

# 煤矿用掘进机耐磨材料的研究与应用

胡照钊 吴皓亮 毛鹏程 胡爱琴 周梦翔 何涟漪 曾亨

浙江宝通工程机械有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19220

**[摘要]** 煤矿用掘进机耐磨材料的研究聚焦于应对凿削、冲击、腐蚀等复杂工况。当前,高铬铸铁基复合材料、钢结硬质合金、陶瓷增强复合材料及表面强化技术(如等离子喷涂、激光熔覆)成为主流方向。通过优化合金成分、热处理工艺及复合结构设计,材料耐磨性显著提升,如高铬铸铁截齿寿命延长1倍以上,激光熔覆涂层使TBM刀盘维修周期延长至450h,全生命周期成本降低40%以上。

**[关键词]** 煤矿用掘进机; 耐磨材料; 研究; 应用

**中图分类号:** TD421.5 **文献标识码:** A

## Research and Application of Wear-Resistant Materials for Coal Mine Roadheaders

Zhaoju Hu Haoliang Wu Pengcheng Mao Aiqin Hu Mengxiang Zhou Lianyi He Heng Zeng  
Zhejiang Baotong Construction Machinery Co., Ltd.

**[Abstract]** The research on wear-resistant materials for coal mine roadheaders focuses on addressing complex working conditions such as cutting, impact, and corrosion. Currently, high chromium cast iron-based composite materials, steel-bonded carbides, ceramic-reinforced composites, and surface strengthening technologies (such as plasma spraying and laser cladding) have become the mainstream directions. By optimizing alloy composition, heat treatment processes, and composite structure design, the wear resistance of materials has been significantly improved. For example, the service life of high chromium cast iron picks has been extended by more than twice, and the laser cladding coating has extended the maintenance cycle of TBM cutterheads to 450 hours, reducing the full life cycle cost by more than 40%.

**[Key words]** coal mine roadheader; wear-resistant material; research; application

### 引言

煤矿高效开采中,掘进机关键部件如截齿、刀盘等,因长期面临高应力凿削、周期性冲击以及井下潮湿腐蚀等恶劣工况,磨损严重、寿命短暂,成为制约开采效率与成本控制的关键瓶颈。传统耐磨材料性能单一,难以兼顾硬度、韧性与耐腐蚀性。为此,本文围绕金属基、陶瓷增强复合材料及先进表面强化技术展开研究,旨在开发高性能耐磨材料体系,提升掘进机服役寿命与作业可靠性。

### 1 煤矿掘进机磨损机理与材料需求分析

#### 1.1 典型工况下的磨损形式

(1) 凿削磨损:截齿与岩层接触时,岩层硬质点对截齿表面产生切削作用,形成犁沟状磨损痕迹,尤其在切割硬度较高的砂岩、页岩时,磨损速率显著加快,导致截齿刃口快速钝化。(2) 冲击磨损:落煤过程中,煤块对截割头产生周期性冲击载荷,使截割头表面材料反复承受应力作用,逐渐产生疲劳剥落,形成凹坑或剥落坑,降低截割头结构强度。(3) 腐蚀磨损:煤矿井下高湿度环境中,煤尘中的酸性物质与水分结合,形成腐蚀性介质,

附着在掘进机零部件表面,引发电化学腐蚀,同时磨损过程破坏腐蚀产物膜,加速腐蚀-磨损协同作用,加剧部件失效。

#### 1.2 耐磨材料性能要求

(1) 高硬度与韧性平衡:材料需具备较高硬度以抵抗硬质点切削,同时需良好韧性避免受冲击时开裂,通过调控显微组织(如马氏体+贝氏体复相组织),提升抗裂纹萌生与扩展能力。(2) 耐热疲劳性能:截齿切割过程中因摩擦生热,表面温度可达300-500℃,材料需在循环高温下保持组织稳定,避免热裂纹产生。(3) 加工性能与可焊接性:材料需易于切削、锻造加工,满足复杂零部件成型需求;同时具备良好可焊接性,方便磨损后进行堆焊修复,降低更换成本<sup>[1]</sup>。

#### 1.3 材料失效模式分析

(1) 显微组织演变与裂纹萌生机制:长期磨损与冲击作用下,材料表层晶粒细化,位错密度增加,形成加工硬化层;当应力超过材料屈服极限时,在晶界、第二相粒子界面等薄弱区域萌生微裂纹,微裂纹扩展后导致材料剥落失效。(2) 磨损表面形貌特征 (SEM/EDS分析):通过扫描电子显微镜 (SEM) 观察,凿削磨损表面

可见明显犁沟与切削痕,冲击磨损表面存在剥落凹坑与疲劳裂纹,腐蚀磨损表面覆盖疏松腐蚀产物;能谱分析(EDS)显示,磨损表面存在煤中S、P等元素,证明腐蚀-磨损协同作用。

## 2 煤矿用掘进机新型耐磨材料体系设计与制备技术

### 2.1 金属基复合材料

#### 2.1.1 高铬铸铁基复合材料

(1)  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 碳化物增强机制:Cr元素与C元素在凝固过程中形成 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 碳化物,其显微硬度高达HV1800-2200,可有效抵抗岩层硬质点切削;碳化物呈针状或块状分布于铸铁基体,形成“硬质点骨架”,当磨料作用于材料表面时, $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 优先承受磨损,减少基体损耗,显著提升整体耐磨性。(2) 热处理工艺对组织均匀性的影响:采用“水淬+280-320℃等温回火”工艺,可细化晶粒并改善碳化物分布;若等温温度过低(<280℃),易出现马氏体组织粗大,碳化物聚集;温度过高(>320℃)则导致碳化物分解,硬度下降;优化后工艺可使碳化物分布均匀度提升35%,避免局部磨损过快<sup>[2]</sup>。

#### 2.1.2 钢结硬质合金

(1) WC颗粒分布优化与界面结合强度:通过机械合金化预处理,将WC颗粒(粒径5-10 μm)均匀分散于40Cr钢基体,WC体积分数控制在30%-40%;采用真空烧结(1250-1300℃)促进基体与WC界面形成 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 过渡相,界面结合强度提升至850MPa,避免磨损过程中WC颗粒脱落。(2) 激光熔覆制备工艺参数控制:激光功率设定为1.8-2.2kW,扫描速度5-8mm/s,送粉量20-25g/min;功率过低易导致熔覆层与基体结合不牢,过高则造成WC颗粒过烧;优化参数可制备厚度2-3mm、孔隙率<1%的熔覆层,硬度达HRC62-65。

### 2.2 陶瓷增强复合材料

#### 2.2.1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷刀具材料

(1) 烧结助剂对致密化的作用:添加5%-8%的 $\text{MgO}-\text{Y}_2\text{O}_3$ 复合助剂,可降低烧结温度(从1600℃降至1450℃),促进颗粒扩散;助剂填充陶瓷颗粒间隙,使材料致密度从88%提升至96%,减少孔隙对耐磨性的削弱。(2) 抗热震性能提升策略:通过颗粒级配( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粒径2-5 μm、TiC粒径1-3 μm),降低热膨胀系数差异;引入10%-15%的SiC晶须,构建“晶须桥接”结构,当材料承受热冲击时,晶须可吸收能量,抑制裂纹扩展,使热震断裂韧性提升至4.5MPa·m(1/2)。

#### 2.2.2 SiC纤维增强金属基复合材料

纤维取向对耐磨性的影响:采用单向纤维排布(纤维方向与磨损方向平行),纤维可直接阻挡磨料切削,耐磨性较无规取向提升60%;若纤维方向与磨损方向垂直,易因纤维端部暴露导致磨损加剧;实际应用中,根据截齿受力方向设计纤维取向,实现定向抗磨。

### 2.3 表面强化技术

(1) 等离子喷涂技。WC-Co涂层在截齿上的应用:采用大气等离子喷涂,将WC-Co粉末(Co含量12%)喷涂于42CrMo截齿表面,涂层厚度0.3-0.5mm,硬度HRC60-63;在软岩(煤层)工况下,涂层

可使截齿寿命延长2倍,且喷涂效率高(单件喷涂时间<10min),适合批量生产。(2) 激光熔覆技术。Fe基金属涂层耐磨性对比实验:对比Fe-Cr-B-Si合金涂层与传统堆焊涂层,在相同磨料磨损工况下,Fe-Cr-B-Si涂层磨损率为 $1.2 \times 10^{-5} \text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ,较传统涂层( $3.5 \times 10^{-5} \text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ )降低65%;因涂层中形成CrB、 $\text{Fe}_3\text{B}$ 硬质相,抗磨性能显著优于堆焊层。(3) 物理气相沉积(PVD)。TiN涂层在潮湿环境中的耐腐蚀性:采用电弧离子镀制备TiN涂层(厚度2-3 μm),涂层致密度高且与基体结合牢固;在模拟井下潮湿环境(相对湿度90%、含0.5% $\text{H}_2\text{S}$ )中,经1000h腐蚀试验,涂层腐蚀速率仅0.02mm/年,较未涂层基体(0.15mm/年)降低87%,有效抵御腐蚀磨损<sup>[3]</sup>。

## 3 煤矿用掘进机新型耐磨材料性能测试与优化

### 3.1 实验室性能测试

(1) 硬度测试(HV、HRC):采用维氏硬度计(HV)测试复合材料表层硬度,针对高铬铸铁基材料,重点检测 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 碳化物区域硬度(要求 $\geq \text{HV}1800$ ),评估硬质点抗磨能力;采用洛氏硬度计(HRC)测试基体整体硬度,钢结硬质合金基体硬度需控制在HRC50-55,平衡硬度与韧性;测试时每类材料取5个不同区域,取平均值减少误差。(2) 冲击韧性测试(CharpyV型缺口):按GB/T229-2020标准制备V型缺口试样,在-20℃(模拟井下低温环境)与室温下分别进行冲击试验,检测材料抗冲击能力。陶瓷增强复合材料冲击韧性需 $\geq 5 \text{kJ}/\text{m}^2$ ,金属基复合材料需 $\geq 15 \text{kJ}/\text{m}^2$ ,确保材料在落煤冲击下不发生脆性断裂;通过断面形貌分析,判断断裂模式(韧性断裂/脆性断裂),为成分调整提供依据。(3) 三体磨料磨损试验(ASTM G65标准):选用石英砂(粒径0.5-1mm,模拟岩层磨料)作为磨料,加载力50N、转速200r/min,测试材料磨损量。金属基复合材料磨损率需 $\leq 5 \times 10^{-5} \text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ,陶瓷材料需 $\leq 2 \times 10^{-5} \text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ;对比不同材料磨损曲线,分析磨料对材料表面的切削、犁沟作用机制,筛选抗磨性能最优材料。

### 3.2 模拟工况加速磨损试验

(1) 截割头模拟试验台设计:试验台采用“电机-减速箱-截割头”传动结构,模拟井下截割岩层工况,配备岩样夹持装置(可更换砂岩、页岩等不同岩性试样)与载荷监测系统;截割头表面焊接待测试材料试样,设定截割速度3-5m/s、进给量8-12mm/r,实现加速磨损测试。(2) 磨损率与截割功率的关联性分析:试验过程中实时记录截割功率变化,每运行1h测量试样磨损量(称重法),建立磨损率-截割功率关系曲线。当材料磨损率增至初始值2倍时,若截割功率增幅 $\leq 15\%$ ,说明材料抗磨稳定性良好;通过该分析,可判断材料在实际截割作业中的能耗与寿命匹配性<sup>[4]</sup>。

### 3.3 材料优化方向

(1) 基于正交实验的成分-工艺-性能映射关系:以高铬铸铁基材料为例,选取Cr含量(15%-20%)、等温淬火温度(250-350℃)、保温时间(1-3h)为影响因素,设计 $L_9(3^4)$ 正交实验,以硬度、冲击韧性、磨损率为评价指标,构建成分-工艺-性能映射模型,确定最优参数组合(如Cr18%、淬火温度300℃、保

温时间2h)。(2)多尺度仿真(CAE)辅助设计:采用ANSYS软件建立微观(碳化物分布)-宏观(截割头结构)多尺度模型,微观尺度模拟 $Cr_7C_3$ 碳化物与基体的应力传递,优化碳化物体积分数(控制在25%-30%);宏观尺度模拟截割过程中材料受力分布,预测易磨损区域,指导表面强化技术(如等离子喷涂)的应用位置,减少试验成本与周期。

#### 4 煤矿用掘进机新型耐磨材料工程应用案例与经济效益分析

##### 4.1 某煤矿掘进机截齿耐磨改造案例

(1)传统截齿与新型截齿的寿命对比:该煤矿原使用传统硬质合金截齿,平均使用寿命15天,月消耗量达400件;采用高铬铸铁基复合材料截齿( $Cr_7C_3$ 碳化物增强)后,使用寿命延长至37天,月消耗量降至160件,月消耗量降低60%,减少截齿更换频次,降低备件采购成本。(2)截割效率提升数据:改造前传统截齿因快速磨损,截割硬岩(砂岩)时平均进尺速度3.2m/h;新型截齿因抗磨性提升,截割过程中刃口保持锋利,进尺速度提升至4.0m/h,进尺速度提高25%,单班掘进量从25m增至31m,缩短工作面推进周期。

##### 4.2 全断面掘进机(TBM)刀盘耐磨涂层应用

(1)激光熔覆涂层在硬岩工况下的适应性:在某煤矿TBM刀盘易磨损区域(刀圈外侧、辐板边缘)制备Fe-Cr-B-Si激光熔覆涂层,涂层硬度达HV850;在截割抗压强度80MPa的花岗岩工况下,连续作业300h后涂层磨损量仅0.3mm,无剥落现象,适配硬岩高磨损工况。(2)维修周期延长导致的停机成本降低:未涂层刀盘平均每150h需停机维修(补焊耐磨层),单次停机成本(人工、设备闲置)约8万元;激光熔覆涂层刀盘维修周期延长至450h,月停机次数从2次降至0.7次,月减少停机成本约10.4万元,显著提升设备利用率。

##### 4.3 成本效益综合评估

(1)材料成本与使用寿命的LCC(全生命周期成本)模型:以新型截齿为例,单件采购成本(800元)较传统截齿(500元)高60%,但使用寿命延长1.5倍;按1年使用周期计算,传统截齿LCC(采购+更换人工)为28.8万元,新型截齿LCC为15.4万元,全生命周期成本降低46.5%。(2)投资回收期计算与敏感性分析:TBM刀盘激光熔覆涂层初始投资(设备+施工)50万元,月节省停机成本10.4万元,静态投资回收期约4.8个月;敏感性分析显示,若硬岩比例增加10%,涂层磨损率上升8%,投资回收期延长至5.2个月,仍具备经济可行性。

#### 5 结束语

煤矿用掘进机耐磨材料的研究与应用,通过金属基复合材料、陶瓷增强体系及表面强化技术的创新设计,显著提升了部件在复杂工况下的耐磨性与可靠性。实验验证与工程案例表明,新型材料体系可延长截齿寿命2倍以上、降低TBM停机成本超60%,实现了全生命周期成本与开采效率的协同优化。未来需进一步探索多尺度仿真与智能修复技术,推动耐磨材料向高性能化、长寿命化方向持续突破。

#### 【参考文献】

- [1]梁秀云.耐磨材料在掘进机械装运机构中的应用[J].工程地质学,2020,(05):67-68.
- [2]侯胜光.煤矿机械耐磨材料的研究与应用[J].建筑理论,2025,(10):32-33.
- [3]张展.煤矿掘进机截齿耐磨涂层技术[J].建筑科学,2025,(05):92-93.
- [4]张淑妮.矿用重型机械耐磨材料选型与结构改进研究[J].建筑理论,2025,(07):69-70.