构设计和表面处理方案。

个性化生产趋势体现在小批量、多品种和快速响应能力上。借助数字化设计平台、增材制造辅助成形和智能制造系统，企业可以实现从用户需求到模具交付的快速迭代，显著缩短交货周期。模块化设计与可更换镶块技术进一步增强了定制化的灵活性，用户可根据生产变化快速调整模具配置，降低整体使用成本。

定制化与个性化生产还推动了服务模式的转变。未来模具企业将从单纯提供产品转向提供“模具+解决方案+全生命周期服务”的综合模式，包括性能监测、远程诊断、预防性维护和再制造服务。这种趋势有助于提升客户粘性，并在高钨价等外部压力下，通过高附加值服务实现差异化竞争。



中钨智造硬质合金模具

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！

采购信息

如有任何关于钨合金光栅的设计生产需求，请联系制造商：

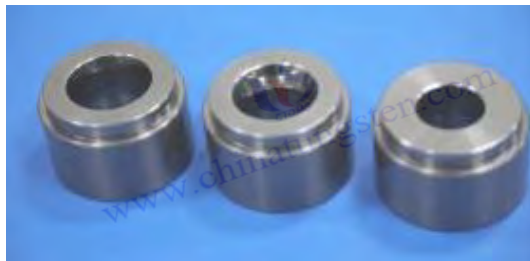
中钨智造（厦门）科技有限公司

地址：福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 0592-5129595；0592-5129696

微信：请扫二维码添加中钨智造



版权与法律责任声明

附录 硬质合金模具术语表

术语	定义
奥氏体化	指钢制模具基体在加热过程中转变为奥氏体组织的过程，常用于热处理工艺中。
比热容	单位质量的材料温度升高 1℃所吸收的热量，是硬质合金模具热性能分析的重要参数。
超细晶硬质合金	碳化钨晶粒平均尺寸通常小于 0.5 μm 的硬质合金，具有较高的硬度和较好的韧性平衡。
断裂韧性	材料抵抗裂纹扩展的能力，以应力强度因子临界值表示，是评价硬质合金模具抗疲劳和抗冲击性能的关键指标。
二相组织	硬质合金中由碳化钨硬质相和钴（或其它金属）粘结相组成的典型微观结构。
粉末冶金	通过粉末制备、成形和烧结等工序制造硬质合金模具的工艺方法。
高耐磨注塑模具	采用硬质合金镶块制作，用于加工含玻璃纤维等磨粒填料塑料的注塑模具。
横向断裂强度	硬质合金材料在三点或四点弯曲试验中抵抗断裂的能力，常用于评价模具的力学性能。
晶粒生长抑制剂	在硬质合金制备中加入的 TaC、NbC 等添加剂，用于抑制碳化钨晶粒在烧结过程中的异常长大。
抗弯强度	材料抵抗弯曲载荷而不发生断裂的能力，是硬质合金模具设计中的重要力学指标。
拉伸模	用于金属丝、管材或棒材拉伸成形的硬质合金模具。
磨粒磨损	由硬质颗粒对模具表面进行微观切削和犁沟作用导致的磨损失效机制。
耐磨性	材料抵抗摩擦、磨粒或粘着作用而保持表面完整性的能力。
PVD 涂层	物理气相沉积技术制备的薄膜涂层，如 TiN、TiAlN 等，常用于提升硬质合金模具表面性能。
气孔率	硬质合金烧结体中孔隙体积占总体积的百分比，是评价致密化程度的重要指标。
热等静压	在高温高压惰性气体介质中对烧结体施加各向同性压力，进一步提高致密度的工艺。
烧结	硬质合金粉末坯体在高温下通过液相或固相扩散实现致密化和组织形成的工艺过程。
碳化钨	硬质合金的主要硬质相，具有极高的硬度和熔点，是赋予模具耐磨性的核心成分。
钨钴系硬质合金	以碳化钨为硬质相、钴为粘结相的硬质合金，是硬质合金模具最常用的材料体系。
细晶硬质合金	碳化钨晶粒平均尺寸在 0.5~1.0 μm 范围内的硬质合金，具有较好的综合力学性能。
液相烧结	硬质合金烧结过程中，钴相熔化形成液相，促进颗粒重排和致密化的主要机制。
粘结相	硬质合金中起到连接硬质相颗粒、提供韧性的金属相，主要成分为钴（Co）。

版权与免责声明

参考文献

中文参考文献

- [1] 中国有色金属工业协会. 中国硬质合金行业发展报告（2024-2025）[R]. 北京：中国有色金属工业协会，2025.
- [2] 中钨高新材料股份有限公司. 2025 年年度报告[R]. 株洲：中钨高新，2026.
- [3] 株洲硬质合金集团有限公司. 硬质合金性能与应用手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2018.
- [4] 株洲硬质合金集团有限公司. 硬质合金应用技术手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2022.
- [5] 孙宝琦，等. 粉末冶金原理与技术[M]. 第 3 版. 北京：化学工业出版社，2023.
- [6] 2025-2031 年中国硬质合金行业研究分析及发展趋势预测报告[R]. 北京：普华有策咨询有限公司，2025.
- [7] 2024-2030 年中国硬质合金模具行业市场现状调查及发展趋向分析报告[R]. 北京：智研咨询，2024.
- [8] 硬质合金及刀具行业发展现状和未来前景分析[J]. 金属世界，2024(4).
- [9] 葛红林. 在 2024 年中国钨工业发展大会上的讲话[R]. 赣州，2024.
- [10] GB/T 18376.1-2008 硬质合金分类 第 1 部分：切削工具用硬质合金分类[S]. 北京：中国标准出版社，2008.

英文参考文献

- [1] Upadhyaya G S. Cemented Tungsten Carbides: Production, Properties and Testing[M]. Norwich, NY: William Andrew Publishing, 1998.
- [2] Brookes K J A. World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard Materials[M]. 6th ed. East Barnet: International Carbide Data, 1996.
- [3] ASM International. ASM Handbook, Volume 7: Powder Metal Technologies and Applications[M]. Materials Park, OH: ASM International, 2019.
- [4] Sandvik Coromant. Cemented Carbide: Properties and Applications[R]. Sandviken: Sandvik AB, 2023.
- [5] Kennametal Inc. Tungsten Carbide Materials Handbook[R]. Latrobe, PA: Kennametal, 2022.
- [6] General Carbide Corporation. The Designer's Guide to Tungsten Carbide[R]. Greensburg, PA: General Carbide, 2024.
- [7] Fortune Business Insights. Carbide Tools Market Size, Share & Industry Analysis, 2026-2034[R]. 2025.
- [8] Persistence Market Research. Tungsten Carbide Powder Market Outlook 2026-2033[R]. 2025.
- [9] ISO 4499-1:2008 Hardmetals — Metallographic determination of microstructure[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2008.

版权与法律责任声明