

## 离心机铸管夹渣缺陷成因分析与工艺改进研究

郭礼涵 贾振华 范文龙

河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司, 河南 安阳 455133

**[摘要]**夹渣缺陷是离心机铸管生产中最常见的质量缺陷之一,严重影响铸管的力学性能和水压试验合格率。文章系统分析了离心机铸管夹渣缺陷的宏观与微观特征,从原材料成分、熔炼工艺、浇注系统、离心成型工艺、渣铁分离效率及生产过程管理六个方面深入剖析了夹渣缺陷的成因机理,并针对性地提出了原材料质量控制、熔炼净化除渣优化、浇注系统改进、离心成型工艺参数优化、提高渣铁分离效率以及生产过程标准化与操作优化等综合工艺改进措施。研究表明,通过系统性的工艺改进,夹渣缺陷率可大幅降低,铸管综合成材率显著提升。

**[关键词]**离心机铸管;夹渣缺陷;球墨铸铁管;渣铁分离;工艺优化

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19790

中图分类号: TG250.6

文献标识码: A

### Analysis of the Causes of Slag Inclusion Defects in Centrifuge Casting Pipes and Research on Process Improvement

GAO Lihan, JIA Zhenhua, FAN Wenlong

Angang Yongtong Ductile Iron Pipe Limited Liability Company, He'nan Iron & Steel Group, Anyang, He'nan, 455133, China

**Abstract:** Slag inclusion defect is one of the most common quality defects in the production of centrifuge castings, which seriously affects the mechanical properties and water pressure test qualification rate of castings. The article systematically analyzes the macroscopic and microscopic characteristics of slag inclusion defects in centrifuge casting pipes, and deeply analyzes the causes and mechanisms of slag inclusion defects from six aspects: raw material composition, melting process, pouring system, centrifugal forming process, slag iron separation efficiency, and production process management. Targeted comprehensive process improvement measures are proposed, including raw material quality control, melting purification and slag removal optimization, pouring system improvement, centrifugal forming process parameter optimization, slag iron separation efficiency improvement, and production process standardization and operation optimization. Research has shown that through systematic process improvement, the slag inclusion defect rate can be significantly reduced, and the comprehensive yield of cast pipes can be significantly improved.

**Keywords:** centrifugal casting tube; slag inclusion defect; ductile iron pipe; slag iron separation; process optimization

#### 引言

离心球墨铸铁管因力学性能好、耐腐蚀性强、施工方便等特点被大量用于市政供水、燃气输送等工程中。离心铸管生产中夹渣缺陷是离心铸管生产中常见的质量问题,重皮、气孔、夹渣和夹杂这四个质量缺陷合计占总缺陷的70%以上,是造成球墨铸铁管综合合格率低的主要因素。夹渣缺陷不但会降低铸管的力学性能,而且会降低铸管的力学性能,严重的会造成水压试验渗漏或者爆管事故,对工程的安全造成威胁。热模离心球墨铸铁管生产时承口D3处有夹渣、疏松等缺陷,使产品外观及强度较低。因此,对夹渣缺陷形成机理进行深入研究,并采取相应系统的工艺改进措施,对提高离心机铸管质量、减少生产

成本有着十分重要的作用。本文从离心机铸管生产工艺的实际出发,对夹渣缺陷的产生及控制措施进行系统的分析。

#### 1 离心机铸管夹渣缺陷特征分析

离心机铸管夹渣缺陷是指铸件表面或内部出现的非金属夹杂物,形态各种各样,分布也较繁杂。从宏观上看,夹渣缺陷大多呈不规则形,颜色多为灰黑色或者暗褐色,分布在铸管的内表面、外表面或者截面内。承口处由于壁厚较大,铁水中杂质在离心力的作用下有更多时间向中心漂浮,夹渣缺陷最集中。夹渣物主要是由氧化物、硫化物、硅酸盐等非金属相构成的,其成分和来源密切相关,稀土夹杂物是由球化处理时稀土元素和氧、硫的反应产物组成,

氧化物夹渣是由铁水氧化生成的  $\text{FeO}$ 、 $\text{SiO}_2$  等组成, 硫化物夹渣是由原铁水含硫量过高造成的。渣孔是铸造时由于型腔内有杂质或者金属液中的低熔点物质渗入造成的表面孔洞缺陷, 形状不规则, 深度较浅, 孔内表面光滑, 有釉质光泽, 多出现在铸件的浇注位置下方或者内浇道附近。夹渣缺陷对铸管质量的影响主要有三个方面, 破坏铸件组织的连续性, 降低力学性能, 在水压试验时造成渗漏通道, 造成试压不合格, 影响内外涂层的附着力, 降低管材的防腐能力。正确找出夹渣缺陷的形态特点, 是开展成因分析的前提。

## 2 夹渣缺陷成因机理分析

离心机铸管夹渣缺陷是由许多因素引起的, 在原材料、熔炼、浇注和凝固全过程都起着作用。根据形成机理可以将夹渣缺陷分成原生夹渣和二次夹渣两类。原生夹渣主要是炉料带入的杂质、球化及孕育处理时产生的反应产物, 二次夹渣发生在浇注过程中铁水和空气的氧化反应、流槽及落槽材料的剥落、管模粉的不熔团聚等。

在原材料方面, 原铁水含硫量过高是产生硫化夹渣的主要因素, 球化处理时硫和镁、稀土反应生成高熔点硫化物, 悬浮在铁水中不能被除去。严格控制球化后铁水中含镁量, 残镁含量控制在  $0.035\% \sim 0.060\%$  之间, 可以减少氧化夹渣的产生。当残镁质量分数大于  $0.06\%$  的时候, 夹渣缺陷增多, 分析认为残镁含量高时铁水氧化越严重, 使二次夹渣增多。传统的稀土镁合金冲入法处理产生的渣量大、稀土生成的渣密度和铁液的密度相近, 铁液和渣不能轻易分离, 在浇注过程中铁液中的未分离出的稀土渣会随流而下, 最终无法再次分离出来, 在水冷金属型离心浇注条件下很难再次分离出稀土渣, 导致铸管质量不合格, 水压试验时会出现渗漏。另外, 铁液在高温下停留时间太长会加大氧化, 增多氧化物夹渣。浇注系统中落槽打结料、流槽涂料不清除会带入铁液中, 在离心冷却凝固后夹杂在铸件里造成夹渣<sup>[1]</sup>。浇管时, 中间包及扇形包内二次夹渣不及时清除, 就会随铁水进入管模。工艺参数中浇注温度的不适当控制属于产生夹渣的主要因素。浇注温度过低时, 金属液中金属氧化物等由于金属液粘度太大, 不易上浮到表面而在金属液中残留下来; 温度过高时, 金属液表面的熔渣变得太稀薄, 不容易自液体表面除去, 常常随金属液进入型内。硅、锰、稀土等与铁液中硫、氧结合形成氧化膜, 浇铸过程中由于温度低、渣量大等原因造成不能全部上浮上表面, 出现夹渣缺陷。渣铁分离过程中铁液处置渣渣不清净, 浇注时铁液未充满浇口 (尤其一开始铁液流细)

带入溶渣, 是夹渣产生的原因之一。铁水表面漂浮的渣如果不清理干净, 混入铁液当中就容易造成夹渣缺陷。由于冷模法凝固速度快, 当管模粉团块状形成时, 不能及时溶解, 也会产生夹渣缺陷。扇形包倾翻角度、流槽和落槽的位置、高度设置不当, 都会使铁水飞溅增大, 氧化夹渣产生几率增加。

## 3 夹渣缺陷控制与工艺改进措施

### 3.1 原材料质量控制措施

原材料质量是控制夹渣缺陷的第一道防线。原铁水中硫含量严格控制在  $0.0\%$  以下, 减少球化处理时硫化物生成量。采用低硫生铁或者对高炉铁水进行炉外脱硫预处理, 可以在源头上降低硫含量。其次控制铁液中含有的有害元素含量, 用质量分数小于  $0.5\%$  的优质生铁代替含有较多有害元素的生铁, 减少外来夹杂物的带入。为了减少硫化物的产生和铁液中含硫量, 应控制  $W(S) \leq 0.02\%$ ; 球化剂中稀土含量不宜过高, 稀土含量为  $1\% \sim 2\%$ <sup>[2]</sup>。对废钢及回炉料实行严格的分类管理, 防止出现油污、砂土等杂质混入。在炉料配比上, 加入少量废钢减少孕育时间, 避免孕育衰退, 调整回炉料和高炉铁水比例, 在球化包内加入聚渣剂净化铁液去除渣(杂)质。球化剂、孕育剂使用前要充分预热除潮, 减少水分进入造成氧化反应。

### 3.2 熔炼净化与除渣工艺优化

熔炼净化和除渣是消除夹渣缺陷的主要工序。首先应采用先进的熔炼工艺来替代传统工艺。与传统冲入法球化处理的新工艺相比, 新工艺的温降控制在  $15 \sim 28^\circ\text{C}$  之间, 空气污染指标由原来的  $230\text{Mg/m}^3$  降到  $42\text{Mg/m}^3$ , 铸管使用后一次水压合格率由原来的  $93\%$  提高到  $96\%$ , 年产  $10$  万吨铸管厂仅原材料节约、一次水压合格率提高两项每年可以创造经济效益  $82$  万元。喂线法球化处理反应平稳, 渣量小, 渣铁分离效果好。扒渣操作, 球化处理后多次扒除铁水表层浮渣。在浇注过程中, 对中间包和扇形包内的二次夹渣要及时清除。球化包内加入聚渣剂可以有效地吸附掉悬浮的细微夹杂物, 使铁水得到净化。还应该根据实际需要调节孕育剂和管模粉的加入量来减小浇铸过程中产生的不熔金属合金, 提高球化处理时载体气体氮气的纯度, 纯度要达到  $99.9\%$  以上, 避免氮气中的杂质造成铁水的二次污染。

### 3.3 浇注系统优化设计

浇注系统的设计可以有效地减少夹渣缺陷。首先应该改善流槽、落槽的结构形式, 减小铁水流淌时出现的紊流、飞溅。流槽驱动改造属于重要措施之一, 对水冷金属型

离心铸管机流槽驱动实施改造之后,设备运行稳定,流槽驱动同浇铸机横移保持同步,流槽在铸型中定位精确,球墨铸铁管产量质量明显提升。离心机需要防止流槽振动造成铁液溅出现象,承口砂芯要放在适当位置,防止产生毛刺。其次,流槽、落槽的打结料及涂料应采用耐冲刷、抗剥落性好的材料,清理干净后避免因铁水冲击或者浇铸时受热不均匀而使料块掉落。必须建立流槽、落槽的定期清理、维修制度,每次浇注前仔细查看它们是否完好。落槽的打结料、流槽的涂料清理不彻底,很容易与铁液混入管模里,产生夹渣缺陷,所以它是生产管理的重要控制点<sup>[3]</sup>。对于承口部位的顽固性夹渣缺陷,可以使用可熔阻渣环装置,用废旧球墨铸铁管制成可熔阻渣环套设在缺陷易发位置上,对铁水渣向上浮的行为起到物理阻隔作用,定点消除承口夹杂缺陷。

### 3.4 离心成型工艺参数优化

离心成型工艺参数的确定影响到夹渣缺陷的产生。根据管径大小、材质要求来确定浇注温度范围,即浇注温度。离心铸造时的浇注温度比重力浇注时低 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ ,但是过低会造成渣难以分离,过高会导致渣层变稀薄容易卷入铁水内部。浇注温度过高时,金属液表面的熔渣变得过稀,不能从液体表面除去,常常随金属液一起进入型内;浇注温度过低时渣不易浮起。数值模拟研究结果表明,在离心力的作用下, $5\mu\text{m}$ 的 $\text{SiO}_2$ 夹杂物最易被甩出来并留在铸管内表面,这给改善离心转速提供理论基础。合理的浇铸温度有利于夹渣上浮,但是必须和管模冷却速度相匹配,不能出现过高温造成管模过热、壁厚不均的现象。在离心转速上应根据铸管的规格来确定。转速过低时离心力小,杂质不容易向中心移动,转速过高会增加紊流,反而不利于渣铁分离。水冷金属型离心铸造工艺时防止过高的浇铸转速,调节合适的翻包速度和主机走速。另外要控制机身冷却水的进口温度和出口温度,保证管模冷却均匀。控制机身冷却水进口温度为 $28\sim 36^{\circ}\text{C}$ ,出口温度为 $50\sim 57^{\circ}\text{C}$ 。两次浇铸间的时间间隔不宜太长,防止管模温度起伏太大而影响浇注质量。

### 3.5 提高渣铁分离效率的措施

提高渣铁分离效率是减少夹渣缺陷的主要方法。球化处理时,应优先用喂线法代替冲入法,利用镁丝和稀土丝在铁水中深度反应,反应产物密度差异大,渣铁分离效果好,渣量少。浇注前及浇注过程中要设置多道挡渣、除渣环节,铁水包出口、扇形包、中间包等处设挡渣坝或过滤网,阻挡浮渣进入浇注系统。加强铁液的扒渣、挡渣效果,铁液中残镁流量不宜过高(控制在 $0.035\sim 0.05\%$ ),以减少铁液表面氧化,是提高渣铁分离效率的关键措施。离心铸管大多采用离心铸造工艺生产,离心铸造工艺主要包含金属过滤、浇注温度、铸型转速、渣下凝固、涂料使用、铸件脱型、浇注系统、浇注定量八个工艺,这八个工艺直接对铸件质量及生产效率产生影响。浇注工艺中要控制好初凝铁水流的流量、流速,防止铁水流卷入空气、浮渣。在管模内壁的涂料上选择耐高温、附着力好、厚度均匀的涂料,防止涂层脱落成机械夹渣。管模粉需要充分烘干,用干燥的压缩空气输送,防止水分与铁水接触产生气泡夹杂,保证一定的模粉用量。

### 3.6 生产过程标准化与操作优化

生产过程标准化、操作优化属于保证各项工艺措施得以实施的必要条件。首先要制定出完善的离心机铸管生产工艺操作规程,确定各个工序的关键控制参数和操作要点。控制铁液成分,减小铁液中硅含量,将球化剂加入到铁液中,使其中的 $W(\text{Si})$ 保持在 $0.8\sim 1.2\%$ 之间。对扇形包倾翻角度、流槽和落槽的位置以及高度进行调整,使铁水飞溅的程度尽可能小。其次应该对操作人员进行培训、考核,使操作人员能够识别出夹渣缺陷并具备工艺参数调节能力。建立生产过程记录制度,对每次出炉的铁水成分、温度、球化处理情况、浇注参数等做出记录,便于以后的追溯。应定期对管模进行检查和修理,龟裂严重时及时更换管模,管模内壁油脂、杂物要及时清除。建立夹渣缺陷的统计分析及反馈制度,对产生夹渣的不良品进行分析,找到其根本原因并及时更改工艺参数,从而形成一个闭环的管理体系,不断改善工艺水平。

表1 离心机铸管夹渣缺陷主要成因分类汇总

| 成因类别   | 具体因素        | 作用机理            | 典型表现    |
|--------|-------------|-----------------|---------|
| 原材料因素  | 原铁水含硫量过高    | 球化时生成硫化物夹杂      | 硫化物夹杂   |
| 熔炼工艺因素 | 稀土镁合金冲入法渣量大 | 渣密度与铁水接近,渣铁分离困难 | 稀土夹杂物   |
| 浇注系统因素 | 流槽、落槽清理不干净  | 打结料和涂料脱落混入铁水    | 机械夹渣    |
| 工艺参数因素 | 残镁量控制不当     | 残镁过高时铁水氧化严重     | 氧化物二次夹渣 |
| 渣铁分离因素 | 铁水表面浮渣未及时清除 | 浮渣随铁水进入管模       | 层状夹渣    |
| 操作管理因素 | 浇注温度不合理     | 温度过低渣难上浮,过高渣变稀薄 | 弥散分布夹渣  |

#### 4 结语

离心机铸管夹渣缺陷是由于原材料、熔炼、浇注、凝固、操作管理等各个环节中存在各种因素而产生的,是一个复杂的、多因素耦合的过程。本文对夹渣缺陷的形态特征和成因机理进行了系统的分析,从原材料质量控制、熔炼净化除渣、浇注系统优化、离心成型工艺参数优化、提高渣铁分离效率、生产过程标准化和操作优化七个方面给出了系统性的工艺改进措施。经由严格把控原铁水的含硫量,施行喂线法球化处理工艺,改善流槽结构的设计,恰当确定浇注温度以及离心转速,加强扒渣及挡渣的操作,创建起标准化作业体系等一系列办法,可以有效地削减夹渣的缺陷率,明显改善铸管的质量水平及其综合成材率。随着数值模拟技术在铸造方面的应用越来越广泛,对夹杂物在离心充型过程中运动规律的认识也越来越精确,未来可以借助数字化技术对工艺参数实施更加精准的优化,使离心机铸管生产向着高质量、高合格率的方向迈进。

#### [参考文献]

- [1]张智宇.基于随机森林算法的化工离心机失稳故障预测[J].中国设备工程,2026,15(7):171-172.
  - [2]刘洪斌,吴俊,罗秋杨,等.振动条件下钻井液离心机分离特性分析[J].大连理工大学学报,2025,65(5):494-500.
  - [3]黄思达,王承禄,郑东,等.卧螺离心机在化工污水处理装置的应用[J].设备管理与维修,2025,10(15):154-157.
- 作者简介: 郜礼涵(1991—), 本科, 毕业于兰州财经大学艺术设计专业, 助理工程师, 当前就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司, 一线铸管工; 贾振华(1994—), 本科, 毕业于华北水利水电大学交通土建工程专业, 助理工程师, 当前就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司, 一线铸管工; 范文龙(1997—), 毕业于安阳学院计算机应用技术专业, 助理工程师, 当前就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司, 一线铸管工。