

球墨铸铁凝固过程缺陷控制与工艺优化研究

谷青山 徐义存 甘文杰 阮宗东 牟华辉
广西玉柴机器股份有限公司 广西 玉林 537000

摘要: 球墨铸铁因糊状凝固特性,凝固过程易产生气孔、缩孔、球化不良等缺陷,严重影响铸件力学性能与使用寿命。本文以QT450-10为研究对象,通过单因素试验分析化学成分、工艺参数等对缺陷的影响,明确关键影响因素及主次关系,提出针对性缺陷控制方法与工艺优化方案,结合ProCAST数值模拟验证,优化后缺陷率降低35%以上,为球墨铸铁高效生产、提升铸件质量提供可靠的试验依据与理论支撑。

关键词: 球墨铸铁;凝固过程;缺陷控制;工艺优化

引言: 球墨铸铁兼具高强度与韧性,广泛应用于机械制造、管道等领域,但其凝固区间宽、液固共存范围大,易受多种因素影响产生各类缺陷,制约其应用拓展。当前生产中缺陷控制效率低、工艺参数不合理等问题突出,导致铸件废品率偏高。基于此,本文开展球墨铸铁凝固过程缺陷控制与工艺优化研究,明确缺陷产生机理,优化工艺参数,旨在解决生产痛点,推动球墨铸铁产业高质量发展。

1 球墨铸铁凝固机理及常见缺陷分析

1.1 球墨铸铁凝固基本机理

(1) 球墨铸铁的凝固特性:其本质为糊状凝固,凝固区间宽,液固共存范围大,凝固过程分三个阶段。石墨球形成需经历形核、长大两个步骤,核心影响因素包括球化剂与孕育剂的种类及加入量、金属液化学成分、浇注温度,其中孕育处理不足易导致石墨球数量少、形态不规则。(2) 凝固过程中的物理化学变化:金属液冷却至液相线以下时开始结晶,先析出初生奥氏体;随温度降低,奥氏体中碳含量饱和,析出石墨球;继续冷却至共晶温度,剩余液体发生共晶反应,形成奥氏体+石墨组织;后续冷却过程中,奥氏体转变为铁素体或珠光体,最终形成球墨铸铁基体组织。(3) 凝固过程与铸件质量的关联机制:凝固速度过快易导致石墨球细小、球化不良,降低铸件韧性;凝固速度过慢则可能出现石墨漂浮。温度场分布不均会造成铸件各部位组织差异,引发应力集中,降低力学性能,合理的温度场分布是保证铸件质量均匀的关键^[1]。

1.2 球墨铸铁凝固过程常见缺陷类型及特征

(1) 孔眼类缺陷:气孔多为圆形或椭圆形,表面光滑,皮下气孔多分布在铸件表层1-5mm处;砂眼呈不规则形状,内部夹杂砂粒,多分布在铸件表面或近表面;渣孔内部含熔渣,颜色发暗,多集中在铸件厚大部位或浇

注系统附近。(2) 收缩类缺陷:缩孔多为集中性孔洞,形状不规则,位于铸件厚大部位或热节处;缩松分为宏观缩松和显微缩松,宏观缩松为细小孔洞聚集,显微缩松需借助显微镜观察,多存在于铸件内部。(3) 其他典型缺陷:粘砂表面粗糙,附着砂粒且难以清理;夹砂呈层状,中间夹杂砂层,易导致铸件开裂;球化不良表现为石墨呈团絮状、蠕虫状,力学性能大幅下降;石墨漂浮多出现于厚大铸件上部,石墨聚集呈漂浮状。

1.3 凝固缺陷的危害及产生机理

(1) 各类缺陷的危害:孔眼类、收缩类缺陷降低铸件致密性,易引发渗漏;所有缺陷均会削弱力学性能,降低强度、韧性;缺陷处易产生应力集中,加速腐蚀,缩短铸件使用寿命。(2) 缺陷产生的核心机理:金属液含气量过高易形成气孔;砂型透气性、强度不足会导致砂眼、夹砂;凝固温度场不均、补缩系统设计不合理易产生缩孔、缩松;球化剂不足或孕育不良会引发球化不良^[2]。(3) 多因素耦合对缺陷产生的影响:金属液含气量高与砂型透气性差耦合,会加剧气孔缺陷;凝固速度过快与补缩不足协同作用,会增加缩孔、缩松风险,各因素相互影响,放大缺陷产生概率。

2 球墨铸铁凝固过程缺陷影响因素试验研究

2.1 试验方案设计

(1) 试验材料:选用QT450-10牌号球墨铸铁原材,以废钢、生铁为基础原料,搭配增碳剂、硅铁等调整化学成分。设计碳含量控制在3.6%-3.9%、硅含量2.0%-2.4%、镁含量0.03%-0.06%(作为球化元素),硫含量 \leq 0.02%(避免影响球化效果),磷含量 \leq 0.07%(防止出现冷脆缺陷),确保化学成分符合试验要求且波动范围可控。(2) 试验设备:熔炼设备选用150kg中频感应电炉,可精准控制熔炼温度,满足金属液熔炼均匀性需求;浇注设备采用手动浇注包,配备流量控制装置,保

证浇注速度稳定；温度检测设备选用K型热电偶，实时监测熔炼、浇注及凝固过程中的温度变化，精度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；缺陷检测设备选用超声波探伤仪（检测内部缺陷）和金相显微镜（观察微观缺陷及石墨形态），提前完成设备调试，确保检测数据准确^[1]。（3）试验参数设定：熔炼温度设定为1480-1520 $^{\circ}\text{C}$ ，分3个梯度进行试验；浇注温度控制在1380-1420 $^{\circ}\text{C}$ ，每20 $^{\circ}\text{C}$ 为一个变量；球化处理参数选用冲入法，球化剂加入量为0.8%-1.2%，分4个水平；冷却速度通过调整砂型厚度（50mm、70mm、90mm）实现，对应慢、中、快三种冷却速率，其余参数保持不变，采用单因素变量法开展试验。

2.2 单因素试验研究

（1）化学成分对凝固缺陷的影响：碳硅含量试验中，碳含量低于3.6%时缩孔、缩松缺陷增多，高于3.9%易出现石墨漂浮；硅含量过高会加剧糊状凝固，增加缩松风险，过低则球化效果不佳。硫磷含量试验中，硫含量超过0.02%会破坏球化反应，导致球化不良，磷含量过高易产生冷隔缺陷。球化剂加入量不足时石墨呈蠕虫状，过量则会产生气孔缺陷。（2）工艺参数对凝固缺陷的影响：浇注温度过低（低于1380 $^{\circ}\text{C}$ ）易产生浇不足、冷隔缺陷，过高（高于1420 $^{\circ}\text{C}$ ）则会增加金属液吸气量，导致气孔增多，且会加剧石墨漂浮。冷却速度过快易产生白口、裂纹缺陷，过慢则会使石墨球长大不均匀，增加缩松缺陷。砂型透气性差会导致型内气体无法排出，引发气孔、夹砂缺陷。（3）球化孕育处理对凝固缺陷的影响：选用硅铁镁合金、稀土镁合金两种球化剂，稀土镁合金球化效果更稳定，可减少球化不良缺陷；孕育剂加入方式采用随流孕育，相较于冲入孕育，能有效避免孕育剂烧损，减少石墨畸变，降低缺陷产生概率，孕育剂加入量控制在0.6%-0.8%时效果最佳。

2.3 试验结果分析与讨论

（1）试验数据整理与缺陷统计：对各变量条件下的铸件进行全面检测，整理缺陷类型、数量及严重程度，建立统计台账。结果显示，碳硅含量、球化剂加入量及冷却速度对缺陷影响最为明显，其中碳含量3.7%-3.8%、硅含量2.2%-2.3%时，缺陷数量最少；球化剂加入量1.0%左右时，球化效果最优，缺陷率最低。（2）影响因素显著性分析：采用极差分析法对试验数据进行处理，明确各因素对凝固缺陷的影响程度主次关系，依次为：球化孕育处理参数 > 化学成分 > 工艺参数，其中球化剂种类及加入量是影响球化不良、气孔缺陷的最显著因素，冷却速度是影响缩孔、缩松缺陷的核心因素。（3）试验结论：提炼出影响球墨铸铁凝固缺陷的关键因素，包括

碳硅含量配比、球化剂与孕育剂的选择及加入量、浇注温度和冷却速度。合理控制碳硅含量（C：3.7%-3.8%，Si：2.2%-2.3%）、选用稀土镁合金球化剂（加入量1.0%左右）、采用随流孕育方式、控制浇注温度1400 $^{\circ}\text{C}$ 左右及中等冷却速度，可有效减少凝固缺陷，为后续球墨铸铁缺陷控制及生产工艺优化提供可靠的试验依据。

3 球墨铸铁凝固过程缺陷控制方法与工艺优化

3.1 凝固缺陷针对性控制方法

（1）孔眼类缺陷控制：降低金属液含气量需在熔炼前对原材进行烘干处理，去除水分，熔炼过程中加入0.1%-0.2%的除气剂，减少气体残留；优化砂型透气性可选用透气性良好的石英砂，合理控制砂型紧实度，避免过度紧实导致气体无法排出；在铸件厚大部位、热节处增设出气冒口，直径根据铸件尺寸设计为15-30mm，高度为冒口直径的1.5-2倍，确保型内气体顺利排出，有效抑制气孔、渣孔缺陷。（2）收缩类缺陷控制：优化浇冒口设计采用“大冒口、小浇口”结构，冒口体积为铸件热节体积的1.2-1.5倍，保证补缩通道畅通；在铸件热节处布置冷铁，选用铸铁冷铁，厚度为铸件壁厚的0.8-1.2倍，加速热节冷却，实现顺序凝固；运用均衡凝固理论，合理分配铸件各部位壁厚，减少温度梯度，避免局部过热导致的缩孔、缩松，同时配合补贴设计，弥补铸件收缩量，提升补缩效果^[4]。（3）其他缺陷控制：粘砂缺陷可在砂型表面涂刷厚度为0.5-1mm的耐火涂料，选用高熔点涂料，减少金属液与砂型的粘连；夹砂缺陷需控制砂型含水量在3%-5%，避免砂型受热膨胀开裂，同时优化浇注速度，防止砂型冲刷；球化不良可选用稀土镁合金球化剂，严格控制加入量，配合二次孕育，确保球化反应充分；对于轻微缺陷，采用焊补、浸渗修补技术，严重缺陷直接报废，避免影响铸件性能。

3.2 球墨铸铁凝固工艺优化方案

（1）熔炼工艺优化：确定熔炼温度优化参数为1490-1510 $^{\circ}\text{C}$ ，避免温度过高导致金属液吸气、元素烧损，过低则熔炼不均匀；保温时间控制在30-40min，确保合金元素充分溶解、均匀分布；调整合金元素配比，碳含量控制在3.7%-3.8%，硅含量2.2%-2.3%，镁含量0.04%-0.05%，硫含量 $\leq 0.02\%$ ，提升金属液流动性和球化效果。（2）浇注工艺优化：浇注速度优化为0.5-0.8m/s，速度过快易产生紊流、卷渣，过慢则易出现浇不足、冷隔；采用底注式浇注方式，减少金属液冲击砂型，避免卷气、夹砂；浇注系统设计为封闭式，横浇道、内浇道截面积比为2:1，确保金属液平稳充型，同时在浇注系统末端设置集渣包，去除熔渣。（3）冷却工艺优化：冷

却速度调控为中等冷却速率,通过调整砂型厚度(70-80mm)实现,避免过快或过慢导致的缺陷;选用砂型冷却方式,对于厚大铸件,配合强制风冷,控制冷却速率均匀;冷铁布置优化为在铸件热节处均匀分布,间距为冷铁直径的2-3倍,确保冷却均匀,减少应力集中^[5]。

(4) 球化孕育工艺优化:球化剂与孕育剂配比优化为1:0.6-0.8,选用稀土镁合金球化剂和硅铁孕育剂;球化剂加入时机为金属液熔炼完成后,温度降至1450-1470℃时冲入,孕育剂分两次加入,第一次在球化处理后加入70%,第二次随流孕育加入30%,避免孕育剂烧损,提升球化和孕育效果。

3.3 工艺优化的数值模拟验证

(1) 数值模拟模型建立:基于球墨铸铁凝固机理,采用ProCAST软件构建温度场、流场模拟模型,以试验铸件为原型,输入铸件尺寸、材质参数、工艺参数,网格划分采用四面体网格,网格尺寸为2-5mm,确保模拟精度;设定边界条件,熔炼温度、浇注温度、冷却速度等与试验参数一致,模拟凝固过程中的温度变化和金属液流动状态。(2) 优化方案模拟分析:将优化后的熔炼、浇注、冷却及球化孕育工艺参数输入模型,模拟不同参数下的凝固过程,预测缺陷产生的位置、类型及严重程度。对比优化前后的模拟结果,分析优化参数对温度场、流场的影响,验证优化方案对缺陷的抑制效果,筛选出最优工艺参数组合。(3) 模拟结果验证:将最优工艺参数组合应用于实际试验,生产多组铸件,检测铸

件缺陷情况,对比模拟结果与试验结果。结果显示,模拟预测的缺陷位置、类型与试验结果吻合度达90%以上,优化后的工艺可使缺陷率降低35%以上,验证了工艺优化方案的可行性和可靠性,为实际生产提供理论支撑。

结束语

本文围绕球墨铸铁凝固过程缺陷控制与工艺优化展开系统研究,通过单因素试验明确了化学成分、工艺参数等关键影响因素,提出了针对性的缺陷控制方法与全面的工艺优化方案,经数值模拟与实际生产验证,该方案可行有效,可显著降低铸件缺陷率、提升铸件质量与生产效率。本次研究仍存在一定局限,后续可结合更先进的检测技术与模拟方法,进一步优化工艺参数,拓展研究成果的适用范围,为球墨铸铁生产提供更全面的技术支持。

参考文献

- [1] 武惠敏,张凤清.球墨铸铁工艺探析[J].铸造设备与工艺,2023,7(05):15-20.
- [2] 何齐书,魏西涛,赵志诚,等.球墨铸铁管在集中供热应用的可行性探讨[J].建筑科学,2022,38(2):125-130.
- [3] 王彭玺,章轩.球墨铸铁管在长距离输水工程的应用[J].中国水利,2023,20(23):68-69
- [4] 高广阔,石力军,常世俭.高强度铸态球墨铸铁整体桥壳材质及工艺的研究开发[J].铸造,2022,61(06):27-32.
- [5] 魏小惠.球墨铸铁管的特点分析及其应用[J].市政工程,2023,26(02):162-165.