

什么是硬质合金安全锤头

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，致力于在工业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、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。



版权与免责声明

目录

第一章 硬质合金安全锤头概述

- 1.1 硬质合金安全锤头的定义
 - 1.1.1 硬质合金安全锤头的物质基础
 - 1.1.2 硬质合金安全锤头的结构基础
- 1.2 硬质合金安全锤头的分类
 - 1.2.1 按组成划分的硬质合金安全锤头
 - 1.2.2 按性能划分的硬质合金安全锤头
 - 1.2.3 按结构形态划分的硬质合金安全锤头
 - 1.2.4 按应用领域划分的硬质合金安全锤头
 - 1.2.5 按工作环境划分的硬质合金安全锤头
- 1.3 硬质合金安全锤头的发展历史
 - 1.3.1 硬质合金安全锤头的早期探索与发明
 - 1.3.2 硬质合金安全锤头的工业化发展
 - 1.3.3 硬质合金安全锤头的现代演变与成熟应用

第二章 硬质合金安全锤头材料体系

- 2.1 硬质合金安全锤头的硬质相组成
 - 2.1.1 碳化钨作为硬质相的硬质合金安全锤头
 - 2.1.2 其他金属碳化物硬质相的硬质合金安全锤头
- 2.2 硬质合金安全锤头的硬质相特性
 - 2.2.1 硬质合金安全锤头的硬度特性
 - 2.2.2 硬质合金安全锤头的耐磨特性
- 2.3 硬质合金安全锤头的粘结相组成
 - 2.3.1 钴作为粘结相的硬质合金安全锤头
 - 2.3.2 镍、铁及其他粘结相的硬质合金安全锤头
- 2.4 硬质合金安全锤头的粘结相特性
 - 2.4.1 硬质合金安全锤头的韧性特性
 - 2.4.2 硬质合金安全锤头的抗冲击特性
- 2.5 硬质合金安全锤头材料匹配性与复合协同机制
 - 2.5.1 硬质相与粘结相适配机理
 - 2.5.2 复合材料整体协同性能优势

第三章 硬质合金安全锤头的结构形态

- 3.1 硬质合金安全锤头的整体式结构
 - 3.1.1 硬质合金安全锤头的尖锥作业端
 - 3.1.2 硬质合金安全锤头的装配段
- 3.2 硬质合金安全锤头的复合式结构
 - 3.2.1 硬质合金安全锤头的基体端
 - 3.2.2 硬质合金安全锤头的作业端
- 3.3 硬质合金安全锤头的结构分析

版权与免责声明

- 3.3.1 硬质合金安全锤头的装配精度控制
- 3.3.2 硬质合金安全锤头的钎焊连接强度
- 3.3.3 硬质合金安全锤头的整体寿命评估
- 3.4 硬质合金安全锤头的结构缺陷类型与失效形式
 - 3.4.1 常见结构加工缺陷
 - 3.4.2 冲击载荷下结构失效机理

第四章 硬质合金安全锤头结合机制与成型工艺

- 4.1 硬质合金安全锤头的结合机制
 - 4.1.1 粉末冶金结合的硬质合金安全锤头
 - 4.1.2 钎焊结合的硬质合金安全锤头
- 4.2 硬质合金安全锤头的粉末冶金成型
 - 4.2.1 硬质合金安全锤头的原料配比与混合
 - 4.2.2 硬质合金安全锤头的压制与烧结
- 4.3 硬质合金安全锤头的钎焊成型
 - 4.3.1 硬质合金安全锤头的钎焊工艺过程
 - 4.3.2 硬质合金安全锤头的钎焊参数控制
- 4.4 硬质合金安全锤头的成型控制
 - 4.4.1 成型尺寸精度管控标准
 - 4.4.2 装配配合精度调控方法
- 4.5 硬质合金安全锤头的成型质量提升
 - 4.5.1 成型工艺稳定性控制策略
 - 4.5.2 成型成品一致性优化方式

第五章 硬质合金安全锤头质量控制与工艺优化

- 5.1 硬质合金安全锤头的原料配比优化
 - 5.1.1 硬质相原料粒度筛选与配比原则
 - 5.1.2 粘结相原料掺杂比例控制要求
 - 5.1.3 复合原料配比误差控制与优化方案
- 5.2 硬质合金安全锤头的烧结工艺优化
 - 5.2.1 烧结升温速率参数优化
 - 5.2.2 高温保温时间与温度区间控制
 - 5.2.3 烧结冷却制度与残余应力优化
- 5.3 硬质合金安全锤头的表面处理工艺
 - 5.3.1 表面抛光与精整处理工艺
 - 5.3.2 表面强化耐磨处理工艺
 - 5.3.3 表面防腐防护处理工艺
- 5.4 全过程质量检测标准体系
 - 5.4.1 半成品质量检测规范
 - 5.4.2 成品出厂质量验收标准
- 5.5 典型加工缺陷分析与整改优化
 - 5.5.1 原料配比不当引发的缺陷及整改方案

版权与免责声明

- 5.5.2 烧结工艺瑕疵导致的产品失效优化
- 5.5.3 表面处理缺陷的修正与工艺改进
- 5.6 批量生产稳定性与工艺一致性控制
 - 5.6.1 批量生产工艺参数波动管控
 - 5.6.2 批次产品质量一致性校准方法

第六章 硬质合金安全锤头的性能表征

- 6.1 硬质合金安全锤头的硬度表征
 - 6.1.1 硬度测试标准与检测设备
 - 6.1.2 硬度分布规律与表征结果分析
- 6.2 硬质合金安全锤头的耐磨表征
 - 6.2.1 磨损试验方案与工况设定
 - 6.2.2 磨损量与耐磨性能评价指标
- 6.3 硬质合金安全锤头的韧性表征
 - 6.3.1 断裂韧性测试试验方法
 - 6.3.2 韧性优劣影响因素与表征分析
- 6.4 硬质合金安全锤头的抗冲击表征
 - 6.4.1 冲击载荷试验测试方案
 - 6.4.2 反复冲击下性能衰减表征分析
- 6.5 硬质合金安全锤头的抗压性能表征
 - 6.5.1 静态抗压载荷测试试验方法
 - 6.5.2 抗压变形量与承载性能分析
- 6.6 硬质合金安全锤头的抗疲劳表征
 - 6.6.1 循环载荷疲劳试验方案设计
 - 6.6.2 疲劳损伤机理与使用寿命表征
- 6.7 硬质合金安全锤头的耐高温性能表征
 - 6.7.1 高温环境性能测试试验规范
 - 6.7.2 高温工况下性能衰减规律分析
- 6.8 硬质合金安全锤头的耐腐蚀性能表征
 - 6.8.1 腐蚀环境模拟试验测试方法
 - 6.8.2 腐蚀损伤程度与耐蚀性能评价
- 6.9 硬质合金安全锤头的结构稳定性表征
 - 6.9.1 长期载荷下结构形变测试方式
 - 6.9.2 整体结构稳定性综合评价分析
- 6.10 中钨智造硬质合金安全锤头 MSDS

第七章 硬质合金安全锤头的应用

- 7.1 硬质合金安全锤头在交通工具中的应用
 - 7.1.1 交通工具应急破拆作业应用场景
 - 7.1.2 车载安全配套装备适配优势分析
- 7.2 硬质合金安全锤头在工业加工中的应用
 - 7.2.1 工业铸件、锻件清渣作业应用

版权与免责声明

- 7.2.2 硬质工件整形与局部拆解应用
- 7.3 硬质合金安全锤头在材料检测中的应用
 - 7.3.1 材料硬度与表层强度冲击检测
 - 7.3.2 构件致密性与缺陷初步筛查检测
- 7.4 硬质合金安全锤头在矿山开采中的应用
 - 7.4.1 矿山围岩表层剥离与修整作业
 - 7.4.2 矿用构件简易拆解与隐患排查应用
- 7.5 硬质合金安全锤头在建筑施工中的应用
 - 7.5.1 建筑混凝土表层破除与修整作业
 - 7.5.2 建筑构件废旧拆除与局部改造应用
- 7.6 硬质合金安全锤头在特种设备检修中的应用
 - 7.6.1 特种设备结垢、锈蚀层清理作业
 - 7.6.2 设备紧固构件松动敲击拆解应用

第八章 硬质合金安全锤头的市场竞争与未来发展

- 8.1 硬质合金安全锤头的全球生产格局与竞争态势
 - 8.1.1 国际领先企业的技术特点与产能布局
 - 8.1.2 国内主要生产企业的竞争优势与技术差距
- 8.2 硬质合金安全锤头的应用领域需求演变
 - 8.2.1 交通运输应急安全领域的需求变化
 - 8.2.2 工业加工与材料检测领域的升级要求
 - 8.2.3 矿山、建筑施工装备领域的发展趋势
- 8.3 硬质合金安全锤头的创新方向与技术路线
 - 8.3.1 新型粘结相、梯度结构硬质合金锤头的研究进展
 - 8.3.2 纳米增强、表面改性复合锤头的技术路线
 - 8.3.3 精密成型、高一一致性智能化锤头的开发思路
 - 8.3.4 低成本、长寿命绿色制备工艺探索与优化
- 8.4 硬质合金安全锤头产业发展的驱动因素与制约因素
 - 8.4.1 技术进步、智能制造升级的行业需求驱动
 - 8.4.2 钨基原材料价格波动对产品市场的影响
 - 8.4.3 原材料供应、环保政策与生产成本制约分析

附录 A 中国硬质合金安全锤头标准

附录 B 国际硬质合金安全锤头标准

附录 C 欧美日韩等国的硬质合金安全锤头标准

附录 D 硬质合金安全锤头术语表

参考文献

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！

采购信息

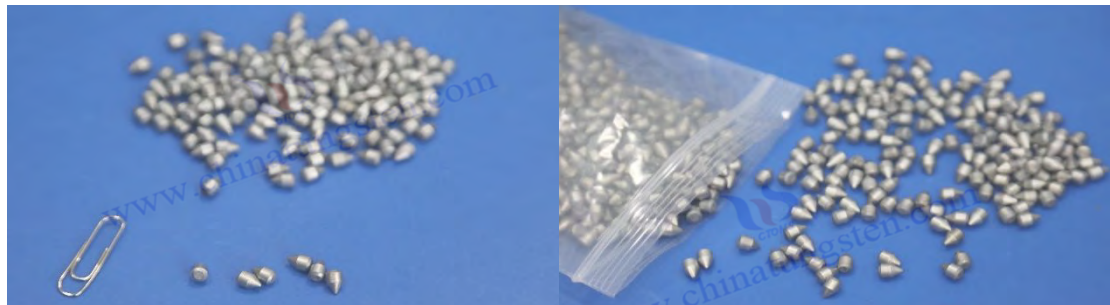
如有关于硬质合金安全锤头的生产需求，请联系制造商：中钨智造（厦门）科技有限公司

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



版权与免责声明

第一章 硬质合金安全锤头概述

1.1 硬质合金安全锤头的定义

硬质合金安全锤头是安全逃生工具中的核心工作部件，专门设计用于在紧急状态下快速击碎钢化玻璃、夹胶玻璃等脆性材料，为交通工具内的人员逃生提供辅助支持。从产品属性来看，它属于镶嵌硬质合金型安全锤的关键组成部分，常见于公交车、客运船舶、地铁等公共交通工具的应急逃生装置中。这类锤头之所以被称为“安全”锤头，源于其在应急场景下所发挥的功能——能够在有限时间内帮助乘员破除玻璃障碍，争取逃生通道的开启时间。根据国家行业标准 QB/T 5231018 的相关规定，镶嵌硬质合金型安全锤的锤击端需满足特定的性能指标，硬质合金安全锤头正是为满足这一标准而设计的专业化产品。



中钨智造硬质合金安全锤头

1.1.1 硬质合金安全锤头的物质基础

硬质合金安全锤头的物质基础由其材料的化学成分与微观组织结构共同构成。从化学成分的角度分析，这类锤头以碳化钨（WC）粉末作为主要的硬质相，其质量分数通常占据材料总质量的绝大部分。碳化钨是一种具有高硬度、高熔点和良好化学稳定性的金属碳化物，在常温下能够抵抗多种酸碱介质的侵蚀，这一特性使得硬质合金安全锤头能够在潮湿环境或存在轻微腐蚀性介质的场合中保持性能稳定。粘结相方面，钴是最常用的金属粘结剂，其含量一般在质量分数百分之六至百分之十一之间浮动，具体数值根据锤头的目标性能要求而有所调整。国标代号“YG”代表钨钴类硬质合金，其后跟随的数字表示钴的质量分数，例如 YG6 表示钴含量约为百分之六，YG8 表示钴含量约为百分之八，YG10X 则表示钴含量约为百分之十。

不同牌号的硬质合金材料在性能上呈现出不同的侧重。YG6 牌号的钴含量相对较低，碳化钨颗粒之间的结合更为紧密，因此硬度表现较为突出，适用于对尖端保持性要求较高、冲击频率相对较低的使用场景。YG8 牌号的钴含量适中，在硬度与韧性之间形成了一种平衡状态，

版权与免责声明

能够适配大多数常规应急破玻场景的需求，是公共交通工具安全锤中应用较为广泛的牌号之一。YG10X 牌号含有更高比例的钴粘结相，其抗冲击性能得到增强，抗弯强度可达到较高水平，适用于需要承受频繁锤击或较大冲击载荷的场合。除了钨钴二元系硬质合金外，部分产品还会添加钽（Ta）、铌（Nb）或钛（Ti）等碳化物作为改性组分，这些添加元素能够进一步优化材料的抗氧化性能或高温硬度，使锤头能够适配更为复杂的作业环境。

在微观组织层面，硬质合金安全锤头的性能与其内部碳化钨颗粒的粒度、分布均匀性以及粘结相的厚度密切相关。碳化钨颗粒的粒度选择通常控制在一个适宜的范围内，过粗的颗粒可能导致材料强度下降，过细的颗粒则可能影响韧性表现。通过粉末冶金工艺，碳化钨颗粒被金属粘结相牢固地“焊接”在一起，形成一种具有连续骨架结构的复合材料。这种微观组织结构赋予硬质合金安全锤头一系列区别于均质材料的特性：当锤头尖端冲击玻璃表面时，碳化钨颗粒承担抵抗压入和磨损的任务，而钴粘结相则通过塑性变形吸收部分冲击能量，避免裂纹在材料内部快速扩展。此外，硬质合金材料具有较高的密度，这在一定程度上增加了锤头的质量感，对于破玻作业而言，适当的质量有助于在锤击过程中积累动能，但过高的质量也可能影响工具的操作便捷性，因此在进行产品设计时需要进行综合考量。化学稳定性方面，硬质合金材料在高温环境中的氧化程度较低，且能够耐受一般的酸碱腐蚀，这一特性使其能够适应不同气候条件下的储存与使用需求。

1.1.2 硬质合金安全锤头的结构基础

硬质合金安全锤头的结构基础可以从宏观结构形态与微观结构设计两个层面加以考察。在宏观结构层面，硬质合金安全锤头主要分为整体式与复合式两种结构类型，两种结构在设计理念、材料分布及适配场景上存在差异。整体式硬质合金安全锤头采用单一硬质合金构件通过粉末冶金工艺一体成型，整个锤头无拼接或镶嵌结构，材质均匀一致。其结构设计通常包含两个功能区域：一端为尖锥状作业端，用于集中冲击力击碎玻璃；另一端为圆柱状或特定形状的装配段，用于嵌入锤柄或与锤体固定。尖锥状作业端的锥角设计常见于六十度至九十度之间，尖部圆弧半径通常控制在 R0.5 至 R1.5 毫米范围内，这种几何参数的选择有助于在锤头与玻璃接触时形成较高的局部应力，触发玻璃的脆性破裂机制。

复合式硬质合金安全锤头则采用“基体加作业端”的组合结构，其中基体部分选用韧性较好的合金钢材料，而作业端（即锤击尖端）采用硬质合金块或硬质合金棒，通过钎焊工艺将两者牢固连接。这种结构设计的优势在于实现了材料性能的分区配置：基体部分承担与锤柄连接、传递冲击力以及吸收振动能量的功能，不需要具备极高的硬度；而作业端则专注于提供高硬度和耐磨性，以保证破玻效果。通过这种结构优化，复合式锤头在保持破玻性能的同时，能够在一定程度上降低材料成本，因为合金钢的价格通常低于硬质合金。此外，合金钢基体具有较好的韧性，能够在锤击过程中缓冲瞬时冲击载荷，降低硬质合金尖端发生崩裂的风险。从使用场景来看，复合式结构在公交车、客运船舶等大型公共交通工具的应急逃生设备中应用较为广泛，而整体式结构则更多见于小型化、轻量化的便携式安全锤产品中。

在连接与固定结构方面，除了上述两种主流结构外，还存在机械夹固式等特殊结构设计。机械夹固式结构通过底垫、压板和紧固件将硬质合金锤头与锤体连接在一起，底垫和压板采用普通铸钢材料，通过斜面配合和螺栓紧固的方式实现硬质合金锤头的固定。这种结构设计

版权与法律声明

的出发点在于方便锤头在使用磨损后的更换操作，使用者无需更换整个锤体，仅需更换硬质合金尖端即可恢复工具的破玻能力，从而延长了安全锤整体的使用寿命。从微观结构层面来看，硬质合金材料本身的内部结构特征是锤头性能的重要基础。碳化钨颗粒作为硬质相，在粘结相中形成连续的空间骨架，这种骨架结构既保证了材料抵抗外部压入和切削的能力，又通过粘结相的塑性变形行为为材料提供了抵抗断裂的韧性储备。正是这种宏观与微观结构的多层次协同，使得硬质合金安全锤头能够在应急破玻场景中展现出较为可靠的性能表现。

1.2 硬质合金安全锤头的分类

硬质合金安全锤头作为一种专业化工具，其产品类型呈现出多样化的特征，这种多样性源于材料科学、结构设计、性能要求以及应用场景等多方面因素的综合作用。

1.2.1 按组成划分的硬质合金安全锤头

按材料组成划分是理解硬质合金安全锤头性能差异的基础维度。从化学成分的角度来看，硬质合金安全锤头的组成体系主要由硬质相、粘结相以及可能的添加相三部分构成，其中硬质相的质量分数通常占据材料总质量的绝大部分，粘结相的含量则根据目标性能要求在一定范围内进行调整。根据国标代号体系，钨钴类硬质合金以“YG”标识，其后跟随的数字表示钴的质量分数，这是目前安全锤头领域应用较为广泛的材料体系。

在钨钴二元系内部，不同钴含量的牌号展现出差异化的性能特征。YG6 牌号的钴含量约为百分之六，硬度处于 HRA91 至 92 区间，抗弯强度约为 1500 至 1700 兆帕，这一牌号的硬质合金安全锤头适用于对尖端保持性要求较高、冲击频率相对较低的使用场景。YG8 牌号的钴含量约为百分之八，硬度约为 HRA89 至 90，抗弯强度可达 1900 兆帕以上，在硬度与韧性之间形成了一种平衡状态，能够适配大多数常规应急破玻场景的需求。YG10X 牌号含有更高比例的钴粘结相，约为百分之十，其抗冲击性能得到进一步增强，适用于需要承受较大冲击载荷或长期使用的场合。除钴含量差异外，碳化钨颗粒的晶粒度也是影响材料性能的组成因素，YG8C 采用粗晶结构设计，钴含量约百分之八，硬度约 HRA89 至 90，抗弯强度可达 2000 至 2200 兆帕，这种粗晶结构在高频锤击环境中展现出良好的抗冲击和耐磨性能。

除了钨钴二元系硬质合金外，部分产品还会添加钛、钽或铌等元素形成多元合金体系。钨钛钴基硬质合金在钴的基础上添加碳化钛，能够改善对某些材料的加工性能和抗月牙洼能力。钨钛钽（铌）基硬质合金则通过添加碳化钽或碳化铌，可以提升材料的硬度和抗氧化性，适用于某些高温或特殊环境条件下的使用需求。这类多元合金体系在安全锤头领域的应用相对有限，但在特定工业加工场景下仍具有一定的适用性。

1.2.2 按性能划分的硬质合金安全锤头

按性能划分硬质合金安全锤头，是从使用功能角度对产品进行归类的重要方式。不同的使用场景对锤头的性能要求存在差异，这种差异主要体现在硬度、韧性、耐磨性及抗冲击性能等指标的权重分配上。

硬度优先型硬质合金安全锤头以 YG6 牌号为代表，钴含量较低，硬度较高，耐磨性能表现突出。这类锤头的作业端能够在长时间使用过程中保持锐利形态，适用于对玻璃等脆性材料进行快速破拆的场景。在应急破玻作业中，锤头尖端需要在有限次数的锤击动作中完成玻璃破碎任务，硬度优先的设计理念保证了锤头尖端的应力集中效果，能够较为可靠地在钢化玻璃表面形成触发碎裂所需的高应力区域。但需要指出的是，硬度优先型锤头的韧性相对有限，在承受偏斜方向的冲击载荷时，硬质合金材料发生局部崩裂的风险略高于韧性优先型产品。

韧性优先型硬质合金安全锤头则以 YG8C 或 YG10X 为代表，钴含量较高或采用粗晶结构设计，材料的断裂韧性得到增强。这类锤头在承受较大冲击载荷时表现出较好的抗崩裂能力，适用于工业加工领域中对岩石、混凝土等硬脆材料进行破碎作业的场合，以及公共交通设备中长期承受周期性锤击的场景。韧性优先的设计思路在一定程度上牺牲了材料的硬度指标，换取了更为可靠的结构完整性，对于使用频率较高或施力方式难以标准化的应用场景而言，这种权衡具有实际意义。综合平衡型硬质合金安全锤头以 YG8 为代表，在硬度与韧性之间寻求协调，其硬度水平足以保证破玻效率，而韧性储备也能够满足大多数常规使用条件下对抗冲击性能的要求，成为应急逃生工具中应用较为广泛的类型。

性能分类还与晶粒度的选择存在关联。细晶粒硬质合金的硬度和抗弯强度较高，适用于对材料强度和耐磨性要求较高的场合；粗晶粒硬质合金则展现出更好的抗热冲击和抗断裂能力，适用于承受频繁锤击的工作环境。根据作业对象的不同，还可将安全锤头区分为专用于钢化玻璃破拆的类型、适用于夹胶玻璃处理的类型，以及适配石材、混凝土等工业物料的类型。

1.2.3 按结构形态划分的硬质合金安全锤头

按结构形态划分是硬质合金安全锤头分类体系中较为直观且应用广泛的方式。结构形态直接关系到锤头的制造工艺、装配方式、成本构成以及适配场景，目前行业内的主流分类包括整体式与复合式两大类型，两种结构在设计理念与性能侧重上存在明显区别。

整体式硬质合金安全锤头采用粉末冶金工艺一体成型，整个锤头由单一硬质合金构件构成，无拼接、无镶嵌、无焊接结构。其结构设计通常包含两个功能区域：一端为尖锥状作业端，用于集中冲击力；另一端为圆柱状或其他特定形状的装配段，用于嵌入锤柄或与锤体固定。尖锥状作业端的锥角常见于六十度至九十度之间，尖部圆弧半径通常控制在 R0.5 至 R1.5 毫米范围内，这种几何参数的选择有助于在锤头与玻璃接触时形成较高的局部应力。整体式结构的优势在于材质均匀，整体硬度与耐磨性保持一致，加工工艺相对简洁，无需额外的钎焊固定工序，尺寸精度容易控制。然而，单一材料的特性也带来一定的局限性——整体式锤头的韧性受限于材料本身，在承受偏斜冲击时，锤头整体均存在脆性失效的风险。此外，由于硬质合金材料的密度较高，整体式锤头的重量相对较大，这一特点对于小型化、轻量化的便携式安全锤产品而言，既是一种优势（有助于积累动能），也可能带来操作上的考量。

复合式硬质合金安全锤头采用“基体加作业端”的组合结构设计，是目前应用较为广泛的类型。基体部分选用韧性较好的合金钢材料，承担与锤柄连接、传递冲击力以及吸收振动能量的功能；作业端（即锤击尖端）采用硬质合金块或硬质合金棒，通过钎焊工艺牢固地固定在基体上。这种结构设计的优势体现在材料性能的分区配置上：合金钢基体具有良好的韧性，

能够在锤击过程中缓冲瞬时冲击载荷，降低硬质合金尖端发生崩裂的风险；硬质合金作业端则专注于提供高硬度和耐磨性，保证破玻效率。两部分通过钎焊工艺连接，可根据实际需求调整硬质合金作业端的尺寸、位置及材质牌号，具有较强的设计灵活性。在成本方面，复合式结构由于合金钢基体的价格低于硬质合金材料，整体制造成本低于整体式产品，而使用寿命与整体式锤头相当，维护成本也相对较低。复合式结构主要适配公交车、客运船舶等大型公共交通工具的应急逃生设备，以及工业领域中需要频繁锤击的作业场景。

1.2.4 按应用领域划分的硬质合金安全锤头

按应用领域划分有助于从使用场景的角度理解硬质合金安全锤头的功能定位与性能要求。不同的应用领域对锤头的设计重点、材料选择及性能指标提出了差异化的要求，基于这一维度可以将硬质合金安全锤头划分为户外应急型、工业加工型以及材料检测型等类别。

户外应急型硬质合金安全锤头是公众认知度较高的类型，主要应用于车辆被困、船舶遇险等紧急情况下的玻璃破碎作业。这一应用领域对锤头的要求集中在“快速有效”上——在应急场景中，使用者可能面临紧张状态，施力条件受限，因此要求锤头能够在有限的锤击次数内完成破玻任务。户外应急型锤头的作业端通常设计为锋利的锥形或尖状结构，以集中作用力在钢化玻璃或夹胶玻璃表面形成高应力区域。材质牌号多选用 YG6 或 YG8 系列，钴含量控制在百分之六至百分之八左右，这种材料配置在保证硬度的同时也兼顾了一定的韧性储备。产品形态上，户外应急型锤头既可采用整体式结构，也可采用复合式结构，具体选择取决于安全锤的整体设计理念与成本控制目标。在公共交通安全法规的框架下，这类锤头需要满足相应的性能标准要求，确保在紧急状况下能够发挥预期功能。公交车、客运船舶、地铁等公共交通工具中配备的安全锤，以及个人随车携带的便携式应急破窗器，均属于这一应用范畴。

工业加工型硬质合金安全锤头主要服务于工业生产领域，广泛应用于石材加工、地矿勘探以及对岩石、混凝土等硬脆材料进行破碎和成孔的作业环境。与户外应急型产品不同，工业加工型锤头面临的工作条件更为严苛——锤击频率更高、冲击载荷更大、作业持续时间更长，且被加工对象的材质多样性较强。这一应用领域对锤头的耐磨性和抗冲击性能提出了较高要求。材质选择上，工业加工型锤头常见 YG8C 等粗晶结构牌号，钴含量约百分之八，硬度约 HRA89 至 90，抗弯强度可达 2000 兆帕以上。连接方式以整体式或复合式为主，以适应高频锤击作业对结构可靠性的要求。在某些工业场景中，安全锤头还需要具备一定的耐高温性能，以应对摩擦生热或环境温度较高的情况。这类锤头在作业过程中承受的磨损程度高于应急型产品，因此对材料耐磨性的关注度更为突出。

材料检测型硬质合金安全锤头是相对特殊的一类产品，主要用于对建筑结构、桥梁工程或道路材料进行强度、裂纹和密度等指标的现场检测。这类锤头的设计理念与应急型、工业加工型存在明显差异——其目标不是“破坏”材料，而是通过可控的敲击观察材料的响应特征，从而评估材料的物理性能或结构完整性。因此，材料检测型锤头的作业端多以圆头或平头为主，便于在受检表面形成稳定的敲击接触面。设计上多采用轻量化、便于携带的整体式结构，以适应现场检测作业的移动性需求。材质牌号的选择较为灵活，可采用 YG6 等细晶结构以兼顾轻便性和耐磨性。这类安全锤头在检测过程中体现出较好的稳定性和重复性，适用于对精密要求不高的现场评估工作。三个应用领域之间并非完全割裂，部分产品可能存在跨领域的

版权与法律声明

适用性，但每个领域对锤头性能的侧重点确实有所不同。

1.2.5 按工作环境划分的硬质合金安全锤头

按工作环境划分是对硬质合金安全锤头进行分类的补充维度，关注的重点在于环境因素对锤头性能表现和使用寿命的影响。工作环境可以从温度条件、介质腐蚀性、湿度水平以及空间受限程度等多个方面进行考察，不同环境条件下对锤头材料性能的要求存在差异。根据环境特征的差异，可以将硬质合金安全锤头划分为常规环境型、潮湿腐蚀环境型以及高温作业型等类别，每一类别在产品设计上体现出针对性的考量。

常规环境型硬质合金安全锤头适用于一般气候条件下的应急破玻与工业加工场景，如公交车厢内、普通厂房车间、民用交通工具等。这类环境中，温度变化范围相对有限，空气中不存在明显的腐蚀性介质，湿度处于常规水平。在常规环境下，钨钴类硬质合金材料能够保持稳定的性能状态，YG6、YG8 等常见牌号可以较好地满足使用要求。常规环境型锤头的设计重点在于硬度与韧性的匹配，以及产品成本的合理控制，无须额外考虑耐腐蚀或耐高温等特殊性能。公共交通工具内配置的安全锤、个人车载应急工具以及一般工业加工设备中使用的破玻锤头，均属于常规环境型产品的范畴。

潮湿腐蚀环境型硬质合金安全锤头主要应用于海洋船舶、港口设施、隧道工程以及南方高湿度地区等场景。这类环境中的空气湿度较高，或直接存在海水、盐水等电解质溶液的接触可能，对金属材料的腐蚀风险较高。硬质合金材料本身具有较好的化学稳定性，钨钴合金在常规环境下耐酸、耐碱性能良好，即使在潮湿环境中也能保持性能的相对稳定，氧化程度较低。但对于长期暴露于高盐雾环境下的产品而言，基体材料（尤其是复合式结构中的合金钢部分）可能需要额外的防腐处理措施，如表面涂层或镀层保护。从材质选择来看，钨钴二元系硬质合金在潮湿环境下的适用性较好，但若环境腐蚀性超出一定范围，可能需要考虑添加钽、铌等元素的多元合金方案。此外，粘结相的选择也会影响材料的耐腐蚀性能，钴在某些酸性介质中的稳定性与镍或铁存在差异，这为特定环境下的牌号选择提供了调整空间。

高温作业型硬质合金安全锤头适用于工业窑炉检修、高温车间作业以及某些特殊工艺场景。这类环境中，环境温度可能显著高于常温，锤头在作业过程中可能承受额外的热负荷。硬质合金材料在高温条件下仍能保持较好的硬度稳定性，这一特性源于碳化物硬质相的高熔点本质。但当温度超过一定范围后，材料的硬度仍会出现一定程度的下降，同时氧化速率加快。高温作业型锤头在设计上可能采用添加钽、钼或铌碳化物的多元合金体系，这些元素能够改善材料的抗氧化性能和高温硬度保持能力。从结构形态来看，整体式锤头在高温环境下的性能一致性较好，而复合式结构中的钎焊部位可能成为薄弱环节，需要采用耐高温钎料或调整连接方式。按工作环境进行的分类有助于在特定工况下进行合理的产品选型，在常规环境中选择经济适用的产品类型，在苛刻环境中选用具备相应耐受能力的高等级产品，从而实现性能与成本的协调平衡。

1.3 硬质合金安全锤头的发展历史

硬质合金安全锤头的发展历程与人类工具演进史密切相关，它的诞生并非孤立事件，而是伴

随着硬质合金材料的发明、应急安全意识的提升以及制造工艺的进步而逐步成型的。从广义的工具发展脉络来看，锤类工具的起源可以追溯至数百万年前的旧石器时代，但硬质合金安全锤头作为一种专业化产品，其历史相对短暂，主要集中在二十世纪中后期至今的时间跨度内。这一发展过程大致可以划分为三个历史阶段：早期探索与发明阶段，以硬质合金材料在工具领域的初步应用为标志；工业化发展阶段，以粉末冶金技术的成熟和产品标准化为特征；现代演变与成熟应用阶段，以产品系列化、场景适配性提升以及智能化趋势的显现为主要内容。以下分别对这三个阶段加以阐述。

1.3.1 硬质合金安全锤头的早期探索与发明

硬质合金安全锤头的早期探索与发明阶段，大致对应于二十世纪二十年代至二十世纪中叶。这一时期的背景是硬质合金材料本身的诞生及其在工业工具领域的初步应用。硬质合金作为一种人工合成的复合材料，其发明可以追溯至二十世纪二十年代的德国。一九二三年，德国科学家卡尔·施勒特尔（Karl Schröter）采用粉末冶金方法，将碳化钨粉末与少量钴混合后烧结成型，制得了具有高硬度和高抗弯强度的硬质合金材料。这一发明标志着硬质合金工业的诞生，也为后续各类硬质合金工具的开发奠定了物质基础。

在硬质合金材料问世之初，其主要应用领域集中在金属切削加工工具上，如硬质合金车刀、铣刀等。这些工具凭借远高于高速钢的硬度和耐磨性，大幅提升了机械加工效率，推动了制造业的发展。然而，将硬质合金应用于冲击类工具（如锤头、破碎机锤头等）的设想，在早期阶段面临着材料韧性的挑战——硬质合金虽然硬度极高，但其韧性明显低于钢材，在承受冲击载荷时容易发生脆性断裂。这一特性限制了硬质合金在冲击工具领域的直接应用，早期的冲击工具仍以高锰钢、高铬合金铸铁等材料为主。

硬质合金安全锤头的真正发明，与两种技术路径的探索密切相关。第一种路径是复合结构设计的提出。为解决硬质合金韧性不足的问题，研究人员尝试将硬质合金与韧性较好的钢材进行复合，形成“钢基体加硬质合金工作端”的结构。这种设计将硬质合金的高硬度和耐磨性用于破碎作业端面，而将钢材的韧性用于承受冲击载荷，实现了两种材料优势的互补。这种复合锤头的早期形式主要应用于矿山破碎设备领域，例如镶嵌硬质合金的高锰钢大锤头，其在浇铸成型过程中将长条状硬质合金直接镶嵌在锤头打击部位，使硬质合金与高锰钢基体形成冶金结合，既保证了锤头使用的安全性，又提高了锤头的使用寿命。

第二种技术路径是硬质合金配方的优化调整。通过调整碳化钨颗粒的粒度以及钴粘结相的含量，研究人员开发出了具有更高断裂韧性的硬质合金牌号。增加钴含量或采用粗晶粒碳化钨，可以在一定程度上牺牲硬度换取韧性，使硬质合金材料本身能够承受有限的冲击载荷。这种材料层面的探索，为整体式硬质合金安全锤头的诞生提供了技术支撑。在这一阶段，硬质合金安全锤头的应用场景主要集中在工业破碎领域，用于替代传统的高锰钢或高铬铸铁锤头，以应对高硬度、强磨蚀性物料的破碎需求。

1.3.2 硬质合金安全锤头的工业化发展

硬质合金安全锤头的工业化发展阶段，大致对应于二十世纪六十年代至二十世纪末。这一时

期的标志性特征包括粉末冶金工艺的成熟、产品生产标准化程度的提高、应用领域的拓宽以及市场规模的扩大。工业化的发展使得硬质合金安全锤头从实验室样品和小批量试制阶段，过渡到了能够满足市场需求的批量化生产阶段。

在制造工艺方面，粉末冶金技术的进步为硬质合金安全锤头的工业化生产提供了工艺基础。硬质合金的生产流程包括配料混合、压制成型、烧结致密化以及后续精加工等环节。在工业化发展时期，这些环节中的关键技术取得了重要突破。首先是烧结工艺的优化，真空烧结和氢气保护烧结技术的普及，使得硬质合金产品的致密度和内部质量得到改善。烧结温度控制在 1350℃ 至 1450℃ 范围内，保温时间的精确控制确保了碳化钨颗粒与钴粘结相之间的充分结合，减少了气孔和夹杂等内部缺陷。其次是压制成型技术的进步，随着高精度模具和等静压成型技术的应用，硬质合金压坯的尺寸精度和密度均匀性得到提高，为后续烧结工序的稳定性和产品合格率的提升创造了条件。此外，硬质合金与钢基体的钎焊工艺也趋于成熟，高质量的钎焊连接保证了复合式锤头中两种材料的可靠结合，降低了使用过程中硬质合金脱落的风险。

在产品标准化方面，工业化发展推动了硬质合金安全锤头系列化、规格化的进程。生产企业根据不同应用场景的需求，开发出了多种材质牌号和结构形式的锤头产品。在材质牌号方面，YG6、YG8、YG10X 等钨钴类硬质合金牌号逐渐形成了稳定的生产体系，每种牌号的钴含量和晶粒度根据目标性能要求进行了优化。在结构形式方面，整体式和复合式两种结构形态各自形成了成熟的产品系列，适应了不同价位区间和性能要求的需求。产品规格参数也逐步标准化，例如锤头直径通常为三至八毫米，长度在五至二十毫米之间，尖部圆弧半径控制在 R0.5 至 R1.5 毫米范围内。国家标准的制定和实施进一步促进了产品的规范化，QB/T 5231018《镶嵌硬质合金型安全锤》对安全锤的锤击端硬度、尺寸要求、装配要求等作出了规定，为产品质量控制和市场秩序维护提供了依据。

在应用领域拓展方面，硬质合金安全锤头在工业化发展时期实现了从工业破碎领域向交通安全应急领域的重要跨越。在工业领域，硬质合金锤头或镶嵌硬质合金块的复合锤头被广泛应用于水泥、电力和矿山等行业的大型破碎设备中，用于处理高硬度、强磨蚀性的物料。据相关技术资料显示，镶嵌硬质合金后高锰钢大锤头的使用寿命比传统高锰钢锤头有明显提高，其提高幅度可达到数倍之多。在交通安全应急领域，随着公共交通工具安全法规的完善和公众安全意识的提升，镶嵌硬质合金型安全锤逐渐成为公交车、客运船舶、地铁等公共交通工具的标准配置。这一阶段的硬质合金安全锤头产品，不仅在性能上优于传统钢制锤头，在成本控制方面也取得了进展，使其具备了在更大范围内推广应用的经济可行性。工业化发展阶段的成果，使得硬质合金安全锤头从一种专业化的工业工具，转变为服务于公共安全领域的成熟产品。

1.3.3 硬质合金安全锤头的现代演变与成熟应用

硬质合金安全锤头的现代演变与成熟应用阶段，大致对应于二十一世纪初期至今。这一阶段的特点是产品性能的精细化调节、应用场景的多元化细分、生产制造的信息化升级，以及智能化工具的初步探索。在现代阶段，硬质合金安全锤头已不再是单一功能的工具，而是根据不同使用需求形成的产品家族，其技术内涵不断丰富，应用边界持续拓宽。

在产品性能的精细化调节方面，现代硬质合金材料技术的发展使得锤头性能可以根据具体应用需求进行更加精细的定制。碳化钨晶粒度的精确控制技术日趋成熟，细晶粒硬质合金的硬度和抗弯强度较高，适用于对材料强度和耐磨性要求较高的场合；粗晶粒硬质合金则展现出更好的抗热冲击和抗断裂能力，适用于承受频繁锤击的工作环境。除传统的钨钴二元系合金外，添加钽、铌或钛等碳化物的多元合金体系也得到了发展，这些添加元素能够优化材料的抗氧化性能或高温硬度，使锤头能够适配更为复杂的作业环境。材料性能的精细化和多样化，为硬质合金安全锤头在更多细分场景中的应用提供了技术可能性。



中钨智造硬质合金安全锤头

在应用场景的多元化细分方面，现代阶段的硬质合金安全锤头已形成较为完整的分类体系。按照应用领域的不同，可以划分为户外应急型、工业加工型以及材料检测型等类别。户外应急型产品主要针对车辆被困等紧急情况下的玻璃破碎需求，作业端设计为锋利的锥形或尖状结构，以集中作用力在钢化玻璃或夹胶玻璃表面形成高应力区域，典型牌号采用 YG6 或 YG8 系列。工业加工型产品广泛应用于石材加工、地矿勘探以及对岩石、混凝土等硬脆材料进行破碎和成孔的场合，常见牌号包括 YG8C 等粗晶结构，在高频锤击环境中展现出较好的抗冲击和耐磨性能。材料检测型产品则用于对建筑、桥梁或工程结构材料进行强度、裂纹和密度等指标的现场检测，设计多采用轻量化、便于携带的整体式结构，作业端以圆头或平头为主，牌号选择较为灵活。这种细化的分类体系反映了产品设计与市场需求之间的深度对接。

在制造技术的信息化与智能化方面，现代阶段的硬质合金安全锤头生产正在经历从传统制造向智能制造的转型。计算机辅助设计和有限元分析技术的应用，使得锤头结构的优化设计可以在虚拟环境中完成，缩短了产品开发周期。粉末冶金工序中的自动化控制系统，能够对配料比例、压制压力、烧结温度等关键工艺参数进行实时监控和调节，提高了产品质量的一致性和稳定性。

在公共安全领域的应用深化方面，硬质合金安全锤头已从早期的公交车安全锤，拓展到了更为广泛的场景。轨道交通车辆、客运船舶、校车等各类公共交通工具中，均可见到镶嵌硬质合金型安全锤的身影。部分便携式个人应急破窗工具，也采用了硬质合金锤头设计。

版权与免责声明

第二章 硬质合金安全锤头材料体系

2.1 硬质合金安全锤头的硬质相组成

硬质相是硬质合金安全锤头材料体系中承担主要功能的部分，其作用是提供高硬度和耐磨性，使锤头能够在与玻璃或岩石等硬脆材料接触时保持锐利的形态和稳定的工作状态。硬质相通常采用金属碳化物，这类化合物具有高熔点、高硬度和良好的化学稳定性。根据具体应用场景对锤头性能要求的不同，硬质相可以选择单一类型的碳化物，也可以采用多种碳化物的组合方案。

2.1.1 碳化钨作为硬质相的硬质合金安全锤头

碳化钨(WC)是硬质合金安全锤头中使用最为广泛的硬质相材料。碳化钨属于六方晶体结构，其碳原子嵌入钨原子构成的晶格间隙中，形成了稳定的化合物。这种晶体结构赋予碳化钨一系列优异的物理性能，包括高硬度、高熔点以及良好的抗压强度。在硬质合金安全锤头的应用场景中，碳化钨作为硬质相的主要优势体现在两个方面：一是能够在与玻璃等硬脆材料接触时保持尖端的几何形态，抵抗磨损引起的钝化；二是具有稳定的化学性质，能够在潮湿、弱酸碱等环境下保持性能不衰减。

碳化钨颗粒的粒度对硬质合金安全锤头的性能表现具有影响。粗颗粒碳化钨（晶粒度在 3.0 微米至 5.0 微米之间）制成的硬质合金，其断裂韧性较高，适用于承受较大冲击载荷的使用场景，例如工业加工领域中对岩石或混凝土进行破碎作业的锤头。细颗粒碳化钨（晶粒度在 0.5 微米至 1.0 微米之间）制成的硬质合金，其硬度和抗弯强度较高，适用于对尖端保持性要求较高的应急破玻场景。介于两者之间的中等粒度碳化钨则提供了综合性能平衡的选项，适用于大多数常规使用工况。碳化钨颗粒在硬质合金中的体积分数通常较高，这保证了材料整体硬度的稳定性。

在硬质合金安全锤头的制造过程中，碳化钨粉末与钴等粘结相粉末按照设定的配比进行混合，经过压制成型和烧结致密化后，形成具有连续骨架结构的复合材料。碳化钨颗粒在烧结过程中发生一定程度的溶解和再析出，形成不规则的多面体形态，颗粒之间通过晶界相互连接。这种微观组织结构使得碳化钨骨架能够有效传递和分散外部载荷，避免应力在局部过度集中。对于镶嵌硬质合金型安全锤而言，碳化钨基硬质合金的工作端能够以较小的接触面积在玻璃表面形成较高的应力水平，从而触发玻璃的脆性破裂机制。根据国家标准 QB/T 5231018 的要求，镶嵌硬质合金型安全锤的锤击端应采用不低于 YG6 牌号的硬质合金材料，碳化钨作为硬质相在这一要求中处于核心地位。

2.1.2 其他金属碳化物硬质相的硬质合金安全锤头

除碳化钨外，其他金属碳化物也可作为硬质合金安全锤头的硬质相，或在碳化钨基合金中作为添加相使用。常见的替代性或添加性硬质相包括碳化钛 (TiC)、碳化钽 (TaC) 和碳化铌 (NbC) 等。这些碳化物各自具有独特的性能特征，其引入可以在不同方面对硬质合金的整体性能产生影响。

版权与免责声明

碳化钛具有较低的密度和较高的硬度，在某些指标上甚至超过碳化钨。碳化钛基硬质合金通常以镍或钼作为粘结相，与碳化钨基合金相比，具有更低的密度和更好的抗氧化性能。然而，碳化钛的韧性低于碳化钨，这在一定程度上限制了其在冲击类工具中的广泛应用。在硬质合金安全锤头的材料体系中，碳化钛更多以添加相的形式出现，与碳化钨形成固溶体，以改善合金的抗氧化能力或调节其摩擦学性能。添加碳化钛后，硬质合金的抗月牙洼磨损能力有所提升，这一特性在高温或高速摩擦场景中具有应用价值。

碳化钽和碳化铌属于同一族系的金属碳化物，具有较高的熔点和良好的化学稳定性。在硬质合金安全锤头的材料体系中，这两种碳化物通常作为微量添加组分使用，其添加量一般控制在质量分数百分之零点五至百分之三之间。碳化钽和碳化铌在烧结过程中能够抑制碳化钨晶粒的异常长大，有助于获得均匀细小的晶粒组织，从而提高材料的抗弯强度和硬度。此外，这两种碳化物还能改善硬质合金的抗氧化性能和抗腐蚀性能，使锤头能够在更为苛刻的环境条件下保持性能稳定。在某些对耐磨性有特殊要求的工业加工场景中，添加碳化钽或碳化铌的硬质合金锤头表现出较长的使用寿命。

多元碳化物组合方案在高端硬质合金安全锤头产品中有所应用。通过同时添加多种碳化物，可以在硬度、韧性、耐磨性和抗腐蚀性等多个性能维度之间寻求协调。例如，一种典型的多元合金体系可能包含碳化钨作为主体硬质相，同时添加少量碳化钛和碳化钽，再以钴或镍作为粘结相。这种合金体系既保留了碳化钨的高硬度和高抗压强度优势，又通过添加相的存在改善了抗氧化和抗腐蚀性能。需要指出的是，多元合金体系的制造成本高于单一的碳化钨钴合金，因此在选择硬质相组成时，需要综合考虑性能要求、应用场景和成本因素，不存在普遍适用于所有场合的优化方案。

2.2 硬质合金安全锤头的硬质相特性

硬质相的特性直接决定了硬质合金安全锤头的核心性能表现。这些特性主要包括硬度特性和耐磨特性，两者之间存在内在的关联性，但在材料设计和工程应用中又需要加以区分。硬度特性反映的是材料抵抗局部压入和塑性变形的能力，而耐磨特性反映的是材料在摩擦和磨损条件下保持质量损失的能力。

2.2.1 硬质合金安全锤头的硬度特性

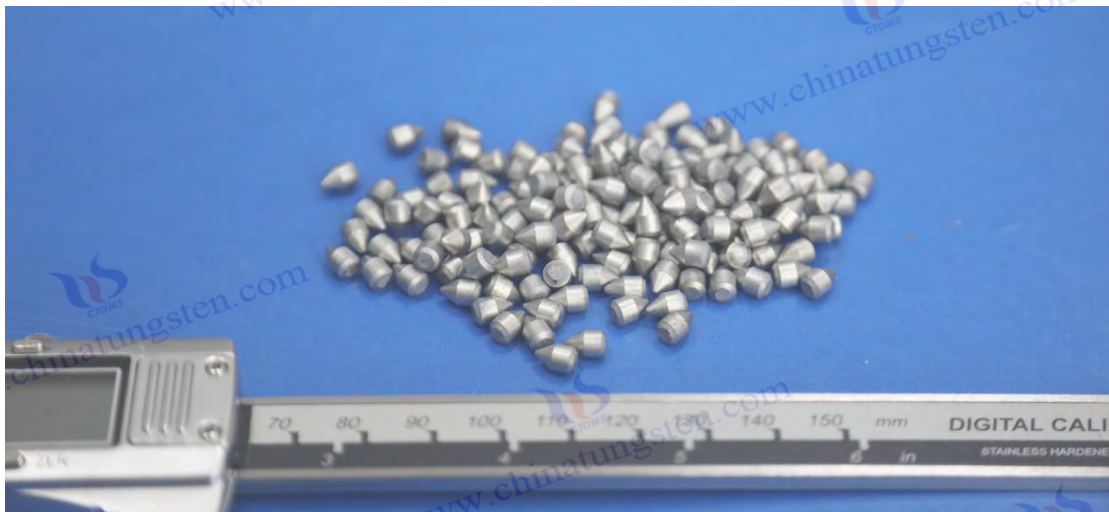
硬度是硬质合金安全锤头材料体系中最为基础也最为直观的性能指标。硬度反映了材料抵抗外部物体压入其表面的能力，对于安全锤头而言，足够的硬度是保证其在玻璃表面形成应力集中点的前提条件。硬质合金材料之所以能够在硬度方面显著优于传统钢材，根本原因在于碳化钨等硬质相本身的硬度远高于普通金属材料。碳化钨的显微硬度可以达到约 1800 至 2200HV，而普通结构钢的显微硬度通常在 200 至 400HV 范围内，两者之间存在一个数量级的差距。

硬质合金安全锤头的硬度主要由三个因素决定：硬质相的硬度、硬质相与粘结相的比例以及碳化钨颗粒的晶粒度。在碳化钨钴系合金中，随着钴含量的降低，材料的硬度呈现上升趋势，这是因为钴作为相对较软的相，其含量的减少意味着硬质相所占的比例增加。以 YG6 牌号为

例，其钴含量约百分之六，硬度通常处于 HRA91 至 92 区间；YG8 牌号的钴含量约百分之八，硬度约为 HRA89 至 90；YG10X 牌号的钴含量约百分之十，硬度约为 HRA88 至 89。这一关系表明，在硬质合金安全锤头的设计过程中，硬度的提高往往以韧性的降低为代价，需要在两者之间做出权衡。

碳化钨晶粒度对硬度的影响同样值得关注。细晶粒硬质合金中，碳化钨颗粒之间的接触更为充分，硬质相骨架的连续性更好，因此材料的硬度和抗弯强度较高。粗晶粒硬质合金由于晶粒尺寸较大，在外力作用下晶粒之间的相对位移更容易发生，因而硬度相对较低。例如，细晶粒 YG8 牌号的硬度可以达到 HRA90.5 以上，而粗晶粒 YG8C 牌号的硬度约为 HRA89 至 90。在硬质合金安全锤头的应用中，应急破玻场景对尖端锐利度保持性的要求较高，倾向于选用细晶粒或中等晶粒度的合金牌号；而工业加工场景对材料抵抗冲击断裂的能力要求较高，粗晶粒合金反而具有优势。

硬质合金安全锤头的硬度测试通常采用洛氏硬度 HRA 标尺，这是因为 HRA 标尺适用于硬质合金、硬质淬火钢等材料的硬度测量，其测量精度能够满足工程应用的需求。根据国家标准 QB/T 5231018 的规定，镶嵌硬质合金型安全锤的锤击端硬质合金块的硬度不应低于 HRA89。



中钨智造硬质合金安全锤头

2.2.2 硬质合金安全锤头的耐磨特性

耐磨性是硬质合金安全锤头材料体系中与使用寿命直接相关的性能指标。耐磨性反映的是材料在摩擦或磨损条件下抵抗质量损失的能力。对于硬质合金安全锤头而言，耐磨性的重要意义在于：当锤头反复冲击玻璃或其他脆性材料时，其尖端会承受持续的摩擦和微切削作用，耐磨性不足的锤头会逐渐磨损变钝，导致破玻效率下降。硬质合金材料在耐磨性方面具有明显优势，这使其能够在多次使用后仍保持较为锐利的工作状态。

硬质合金安全锤头的耐磨性来源于其微观组织结构中的硬质相骨架。碳化钨颗粒的硬度远高于玻璃或岩石等被加工材料，当锤头尖端与被加工材料接触时，碳化钨颗粒能够抵抗被加工

版权与免责声明

材料对其表面的划擦和切削。与此同时，钴粘结相虽然硬度较低，但其在磨损过程中能够为碳化钨颗粒提供支撑，防止碳化钨颗粒过早脱落。这种“硬质相承载磨损载荷、粘结相提供支撑”的协同机制，使得硬质合金材料在磨损条件下表现出优于均质材料的性能。

影响硬质合金安全锤头耐磨性的因素包括硬质相含量、碳化钨晶粒度以及粘结相的分布均匀性。在硬质相含量较高的合金中，碳化钨颗粒所占的体积分数较大，材料抵抗磨损的能力较强。随着钴含量的降低，材料耐磨性呈现上升趋势，这与硬度变化的趋势是一致的。碳化钨晶粒度对耐磨性的影响较为复杂：细晶粒碳化钨在微观尺度上形成的磨损表面更加平滑，有利于降低摩擦系数；粗晶粒碳化钨在磨损过程中可能形成更大的磨屑，但晶粒本身抵抗磨损的能力较强。

粘结相的分布状态同样对耐磨性产生影响。在理想情况下，钴粘结相应均匀分布在碳化钨颗粒之间，形成厚度适当的粘结层。如果钴分布不均匀，出现局部富集区或贫乏区，富集区可能因粘结相含量较高而加速磨损，形成凹坑，进而导致相邻碳化钨颗粒失去支撑而脱落；贫乏区则可能因粘结不足而出现碳化钨颗粒的直接剥离。因此，在硬质合金安全锤头的制造过程中，对混合均匀性和烧结工艺的控制较为重要。耐磨性的评价方法包括实验室条件下的磨损试验以及实际使用条件下的寿命测试，前者可以在较短时间内获得对比数据，后者更接近真实使用情况但测试周期较长。

2.3 硬质合金安全锤头的粘结相组成

粘结相是硬质合金安全锤头材料体系中起连接和支撑作用的重要组成部分。硬质相颗粒本身无法直接形成致密、连续的材料整体，需要依靠粘结相将它们“焊接”在一起，形成具有一定强度和韧性的复合材料。粘结相的选择、含量控制以及分布状态对硬质合金安全锤头的综合性能具有影响。

2.3.1 钴作为粘结相的硬质合金安全锤头

钴是硬质合金安全锤头材料体系中应用时间最长、技术成熟度最高的粘结相材料。钴属于铁族金属，具有面心立方晶体结构，其本身具有良好的塑性和韧性。在硬质合金的烧结过程中，钴在约 1300℃ 至 1450℃ 的温度范围内熔化，对碳化钨颗粒形成良好的润湿，液相钴能够在碳化钨颗粒之间的缝隙中充分流动并填充孔隙。当烧结完成后的冷却过程中，钴凝固并将碳化钨颗粒牢固地结合在一起，形成致密的复合材料组织。

钴作为粘结相的优势体现在润湿性、溶解度和力学性能三个方面。首先，钴对碳化钨的润湿角较小，这意味着液态钴能够较为充分地铺展在碳化钨颗粒表面，形成均匀的粘结层。良好的润湿性有助于减少材料内部的孔隙缺陷，提高硬质合金的致密度。其次，钴对碳化钨具有一定的溶解度，在烧结温度下，少量碳化钨会溶解于液相钴中，在冷却过程中再析出并附着在原有碳化钨颗粒表面，这一溶解-再析出过程有利于形成碳化钨颗粒之间的连续骨架结构，增强硬质相之间的结合强度。再次，钴本身的力学性能与硬质合金的使用要求具有较好的适配性，其韧性有助于吸收冲击能量，降低锤头在服役过程中发生脆性断裂的风险。

版权与法律责任声明

钴含量的变化对硬质合金安全锤头的性能产生系统性影响。在 YG6 牌号中，钴的质量分数约为百分之六，制备出的硬质合金具有较高的硬度，适用于对尖端保持性要求较高的应急破玻场景。在 YG8 牌号中，钴含量约为百分之八，材料在硬度和韧性之间形成了平衡状态，成为安全锤头领域应用较为广泛的牌号之一。在 YG10X 牌号中，钴含量约为百分之十，材料韧性进一步增强，适用于需要承受较大冲击载荷或频繁锤击的场合。

2.3.2 镍、铁及其他粘结相的硬质合金安全锤头

除钴外，镍、铁以及其他金属材料也可作为硬质合金安全锤头的粘结相使用。这些替代性粘结相材料的引入，主要出于成本控制、性能调节以及特定环境适应性等方面的考虑。镍基和铁基粘结相体系各自具有不同的性能特征，在某些应用中展现出与钴基体系不同的优势。

镍作为粘结相材料，与钴同属铁族金属，具有面心立方晶体结构，其塑性和韧性表现较好。镍对碳化钨的润湿性略低于钴，但在适当的烧结工艺条件下仍能够实现较为充分的致密化。镍基硬质合金的主要特点包括较好的抗腐蚀性能和抗氧化性能，这一特性使镍粘结相硬质合金安全锤头在潮湿环境或存在弱腐蚀性介质的场合中表现出较长的使用寿命。在海洋船舶、港口设施等应用场景中，镍粘结相硬质合金锤头的耐盐雾腐蚀能力优于普通钴基合金。然而，镍基硬质合金的硬度和抗弯强度通常略低于同钴含量的钴基合金，这是因为镍对碳化钨的溶解度较低，烧结过程中碳化钨颗粒之间的直接结合程度有所减弱。

铁作为粘结相材料，其成本明显低于钴和镍，具有经济性方面的吸引力。铁基硬质合金的研究和开发已有数十年历史，但在安全锤头领域的大规模应用相对有限。铁对碳化钨的润湿性不如钴和镍，且在烧结过程中容易出现碳化物晶粒的异常长大现象，导致材料组织粗化和力学性能下降。为了改善铁基硬质合金的性能，研究者通常采取添加少量合金元素的方式进行调节，如添加铬、钼等元素以抑制晶粒长大，或添加磷等元素以改善烧结活性。经过成分优化和工艺调整后，铁基硬质合金可以在一定程度上接近钴基合金的性能水平，但其稳定性和一致性仍有提升空间。

除单一金属粘结相外，钴-镍、钴-铁、镍-铁等复合粘结相体系也在研究和应用中有所涉及。复合粘结相的设计思路是通过不同金属组分的协同作用，在保持良好力学性能的同时改善特定方面的性能表现。例如，钴-镍复合粘结相可以在维持较高硬度和抗弯强度的基础上，提升材料的抗腐蚀性能；镍-铁复合粘结相则在控制成本的同时，通过镍的加入改善铁的润湿性。从实际应用情况来看，钴基粘结相仍占据主导地位，镍基和铁基粘结相体系在某些特定场景或成本敏感型产品中有所应用，但其总体市场份额相对有限。粘结相材料的选择需要在性能、成本、工艺稳定性等多重因素之间进行权衡，根据具体的使用要求做出判断。

2.4 硬质合金安全锤头的粘结相特性

粘结相的特性对硬质合金安全锤头的力学性能产生直接影响。钴、镍等粘结相金属属于韧性材料，与硬质相碳化物在力学性能上形成互补关系。正是这种互补关系的存在，使得硬质合金安全锤头能够在保持高硬度的同时，具备一定的韧性和抗冲击能力。

2.4.1 硬质合金安全锤头的韧性特性

韧性是硬质合金安全锤头材料体系中与抗断裂能力相关的力学性能指标。对于冲击类工具而言，韧性具有实际意义——锤头在锤击过程中承受的是瞬时冲击载荷，如果材料的韧性储备不足，硬质合金可能发生脆性断裂或崩裂，导致工具失效。硬质合金作为脆性材料的一种，其韧性水平普遍低于钢材，但通过合理设计粘结相的含量和分布，可以在一定程度上改善其韧性表现。

粘结相在硬质合金安全锤头的韧性贡献中扮演着重要角色。当材料承受外部载荷时，碳化钨颗粒承担主要的压应力，而钴粘结相则通过塑性变形吸收部分能量。这种能量吸收机制类似于金属材料中的位错运动和塑性流动过程。在微观层面上，当裂纹在碳化钨颗粒内部或颗粒界面处萌生后，扩展中的裂纹遇到钴粘结相区域时，由于钴具有良好的塑性，裂纹尖端会发生钝化，裂纹扩展所需的能量增加，从而延缓或阻止裂纹的继续扩展。这一过程通常被称为裂纹的“桥接”或“偏转”机制，是硬质合金韧性来源的主要微观解释。

钴含量对硬质合金安全锤头的韧性产生系统性影响。随着钴含量的增加，材料中的粘结相体积分数增大，裂纹桥接和偏转的路径长度增加，因此材料的断裂韧性呈现上升趋势。以 YG6 牌号为例，其钴含量约百分之六，断裂韧性相对有限；YG8 牌号钴含量约百分之八，断裂韧性有所提高；YG10X 牌号钴含量约百分之十，断裂韧性在钨钴系列合金中处于较高水平。这一关系表明，在硬质合金安全锤头的设计过程中，通过调整粘结相含量可以在硬度与韧性之间进行权衡：高硬度有利于保持尖端锐利，高韧性有利于抵抗冲击断裂，两者需要根据具体使用场景加以平衡。

碳化钨晶粒度同样对韧性产生影响。粗晶粒硬质合金中，碳化钨颗粒的尺寸较大，颗粒之间的钴粘结层厚度相对较小，但晶粒本身的断裂韧性较高，且粗晶粒在裂纹扩展过程中能够通过晶粒的拔出效应吸收更多能量。细晶粒硬质合金虽然硬度较高，但由于晶界总面积较大，晶界处的应力集中程度较高，裂纹更容易沿晶界扩展。因此，在要求较高韧性的使用场景中，粗晶粒或中等晶粒度的硬质合金牌号往往具有优势。YG8C 牌号采用粗晶结构设计，其钴含量约百分之八，断裂韧性可达到较高水平，适用于高频锤击或大冲击载荷的工作环境。

2.4.2 硬质合金安全锤头的抗冲击特性

抗冲击特性是硬质合金安全锤头材料体系中与瞬时动力载荷下材料响应行为相关的性能指标。与静态或准静态载荷条件下测得的韧性不同，抗冲击特性更关注材料在高速、高应变率条件下的力学行为。安全锤头的实际使用过程具有瞬时性特征，锤头尖端以较快的速度撞击玻璃表面，应变率较高，因此抗冲击特性对于评估硬质合金安全锤头在真实使用场景中的可靠性具有参考价值。

粘结相在提高硬质合金抗冲击性能方面发挥着作用。当高速冲击载荷作用于锤头尖端时，应力波在材料内部传播，碳化钨颗粒和钴粘结相的动态力学响应存在差异。钴粘结相在高速变形条件下能够保持一定的塑性流动能力，通过塑性功的耗散吸收部分冲击能量。同时，钴粘结相的存在有助于缓解碳化钨颗粒之间的应力集中，避免局部应力超过颗粒的断裂强度。

版权与免责声明

影响硬质合金安全锤头抗冲击特性的因素与影响韧性的因素存在重叠但又有区别。粘结相含量是首要因素，较高的钴含量有利于提高材料的抗冲击性能，因为更多的塑性相可以吸收更多的冲击能量。但是，当钴含量超过一定范围后，材料的硬度下降明显，锤头尖端在冲击过程中可能发生过多的塑性变形，反而影响破玻效果。因此，硬质合金安全锤头的抗冲击性能提升存在一个优化区间，钴含量在百分之八至百分之十之间通常被认为是兼顾硬度和抗冲击性能的范围。碳化钨晶粒度的影响表现为：粗晶粒硬质合金在抗冲击性能方面具有一定优势，因为粗大的碳化钨颗粒自身的断裂韧性较高，不易在冲击载荷下发生穿晶断裂。

2.5 硬质合金安全锤头材料匹配性与复合协同机制

硬质合金安全锤头的性能表现并非硬质相和粘结相各自性能的简单叠加，而是两种组分在微观尺度上协同作用的结果。材料匹配性的优劣决定了复合材料能否充分发挥各组分的优势，而复合协同机制则解释了这种材料体系“整体性能优于组分性能线性之和”的内在原因。以下分别阐述硬质相与粘结相的适配机理，以及复合材料的整体协同性能优势。

2.5.1 硬质相与粘结相适配机理

硬质相与粘结相的适配性是硬质合金安全锤头材料设计中需要关注的问题。适配性涉及物理性能、化学性能和力学性能三个层面，只有当硬质相和粘结相在这三个方面形成良好的匹配关系时，复合材料的综合性能才能达到预期水平。

在物理性能适配方面，硬质相和粘结相的热膨胀系数差异是影响材料内应力和烧结质量的因素。碳化钨的线膨胀系数约为 $4.5 \times 10^{-6}/K$ 至 $5.5 \times 10^{-6}/K$ （在室温至 $1000^{\circ}C$ 范围内），钴的线膨胀系数约为 $13.0 \times 10^{-6}/K$ 左右。两者之间的差异意味着在硬质合金从烧结温度冷却至室温的过程中，钴粘结相比碳化钨收缩更多，这会在碳化钨颗粒之间产生残余压应力。适当的残余压应力对硬质合金的强度是有益的，因为它可以抵消部分外加载荷产生的拉应力。如果膨胀系数差异过小，则无法形成有益的残余应力状态；如果差异过大，则可能导致冷却过程中产生微裂纹。碳化钨与钴之间的膨胀系数差异处于适宜的范围，这也是钴能够成为主流粘结相的重要原因之一。

在化学性能适配方面，硬质相与粘结相之间的润湿性、溶解度以及界面反应行为构成了适配性的化学基础。钴对碳化钨具有良好的润湿性，润湿角在烧结温度下可达到较低水平，这有利于液态钴在碳化钨颗粒之间的均匀铺展和孔隙填充。钴对碳化钨具有适中的溶解度，在烧结温度下能够溶解少量碳化钨，冷却过程中再析出形成 WC-Co 共晶组织，增强碳化钨颗粒之间的直接结合。如果粘结相对硬质相的溶解度过高，会导致碳化钨颗粒过度溶解和再析出，引起晶粒异常长大；如果溶解度过低，则碳化钨颗粒之间的直接结合程度不足，材料的强度和韧性均会下降。钴与碳化钨之间的溶解度处于适宜的区间，这也是钴基硬质合金能够实现较高致密度和力学性能的原因。

在力学性能适配方面，硬质相的高硬度和粘结相的良好韧性形成互补关系。碳化钨颗粒承担抵抗外部压入和磨损的主要载荷，而钴粘结相则通过塑性变形吸收冲击能量并延缓裂纹扩展。这种硬-韧配合的机理要求粘结相具有足够的塑性和强度，能够在服役条件下保持对硬

质相颗粒的有效支撑。钴的屈服强度和抗拉强度适中，塑性变形能力较好，能够在较大应变范围内保持对碳化钨颗粒的约束。如果将粘结相更换为强度过高而塑性不足的材料，虽然材料的整体强度可能提高，但裂纹扩展的阻力会下降，反而导致韧性降低。因此，硬质相与粘结相的力学性能适配是一个寻求平衡的过程，而非简单地追求某一性能指标的极端化。

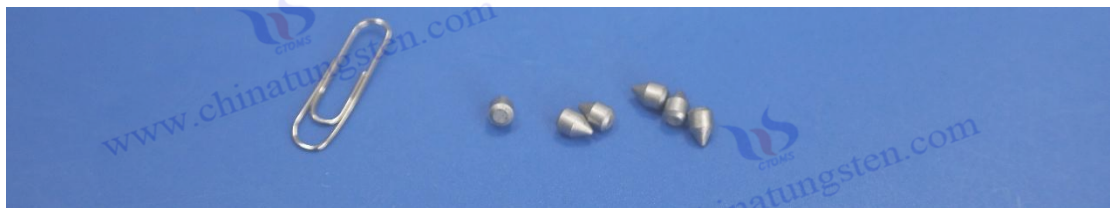
2.5.2 复合材料整体协同性能优势

硬质合金安全锤头的整体协同性能优势体现在其复合材料结构所带来的“高硬度与适当韧性并存”的特性上。这一特性使得硬质合金安全锤头能够胜任传统钢材锤头难以完成的任务——在以高硬度为前提的条件下承受一定的冲击载荷。这种协同性能优势源自硬质相与粘结相在微观尺度上的相互作用，可以从抗变形能力、抗断裂能力和抗磨损能力三个方面加以说明。

在抗变形能力方面，硬质合金安全锤头的整体硬度由碳化钨骨架决定，而骨架的刚性和稳定性依赖于钴粘结相对碳化钨颗粒的约束作用。在没有钴粘结相的情况下，碳化钨颗粒之间仅靠机械嵌合或极少量的烧结颈连接，材料整体的抗压强度很低，在受力时颗粒之间容易发生相对滑移。钴粘结相的存在将离散的碳化钨颗粒连接成一个连续的整体，使外部载荷能够通过钴粘结层在碳化钨颗粒之间传递，从而发挥碳化钨颗粒的高硬度特性。这种“硬质相承担载荷、粘结相传力”的协同机制，使得硬质合金的宏观硬度接近碳化钨颗粒的硬度水平，而非钴的硬度水平。

在抗断裂能力方面，硬质合金安全锤头的断裂韧性显著高于纯碳化钨材料。纯碳化钨的断裂韧性很低，在冲击载荷下几乎表现为完全的脆性断裂。当引入钴粘结相后，材料的断裂模式发生变化：裂纹扩展路径不再局限于穿晶断裂，而是更多地转向沿晶断裂和穿越钴粘结相的混合模式。钴粘结相在裂纹扩展过程中发生塑性变形，消耗裂纹扩展的驱动力，这种能量耗散机制使得材料抵抗裂纹扩展的能力增强。统计数据显示，钴含量约为百分之八的YG8硬质合金，其断裂韧性可以达到纯碳化钨的数倍之多。这一提升幅度反映了复合材料协同效应的价值所在——以相对有限的钴含量增量，换取了显著的材料韧性改善。

在抗磨损能力方面，硬质合金安全锤头的耐磨性优于纯碳化钨材料和纯钴材料的加权平均值。原因在于磨损过程中，碳化钨颗粒承担抵抗磨损的主要作用，而钴粘结相的存在防止了碳化钨颗粒的过早脱落。当锤头尖端与玻璃表面发生摩擦时，碳化钨颗粒突出于钴粘结相之外，形成所谓的“阴影效应”或“支撑效应”——钴粘结相被优先磨损后，碳化钨颗粒仍然突立于材料表面，继续发挥抵抗磨损的功能。这种自适应的磨损表面演化机制，使得硬质合金安全锤头能够在较长的使用周期内保持稳定的工作状态。如果仅从组分性能的线性叠加来预测硬质合金的耐磨性，往往会低估实际材料表现出的耐磨能力。



中钨智造硬质合金安全锤头

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！

采购信息

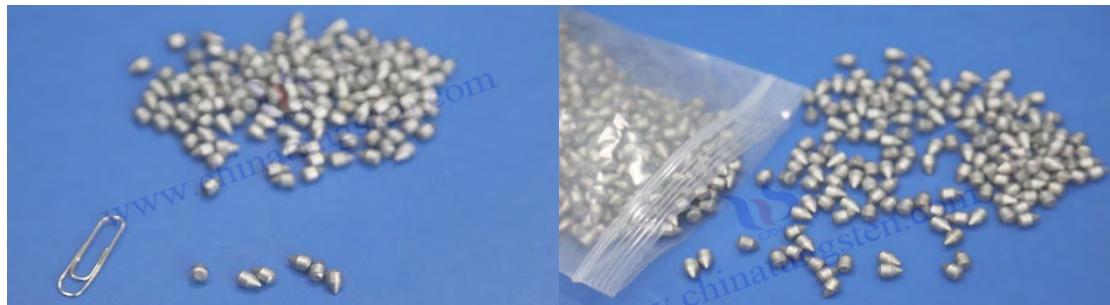
如有关于硬质合金安全锤头的生产需求，请联系制造商：中钨智造（厦门）科技有限公司

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



第三章 硬质合金安全锤头的结构形态

3.1 硬质合金安全锤头的整体式结构

整体式硬质合金安全锤头是指整个锤头构件由单一的硬质合金材料通过粉末冶金工艺一体成型的产品形态。在这种结构设计中，从锤头的尖端到装配段均采用相同材质、相同牌号的硬质合金，不存在材料界面或连接部位。整体式结构的优势在于材质均匀、结构简洁、无连接弱区，但也面临着材料成本较高和韧性调节空间有限的挑战。一个完整的整体式硬质合金安全锤头通常包含两个功能区域：承担破玻任务的尖锥作业端和用于与锤柄连接的装配段。

3.1.1 硬质合金安全锤头的尖锥作业端

尖锥作业端是整体式硬质合金安全锤头中直接与玻璃等脆性材料接触并执行破碎功能的核心区域。其几何形态的设计直接关系到锤头与被加工材料之间的接触应力分布，进而影响破玻效率和锤头自身的磨损状况。尖锥作业端通常采用锥形几何轮廓，锥角的取值一般在六十度至九十度之间。这一锥角范围的选取经过了长期工程实践的验证：锥角过小时，虽然应力集中程度较高，但尖端过于尖锐，在冲击过程中容易发生崩缺；锥角过大时，锤头与玻璃的接触面积增大，单位面积压力降低，可能影响应力集中效果，需要多次锤击才能触发玻璃的脆性破裂机制。因此，锥角的选择需要在应力集中效应与尖端结构强度之间寻求协调。

尖锥作业端的尖部处理是结构设计中的细节之处。在实际产品中，尖端并非理想的几何点，而是具有特定圆弧半径的球面或圆锥台面。尖部圆弧半径通常控制在 R0.5 毫米至 R1.5 毫米范围内。这一圆弧的存在具有两方面作用：一方面，它可以避免尖端在使用前或运输过程中因意外磕碰而产生微观缺陷；另一方面，适度的圆弧半径有助于在冲击过程中分散瞬间峰值应力，降低尖端发生崩裂的风险。如果圆弧半径过小，虽然初始破玻效果可能较好，但尖端对偏斜冲击的耐受能力下降；如果圆弧半径过大，则锤头与玻璃的接触趋于面接触，应力集中效果减弱。因此，圆弧半径的精确认控制制造工艺的精度提出了要求。

尖锥作业端的表面质量同样影响着使用性能。烧结态硬质合金表面存在一定的粗糙度，部分产品会对其作业端进行进一步加工处理，以获得更光滑的表面。表面粗糙度的降低有助于减少锤头与玻璃接触时的摩擦阻力，使冲击能量更有效地转化为玻璃内部的张应力，而不是消耗在摩擦过程中。同时，光滑的表面也有利于减少锤头表面的微裂纹萌生源，对提高抗冲击性能具有积极意义。从制造工艺的角度来看，尖锥作业端的几何精度控制主要依赖压制模具的设计精度和烧结过程中的尺寸稳定性控制。由于硬质合金在烧结过程中存在一定的收缩行为，且收缩率在不同方向上可能存在差异，因此模具设计时需要预留烧结收缩余量，并在试制过程中进行必要的修正。

3.1.2 硬质合金安全锤头的装配段

装配段是整体式硬质合金安全锤头中用于与锤柄或锤体进行连接固定的功能区域。与尖锥作业端追求尖锐和应力集中的设计思路不同，装配段的设计侧重于连接的可靠性、装配的便利性以及使用过程中的防松脱性能。装配段的几何形态通常采用圆柱状、棱柱状或带有特定定

位特征的异形截面，以适应不同的锤柄结构形式和固定方式。

圆柱状装配段是较为常见的设计形式，其直径与尖锥作业端的底部直径相衔接或略大，形成自然的过渡区域。圆柱形装配段的优势在于加工精度容易控制，与锤柄上相应的圆柱孔进行过盈配合或间隙配合后，通过胶粘剂、紧定螺钉或卡簧等方式进行固定。为了增强装配段与锤柄之间的抗旋转和抗拔出能力，部分产品在圆柱面上设置了滚花、环形槽或轴向平面等防转结构。这些结构的引入增加了装配界面的摩擦力和机械锁合力，降低了在使用过程中锤头相对于锤柄发生转动或松脱的可能性。滚花结构通过冷挤压工艺在圆柱表面形成网格状或直线状的微观凹凸纹理，在与锤柄配合时产生较大的静摩擦力。

棱柱状装配段（如四方柱、六方柱截面）是另一种常见的装配结构形式。棱柱结构的优势在于通过非圆截面直接传递扭矩，无需依赖摩擦或胶粘剂即可实现防转功能。这种设计特别适用于需要承受较大扭转载荷或频繁更换锤头的使用场景。当锤头装入锤柄上相应形状的安装孔后，棱柱的各平面与锤柄安装孔的内壁形成面接触，在锤击过程中无论受力方向如何变化，锤头与锤柄之间均不会发生相对转动。棱柱状装配段的棱边需要进行倒角或圆角处理，以消除应力集中并便于装配操作。

装配段的长度与直径的比例也是结构设计中的考量因素。一般而言，装配段的长度应足以保证锤头在锤柄中获得足够的嵌入深度，通常嵌入深度与装配段直径的比值在 1.5 至 3.0 之间。嵌入深度过浅时，锤头在锤柄中的固定不够稳固，在锤击过程中可能发生松动或拔出；嵌入深度过深时，锤头的总长度增加，材料用量上升，且对于硬质合金材料而言，过长的装配段意味着更高的材料成本。因此，装配段的尺寸设计需要在连接可靠性、材料经济性和整体重量之间进行权衡。在整体式结构中，由于整个锤头均采用硬质合金材料，装配段的材料成本不容忽视，部分产品会通过适当缩短装配段长度或采用较小的装配段直径来控制成本。

3.2 硬质合金安全锤头的复合式结构

复合式硬质合金安全锤头采用“基体加作业端”的组合结构设计，是目前应用较为广泛的产品类型。与整体式结构不同，复合式结构将锤头分为两个材质不同的部分：基体部分选用韧性较好的金属材料（以合金钢为主），作业端选用高硬度的硬质合金材料，通过钎焊、机械夹固或镶嵌铸造等方式将两者牢固连接。这种结构设计的核心理念是实现材料性能的分区配置——基体承受冲击载荷并与锤柄连接，作业端专注于提供破玻所需的高硬度和耐磨性。

3.2.1 硬质合金安全锤头的基体端

基体端是复合式硬质合金安全锤头中承担结构支撑和载荷传递功能的主体部分。基体通常选用合金钢材料，如 40Cr、45 号钢、42CrMo 等中碳钢或中碳合金钢，这些材料经过适当的热处理后，能够在抗拉强度、屈服强度和冲击韧性之间形成较好的匹配。基体端的设计需要满足三个方面的要求：一是具有足够的强度和韧性，以承受锤击过程中产生的冲击载荷而不发生塑性变形或断裂；二是能够与硬质合金作业端形成可靠连接，保证在使用过程中作业端不会脱落；三是具备与锤柄装配的接口，便于安装和更换。

从几何形态来看，复合式基体端通常呈现为一个带有安装孔的杆状或块状构件。在锤头的前端（即与玻璃接触的一端），基体上设置有一个凹坑、凸台或特定形状的安装座，用于容纳和固定硬质合金作业端。安装座的形式根据连接方式的不同而有所区别：采用钎焊连接时，安装座通常为盲孔或通孔结构，硬质合金棒料或块料嵌入其中，钎料填充于间隙之中；采用机械夹固方式时，安装座上可能设置有螺纹孔或锥面配合结构，通过压板和螺栓将硬质合金作业端紧固于基体上。安装座的尺寸精度和表面质量对连接质量具有影响，粗糙度过高或尺寸偏差过大均可能导致钎焊缺陷或夹固不牢。

基体端的热处理状态是影响其力学性能的因素。合金钢基体通常在经过调质处理后使用，调质处理包括淬火和高温回火两个工序，可以获得回火索氏体组织，使材料兼具较高的强度和良好的韧性。基体端不需要达到硬质合金那样的高硬度，过高的硬度反而可能降低材料的韧性储备，增加在冲击载荷下发生脆断的风险。因此，基体端的设计硬度通常在 HRC30 至 45 之间，这一硬度范围既能保证基体具有足够的抗变形能力，又保留了充分的塑性变形空间，以吸收和缓冲冲击能量。在一些对耐磨性有附加要求的场合，如基体端也参与部分锤击作业，可对其表面进行局部硬化处理，但这种情况在安全锤头产品中相对少见。

基体端与锤柄的连接方式也是复合式结构设计中的一个环节。多数复合式安全锤的设计将基体端直接作为锤体的组成部分，即基体端本身延伸为锤柄或与锤柄连为一体。在这种设计方案中，基体端兼具锤头和锤柄的双重功能，结构更为简化。另一种方案是基体端上设有内螺纹或外螺纹，通过与锤柄上的配合螺纹进行连接，这种可拆卸设计便于锤头磨损后的单独更换，但螺纹连接在长期使用中可能存在松动风险，需要配合防松措施。无论采用何种连接方式，基体端在传递锤击力的过程中需要保证力流的顺畅性，避免因截面突变或几何尖角导致应力集中。

3.2.2 硬质合金安全锤头的作业端

作业端是复合式硬质合金安全锤头中直接执行破玻功能的核心部件，通常采用硬质合金棒料、块料或异形件，通过钎焊、镶嵌或机械夹固的方式固定在基体端上。与整体式锤头的作业端相比，复合式结构的作业端体积较小、材料用量较少，因此可以在保证破玻性能的前提下控制材料成本。硬质合金作业端的材质牌号选择与整体式锤头类似，YG6、YG8 等牌号均有应用，具体选择取决于使用场景对硬度、韧性和耐磨性的侧重。

硬质合金作业端的几何形态设计具有一定的灵活性。常见的设计形式包括圆柱锥尖形、圆锥形和多棱锥形等。圆柱锥尖形作业端的主体为圆柱状，前端加工成圆锥形尖头，这种形式便于棒料的批量生产和后续的锥面加工，钎焊时圆柱面与基体安装孔之间的配合精度容易控制。圆锥形作业端整体呈圆锥状，锥度较为平缓，这种形式的应力分布较为均匀，适合承受较大冲击载荷的场合。多棱锥形作业端具有多个切削刃口，在锤击过程中即使某一棱边发生磨损，其他棱边仍可发挥作用，但这种形式的加工难度较高，应用相对较少。无论采用何种几何形态，作业端的尖部通常也需要进行圆弧处理，圆弧半径的控制原则与整体式结构相似。

作业端与基体端的连接质量是复合式结构的技术要点。钎焊是应用较为广泛的连接方式，钎料通常采用铜基或银基钎料，钎焊温度在 700℃ 至 1000℃ 之间。钎焊工艺需要控制加热温

度、保温时间和冷却速度三个参数：加热温度过低时钎料流动性不足，无法充分填充间隙；加热温度过高时可能引起硬质合金的氧化或基体材料的过烧；冷却速度过快时钎焊接头中可能产生较大的热应力，降低连接强度。为了获得良好的钎焊质量，通常需要对基体安装孔和硬质合金作业端进行表面预处理，去除油污和氧化层，并在钎焊过程中施加适当的压力或采用保护气氛。

机械夹固式结构是另一种连接方式，通过底垫、压板和紧固件将硬质合金作业端固定在基体端上。这种结构不依赖钎焊连接，避免了高温对硬质合金和基体材料性能的潜在影响，同时具有可更换性优势——当作业端磨损后，无需更换整个锤体，仅需更换硬质合金尖端即可恢复工具的使用性能。机械夹固式结构中，硬质合金作业端通常设计为具有特定定位结构的可换件，底垫和压板采用普通铸钢材料，通过斜面配合和螺栓紧固的方式实现硬质合金作业端的固定。这种结构设计的难点在于夹固可靠性与更换便利性之间的平衡，需要保证在反复冲击条件下夹固力不衰减，同时更换操作应尽量简便。镶嵌铸造法则是在基体浇铸过程中将硬质合金块直接镶嵌在指定位置，使硬质合金与基体形成冶金结合或机械互锁，这种方式的连接强度较高，但对铸造工艺的控制要求较严格。

3.3 硬质合金安全锤头的结构分析

结构分析是对硬质合金安全锤头设计合理性和使用可靠性的系统性评估。不同于前文对结构形态的分类描述，结构分析侧重于考察各类结构在实际使用条件下所表现出的性能特征、薄弱环节以及改进方向。装配精度、连接强度和寿命评估是结构分析的三个重要维度，它们分别从制造过程、连接质量和长期使用表现等角度反映了结构设计的合理程度。

3.3.1 硬质合金安全锤头的装配精度控制

装配精度控制是硬质合金安全锤头制造过程中的重要技术环节。无论是整体式结构还是复合式结构，锤头与锤柄之间、硬质合金作业端与基体之间的装配精度都直接影响产品的使用性能和安全性。装配精度主要涉及尺寸公差、形位公差以及配合表面的微观质量三个方面，每一个方面都需要在设计和制造阶段给予关注。

在整体式硬质合金安全锤头的装配中，装配段与锤柄安装孔之间的配合精度是控制重点。整体式锤头的装配段通常采用圆柱面设计，与锤柄上的圆柱孔形成过盈配合或过渡配合。过盈量的选择需要结合锤头的使用受力特点和锤柄材料的弹性模量进行综合评估。当过盈量过大时，装配过程中可能因压入力过高而导致锤头装配段产生裂纹，或者在锤柄安装孔内壁上形成过大的环向拉应力，超过锤柄材料的屈服极限后可能引起安装孔的塑性变形甚至开裂。当过盈量过小时，配合面之间的摩擦力不足以抵抗锤击过程中产生的轴向拔出力 and 周向扭矩，锤头可能在使用中发生松动或脱落。因此，设计阶段需要通过计算或试验确定配合过盈量的参考范围，并在批量生产中通过统计过程控制方法对装配段的尺寸一致性进行监控。

形位公差控制涉及装配段的圆柱度、圆度以及装配段轴线与锤头作业端轴线的同轴度要求。装配段圆柱度的偏差会导致实际接触面积小于理论接触面积，在过盈配合条件下可能产生局部应力集中，增加锤头开裂的风险。同轴度偏差则会引起锤头作业端轴线与锤柄轴线之间的

版权与免责声明

夹角，当使用者握持锤柄进行锤击时，实际冲击方向与锤头轴线方向存在夹角，锤头尖端可能以偏斜角度撞击玻璃表面，这不仅降低了有效冲击能量的利用率，还使锤头承受弯曲力矩，增加了尖端崩裂的可能性。为了控制形位公差，模具设计和压制工艺需要保持较高的精度水平，烧结后可能还需要进行必要的精加工处理。

在复合式硬质合金安全锤头的装配中，钎焊前的装配间隙控制直接关系到钎焊质量。钎焊接头的间隙通常控制在百分之二至百分之五的范围内，间隙过小时钎料难以通过毛细作用充分填充整个接合面，形成未焊透缺陷；间隙过大时钎料填充后形成的钎缝过厚，钎料本身的强度通常低于母材，过厚的钎缝成为连接区域的薄弱环节。装配间隙的均匀性同样值得关注，局部间隙过大会导致该区域钎料堆积，局部间隙过小则可能导致该区域完全无钎料。为了获得均匀的装配间隙，基体安装孔和硬质合金作业端的加工精度需要控制在 IT7 至 IT8 级范围内。

3.3.2 硬质合金安全锤头的钎焊连接强度

钎焊连接强度是复合式硬质合金安全锤头结构可靠性中的关键指标。钎焊接头作为硬质合金作业端与钢基体之间的连接界面，在使用过程中需要承受锤击产生的冲击载荷，其强度表现直接决定了锤头是否会因连接失效而脱落。影响钎焊连接强度的因素包括钎料选择、钎焊工艺参数以及接头形式设计等方面。

钎料的选择对连接强度产生影响。银基钎料和铜基钎料是硬质合金钎焊中应用较广的两类钎料。银基钎料（如 BAg-8、BAg4 等）的熔点较低，通常在 600℃ 至 760℃ 之间，较低的钎焊温度有利于减少高温对硬质合金和钢基体性能的不利影响，同时银基钎料对硬质合金和钢均具有良好的润湿性，能够形成致密的钎缝组织。银基钎料的接头抗剪强度可达到 180 兆帕至 220 兆帕，在冲击载荷下表现出较好的韧性。铜基钎料（如纯铜、铜-锰-钴系合金等）的熔点较高，通常在 1000℃ 以上，钎焊温度较高可能导致硬质合金表面发生氧化或脱碳，影响连接质量。铜基钎料的成本低于银基钎料，但其对钎焊工艺控制的要求更为严格，通常需要在保护气氛或真空气氛中进行钎焊以防止氧化。

钎焊工艺参数对连接强度具有影响。加热温度是首要的工艺参数，温度过低时钎料无法完全熔化或流动性不足，无法充分填充钎缝间隙；温度过高时可能引起硬质合金粘结相的过烧或钢基体的晶粒粗化，降低材料的力学性能。保温时间需要根据钎焊件的尺寸和热容量进行设定，保温时间不足会导致钎料与母材之间的扩散反应不充分，保温时间过长则可能促进脆性金属间化合物的形成，削弱接头的韧性和强度。冷却速度的控制同样值得重视，钎焊完成后冷却速度过快会在接头上产生较大的残余热应力，这是硬质合金与钢的热膨胀系数差异所决定的，残余热应力的存在可能成为裂纹萌生的起点。为了缓解残余热应力，一些工艺中在钎焊后采取缓冷措施或进行去应力退火处理。

接头形式设计对连接强度的发挥具有影响。搭接接头是硬质合金钎焊中常用的接头形式，硬质合金棒料插入钢基体的盲孔中，钎料填充于圆柱面之间的环形间隙。这种接头形式的承载能力与插入深度正相关，插入深度越大，钎焊面积越大，连接强度越高。但插入深度受限于锤头的整体长度设计和材料成本考量，通常控制在硬质合金作业端直径的 1.5 至 2.5 倍范

版权与免责声明

围内。为了避免应力集中，插入端的底部通常设计为平面或锥面，减少尖角处的应力集中程度。部分设计中在硬质合金杆上设置环形槽或螺纹，以增加机械互锁作用，这种设计方案可以在钎焊基础上提供额外的连接可靠性保障。此外，钎焊接头的质量检测通常采用超声无损检测方法，对钎缝内部的气孔、未焊透等缺陷进行筛查，确保出厂产品的连接质量满足使用要求。

3.3.3 硬质合金安全锤头的整体寿命评估

整体寿命评估是对硬质合金安全锤头在预期使用周期内保持功能能力的综合判断。与单次使用的应急安全锤不同，工业加工领域中的硬质合金安全锤头需要具备一定的使用寿命，而公共交通工具中的应急安全锤虽然使用频率较低，但也需要考虑材料老化、环境腐蚀等因素对长期存放后功能可靠性的影响。寿命评估通常涉及耐磨寿命、疲劳寿命和储存寿命三个维度，每个维度对应的失效模式和评估方法存在差异。

耐磨寿命的评估主要针对工业加工型硬质合金安全锤头。在这类应用中，锤头反复冲击岩石、混凝土或玻璃等硬脆材料，工作端的磨损逐渐累积，当磨损量达到一定程度后，锤头的破破效率或破碎能力下降到无法满足使用要求的水平。耐磨寿命的评估方法包括实验室加速磨损试验和现场使用跟踪两种方式。实验室加速磨损试验通过模拟实际工况中的冲击频率、冲击能量和被加工材料特性，在较短时间内获得锤头的磨损曲线，从而推断其在正常使用条件下的预期寿命。现场使用跟踪则需要在真实生产环境中记录锤头的实际使用时长或冲击次数，直至其性能下降到不可接受的程度。

疲劳寿命的评估关注锤头在周期性冲击载荷作用下的结构完整性。虽然硬质合金材料通常被认为具有一定的脆性，缺乏明显的疲劳极限概念，但在低于静态断裂强度的循环载荷作用下，材料内部仍然可能发生损伤的累积，最终导致疲劳断裂。对于复合式硬质合金安全锤头，钎焊接头是疲劳寿命的薄弱环节，因为钎料和母材的力学性能差异导致应力集中，循环载荷作用下接头区域容易萌生疲劳裂纹。疲劳寿命评估通常采用成组法进行，即在同一应力水平下对多件试样进行疲劳试验，获取疲劳寿命的分布特征。由于冲击载荷的频率较低且每次冲击的能量差异较大，硬质合金安全锤头的疲劳行为更接近低周疲劳范畴，即在较少的循环次数（通常在 10^3 至 10^5 次之间）内即可能发生破坏。评估结果用于指导结构优化设计，例如通过增大钎焊面积、优化接头几何过渡等方式降低局部应力集中程度。

储存寿命的评估主要针对应急型硬质合金安全锤头。这类产品在公共交通工具上的实际使用频率较低，多数时间处于待用状态，但要求在紧急时刻能够发挥预期功能。储存寿命评估关注的是长期存放过程中材料性能的退化情况，包括硬质合金表面的氧化、钎焊接头的时效弱化、塑料或橡胶锤柄的老化等。硬质合金材料在常规环境下的化学稳定性较好，但在高湿度或盐雾环境下，钴粘结相可能发生一定程度的腐蚀，导致表面硬质相颗粒的脱落。

3.4 硬质合金安全锤头的结构缺陷类型与失效形式

结构缺陷和失效形式的研究对于改进产品设计、优化制造工艺以及制定使用维护规范具有重要意义。硬质合金安全锤头在制造过程中可能产生多种类型的加工缺陷，这些缺陷的存在降

低了锤头的结构完整性；在实际使用过程中，冲击载荷作用下可能发生不同形式的失效。理解缺陷的形成原因和失效的物理机理，有助于在生产和使用环节采取针对性措施，提高产品的整体可靠性。

3.4.1 常见结构加工缺陷

硬质合金安全锤头的加工缺陷主要产生于粉末冶金成型、烧结、钎焊以及后续精加工等环节。这些缺陷的存在形态、分布特征及其对产品性能的影响程度各不相同，按照缺陷产生的工序阶段可以将其划分为烧结体缺陷、钎焊缺陷和精加工缺陷三个类别。

烧结体缺陷主要出现在整体式锤头或复合式锤头的硬质合金作业端。压制裂纹是较为常见的一类缺陷，在粉末压制成型过程中，如果模具设计不合理或压制压力分布不均匀，压坯内部可能产生微裂纹。这些裂纹在烧结过程中可能部分愈合，但残留的微裂纹仍然是潜在的薄弱区域。烧结收缩裂纹是另一类烧结体缺陷，当烧结过程中的收缩行为受到模具或支撑体的约束时，可能在压坯内部产生拉应力，当拉应力超过坯体的强度时即形成裂纹。这类裂纹通常出现在锤头的截面变化处，如尖锥作业端与装配段的过渡区域。此外，烧结过程中的脱碳或渗碳也可能导致硬质合金表面层的相组成发生变化，形成脱碳层或 η 相层，这些表层的力学性能与基体存在差异，在使用过程中可能提前发生剥落。

钎焊缺陷是复合式硬质合金安全锤头特有的加工缺陷类型。钎焊未熔合是指钎料未能与基体或硬质合金表面形成冶金结合的现象，表现为钎缝中存在未被钎料润湿的区域。未熔合缺陷的存在大幅降低了连接区域的有效承载面积，在使用过程中该区域容易成为裂纹源。气孔是钎缝中的另一类常见缺陷，通常由于钎料中的低沸点组分挥发、母材表面吸附气体的释放或保护气氛控制不当所致。气孔作为应力集中点，在冲击载荷作用下可能诱发裂纹萌生。钎缝裂纹通常出现在钎焊后的冷却过程中，由于硬质合金与钢基体热膨胀系数的差异，冷却时产生的热应力可能在钎缝中或钎缝与母材的界面处引发裂纹。这类裂纹往往沿钎缝方向扩展，严重时可能贯穿整个连接界面，导致硬质合金作业端完全脱落。

精加工缺陷主要出现在锤头的机械加工环节。整体式硬质合金锤头的尖锥作业端有时需要进行磨削加工以达到设计要求的几何精度和表面粗糙度。磨削过程中如果冷却不充分或磨削参数选择不当，可能在加工表面产生磨削烧伤或微裂纹。磨削烧伤本质上是磨削热导致的表面组织变化，可能伴随表面硬度的下降或残余应力的改变。磨削微裂纹的形成与磨削热和磨削力的综合作用有关，这些微裂纹尺寸通常在微米量级，但在后续使用过程中可能扩展为宏观裂纹。对于复合式锤头中钢基体的加工，如安装孔的镗削、螺纹的攻丝等，尺寸偏差或表面质量缺陷同样会影响装配精度和连接质量。

3.4.2 冲击载荷下结构失效机理

冲击载荷下硬质合金安全锤头的结构失效机理涉及材料响应、应力分布和裂纹演化等多个物理过程。与静态载荷不同，冲击载荷具有高应变率和瞬时性的特点，材料在这种条件下的力学行为表现出与准静态条件下不同的特征。

硬质合金作业端的崩缺是常见的失效形式。崩缺表现为锤头尖端或边缘部位的小块材料脱落，形成不规则的缺口。崩缺的机理可以从应力波传播的角度加以理解：当锤头以较高速度撞击玻璃表面时，接触区域产生压缩应力波，该应力波向锤头内部传播，在遇到自由表面或截面变化处时发生反射，形成拉伸应力波。硬质合金材料的抗压强度显著高于抗拉强度，因此反射拉伸波可能导致局部区域的拉应力超过材料的抗拉强度，从而引发断裂。崩缺的严重程度与冲击速度、锤头的几何形状以及材料的内在缺陷分布有关。尖端的圆弧半径过小或存在微裂纹等缺陷时，崩缺更容易发生且损失的材料体积更大。在复合式结构中，崩缺还可能发生在钎焊接头附近的硬质合金边缘，这是由于钎焊残余应力和冲击载荷的叠加效应所致。

钎焊接头脱焊是复合式硬质合金安全锤头特有的失效形式。脱焊是指硬质合金作业端与钢基体之间的钎焊接头发生分离，导致作业端完全脱落或部分脱离。脱焊的机理可以归结为钎焊接头在循环冲击载荷作用下的疲劳破坏。每一次锤击都会在钎缝中产生应力脉冲，虽然单次应力水平可能低于钎料的静态强度，但多次循环加载后，钎料内部或界面处的微缺陷会逐渐累积损伤，最终导致裂纹萌生和扩展。当裂纹扩展到临界尺寸时，剩余的有效连接面积不足以承载冲击载荷，即发生瞬时脱焊。钎焊接头中的气孔、未熔合区域等初始缺陷会加速这一过程，因为这些缺陷本身就是应力集中的位置，同时减少了有效承载面积。脱焊的发生还受到冲击方向的影响，偏斜冲击产生的剪切分量对钎焊接头的破坏作用比垂直冲击更为明显。

整体式锤头的整体断裂是较为严重的失效形式，表现为锤头沿某一截面完全断裂为两个或多个部分。这种失效在正常使用条件下较少发生，但在存在较严重加工缺陷或遭遇异常大冲击载荷时可能出现。整体断裂的裂纹通常起源于锤头表面的加工刀痕、磨削微裂纹或烧结体内部的原始裂纹，在冲击载荷作用下，这些初始缺陷作为应力集中点，促使裂纹以穿晶或沿晶的方式扩展。由于硬质合金材料的断裂韧性相对有限，一旦裂纹形成并达到临界尺寸，断裂过程的扩展速度较快，表现为脆性断裂特征。断口形貌通常呈现出平坦的放射状区域，部分区域可能观察到碳化钨颗粒的解理断裂特征。在复合式结构中，钢基体的整体断裂也有发生，但钢材料的韧性较好，断裂前通常会出现明显的塑性变形，表现为弯曲或颈缩等宏观特征，这在一定程度上为使用者的观察判断提供了预警信号。通过对失效样品的断口分析和痕迹检查，可以追溯失效的具体原因，为产品改进提供依据。



中钨智造硬质合金安全锤头

版权与免责声明

第四章 硬质合金安全锤头结合机制与成型工艺

4.1 硬质合金安全锤头的结合机制

硬质合金安全锤头的制备涉及两种不同性质的结合机制与成型工艺。一种是在硬质合金材料内部发生的粉末冶金结合，即碳化钨颗粒与钴等粘结相金属通过高温烧结形成致密的复合材料；另一种是在硬质合金作业端与钢基体之间发生的钎焊结合，即通过熔化钎料将两种异质材料连接为一体。这两种结合机制在本质、条件和评价标准上存在差异，但又共同决定了最终产品的性能表现。

4.1.1 粉末冶金结合的硬质合金安全锤头

粉末冶金结合是硬质合金安全锤头材料内部硬质相与粘结相之间的结合机制。这种结合发生在硬质合金的烧结过程中，其本质是在高温条件下通过液相烧结实现碳化钨颗粒与钴粘结相之间的冶金结合。粉末冶金结合所形成的组织结构赋予了硬质合金独特的性能组合——高硬度来源于碳化钨颗粒的骨架结构，适当的韧性来源于钴粘结相的塑性变形能力。

粉末冶金结合的过程可以从烧结温度下的物理化学变化加以描述。当硬质合金压坯被加热到钴熔点以上的温度时，钴转变为液相，液相钴在毛细管力的驱动下在碳化钨颗粒之间的空隙中流动。钴对碳化钨具有良好的润湿性，液态钴能够较为充分地包覆碳化钨颗粒的表面，形成连续分布的粘结相。与此同时，部分碳化钨溶解于液相钴中，达到饱和状态。在随后的冷却过程中，溶解的碳化钨从液相中析出，并附着在原有的碳化钨颗粒表面，这一溶解-再析出过程促进了碳化钨颗粒之间的直接接触和晶界形成，最终构成刚性的碳化钨骨架。钴粘结相凝固后将碳化钨颗粒牢固地嵌合在一起，形成了硬质相承担载荷、粘结相传递载荷并吸收能量的复合结构。

粉末冶金结合的质量受到多个因素的影响。烧结温度是首要因素，烧结温度过低时液相钴的流动性不足，无法充分填充碳化钨颗粒间的孔隙，导致材料致密度偏低；烧结温度过高则可能引起碳化钨晶粒的异常长大，同时钴粘结相可能发生过度挥发，在材料内部形成孔隙缺陷。保温时间的控制同样值得重视，保温时间不足时碳化钨的溶解-再析出过程不充分，碳化钨颗粒之间的直接结合程度有限；保温时间过长则可能导致晶粒粗化和组织不均匀。此外，烧结气氛的选择对粉末冶金结合质量具有影响，真空或还原性气氛可以防止碳化钨和钴在高温下氧化，同时有利于排除压坯中的气体和杂质，获得致密的烧结体。从微观组织的观察来看，良好的粉末冶金结合表现为碳化钨颗粒呈多面体形态相互接触，钴粘结相均匀分布在碳化钨颗粒之间，材料内部无明显孔隙或夹杂缺陷。

4.1.2 钎焊结合的硬质合金安全锤头

钎焊结合是复合式硬质合金安全锤头中硬质合金作业端与钢基体之间的连接机制。与粉末冶金结合不同，钎焊结合是一种连接异质材料的工艺方法，其本质是利用熔点低于母材的钎料熔化后填充接头间隙，通过钎料与母材之间的扩散和反应形成冶金结合。钎焊接头中不涉及母材本身的熔化，硬质合金和钢基体在钎焊过程中保持固态，这使得钎焊能够在不对母材性

能造成显著影响的前提下实现异质材料的可靠连接。

钎焊结合的形成过程包括钎料熔化、润湿铺展、间隙填充和凝固结合四个阶段。在加热过程中，钎料达到熔点后开始熔化，熔化的钎料在毛细作用下沿硬质合金与钢基体之间的接头间隙流动。钎料对硬质合金和钢基体的润湿性是钎焊结合能够实现的前提条件，良好的润湿性意味着钎料能够铺展在母材表面并与之发生必要的扩散反应。在钎焊温度下保温期间，钎料中的活性元素向母材表面扩散，母材中的某些元素也可能向钎料中溶解，这种相互扩散在钎料与母材的界面处形成扩散层，扩散层的存在标志着冶金结合的形成。当钎焊接头冷却后，钎料凝固形成的钎缝将硬质合金和钢基体连接为一个整体。

钎焊结合的质量受到多个因素的交互影响。钎料与母材的材料匹配性是首要考虑的因素，钎料不仅需要与硬质合金和钢基体具有良好的润湿性，还需要在使用条件下保持足够的力学性能和化学稳定性。银基钎料在硬质合金钎焊中应用较广，其对硬质合金和钢的润湿性较好，钎焊温度适中，接头的抗剪强度可满足安全锤头的使用要求。铜基钎料虽然成本较低，但其对硬质合金的润湿性相对较差，钎焊温度较高，对工艺控制的要求更为严格。接头间隙的尺寸对钎焊质量具有影响，间隙过小会阻碍钎料的流动和填充，形成未焊透区域；间隙过大会导致钎缝过厚，钎料本身的强度通常低于母材，过厚的钎缝成为连接区域的薄弱环节。钎焊结合的质量评估通常采用外观检查、超声无损检测和破坏性试验相结合的方法，外观检查可以发现钎缝表面的气孔、裂纹等宏观缺陷，超声检测用于评估钎缝内部的致密性，破坏性试验则通过剪切或拉伸测试对接头强度进行定量评价。

4.2 硬质合金安全锤头的粉末冶金成型

粉末冶金成型是制备硬质合金安全锤头材料及整体式锤头的核心工艺方法。这一工艺路线的本质是将金属粉末或碳化物粉末按设定配比混合后，通过压制成型获得具有一定形状和强度的压坯，再在高温下进行烧结使压坯致密化，最终获得具有所需形状和性能的成品。粉末冶金成型工艺的精度控制和稳定性直接影响硬质合金安全锤头的材料性能和尺寸一致性。

4.2.1 硬质合金安全锤头的原料配比与混合

原料配比是硬质合金安全锤头粉末冶金成型的起点。配比设计需要根据锤头目标性能确定碳化钨粉末与钴粉末的质量比例，这一比例直接决定了烧结后材料的硬度和韧性水平。对于 YG6 牌号，钴含量约为百分之六，碳化钨含量约为百分之九十四；对于 YG8 牌号，钴含量约为百分之八，碳化钨含量约为百分之九十二；对于 YG10X 牌号，钴含量约为百分之十，碳化钨含量约为百分之九十。在实际生产中，配比需要考虑到原料粉末的纯度、粒度分布以及后续工序中可能发生的成分变化。碳化钨粉末的纯度通常要求在百分之九十九点五以上，钴粉末的纯度也需达到较高的工业标准，杂质元素（如氧、硫、磷等）的含量需要控制在允许范围内，因为这些杂质可能在烧结过程中形成有害的第二相或降低粘结相的润湿性。

原料混合是粉末冶金成型工艺中的关键工序。混合的目的是使碳化钨粉末和钴粉末在微观尺度上达到均匀分布，为后续烧结获得均匀的组织创造条件。混合过程通常在球磨机中进行，球磨介质可以选择酒精、丙酮或己烷等有机液体，液体介质的加入可以防止粉末在混合过程

中发生团聚，同时减少粉尘的产生。球磨时间、球料比和球磨转速是混合工序的三个工艺参数，球磨时间通常控制在二十四小时至七十二小时之间，球料比一般在四比一至十比一的范围内，球磨转速则需要根据球磨机的类型和容积进行调整。球磨过程中，粉末颗粒经历反复的变形、破碎和冷焊，颗粒尺寸逐渐细化，钴粉末均匀地附着在碳化钨颗粒的表面。球磨过度或不足都会影响混合效果：球磨不足时钴分布不均，烧结后可能出现钴池或贫钴区；球磨过度则可能引入过多的杂质，同时使粉末活性过高，增加后续工序的操作难度。

混合料浆经过滤、干燥和造粒处理后获得具有一定流动性的混合粉末，供压制工序使用。干燥过程需要控制温度和气氛，温度过高可能导致有机介质挥发过快引起粉末扬尘，温度过低则干燥效率不足。造粒工序通过添加成型剂（如石蜡、聚乙二醇等）并经过筛分，获得颗粒大小均匀、流动性良好的造粒粉。成型剂的作用是在压制过程中提供润滑并增加压坯强度，但在烧结前需要通过脱蜡工序予以去除。原料配比与混合工序的质量控制包括取样分析、粒度测试和化学成分检测，确保每一批次的混合粉末符合工艺规程的要求。

4.2.2 硬质合金安全锤头的压制与烧结

压制是将混合粉末转化为具有一定形状和强度的压坯的工序。对于整体式硬质合金安全锤头，压制工序需要直接形成锤头的外形轮廓，包括尖锥作业端和装配段。压制通常采用刚性模具在机械压机或液压机上进行，模具的设计和制造精度对压坯的尺寸精度和密度分布具有决定性影响。压制过程中，造粒粉在模腔中受到单向或双向的压力作用，粉末颗粒之间的空隙被压缩，颗粒发生重排和塑性变形，压坯密度逐渐增加。压坯密度需要达到理论密度的百分之六十至七十，这一密度水平足以使压坯在搬运和脱蜡过程中保持形状完整，同时为烧结致密化保留足够的收缩空间。

压制工序中的压力分布均匀性是影响压坯质量的因素。对于整体式锤头这类具有复杂形状的压坯，不同部位的密度可能不一致：在压力传递路径上的远端和截面变化处，密度往往较低。密度不均匀会导致烧结过程中的收缩行为不一致，引起产品变形或开裂。为了改善密度分布均匀性，可以采用双向压制、浮动模压或等静压等压制方式。双向压制从上下两个方向同时施加压力，可以在一定程度上缓解单向压制时压力沿压坯高度方向衰减的问题。等静压通过液体介质从各个方向均匀施压，可以获得密度分布较为均匀的压坯，但等静压后的压坯需要进一步加工才能获得复杂的外形轮廓，因此多用于形状相对简单的坯料制备。

烧结是粉末冶金成型工艺的核心环节，其目的是在高温下使压坯致密化并获得所需的力学性能。硬质合金的烧结温度通常在 1350℃ 至 1450℃ 之间，这一温度范围高于钴的熔点但低于碳化钨的熔点，因此属于液相烧结范畴。烧结过程在真空烧结炉或氢气保护烧结炉中进行，保护气氛的作用是防止碳化钨和钴在高温下氧化，同时协助排除压坯中的气体和成型剂残留。烧结过程可以划分为升温、保温、冷却三个阶段。升温阶段需要控制升温速率，避免因升温过快导致成型剂挥发剧烈引起压坯开裂。保温阶段是液相烧结发生的主要时期，钴熔化后形成液相，在毛细力驱动下充分填充碳化钨颗粒之间的孔隙，同时碳化钨的溶解-再析出过程促进了碳化钨骨架的形成。冷却阶段需要控制冷却速度，冷却过快可能导致热应力引起的开裂，冷却过慢则可能引起晶粒粗化或相变产物的析出。

版权与免责声明

烧结完成后获得的产品在尺寸上相对于压坯发生了收缩，收缩率一般在百分之十五至二十之间，具体数值取决于粉末的原始粒度、压坯密度和烧结工艺参数。对于整体式硬质合金安全锤头，烧结后的产品可能需要进行少量的精加工（如磨削尖锥表面或修整装配段尺寸）以达到设计的几何精度要求。对于复合式锤头中的硬质合金作业端，烧结后通常以圆柱棒料或块料的形式供应，然后通过钎焊或机械夹固的方式与钢基体连接。烧结工序的质量控制包括密度测量、硬度测试和金相组织观察，确保产品的性能指标符合设计要求。

4.3 硬质合金安全锤头的钎焊成型

钎焊成型是复合式硬质合金安全锤头制造中的关键工艺环节。这一工艺将粉末冶金烧结成型的硬质合金作业端与机械加工的钢基体连接为一个完整的锤头组件。钎焊成型的质量决定了复合式锤头在使用过程中的连接可靠性，因此对钎焊工艺过程的理解和参数控制具有重要意义。

4.3.1 硬质合金安全锤头的钎焊工艺过程

硬质合金安全锤头的钎焊工艺过程通常包括焊前准备、装配定位、加热钎焊和焊后处理四个主要环节。每一个环节的操作质量都会对最终钎焊接头的性能产生影响，需要在工艺设计阶段给予明确规范并在生产过程中严格执行。

焊前准备阶段的主要工作包括表面清理和钎料处理。硬质合金作业端和钢基体安装孔表面的油污、氧化层和吸附气体是影响钎焊质量的因素，需要在钎焊前予以去除。表面清理通常采用机械方法（如砂纸打磨、喷砂处理）或化学方法（如酸洗、碱洗）进行。机械清理可以获得清洁且具有一定粗糙度的表面，有利于钎料的润湿和铺展；化学清理适用于处理形状复杂的表面，但需要确保清洗液完全去除。对于硬质合金表面，由于其在高温下容易发生氧化，清理后应尽快进行钎焊，避免长时间暴露在空气中重新形成氧化膜。钎料的预处理包括裁剪、成型和清洗，预成型钎料可以按照接头形状预先加工成垫片、丝圈或膏状，便于在装配时放置在合适的位置。

装配定位阶段将清理好的硬质合金作业端、钢基体和钎料按照设计位置组装在一起。装配间隙的控制在这一阶段得到体现，间隙过小或过大的问题需要在装配前通过尺寸检验发现并予以纠正。对于批量生产，可以采用专用装配夹具来保证硬质合金作业端在基体安装孔中的位置精度和垂直度。定位方式包括自重定位、弹簧压紧或压板固定，定位装置的设计需要考虑到钎焊过程中的热膨胀，避免因定位过紧导致装配应力过大。对于采用银基钎料的钎焊，通常还需要在钎缝附近涂抹钎剂，钎剂的作用是溶解和去除母材表面的氧化膜，促进钎料的润湿。常用的钎剂包括硼砂、硼酸及其混合物，其使用温度需要与钎料的熔化温度相匹配。

加热钎焊阶段是工艺过程的核心环节。加热方式包括火焰加热、感应加热、电阻加热和炉中加热等，不同加热方式适用于不同生产规模和产品要求。火焰加热操作灵活，适合小批量生产或修补性钎焊，但温度控制精度较低，对操作人员技能要求较高。感应加热利用电磁感应原理在工件中产生涡流进行加热，加热速度快，温度控制较为精确，适合中等批量生产。炉中加热在真空炉或保护气氛炉中进行，温度均匀性好，适用于高精度要求的产品。在加热过程中，需要监控钎焊温度并保持适当的保温时间。当钎料完全熔化并在毛细作用下充分填充

版权与免责声明

接头间隙后，可以停止加热进入冷却阶段。焊后处理阶段包括钎焊后的冷却、渣和检验。冷却速度需要控制在适当范围内，避免因冷却过快产生的热应力损伤接头。钎焊后残留的钎剂和氧化皮需要清除，可以采用温水刷洗、酸洗或喷砂等方法。检验环节包括外观检查、尺寸检查和必要的无损检测，以剔除存在明显缺陷的不合格品。

4.3.2 硬质合金安全锤头的钎焊参数控制

钎焊参数控制是保证复合式硬质合金安全锤头连接质量的技术手段。钎焊工艺参数主要包括钎焊温度、保温时间、加热速度和冷却速度等，这些参数之间存在相互影响关系，需要结合具体的钎焊方法和产品要求进行协调优化。

钎焊温度的选择需要考虑钎料的熔点、母材的热敏感性和接头的性能要求。钎焊温度通常设定为高于钎料液相线温度三十度至五十度，这一温度范围既能保证钎料具有良好的流动性和润湿性，又可以避免因温度过高引起的不利影响。对于银基钎料，钎焊温度一般在 650℃ 至 760℃ 之间；对于铜基钎料，钎焊温度通常在 950℃ 至 1100℃ 之间。钎焊温度过低时，钎料粘度较高，流动性不足，难以充分填充接头间隙；钎焊温度过高时，硬质合金表面可能发生过度的氧化或脱碳，钢基体的晶粒可能粗化，钎料中的低沸点元素可能挥发。在实际生产中，通过热电偶或红外测温仪对钎焊温度进行监测，确保其在工艺规程规定的范围内。

保温时间的设定取决于工件尺寸、热容量和钎焊方法。保温时间需要足够长，以保证钎料充分熔化、流动并完成与母材的扩散反应，但同时应避免过长的保温导致晶粒粗化或有害相的形成。对于小型安全锤头工件，保温时间通常在三十秒至三分钟之间；对于大型或厚壁工件，保温时间可能需要延长至五分钟以上。感应加热钎焊的保温时间较短，火焰加热和炉中加热的保温时间相对较长。保温时间的控制精度对连接质量的一致性具有影响，时间过短时接头中出现未焊透区域的可能性增大，时间过长时钎缝中可能形成过厚的金属间化合物层，这些化合物的脆性较高，会降低接头的韧性。

加热速度的控制主要适用于炉中钎焊和感应钎焊。在炉中钎焊中，加热速度过快可能导致工件内外温差过大，热应力引起变形或开裂；加热速度过慢则生产效率较低。通常采用分段加热的方式，在钎料熔点以下设置保温平台，使工件温度趋于均匀后再继续升温至钎焊温度。冷却速度的控制同样需要关注，尤其是在钎焊温度降至约 500℃ 以下的区间，这一温度范围内的冷却速度不宜过快，以减小硬质合金与钢基体之间因热膨胀系数差异而产生的残余热应力。实践表明，缓冷或钎焊后进行去应力退火处理有助于提高钎焊接头的抗冲击性能。去应力退火的温度通常在 400℃ 至 500℃ 之间，保温一至两小时后随炉冷却。通过对钎焊参数的精确控制和记录，可以实现复合式硬质合金安全锤头钎焊质量的稳定性和可追溯性。

4.4 硬质合金安全锤头的成型控制

成型控制是硬质合金安全锤头制造过程中保障产品质量和性能一致性的重要环节。在粉末冶金成型与钎焊成型这两类工艺路线中，尺寸精度和装配配合精度是成型控制的两个核心关注点。前者关注单个零件或组件的几何尺寸是否满足设计图纸要求，后者关注多个零件在装配后形成的配合关系是否符合功能预期。

4.4.1 成型尺寸精度管控标准

成型尺寸精度管控标准是硬质合金安全锤头制造过程中用于检验和判定产品尺寸合格与否的技术依据。由于硬质合金安全锤头涉及整体式和复合式两种结构形态，且制造工艺包括粉末冶金烧结和机械加工等多个工序，因此尺寸精度管控需要覆盖从粉末压制到成品交付的全过程，不同工序阶段采用不同的精度控制要求和检测方法。

在粉末冶金压制工序，压坯的尺寸精度控制主要依赖模具精度和压制工艺参数的稳定性。压制模具的工作部分尺寸需要根据产品的最终尺寸要求和烧结收缩率进行反向设计。由于不同牌号的硬质合金以及不同批次的混合粉末在烧结过程中的收缩行为可能存在差异，模具设计阶段需要预留调整余量。压坯的尺寸检测通常在压制完成后进行，检测项目包括压坯的高度、直径以及尖锥部位的几何轮廓。对于整体式硬质合金安全锤头，压坯的尺寸公差一般控制在 IT11 至 IT13 级范围内，这一较宽的公差范围反映了粉末压坯在未经烧结时强度较低、容易变形的特点。压坯检测中发现尺寸超差时，需要从粉末性能、模具状态和压制参数三个方面分析原因并采取纠正措施。

烧结工序完成后，硬质合金产品发生明显的体积收缩，尺寸精度较压坯阶段有所提高。烧结体的尺寸检测是质量控制的关键环节，检测结果直接决定产品是否进入下一道工序或需要返工处理。对于整体式硬质合金安全锤头，烧结后产品的主要检测尺寸包括尖锥作业端的锥角、尖部圆弧半径、装配段的直径和长度以及锤头总长度。根据国家标准 QB/T 5231018 的相关要求以及行业通行做法，整体式锤头装配段的直径公差通常控制在 IT8 至 IT10 级范围内，长度公差控制在 ± 0.15 毫米至 ± 0.30 毫米之间。尖锥作业端的锥角偏差一般不超过 ± 2 度，尖部圆弧半径的允许偏差在 ± 0.1 毫米范围内。这些公差范围的设定考虑了粉末冶金工艺的固有波动性以及使用功能对尺寸精度的实际需求，既保证了产品的可装配性，又避免了过于严格的公差要求导致成品率过低。

对于复合式硬质合金安全锤头，尺寸精度管控需要分别对硬质合金作业端和钢基体提出要求，同时对钎焊后的组件尺寸进行检查。硬质合金作业端通常以圆柱棒料的形式供应，其直径公差控制在 IT7 至 IT8 级范围内，长度公差控制在 ± 0.10 毫米以内，以保证与基体安装孔之间的配合间隙满足钎焊要求。钢基体安装孔的孔径公差同样需要控制在 IT7 至 IT8 级范围内，孔底平面的平面度以及孔轴线与基体基准面的垂直度需要满足设计要求。钎焊完成后，需要对组件的总长度、硬质合金作业端的伸出长度以及作业端轴线与基体基准面的同轴度进行检测。同轴度偏差一般控制在 0.15 毫米以内，以保证锤头在装配到锤柄后，锤击方向与使用者施力方向保持一致。尺寸精度管控标准的建立和执行，依赖于检测设备的精度和检测人员的操作规范性，定期对检测设备进行校准是保证管控有效性的必要措施。

4.4.2 装配配合精度调控方法

装配配合精度调控方法是指通过调整制造过程中的工艺参数和操作条件，使硬质合金安全锤头的各个组成部分在装配后达到预定配合状态的工程技术手段。对于整体式结构，装配配合主要是指锤头装配段与锤柄安装孔之间的配合关系；对于复合式结构，装配配合则包括硬质合金作业端与基体安装孔的钎焊配合以及锤头组件与锤柄的装配配合。不同的配合类型需要

采用不同的调控方法。

在整体式硬质合金安全锤头的装配配合调控中，过盈配合的设计和实现是核心内容。过盈量的大小需要根据锤头在使用过程中承受的轴向拔出力、周向扭矩以及锤柄材料的弹性模量和强度极限进行计算。计算过盈量时需要考虑硬质合金和锤柄材料热膨胀系数的差异，因为在装配过程中通常采用热装法或冷装法来降低压装力。热装法是将锤柄加热使其安装孔膨胀，然后将常温状态的锤头装入孔中，冷却后安装孔收缩将锤头抱紧。冷装法则是将锤头冷却使其收缩，装入常温状态的锤柄安装孔后恢复温度产生过盈配合。无论采用哪种方法，都需要对加热温度或冷却温度进行控制，温度过高可能影响锤柄材料的力学性能，温度过低则可能引起硬质合金的冷脆风险。在批量生产中，通过统计过程控制方法对装配段的尺寸分布和锤柄安装孔的尺寸分布进行监控，确保两者的配合过盈量稳定在工艺规程规定的范围内。

复合式结构中硬质合金作业端与钢基体安装孔的钎焊配合间隙调控，是影响钎焊质量的重要因素。钎焊配合间隙的目标值通常在百分之二至百分之五的范围内，这一间隙既能保证钎料通过毛细作用充分填充，又不会因间隙过大导致钎缝过厚。配合间隙的调控需要从硬质合金作业端的直径公差和基体安装孔的孔径公差两个方面进行。在生产实践中，通常采用分组选配的方法来控制配合间隙：将硬质合金作业端按直径测量值分为若干组，将基体安装孔按孔径测量值分为对应的若干组，同一组别的作业端和安装孔进行配对钎焊。这种方法可以在不显著提高单个零件加工精度的情况下，有效控制配合间隙的波动范围。对于要求较高的情况，可以在钎焊前对硬质合金作业端或基体安装孔进行配磨，即根据实测尺寸对其中一个零件的配合面进行精加工，使配合间隙达到设计要求。配磨法虽然增加了工序时间和成本，但可以获得较为理想的配合精度。

锤头组件与锤柄的装配配合调控需要考虑使用过程中的防松脱要求。对于采用胶粘剂辅助固定的装配方案，配合间隙需要控制在胶粘剂推荐的范围之内，间隙过小时胶粘剂难以形成连续胶层，间隙过大时胶粘剂的剪切强度下降。装配前需要对配合面进行清洁处理，去除油污和氧化物，以保证胶粘剂与基体材料的结合强度。胶粘剂的固化时间和固化温度需要按照产品说明书的要求进行控制，固化过程中应避免锤头与锤柄发生相对移动。对于采用机械夹固方式的装配方案，配合精度调控的重点在于保证夹固力在反复冲击条件下不衰减。这通常需要采用防松垫圈、螺纹锁固胶或自锁螺纹结构，并在装配后按照规定的扭矩值进行紧固。装配完成后进行的抽检测试包括拉拔试验和扭转试验，以验证装配的可靠性。

4.5 硬质合金安全锤头的成型质量提升

成型质量提升是硬质合金安全锤头制造技术发展的持续追求。与单件试制不同，批量生产条件下成型质量的核心指标包括工艺稳定性和成品一致性两个方面。工艺稳定性关注的是制造过程在时间维度上的可重复性，即不同批次、不同时段生产的产品是否具有相同的质量水平；成品一致性关注的是同一批次产品中个体之间的质量差异是否控制在可接受的范围内。

4.5.1 成型工艺稳定性控制策略

成型工艺稳定性控制策略是指通过系统性的管理方法和技术手段，使硬质合金安全锤头的制

造过程保持在受控状态，减少外部因素和随机因素对产品质量的干扰。粉末冶金成型和钎焊成型这两类工艺路线对稳定性控制的要求各有侧重，但控制策略的基本框架具有共性，包括工艺参数的标准化、关键工序的监控与反馈、以及设备状态的维护与管理。

工艺参数的标准化是成型工艺稳定性控制的基础。在粉末冶金成型中，需要标准化的参数包括混合粉末的粒度分布、成型剂的种类和添加量、压制压力、压制速度、烧结温度曲线和烧结气氛流量等。在钎焊成型中，需要标准化的参数包括钎料的牌号和规格、钎焊温度、保温时间、加热速度和冷却速度等。标准化工作的核心是将经验性的操作转化为可量化、可传递的工艺规程。工艺规程的制定需要基于工艺验证试验的结果，在试验中通过单因素法或正交试验法确定各参数的可接受范围，并通过重复性试验验证这些范围在不同条件下的适用性。

关键工序的监控与反馈是实现工艺稳定性控制的动态手段。监控的对象包括工艺参数本身以及工艺过程的输出结果。对于工艺参数的监控，通常采用在线检测设备实时采集温度、压力、流量等数据，并与工艺规程中设定的上下限进行比较，当参数超出设定范围时系统发出报警信号。对于工艺过程输出结果的监控，则需要通过对每批次产品的抽样检测来完成，检测指标包括烧结体的密度和硬度、钎焊接头的抗剪强度以及产品的尺寸精度等。监控数据的记录和积累为后续的工艺优化提供了依据。反馈机制的作用是将监控中发现的问题及时传递到相关环节并采取纠正措施，例如当检测到某批次烧结体的硬度偏低时，需要追溯该批次的烧结温度曲线，检查是否存在温度偏低或保温时间不足的情况，然后对后续批次进行相应的参数修正。

设备状态的维护与管理是工艺稳定性控制的物质保障。压制成型设备的压力精度、模具的磨损状态、烧结炉的温度均匀性以及测温系统的准确性，都会对工艺稳定性产生影响。定期对设备进行校准和预防性维护，可以减少因设备状态变化引起的工艺波动。模具的管理尤其值得重视，因为模具在长期使用过程中会发生磨损，导致压坯尺寸逐渐变化。建立模具寿命管理制度，规定模具的最大使用次数，并在达到上限前进行修复或更换，可以避免因模具磨损过度造成的尺寸超差。对于烧结炉这类热工设备，定期进行温度均匀性测试（炉温测定）并绘制炉温分布图，有助于识别炉内是否存在冷点或热点，从而在装炉时避开这些区域或对温度设定值进行补偿。

4.5.2 成型成品一致性优化方式

成型成品一致性优化方式是指通过改进材料、工艺和检测手段，缩小同一批次硬质合金安全锤头产品之间的质量差异，使每一个产品都能够稳定地达到设计要求的性能水平。成品一致性是多批次产品稳定性的进一步细化要求，关注的是批次内个体之间的均匀程度。对于硬质合金安全锤头而言，一致性的优化需要从材料批次稳定性、工艺均匀性和检测筛选三个层面入手。

材料批次稳定性的控制是成品一致性的前提条件。硬质合金生产所用的碳化钨粉末和钴粉末来源于不同的供应商或同一供应商的不同生产批次，不同批次的粉末在粒度分布、纯度、颗粒形貌等方面可能存在差异，这些差异会传导到最终产品的性能上。为了减小这种影响，可以对粉末原料进行入厂检验和批次管理，检验不合格的批次不予接收。对于批量较大的生产

订单，可以采取大批量混料的方式，将多个小批次的粉末按一定比例混合均匀后使用，以平滑不同批次之间的差异。混合后的粉末经过取样检测确认其性能指标在控制范围内，方可投入生产使用。对于钎焊成型所用的硬质合金作业端，同样需要对其尺寸和材质进行批次管理，确保同一批次产品中使用的硬质合金棒料来源于相同的生产批号。

工艺均匀性的改善是成品一致性的技术核心。在粉末冶金成型中，压坯密度的均匀性是影响烧结后产品一致性的重要因素。通过在压制模具设计中增设浮动模芯、采用双向压制或等静压制等方式，可以改善压坯不同部位的密度差异。在装炉烧结时，压坯在烧结舟上的摆放位置和密度会影响其受热和冷却的条件，采用均匀间距摆放并定期旋转烧结舟的位置，可以减少炉内温度场不均匀带来的影响。在钎焊成型中，采用自动化的钎焊设备替代人工操作，可以减少因操作人员熟练程度和经验差异引起的工艺波动。感应钎焊设备配合红外测温闭环控制系统，可以实现钎焊温度和时间的自动控制，使同一批次产品在基本相同的热条件下完成钎焊，从而获得一致性较好的接头质量。

检测筛选是保证出厂成品一致性的质量把关手段。即使通过工艺改进可以将产品差异控制在较低水平，但由于多种因素的影响，同一批次产品中仍可能存在少量不合格品或性能偏离较大的产品。通过百分之百的尺寸检测和抽样性能检测，可以将这些不符合要求的产品剔除。对于整体式硬质合金安全锤头，可以采用自动光学检测设备对锤头的几何尺寸和表面缺陷进行快速筛查。对于复合式结构，可以对接头的钎焊质量进行超声无损检测，识别出存在未焊透、气孔或裂纹的缺陷产品。经过检测筛选后，合格产品的性能一致性得到了保障。需要指出的是，检测筛选是一种事后控制手段，其本身并不能改善产品的内在质量，因此检测筛选应与工艺改进相结合，通过检测数据反馈驱动工艺参数的持续优化，从根本上提高成品的批次一致性水平。



中钨智造硬质合金安全锤头

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

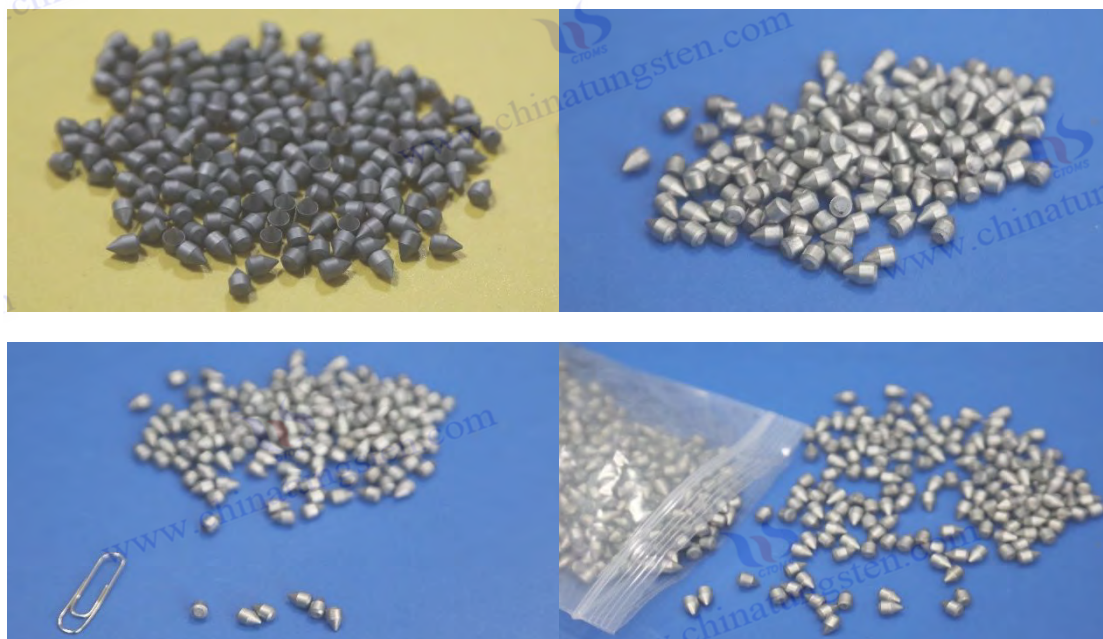
如有关于硬质合金安全锤头的生产需求，请联系制造商：中钨智造（厦门）科技有限公司

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



版权与免责声明

第五章 硬质合金安全锤头质量控制与工艺优化

5.1 硬质合金安全锤头的原料配比优化

原料配比是硬质合金安全锤头材料设计的起点，其合理性直接决定了材料的硬度、韧性和耐磨性等核心性能指标。配比优化涉及硬质相原料的粒度选择、粘结相原料的掺杂比例控制以及配比误差的管理与控制。

5.1.1 硬质相原料粒度筛选与配比原则

硬质相原料的粒度筛选是硬质合金安全锤头材料设计中的基础工作。碳化钨粉末作为主要的硬质相，其颗粒尺寸分布对烧结行为、微观组织以及最终产品的力学性能均产生影响。粒度筛选的目标是选择适合特定应用场景的碳化钨粉末粒度组合，以平衡硬度、韧性和耐磨性之间的关系。

碳化钨粉末的粒度通常以费氏粒度（FSSS）表示，其数值范围从亚微米级到数十微米不等。对于硬质合金安全锤头而言，不同应用场景对粒度的要求存在差异。在应急破玻型安全锤头中，对硬度的要求较高，因为锤头需要在有限次数的锤击中完成玻璃破碎任务。这类产品倾向于选用细晶粒碳化钨粉末，其费氏粒度通常在 0.6 微米至 1.2 微米的范围内。细晶粒碳化钨在烧结后形成的硬质合金具有较高的硬度和抗弯强度，尖端的锐利度保持性较好。在工业加工型安全锤头中，对韧性和抗冲击性能的重视程度更高，因为这类锤头需要承受频繁的冲击载荷。工业加工型产品倾向于选用中等粒度或粗粒度的碳化钨粉末，其费氏粒度通常在 2.0 微米至 5.0 微米的范围内。粗晶粒碳化钨制成的硬质合金虽然硬度略低于细晶粒产品，但其断裂韧性较高，在冲击载荷下抵抗裂纹扩展的能力更强。

除了单一粒度的选择外，粒度级配也是原料配比优化的重要手段。粒度级配是指将不同粒径范围的碳化钨粉末按一定比例混合使用，以达到提高压坯密度、改善烧结行为的目的。在粒度级配的设计中，粗颗粒构成骨架，中等颗粒填充粗颗粒之间的间隙，细颗粒则填充更小的空隙。通过合理的级配，混合粉末的振实密度可以高于单一粒度粉末的振实密度，这有利于在压制过程中获得更高的压坯密度，减少烧结收缩率并提高产品尺寸一致性。粒度级配的具体方案需要通过试验确定，常用的级配比例包括双峰分布和宽分布两种模式。双峰分布是指将粗粉和细粉按一定比例混合，粗粉与细粉的粒径比通常控制在五比一至十比一的范围内；宽分布则涉及三个或更多粒度级别的粉末。在实际生产中，粒度级配方案的选择需要结合具体的产品要求和压制工艺条件进行综合评估。

粒度筛选和配比的原则可以概括为“应用导向、综合平衡”。这意味着粒度方案的设计不能孤立地追求单一性能指标的最大化，而需要在性能、制造可行性和经济性之间寻求协调。

5.1.2 粘结相原料掺杂比例控制要求

粘结相原料的掺杂比例控制是硬质合金安全锤头配比优化的另一个重要方面。粘结相的含量决定了硬质合金中硬质相与粘结相的比例关系，进而影响材料的硬度、韧性、抗弯强度和耐

磨性等一系列性能指标。

以钨钴类硬质合金为例，钴含量的变化范围通常在百分之六至百分之十一之间，这一区间覆盖了从高硬度型到高韧性型的多种牌号。YG6 牌号的钴含量约为百分之六，其制备的硬质合金硬度较高，适用于对尖端保持性要求较高的应急破玻场景。YG8 牌号的钴含量约为百分之八，在硬度与韧性之间形成了平衡状态，成为安全锤头领域应用较为广泛的牌号之一。YG10X 牌号的钴含量约为百分之十，材料韧性进一步增强，适用于需要承受较大冲击载荷或频繁锤击的工业加工场合。这一系列牌号的形成表明，粘结相掺杂比例的调整是调节硬质合金性能的有效手段。

粘结相掺杂比例的控制要求体现在名义成分的准确性和实际成分的一致性两个方面。名义成分的准确性是指配料时钴粉的称量比例需要与设计值相符，偏差应控制在较小范围内。通常要求钴含量的配料误差不超过 ± 0.2 个百分点，即对于名义钴含量为百分之八的 YG8 牌号，配料钴含量应在百分之七点八至百分之八点二之间。这一要求的实现依赖于高精度的称量设备和规范的称量操作。实际成分的一致性是指烧结后产品中的实际钴含量与配料设计值之间的偏差以及不同产品之间钴含量的波动范围需要得到控制。在烧结过程中，钴可能因挥发而损失，特别是在高温或真空烧结条件下，钴的蒸气压较高，挥发量可达百分之零点一至百分之零点五。为了补偿这种损失，配料时可以在设计值基础上适当增加钴的加入量，增加的具体数值需要通过工艺试验确定。

除了钴含量的控制外，掺杂元素的纯度也是粘结相原料控制的内容之一。钴粉中可能存在的杂质元素包括铁、镍、铜、硫、磷等，这些杂质的存在可能对硬质合金的性能产生影响。铁和镍在一定含量范围内对硬质合金的性能影响相对较小，但硫、磷等杂质元素容易在晶界处偏聚，降低晶界强度，增加材料的脆性。因此，对钴粉的纯度要求通常在百分之九十九点五以上，特定杂质元素的含量应控制在较低水平。杂质含量的检测通常采用化学分析法或光谱分析法，每批次的钴粉在投入使用前都需要进行入厂检验，合格后方可进入配料工序。

5.1.3 复合原料配比误差控制与优化方案

复合原料配比误差控制是指在硬质合金安全锤头的原料准备过程中，对碳化钨粉末、钴粉末以及可能添加的其他碳化物粉末进行称量和混合时，将各组分比例的偏差控制在允许范围内的技术措施。配比误差的存在会改变材料的实际成分，进而影响产品的性能一致性，因此需要建立系统的误差控制方案。

配比误差的来源可以归纳为称量误差、混合误差和取样误差三个类别。称量误差主要产生于称量设备的精度限制和操作人员的操作规范性。采用电子天平或台秤进行称量时，设备的精度等级需要与称量要求的精度相匹配。对于小批量配料，通常采用量程适中、精度较高的电子天平，其分度值可达到 0.01 克甚至 0.001 克；对于大批量生产，则采用自动配料系统，通过失重秤或皮带秤实现连续配料和动态校准。称量操作中需要注意环境因素（如气流、振动）对称量精度的影响，并定期使用标准砝码对称量设备进行校准。混合误差产生于混合过程中粉末的偏析现象，由于碳化钨和钴的密度存在差异，混合后的粉末在输送、储存过程中可能发生密度偏析，导致不同部位取样的成分不一致。为了减小混合误差，可以在混合过程

中加入适量的成型剂，增加粉末颗粒之间的粘附力，降低偏析倾向。混合后的粉末应尽快使用，避免长时间存放，若需要存放则应采用密封容器并避免振动。

配比误差控制的优化方案包括工艺参数优化和在线检测反馈两个方向。工艺参数优化方面，通过调整球磨时间、球料比和球磨转速，可以改善粉末混合的均匀性。研究数据表明，球磨时间达到二十四小时以上时，钴在碳化钨颗粒表面的分布趋于均匀，不同取样点的钴含量偏差可控制在较小范围内。在线检测反馈方面，可以引入近红外光谱分析或 X 射线荧光光谱分析技术，对混合粉末的成分进行快速检测，并将检测结果与目标值进行比较。当检测到偏差超出设定阈值时，系统可自动调整后批次配料参数或发出报警信号提示操作人员干预。对于配比误差已经发生的情况，可以采取混合料掺兑的方式进行补救，即将成分偏高和成分偏低的混合料按一定比例混合，使最终混合料的成分回归目标范围。这一方案需要建立精确的物料成分数据库和掺兑计算模型。

5.2 硬质合金安全锤头的烧结工艺优化

烧结工艺是硬质合金安全锤头制造过程中的关键热工环节。在烧结过程中，粉末压坯经历从松散的颗粒集合体向致密的复合材料转化的复杂物理化学变化，其升温速率、保温参数和冷却制度都对最终产品的微观组织和力学性能产生影响。烧结工艺优化的目标是在保证产品性能的前提下，提高生产效率、降低能耗并减少批次间的性能波动。

5.2.1 烧结升温速率参数优化

烧结升温速率是指烧结炉从室温升至目标烧结温度的过程中，单位时间内温度上升的数值。升温速率的选择需要考虑压坯中成型剂的排除、气体的逸出以及压坯在升温过程中的热应力状态。升温速率过快可能导致一系列问题：成型剂在短时间内大量挥发，产生的气体来不及排出炉外，可能在压坯内部形成气孔或引起压坯开裂；压坯内外温差过大产生热应力，当热应力超过压坯的强度时即形成裂纹；碳化钨颗粒与钴颗粒之间的扩散反应在非平衡状态下进行，可能导致局部成分不均匀。升温速率过慢则延长了烧结周期，降低了设备利用率和生产效率。

升温速率的优化通常采用分段升温的策略。在低温阶段（室温至 400℃），这一区间主要是成型剂的挥发和分解过程，升温速率宜控制在较慢的水平，通常为每分钟 2℃至 5℃。慢速升温可以使成型剂有充分的时间从压坯内部扩散至表面并挥发，同时避免因挥发过快导致压坯内部压力升高引起开裂。在中温阶段（400℃至 800℃），这一区间是压坯中残余气体的排除和氧化物还原的过程，升温速率可以适当提高至每分钟 5℃至 8℃。在高温阶段（800℃至烧结温度），这一区间是碳化钨与钴之间开始发生明显扩散反应的区域，升温速率的选择需要根据压坯的尺寸和形状进行调整。对于小型安全锤头压坯，由于尺寸较小，热传导较快，升温速率可以控制在每分钟 8℃至 12℃；对于尺寸较大或形状复杂的压坯，则需要适当降低升温速率以避免热应力集中。

升温速率参数的优化需要通过试验设计和性能验证来完成。常用的方法是设置不同的升温速率方案，在相同烧结温度和保温时间条件下进行对比烧结，然后对烧结体的密度、硬度和微

观组织进行检测。通过对比分析可以确定某一特定产品规格下的升温速率区间。需要指出的是，升温速率的优化结果与烧结炉的类型有关，真空烧结炉和氢气保护烧结炉的热传递方式不同，升温速率的设定值也存在差异。因此，工艺参数优化应针对具体的设备条件进行，不宜直接套用其他设备的参数。

5.2.2 高温保温时间与温度区间控制

高温保温阶段是硬质合金烧结过程中液相烧结发生的主要时期，也是材料致密化和微观组织形成的关键环节。在这一阶段，压坯在烧结温度下保持一定时间，使钴完全熔化形成液相，液相钴在毛细作用下充分填充碳化钨颗粒之间的孔隙，同时碳化钨的溶解-再析出过程促进了碳化钨颗粒之间的结合。保温时间和保温温度的选择对烧结体的最终性能具有重要影响。

保温时间的选择需要考虑压坯的尺寸、形状以及装炉量等因素。对于硬质合金安全锤头这类小型制品，保温时间通常在三十分钟至九十分钟之间。保温时间过短时，液相钴的流动和重排不充分，孔隙未能完全消除，烧结体密度偏低，硬度和强度均难以达到设计值。保温时间过长则可能产生不利影响：碳化钨晶粒发生异常长大，粗大的晶粒会降低材料的抗弯强度；钴粘结相可能发生聚集，形成尺寸较大的钴池，这些钴池区域在受力时容易优先变形，成为裂纹萌生的位置；烧结体表面可能发生脱碳或渗碳反应，形成性能异常的表层。保温时间的优化可以通过跟踪烧结体的密度变化曲线来进行，当密度随保温时间延长的增加幅度逐渐趋于平缓时，即表明致密化过程基本完成，此时可终止保温。

保温温度的控制精度和均匀性是温度区间控制的核心内容。烧结温度通常设定在 1350℃ 至 1450℃ 的范围内，具体数值取决于碳化钨的粒度、钴含量以及产品性能要求。细晶粒碳化钨由于其表面能较高，烧结活性较大，可以在较低的烧结温度（约 1350℃ 至 1400℃）下实现充分致密化；粗晶粒碳化钨则需要较高的烧结温度（约 1400℃ 至 1450℃）来驱动致密化过程。保温温度的控制精度要求在±5℃ 以内，过大的温度波动会导致烧结体性能的批次间差异。温度均匀性是指炉膛内不同位置的温度分布是否一致，通常要求炉温均匀性在±10℃ 以内。为了改善温度均匀性，可以采用多区控温的烧结炉，并在炉膛内合理布置辐射屏和均热板。对于真空烧结炉，由于炉内没有对流传热，温度的均匀性主要依赖辐射传热，因此装炉时应注意工件之间保持适当间距，避免相互遮挡影响辐射加热效果。

5.2.3 烧结冷却制度与残余应力优化

烧结冷却制度是指烧结保温结束后，将炉温从烧结温度降至室温的过程安排。冷却制度的设计需要考虑冷却速度的选择、相变过程的控制以及残余应力的管理。对于硬质合金安全锤头而言，冷却阶段的控制对于产品的尺寸稳定性、微观组织状态以及使用性能都有影响。

冷却速度的选择是冷却制度设计的核心参数。从烧结温度降至约 1000℃ 的范围内，这一区间内硬质合金仍处于较高温度状态，冷却速度对碳化钨在钴中的溶解度和析出行为有影响。较快的冷却速度可以抑制碳化钨在冷却过程中的过度析出，获得较为细小的晶粒组织，但同时也可能增大热应力。较慢的冷却速度有利于减小热应力，但可能导致碳化钨晶粒的进一步粗化。在 1000℃ 至 600℃ 的范围内，硬质合金已进入弹性状态，这一阶段的冷却速度对残余

热应力的形成有显著影响。由于硬质合金和钎焊连接的钢基体热膨胀系数存在差异，冷却过程中产生的热应力如果不加以控制，可能导致产品的变形或开裂。在 600℃ 以下的低温区间，冷却速度对组织的影响较小，但过快的冷却仍可能因热震而引起表面微裂纹。

残余应力的优化是冷却制度设计的重要目标。硬质合金材料本身属于脆性材料，对拉应力的敏感程度较高，残余拉应力的存在会降低产品的承载能力。残余应力的形成与冷却过程中温度梯度和材料内部组织的非均匀性有关。为了减小残余应力，可以采用分段冷却或缓冷工艺。分段冷却是将冷却过程划分为若干阶段，在不同阶段采用不同的冷却速度：在高温阶段采用较快的冷却速度以提高生产效率，在接近室温的阶段采用较慢的冷却速度以减小热应力。缓冷工艺是在烧结完成后不立即进行快速冷却，而是让炉温以每分钟 2℃ 至 5℃ 的速度缓慢降至某一中间温度（如 600℃ 或 400℃），然后再进行快速冷却。对于要求较高的产品，可以在烧结后进行去应力退火处理，即在烧结冷却至室温后，将产品重新加热至 600℃ 至 800℃ 并保温一至两小时，然后随炉冷却。这一处理可以使硬质合金内部的残余应力得到一定程度的释放，提高产品的尺寸稳定性和使用可靠性。冷却制度的优化需要通过残余应力检测来验证，常用的检测方法包括 X 射线衍射法和钻孔应变法，通过对比不同冷却制度下产品的残余应力水平，可以确定适合特定产品规格的冷却方案。

5.3 硬质合金安全锤头的表面处理工艺

表面处理是硬质合金安全锤头制造过程中的重要辅助工序。虽然硬质合金材料本身已经具备了较高的硬度和耐磨性，但适当的表面处理可以进一步改善其使用性能、延长使用寿命并提升产品的外观质量。根据处理目的的不同，表面处理工艺可以分为抛光与精整处理、强化耐磨处理以及防腐防护处理三个类别。这些工艺在整体式锤头和复合式锤头的作业端表面均有应用，但对于复合式锤头中的钢基体部分，表面处理的侧重点有所不同。

5.3.1 表面抛光与精整处理工艺

表面抛光与精整处理是硬质合金安全锤头制造过程中的修饰性加工工序，其目的是改善锤头表面的光洁度、去除烧结或加工过程中产生的表面缺陷，并为后续的涂覆或防护处理提供良好的基底表面。对于硬质合金安全锤头而言，抛光与精整处理的主要应用对象是整体式锤头的尖锥作业端以及复合式锤头中硬质合金作业端的锥面部分。

硬质合金材料的高硬度特性使得其表面抛光具有一定的技术难度。普通磨料在硬质合金表面上的磨削效率较低，需要采用硬度更高的超硬磨料进行加工。金刚石磨具是硬质合金表面抛光中应用较为广泛的工具，其磨料粒度从粗到细可以分为多个级别，抛光过程通常采用逐级细化的工艺路线。粗磨阶段采用粒度为 W40 至 W28 的金刚石磨盘或磨轮，用于去除烧结后锤头表面的氧化层、烧结皮以及明显的加工痕迹。粗磨后表面粗糙度 Ra 值可降至约 0.8 微米至 1.6 微米。半精磨阶段采用粒度为 W14 至 W10 的金刚石磨具，进一步细化表面纹理，使表面粗糙度降至约 0.2 微米至 0.4 微米。精磨和抛光阶段采用粒度为 W7 至 W3.5 甚至更细的金刚石膏或金刚喷雾，配合软质抛光轮（如羊毛轮或绒布轮）进行加工，可使表面粗糙度达到 Ra0.05 微米至 0.10 微米的光亮镜面效果。

版权与免责声明

抛光与精整处理对硬质合金安全锤头性能的影响体现在多个方面。从破玻功能的角度来看，抛光的尖锥表面与玻璃接触时摩擦系数较低，冲击能量可以更有效地转化为玻璃内部的张应力，有利于玻璃的快速碎裂。从应力分布的角度来看，抛光去除了烧结或磨削过程中产生的表面微裂纹层，这些微裂纹层深度通常在数微米至数十微米之间，虽然在宏观上不易察觉，但作为应力集中源可能在使用过程中引发裂纹扩展。通过抛光将表面微裂纹层去除后，锤头的抗冲击性能可以得到一定程度的改善。从外观质量的角度来看，抛光的硬质合金表面呈现出银灰色至灰黑色的金属光泽，产品外观较为美观，有利于提升产品的市场形象。

抛光工艺参数的设定需要根据产品的具体要求和生产批量进行合理选择。对于批量较大的标准产品，可以采用机械自动化抛光生产线，通过设定固定的抛光时间、压力和磨料供给量来保证批次间的一致性。对于小批量或特殊规格产品，则多采用手工辅助抛光或半自动抛光方式，操作人员的技能水平对抛光质量有较大影响。抛光过程中需要注意避免过度抛光导致锤头尖端的几何形状发生明显改变，特别是尖部圆弧半径的控制需要在抛光后重新检验确认。抛光工序完成后，应及时清除残留在锤头表面的磨料颗粒和抛光膏残留物，通常采用超声波清洗配合有机溶剂或专用清洗剂进行清洁处理，然后使用洁净压缩空气吹干或热风烘干。

5.3.2 表面强化耐磨处理工艺

表面强化耐磨处理是旨在进一步提高硬质合金安全锤头作业端表面抵抗磨损能力的工艺措施。尽管硬质合金材料本身已经具备了较好的耐磨性能，但在某些特定使用条件下（如工业加工领域中对高磨蚀性物料进行长时间、高频率的破碎作业），硬质合金表面仍会发生渐进性的材料损失。表面强化处理通过改变表层材料的成分、结构或应力状态，使锤头表面获得比基体更高的耐磨性能。

化学气相沉积和物理气相沉积是硬质合金表面强化处理中应用较为广泛的两种技术路线。化学气相沉积是在高温条件下（通常为 900℃ 至 1100℃），将含有钛、铝、硅等元素的气态先驱体通入反应室，在硬质合金表面发生化学反应生成 TiN、TiCN、Al₂O₃ 等硬质涂层的工艺方法。涂层的厚度通常在 5 微米至 15 微米之间，显微硬度可达 2000HV 至 3000HV，高于硬质合金基体的表面硬度。涂层在磨粒磨损条件下能够有效保护基体材料，延缓锤头尖端的磨损速率。然而，化学气相沉积的高温处理过程可能导致硬质合金基体的粘结相发生软化或晶粒粗化，因此该工艺在硬质合金安全锤头中的应用相对有限，多用于对耐磨性有特殊要求的高端产品。

物理气相沉积是在较低温度条件下（通常为 200℃ 至 500℃）进行的真空镀膜工艺。通过磁控溅射或电弧蒸发的方式将靶材材料（如钛、铬等）气化并沉积在硬质合金表面，形成 TiN、CrN、TiAlN 等硬质涂层。由于沉积温度较低，物理气相沉积对硬质合金基体的性能影响较小，更适合应用于硬质合金安全锤头的表面强化处理。物理气相沉积涂层的厚度通常在 2 微米至 5 微米之间，虽然厚度低于化学气相沉积涂层，但涂层与基体之间的结合力较强，在冲击载荷下不易发生剥落。涂层的硬度可根据成分不同在 2000HV 至 3500HV 范围内调节，TiAlN 涂层在高温条件下还表现出较好的抗氧化性能。

表面喷丸强化是另一种形式的表面处理工艺，其原理是利用高速喷射的硬质弹丸（如玻璃珠、

版权与免责声明

陶瓷丸或钢丸）反复撞击硬质合金表面，使表层材料发生塑性变形并产生残余压应力。残余压应力的存在可以抵消部分使用过程中产生的拉应力，从而抑制表面裂纹的萌生和扩展。喷丸处理还可以使表面微观组织得到细化，提高表层的加工硬化程度。对于硬质合金安全锤头而言，喷丸强化的效果主要体现在提高抗冲击性能方面，特别是在承受偏斜冲击或存在应力集中的条件下，经过喷丸处理的锤头表现出较高的抗崩裂能力。喷丸工艺参数需要根据锤头的几何形状和材料牌号进行优化设定。处理后的表面粗糙度会有所增加，对于要求高表面光洁度的产品，喷丸后可能需要进行轻度的抛光处理。

5.3.3 表面防腐防护处理工艺

表面防腐防护处理主要针对复合式硬质合金安全锤头中的钢基体部分，以及在潮湿或腐蚀性环境中使用的整体式锤头。硬质合金材料本身具有较好的化学稳定性，在常规环境下的腐蚀速率较低，但钢基体材料（如 40Cr、45 号钢等）在潮湿空气中容易发生氧化生锈，影响产品的外观和连接的可靠性。表面防腐处理的目的是在钢基体表面形成一层致密的保护膜，隔绝水分和氧气与基体金属的接触。

电镀是钢基体表面防腐处理中应用较为广泛的方法之一。镀锌和镀铬是两种常见的电镀工艺。镀锌层在空气中能够形成致密的氧化锌钝化膜，对钢基体起到阳极保护作用，即使镀层局部破损，锌作为阳极仍能优先溶解，保护钢基体不受腐蚀。镀锌层的外观呈银白色或蓝白色，经过钝化处理后可以获得更好的耐蚀性能。镀铬层外观呈光亮的银白色，硬度较高，耐磨性较好，但铬镀层属于阴极性镀层，一旦破损会在破损处形成小阳极大阴极的腐蚀电池，反而加速钢基体的腐蚀。因此，对于承受冲击载荷的安全锤头而言，镀铬处理对镀层完整性的要求较高，在冲击作用下镀层容易产生微裂纹，可能影响防腐效果。电镀工艺需要控制镀液成分、电流密度、温度和处理时间等参数，镀层厚度通常在 5 微米至 15 微米之间，过薄的镀层防护能力不足，过厚的镀层则可能影响装配配合精度。

化学镀镍是另一种钢基体表面防腐处理方法，其特点是不需要外加电流，通过镀液中的还原剂将镍离子还原沉积在基体表面。化学镀镍层具有良好的均匀性，即使在形状复杂的零件表面也能获得厚度一致的镀层。化学镀镍层的硬度较高，不经热处理时可达 500HV 至 600HV，经过适当的热处理后硬度可进一步提高至 900HV 至 1000HV。此外，化学镀镍层还具有一定的自润滑性能，在锤头与锤柄装配过程中有利于减少摩擦阻力。化学镀镍的缺点是成本高于电镀，且镀液的使用寿命有限，需要定期更换。

黑色氧化处理（发蓝处理）是一种较为简便的钢基体表面防护方法。将钢制零件置于含有氢氧化钠和亚硝酸钠的碱性溶液中加热处理，在零件表面生成一层由四氧化三铁组成的黑色氧化膜。黑色氧化膜的厚度较薄，通常在 1 微米至 2 微米之间，其防腐能力不及电镀层，但具有一定的吸油保油能力，涂覆防锈油后可以获得短期防锈效果。黑色氧化处理对零件的尺寸和精度影响较小，处理后表面无金属光泽，呈均匀的黑色或深蓝黑色，在外观上具有一定特色。对于使用频率较低、储存环境较好的应急安全锤产品，黑色氧化处理配合定期涂油维护可以满足基本的防腐要求。无论采用何种防腐处理工艺，处理后的质量检验（如盐雾试验、厚度测试和结合力测试）都是保证防腐效果的重要环节。

5.4 全过程质量检测标准体系

全过程质量检测标准体系是硬质合金安全锤头质量管理的制度性框架。与单点式的最终产品检验不同，全过程检测强调在从原料入厂到成品出厂的每一个关键环节设置检测节点，通过工序间控制取代单纯的成品把关。这一体系涵盖半成品质量检测和成品出厂质量验收两个层面，前者侧重于过程控制，后者侧重于终端验证。

5.4.1 半成品质量检测规范

半成品质量检测规范是指硬质合金安全锤头在制造过程中，对尚未完成全部工序的中间产品进行质量检验的技术要求和操作程序。半成品检测的目的是及早发现制造过程中的异常情况，避免存在缺陷的半成品流入后续工序造成材料和工时的浪费。对于硬质合金安全锤头而言，半成品检测的主要对象包括混合粉末、压制压坯、烧结坯以及钎焊前的组件。

混合粉末的质量检测在配料和混合工序完成后进行。检测项目包括钴含量、碳含量、氧含量、粒度分布和流动性。钴含量的测定可采用化学分析法或 X 射线荧光光谱法，允许偏差通常控制在名义钴含量的±0.2 个百分点以内。碳含量的控制对硬质合金的性能有重要影响，总碳含量和游离碳含量分别采用燃烧-红外吸收法和化学溶解过滤法测定。氧含量的升高会降低烧结体的致密度和力学性能，通常要求混合粉末的氧含量低于某一阈值，具体数值根据原料类型和生产工艺条件确定。粒度分布采用激光粒度仪测定，用于确认混合粉末的颗粒尺寸是否符合工艺要求。流动性的测定采用霍尔流量计，通过测量一定质量粉末流过标准漏斗所需的时间来评价粉末的充模性能，流动时间过长的粉末在压制成型时可能造成装粉不均匀。

压制压坯的检测在压制成型工序完成后进行。检测项目包括压坯的外观、尺寸、密度和密度分布。外观检查主要识别压坯是否存在可见的裂纹、掉角、分层等缺陷，通常在专用灯光台下进行目视检查。尺寸测量使用游标卡尺或千分尺等通用量具，检测位置和公差范围按照工艺文件的规定执行。压坯密度的测定采用几何法，即通过称量压坯的质量并测量其外形尺寸计算体积，求得密度值。压坯密度应在理论密度的百分之六十至七十之间，低于下限可能导致烧结后尺寸偏小或出现收缩缺陷，高于上限则可能表明压制成型压力过高，增加了模具损坏的风险。密度分布的均匀性通过将压坯切割后测量不同部位的密度来评价，对于安全锤头这种形状复杂的压坯，尖锥部位的密度往往低于装配段，这种差异需要控制在可接受的范围内。

烧结坯的检测在烧结工序完成后进行。烧结坯已具备最终产品的材料性能，因此检测项目较前两个阶段更为全面。检测内容包括外观、尺寸、密度、硬度、矫顽磁力和钴磁。外观检查重点关注烧结坯表面是否存在氧化、粘连、裂纹、气泡等缺陷。尺寸测量用于验证烧结收缩是否在预期范围内，并将测量数据用于模具修正。密度和硬度的测定方法及合格标准与成品相同，这两个指标直接反映了烧结工艺是否正常。矫顽磁力和钴磁是硬质合金特有的无损检测参数，矫顽磁力与碳化钨晶粒度相关，钴磁与钴含量相关，两者结合可用于评价烧结组织的均匀性和牌号符合性。对于复合式锤头，钎焊前的硬质合金作业端和钢基体组件还需要进行单独的尺寸检测和清洁度检查，以确保钎焊配合间隙和表面状态符合工艺要求。半成品检测规范的执行需要配备相应的检测设备和经过培训的检测人员，检测记录应保持完整并具有可追溯性。

5.4.2 成品出厂质量验收标准

成品出厂质量验收标准是硬质合金安全锤头在完成全部制造工序后,进行最终质量判定和出厂放行的技术依据。与半成品检测侧重于过程控制不同,成品验收是对产品整体质量水平做出最终评价,其合格与否直接决定产品能否交付给客户使用。成品出厂质量验收标准通常以企业标准的形式存在,但需要参照相关的国家标准或行业标准制定。对于镶嵌硬质合金型安全锤,国家标准 QB/T 5231018 规定了锤击端硬质合金块的相关要求。

成品质量验收的检测项目包括外观质量、尺寸精度、材料性能、装配质量以及包装标识等。外观质量检查在适宜的照明条件下进行,使用目视或低倍放大镜检查锤头表面是否存在裂纹、气孔、毛刺、锈蚀、镀层剥落等缺陷。对于整体式硬质合金锤头,表面允许存在轻微的烧结痕迹或磨削纹路,但不得有明显的凹坑或划伤。对于复合式锤头,钎焊区域应检查是否存在明显的钎料溢流或未填满现象,硬质合金作业端与钢基体的结合处应无可见缝隙。外观质量检查通常采用抽样检验的方式,抽样方案根据产品的质量稳定性确定,检验水平一般选用一般检查水平 II 级,合格质量水平根据缺陷的严重程度划分为不同等级。

尺寸精度和几何公差的检测是成品验收的技术核心。检测工具包括游标卡尺、千分尺、万能角度尺、轮廓仪和三坐标测量机等。对于整体式锤头,主要检测尺寸包括装配段直径、装配段长度、锤头总长度、尖锥锥角和尖部圆弧半径。对于复合式锤头,除了上述与作业端相关的尺寸外,还需检测硬质合金作业端的伸出长度、作业端轴线与基体基准面的同轴度以及基体上与锤柄配合部位的尺寸。尺寸检测通常采用抽样检验的方式,对于关键尺寸(如装配段直径)可能要求实施百分之百检测。检测结果的判定依据是设计图纸上标注的公差范围,任何一项尺寸超差均构成不合格。

材料性能和装配质量的验收需要结合破坏性试验和非破坏性检测两种方式。硬质合金的硬度和密度检测可以从每批次产品中抽取样品进行,硬度采用洛氏硬度 HRA 标尺测定,密度采用排水法测定,测定结果需要符合相应牌号的技术要求。对于复合式锤头,钎焊接头的强度可通过抽样进行剪切试验或拉脱试验进行评价,试验时应记录破坏载荷和破坏位置,破坏发生在硬质合金内部或基体内部而非钎焊接头界面处时,通常认为接头的强度高于母材,满足使用要求。对于整体式锤头与锤柄的装配质量,可通过抽样进行拉拔试验和扭转试验来验证连接的可靠性。包装和标识的检查包括产品在包装盒内的固定方式、包装材料的防护性能、产品标识的清晰度和准确性以及随附的产品合格证和使用说明书的完整性。

5.5 典型加工缺陷分析与整改优化

在硬质合金安全锤头的制造过程中,由于原料、工艺或操作等多种因素的影响,不可避免地会出现一定比例的加工缺陷。对这些缺陷进行系统分析,找出其产生的根本原因,并制定针对性的整改方案,是持续改进产品质量的重要途径。

5.5.1 原料配比不当引发的缺陷及整改方案

原料配比不当是硬质合金安全锤头制造过程中较为常见的缺陷来源。这类缺陷通常表现为产

品的硬度、韧性或耐磨性偏离设计要求，且往往具有批次性的特征——即同一批混合粉末生产的锤头表现出相似的性能偏差。根据缺陷的不同，可以将其区分为钴含量偏差缺陷、碳含量偏差缺陷以及杂质污染缺陷三种主要类型，每种类型的缺陷成因和整改方案各有侧重。

钴含量偏差缺陷表现为产品的硬度与韧性之间的平衡关系偏离设计预期。当实际钴含量高于名义值时，硬质合金的硬度偏低，锤头尖端在使用过程中容易发生塑性变形或过快磨损，破玻效率下降；当实际钴含量低于名义值时，材料的韧性储备不足，锤头在冲击载荷下发生崩裂的风险增加。导致钴含量偏差的原因主要包括配料称量误差、混合过程中钴粉的损失或偏析、以及烧结过程中钴的挥发。针对称量误差，整改方案包括升级称量设备的精度等级、对称量设备进行更频繁的校准、以及引入双人复核或自动配料系统以减少人为失误。针对混合过程中的偏析问题，可以优化球磨工艺参数（如适当延长球磨时间、调整球料比），并在混合后的粉末中加入适量的成型剂以增加颗粒间的粘附力，降低密度偏析的倾向。针对烧结过程中的钴挥发，可以在烧结工艺中适当增加钴的补偿加入量，补偿值可通过对比烧结前后钴含量的变化试验确定，通常在百分之零点一至百分之零点三之间。

碳含量偏差缺陷表现为硬质合金中出现脱碳相或渗碳相。碳含量过低时，硬质合金中会形成 η 相 ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 或 $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$)，这种相呈脆性，会显著降低材料的强度和韧性，锤头在使用过程中容易发生脆性断裂。碳含量过高时，硬质合金中出现游离石墨，游离石墨以石墨片的形式分布在材料内部，割裂了碳化钨骨架的连续性，同样降低了材料的强度。碳含量偏差的原因包括碳化钨粉末本身的碳含量波动、混合过程中碳的损失或污染、以及烧结气氛的碳势控制不当。整改方案需要从源头控制和过程监控两方面入手。源头控制方面，加强对碳化钨原料的入厂检验，每批次碳化钨的总碳含量和游离碳含量均需符合采购技术条件，游离碳含量通常要求低于百分之零点一。过程监控方面，在烧结炉内安装氧探头或碳势传感器，对保护气氛的碳势进行实时监测和自动调节，对于真空烧结炉则需严格控制炉内真空度和升温速率，避免高温下硬质合金表面的脱碳反应。当检测到碳含量偏离时，可以通过调整混合粉末中碳化钨与钴的比例或在粉末中加入适量的碳黑或钨粉进行碳补偿。

杂质污染缺陷表现为硬质合金中存在非预期的夹杂物或异常相。常见杂质元素包括铁、铝、硅、硫、磷等，这些杂质可能来源于原料粉末、球磨介质、磨损的模具或烧结炉内的污染环境。杂质的存在形式多样，可能以单质颗粒、氧化物或化合物的形态分布在材料内部，成为应力集中源或裂纹萌生点。整改方案包括建立严格的异物控制体系，具体措施包括：对原料粉末进行磁选或筛分处理，去除粗颗粒和金属夹杂物；定期检查球磨罐和球磨介质的磨损情况，及时更换过度磨损的部件；在混合和压制工序中保持良好的清洁卫生，避免不同牌号或不同材料的交叉污染；对烧结炉进行定期清洗和维护，清除炉内的残留物和挥发物。对于已经发生杂质污染的产品，如果污染程度较轻，可以通过后续加工将污染层去除；如果污染程度较重或分布范围较广，则该批次产品通常难以挽救，需要做报废处理并对污染源进行彻底排查。

5.5.2 烧结工艺瑕疵导致的产品失效优化

烧结工艺瑕疵是硬质合金安全锤头制造过程中的另一类重要缺陷来源。与原料配比不当导致的缺陷不同，烧结工艺瑕疵往往表现为产品微观组织异常、尺寸不一致或性能波动，且缺陷

的分布可能呈现出与烧结炉内位置相关的规律性。烧结工艺瑕疵的主要类型包括烧结体密度不足、晶粒异常长大、烧结变形与开裂、以及表面脱碳或渗碳等，每种类型都需要针对性的优化措施。

烧结体密度不足表现为产品实际密度低于牌号标准要求的下限。密度不足的硬质合金内部存在较多的残留孔隙，材料的硬度和抗弯强度均会下降。导致密度不足的原因包括烧结温度偏低、保温时间不足、压坯密度偏低、或烧结气氛的还原能力不足。在整改优化时，首先需要确认烧结温度的真实值，通过对烧结炉进行定期测温校验，排除测温系统误差的可能性。如果烧结温度确实偏低，可按照一定的温度增量（如 10℃ 至 20℃）逐步上调烧结温度，每次调整后对烧结体的密度和硬度进行检测验证，直至达到目标性能范围。保温时间的调整也是一个优化方向，当烧结温度受设备能力限制难以进一步提高时，适当延长保温时间可以在一定程度上提高致密度。压坯密度偏低的问题则需要追溯压制工序，检查压制压力是否足够、模具配合是否合理、粉末流动性是否良好。对于真空烧结炉，需要确保炉内的真空度达到要求，以保证钴在液相状态下的充分流动和排气。

晶粒异常长大表现为碳化钨颗粒尺寸明显大于正常晶粒度范围，部分晶粒尺寸可达正常值的数倍甚至数十倍。异常长大的晶粒破坏了材料的组织均匀性，在晶粒内部和晶界处容易产生微裂纹，降低材料的强度和韧性。导致晶粒异常长大的原因主要包括烧结温度过高、保温时间过长、碳化钨粉末粒度分布不当、或混合粉末中存在局部碳含量偏低区域。整改方案需要从多个方面入手。控制烧结温度和保温时间是最直接的措施，可以适当降低烧结温度（如降低 10℃ 至 20℃）或缩短保温时间（如缩短百分之十至三十），在保证致密化的前提下抑制晶粒的长大倾向。对于碳化钨粉末粒度过细或粒度分布过窄的情况，可以掺入适量的粗颗粒碳化钨粉末，形成双峰分布的粒度组成，这种粒度组合有助于抑制晶粒在烧结过程中的异常长大。在混合粉末中加入微量的晶粒长大抑制剂（如碳化钒或碳化铬），可以进一步提高材料的抗晶粒粗化能力。晶粒异常长大的问题通过金相组织观察可以准确判断，整改措施的效果也需要通过金相检验进行验证。

烧结变形与开裂是较为严重的一类烧结工艺瑕疵，直接导致产品报废。变形表现为锤头的几何形状发生扭曲或尺寸超差，开裂表现为锤头内部或表面出现可见的裂纹。导致变形和开裂的原因包括压坯密度分布不均匀、升温或冷却速度过快、压坯内部存在成型剂残留、或烧结舟的支撑方式不合理。整改方案需要从压制和烧结两个环节协调进行。在压制环节，通过优化模具设计和压制方式（如采用双向压制或浮动模压）改善压坯的密度分布均匀性。在烧结环节，减缓升温速率，特别是在成型剂挥发的温度区间（约 200℃ 至 400℃），可设定保温平台使成型剂缓慢挥发，避免因气体快速逸出导致压坯开裂。在冷却阶段，适当降低冷却速度，特别是通过相变温度区间时，可以减小因热应力引起的变形和开裂风险。烧结舟的支撑方式需要确保压坯在烧结过程中受力均匀，避免局部悬空或单点支撑。对于形状复杂的整体式锤头，可以采用在烧结舟上铺设与锤头形状相匹配的支撑垫片，使锤头在自重作用下均匀收缩。

5.5.3 表面处理缺陷的修正与工艺改进

表面处理缺陷是指硬质合金安全锤头在经过抛光、强化或防腐处理工序后，表面出现的质量不合格现象。这类缺陷虽然不一定影响锤头的核心使用性能，但可能影响产品的外观质量、

耐腐蚀能力或长期使用的可靠性。表面处理缺陷的主要类型包括抛光过度与尖部变形、涂层剥落与结合力不足、及电镀层质量缺陷等，每种缺陷都有其特定的修正方法和工艺改进方向。

抛光过度与尖部变形是硬质合金锤头抛光工序中容易出现的问题。由于硬质合金材料硬度高，抛光操作中操作人员为了追求表面光洁度，可能过度延长抛光时间或施加过大的抛光压力，导致锤头尖端的几何形状发生改变。尖部圆弧半径增大，破玻时应力集中效果减弱；严重时尖端可能出现明显的圆钝甚至平台状特征。对于抛光过度的产品，如果尖端变形程度尚在可接受范围内，可以通过后续的轻度返修抛光进行形状修正，但此操作需要经验丰富的操作人员谨慎进行。如果变形程度已经超出设计公差范围，则该产品难以修复，需要做降级使用或报废处理。工艺改进的方向包括：在抛光工序前明确设定尖部圆弧半径的控制范围，并配备专用的轮廓测量工具进行过程检验；采用半自动或全自动抛光设备替代纯手工操作，通过设备的机械限位和工艺参数控制来限制抛光余量；在抛光工序中采用分段式加工，每完成一段加工后进行尺寸检验，避免一次抛光过度。

涂层剥落与结合力不足是表面强化处理工艺中的常见缺陷。物理气相沉积或化学气相沉积涂层与硬质合金基体之间的结合力取决于表面清洁度、基体表面状态以及沉积工艺参数。当基体表面存在油污、氧化层或微观裂纹时，涂层与基体的结合力会明显下降，在使用过程中涂层容易发生剥落。涂层剥落后暴露出的基体表面失去了强化层的保护，耐磨性下降。针对涂层剥落问题，修正方案包括：对于刚完成涂层且剥落面积较小的产品，可以进行重新涂层处理，但需要在重新涂层前彻底去除原有的涂层和表面污染物；对于剥落严重或已进入使用阶段的产品，修正难度较大。工艺改进的方向包括：强化涂层前的基体表面清洗工序，采用超声波清洗加离子轰击的组合方式，确保表面达到原子级清洁；优化基体表面的粗糙度，适当的表面粗糙度（通常 Ra 值在 0.2 微米至 0.4 微米之间）有利于涂层的机械嵌合，但过高的粗糙度可能导致涂层厚度不均匀；控制沉积工艺参数，确保涂层生长过程中的应力和组织状态处于优化区间。

电镀层质量缺陷主要出现在复合式锤头的钢基体表面。常见缺陷包括镀层起泡、结合力差、厚度不均匀以及局部漏镀等。镀层起泡通常在电镀后或存放一段时间后出现，表现为镀层表面局部隆起形成的泡状结构，气泡破裂后露出基体金属。起泡的原因主要是镀前处理不彻底，基体表面存在油污或氧化膜未被完全去除，电镀过程中这些污染物所在区域无法形成良好的镀层结合，后续产生氢气析出或腐蚀产物积累导致镀层隆起。工艺改进的方向包括：优化镀前处理的工艺流程，采用化学脱脂、电化学脱脂和酸洗活化相结合的预处理方案，并在每道工序后设置水洗和干燥环节；加强镀前处理的在线检验，如采用水膜连续性测试法检查表面亲水性，水膜能够在清洁表面保持三十秒以上不破裂时表明表面清洁度良好。厚度不均匀的问题可以通过优化电镀槽的电场分布、增加辅助阴极或调整挂具设计来改善。局部漏镀的原因可能是零件表面存在遮蔽物、气泡附着或电流密度过低，通过改进挂具设计、添加润湿剂或增加搅拌强度等措施可以减少漏镀的发生。对于已经出现电镀缺陷的产品，可以进行退镀后重新电镀处理，但退镀过程需要控制时间以避免过度腐蚀基体。

5.6 批量生产稳定性与工艺一致性控制

批量生产稳定性与工艺一致性控制是硬质合金安全锤头从试制阶段转入规模化生产后面临

版权与免责声明

的核心质量管理课题。与单件或小批量生产不同，批量生产需要在较长时间周期内、不同生产条件下持续产出符合质量要求的产品。工艺参数的波动是客观存在的，控制的目标不是完全消除波动，而是将波动限制在可接受的范围内，并确保产品的质量特性在统计意义上保持稳定。

5.6.1 批量生产工艺参数波动管控

批量生产工艺参数波动管控是指通过统计过程控制方法，对硬质合金安全锤头制造过程中的关键工艺参数进行实时监控和分析，识别异常波动并及时采取干预措施的管理体系。与单次工艺调整不同，波动管控强调的是持续性和预防性，即在质量问题的萌芽阶段就发现并消除异常因素。

工艺参数波动管控的第一步是识别需要监控的关键工艺参数。对于硬质合金安全锤头的制造过程，需要监控的参数包括：混合工序中的球磨时间和球料比，压制工序中的压制压力和保压时间，烧结工序中的升温速率、烧结温度、保温时间和冷却速度，以及钎焊工序中的钎焊温度、保温时间和冷却方式。这些参数对产品质量具有显著影响，且在生产过程中容易受到设备状态、环境条件和人为操作等因素的影响而发生波动。对于每一个关键参数，需要设定合理的控制上下限，控制限的宽度需要基于工艺能力指数和实际生产条件确定，过宽的控制限无法有效发现异常，过窄的控制限则可能导致过多的虚报警报。

工艺参数波动的监控采用控制图方法。控制图以时间为横坐标，以工艺参数的测量值为纵坐标，同时绘制中心线、上控制限和下控制限。每次生产时对该工艺参数进行测量并在控制图上描点，当点落在控制限之外或出现特定的异常模式（如连续七点上升或下降、连续十一点中十点落在中心线一侧等）时，表明过程中存在异常因素，需要立即停止生产并进行排查。对于烧结温度这类关键参数，可以采用在线记录仪自动采集温度数据并生成实时控制图，减少人工记录的延迟和误差。控制图的解读需要结合过程知识，不能单纯依赖统计规则，有些异常模式虽然在统计上显著，但从工程角度判断可能不需要立即干预，反之有些统计上不显著的细微变化可能预示着设备性能的缓慢退化。

当监控发现工艺参数异常波动时，需要按照预设的响应程序进行处理。响应程序包括四个步骤：确认异常、查找原因、采取措施和验证效果。确认异常是指检查测量数据是否准确、测量设备是否正常，排除因测量误差导致的虚假异常。查找原因需要组织相关技术人员对异常发生时段和设备状态、原材料批次、操作人员、环境条件等进行回顾分析，必要时进行分层调查。采取措施针对已识别的原因进行纠正，例如发现烧结温度波动是由于热电偶接触不良所致，则需更换或重新安装热电偶。验证效果是指在采取措施后继续监控该工艺参数，确认其回归受控状态。对于频繁出现的异常波动，需要进行深层次的系统改进，如设备升级、工艺改型或操作培训。所有异常事件及其处理过程应记录在案，作为后续工艺优化和管理评审的依据。

5.6.2 批次产品质量一致性校准方法

批次产品质量一致性校准方法是指通过系统性的检测、分析和调整手段，使不同生产批次的

硬质合金安全锤头在性能指标上保持稳定和一致的技术措施。与工艺参数波动管控侧重于过程不同，批次一致性校准侧重于结果，即通过对成品质量的检测和评价，发现批次间的系统偏差，并通过调整前道工序的工艺参数来消除这种偏差。

批次产品质量一致性的评价需要建立统一的检测标准和抽样方案。检测项目应包括硬度、密度、尺寸和外观等关键质量特性，抽样方案应具有代表性，能够反映该批次产品的整体质量水平。对于每个批次，计算各检测项目的平均值、标准差和极差，并绘制批次间趋势图。当某批次的平均值与历史平均值出现系统性偏离时，表明该批次产品的性能发生了整体偏移，需要进行原因分析。当某批次的标准差或极差显著大于历史水平时，表明该批次产品的一致性较差，可能存在混合不均匀、工艺稳定性不足或设备状态异常等问题。

批次间系统偏差的校准需要从原材料批次差异和工艺参数漂移两个方面入手。原材料批次差异是导致产品性能波动的重要原因，不同批次的碳化钨粉末在粒度分布、纯度、颗粒形貌等方面可能存在差异。为了减小这种差异的影响，可以采用“大批量混料”的策略，即将多个批次的碳化钨粉末按一定比例混合后使用，使混合粉的总体性能趋于稳定。同时，建立碳化钨粉末的批次数据库，记录每批次粉末的关键性能指标（如费氏粒度、总碳含量、氧含量）以及使用该批次粉末生产的锤头的性能检测结果，通过统计回归分析建立粉末性能与产品性能之间的关系模型，用于预测和调整。当某一新批次的粉末指标偏离历史范围时，可以根据模型预测其对产品性能的影响，并预先调整工艺参数进行补偿。

工艺参数漂移是导致批次间系统偏差的另一类原因。烧结炉在使用过程中，热电偶的老化、加热元件的衰减、炉膛内壁的结垢等因素都可能导致实际炉温与显示温度之间的偏差逐渐增大，这种偏差是缓慢而累积的，容易被忽视。为了校正工艺参数漂移，需要建立定期的设备校准和工艺验证制度。对于烧结炉，每季度或每半年进行一次炉温均匀性测试，使用独立的测温装置（如黑体热电偶或测温环）对炉膛内不同位置的温度进行测量，与设备显示温度进行对比，如果偏差超过允许范围则对温控系统进行校准或修正。同时，设置标准样件，每批次烧结时将标准样件随炉烧结，通过对标准样件的硬度和密度检测来验证烧结工艺的稳定性。标准样件的检测结果出现趋势性变化时，即使仍在合格范围内，也提示烧结工艺可能发生了缓慢漂移，需要进行预防性调整。



中钨智造硬质合金安全锤头

第六章 硬质合金安全锤头的性能表征

6.1 硬质合金安全锤头的硬度表征

硬度是硬质合金安全锤头材料性能中最为基础的指标，它反映了材料抵抗局部压入和塑性变形的能力。对于安全锤头而言，足够的硬度是保证其在玻璃表面形成有效应力集中点的前提条件。

6.1.1 硬度测试标准与检测设备

硬质合金安全锤头的硬度测试主要采用洛氏硬度 A 标尺 (HRA)，这是硬质合金行业应用较为广泛的硬度测试方法。国家标准 GB/T 3849.1015《硬质合金 洛氏硬度试验(A 标尺) 第 1 部分：试验方法》对硬质合金洛氏硬度试验的原理、试验设备、试样要求、试验程序及结果表示作出了明确规定。该标准适用于硬质合金洛氏硬度 (A 标尺) 的测定，是硬质合金安全锤头硬度检测的规范性依据。

洛氏硬度 A 标尺测试的原理是使用金刚石圆锥压头 (锥角 120° ，尖端球面半径 0.2 mm)，在初试验力和主试验力的先后作用下压入试样表面，通过测量在规定条件下的压入深度差值来评定硬度值。A 标尺的总试验力为 588.4 N (60 kgf)，这一载荷水平适用于高硬度材料的测试，能够避免压入过深导致的试样损坏或压头损伤。与洛氏 C 标尺 (HRC，适用于淬火钢) 相比，A 标尺的载荷较小，更适合硬质合金这类高硬度、脆性材料的硬度检测。

硬度测试设备主要包括洛氏硬度计和配套的金钢石压头。洛氏硬度计按照加载方式可分为手动型和电动型，电动型设备能够自动完成加荷、保荷和卸荷过程，减少了人为操作误差。硬度计的精度需要定期使用标准硬度块进行校验，标准硬度块的标称值应覆盖待测试样的硬度范围。对于硬质合金安全锤头这类小尺寸试样，测试时需要使用专用的试样台或夹具将锤头可靠固定，防止在压入过程中发生移动或倾斜。测试位置的选择应避开锤头的边缘区域和圆锥顶端的曲率变化较大处，通常选取圆锥作业端的侧面或装配段的端面作为测试面。

除了常规的洛氏硬度测试外，维氏硬度测试在某些研究场合也有应用。维氏硬度采用 136° 金刚石四棱锥压头，试验力可根据试样尺寸和厚度在较小范围内选择。维氏硬度的压痕为正方形，便于在显微镜下测量对角线长度，对于组织不均匀的硬质合金材料，维氏硬度测试可以评估局部区域的硬度差异。但由于维氏硬度测试操作相对复杂、效率低于洛氏硬度，在批量生产中洛氏硬度仍为主流检测方法。

6.1.2 硬度分布规律与表征结果分析

硬质合金安全锤头的硬度分布规律受到材料成分、烧结工艺和几何形状的综合影响。在同一锤头产品的不同部位，硬度值可能存在一定差异，这种差异的分布规律对于理解材料组织的均匀性和评估产品的整体性能具有参考价值。

从材料成分的角度来看，钴含量是影响硬度的首要因素。随着钴含量的增加，硬质合金的硬

度呈下降趋势，这是因为钴作为相对较软的粘结相，其体积分数的增加意味着硬质相所占比例的减少。YG6 牌号（钴含量约 6%）的硬度通常在 HRA91 至 92 之间，YG8 牌号（钴含量约 8%）的硬度约为 HRA89 至 90，YG10X 牌号（钴含量约 10%）的硬度约为 HRA88 至 89。这一关系表明，硬度与钴含量之间存在负相关关系，在硬质合金安全锤头的材料选择中，应根据使用场景对硬度和韧性的不同侧重进行权衡。对于应急破玻型安全锤头，较高的硬度有利于保持尖端锐利度，因此倾向于选用 YG6 或 YG6X 牌号；对于工业加工型锤头，需要兼顾韧性，YG8 牌号是较为常见的选择。

从碳化钨晶粒度的角度来看，细晶粒硬质合金的硬度高于粗晶粒硬质合金。细晶粒碳化钨（晶粒度在 $0.5\ \mu\text{m}$ 至 $1.0\ \mu\text{m}$ 之间）具有更大的晶界面积，晶界对位错运动的阻碍作用更强，从而提高了材料的抗变形能力。研究表明，晶粒尺寸控制在 $0.5\ \mu\text{m}$ 至 $1.0\ \mu\text{m}$ 范围内时，硬质合金的硬度可达到 HV 1800 至 2200 的水平。粗晶粒硬质合金（晶粒度在 $3.0\ \mu\text{m}$ 以上）由于晶界强化效应减弱，硬度相对较低。在烧结过程中，晶粒长大抑制剂（如碳化钒 VC，添加量约 0.2%）的加入可以有效抑制碳化钨晶粒的异常长大，有助于获得均匀细小的晶粒组织。

从硬度分布的角度来看，由于粉末冶金成型过程中压坯密度可能存在分布不均，烧结后不同部位的硬度也会呈现一定差异。通常来说，锤头的尖锥作业端由于截面尺寸较小，在压制过程中密度可能低于装配段，导致烧结后该区域的硬度偏低。然而，尖锥作业端恰恰是对硬度要求最高的部位，这种硬度分布特征与功能需求之间存在一定程度的错配。为了改善这一状况，可以在模具设计中优化压制方式（如采用双向压制或浮动模压），减小压坯不同部位的密度差异。硬度测试结果的统计分析包括计算批次产品的平均值、标准差和极差，通过与历史数据和工艺规格限进行对比，评估硬度指标的稳定性和一致性。

6.2 硬质合金安全锤头的耐磨表征

耐磨性是硬质合金安全锤头与使用寿命直接相关的性能指标。耐磨表征的目的是在可控的实验室条件下模拟锤头在使用过程中的磨损行为，通过定量测量磨损量来评价材料的耐磨性能，并建立与材料成分、组织和工艺之间的关联。耐磨表征涉及磨损试验方案的设计、工况条件的设定以及评价指标的确定等多个方面。

6.2.1 磨损试验方案与工况设定

硬质合金安全锤头的磨损试验方案需要根据锤头的实际使用工况进行设计。磨损试验的本质是通过磨料与试样表面的相对运动，使试样表面发生材料损失，通过测量材料损失量来评价耐磨性能。根据磨料与试样接触方式的不同，磨损试验可以分为干式磨损试验和湿式磨损试验，以及高应力磨损试验和低应力磨损试验等不同类型。

ASTM G65 标准是硬质合金材料干式磨损试验中应用较为广泛的方法之一。该试验使用橡胶轮或钢轮带动磨料（通常为石英砂或氧化铝颗粒）在试样表面滑动，通过控制载荷、滑动距离和磨料供给量来模拟磨粒磨损条件。对于硬质合金安全锤头的耐磨表征，载荷通常设定为 130 N，滑动距离可根据试验目的选择 4300 m 或更长的行程。试验过程中，试样被压在旋转

的轮子上，磨料通过料斗供给并带入试样与轮子之间的接触区域，在轮子的旋转带动下磨料对试样表面产生切削和划擦作用，导致材料损失。

ASTM B6113 标准是高应力磨损试验的方法规范，适用于硬质合金、陶瓷和金属陶瓷等高硬度材料。与 ASTM G65 的低应力磨损不同，ASTM B611 采用钢轮强制磨料与试样接触，通过较高的接触压力模拟磨料颗粒在高应力条件下发生断裂的磨损环境。该标准使用含氧化铝颗粒的水性浆料作为磨料介质，试验过程中试样浸没在浆料中，旋转的钢轮将磨料压向试样表面。这种高应力磨损条件更接近工业加工中硬质合金工具的实际服役状态，对于评估硬质合金安全锤头在高载荷、高冲击条件下的耐磨性能具有参考价值。

除了标准化的磨损试验方法外，针对硬质合金安全锤头的特定应用场景，还可以设计工况模拟试验。例如，将硬质合金锤头试样安装在专用的冲击磨损试验机上，以设定的冲击频率和冲击能量反复撞击玻璃板或混凝土块，通过测量单位时间内锤头的质量损失或尖端半径变化来评价其耐磨性能。这种工况模拟试验虽然标准化程度较低，但更贴近实际使用条件，其结果对于产品改进具有直接指导意义。试验方案的设计需要明确以下参数：磨料类型和粒度、施加的载荷、相对运动速度、试验持续时间以及环境条件（温度、湿度、介质等）。

6.2.2 磨损量与耐磨性能评价指标

磨损量是评价硬质合金安全锤头耐磨性能的核心指标，其测定方法包括质量损失法、体积损失法和几何尺寸变化法三种。

质量损失法是最常用的磨损量评价方法。在磨损试验前后分别对试样进行清洗、干燥和称量，使用精度为 0.1 mg 或更高的分析天平测定试样的质量，两次称量的差值即为磨损造成的质量损失。质量损失法操作简便、精度较高，适用于质量较大的试样。对于硬质合金安全锤头这类小尺寸试样，质量损失的绝对值通常在毫克级别，因此对称量精度要求较高。YG6 牌号硬质合金在 ASTM G65 标准试验条件下的干式磨损率约为 $0.05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ，YG8 牌号约为 $0.06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 。这一数据表明，钴含量较低的 YG6 具有更好的耐磨性能，这与硬度与耐磨性之间的正相关关系是一致的。

体积损失法通过测量磨损后试样表面形成的磨痕尺寸来计算体积损失。对于平面试样，可以通过轮廓仪测量磨痕的深度和宽度，代入几何公式计算磨痕的横截面积，再乘以磨痕长度得到体积损失。体积损失法的优点是不受材料密度波动的影响，适用于密度差异较大的材料对比。对于硬质合金安全锤头的尖锥部位，由于几何形状复杂，体积损失的测量较为困难，通常采用质量损失法并结合材料的理论密度进行换算。

耐磨性能评价指标除了绝对磨损量外，还包括磨损率这一相对指标。磨损率定义为磨损体积与法向载荷和滑动距离的乘积之比，单位为 $\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 。磨损率消除了载荷和滑动距离对磨损量的影响，使得不同试验条件下获得的磨损数据具有可比性。对于硬质合金安全锤头而言，磨损率越低，表明材料的耐磨性能越好。研究表明，晶粒尺寸控制在 $0.5 \mu\text{m}$ 至 $1.0 \mu\text{m}$ 范围内、钴含量控制在 6% 至 8% 范围内的硬质合金，其磨损率可以保持在 $0.06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ 以下。磨损后的表面形貌观察也是耐磨表征的重要组成部分，通过扫描电子显微镜观察磨损表面的

版权与免责声明

微观形貌，可以识别磨损机制（如磨粒磨损、粘着磨损或疲劳磨损），为耐磨性能的优化提供微观依据。

6.3 硬质合金安全锤头的韧性表征

韧性是硬质合金安全锤头材料抵抗断裂能力的重要指标。与硬度和耐磨性不同，韧性反映的是材料在裂纹萌生和扩展过程中的能量吸收能力。对于承受冲击载荷的安全锤头而言，足够的韧性储备可以降低锤头在使用过程中发生崩裂或整体断裂的风险。韧性的表征涉及断裂韧性测试方法的选取、测试结果的分析解读以及影响因素的识别。

6.3.1 断裂韧性测试试验方法

断裂韧性 (K_{IC}) 是评价硬质合金材料抗裂纹扩展能力的标准参数，它表征材料抵抗裂纹失稳扩展的能力，单位为 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。对于硬质合金这类脆性材料，断裂韧性的测试方法不同于金属材料，需要采用专门针对高硬度材料的试验规范。

帕姆奎斯特压痕法 (Palmqvist method) 是硬质合金断裂韧性测试中应用较为广泛的方法，已形成国际标准 ISO 28079:2009。该方法的原理是：使用维氏硬度压头在试样表面压入一个压痕，压痕的四个角区域由于应力集中会产生从压痕角点向外辐射的裂纹。在显微镜下测量裂纹的长度，根据压痕载荷和裂纹长度的关系计算出断裂韧性值。帕姆奎斯特法的优点在于试样制备简单、所需试样尺寸小，适用于小尺寸硬质合金产品（如安全锤头）的断裂韧性评价。该方法的局限性在于仅适用于硬度较高的硬质合金 (HV30 大于 1300)，对于韧性较高的材料可靠性有所下降。

Chevron 缺口弯曲法是另一种断裂韧性测试方法，通过在三点弯曲试样上加工一个 V 形缺口 (Chevron 缺口)，在弯曲加载过程中从缺口尖端萌生裂纹并测量临界载荷，进而计算断裂韧性。与压痕法相比，Chevron 缺口法的测试结果更为准确，适用于宽韧性范围的硬质合金材料，但缺点是需要制备较大的试样且加工难度较高。对于硬质合金安全锤头这类小型产品，Chevron 缺口法的应用受到试样尺寸的限制，通常仅在研发阶段或对标分析时采用。

在断裂韧性测试中，试样的制备质量对测试结果有重要影响。试样表面需要经过研磨和抛光处理，去除加工损伤层，获得平整、无划痕的测试面。压痕测试时需要注意压头与试样表面的垂直度，以及压痕位置的选取（应避开试样边缘和明显缺陷区域）。裂纹长度的测量需要使用高倍率光学显微镜或扫描电子显微镜，测量每个压痕的四条裂纹长度，取平均值后代入公式计算。对于 YG6 牌号硬质合金，其断裂韧性通常在 $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 左右；YG8 牌号由于钴含量较高，断裂韧性可达 $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 左右。这一数据反映了钴含量对韧性的增强作用。

6.3.2 韧性优劣影响因素与表征分析

硬质合金安全锤头韧性的优劣受到多个因素的共同影响，其中钴含量、碳化钨晶粒度和微观组织均匀性是三个主要的影响因素。

版权与免责声明

钴含量对韧性的影响表现为正相关关系。钴作为粘结相，通过塑性变形吸收裂纹扩展的能量，起到延缓裂纹扩展的作用。当钴含量从 6% 增加到 8% 时，断裂韧性可以提高约 20%。这是由于钴粘结相体积分数的增加，使得裂纹扩展路径中遇到粘结相的概率增大，裂纹偏转和桥接机制的作用更为显著。然而，钴含量的增加会带来硬度的下降，这一权衡关系是硬质合金设计中的核心矛盾。对于硬质合金安全锤头而言，应急破玻型产品更注重硬度和耐磨性，倾向于选择较低的钴含量（YG6）；工业加工型产品需要承受较大的冲击载荷，选择较高的钴含量（YG8 或 YG10X）有利于提高韧性。

碳化钨晶粒度对韧性的影响与对硬度的影响方向相反。粗晶粒硬质合金（晶粒度 3.0 μm 以上）的断裂韧性高于细晶粒硬质合金，这是因为粗大的碳化钨颗粒自身的断裂抗力较高，且在裂纹扩展过程中粗晶粒能够通过晶粒拔出效应吸收更多能量。研究表明，当晶粒尺寸超过 2 μm 时，硬质合金的韧性比细晶粒材料有显著提高。然而，粗晶粒带来的韧性改善是以硬度下降为代价的。在实际应用中，需要根据使用工况对硬度和韧性的侧重来选择合适的晶粒度范围。

微观组织均匀性对韧性的影响主要体现在钴分布的均匀性和碳化钨颗粒的形态特征上。钴分布不均匀时，富钴区域成为变形的优先位置，贫钴区域则成为裂纹萌生的薄弱环节，两者的共同作用导致材料整体韧性下降。碳化钨颗粒形态的不规则性（如出现异常长大的晶粒或尖角状的颗粒轮廓）也会在颗粒尖端产生应力集中，降低抗裂纹扩展能力。定量金相分析技术可用于评估硬质合金的晶粒度分布、钴分布均匀性等组织特征，为韧性表征提供微观层面的解释。通过对断裂韧性与微观组织参数的关联分析，可以识别影响韧性的关键组织因素，为工艺优化提供方向。

6.4 硬质合金安全锤头的抗冲击表征

抗冲击性能是硬质合金安全锤头在实际使用条件下抵抗冲击载荷作用的能力表征。与断裂韧性测试侧重于静态或准静态条件下的裂纹扩展行为不同，抗冲击表征更关注材料在高应变率条件下的动态响应。对于安全锤头这类承受瞬时冲击载荷的工具而言，抗冲击性能的表征对于评估其使用可靠性具有重要意义。

6.4.1 冲击载荷试验测试方案

硬质合金常温冲击韧性试验方法已形成国家标准 GB/T 1817017，该标准规定了硬质合金常温冲击韧性试验的原理、试验设备、试样制备、试验程序和结果处理方法。该标准适用于在常温条件下对硬质合金进行冲击韧性试验，是无缺口试样的冲击弯曲试验方法。标准规定了试样的尺寸要求、冲击试验机的技术参数以及冲击吸收能量的测定方法。

冲击韧性试验的基本原理是将标准尺寸的无缺口试样水平放置在试验机的支座上，使摆锤从设定高度自由下落，冲击试样的中部使其断裂，通过测量摆锤冲击前后的能量差来计算冲击吸收能量。对于硬质合金材料，由于试样通常不发生明显的塑性变形，冲击吸收能量主要对应于裂纹萌生和扩展所消耗的能量。冲击韧性的单位为焦耳（J），也可以除以试样的横截面积得到单位面积的冲击吸收能量（ J/cm^2 ）。

版权与法律责任声明

在硬质合金安全锤头的抗冲击表征中,可以根据产品特点和测试目的对标准试验方法进行适当调整。对于整体式硬质合金锤头,可以直接将锤头作为试样进行冲击试验,模拟实际使用中的锤击工况。试验时将锤头固定在冲击试验机的支座上,用摆锤冲击锤头的尖锥作业端,测量锤头断裂时的冲击吸收能量。对于复合式锤头,可以分别对硬质合金作业端和钎焊接头进行冲击试验,评价两者的抗冲击性能。冲击试验后需要对断口进行观察,区分脆性断裂区、韧性断裂区和界面脱粘区,分析失效的起始位置和扩展路径。

6.4.2 反复冲击下性能衰减表征分析

与单次冲击试验不同,硬质合金安全锤头在实际使用中可能承受多次冲击载荷,特别是在工业加工领域,锤头需要经受长期的反复冲击。反复冲击下的性能衰减表征旨在通过模拟实际使用工况,研究锤头在多次冲击作用下的性能变化规律,包括疲劳裂纹的萌生与扩展、表面损伤的累积以及最终失效的临界条件。

反复冲击试验可以采用落锤式冲击试验机或气动冲击试验机进行。试验时设定冲击能量、冲击频率和总冲击次数,定期取出试样进行检测,记录质量损失、硬度变化、表面形貌演变等参数。通过绘制这些参数随冲击次数的变化曲线,可以表征锤头性能衰减过程。试验参数的设定需要参考实际使用工况:冲击能量应根据安全锤头的标准使用方法确定,通常应急破玻璃场景的单次冲击能量较低,而工业加工场景的冲击能量较高;冲击频率反映了锤头的使用强度,可以根据目标应用场景的工作节拍进行设定。

反复冲击下的性能衰减表征可以揭示锤头的疲劳寿命和失效机理。对于硬质合金材料,虽然其塑性变形能力有限,但在循环冲击载荷作用下内部仍可能发生疲劳损伤的累积。损伤的早期表现形式包括表面微裂纹的形成、碳化钨颗粒的微崩以及粘结相的局部塑性变形。随着冲击次数的增加,微裂纹逐渐扩展连接,形成宏观裂纹,最终导致锤头崩缺或断裂。研究数据表明,YG8 牌号硬质合金在高频冲击条件下的疲劳寿命优于 YG6 牌号,这归因于较高钴含量带来的能量吸收能力提升。

反复冲击试验后的微观分析是理解性能衰减机理的重要手段。通过扫描电子显微镜观察冲击表面的形貌,可以识别疲劳辉纹、微裂纹网络和碳化钨颗粒的脱落特征。通过截面金相观察,可以评估亚表层损伤的深度和分布,了解裂纹扩展路径(沿晶断裂或穿晶断裂)。这些微观信息与宏观性能衰减数据的关联分析,有助于识别影响抗冲击性能的关键组织因素,为产品设计和工艺优化提供依据。对于复合式锤头,钎焊接头在反复冲击下的性能衰减也是重点考察内容,通过对比不同钎焊工艺条件下接头的疲劳寿命,可以评估钎焊质量对整体抗冲击性能贡献程度。

6.5 硬质合金安全锤头的抗压性能表征

抗压性能是硬质合金安全锤头在压缩载荷作用下抵抗变形和破坏的能力表征。与硬度测试反映材料表面抵抗局部压入的能力不同,抗压性能测试关注的是材料整体在单轴压缩状态下的力学响应。对于安全锤头而言,抗压性能的意义在于:当锤头以垂直方向冲击玻璃表面时,

版权与免责声明

锤头尖端承受的是压应力主导的载荷状态，足够的抗压强度是保证锤头在冲击过程中不发生压溃失效的前提条件。抗压性能的表征涉及静态抗压载荷测试方法的建立以及抗压变形量与承载性能的关联分析。

6.5.1 静态抗压载荷测试试验方法

硬质合金安全锤头的静态抗压载荷测试可参照 GB/T 3851《硬质合金 横向断裂强度试验方法》的基本原理进行适应性设计。横向断裂强度（抗弯强度）测试是通过三点弯曲加载测定硬质合金的抗弯能力，而抗压测试则需要采用压缩加载方式，两者的应力状态存在差异。对于安全锤头这类具有特定几何形状的产品，抗压测试需要根据锤头的实际受力特点设计专用的测试夹具和试验方案。

GB/T 3851 标准规定的抗弯强度测试是将试样置于两个支撑点上，在跨距中点施加集中载荷，使试样发生弯曲变形直至断裂。这一方法适用于评价硬质合金在弯曲应力下的断裂行为，但安全锤头在实际使用中以压缩受力为主，弯曲测试结果不能直接等同于抗压性能。因此，针对安全锤头的抗压表征，可采用轴向压缩试验方案：将整体式锤头或复合式锤头的硬质合金作业端朝上放置在压缩试验机的下压板上，上压板以设定的加载速率垂直向下施加压力，直至锤头发生压溃或达到预定载荷值。加载速率通常设定为 0.5 mm/min 至 2 mm/min，这一速率范围可以保证测试过程处于准静态加载状态，避免加载速率过快引起的动态效应干扰测试结果。

测试设备的选用对抗压测试结果的准确性具有影响。万能材料试验机是进行抗压测试的主要设备，其载荷测量精度应达到±1%，压板平行度偏差应控制在 0.02 mm 以内。对于硬质合金这类高强度材料，试验机的量程需要根据预估的破坏载荷进行选择，通常选用 100 kN 或更高量程的设备。测试夹具的设计需考虑锤头形状的问题：由于锤头的装配段通常为圆柱形，在压缩加载过程中容易发生侧向滑移或倾斜，因此需要在压板上设置 V 形槽或定制凹槽定位座，确保锤头在加载过程中保持轴线与加载方向一致。在压板与锤头接触面之间可放置薄的塑料片或铜片作为垫层，以减少压板与硬质合金表面之间的摩擦约束对测试结果的影响。

抗压测试的数据采集包括载荷-位移曲线的记录、最大载荷的读取以及破坏模式的观察。载荷-位移曲线由试验机的数据采集系统自动记录，曲线形态反映了材料在压缩过程中的变形行为：硬质合金属于脆性材料，其压缩曲线在弹性阶段呈线性上升，达到峰值载荷后通常发生突然的载荷跌落，表明材料发生了压溃或碎裂。最大载荷即为抗压破坏载荷，除以锤头尖端的横截面积可得到名义抗压强度。需要注意的是，由于锤头尖端的几何形状复杂，应力分布不均匀，计算得到的名义抗压强度与材料本征的抗压强度存在差异，因此在结果分析中应结合破坏形貌进行综合判断。

6.5.2 抗压变形量与承载性能分析

抗压变形量是衡量硬质合金安全锤头在压缩载荷作用下抵抗变形能力的重要参数。对于脆性材料而言，塑性变形阶段极短甚至不存在，抗压变形量的概念更多体现在弹性变形阶段的位移以及压溃发生前的临界变形量。抗压变形量的大小反映了材料在压缩应力场中的刚性程

度，同时也与锤头的几何设计存在关联。

在抗压测试过程中，载荷-位移曲线的线性段对应弹性变形阶段，该阶段的斜率反映了锤头的压缩刚度。对于相同几何形状的锤头，压缩刚度由硬质合金的弹性模量决定。钨钴类硬质合金的弹性模量通常在 500 GPa 至 650 GPa 范围内，远高于钢材的弹性模量（约 210 GPa），这意味着硬质合金锤头在相同载荷下的弹性变形量明显小于钢制锤头。这一特性对于安全锤头的使用具有重要意义：较小的弹性变形意味着冲击能量能够更有效地传递到玻璃表面，减少了能量在锤头自身变形过程中的耗散。

抗压承载性能的分析涉及破坏载荷和破坏模式的综合评价。硬质合金安全锤头在静态压缩下的破坏形式主要包括尖端压溃和整体开裂两种类型。尖端压溃表现为锤头尖部发生局部的材料碎裂，形成一个平顶状的压溃面，这一现象通常发生在载荷超过材料抗压强度但尚未引起整体断裂的情况下。整体开裂表现为锤头沿纵向或横向发生贯穿性裂纹，严重时锤头分裂为多个碎块。破坏模式的差异与材料的硬度-韧性平衡有关：硬度较高但韧性不足的牌号倾向于发生整体脆断，而韧性较好的牌号则可能先出现尖端压溃而后逐渐碎裂。通过对破坏试样的断口形貌观察，可以识别裂纹的萌生位置和扩展路径，为结构优化提供依据。

硬质合金材料的本征抗压强度远高于其抗弯强度和抗拉强度。技术资料显示，硬质合金的抗压强度可达到 6000 MPa 至 6500 MPa 的水平，抗弯强度则在 2800 MPa 至 3000 MPa 范围内。这一对比说明硬质合金在压缩应力状态下能够发挥其性能优势，而在拉伸或弯曲应力状态下则相对薄弱。这一特性为安全锤头的设计提供了启示：应尽可能使锤头在使用中处于压应力主导的受力状态，避免锤头承受弯曲或扭转力矩。在安全锤的实际使用中，当使用者以偏斜角度锤击玻璃时，锤头尖端会受到弯曲分量的作用，这种应力状态对硬质合金材料的挑战大于垂直冲击。因此，在产品设计和使用时，应强调垂直冲击的重要性，以充分发挥硬质合金的抗压性能优势。

6.6 硬质合金安全锤头的抗疲劳表征

抗疲劳性能是硬质合金安全锤头在循环载荷作用下抵抗性能衰减和疲劳破坏的能力表征。与静态载荷下的性能不同，疲劳性能关注的是材料在反复加载-卸载过程中的损伤累积和寿命表现。对于工业加工型硬质合金安全锤头，其在服役过程中需要承受成千上万次的循环冲击，疲劳性能关系到工具的使用寿命。

6.6.1 循环载荷疲劳试验方案设计

硬质合金安全锤头的疲劳试验方案需要根据产品的实际使用工况进行设计。疲劳试验的核心是在控制条件下对试样施加循环载荷，记录试样从开始加载到失效的循环次数，以此评价材料的抗疲劳能力。与金属材料不同，硬质合金属于脆性材料，其疲劳行为表现出低周疲劳特征，即疲劳寿命通常在 10^3 至 10^5 次循环范围内，且不存在明显的疲劳极限。

疲劳试验方案的设计需要考虑载荷类型、应力水平、加载频率和环境条件等多个参数。载荷类型方面，根据安全锤头的受力特点，可选择压缩-压缩循环加载模式，模拟锤头在反复锤

击过程中的受力状态。应力水平的设定通常以静态抗压强度为基准，选取一定比例的应力幅值进行测试，常见的应力比（最小应力与最大应力之比）设定为 0.1，以反映锤头在锤击后卸载再重新加载的受力过程。加载频率的选择需要兼顾试验效率和试样发热的控制，对于硬质合金这类热导率较高的材料，加载频率可设定在 10 Hz 至 30 Hz 范围内，但需要注意避免过高频率引起的试样温度升高对测试结果产生干扰。

疲劳试样的制备是试验方案设计中的重要环节。对于整体式硬质合金安全锤头，可以直接以成品锤头作为疲劳试样，这有利于获得与实际产品一致性的测试结果。测试时需要设计专用夹具将锤头固定，保证加载轴线与锤头轴线重合。对于研发阶段的材料筛选，也可以采用标准尺寸的试样进行疲劳测试，以消除几何形状对测试结果的影响。试样的表面状态对疲劳性能有显著影响，机械加工痕迹、表面划伤或微裂纹都可能成为疲劳裂纹的萌生源，因此试样表面应经过抛光处理，表面粗糙度 Ra 值控制在 $0.2 \mu\text{m}$ 以下。

试验过程的监测和数据记录是疲劳试验的重要组成部分。在试验过程中，需要实时监测试样的载荷、位移以及声发射信号等参数。载荷和位移数据用于验证试验条件的稳定性，声发射信号则可用于捕捉疲劳裂纹萌生和扩展的早期迹象。当试样发生完全断裂或载荷下降幅度超过设定阈值（如最大载荷的 30%）时，即判定试样失效，记录此时的循环次数作为疲劳寿命。对于未发生失效的试样，通常设定一个终止循环次数（如 10^6 次）作为运行终点。每组试验条件至少测试 5 个试样，以获得疲劳寿命的统计分布特征。

6.6.2 疲劳损伤机理与使用寿命表征

硬质合金的疲劳损伤机理与金属材料存在本质区别。对于以韧性变形为主的金属材料，疲劳损伤通常表现为位错累积、驻留滑移带形成以及裂纹的缓慢扩展，具有明显的塑性变形特征。而硬质合金作为脆性材料，其疲劳损伤机制主要表现为钴（钎）的循环塑性变形和碳化钨颗粒界面的逐渐弱化。在循环载荷作用下，钴粘相发生反复的塑性变形，导致位错密度增加和局部应力集中；当应力集中超过碳化钨颗粒或 WC/Co 界面的强度时，微裂纹在界面处萌生；随着循环次数的增加，微裂纹逐渐扩展连接，最终导致材料的宏观断裂。

疲劳寿命的表征通常采用 S-N 曲线（应力-寿命曲线）和疲劳极限两种方式。S-N 曲线以循环应力幅值为纵坐标、以疲劳寿命的对数为横坐标绘制，反映了不同应力水平下材料的疲劳寿命分布。研究表明，随着应力幅值的降低，硬质合金的疲劳寿命呈增加趋势，但不存在明显的水平渐近线，即不存在传统意义上的疲劳极限。这一特征意味着即使在较低的应力水平下，经过足够多次的循环加载后，材料仍有可能发生疲劳破坏。因此，在工业加工型安全锤头的设计中，不能简单地将静态强度除以安全系数作为设计依据，还需要结合预期的使用寿命进行疲劳校核。

影响硬质合金疲劳性能的因素包括钴含量、碳化钨晶粒度和残余应力状态等。钴含量的增加通常有利于提高疲劳寿命，因为钴粘相的塑性变形能力可以缓解循环载荷下的应力集中，延缓裂纹萌生。碳化钨晶粒度的影响表现为：细晶粒硬质合金的疲劳强度较高，这是由于细晶粒材料中裂纹扩展路径更为曲折，扩展阻力较大；但细晶粒材料的断裂韧性较低，一旦裂纹形成后扩展速度较快。残余压应力的存在有助于抑制疲劳裂纹的萌生和扩展，因此经过喷

版权与免责声明

丸强化处理的锤头往往表现出更优的疲劳性能。

硬质合金安全锤头的使用寿命表征需要结合具体的应用场景。对于工业加工型锤头，使用寿命通常以冲击次数或工作时间来衡量。在标准试验条件下，YG8 牌号硬质合金在循环冲击载荷下的疲劳寿命可达到 10^5 次以上。对于应急型安全锤头，虽然使用频率极低，但需要考虑长期储存过程中的材料老化和应力松弛问题。通过加速老化试验并结合疲劳性能测试，可以估算产品在储存状态下的性能保持期。疲劳测试结果的统计分析应提供平均值、标准差和置信区间，为产品质量评价和使用寿命预测提供定量依据。

6.7 硬质合金安全锤头的耐高温性能表征

耐高温性能是硬质合金安全锤头在高温环境或摩擦生热条件下保持力学性能的能力表征。硬质合金材料虽然具有较高的熔点和良好的热稳定性，但当使用温度超过一定范围后，其硬度、强度和抗氧化能力仍会发生不同程度的衰减。对于某些工业加工场景中的安全锤头，如高温炉窑检修工具或热态物料处理设备，耐高温性能表征具有重要意义。此外，在高速冲击条件下，锤头与玻璃或岩石的摩擦也可能产生局部高温，了解材料的高温性能有助于评估其在极端工况下的可靠性。

6.7.1 高温环境性能测试试验规范

硬质合金安全锤头的高温性能测试需要遵循相应的试验规范。国家标准 GB/T 7997017《硬质合金 性能试验方法》对硬质合金的高温维氏硬度测试作出了规定，为高温力学性能表征提供了方法依据。该标准规定高温硬度测试时，试样应在保护气氛或真空中加热至目标温度，以防止高温氧化对测试结果的干扰。测试温度可根据使用要求进行选择，常见的测试温度点包括 400°C 、 600°C 、 800°C 和 1000°C 。

高温硬度测试的试样制备需要满足特定要求。试样表面应经过磨平和抛光处理，表面粗糙度 R_a 值控制在 $0.05\ \mu\text{m}$ 以下，以保证在高温下压痕边界的清晰可辨。测试时，将试样与加热装置一同置于硬度计的工作平台上，待温度稳定至设定值后，在规定载荷下压入金刚石压头，保持一定时间后卸载，待冷却至室温后测量压痕对角线长度，计算硬度值。对于硬质合金材料，高温维氏硬度的测试载荷通常选用 $30\ \text{kg}$ ($294.2\ \text{N}$) 或 $10\ \text{kg}$ ($98.07\ \text{N}$)，保荷时间一般为 10 秒至 15 秒。

高温氧化性能测试是耐高温性能表征的另一重要方面。正在制定中的国家标准《硬质合金高温氧化性能试验方法》将为这一领域提供统一的测试规范。该标准计划规定在 500°C 至 1000°C 温度范围内进行等温氧化测试，试样为 $\phi 50\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ 的圆片，表面经磨平抛光处理。测试时，将试样在高纯氩气保护下以 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率加热至氧化温度，然后以 $100\ \text{mL}/\text{min}$ 的速率通入干燥空气或合成空气 ($\text{N}_2:\text{O}_2=80:20$)，保持规定时长后切换回氩气气氛冷却至室温。通过测量氧化前后单位表面积的质量变化来评价高温氧化性能，质量变化的计算精度要求达到 $\pm 0.01\ \text{mg}$ 。

除了标准化测试外，针对安全锤头的特定使用场景，还可以设计工况模拟测试。例如，将锤

版权与免责声明

头试样安装在旋转摩擦试验机上，以设定的转速和压力与玻璃或岩石对磨，通过测量摩擦系数、温度变化和磨损量来评价材料在摩擦热作用下的性能表现。这类模拟测试虽然标准化程度较低，但更接近实际使用条件，其结果对于产品改进具有直接指导意义。

6.7.2 高温工况下性能衰减规律分析

硬质合金在高温工况下的性能衰减主要表现为硬度下降、强度降低和抗氧化能力减弱三个方面。理解这些衰减规律对于合理选择材料牌号和设计使用规范具有指导意义。

硬度的温度依赖性是最为直观的性能衰减表现。钨钴类硬质合金在室温下的硬度通常在 HRA 89 至 92 之间（对应维氏硬度约 1300 HV 至 1800 HV）。当温度升高到 600℃ 时，硬度下降至室温值的约 70% 至 80%；当温度达到 800℃ 时，硬度进一步下降至室温值的约 50% 至 60%。这一衰减趋势与钴粘结相的软化和碳化钨颗粒的塑性变形能力增强有关。从具体牌号来看，YG6（Co 6%）由于钴含量较低，高温硬度保持能力优于 YG10X（Co 10%），但后者在室温和中温范围内的抗冲击性能更佳。在材料选择中，如果锤头需要在较高温度下使用，应优先考虑钴含量较低、晶粒较细的牌号。

高温氧化是硬质合金在含氧环境中使用时面临的另一挑战。当使用温度超过 600℃ 时，硬质合金的氧化速率随温度升高而显著增加。氧化过程首先发生在钴粘结相，钴氧化生成 CoO 或 Co_3O_4 ，体积膨胀导致表面出现微裂纹；随后氧气沿裂纹向内扩散，碳化钨被氧化生成 WO_3 ，进一步加剧了氧化层的疏松和多孔特征。严重的氧化导致材料表面剥落，锤头尺寸减小，破玻效率下降。研究表明，在 800℃ 空气中暴露一定时间后，未防护处理的 YG8 硬质合金表面氧化层厚度可达到数十微米。为了改善高温抗氧化性能，可以在材料中添加少量 Cr_3C_2 或 TaC，这些添加元素在高温下能够形成致密的氧化保护层，减缓氧的向内扩散。

硬质合金安全锤头在高温工况下的性能衰减还体现在抗冲击能力的下降。当锤头温度升高时，钴粘结相的强度降低，对碳化钨颗粒的约束能力减弱，在冲击载荷下碳化钨颗粒更容易发生脱落。因此，对于需要在高温下使用的安全锤头，应合理控制使用温度上限。根据技术资料，WC-Co 硬质合金的推荐使用温度一般不超过 800℃，在更高温度下需要采用 WC-Ni 系或添加抗氧化元素的特殊牌号。从应用角度来看，绝大多数应急破玻场景在常温条件下进行，高温性能主要针对工业加工领域的特殊需求，在选型时需要根据实际工况进行综合评估。

6.8 硬质合金安全锤头的耐腐蚀性能表征

耐腐蚀性能是硬质合金安全锤头在腐蚀性环境中抵抗化学侵蚀和性能退化的能力表征。硬质合金材料中的碳化钨硬质相具有较好的化学稳定性，但钴粘结相在一定介质条件下可能发生电化学溶解。

6.8.1 腐蚀环境模拟试验测试方法

硬质合金安全锤头的耐腐蚀性能测试可参照 GB/T 18376014《硬质合金 耐腐蚀性和耐磨性试验方法》和 ISO 9227 标准的规范进行。腐蚀环境模拟试验主要包括盐雾试验和酸浸试验

两种类型，分别模拟海洋大气环境和酸性介质条件下的腐蚀行为。

盐雾试验依据 ISO 9227:2017 标准进行，采用中性盐雾试验方法。试验溶液为质量分数 5% ± 0.1% 的 NaCl 溶液，pH 值控制在 6.5 至 7.2 之间。试验在盐雾箱中进行，箱内温度保持 35°C ± 2°C，相对湿度大于 95%，喷雾量控制在 1 mL/(80 cm² · h) 至 2 mL/(80 cm² · h) 范围内。试样按照要求进行表面处理，粗糙度 Ra 值应小于 0.8 μm，测试前用无水乙醇超声波清洗 5 分钟，干燥后用分析天平称量初始质量，精度达到 ± 0.01 mg。试验持续时间根据产品要求确定，常规检测周期为 48 小时至 240 小时，对于耐腐蚀性能评价需要更长时间暴露时，可延长至 500 小时或 1000 小时。

酸浸试验用于模拟酸性介质环境下的腐蚀行为。根据 GB/T 18376 标准的规定，将试样浸入 1% ± 0.1% 的 H₂SO₄ 溶液中，温度保持在 25°C ± 1°C，浸泡时间为 24 小时 ± 1 小时。试验结束后取出试样，用去离子水清洗，干燥后称量，计算失重率。对于硬质合金材料，还可采用电化学测试方法进行耐腐蚀性能评价。电化学测试采用三电极体系：硬质合金试样作为工作电极，饱和甘汞电极作为参比电极，铂电极作为辅助电极。电解液为 3.5% ± 0.1% 的 NaCl 溶液，扫描速率为 1 mV/s，电位范围为相对于开路电位 ± 0.25 V。通过 Tafel 拟合分析得到腐蚀电位 (E_{corr}) 和腐蚀电流密度 (i_{corr})，腐蚀电流密度越小，材料的耐腐蚀性能越好。

试样制备对于腐蚀测试结果的准确性具有重要影响。试样的暴露面积需要精确测量，使用游标卡尺测量各边尺寸，计算表面积时需计入所有暴露面。对于复合式硬质合金安全锤头，如果需要对特定部位（如硬质合金作业端或钢基体）分别进行腐蚀测试，可采取涂层遮蔽的方式隔离非测试区域。腐蚀试验后的试样应进行表面形貌观察，可采用扫描电子显微镜观察腐蚀坑的形态和分布，使用能谱分析识别腐蚀产物的成分，这些微观分析结果为理解腐蚀机理提供了依据。

6.8.2 腐蚀损伤程度与耐蚀性能评价

硬质合金耐腐蚀性能的评价指标主要包括失重率、腐蚀电流密度和腐蚀形貌特征等。失重率是最直观的定量指标，计算公式为 $\Delta W = (m_0 - m_1)/A$ ，其中 ΔW 为失重率 (mg/cm²)， m_0 为试验前质量， m_1 为试验后质量， A 为试样表面积。失重率越小，表明材料的耐腐蚀性能越好。对于 WC-Co 硬质合金，在盐雾试验中未优化样品的失重率约为 0.09 mg/cm² 至 0.15 mg/cm²，而经过成分优化的样品可以将失重率控制在 0.06 mg/cm² 至 0.10 mg/cm² 范围内。

硬质合金的腐蚀机理主要表现为粘结相钴的选择性溶解。在酸性介质中，钴发生电化学溶解反应： $\text{Co} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Co}^{2+} + \text{H}_2$ 。钴的溶解速率约为 10⁻⁶ g/cm² · h，而碳化钨的溶解速率低于 10⁻⁸ g/cm² · h。钴优先溶解后，WC 颗粒失去支撑而脱落，在材料表面形成腐蚀坑。腐蚀坑深度可达数微米至数十微米，严重时导致表面层 WC 颗粒的整体剥离。在盐雾环境中，氯离子对钴表面的自然氧化层 (Co(OH)₂ 或 CoO) 具有破坏作用，引发点蚀。点蚀初始深度约为 5 μm，随着腐蚀进行可扩展至 10 μm 以上。

影响硬质合金耐腐蚀性能的因素包括钴含量、晶粒尺寸和添加元素等。钴含量的增加通常会降低材料的耐腐蚀性能，因为更多的钴意味着更多的潜在腐蚀源。晶粒尺寸的细化有利于提

高耐腐蚀性能，细晶粒材料中晶界密度增加，钨分布更加均匀，减少了局部腐蚀的倾向。添加 Cr_3C_2 是改善 WC-Co 硬质合金耐腐蚀性能的有效手段， Cr_3C_2 在烧结过程中能够形成 Cr_2O_3 钝化层，厚度约 10 nm，该钝化层具有良好的抗 Cl^- 渗透能力，可将点蚀率降低约 40%。对于长期在腐蚀性环境中使用的安全锤头，可以选择添加合金元素的特殊牌号，或对钢基体部分进行表面防腐处理（如镀锌、镀铬或黑色氧化），以提高整体产品的耐腐蚀性能。

6.9 硬质合金安全锤头的结构稳定性表征

结构稳定性是硬质合金安全锤头在长期使用或储存条件下保持几何形状和装配关系的能力表征。与材料性能不同，结构稳定性更关注产品整体的形变行为、连接部位的可靠性以及各组成部分之间的相对位置保持能力。对于复合式硬质合金安全锤头，钢基体与硬质合金作业端的连接界面是结构稳定性的薄弱环节；对于整体式锤头，则主要关注其在服役过程中的尺寸稳定性和抗变形能力。

6.9.1 长期载荷下结构形变测试方式

硬质合金安全锤头在长期载荷下的结构形变测试旨在评估产品在使用寿命周期内的尺寸稳定性和几何精度保持能力。测试方式包括蠕变测试、应力松弛测试和长期加载形变测试等，可根据产品的具体使用条件和失效模式选择合适的测试方法。

蠕变测试用于评估锤头在恒定载荷作用下随时间发生的塑性变形。测试时将锤头装配在模拟锤柄的夹具中，施加设定的恒定载荷（例如相当于标准锤击力的大小），在规定温度条件下保持一定时间（如 100 小时、500 小时、1000 小时），定期测量锤头尖端的位移量或装配段的松动程度。对于硬质合金材料本身，由于其熔点较高，在常温下的蠕变行为并不显著；但对于复合式结构中的钎焊接头或机械夹固界面，在持续载荷下可能发生应力松弛或蠕变变形，导致装配预紧力下降。因此，蠕变测试的重点应放在连接界面的行为表征上。

应力松弛测试是另一种评估结构稳定性的方法。与蠕变测试的恒定载荷条件不同，应力松弛测试是在恒定变形条件下测量连接界面内应力的衰减情况。将装配好的复合式锤头组件固定在专用夹具中，施加设定的初始预紧力或保持规定的装配过盈量，记录初始应力值；然后将组件置于规定的环境条件下存放一定时间，定期测量残余应力值。通过应力-时间曲线的绘制，可以评价连接界面在长期使用中的锁紧力保持能力。应力松弛速率较低的连接方式更适合于需要长期保持装配可靠性的安全锤头产品。

长期加载形变测试结合了载荷和环境因素的综合影响。将锤头组件安装在模拟使用状态的试验装置上，施加周期性或持续性的载荷，同时在设定的温度、湿度条件下进行暴露。定期拆下组件进行尺寸测量，检查硬质合金作业端与基体的相对位置变化、基体的永久变形以及锤头尖端的几何形状变化。测试周期可根据产品的预期使用寿命进行设定，通常为数百小时至数千小时。通过测试前后的尺寸对比和形貌观察，可以定量评价锤头在长期服役条件下的结构稳定性。GB/T 5242017《硬质合金制品检验规则与试验方法》标准中规定的坠落检验（或敲打检验）可用于评估硬质合金制品在冲击条件下的结构完整性。

版权与免责声明

6.9.2 整体结构稳定性综合评价分析

硬质合金安全锤头的整体结构稳定性是材料性能、结构设计和制造工艺的综合体现。评价结构稳定性需要从多个维度进行综合分析，包括几何尺寸稳定性、连接界面完整性和功能性能保持性等方面。

几何尺寸稳定性评价涉及锤头在长期使用或储存过程中的尺寸变化规律。硬质合金材料的烧结合组织在常温下具有较好的相稳定性，不会发生自发的相变或体积变化。但在实际使用中，锤头可能受到反复冲击载荷的作用，冲击载荷可能引起材料内部的微观损伤累积，表现为微裂纹的产生和扩展。当微裂纹密度达到一定程度后，材料的宏观尺寸可能发生微小变化，如尖端的圆弧半径增大或尖锥角度的变化。通过定期测量锤头关键尺寸并绘制变化曲线，可以评估尺寸稳定性随使用时间的演变趋势。对于大多数应用场景，只要尺寸变化不超出设计公差范围，锤头的功能性能仍可维持。

连接界面完整性评价是复合式锤头结构稳定性的关键环节。钎焊接头在长期服役过程中可能发生界面扩散层的演变，表现为金属间化合物的生长。金属间化合物通常具有较高的硬度和脆性，其过度生长会降低接头的韧性和抗冲击能力。通过加速老化试验，将钎焊接头在较高温度下保温一定时间，模拟长期使用的组织演变，然后进行接头强度测试和断口分析，可评价连接界面的长期稳定性。对于机械夹固式结构，需关注紧固件的防松性能以及接触面的微动磨损情况。定期扭矩检测和接触面磨损量的测量是评价机械夹固结构稳定性的有效手段。

结构稳定性的综合评价还需要结合无损检测技术。超声检测可用于识别钎焊接头内部的未焊透、气孔等原始缺陷以及使用过程中产生的新缺陷。X射线检测可用于评估锤头内部的裂纹扩展情况。通过定期对同一样品进行无损检测跟踪，可以获取结构损伤演变的动态数据，为寿命预测提供依据。将无损检测结果与破坏性试验结果进行关联分析，可以建立结构损伤的量化评价指标。

6.10 中钨智造硬质合金安全锤头 MSDS

材料安全数据表是对硬质合金安全锤头产品的安全信息进行系统化描述的技术文件。中钨智造（厦门）科技有限公司作为钨钼材料领域的综合性企业，提供包括硬质合金在内的多种钨钼产品的研发、生产和销售服务。硬质合金安全锤头作为一种以碳化钨和钴为主要成分的复合材料，其 MSDS 需要涵盖成分信息、危险性识别、安全操作指南以及应急处置措施等内容。

从成分构成来看，硬质合金安全锤头的主要成分为碳化钨（WC）和钴（Co）。碳化钨是一种高硬度、高熔点的粉末材料，化学性质稳定，在常温下不会与空气、水或常见酸碱发生剧烈反应。钴作为粘结相金属，具有一定的化学活性，在特定条件下可能发生腐蚀或释放可溶性钴离子。硬质合金无毒，但在机械加工（如磨削、抛光）过程中产生的废合金块/片，在一定程度上会对人的安全性造成威胁。在安全操作方面，加工硬质合金安全锤头时，操作人员应佩戴防护面罩和防护眼镜。废弃的硬质合金产品不宜随意丢弃，建议通过专业的废金属回收渠道进行处理，这不仅有利于资源的循环利用，也符合环保要求。

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！

采购信息

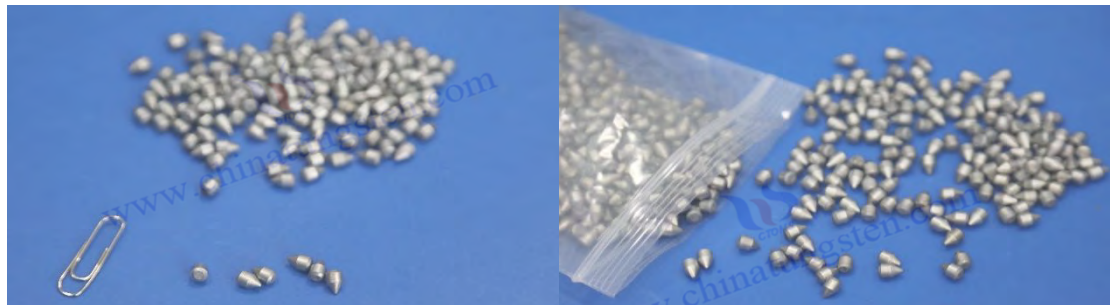
如有关于硬质合金安全锤头的生产需求，请联系制造商：中钨智造（厦门）科技有限公司

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



版权与免责声明

第七章 硬质合金安全锤头的应用

7.1 硬质合金安全锤头在交通工具中的应用

交通工具领域是硬质合金安全锤头应用最为广泛的领域之一，也是公众认知度最高的应用场景。在这一领域中，硬质合金安全锤头主要作为应急逃生工具的核心部件，被集成于公交车、客运船舶、地铁、校车等公共交通工具的安全锤装置中。

7.1.1 交通工具应急破拆作业应用场景

交通工具应急破拆作业是硬质合金安全锤头最典型的应用场景。在公交车、客运船舶、地铁列车等公共交通工具发生火灾、落水、侧翻或碰撞等紧急情况时，车门可能因变形或电路故障无法正常开启，车窗玻璃成为重要的逃生通道。硬质合金安全锤头专门针对此类场景设计，能够在有限的操作空间和紧张的施力条件下，以较小的冲击能量快速击碎钢化玻璃或夹胶玻璃，为乘员争取宝贵的逃生时间。

钢化玻璃的碎裂机制决定了硬质合金安全锤头在应急破拆作业中的核心作用。钢化玻璃表面存在较高的压应力层，其内部则存在张应力层，这种应力分布使得玻璃在受到局部冲击时容易发生整体碎裂。硬质合金安全锤头的尖锥作业端能够在接触点形成极高的局部应力，当该应力超过玻璃表面压应力的承受极限时，玻璃内部的张应力被触发，导致玻璃在数秒内碎裂成细小颗粒。这一过程对锤头尖端的硬度和锐利度保持性要求较高，因为只有在尖端保持足够锐利的条件下，才能在有限次锤击中完成破玻任务。根据公交车安全锤的配置标准，一辆大型公交车通常需要配备 4 至 6 把安全锤，分布于车窗两侧，以便不同位置的乘客在紧急情况下取用。

船舶环境对硬质合金安全锤头的耐腐蚀性能提出了附加要求。海洋环境中的高湿度、盐雾以及可能的溅水条件，对普通钢制锤头构成了腐蚀风险。硬质合金材料本身具有较好的化学稳定性，其在潮湿环境下的氧化速率较低，能够适应船舶客舱内的储存条件。对于复合式安全锤头中的钢基体部分，通常需要采取镀锌、镀铬或黑色氧化等防腐处理措施，以延长产品的使用寿命。国家标准对镶嵌硬质合金型安全锤的产品质量和性能水平作出了规定，为交通工具应急破拆工具的规范化配置提供了技术依据。

7.1.2 车载安全配套装备适配优势分析

硬质合金安全锤头在车载安全配套装备中的适配优势主要体现在材料性能、结构设计和维护便利性三个方面。从材料性能来看，硬质合金锤头的硬度区间处于 HRA89 至 93 之间，这一硬度水平高于高速钢材料，能够保证锤头在玻璃表面形成有效的应力集中点。采用 YG6 或 YG8 牌号硬质合金的安全锤头，其钴含量控制在 6%至 8%之间，这种配比在保证硬度的同时兼顾了一定的韧性储备，降低了使用过程中锤头崩裂的风险。相比于传统的一体式钢制安全锤，硬质合金安全锤头在长期使用后尖端磨损量较小，能够保持较好的初始破玻效率。

从结构设计来看，镶嵌硬质合金型安全锤采用复合式结构，将硬质合金作业端通过钎焊或机

械夹固方式固定在钢制基体上。这种结构设计使得锤头在保持高硬度的同时，钢制基体提供了较好的冲击吸收能力，减少了锤击过程中振动对手部的不适感。硬质合金作业端的体积较小，材料用量有限，这使得产品成本得到有效控制，便于在公共交通工具上大规模配置。复合式结构的另一个优势在于：当硬质合金尖端发生磨损或损坏时，可以仅更换尖端部件而无需更换整个锤体，这降低了维护成本并延长了工具的整体使用寿命。

从维护便利性来看，硬质合金安全锤头具有较好的环境适应性。在车厢内部长期存放过程中，锤头可能受到温度变化、湿度波动以及车内清洁剂等因素的影响。硬质合金材料对酸碱类物质的侵蚀具有一定的抵御能力，在潮湿环境中的氧化程度较低。定期检查时，维护人员可以通过目视观察锤头尖端的锐利度、检查钎焊接头是否有裂纹或松动迹象，快速判断安全锤的可用状态。当发现锤头尖端出现明显磨损或钝化时，仅需更换硬质合金作业端即可恢复工具的性能，这种模块化的维护方式符合公共交通系统对设备可维护性的要求。车载安全锤的配置和检查已成为公共交通运营安全管理体系中的常规项目，硬质合金安全锤头的性能稳定性为此提供了技术支持。

7.2 硬质合金安全锤头在工业加工中的应用

工业加工是硬质合金安全锤头应用的第二个主要领域。与交通工具应急应用不同，工业加工场景下的锤头使用具有高频次、高载荷、长时间连续作业的特点，对材料的耐磨性和抗冲击性能提出了更高要求。硬质合金安全锤头在这一领域的应用形式包括工业铸件、锻件的清渣作业，以及硬质工件的整形与局部拆解等。

7.2.1 工业铸件、锻件清渣作业应用

工业铸件和锻件在成型后，表面往往残留有浇冒口、飞边、毛刺以及附着型砂等多余物，这些残留物需要在后续加工前予以清除。清渣作业是对锤头耐磨性考验较大的应用场景之一，因为铸件表面残留的型砂和氧化皮具有较高的硬度，对锤头尖端产生强烈的磨粒磨损作用。传统的高锰钢或工具钢锤头在处理这类物料时磨损速度较快，需要频繁更换，影响生产效率。硬质合金锤头由于碳化钨硬质相的存在，耐磨性能明显优于钢制工具，能够有效延长单次使用寿命。

在铸造车间的清渣工序中，操作人员使用手持式清渣锤或气动冲击工具，对铸件表面的残留物进行敲击清除。硬质合金安全锤头的尖锥作业端能够集中冲击力，对附着牢固的型砂或氧化皮进行定点清除。对于大型铸件，有时需要采用破碎锤等大型设备进行作业，此时硬质合金锤头以镶嵌块的形式布置在破碎锤的工作面上，通过高频冲击实现大面积的清渣处理。在工业加工型锤头的材料选择上，YG8C 等粗晶粒牌号的应用较为常见，其钴含量约 8%，粗晶粒结构在高频冲击条件下表现出良好的抗疲劳性能，适合长时间连续作业。

锻件的清渣作业与铸件类似，但残留物的类型有所不同。锻件在加热锻造过程中表面形成的氧化皮具有较好的附着性，需要采用冲击方式予以清除。硬质合金锤头在处理锻件氧化皮时，除需要较高的耐磨性外，还需要具备一定的抗冲击韧性，因为锻件表面可能存在硬度不均的区域，锤击过程中的受力状态不够稳定。钴含量较高的 YG10X 牌号在此类应用中展现出优

版权与法律责任声明

势，其较好的韧性储备能够降低锤头在偏斜冲击条件下的崩裂风险。从生产效率的角度来看，采用硬质合金锤头进行清渣作业可以减少工具更换频次，降低操作人员的劳动强度，对于批量生产的铸造和锻造企业而言，这一改进具有实际的经济效益。

7.2.2 硬质工件整形与局部拆解应用

硬质合金安全锤头在硬质工件整形与局部拆解方面的应用，是工业加工领域较为细分的使用场景。在机械装配和维修过程中，有时需要对金属工件进行局部整形，例如矫正轻微变形的工件、调整配合面的形状等。这类操作对锤头的硬度要求较高，因为普通钢锤在敲击硬化钢或铸铁件时自身容易发生变形或磨损，而硬质合金锤头由于硬度远高于被加工工件，能够在敲击过程中保持自身形状的稳定，实现精确的整形效果。

在局部拆解作业中，硬质合金安全锤头可用于破除锈蚀的螺纹连接、分离过盈配合的零件、或对焊死的部件进行冲击松解。这类操作对锤头的冲击韧性要求较高，因为拆解过程中的受力方向往往不够规整，锤头可能承受弯曲或剪切分量的作用。工程实践表明，YG8 牌号硬质合金在此类应用中表现出较好的适应性，其硬度与韧性的平衡状态能够满足大多数拆解工况的要求。对于特别紧配合的零件拆解，有时需要配合渗透润滑剂使用，锤头的冲击作用将润滑剂带入配合间隙，辅助零件的分离。

硬质合金锤头在工业加工中的应用还延伸至特定行业的专用工具。例如，在石材加工行业，硬质合金锤头用于对石材表面进行仿旧处理或纹理加工；在模具制造行业，硬质合金锤头用于对模具表面的局部缺陷进行修正。这些应用虽然单次用量不大，但所涉及的行业种类较多，形成了硬质合金安全锤头产品系列中的重要组成部分。从产品设计的角度来看，工业加工型锤头可以根据具体作业对象的硬度、形状和尺寸要求进行定制化设计，通过调整硬质合金牌号、尖锥角度和结构形式来适配不同的使用场景。

7.3 硬质合金安全锤头在材料检测中的应用

材料检测领域对硬质合金安全锤头的应用需求主要集中在对材料硬度、表层强度以及构件致密性的现场快速评估方面。与实验室条件下的精密检测不同，现场检测往往需要快速、简便的方法对材料的基本性能做出初步判断。硬质合金安全锤头凭借其高硬度和可控的冲击特性，成为现场材料检测的辅助工具之一。

7.3.1 材料硬度与表层强度冲击检测

在现场工程条件下，对金属材料、混凝土或岩石的硬度和表层强度进行快速评估，有时采用锤击回弹法或冲击痕迹法。这些方法的原理是将硬质合金锤头以标准化的方式冲击被测材料表面，通过观察回弹高度、冲击痕迹的大小或深度来间接评价材料的硬度或强度。硬质合金锤头的高硬度和形状稳定性是这类检测方法得以实施的前提条件——如果锤头尖端在使用过程中发生变形或磨损，检测结果的可比性将受到影响。

在金属材料的现场检测中，硬质合金锤头可用于区分不同硬度等级的材料。例如，在废旧金

属分拣或材料验收场景中，操作人员使用安全锤头在材料表面轻轻敲击，根据敲击后留下的痕迹深度和形态来判断材料的硬度范围。碳化钨尖端的硬度远高于金属材料，能够在较短时间内形成清晰的鉴别痕迹。这种方法虽然不够精确，但操作简便、速度快，适用于大批量材料的初步筛选。对于淬火钢、工具钢等高硬度材料，普通钢锤可能无法在其表面留下可辨识的痕迹，而硬质合金锤头则能够有效实现这一目的。

在建筑工程现场，混凝土强度的初步评估有时采用回弹仪法，回弹仪的冲击杆尖端通常采用硬质合金材料制成。当冲击杆以规定的能量冲击混凝土表面时，根据回弹距离可以换算为混凝土的推定强度。硬质合金尖端的高硬度和耐磨性保证冲击杆在使用寿命内的形状稳定性，从而确保检测结果的一致性。虽然安全锤头本身并不构成完整的回弹仪，但其硬质合金尖端的材料选择与回弹仪冲击杆存在相似之处，两者在材料应用层面具有一定的技术关联性。

7.3.2 构件致密性与缺陷初步筛查检测

对金属铸件、焊接接头或复合材料构件进行内部缺陷的初步筛查，是硬质合金安全锤头在材料检测领域的另一应用形式。这种检测方法基于声学原理——当用锤头敲击构件时，根据敲击声的音调、持续时间和衰减特性可以初步判断构件内部是否存在裂纹、气孔或疏松等缺陷。致密完好的构件敲击声清脆、延续时间较长，而存在缺陷的构件敲击声沉闷、衰减迅速。这种锤击听声法在铁路车轮探伤、钢轨检测、铸件检验等领域已有长期应用历史。

在铸件生产现场，质检人员使用安全锤头对铸件进行逐件敲击检查，通过声音特征初步筛选出可能存在内部缺陷的铸件，然后对可疑件进行进一步的无损检测。这一方法对锤头的要求主要体现在两个方面：一是锤头重量和形状的标准化，以保证敲击能量的一致性；二是锤头材料的均质性，以避免锤头自身缺陷对敲击声的干扰。硬质合金安全锤头通过粉末冶金工艺成型，材料组织较为均匀，能够满足这一使用要求。在桥梁钢结构、压力容器等焊接构件的现场检查中，锤击法也被用作焊缝表面裂纹的初步筛查手段，当敲击焊缝区域时，如果存在表面开口裂纹，敲击声会出现特征性的变化。

需要注意的是，锤击听声法属于经验性检测方法，其检测结果的可靠性依赖于操作人员的经验和技能水平，不能替代射线检测、超声检测等标准化的无损检测方法。硬质合金安全锤头在这一应用中的作用是为操作人员提供一个可靠的敲击工具，其自身的性能稳定性有助于减少工具因素对检测结果的干扰。

7.4 硬质合金安全锤头在矿山开采中的应用

矿山开采是硬质合金安全锤头应用的又一重要领域。矿山作业环境恶劣，物料硬度高、磨蚀性强，对锤头材料的性能要求较高。在这一领域中，硬质合金安全锤头主要应用于围岩表层的剥离与修整作业，以及矿用构件的简易拆解与隐患排查等方面。

7.4.1 矿山围岩表层剥离与修整作业

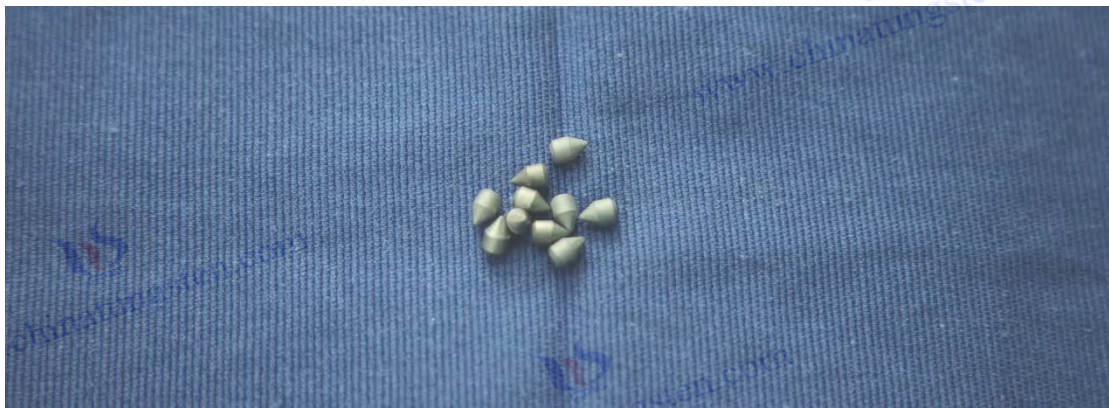
矿山开采过程中，巷道掘进和采场作业面常常需要对围岩表层进行剥离和修整。围岩表层可

版权与法律责任声明

能存在的浮石、松动的岩块以及爆破后残留的凸起，需要及时予以清除，以确保作业面的安全性和后续工序的顺利进行。硬质合金破碎锤头在此类作业中承担着直接冲击岩石的任务，通过与破碎锤或气动冲击设备配合使用，实现岩石的破碎和分离。

围岩的岩性差异较大，从软质页岩、砂岩到硬质花岗岩、石英岩，各类岩石的硬度范围较宽。硬质合金安全锤头的材料选择需要根据目标岩石的硬度进行匹配。对于中等硬度的砂岩、灰岩，YG8 牌号硬质合金能够满足使用要求，其硬度与韧性的平衡状态适用于大多数矿山围岩处理作业。对于高硬度的花岗岩或含有石英脉的岩层，需要采用韧性更好的粗晶粒牌号 YG8C，以减少锤头在冲击过程中的崩裂风险。对于软质岩层或风化岩，硬质合金锤头的耐磨性要求相对降低，但抗冲击性能仍然是需要关注的因素，因为岩层中的节理和裂隙可能导致锤击过程中的受力方向突变。

围岩修整作业对锤头的耐磨性要求较高。岩石在与锤头接触过程中产生强烈的磨粒磨损作用，硬质合金锤头中的碳化钨颗粒承担了抵抗磨损的主要任务。研究表明，YG8 牌号硬质合金在花岗岩破碎作业中的寿命明显优于高锰钢锤头，其提高幅度可达到数倍之多。这一性能优势使得硬质合金锤头在矿山围岩处理中逐步取代了钢制工具。在矿山作业中，锤头的使用寿命影响设备的停机时间，较长的使用寿命意味着更少的更换次数和更高的作业效率。



中钨智造硬质合金安全锤头

7.4.2 矿用构件简易拆解与隐患排查应用

矿山设备在长期使用过程中，紧固件可能因锈蚀而难以拆卸，结构件可能因磨损或变形需要局部修整。在这些维修作业中，硬质合金安全锤头作为一种辅助工具，用于对锈蚀螺栓、卡死的销轴等构件进行冲击拆解。与工业加工领域的拆解应用类似，矿山环境的腐蚀性条件（如矿井水、酸性环境）对锤头的耐腐蚀性能提出了附加要求。硬质合金材料在潮湿条件下的化学稳定性为其在此类环境中的使用提供了保障。

矿山安全隐患排查是硬质合金安全锤头的另一应用场景。矿山作业人员使用安全锤头对巷道支护锚杆、钢架连接点以及运输设备的承载结构进行敲击检查，通过声音特征判断是否存在松动、裂纹或腐蚀减薄等隐患。这种锤击检查法在矿山安全管理中有较长的应用历史，是一种简便有效的现场排查手段。硬质合金锤头的均质性和高硬度保证了敲击声音的清晰度和一

版权与免责声明

致性，有助于操作人员做出准确的听觉判断。对于采场顶板的稳定性检查，锤击法也是常用的手段之一，作业人员通过敲击顶板岩层，根据声音的变化判断是否存在离层或裂隙。

矿用构件的简易拆解还包括对输送带接头、料仓衬板等部件的维修更换作业。在这些作业中，锤头用于对卡涩部件进行冲击松解，对变形构件进行局部整形。由于矿山维修作业环境空间受限、照明条件差，操作人员难以使用大型工具，轻便的手持式安全锤成为较为合适的选择。硬质合金锤头的高硬度使其能够在有限的操作空间内发挥较好的敲击效果，减少无效锤击的次数，提高维修作业的效率。

7.5 硬质合金安全锤头在建筑施工中的应用

建筑施工领域对硬质合金安全锤头的需求主要体现在混凝土表层的破除与修整作业，以及建筑构件的废旧拆除与局部改造等方面。建筑施工环境中的物料以混凝土、砖石、砂浆等硅酸盐材料为主，这些材料对锤头具有中等到较强的磨粒磨损作用。

7.5.1 建筑混凝土表层破除与修整作业

混凝土结构在施工过程中可能出现蜂窝、麻面、跑模等表面缺陷，这些缺陷需要在后续工序前进行修整处理。硬质合金安全锤头可用于对缺陷部位的疏松混凝土进行剔除，露出密实的基层，为修补材料的附着提供良好条件。对于混凝土浇筑后残留的模板拉杆、钢筋头等嵌入物，锤头可用于对其周围的混凝土进行局部破除，便于嵌入物的切除或取出。这类作业对锤头的精度要求较高，需要在保证剔除效果的同时避免对周边完好混凝土的过度破坏。

建筑改造工程中，有时需要在既有混凝土结构上进行局部开槽或孔洞扩大。硬质合金锤头与小型破碎工具配合使用，能够对混凝土进行精确的局部破除。相比于大型破碎设备，手持式安全锤具有更好的操作灵活性，适用于空间受限的作业环境。硬质合金锤头的高硬度使其能够有效穿透混凝土中的粗骨料（如碎石、卵石），避免因骨料硬度较高而导致的锤头卡滞或失效。在混凝土破除作业中，锤头的耐磨性直接关系到作业效率，采用硬质合金尖端的工具在连续作业数小时后仍能保持较好的破拆能力，减少了中途更换工具的时间消耗。

混凝土表面的浮浆层、水泥浆皮等薄弱层在后续施工前需要予以清除。硬质合金锤头可用于对大面积混凝土表面进行凿毛处理，增加表面的粗糙度，提高新老混凝土之间的粘结强度。这种凿毛作业要求锤头具有一定硬度，能够有效去除表面薄弱层，同时对基体混凝土的损伤控制在可接受范围内。相比于传统的手工凿毛方法，使用硬质合金锤头配合轻型冲击工具能够显著提高作业效率，降低操作人员的劳动强度。

7.5.2 建筑构件废旧拆除与局部改造应用

建筑废旧拆除是指对既有建筑中的部分构件进行破坏性拆除，以便为新建或改造工程腾出空间。在这一过程中，硬质合金安全锤头用于对砖墙、砌体、小型混凝土构件等进行人工拆除。相比机械拆除方式，人工拆除具有更好的选择性和可控性，适用于需要保留部分结构或避免剧烈震动的场景。硬质合金锤头能够有效穿透砖石材料，且在使用过程中自身磨损较小，适

合长时间的拆除作业。

局部改造应用涉及对建筑结构进行有限度的变动，例如在墙体上开设门洞、窗洞，或对梁柱截面进行局部修整。在这些作业中，锤头用于对混凝土保护层进行破除，暴露出内部的钢筋，然后对钢筋进行切割或弯折处理。硬质合金锤头的硬度和耐磨性使其能够应对混凝土中可能存在的硬质骨料，以及钢筋表面的轧制氧化皮。操作人员可以根据实际需要选择不同尖锥角度的锤头——较尖锐的锤头适合定点破除，较平缓的锤头适合大面积凿除。

建筑拆除和改造作业中的安全性是需要关注的问题。操作人员在使用硬质合金锤头时应佩戴防护眼镜和防尘口罩，防止碎屑飞溅和粉尘吸入。在拆除承重构件前，需要进行结构稳定性评估，采取必要的临时支撑措施。高空作业时，应注意工具放置的安全，防止锤头坠落伤人。拆除产生的建筑废料应按类别进行分类收集，硬质合金锤头本身在使用寿命结束后可作为废金属回收处理。

7.6 硬质合金安全锤头在特种设备检修中的应用

特种设备检修是硬质合金安全锤头应用的专业化领域。特种设备包括锅炉、压力容器、压力管道、起重机械、电梯等，这些设备在长期运行过程中可能产生结垢、锈蚀层，紧固件也可能因锈蚀而难以拆卸。硬质合金安全锤头凭借其高硬度和耐磨性，在这些检修作业中作为辅助工具发挥着作用。

7.6.1 特种设备结垢、锈蚀层清理作业

特种设备在服役过程中，接触介质的性质不同会在表面形成不同类型的沉积物。锅炉受热面可能形成水垢和烟灰沉积，压力容器内壁可能形成物料结疤，管道内壁可能形成铁锈和腐蚀产物。这些沉积物的存在会降低设备的传热效率，加速材料的腐蚀，甚至堵塞介质通道，需要在检修时予以清除。硬质合金安全锤头可用于对设备表面的硬质结垢层进行机械破除，尤其适用于局部顽固沉积物的定点清除。

水垢是由水中溶解的钙、镁碳酸盐在受热面上沉淀形成的，其硬度较高，普通钢制工具在清理水垢时自身磨损较快。硬质合金锤头由于碳化钨硬质相的存在，其硬度远高于水垢，能够在敲击过程中有效将水垢从金属表面剥离，而锤头自身的磨损量较小。对于锅炉水冷壁、过热器管束等部位的除垢作业，操作人员使用加长柄的安全锤对管排间的沉积物进行敲击清理。硬质合金尖端的尖锐形状可以进入管排间的狭窄缝隙，对难以触及的部位进行清理。

锈蚀层的清理是另一类常见作业。压力容器和管道在长期使用后，表面可能形成多层松散的锈蚀产物，这些锈蚀层不仅影响设备的外观，还可能在后续的无损检测中干扰信号的正常传播。使用硬质合金安全锤头对锈蚀层进行敲击，可以使其从金属表面剥离，暴露出清洁的基体金属表面，便于后续的测厚、探伤等检测工作的进行。敲击清理时需要注意控制敲击力度，避免对基体金属造成过度损伤。对于重要设备的锈蚀清理，应在清理后对敲击部位进行补涂防护涂层，以防止再次锈蚀。

版权与免责声明

7.6.2 设备紧固构件松动敲击拆解应用

特种设备在长期运行后，螺栓、螺母等紧固构件常因锈蚀、高温咬合或振动自锁而难以拆卸。普通扳手施力时可能因扭矩过大导致螺栓断裂或螺纹损坏，而液压扳手等专业工具在某些狭窄空间内难以使用。在这种情况下，采用硬质合金安全锤头对紧固件进行冲击松解是一种有效的辅助方法。敲击产生的冲击力可以使锈蚀层产生微裂纹，同时使螺栓与螺母之间产生相对微动，破坏锈蚀粘结，降低拆卸扭矩。

冲击敲击拆解的操作要点包括：选择合适的敲击方向和力度，避免对紧固件造成不可逆的变形损伤；在敲击前对螺纹部位喷涂渗透润滑剂，利用敲击的振动作用促进润滑剂渗入配合间隙；对重要螺栓在拆卸前记录原始位置和扭矩，以便于后续的复装。硬质合金锤头的硬度和形状稳定性保证了每一次敲击都能有效地将能量传递到紧固件上，减少了无效锤击的次数。对于高温设备上紧固件的拆卸，应在设备冷却至室温后进行敲击，以避免热应力导致的脆性断裂。

在起重机械、电梯等设备的检修中，安全锤头可用于对销轴、卡环等连接件的松脱敲击。这类设备的连接部位通常设计有防松装置，需要先解除防松措施后再进行冲击拆解。硬质合金锤头适用于在这些有限空间内进行精确敲击，操作人员可以根据反馈的敲击声音和手感判断连接的紧固状态。检修完成后，需要检查锤头的钎焊接头是否完好、硬质合金尖端有无崩缺，以确保下次使用时的可靠性。特种设备检修对工具的防爆性能有特殊要求，在某些易燃易爆环境中（如化工厂、油气储运设施），需要使用铜制或铍铜合金制成的防爆工具，硬质合金安全锤头因其可能产生火花，不宜在这些环境中使用。



中钨智造硬质合金安全锤头

第八章 硬质合金安全锤头的市场竞争与未来发展

8.1 硬质合金安全锤头的全球生产格局与竞争态势

硬质合金安全锤头作为硬质合金工具领域中的一个专业化细分产品，其市场竞争格局和发展趋势受到上游原材料供应、下游应用需求以及技术创新的多重影响。从全球范围来看，硬质合金工具行业正处于稳步增长阶段，2024 年中国硬质合金总产量达到 6 万吨，同比增长 13.21%，各终端领域对硬质合金工具的实际应用数量持续增加。在安全锤这一细分领域，2025 年全球安全锤市场规模约为 35 亿美元，预计到 2030 年将增长至 68 亿美元，复合年增长率达到 8.5%。这一增长态势为硬质合金安全锤头产业的发展提供了良好的市场环境。

8.1.1 国际领先企业的技术特点与产能布局

在全球硬质合金工具市场中，国际领先企业凭借长期的技术积累和完善的产业链布局，在高性能硬质合金材料、精密成型工艺和涂层技术等方面保持着领先地位。从工具锤市场的整体格局来看，全球前五大工具锤生产商的市场份额集中度较高。这些企业的技术特点主要体现在材料开发、工艺控制和产品标准化三个层面。

在材料开发方面，国际领先企业掌握了从碳化钨粉末制备到硬质合金烧结的全流程核心技术。通过优化碳化钨晶粒度的分布范围和钴粘结相的均匀性控制，能够生产出硬度与韧性匹配良好的硬质合金材料。部分企业还开发出了梯度结构硬质合金，即在锤头表层采用高硬度配方、芯部采用高韧性配方的复合结构，这种设计可以在保持破玻效率的同时提高抗冲击能力。在涂层技术方面，物理气相沉积和化学气相沉积涂层的工业化应用已经较为成熟，TiN、TiAlN、CrN 等硬质涂层能够进一步提升锤头表面的耐磨性能。

在工艺控制方面，国际领先企业的优势体现在生产过程的自动化和标准化水平较高。从粉末配料、压制成型到烧结和精加工，各工序的质量控制体系较为完善。对于复合式硬质合金安全锤头，钎焊工艺的稳定性是影响产品质量的关键因素，国际企业通过采用真空钎焊技术和自动化装配线，将钎焊接头的缺陷率控制在较低水平。此外，国际企业在产品检测方面配备了先进的检测设备，如自动光学检测系统、超声无损检测设备等，能够实现对产品质量的全检或高频次抽检。

在产能布局方面，国际领先企业的生产基地分布呈现全球化特征。部分企业在欧洲、北美和亚洲设有多个生产基地，以便就近服务区域市场并分散供应链风险。从市场区域来看，北美地区作为全球安全锤市场的领导者，占据了约 40% 的市场份额。亚太地区则受益于制造业转移和基础设施建设的推进，成为增长最快的区域市场。

8.1.2 国内主要生产企业的竞争优势与技术差距

中国硬质合金工具行业经过多年发展，已经形成了较为完整的产业体系。从产业集群来看，株洲、自贡、厦门等地是硬质合金生产企业的集中分布区域，形成了从原料供应到产品加工的区域配套优势。

版权与免责声明

国内主要生产企业的竞争优势主要体现在成本控制、响应速度和客户服务三个方面。在成本控制方面，国内企业的人工成本和部分原料采购成本低于国际同行，使得中低端产品具有价格竞争力。在响应速度方面，国内企业能够根据客户需求快速调整产品规格和交付周期，适应小批量、多品种的订单模式。在客户服务方面，国内企业依托本地化优势，能够提供更及时的技术支持和售后服务，这一优势在矿山、建筑施工等现场应用场景中尤为明显。

然而，国内企业与国际领先企业之间仍存在一定的技术差距。这一差距主要体现在高端材料配方开发、精密成型工艺控制和产品质量一致性三个方面。

8.2 硬质合金安全锤头的应用领域需求演变

硬质合金安全锤头的应用领域需求经历了从传统破碎向多元化、精密化方向的演变过程。

在早期阶段，硬质合金安全锤头主要应用于矿山破碎、水泥制造及冶金行业的重型破碎设备，其高硬度和优异耐磨性使其在破碎高硬度、强磨蚀性物料（如石英岩、花岗岩）时展现出显著优势。

随着制造业转型升级，需求逐步拓展至凿岩工程、地质勘探及道路维修等领域。近年，受益于新能源汽车轻量化及 3C 电子微型化趋势，硬质合金安全锤头在精密零部件拆解、电子废弃物处理等场景的需求逐步释放。

8.2.1 交通运输应急安全领域的需求变化

交通运输应急安全领域是硬质合金安全锤头最为成熟的应用市场。这一领域的需求变化受到公共交通发展水平、安全法规完善程度以及公众安全意识提升等多重因素的影响。全球汽车保有量的持续增长为安全锤市场提供了稳定的存量需求。

新能源汽车的普及对安全锤头的应用需求产生了结构性影响。与传统燃油车相比，新能源汽车的电池系统对碰撞安全性的要求更高，应急逃生工具作为整车安全配置的一部分，需求有所增加。同时，新能源汽车轻量化材料的应用，使得车身结构和玻璃类型发生变化，对安全锤头的破玻性能提出了新的要求。

在需求特征方面，交通运输领域对硬质合金安全锤头的要求正在从“能用”向“可靠”转变。公共交通工具运营企业对产品的一致性和长期储存稳定性提出了更高要求，希望锤头在车辆全生命周期内保持可靠的破玻能力。这一需求变化推动了产品设计从单一的破玻功能向“破玻+警示+防误触”的多功能集成方向发展。此外，智能安全锤的出现将集成 GPS 定位、紧急呼叫等功能，提高救援效率，这对硬质合金锤头与其他电子元件的配合提出了新的适配要求。

8.2.2 工业加工与材料检测领域的升级要求

工业加工领域对硬质合金安全锤头的需求演变主要体现在加工精度要求的提升和加工对象的多样化两个方面。随着制造业向高端化转型，工业加工对工具的性能要求不断提高。在铸

件清渣、锻件修整等传统应用场景中，用户对锤头的耐磨性和抗冲击性能提出了更高的期望，希望延长单次使用寿命、减少更换频次。这推动了硬质合金牌号从 YG6 向 YG8C、YG10X 等更高韧性牌号的升级。

加工对象的多样化对锤头产品的系列化提出了要求。不同行业、不同物料的硬度、韧性和磨蚀性差异较大，难以用一种产品覆盖所有应用场景。例如，石材加工行业对锤头的耐磨性要求突出，而模具修正行业对锤头的形状精度和表面光洁度要求更高。这一趋势推动了产品从通用型向专用型的转变，生产企业需要根据细分市场的具体需求开发针对性的产品系列。

在材料检测领域，硬质合金安全锤头作为现场快速检测工具的辅助部件，其需求受到工程质量检测规范化程度的影响。随着建筑工程质量监管的加强，现场检测工具的使用频率有所增加。锤击回弹法检测混凝土强度、锤击听声法检测构件缺陷等传统方法，虽然难以完全替代仪器检测，但在初步筛查和现场快速判断中仍具有应用价值。这一领域对锤头的要求主要体现在形状标准化和材料一致性两个方面，以确保检测结果的可比性。

8.2.3 矿山、建筑施工装备领域的发展趋势

矿山开采和建筑施工是硬质合金安全锤头应用的传统领域，其发展趋势与基础设施建设和能源开采活动的景气度密切相关。

在矿山领域，硬质合金破碎锤头的应用趋势是向大型化和智能化方向发展。大型矿山设备对锤头的单次使用寿命要求更高，推动了粗晶粒硬质合金牌号的研发和应用。同时，矿山作业环境对锤头的耐冲击性能提出了持续改进的要求。在建筑施工领域，混凝土破除和修整作业对锤头的需求受到城市化进程和旧城改造政策的影响。

8.3 硬质合金安全锤头的创新方向与技术路线

硬质合金安全锤头的技术发展主要围绕复合结构设计与材料体系优化两个方向展开。镶嵌式复合锤头是重要的技术路线。该工艺将长条状 TiC 硬质合金在高锰钢锤头浇铸成型过程中直接镶嵌于打击部位，硬质合金与高锰钢之间形成冶金结合。通过在高锰钢基体中添加 Cr、Ti、RE、B、Nb 等合金元素，可提高基体加工硬化率，使锤头使用寿命比传统高锰钢锤头提高 3 倍以上。镶嵌体积百分比可达打击部位的 50% 以上，既保证了锤头韧性，又显著提升了耐磨性。

钢结硬质合金硬化层技术采用原位合成的 TiC 颗粒（体积分数 10-40%）与外加 WC 颗粒、Al₂O₃ 颗粒复合增强，硬化层厚度可达 5-150mm。该技术通过高温燃烧反应结合消失模铸渗工艺，在锤头抗磨损区域形成复相颗粒增强的耐磨层，兼顾了高硬度与良好韧性的性能匹配。

8.3.1 新型粘结相、梯度结构硬质合金锤头的研究进展

粘结相是硬质合金材料设计中的重要组成部分，传统的钴粘结相虽然在综合性能方面表现较好，但在成本、供应稳定性和特定环境适应性方面存在局限。因此，开发新型粘结相体系成

为硬质合金研究的重要方向之一。镍基和铁基粘结相的研究已有较长历史，但大规模工业应用仍面临挑战。镍基粘结相的耐腐蚀性能优于钴基，但其对碳化钨的润湿性略差，烧结过程中需要更高的温度或更长的保温时间。铁基粘结相的成本优势明显，但烧结过程中碳化物晶粒异常长大和材料韧性不足的问题有待解决。

近年来的研究热点集中在复合粘结相和粘结相改性两个方面。复合粘结相是指将钴与镍、铁按一定比例混合使用，通过不同金属组分的协同作用，在保持良好力学性能的同时改善特定性能。例如，钴-镍复合粘结相可以在维持较高硬度和抗弯强度的基础上，提升材料的抗腐蚀性能；钴-铁复合粘结相则在控制成本的同时，通过钴的加入改善铁的润湿性。粘结相改性是指在钴中添加少量合金元素，如添加钨可以细化晶粒、提高抗弯强度；添加铬或钼可以改善抗氧化性能。

梯度结构硬质合金是另一项具有应用前景的技术。传统的均质硬质合金在硬度和韧性之间存在固有的权衡关系，而梯度结构通过在材料不同区域设置不同的成分和微观组织，可以在整体上实现硬度与韧性的协调。对于安全锤头而言，理想的梯度结构是：表层采用高硬度、高耐磨性的配方，以保证破玻效率和尖端保持性；芯部采用高韧性、高强度的配方，以吸收冲击能量、抵抗整体断裂。梯度结构的实现途径包括分层压制、扩散处理和渗碳处理等，但应用于小尺寸安全锤头的工业化工艺尚不成熟。

8.3.2 纳米增强、表面改性复合锤头的技术路线

纳米增强是指通过在硬质合金中添加纳米尺度的增强相（如纳米碳化钨、纳米碳化钒、纳米氧化铝等），利用纳米颗粒的晶界钉扎效应和弥散强化效应，提高材料的硬度、强度和耐磨性。纳米增强硬质合金的关键技术难点在于纳米颗粒在粉末混合过程中的均匀分散，以及烧结过程中纳米颗粒的保持。传统的球磨混合方法难以使纳米级颗粒在微米级碳化钨颗粒之间均匀分布，容易出现纳米颗粒团聚现象，形成局部缺陷。解决这一问题的技术路线包括：采用化学包覆法在碳化钨颗粒表面沉积纳米颗粒、采用高能球磨结合表面活性剂辅助分散、以及采用喷雾干燥法制备复合粉末。

表面改性是指在不改变基体材料性能的前提下，通过涂层或表面处理技术提升锤头表面的耐磨性、抗腐蚀性或抗冲击性能。物理气相沉积和化学气相沉积涂层技术在硬质合金切削工具领域已经得到广泛应用，将其移植到安全锤头产品中在技术上是可行的。涂层材料的选择需要根据锤头的使用工况进行优化：对于以磨粒磨损为主的工业加工场景，可选用 TiAlN 等高硬度涂层；对于以冲击载荷为主的应急破玻场景，则需要涂层具有较好的韧性和结合力，CrN 或 CrAlN 涂层是较为合适的选择。

表面改性还包括激光熔覆、离子注入等较新的技术路线。激光熔覆是通过高能激光束将合金粉末熔覆在锤头表面，形成与基体冶金结合的表面层，可用于修复磨损的锤头尖端。离子注入是将特定元素的离子加速后注入锤头表面，改变表层的成分和结构，注入层与基体之间没有明显的界面，不存在涂层剥落的风险。这些技术目前仍处于实验室研究或小规模试验阶段，距离工业应用还有一定距离。

版权与免责声明

8.3.3 精密成型、高一一致性智能化锤头的开发思路

精密成型是指通过优化压制模具设计、烧结收缩控制以及后续精加工工艺，使硬质合金安全锤头的几何尺寸和形状精度达到较高水平。对于整体式硬质合金锤头，精密成型的难点在于尖锥作业端的形状控制。由于烧结过程中存在各向异性的收缩行为，模具设计时预留的收缩余量需要经过多次试验修正才能确定。采用计算机模拟技术对压制和烧结过程进行仿真，可以辅助模具设计，缩短开发周期。对于复合式锤头，精密成型的重点在于硬质合金作业端与基体安装孔的配合间隙控制，这要求两者的加工精度均达到较高水平。

高一一致性是指在批量生产条件下，不同批次产品以及同批次不同产品之间的性能差异控制在较小范围内。一致性的提升依赖于生产过程的自动化和智能化改造。具体措施包括：采用自动配料系统和在线检测设备，减少人工操作带来的误差；采用带闭环控制的烧结炉，实时监控和调整烧结温度、气氛和压力；建立产品追溯系统，记录每一批次产品的原料来源、工艺参数和检测结果，便于质量问题的追溯和分析。

智能化的更高层次是实现生产过程的数字孪生和自适应控制。数字孪生是指在虚拟空间中构建与实际生产线相对应的数字模型，通过实时数据交换实现对生产过程的仿真、预测和优化。自适应控制是指生产设备根据检测数据自动调整工艺参数，使产品质量保持在目标范围内。这些技术在汽车、电子等行业的应用已经较为成熟，在硬质合金工具行业的推广需要解决数据采集设备的兼容性和工艺模型的准确性等问题。

8.3.4 低成本、长寿命绿色制备工艺探索与优化

绿色制备工艺是指在硬质合金安全锤头的生产过程中，减少能源消耗、降低污染物排放、提高资源利用效率的技术路线。硬质合金生产属于高能耗行业，烧结工序需要将材料加热至1350℃以上并保持较长时间，电力消耗在生产成本中占有相当比例。降低烧结温度是节能的有效途径之一，可通过使用细晶粒碳化钨粉末或在混合粉末中添加烧结助剂来实现。

废钨资源的回收利用是绿色制备工艺的重要组成部分。硬质合金生产过程中的废料（如压制废品、烧结废品、磨削废料）以及使用后的废旧工具，均含有较高品位的钨和钴，具有回收价值。回收方法包括锌熔法、电化学溶解法和机械破碎法等。锌熔法利用锌与钴的亲合力，将废旧硬质合金在锌熔液中处理，使钴溶解进入锌液，碳化钨保持固态，分离后得到可直接使用的碳化钨粉末。这一方法回收效率较高，已在部分大型硬质合金企业中实现工业化应用。从产业政策来看，发展循环经济、降低原生资源消耗是行业发展的方向，再生钨领域的头部企业正在积极布局废钨回收技术。

长寿命设计是绿色制备理念的延伸。通过提高单只锤头的使用寿命，可以在满足同样使用需求的前提下减少产品总产量，从而降低全生命周期的资源消耗和环境负荷。实现长寿命的技术路径包括：优化硬度与韧性的匹配，使锤头在耐磨性和抗冲击性之间取得更好的平衡；采用可更换式结构设计，使磨损后的锤头可以更换尖端而非整体报废；开发自锐性材料，使锤头在使用过程中自动保持尖端的锐利度。这些技术路线的探索和优化，将为硬质合金安全锤头产业的可持续发展提供技术支撑。

版权与免责声明

8.4 硬质合金安全锤头产业发展的驱动因素与制约因素

矿山开采、基础设施建设及废旧物料回收等行业的持续发展，对破碎设备耐磨部件的性能要求不断提升，是硬质合金安全锤头产业的主要需求驱动力。复合结构设计（如镶嵌式锤头）和钢结硬质合金硬化层技术的应用，使锤头使用寿命比传统高锰钢产品提升 3 倍以上，满足了用户对降低停机更换频次的需求。高硬度（HRA 90 以上）和优异的耐磨性使其在破碎高磨蚀性物料时具有性能优势。

硬质合金安全锤头的主要制约因素包括：原材料价格波动较大，碳化钨、钴等战略性金属价格受国际市场供需影响明显；产品内部残余应力难以完全消除，在承受较大冲击负荷时存在开裂风险；高精度磨削加工成本较高，影响产品在价格敏感型市场的推广。

8.4.1 技术进步、智能制造升级的行业需求驱动

技术进步是推动硬质合金安全锤头产业发展的核心驱动力。在材料层面，硬质合金牌号的持续优化和新型粘结相的开发，使锤头的综合性能不断提升，能够适应更加多样化的使用场景。在工艺层面，粉末冶金技术和钎焊技术的进步，提高了产品的质量稳定性和生产效率。在检测层面，无损检测技术的应用使得产品在出厂前能够更全面地排除内部缺陷，降低了使用过程中的失效风险。

智能制造升级是行业需求驱动在制造端的体现。随着劳动力成本的上升和产品质量要求的提高，硬质合金工具生产企业对自动化、智能化生产装备的需求日益增长。目前我国机床数控化率已达 66.4%，数控设备正向高速、高精、智能化方向发展。这一趋势在硬质合金工具行业同样有所体现，自动压制设备、带闭环控制的烧结炉以及机器人辅助的钎焊生产线正在逐步替代传统的人工操作设备。

终端用户对产品性能和使用体验的要求提升，也是驱动行业发展的重要因素。在交通运输应急领域，公共交通工具运营企业希望安全锤在长期存放后仍能可靠使用，这推动了产品在老化性能和防误触发设计方面的改进。在工业加工领域，用户对工具的耐用性和更换便利性提出了更高期望，推动了复合式结构的普及和模块化设计的发展。

8.4.2 钨基原材料价格波动对产品市场的影响

钨是硬质合金安全锤头的主要原材料，碳化钨粉末在锤头成本中占有较高比重，通常可达到 60%至 70%。因此，钨精矿和钨粉价格的波动对硬质合金安全锤头产品的成本和市场价格具有直接影响。2026 年以来，钨矿市场迎来强势上涨行情，核心品种价格接连刷新历史纪录。截至 2026 年 3 月，65%黑钨精矿报价达到 105 万元/标吨，较年初上涨 128.3%；钨粉价格报 2400 元/公斤，较年初上涨 122.2%。这一轮价格上涨由供给收紧、需求回暖、战略属性重估三重因素共同推动。

钨价上涨对硬质合金安全锤头产业的影响是双重的。一方面，原材料成本上升挤压了生产企业的利润空间。对于议价能力较弱的中小企业，成本压力尤为突出，部分企业已陷入成本倒

挂的困境，减产、停工现象开始显现。另一方面，高钨价推动了行业的结构调整。部分企业加速向高附加值产品转型，通过产品升级实现溢价，缓解成本压力。也有企业开始布局废钨回收技术，试图通过提升再生钨的使用比例来降低对原生钨的依赖。

从长期来看，钨的战略资源属性将进一步凸显，其稀缺性和价值将得到市场的重估。这意味着钨价回归到历史低位的可能性较低，下游产业的成本压力可能长期存在。对于硬质合金安全锤头生产企业而言，适应高钨价时代的策略包括：优化产品设计、减少材料浪费；开发低钴或无钴粘结相体系；建立废旧产品的回收利用体系；以及向下游传导成本压力时加强与客户的沟通协调。

8.4.3 原材料供应、环保政策与生产成本制约分析

钨原料供应的稳定性是硬质合金安全锤头产业面临的主要制约因素之一。我国虽然是全球最大的钨资源生产国和消费国，但钨矿属于战略性矿产资源，国家对其实行开采总量控制制度。2026年开采指标延续偏紧基调，全年指标较上年有所下调。与此同时，矿山复产节奏较慢，库存低位运行，市场现货偏紧、企业惜售情绪明显。这种供应格局使得下游企业难以建立稳定的原料库存，增加了供应链管理的难度。

环保政策的趋严是另一个制约因素。硬质合金生产过程中的粉末冶金、钎焊和表面处理等工序，涉及粉尘、废气、废水和固体废物的排放，需要满足日益严格的环保法规要求。一方面，环保投入的增加推高了生产成本；另一方面，部分环保设施不完善的中小企业面临关停风险，行业供给能力可能进一步收缩。从积极的角度来看，环保政策的实施有利于淘汰落后产能，提高行业集中度，推动产业结构优化。

生产成本的多重压力正在改变行业的竞争格局。除了钨原料价格高企外，劳动力成本、能源成本以及环保合规成本也在持续上升。这些因素叠加在一起，使得生产成本显著增加。面对成本压力，不同的企业采取了不同的应对策略：部分企业通过提高产品价格将成本向下游传导，部分企业通过内部挖潜降低消耗，还有部分企业通过开发高附加值产品实现结构升级。



中钨智造硬质合金安全锤头

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

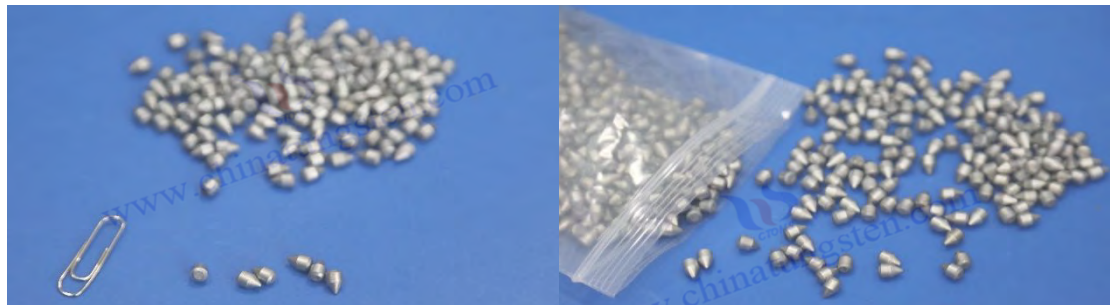
如有关于硬质合金安全锤头的生产需求，请联系制造商：中钨智造（厦门）科技有限公司

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



附录 A 中国硬质合金安全锤头标准

中国的硬质合金锤头标准体系由国家标准（GB/T）、行业标准（YS）和团体标准等多个层级构成，覆盖了从产品分类、技术要求、试验方法到检验规则、标志包装的全过程规范。其中，与硬质合金安全锤头直接相关的标准主要包括产品标准和基础通用标准两大类。

A.1 现行主要标准概览

1. YS/T 1610023《硬质合金锤头齿》

该标准是硬质合金锤头齿领域的行业标准，由中华人民共和国工业和信息化部发布，于 2023 年 12 月 20 日发布，2024 年 7 月 1 日正式实施。标准号为 YS/T 1610023，中国标准分类号为 H72，国际标准分类号为 77.160。该标准适用于硬质合金锤头齿的生产和检验，是当前国内硬质合金锤头产品最为直接的技术规范。

该标准规定了硬质合金锤头齿的产品分类和型号表示规则、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输、贮存、随行文件及订货单内容。在产品分类方面，根据形状将锤头齿分为 8 类：A 型、B 型、C 型、D 型、E 型、F 型、G 型及其他类，产品典型型号尺寸及示意图见标准附录 A。型号表示规则为：锤头齿用字母 TC 表示，其后依次为长度（三位整数）、宽度（两位整数）、高度（两位整数）、其他重要尺寸（两位整数）及形状字母。例如，TC1102313A 表示长度为 110mm、宽度为 23mm、高度为 13mm 的 A 型锤头齿；TC178231308C 表示长度为 178mm、宽度为 23mm、高度为 13mm、增头高度为 8mm 的 C 型锤头齿。

在技术要求方面，标准推荐采用钨含量为 6.0%~10.0%的 WC-Co 合金，化学成分、物理性能、金相组织结构及尺寸允许偏差均有明确规定。物理性能应符合表 2 规定，金相组织结构中大于 125 μm 的缺陷不应出现。尺寸允许偏差按产品尺寸范围分类规定，工作面弯曲度应不大于 0.5mm，非工作面弯曲度应不大于 0.8mm。外观质量要求产品表面应喷砂处理，无明显脏污、烧结痕迹，不应有目视可见的裂纹、分层、未压好等缺陷。

2. QB/T 5231018《镶嵌硬质合金型安全锤》

该标准是交通安全应急领域的重要产品标准，对镶嵌硬质合金型安全锤的技术要求作出了系统规定。该标准明确要求安全锤的锤击端硬质合金块的硬度不应低于 HRA89，并对锤头的尺寸、装配要求和使用性能提出了规范。根据该标准，安全锤的锤击端硬质合金可采用不低于 YG6 牌号的硬质合金材料，这一要求为硬质合金安全锤头的材料选择提供了依据。

3. GB/T 5242017《硬质合金制品检验规则与试验方法》

该标准是硬质合金制品的通用检验规范，适用于烧结态硬质合金制品的化学成分、物理与力学性能、组织结构、形位尺寸、外观质量的检验与试验。标准号为 GB/T 5242017，于 2017 年 10 月 14 日发布，2018 年 5 月 1 日实施，代替了 GB/T 5242006 版本。该标准规定了硬质合金制品的检验项目、组批规则、取样规则和试验方法，是硬质合金锤头检验的基础依据。

版权与免责声明

该标准的主要检验项目包括：化学成分（每批任取 1 份送检）、物理与力学性能、金相组织（每批任取不少于 2 件）、尺寸、外观质量等。其中，冲击韧性试验按 GB/T 1817 规定进行，每批制取试样不少于 5 件。标准还增加了坠落检验（或敲打检验）项目，规定长度不小于 150mm 的棒材制品应逐件进行坠落检验或敲打检验。试验方法包括化学成分测定、金相组织观察、物理性能检测等，具体方法依据相应的检测方法标准执行。

A.2 相关基础标准

与硬质合金安全锤头相关的其他基础标准包括：

GB/T 5124.3 硬质合金化学分析方法：规定了钴量的测定方法，采用电位滴定法，适用于硬质合金中钴含量的化学分析。

GB/T 5243 硬质合金制品的标志、包装、运输和贮存：规定了硬质合金制品的标志、包装、运输和贮存要求，是产品出厂和流通环节的规范依据。

GB/T 3489 硬质合金 孔隙度和非化合碳的金相测定：用于硬质合金金相组织结构的检测，评价材料内部孔隙和游离碳的分布情况。

GB/T 3488 硬质合金 显微组织的金相测定：用于硬质合金显微组织的金相检测。

A.3 标准体系特点

中国硬质合金锤头标准体系具有以下特点：

层次分明：国家标准（GB/T）规定通用检验规则和试验方法，行业标准（YS/T）规定具体产品技术规范，形成了从基础方法到产品应用的标准链条。

技术要求全面：涵盖化学成分、物理性能、金相组织、尺寸精度、外观质量等多个维度，对产品的性能表征较为完整。

分类系统化：根据锤头齿的几何形状建立了 A 型至 G 型等 8 个类别，型号表示规则规范统一，便于产品的识别和管理。

检验规则明确：规定了组批规则、取样规则、检验结果的判定规则，化学成分不合格允许复检一次，物理性能不合格允许双倍复检。

附录 B 国际硬质合金安全锤头标准

在国际范围内，硬质合金产品主要采用 ISO（国际标准化组织）标准和各国各自的技术规范体系。硬质合金锤头作为一种专业化工具，其国际标准体系的构建与中国标准体系存在一定的差异。

版权与免责声明

B.1 ISO 硬质合金牌号分类系统

ISO 硬质合金分类系统是按照硬质合金的使用标号进行分类，而不是按化学成分、显微组织、物理性能和其它特征进行分类。欧洲和日本等国家和地区主要采用 ISO 分类系统，该系统将硬质合金按加工对象和应用领域划分为不同的应用类别，用字母和数字组合表示。

ISO 分类系统中的 K 类硬质合金（如 K10、K20、K30 等）是钨钴类合金，主要用于铸铁、有色金属和非金属材料的加工。

ISO 标准对硬质合金的性能表征包括硬度、抗弯强度、密度、矫顽磁力等指标，其试验方法标准与中国国家标准有一定的对应关系。

B.2 硬质合金试验方法国际标准

ISO 3878《硬质合金 维氏硬度试验》规定了硬质合金维氏硬度的测试方法，是国际通用的硬质合金硬度检测标准。

ISO 4506《硬质合金 抗弯强度试验方法》规定了硬质合金抗弯强度的测试方法，采用三点弯曲加载方式测定试样的抗弯强度。

ISO 3327《硬质合金 横向断裂强度的测定》规定了硬质合金横向断裂强度的测试方法。

附录 C 欧美日韩等国的硬质合金安全锤头标准

C.1 美国标准体系

美国硬质合金工具主要采用“C 类”分类系统，该系统按硬质合金的应用领域将产品划分为 C1 至 C4 等牌号，主要用于金属切削和耐磨应用。C 类系统虽然不如 ISO 系统详细，但在北美市场具有广泛应用。

美国 C 类系统的典型牌号包括：C2/C10 对应于碳化钨 90%、钴 10%的成分组成，在耐磨性和韧性之间取得平衡，适用于金属切削、磨损和模具应用；C3 对应于碳化钨 94%、钴 6%的成分组成，具有高硬度和耐磨性，适用于金属切削、能源应用；C12 对应于碳化钨 85%、钴 15%的成分组成，韧性较好，硬度中等，适用于磨损与模具应用。

在特殊用途方面，美国企业还有专用的采矿工具牌号，如 Hyperion 公司开发的 H6P 牌号为碳化钨 94%、钴 6%，用于采矿钻头；H10C 牌号为碳化钨 91%、钴 9%，用于 HPGR 螺柱。这些专用牌号的开发思路与硬质合金安全锤头的材料设计具有参考价值。

美国硬质合金试验方法标准主要由 ASTM（美国材料与试验协会）制定。ASTM B6113 是硬质合金高应力磨损试验的标准方法，适用于硬质合金、陶瓷和金属陶瓷等高硬度材料的耐磨性

版权与免责声明

评价。ASTM G65 是硬质合金干式磨损试验的标准方法，使用橡胶轮带动磨料在试样表面滑动。ASTM B294 是硬质合金硬度的标准测试方法。

C.2 欧洲标准体系

欧洲硬质合金工具主要采用 ISO 分类系统，同时部分国家也有各自的标准体系。德国是欧洲硬质合金工业最为发达的国家之一，其工业标准在许多方面与国际标准接轨。欧洲硬质合金生产企业在高端硬质合金材料开发方面处于领先地位，特别是在超细晶粒硬质合金、梯度结构硬质合金和涂层技术方面。

欧洲硬质合金标准的典型特征是对材料性能的系统性表征，包括碳化钨晶粒度的精确控制、钴分布均匀性的金相评价以及抗弯强度的全面测试。欧洲企业在硬质合金烧结工艺控制、热等静压处理等方面积累了丰富的技术经验，这些工艺能力在高端锤头产品的生产中具有应用价值。

C.3 日本标准体系

日本硬质合金工具主要参照 ISO 分类系统，同时日本工业标准（JIS）中也有硬质合金的相关规范。日本是亚洲硬质合金工业的重要国家，其硬质合金产品在精密加工、微型工具等领域具有特色。

日本硬质合金标准的典型特点是对产品精度和一致性的严格要求。日本企业在粉末制备、压制成型、烧结控制等环节的技术水平处于世界前列，特别是在细晶粒硬质合金的工业化生产方面积累了丰富的丰富经验。

C.4 韩国标准体系

韩国硬质合金工业发展较快，其标准体系与国际标准接轨程度较高。韩国硬质合金企业通过技术引进和自主创新，在切削工具、矿山工具等领域形成了一定的市场竞争力。韩国硬质合金标准体系主要参照 ISO 标准和日本 JIS 标准，同时结合本国工业发展特点进行了适应性调整。

C.5 各国标准对比

综合对比各国标准，中国标准体系在产品分类和型号表示方面较为系统，YS/T 1610023 标准对锤头齿的分类和型号标识做出了详细规定；ISO 标准以应用分类见长，K 类牌号的划分便于用户根据加工对象进行选择；美国 C 类系统简洁实用，但在精细程度上略逊于 ISO 系统；日本标准以精度要求严格著称。

在性能要求方面，各国标准对硬度和耐磨性的要求趋势相近，但在具体指标和试验方法上存在一定差异。中国标准普遍参照 ISO 标准制定，与国际标准体系保持了较好的一致性。

版权与免责声明

附录 D 硬质合金安全锤头术语表

术语名称	定义与说明
碳化钨	硬质合金的主要硬质相，碳原子嵌入钨晶格间隙形成。具有极高硬度（1800200HV）、高熔点和良好化学稳定性，是锤头耐磨性的主要来源。
钴	最常用的粘结相金属。具有良好的塑性和韧性，烧结时熔化并粘结碳化钨颗粒。钴含量通常在 6%~5%，直接决定合金的韧性与强度的平衡。
镍	可作为粘结相的金属材料。相比钴，耐腐蚀性能更优，但对碳化钨的润湿性略差，常用于特定环境要求的产品。
硬质相	硬质合金中承担抵抗磨损和压入功能的组分，主要由碳化钨等金属碳化物构成。其硬度和体积分数决定了材料的耐磨性能。
粘结相	硬质合金中连接和支撑硬质相的组分，常用钴、镍或铁等金属。通过塑性变形吸收冲击能量，并为材料提供必要的断裂韧性。
YG 系列牌号	中国钨钴类硬质合金国标代号。“Y”代表硬质合金，“G”代表钴，数字代表钴的质量分数（如 YG6 表示钴含量约 6%）。
晶粒度	碳化钨颗粒的尺寸大小。细晶粒（0.5.0 μm）硬度较高，粗晶粒（3.0 μm 以上）韧性较好，需根据工况权衡选择。
整体式结构	锤头整体由单一硬质合金通过粉末冶金一体成型，无拼接。材质均匀，但韧性受材料本身限制。
复合式结构	“钢基体+硬质合金作业端”的组合结构。基体提供韧性，硬质合金端负责破玻，通过钎焊或机械夹固连接。
尖锥作业端	锤头直接接触并破碎玻璃的部分。通常设计为锥形，锥角在 60° 至 90° 之间，用于集中冲击应力。
装配段	锤头与锤柄或锤体连接的区域。通常设计为圆柱状或棱柱状，用于传递冲击力并确保连接稳固。
钎焊接头	复合式结构中连接硬质合金作业端与钢基体的界面。通过熔化钎料填充间隙形成冶金结合。
洛氏硬度 HRA	硬质合金硬度检测的主要标尺。采用金刚石圆锥压头，总试验力 588.4N。YG8 硬度约 HRA890，YG6 约 HRA912。
抗弯强度	材料在弯曲载荷下抵抗断裂的能力（三点弯曲法）。WC-Co 硬质合金的抗弯强度可达 2400800N/mm ² 。
断裂韧性	材料抵抗裂纹扩展的能力参数，单位为 MPa·m ^{1/2} 。硬质合金的断裂韧性通常随钴含量增加而提高。
耐磨性	材料在摩擦或磨损条件下抵抗质量损失的能力。硬质合金的高耐磨性源于碳化钨硬质相的支撑效应。
粉末冶金	硬质合金安全锤头的主要制造工艺，主要包括原料混合、压制成型、烧结致密化等工序。
烧结	将粉末压坯在高温下加热致密化的工艺。硬质合金烧结温度通常为 1350℃~1450℃，属于液相烧结。
钎焊	复合式结构中连接硬质合金与钢基体的工艺。使用银基或铜基钎料，通过高温熔化填充接头间隙。

版权与免责声明

硬质合金安全锤头参考文献

中文参考文献

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. YS/T 1610023 硬质合金锤头齿[S]. 2023.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. QB/T 5231018 镶嵌硬质合金型安全锤[S]. 2018.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5242017 硬质合金制品检验规则与试验方法[S]. 2017.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1817017 硬质合金常温冲击韧性试验方法[S]. 2017.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 3851015 硬质合金 横向断裂强度试验方法[S]. 2015.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 3849.1015 硬质合金 洛氏硬度试验(A标尺) 第1部分: 试验方法[S]. 2015.
- [7] 中华人民共和国工业和信息化部. YS/T 295 建材加工工具用硬质合金制品[S].
- [8] 厦门中钨在线科技有限公司. 什么是硬质合金安全锤头? [EB/OL]. (2026-053).
- [9] 袁国良, 曾显华, 张柳水, 等. 一种机械夹固式超细硬质合金锤头: CN201020280563.8[P]. 2011-065.
- [10] 谢志勇, 程福军. 一种组合锤头: CN201320523770[P]. 2014-036.
- [11] 卢洪波, 廖清泉, 马峰, 等. 一种加固式锤头结构: CN201520366542.0[P]. 2015-09-30.

英文参考文献

- [1] International Organization for Standardization. ISO 3878:1983 Hardmetals — Vickers hardness test[S]. 1983.
- [2] International Organization for Standardization. ISO 4506:2018 Hardmetals — Determination of transverse rupture strength[S]. 2018.
- [3] International Organization for Standardization. ISO 3327:2009 Hardmetals — Determination of transverse rupture strength[S]. 2009.
- [4] International Organization for Standardization. ISO 3369:1975 Impermeable sintered metal materials and hardmetals — Determination of density[S]. 1975.
- [5] International Organization for Standardization. ISO 3738:1982 Hardmetals — Rockwell hardness test (scale A) [S]. 1982.
- [6] International Organization for Standardization. ISO 28079:2009 Hardmetals — Palmqvist toughness test[S]. 2009.
- [7] ASTM International. ASTM B6113 Standard Test Method for Abrasive Wear Resistance of Cemented Carbides[S]. 2013.
- [8] ASTM International. ASTM G656 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus[S]. 2016.
- [9] ASTM International. ASTM A576 Standard Specification for Steel Bars, Carbon, Hot-Wrought, Special Quality[S].
- [

版权与免责声明