

矿山机械设备铸件铸造工艺探讨

黄萍, 陆建良

(海盐通惠铸造有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要 本文聚焦矿山机械设备铸件铸造工艺的技术要点与优化方向, 针对复杂铸件结构及恶劣服役环境, 分析传统工艺缺陷, 提出材料选择、浇注系统设计、凝固模拟、热处理等优化策略。以高耐磨高锰钢定位分料盘为例, 验证了通过三维模拟优化结构、雨淋式浇道设计、双联熔炼、阶梯冷铁强化等措施, 成功实现了铸件屈服强度 ≥ 800 MPa、冲击韧性 ≥ 120 J/cm²、表面硬度HRC48-52, 显著提升了其抗冲击与耐磨性能。

关键词 矿山机械设备; 铸件铸造工艺; 热处理技术; 双联熔炼

中图分类号: TD4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.036

0 引言

矿山机械设备作为资源开采核心装备, 其铸件需承受高载荷、强冲击及复杂应力环境, 铸造工艺直接决定设备可靠性。传统工艺因设计经验依赖性强、过程控制粗放, 易导致铸件内部缺陷与性能波动。在计算机模拟技术成熟与新材料研发的背景下, 铸造工艺正向精准化、集成化方向发展。因此, 本文深入探究矿山机械设备铸件铸造工艺应用, 旨在为工艺设计提供理论框架与实践参考, 助力矿山机械制造业提质增效。

1 矿山机械设备的特点分析

1.1 工作环境适应性特征

矿山机械需长期暴露在高温、高湿、多粉尘的井下或露天环境, 设备表面须具备抗腐蚀涂层与密封结构, 关键部件需采用耐磨损材料, 且需要适应不同矿体的倾角、硬度与赋存状态, 作业装置需要具有高度可调节性与地质适应性, 比如掘进机刀盘可根据岩性自动调整转速与切削力。

1.2 载荷承载的极端性

矿山机械需要承受周期性冲击载荷与交变应力, 比如破碎机的动颚板需耐受瞬时冲击力达数千千牛, 输送机托辊需长期承受非均匀分布的物料压力; 矿山机械的关键结构件, 需要通过有限元分析进行拓扑优化, 采用高强度合金钢与复合铸造工艺, 才能够确保在循环应力作用下不发生疲劳失效^[1]。

1.3 系统结构的复杂性

现代矿山机械已发展为机电液一体化系统, 包含机械传动、液压控制、智能监测等多个子系统, 比如采煤机集成多电机协同控制模块, 需实现截割路径规

划、滚筒调高与牵引速度的智能匹配, 其控制系统具有多参数耦合与非线性特征^[2]。

1.4 操作安全的高风险性

矿山作业环境存在瓦斯爆炸、透水、片帮等多重安全隐患, 设备操作直接关联人员生命安全。井下采煤机需在0.5 m以下能见度环境中作业, 滚筒截齿与煤壁接触瞬间产生的火花可能引燃瓦斯, 因此要求设备必须具备KBA127矿用隔爆认证。露天矿用钻机在30°斜坡作业时, 若制动系统响应延迟0.1 s, 可能导致200吨级设备滑坡距离超5 m。

1.5 运行维护的高成本性

矿山机械设备因长期处于重载、高粉尘、强冲击等极端工况下, 零部件磨损速率远超普通机械, 比如颞式破碎机的颞板需承受每秒数次的剧烈冲击, 导致其寿命通常不超过6个月; 液压支架的密封件在高压油液反复作用下, 平均每3个月需更换一次。此外, 设备润滑要求严格, 需使用抗磨液压油、极压锂基脂等特种润滑剂, 单台大型电铲的年度润滑成本可达数十万元。

2 矿山机械设备铸件铸造工艺要点

2.1 模具制作工艺

在矿山机械设备生产过程中, 模具工艺是保障铸件精度、质量与生产效率的核心环节。模具需承受高温金属液的冲刷、热应力循环及机械振动, 其设计需兼顾铸件结构特征、金属液流动规律与冷却控制要求。以破碎机动颞板为例, 该部件需承受高频冲击载荷, 其铸件内部需通过模具设计实现致密组织, 同时外形需保证与动颞体的装配精度, 其模具工艺需从设计、材料、加工、热处理四方面系统把控。

模具设计时, 首先需要确定分型面位置, 破碎机

动颚板铸件分型面通常设置于最大截面处,该模式既便于起模又减少飞边;模具的浇道系统,通常采用开放式阶梯设计,能够确保金属液平稳充型,内浇道截面计算按照铸件体积计算确定,通常取铸件平均壁厚 1.2~1.5 倍;冷铁布置需结合凝固模拟结果,在动颚板齿部等厚大区域设置铜质冷铁,从而可以消除缩孔缺陷;排气系统设计时,一般采用直通式排气道与溢流槽组合,能够有效防止卷气缺陷,且模具需预留足够的加工余量,关键尺寸如安装孔位需设置工艺凸台,从而可以为后续机加工提供基准。

模具材料选择时,需要充分考虑到热稳定性与成本,破碎机动颚板模具主体可以采用 HT300 灰铸铁,其良好的铸造性能,能够保证模具表面质量;在镶块部分,可以选用 45 钢调质处理,能够增强耐磨性;砂型铸造模具需选用高硅铝合金框架,确保在高温下保持尺寸稳定性;模具型腔表面粗糙度,通常需要控制在 $Ra3.2 \mu m$ 以内,通过电火花加工与手工抛光实现,减少铸件表面缺陷;模具基准面生产时,需要经龙门铣床精加工,平面度公差控制在 0.05 mm/m^2 。

在模具加工过程中,可以采用数控加工中心进行粗加工,能够保证分型面平齐度;关键型腔生产时,可以采用电火花成型工艺,利用石墨电极加工出齿形结构,放电间隙需要控制在 $\pm 0.02 \text{ mm}$;浇道系统加工时,通常采用线切割加工方式,能够确保内浇道截面过渡圆滑;模具合模后需进行低压试验,检测分型面密封性;热处理工艺采用去应力退火,消除加工内应力,回火温度控制在 $550 \sim 580 \text{ }^\circ\text{C}$,保温时间按模具厚度每毫米 1 分钟计算^[3]。

2.2 型砂配置与造型

型砂须具备足够的强度、透气性、耐火性和退让性,造型过程需要确保砂型与铸件结构的精准匹配。例如:在矿用磨机衬板制造过程中,该部件需承受强烈磨损与冲击,所以铸件要求表面粗糙度低、轮廓尺寸准确。磨机衬板铸件通常采用石英砂作为主体材料,其二氧化硅含量 $\geq 95\%$,粒度分布控制在 70/140 目,可以确保砂粒间形成紧密咬合;粘结剂可以选用膨润土与淀粉复合体系,膨润土加入量占砂重的 4%~6%,淀粉占比 1.5%~2.5%,通过混砂机干混 2 分钟后逐步加入水分;水分通常按砂重 * 季节系数计算,夏季一般取 4.2%~4.5%,冬季一般取 4.8%~5.2%,能够确保型砂紧实后无松散颗粒;混砂时间通常控制在 8~10 分钟,直到型砂呈现均匀湿润状态,手捏成团且轻弹即散为最佳。

造型工艺应用时,需要匹配铸件几何特征,磨机

衬板一般采用对开式两箱造型,下型使用震击造型机紧实,砂型硬度达 85~90 单位;上型可以采用手工春砂,重点保证分型面平齐度,间隙控制为 $\leq 0.2 \text{ mm}$;浇道系统可以采用雨淋式浇口杯,直浇道截面依据铸件热节圆直径设计,内浇道需要设置 3~5 道分散引入,从而可以防止金属液冲刷砂型;冒口设计遵循模数法,确保最后凝固区域有效补缩,冒口颈尺寸按铸件壁厚 1.2 倍确定;砂芯用于成型衬板安装孔,可以采用 CO_2 硬化水玻璃砂,芯骨需预先涂覆耐火泥,防止铸件渗碳缺陷^[4]。

2.3 熔化与浇注

矿山机械设备铸件制造过程中,熔化与浇注工艺的实施,可以直接影响铸件的凝固组织、力学性能及内部质量,熔化与浇注过程中需精准控制金属液成分、温度与流动状态,确保铸件获得致密结构与均匀性能。

以某型号矿用挖掘机斗齿为例,该部件需承受强烈冲击与磨损,其生产过程中熔化与浇注的技术参数如表 1 所示。

该矿用挖掘机斗齿熔化工艺采用冲天炉—电弧炉双联熔炼,废钢与增碳剂首先经冲天炉熔化成铁水,再转入电弧炉进行成分微调;在熔化过程中,技术人员需要严格控制碳当量 4.2%~4.4%,确保铸件获得珠光体+渗碳体组织;铁水出炉前,需要经光谱分析,重点检测 Si (1.8%~2.2%)、Mn (0.6%~0.8%)、S ($\leq 0.05\%$)、P ($\leq 0.08\%$) 等关键元素,超标铁水需回炉处理。浇注系统采用了阶梯式浇道设计方案,直浇道截面积按铸件重量计算确定为 80 cm^2 ,横浇道设置挡渣坝与溢流槽组合;浇注前,技术人员先对砂型进行预热,温度梯度控制在 $200 \sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,能够减少金属液与型砂温差;浇注操作遵循“慢—快—慢”原则,先缓慢注入液面至浇口杯 1/3 高度,再快速充型至冒口根部,最后缓慢补缩防止飞溅。

2.4 热处理技术

以矿用输送机滚筒为例,该部件需承受大扭矩与交变载荷,其铸件要求表面硬度 HRC45~50,心部韧性 $\geq 40 \text{ J/cm}^2$,该设备热处理工艺路线可以采用“退火+淬火+回火”三步法。退火选用高温扩散退火,铸件随炉升温至 $880 \sim 920 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 8~10 小时,可以消除偏析与枝晶偏析,获得均匀珠光体组织;淬火采用油淬工艺,铸件预热至 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 后转入淬火炉,快速升温至 $840 \sim 860 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 45 分钟,能够确保奥氏体化完全;淬火介质选用机械油,油温控制 $40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$,搅拌速度 0.8 m/s ,从而可以保证冷却均匀性;回火采用高温回火工艺,铸件在 $560 \sim 580 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 6 小时,空冷至

表1 某型号矿用挖掘机斗齿熔化与浇注技术参数

工艺阶段	参数名称	设定值 / 范围	控制要点
熔化	炉型选择	3吨 / 小时冲天炉	双层炉衬预热至 800 °C
	炉料配比	废钢 60%+ 生铁 30%+ 回炉料 10%	成分波动 ≤ ±0.5%
	熔化温度	1 520 ~ 1 550 °C	铁水表面氧化膜呈亮黄色
	精炼处理	硅钙合金 0.8%	扒渣后测温取样分析
浇注	浇注温度	1 400 ~ 1 430 °C	液面撒草木灰覆盖保温
	浇注重量	280 ± 5 kg	使用电子秤实时监控
	浇注速度	先快后慢 (40 s 完成)	控制液面上升速度防止飞溅
	浇口杯设计	漏斗形高 150 mm	内衬耐火泥减少飞溅
	冒口补缩	圆柱形 φ50 mm × 3	设置明冒口与暗冒口组合
	冷铁使用	石墨冷铁 3 处	预置在热节区域加速凝固

室温, 获得回火索氏体组织^[5]。热处理设备可以选用箱式电阻炉, 配备智能温控系统, 炉温均匀性 ≤ ±5 °C; 装炉方式采用单层平铺, 铸件间距 ≥ 50 mm, 能够防止热处理变形; 淬火转移时间控制 ≤ 8 s, 采用专用淬火篮实现快速入油; 回火后需要进行时效处理, 铸件在 200 °C 保温 4 小时, 可以消除残余应力, 且热处理全程记录温度-时间曲线, 关键节点取样进行金相分析, 确保组织转变符合预期。

3 案例分析——以某型号高耐磨高锰钢定位分料盘为例

某矿山机械企业生产的 ZGMn13-4 型高锰钢定位分料盘, 需长期承受矿石冲击与摩擦, 铸件要求屈服强度 ≥ 800 MPa, 冲击韧性 ≥ 120 J/cm², 表面硬度 HRC48-52。铸件设计采用三维模拟优化结构, 壁厚均匀过渡避免应力集中, 关键部位设置加强筋提升抗冲击性; 分型面选择避开热节区域, 浇道系统采用雨淋式底注设计, 直浇道截面积按铸件重量计算为 120 cm², 横浇道设置陶瓷过滤器 + 挡渣坝组合; 砂型采用呋喃树脂自硬砂, 型砂紧实率控制 42 ~ 45, 透气性 ≥ 85, 确保铸件表面质量。

在熔炼过程中, 采用了电弧炉 + LF 炉双联熔炼, 废钢占比 65%, 高碳锰铁与硅铁合金化; 电弧炉熔清后测温取样, 控制 C 含量 1.1% ~ 1.3%, Mn 含量 11% ~ 13%, Si 含量 0.3% ~ 0.5%; LF 炉精炼过程加入铝粒脱氧, 喂 CaSi 线脱硫, 白渣保持时间 ≥ 15 分钟, 确保钢液纯净度 [O] ≤ 30 ppm, [S] ≤ 0.02%。出钢温度控制 1 580 ~ 1 600 °C, 液面撒稻壳保温。在浇注过程中, 首先预热至 200 ~ 250 °C, 采用塞杆式浇口杯, 浇注重量 280 ± 3 kg; 浇注速度先快后慢, 首 30 s 注入金属液

200 kg, 后续 15 s 平稳充型; 铸型采用了阶梯式冷铁强化激冷, 冒口设计模数比铸件大 15%, 从而能够确保顺序凝固。在热处理过程中, 执行水韧处理, 铸件入水温度 1 080 ~ 1 100 °C, 保温 40 分钟, 出水后空冷; 回火处理在 560 ~ 580 °C 保温 6 小时, 可以有效消除残余应力; 关键参数通过正交试验确定, 能够确保获得单相奥氏体组织, 晶粒尺寸控制 8 ~ 12 级; 热处理后铸件表面进行喷丸强化, 覆盖率达 200%, 从而提升疲劳强度 30%。

4 结束语

研究成果为矿山机械设备铸件铸造工艺提供了理论框架与实践依据, 通过系统优化材料、工艺参数及质量控制策略, 有效解决了传统工艺中的缩孔、裂纹等缺陷问题, 所提出的技术方案不仅提升了铸件的综合性能, 更为行业向智能化、绿色化转型提供了新思路。未来, 矿山机械设备铸件铸造工艺将会进一步发展, 全面提升机械设备质量, 从而保障矿山生产安全高效。

参考文献:

- [1] 徐信水, 唐洁, 汪强. 合理润滑技术在矿山机械维修中的应用 [J]. 中国科技纵横, 2023(20):91-93.
- [2] 王成军, 洪维立, 白东明, 等. 矿用平板车车轮铸件铸造过程模拟及优化 [J]. 铸造, 2022, 71(05):650-655.
- [3] 姜鸿山, 郭飞宇. 矿山机械设备的智能维修技术研究 [J]. 中国金属通报, 2024(15):95-97.
- [4] 汪强, 徐信水. 机电一体化数控技术在矿山机械中的应用 [J]. 中国科技纵横, 2024(06):133-135.
- [5] 张志华, 刘雪涛. 铸造皮带机皮带跑偏原因分析及处理方法 [J]. 中国铸造装备与技术, 2023, 58(02):24-27.