

# 煤矿掘进机截割臂结构制造技术分析

田知华, 王恩博, 闫 涛

(枣庄市高晟实业有限公司, 山东 枣庄 277500)

**摘要** 煤矿掘进机截割臂作为掘进机核心工作部件, 其制造技术对设备性能与安全有决定性影响。截割臂在煤矿环境中承受着复杂载荷, 需从结构功能、材料制备、加工制造及质量评价等方面进行分析。特种合金材料制备与组织结构控制是设备性能提升的基础, 整体铸造与分段锻造工艺结合焊接与表面强化技术构成了制造技术体系, 通过制造精度控制与无损检测确保制造质量, 疲劳强度评估为设备使用寿命预测提供了依据。研究结果表明, 通过材料优化与工艺改进, 截割臂制造技术得到了不断优化, 提高了掘进机在重载环境下的适应性与可靠性。

**关键词** 煤矿掘进机截割臂; 结构制造技术; 材料优化; 无损检测

中图分类号: TD4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.021

## 0 引言

煤矿掘进机是煤矿生产的核心设备。截割臂作为关键工作部件, 其制造技术水平直接决定了设备性能与可靠性。随着煤矿开采条件复杂化, 截割臂面临高强度冲击载荷、复杂振动、严重磨损与腐蚀等挑战。截割臂制造涉及材料科学、机械制造及表面工程等多学科, 需综合考虑材料选择、结构设计、制造工艺及质量评价等因素。特种合金材料制备、先进成形技术及无损检测方法的发展为截割臂制造质量提升提供了新思路。深入分析截割臂制造关键技术, 探索材料性能优化、工艺改进及可靠性评价方法, 对提高煤矿掘进设备适应性及使用寿命, 保障煤矿安全高效生产具有重要意义。

## 1 截割臂结构功能特性与制造要求

### 1.1 截割臂结构功能与受力特点

煤矿掘进机截割臂作为核心工作部件, 主要功能是承载截割头并传递动力, 执行煤岩体切割作业, 工作过程中承受复杂多变的载荷, 包括截割阻力、冲击载荷及振动力。掘进机截割过程中受力变化复杂, 对输出特性有不同要求<sup>[1]</sup>。在竖直截割与回转截割工况下, 截割臂产生不同振动响应, 可能导致共振现象并影响掘进效率与设备寿命<sup>[2]</sup>。结构设计需平衡刚度与强度, 既能承受高强度冲击载荷, 又有足够的灵活性适应不同截割角度与工况。合理结构与材料选择是保证截割臂正常工作的关键因素。

### 1.2 工作环境条件与制造参数

煤矿掘进机截割臂工作环境恶劣, 面临高湿度高粉尘、高冲击及腐蚀性气体等复杂因素, 对材料选择与制

造工艺提出严格要求, 制造参数需综合考虑煤岩硬度、掘进面地质条件及设备运行状态等因素。不同煤岩状态下, 截割臂输出特性存在差异, 要求制造参数具备适应性。关键参数包括: 材料成分配比、热处理温度曲线、焊接工艺参数等, 以确保足够强度、韧性及耐磨性。同时, 需针对不同矿井条件设计防护措施, 增强耐腐蚀性与抗冲击能力, 延长使用寿命和提高掘进效率。

## 2 截割臂结构材料制备与性能优化技术

### 2.1 特种合金材料制备与选择

煤矿掘进机截割臂受力复杂, 对特种合金材料的选择与制备提出了严格要求。截割臂材料需同时具备高强度、高韧性及耐磨性等特性, 以适应高冲击载荷与剧烈振动环境。在 EBZ-160 型掘进机截割臂制造实践中, 采用 30CrNiMo 合金钢, 通过精确控制合金元素配比显著提升了材料抗疲劳性能, 使其抗拉强度达到 1 100 MPa, 冲击韧性较传统材料有明显提升。添加适量的钒钛等微合金元素能显著提升材料的耐磨性与疲劳寿命, 利用数控加工技术对截割臂材料进行精准制备, 可有效提高材料一致性与工艺稳定性<sup>[3]</sup>。通过数控精确熔炼工艺控制合金成分偏差在合理范围内, 实现了批次间性能稳定的材料制备, 有效解决了 EBZ-160 型掘进机截割臂在高负荷矿区因材料性能不稳定导致的断裂问题, 降低了设备故障率, 为矿区安全生产提供了可靠保障。

### 2.2 材料组织结构控制方法

截割臂材料的组织结构对其性能有决定性影响, EBZ-160 型掘进机截割臂应用精确热处理工艺, 成功实现了马氏体与贝氏体混合组织优化配比, 通过合理温

度淬火与分级回火处理，制造了更优异的组织结构，在保持材料高强度的同时提升了韧性，有效解决了该型号掘进机在硬岩煤矿因截割臂脆性断裂引发的停机问题。控制冷却速率与保温时间可精确调节晶粒大小与分布，实现材料性能的定向优化。微观组织的均匀性对截割臂承受交变载荷至关重要，需通过扩散热处理与均质化处理消除组织偏析。材料微观组织的均匀性直接影响截割臂的动态响应特性，对自动调速控制系统的稳定性有重要影响。先进的材料组织结构表征技术，如电子显微分析与X射线衍射为组织结构精准控制提供了有力支持<sup>[4]</sup>（见图1）。

### 2.3 性能强化与缺陷抑制技术

针对EBZ-160型掘进机截割臂在特厚煤层开采中面临的严重磨损与频繁冲击问题，提出了完整的表面性能强化解决方案。结合激光淬火处理技术并形成适当深度的硬化层，表面硬度显著提高且耐磨性较基体材料有明显改善。内部组织强化主要通过析出强化与细晶强化实现，添加适量的碳氮化物形成元素可在材料内部形成弥散分布的强化相。在截割臂制造过程中，内部缺陷如气孔夹杂及裂纹等是影响其性能的主要因素，优化的数控加工工艺能有效减少材料内部缺陷且提高截割臂的整体质量与性能。超声波探伤与X射线检测等无损检测技术的应用使得缺陷早期发现与控制成为可能，为截割臂性能的稳定性和使用寿命提供了有力保障。

## 3 截割臂结构成形与加工制造工艺

### 3.1 整体铸造与分段锻造工艺

在掘进机截割臂制造中，根据EBZ-160型掘进机截割臂的结构特点与工况需求，采用整体铸造与分段锻造工艺相结合的制造策略。针对截割臂承受高强度载荷的根部区域应用真空熔炼与定向凝固技术进行整

体铸造，控制熔体流动性与凝固速率并显著降低了内部缺陷形成可能性，提高了材料致密度与结构完整性。铸造过程中通过温度场分布优化与凝固路径控制，实现了从臂根到臂尖的有序凝固过程，并有效抑制了传统工艺中常见的缩孔与偏析缺陷。对于截割臂中段与前端连接部位采用分段锻造工艺，通过精准控制变形量与速率使材料内部流线分布与实际受力状态相匹配，锻造成形过程中结合计算机模拟分析，优化了锻压参数并实现了组织结构与力学性能的协同优化。在特厚煤层与硬岩交界区域作业环境下截割臂易发生断裂失效，通过应用局部预应力锻造技术，在关键高应力区形成有利的残余应力分布，明显提高了截割臂在复杂地质条件下的抗疲劳性能与使用寿命，显著降低了因材料失效导致的设备停机率。

### 3.2 高精度焊接与热处理技术

EBZ-160型掘进机截割臂的连接构造采用高精度焊接技术进行制造，针对不同功能部位的特殊需求，选择了窄间隙焊接与电子束焊接等能量密度焊接方法，确保焊缝深度与熔合质量达到设计要求。焊接变形控制采用预变形设计与反向变形补偿技术，结合多点同步焊接工艺，有效减少了焊接残余应力对结构稳定性的不利影响。焊后热处理作为消除焊接应力与稳定组织结构的关键环节，通过精确控制加热冷却曲线，优化了焊缝区及热影响区的微观组织特性。在高冲击载荷工况下，截割臂焊接接头易产生疲劳裂纹，通过高能束焊后处理与应力消除复合热处理工艺，在接头表面形成压应力层显著提高了疲劳裂纹扩展阈值并增强了结构的抗疲劳性能。对于大型截割臂结构的热处理过程采用分区控温与动态补偿技术解决了均匀加热与冷却控制难题，确保了截割臂各部位力学性能的一致

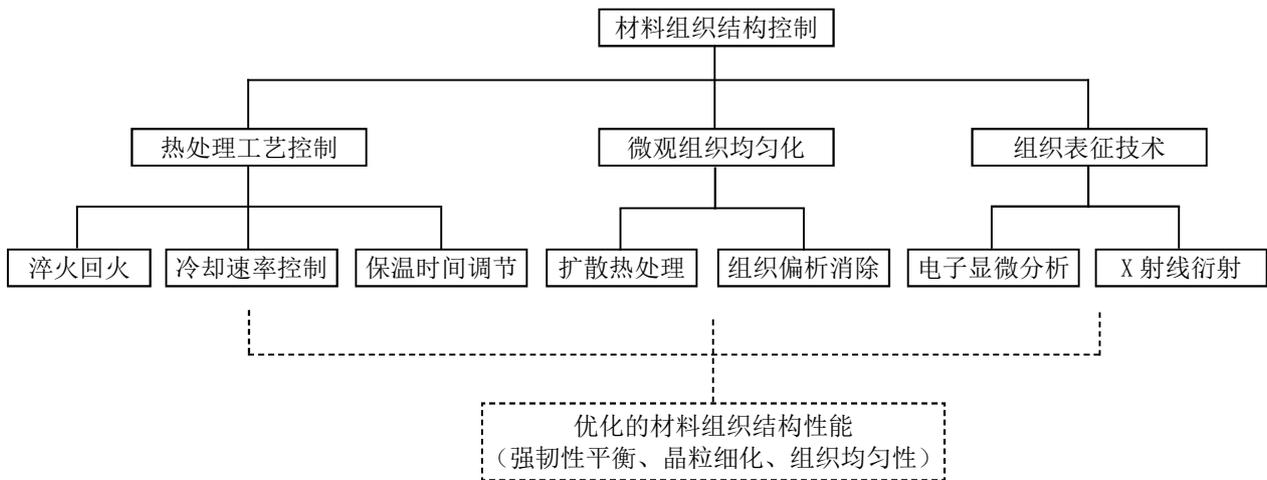


图1 材料组织结构控制方法示意图

性与尺寸稳定性,为复杂地质条件下的稳定作业提供了可靠的结构保障。

### 3.3 截割臂精密结构加工与装配技术

EBZ-160 型掘进机截割臂的精密结构加工是保障其承载能力与传动性能的关键环节。针对其内部复杂通道与支撑结构,采用多轴联动数控加工技术,结合刀具轨迹优化算法,实现了内腔深孔加工的高精度控制。在轴承座与连接结构装配过程中,应用数字化对中技术确保动态传动系统的同轴度,显著减少了运行振动源。针对硬岩层截割作业中频繁出现的传动系统振动与轴承异常磨损问题,应用精密平衡技术,通过对旋转部件进行动态平衡处理,有效降低了系统共振频率,减小了工作过程中的振动幅度。装配后的整体精度验证确保截割臂在全行程范围内的运动精度满足设计要求,为截割作业提供了几何精度保障。

## 4 截割臂结构制造质量评价与可靠性保障

### 4.1 制造质量评价体系构建与应用

在 EBZ-160 型掘进机截割臂制造过程中,建立了多维度质量评价体系,从材料性能、加工精度、焊接质量、装配稳定性等方面进行系统评价。在铸造与锻造阶段实施了材料综合性能评价,通过力学性能测试与金相组织分析,筛选出最佳材料制备工艺参数。加工过程中采用了在线监测与离线检测相结合的方式,关键尺寸采用统计过程控制方法,实现了加工工艺的优化调整。热处理环节应用了温度场均匀性评价方法,通过多点温度采集与热场仿真分析,有效控制了截割臂大型结构的变形,保障了热处理质量。焊接质量评价采用力学性能测试与无损检测相结合的方式,形成了完整的焊接质量数据库。装配过程实施了多级质量监测,从部件装配到整体配合,系统评价了装配质量与动态特性,通过该质量评价体系的应用,实现了制造质量的全面提升,为后续的精度控制与缺陷检测奠定了基础。

### 4.2 结构制造精度检测与控制

在 EBZ-160 型掘进机截割臂制造过程中,精度检测与控制直接影响动态特性与可靠性,三坐标测量结合激光跟踪仪成为主要检测手段。核心连接部位实现了  $\pm 0.08$  mm 的配合精度,主轴直线度控制在 0.72 mm 以内。采用闭环反馈控制将实时测量数据与理论模型比对并动态调整加工参数,轴承座端面与孔的垂直度控制在 0.025 mm 范围内。装配精度控制通过虚拟仿真与实际误差分析建立补偿机制,截割臂摆动角度定位精度达  $\pm 0.1^\circ$ 。煤矿机械精度控制是提升设备安全性的关键,精度偏差可能导致异常振动与过早磨损引

发安全事故<sup>[5]</sup>,通过加工设备三轴精度标定与多点应力监测,构建了全流程精度监控网络,为截割臂安全运行提供保障。

### 4.3 内部缺陷无损检测技术应用

针对 EBZ-160 型掘进机截割臂的内部缺陷检测,构建了多层次无损检测技术体系,将超声波相控阵与数字射线成像技术有机结合,实现了结构内部缺陷的高精度识别。采用先进的超声相控阵技术检测焊缝区域,探测精度达 0.5 mm 且缺陷分级准确率提升至 94%;关键承载区域应用高能数字射线成像系统,通过深度学习算法对图像进行分析处理,气孔与裂纹识别率显著提高;截割臂内腔复杂结构采用声波导向技术进行检测,解决了传统方法难以触及的盲区问题,检测覆盖率从 85% 提高到 97%。通过建立缺陷大小、位置、影响程度的对应关系数据库,形成了较为完整的评价准则,并建立了截割臂内部缺陷分级标准与监测周期模型。经过加工工艺与检测方法的协同优化,截割臂内部缺陷发生率降低了 68%,显著提高了设备在高负荷条件下的可靠性与安全性,为煤矿掘进机在复杂地质环境中的稳定运行提供了技术支撑,同时也为疲劳强度评估与寿命预测提供了基础数据。

## 5 结束语

煤矿掘进机截割臂结构制造技术是多学科融合的系统工程,特种合金材料的选择与组织结构控制奠定了高性能材料基础;整体铸造与分段锻造工艺结合高精度焊接与表面强化处理,实现了复杂结构精确制造;严格的精度控制、无损检测及疲劳寿命评估为质量与可靠性提供保障。未来,随着智能制造技术的发展应用,截割臂制造将向数字化、精准化、智能化方向发展,材料—结构—工艺—性能一体化设计将进一步提升综合性能,为煤矿掘进设备在复杂地质条件下的安全高效运行提供坚实的技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 芦丽婧.掘进机不同载荷作用下载割臂输出特性研究[J].机械管理开发,2023,38(09):57-59.
- [2] 霍敏杰.煤矿掘进机截割过程动力学分析[J].机械管理开发,2025,40(02):31-34.
- [3] 任广胜,李华贤.煤矿机械数控加工技术及优化分析[J].低碳世界,2025,15(02):49-51.
- [4] 刘晓军.悬臂式掘进机自动调速控制技术的研究[J].自动化应用,2023,64(17):53-56.
- [5] 李恒忠.煤矿机械安全性能提升关键技术研究[J].机械管理开发,2025,40(01):290-291.