

离心机铸管裂纹缺陷形成原因与防治措施研究

王晨阳 张建文 师佳喜

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] 离心铸造作为生产铸管的重要环节, 在很大程度上决定铸管的质量好坏, 而裂纹问题一直是困扰铸管质量提高的重要难题。文中介绍了离心机铸管裂纹的不同形式, 从材料方面、工艺参数的影响、模具的设计及状态、应力状态及外部环境等几个角度对产生裂纹的原因进行分析并提出相应的预防措施。此外还总结了对整个生产过程的监控、无损探伤、金相组织和力学性能检测以及数据回溯和工艺改进的方法。

[关键词] 离心铸造; 铸管; 裂纹缺陷; 应力分析; 防治措施

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19546

中图分类号: TG255

文献标识码: A

Research on the Causes and Prevention Measures of Crack Defects in Centrifuge Casting Pipes

WANG Chenyang, ZHANG Jianwen, SHI Jiaxi

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

Abstract: Centrifugal casting, as an important process in the production of cast pipes, largely determines the quality of the pipes, and crack problems have always been a major challenge in improving the quality of cast pipes. The article introduces different forms of cracks in centrifuge casting pipes, analyzes the causes of cracks from several perspectives such as material, process parameters, mold design and state, stress state, and external environment, and proposes corresponding preventive measures. In addition, methods for monitoring the entire production process, non-destructive testing, metallographic structure and mechanical property testing, as well as data tracing and process improvement were summarized.

Keywords: centrifugal casting; cast iron pipe; crack defects; stress analysis; prevention and control measures

离心铸造是通过离心力场使金属液在高速旋转的铸型中凝固成型的一种方法, 其优点为致密度高、强度好、生产率高, 而被大量用于制造球墨铸铁管、灰铸铁管以及各种合金铸管等。但是由于离心铸造工艺比较复杂, 涉及金属液流动、传热传质、凝固收缩及应力变化等多种因素综合作用, 因此铸管裂缝是造成产品质量不合格的主要原因之一。裂缝不仅会使铸管强度下降、寿命缩短, 在极端情况下还可能导致铸管在使用过程中出现渗漏或者破裂等安全事故, 给人们带来巨大的危害与损失。因此, 对离心机铸管裂纹产生原因进行研究并提出切实可行预防对策有着十分重要的现实意义和实用价值。

1 离心机铸管裂纹缺陷的主要类型

离心机铸管裂纹根据其产生的温度范围以及形状可大致分为三类: 热裂纹、冷裂纹及应力腐蚀裂纹。热裂纹是在凝固结束之前较高温度区域产生的, 这时铸管中已经形成了连续的固相骨架, 但是晶界之间仍然存在一些低熔点液体薄膜, 在凝固收缩应力与离心力的作用下,

沿着这些晶界撕裂而产生裂纹。热裂纹一般沿晶界分布, 断面为氧化色, 在铸管壁厚变化处、管端和浇注位置常见^[1]。冷裂纹是在铸管冷却到较低温度或者放置在室温中形成的。此时金属已经全部凝固, 但冷却速度过快或者相变体积效应而导致铸管内存在较大残余应力, 当应力大于材料抗拉强度时就会出现裂纹。冷裂纹多为穿晶断裂, 断口呈金属光泽, 无氧化迹象。应力腐蚀裂纹是由于受到一定应力的同时又处于某种腐蚀环境中而形成的延迟性裂纹, 在输送腐蚀性流体合金铸管中较为常见。这种裂纹的发展是具有时效性的, 在运行一段时间之后才会出现。

2 离心机铸管裂纹缺陷的形成原因

2.1 材料因素

材料自身的冶金性能决定了其裂纹敏感度。合金中的碳、硅、锰、磷、硫等元素含量会对裂纹产生很大影响。当碳当量较高时会使得凝固温度范围增大从而增加其热裂倾向; 硫与铁形成的低熔点 FeS 共晶在晶界处形成脆性薄

膜，当硫含量增加到 0.01%时热裂倾向系数会提升约 8%~12%，虽然磷可以改善流动性但是过多的磷会导致磷共晶出现从而使材料变得脆弱并且容易产生裂纹；另外在熔炼过程中带入的气体以及非金属夹杂也是造成裂纹的原因之一。氢会在凝固时析出而形成气孔及微裂纹进而成为应力集中位置。氧化物、硫化物等夹杂物割裂基体连续性，在夹杂物含量大于 0.05%情况下使铸管疲劳裂纹扩展速度加快。

2.2 工艺参数影响

离心铸造工艺条件对铸管温度场、流场以及应力场的影响显著，也是造成裂纹的主要原因。浇注温度过高会使凝固时间延长，凝固收缩加大，容易出现热裂；而温度过低会使金属液流动性差，造成冷隔或者浇注不足等问题，在后续冷却时也易发生裂纹。离心速度影响离心力及金属液在砂型内壁上的流动情况。如果离心速度较小，不能抵消重力作用而产生淋落和壁厚差异；反之如果离心速度过大，则会使凝固期间受到较大的外压，使得铸件与砂型之间摩擦增大，导致冷却收缩受限而产生拉应力从而引起冷裂。重力倍数（G 值）一般在 60~120 之间较好，但要结合管径、壁厚而定。冷却速度对裂纹的影响很大，冷却速度快，铸管内外壁温差大，热应力大，在冷却速度大于 50℃/min 的情况下，冷裂纹出现的概率急剧上升。另外模具预热温度也很重要，如果模具温度太低会使表面金属迅速凝固形成一层细晶区域，从而造成内外面组织不同而产生的界面处应力。

2.3 模具设计与状态

模具是离心铸造的重要工具，模具的设计好坏以及工作状况直接影响产品质量。模具壁厚及形状影响其热容量

及导热性，壁太薄会造成热量不足，无法及时降温，而壁过厚又会造成热应力分布不均。模具内部表面状态对于铸管表面质量有很大影响，表面粗糙度 Ra 每提升 5μm，铸管表面出现裂缝的可能性会提高 10%~15%^[2]。涂料的作用是保护模具，控制传热以及便于脱模。涂料厚度不均匀会造成局部冷却不同，在此区域产生应力集中点；涂料脱落或者有缺陷会使铸件与模具接触，导致局部激冷和粘连，严重时会产生纵向裂纹。模具在使用过程中所受到的热疲劳损伤也不可小觑，在不断重复快速加热、冷却的过程中，模具表面会出现网状开裂现象，而这种开裂会在铸管上留下“印记”。

2.4 应力状态与外界条件

离心铸管在凝固及冷却时受到各种应力叠加影响。凝固收缩应力由于液体变为固体过程中体积减少造成，一般为 3%~6%，是热裂纹主要原因。热应力由铸管内外壁冷却速率不同引起，外壁先凝固收缩对外壁产生压缩应力，而内壁后凝固收缩受到已经凝固外壁限制产生拉伸应力，当拉力大于材料高温强度时就会产生裂纹。相变应力由于奥氏体转变为铁素体或珠光体时体积增大造成，与热应力叠加使得应力更加复杂。同时，离心力也会在铸管内部产生周向拉伸应力，其大小与转动速度平方成正比。外部环境因素方面，环境温度和湿度对铸管冷却有影响，在冬天温度较低时，铸管冷却较快，容易出现冷裂，而在夏天湿度较大时，铸管表面易生锈，从而造成应力腐蚀裂纹萌生。因此，离心铸管裂纹是由于冶金、应力以及工艺等多种因素相互作用而产生的。为了便于分析这些裂纹之间的联系，如表 1 所示总结了这几种主要裂纹的特点、原因及其预防措施。

表 1 离心机铸管裂纹缺陷类型、主要成因及防治措施对照表

裂纹类型	形成阶段	主要成因归纳	关键防治措施	检测/监控手段
热裂纹	凝固末期	1.晶界低熔点薄膜 2.凝固收缩应力大 3.浇注温度过高、壁厚过渡突变	1.严控 $S \leq 0.02\%$ 、 $P \leq 0.06\%$ 2.优化碳当量，添加稀土/镁 3.精确控制浇温波动 $\pm 10^\circ\text{C}$	金相观察晶界特征 断口氧化色判断 过程温度曲线监控
冷裂纹	冷却后期	1.冷却速度过快 2.模具约束收缩导致拉应力集中 3.相变体积效应叠加残余应力	1.分段控冷，缓冷坑缓冷 2.热脱模工艺减少约束 3.去应力退火	超声波探伤 磁粉探伤 残余应力测试
应力腐蚀裂纹	服役阶段	1.特定腐蚀介质环境 2.铸管内部存在较大残余拉应力 3.表面组织缺陷或锈蚀	1.严格控制残余应力水平 2.表面防护涂层处理 3.优化成分提高耐蚀性	渗透检测 服役环境监测 定期壁厚检测
工艺/模具因素	全流程	1.离心转速过高/过低 2.模具预热不均 3.涂料厚度不均或脱落 4.夹杂物含量超标	1.动态调节离心转速 2.红外热像仪保证模温均匀 3.涂料厚度控制 $\pm 0.1\text{mm}$ 4.吹氩精炼/过滤网净化	转速实时监控 SPC 过程统计控制 热成像温度场监测

3 离心机铸管裂纹缺陷的防治措施

3.1 优化材料与熔炼工艺

从材料源头控制裂纹敏感性是预防的基础工作。要严格控制在冶炼的原材料化学成分,合理确定碳当量,把硫含量降到 0.02% 以下,磷含量降到 0.06% 以下。对球墨铸铁管要求有一定的残留镁和稀土元素来抵消硫的危害并使石墨呈团絮状。在熔炼过程中采用中频感应电炉或者冲天炉—电炉双联法进行熔炼,保证足够的铁水过热度以及足够的时间让气体和夹杂物上浮排出。在进行炉前孕育及球化处理时要注意控制好添加的数量以及温度,以免造成不必要的组织问题。推广使用铁水预处理方法如氩气搅拌、过滤网过滤等,都可以大大降低夹杂物数量。

3.2 精确控制工艺参数

建立合理的工艺参数控制是预防裂纹的根本办法。浇注温度要依据管子大小、壁厚以及材料而定并且要用连续测温仪进行监控,建议浇注温度变化不超过 $\pm 10^{\circ}\text{C}$,有利于不同批次之间的一致性;离心速度要根据铸管尺寸进行计算得出,使重力倍数在一定范围内,还要考虑到离心速度随着凝固过程的变化情况,在凝固开始时用较高的离心速度保证充型良好,在凝固结束时降低离心速度以减轻离心引起的内应力;冷却制度也要分段进行,在高温区缓慢冷却,在相变温度区域控制冷却速度,以免产生过多的组织应力。管模预热温度一般为 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$,以便降低表面快速冷却作用。

3.3 改进模具设计与维护

模具设计必须考虑热平衡以及应力分布问题。合理设计模具壁厚及端部形状,防止截面急剧变化造成应力集中。模具外面加散热筋或者冷却水路等来控制不同部位冷却速率。模具材料建议选择具有良好抗热疲劳性的低合金钢或者热作模具钢并对其进行适当的热处理。涂料工艺上需注意涂料比例、黏度、喷涂厚度等,涂料厚度误差不得超过 $\pm 0.1\text{mm}$ 以保证传热条件一致性。制定模具定期检查保养规定,对于出现裂缝、磨损及变形等情况做好登记并分析原因,及时修复或者更换。推广使用模具表面激光熔覆强化方法,提高模具寿命,降低由于模具状况不佳造成的产品质量不稳定问题。

3.4 应力调控与生产环境管理

应力控制从浇注到落砂始终存在,在铸管凝固后至冷却时可采用“热脱模”,即在铸管还有一定温度情况下将其从模具中取出,降低模具对收缩的影响。脱模后的铸管要放在缓冷坑或者保温罩中进行缓冷,冷却速度在 $5\sim$

$15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以内,让其内部残余应力充分消除。如果已经形成了很大的残余应力,则需要对其进行消除应力退火处理^[3]。退火温度一般为 $550\sim 650^{\circ}\text{C}$,根据壁厚来决定保温时间,最后出炉后慢慢冷却。另外,在生产过程中要注意冬天车间保暖,不能让冷风吹向铸管;同时建立良好的温度、湿度检测设备,保证生产的正常进行。

4 质量控制与检测方法

4.1 过程监控

建立全过程的过程监控系统,对铁水温度、化学成分、浇注速度、离心转速、模具温度、冷却曲线等重要指标进行实时监测并保存。用统计过程控制 (SPC) 的方法对这些指标的变化情况进行分析判断是否有不良的趋势出现并且采取相应的对策措施。重要的环节设有自动报警及连锁保护装置避免由于指标超出范围造成的大批量裂纹问题的发生,在智能监控系统中可以将工艺条件以及裂纹的数据存入数据库中,使用机器学习的方法建立裂纹预测的模型对每一根铸管的裂纹风险进行及时准确地评价和预报。另外,利用热成像技术对铸管凝固过程中温度场进行在线检测,可以发现冷却不足部位并反馈给冷却系统以做出相应改变。

4.2 无损检测技术

无损检测是裂纹缺陷筛查以及评价的一种有效方法。超声波检测能够发现 1mm 以上深度裂纹缺陷,适合进行铸管在线或离线检测;而磁粉检测能够发现表面及近表面裂纹缺陷,简单易行,在离心铸管表面裂纹检测中经常使用;渗透检测仅能用于非铁磁性材料铸管上表面开口裂纹检测。对于一些重要用途铸管,建议使用超声波和磁粉两种方法结合的方式进行检测,可以将裂纹漏检率降至 0.5% 以下。目前,相控阵超声以及数字射线成像等新技术已逐渐应用于生产实际中,提高了检测准确性和工作效率。

4.3 金相与力学性能分析

金相分析可以从微观上了解裂纹产生原因及特点。通过对裂纹周围组织、脱碳程度及氧化情况进行分析可以判断出裂纹发生在高温区还是低温区。利用扫描电子显微镜配合能量谱仪可以识别出裂纹表面夹杂种类以及数量,从而对裂纹起源起到一定的指导作用。通常情况下,在高温热裂纹断面上可以看到树枝晶自由表面和低熔点共晶膜,在冷裂纹断面上则表现为解理或者准解理。力学性能试验有抗拉强度、伸长率、硬度以及冲击韧性等都是衡量铸管抗裂能力的重要标准,应当和金相分析结合起来建立组织-性能-裂纹敏感性关系。一般需达到球墨铸铁管延展率大

于等于 10%，冲击韧性大于等于 12J/cm³，留有一定的余量^[4]。不定期取样做阶梯试块，可以观察工艺变化对铸件本身的影响。

4.4 数据追溯与工艺优化

建立铸管生产全流程数据追踪管理系统，给每支铸管一个唯一的标识码，记录下该铸管所用原料批号、生产工艺条件、检查情况以及最后评价等级等信息。通过对这些已有资料进行研究总结出裂纹缺陷发生概率与不同工艺条件之间关系，找出主要的影响因素。运用多元回归及主成分分析法可以衡量各个工艺因素对于产生裂纹影响大小并得出最优参数范围，在此基础上不断调整和完善生产工艺条件及要求，形成一个“检查-分析-改善-再检查”循环过程。随着工业互联网的发展，不同车间之间质量信息交流变得更加方便快捷，促进了整个行业的技术水平进步。

5 结束语

离心机铸管裂纹缺陷产生是多种因素共同作用的结果，包括原材料成分、生产工艺、设备条件以及应力变化等方面的影响。预防裂纹发生必须有全局意识，在材料选择、工艺控制、模具管理及应力处理上采取相应措施的同时，还要利用过程监控、无损检测及追踪记录等方式保证整个生产过程的质量。近年来随着制造业信息化水平不断提高，以大数据为基础进行工艺改进和实时质量预报也逐

渐成为离心铸管质量管理的新趋势。今后还应应对离心铸造过程中各种物理场之间相互关系展开深入探讨，研发出能够实现裂纹预警并及时加以抑制的软件，促进我国铸管产业走上一条高质量发展之路。

[参考文献]

- [1]吴哲,宋润滨,吕烨,等.堆焊铸管模热疲劳性能试验研究[J].哈尔滨理工大学学报,2006,10(3):34-37.
- [2]朱厚国,赵昆.用于铸管模修复的抗热疲劳堆焊材料试验研究[J].中国表面工程,2009,22(6):57-60.
- [3]庞于思.新兴铸管股份有限公司成功批量生产 N07718 无缝钢管产品[J].钢管,2017,46(2):20.
- [4]张惠萍,陈洪琪,卢玲玲,等.连铸管坯质量对钢管内折缺陷的影响[J].钢管,2006,20(6):27-30.

作者简介：王晨阳（1993.12—），毕业于河南应用技术职业学院电子商务专业，现就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司，任铸管工，助理工程师；张建文（1994.06—），毕业于河南建筑职业技术学院建筑工程技术专业，现就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司，流槽工，助理工程师；师佳喜（1994.08—），毕业于郑州职业技术学院汽车检车与维修专业，现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，助理工程师。