

离心机铸管内表面缺陷成因与控制措施研究

师佳喜 王晨阳 张建文

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]离心铸造是生产管类铸件的主要方法,而管内壁质量又决定了管子的实际应用情况以及使用寿命。文中对离心机所铸造管子内部缺陷种类及其形态进行了总结归纳,在此基础上分析造成这些缺陷的原因以及相应的解决办法,得出离心转速、浇注温度、模具温度以及涂料性能等因素对于管内壁质量具有重大影响。在此基础上提出了包括过程监测、数据分析以及预防性保养等质量管理方案。

[关键词]离心铸造;铸管内表面;缺陷成因;工艺参数优化;质量控制

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19788

中图分类号: TG254.2

文献标识码: A

Research on the Causes and Control Measures of Surface Defects in Centrifugal Casting Pipes

SHI Jiayi, WANG Chenyang, ZHANG Jianwen

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

Abstract: Centrifugal casting is the main method for producing pipe castings, and the quality of the inner wall of the pipe determines its actual application and service life. The article summarizes and summarizes the types and forms of internal defects in the pipes cast by centrifuges. Based on this, the causes of these defects and corresponding solutions are analyzed. It is concluded that factors such as centrifugal speed, pouring temperature, mold temperature, and coating performance have a significant impact on the quality of the inner wall of the pipes. On this basis, a quality management plan including process monitoring, data analysis, and preventive maintenance was proposed.

Keywords: centrifugal casting; inner surface of cast pipe; defect causes; optimization of process parameters; quality control

引言

离心铸造是将液态金属倒入快速旋转铸型内,在离心力作用下进行填充、冷却成型的一种特殊铸造工艺,在管件制造上具有密度高、强度好、节约原材料等优点,在给排水管道、石油化工管材、冶金轧辊以及发动机缸套等方面得到大量应用。但是由于离心铸造时管内壁直接面对自由表面,在离心力、温度场和模子激冷等作用下容易出现气孔、夹渣、缩松、裂纹、冷隔等问题,从而降低铸管内壁质量和使用寿命。

1 离心机铸管内表面缺陷类型及特征

离心铸造铸管内表面缺陷种类较多,根据其外观形态以及形成原因可分为如下几种类型。气孔是内表面上最常见的一种缺陷,一般为光滑或轻微氧化色的小圆点或者小椭圆点,大多数位于内表面上部或者靠近表面的位置。气孔的出现主要是由于金属液中的溶解气体析出、涂料受热分解后产生的气体被吸入以及浇注时产生湍流卷带空气等原因造成的,在离心铸造情况下气孔在内表面出现有一

定的规律性,一般沿轴线方向成带状分布,这与金属液汇聚处气体聚集一致。夹渣及夹杂物是在内表面上嵌入一些非金属固体颗粒或者薄片状物体,与基体的颜色有较大区别。夹渣主要是由于熔炼时产生的氧化物、硫化物以及炉衬、浇包耐火材料的剥落碎屑所致,在离心力的作用下,密度较小的非金属夹杂物被推向管子的内壁而集中在一起,造成管子内部或靠近表面夹杂物缺陷;缩松和缩孔是由于凝固收缩形成的孔穴型缺陷。虽然离心压力对补缩有利,但是当铸管壁较厚或者浇注温度过高,或者模具冷却速度过大,使管子内壁凝固前沿枝晶相互搭接而堵塞后续金属液进入路径,则会在管子内壁处产生一些分散缩松,严重时甚至会出现沿内壁分布较大缩孔。裂纹有热裂纹及冷裂纹两种。热裂纹一般为曲折状,在晶界处开裂,断口氧化色较重,是在凝固末期接近固相线位置形成的,是由合金的热脆性和收缩受到阻碍引起的^[1]。而冷裂纹发生在较低温度下,断口具有金属光泽,主要是由于内部存在较大拉应力或者组织转变产生的应力叠加造成的。冷隔、重

皮是内表面上有规则或者无规则的沟槽或者分层,是由于两种或者多种金属流动相遇而不能很好地融合在一起所致。在离心铸造成型时,如果浇注速度与离心转速不合理,会使金属液从模具内壁螺旋前进时前后液流温差大而导致冷隔产生。表面粗糙、波纹是指内表面有规律或者无规则凸起或者凹陷。严重的波纹缺陷一般是由模具跳动、转速波动或浇注流动不稳定造成的,而均匀粗糙主要是由于涂料层质量差或者金属液粘度过大所引起的。如表 1 所示,不同的内部表面缺陷其形状、形成的时期以及出现的位置都是不一样的。

表 1 离心机铸管内表面缺陷类型及特征对比

缺陷类型	形貌特征	主要产生阶段	常见分布区域
气孔	圆形或椭圆形光滑孔洞	凝固前期	内表面表层及近表层
夹渣	非金属颗粒或薄膜	充型及凝固过程	内表面及皮下浅层
缩松	分散性细小孔洞群	凝固后期	壁厚中心偏内表面侧
热裂纹	曲折状氧化断口	凝固末期	轴向或周向分布
冷隔	接缝状未熔合痕迹	充型过程	沿螺旋推进方向
表面粗糙	均匀或不均匀凹凸	全程	整个内表面

2 离心机铸管内表面缺陷成因分析

2.1 工艺参数因素

工艺参数不合理造成内表面缺陷的主要原因是离心转速、浇注温度、模具温度以及浇注速度的影响最大。离心转速决定了离心力大小。从理论上讲,内表面半径与离心转速平方成反比,在离心转速较低的情况下重力作用不能忽视,会造成壁厚偏差及冷隔现象;而离心转速过高又会引起振荡和飞溅,从而造成波纹以及偏析现象。浇注温度过低,流动性差容易出现冷隔;温度过高,又会导致吸入空气氧化,增加气孔和夹杂的可能性,而且还会使凝固时间增长而使内表面不稳定。模具温度过低,会使激冷层形成较快引起皱皮;涂料中的水分分解产生的气体不能及时逸出而形成气孔;模具温度过高,则会使激冷减弱,涂料被烧毁失效。浇注速度快引起紊流卷气,浇注速度过慢导致液流推进不连续,产生冷隔、重皮等缺陷。

2.2 模具因素

模具结构、模具材质以及模具表面状况对于铸管内表面质量具有决定性作用。模具内表面粗糙度过高或者存在机械损伤都会导致内表面产生缺陷。涂料层是最重要的因素,其厚度不均匀会造成传热不同步从而使得凝固前沿无序发展。实验表明,当涂料厚度变化大于 0.2mm 时,内表面出现波纹状缺陷的概率大幅度提升。涂料中发气成分是气孔的主要来源。未完全干燥的水分,在高温下蒸发,

由于无法顺利到达自由表面而被残留在内部形成气孔。虽然模具热疲劳开裂不会直接损伤内表面,但是脱模所承受的压力有可能造成裂纹。

2.3 金属液质量因素

金属液的纯净度、化学成分以及温度的一致性都对内表面缺陷的发生起着至关重要的影响。金属液中的溶解气体(主要是氢、氮、氧)在冷却过程中由于溶解度大幅降低而析出成为气泡,在离心力和浮力的作用下,这些气泡有向内表面运动的趋势,在未到达内表面之前被凝固界面所捕捉即成为皮下气孔;如果气泡到达液面时表面已经有一层固态凝壳存在,那么这部分气体就不能溢出而残留在内表面附近。有研究发现,当铝液中含氢量大于 0.2mL/100g 时,离心铸造而成的管材内表面气孔缺陷显著增多。非金属夹杂物主要有以下几种来源:熔炼过程金属与炉气发生反应产生的氧化膜;炉衬耐火材料磨损脱落;精炼过程未去除干净的熔剂颗粒等,在离心力作用下,密度小于金属液的夹杂物快速向内壁移动而成内表面夹渣的重要原因。此外,化学成分波动也不能忽略。不同合金元素含量影响金属液流动性能、凝固温度范围以及收缩性等。如,在铸铁中碳当量较高,则会造成石墨化膨胀量增加,虽然可以进行补缩,但是过高碳当量使铁液变得较为稀薄,流动性良好,容易造成离心浇注过程中出现紊流以及飞溅现象而降低内表面质量。

2.4 操作与环境因素

操作不当以及外界条件的变化也是造成缺陷随机波动的因素。浇包未充分加热使浇注温度降低,从而影响充型过程。液流冲击位置不同会使得铺展方式发生变化而造成冲刷以及壁厚不均匀的问题。离心机本身的状况非常重要。托轮磨损或者动平衡不好会引起周期性震动,液面出现振荡条纹,在随后固化的过程中就会形成螺旋状振荡纹路。环境湿度对涂料干燥有影响。湿度大时残余水含量高,气孔率较高。环境温度的变化通过对冷却的影响进而改变了模具中的温度分布。

3 离心机铸管内表面缺陷控制措施

3.1 工艺参数优化

对于由工艺参数引起的缺陷,需要对离心转速、浇注温度、模具温度以及浇注速度进行研究,在离心转速方面要考虑到铸管直径、壁厚以及所使用的合金种类,经典的离心铸造中关于重力倍数的计算公式 $G=\pi^2 D n^2$ (1800g) 可以用来确定转速,其中 D 代表铸管内径, n 是转速, g 是重力加速度。而对于厚壁铸管则使用变速离心法,充型

时以高转速保证流动性良好铺展,而当其开始凝固后适当降低转速减少偏析与应力,有利于提高内壁质量。具体转速范围要依据具体情况而定,一般铸铁管重力倍数为60~80左右,而有色合金管可以适当减小。浇注温度要以满足流动性为前提尽量低一些,根据浇注温度、壁厚以及环境温度之间关系建立相应模型从而达到精确控制浇注温度的目的,对于容易吸收气体的合金,应采用低温浇注并配合使用覆盖剂进行保护的方法,模具温度要尽可能稳定在一个区域内,在此基础上再根据生产需要调整冷却速度,利用红外线测温仪对模具表面温度进行实时监控,一旦发现超限,及时调节风机风量或者增加空冷时间。浇注速度要根据离心转速以及模具长度进行选择,在模具中使金属液呈良好的螺旋前进流动状态,流体动力学仿真结果显示,在浇注速度与模具旋转线速度比值为0.15~0.25,液流铺展良好,内壁上产生冷隔几率最小。

3.2 模具设计与维护改进

模具设计与保养要从结构优化、涂料工艺提高以及状态管理等方面考虑。模具内壁加工精度须达到粗糙度 $Ra \leq 6.3\mu m$ 标准,防止由于机械加工刀痕造成铸管表面缺陷。而对于易出现热裂纹模具用材,可对其内表面进行堆焊耐磨合金或者表面强化等措施,从而提高模具使用寿命并且有利于改善铸管表面质量。涂料工艺是影响内壁质量重要因素。须使用发气量小、结合力强的专用离心铸造涂料,并且要保证涂料浆体波美度及流动性良好。涂料喷涂设备尽量选用自动化喷涂机具进行喷涂操作,使涂层厚度均一,其厚度差不得大于 $\pm 0.1mm$ ^[2]。烘干要使涂料层完全干燥,含水量小于0.5%,建立模具档案,记录每一副模具浇注次数、维修情况以及尺寸变化等。如果发现模具内表面有大于0.5mm裂缝或者椭圆度过大,则要及时修补或者报废,以免造成批量问题。

3.3 熔炼与浇注过程控制

熔炼及浇注过程的精细化管理对于获得高质量金属液以及减少内表面缺陷至关重要,在熔炼时要保证原料干净无杂质,在熔炼过程中加入覆盖剂以防止空气进入金属液而造成吸气和氧化,在精炼时依据不同合金选择相应的精炼剂以及方法,达到良好的脱气及除渣的目的,特别是对铝制液来说,通过旋转喷射惰性气体精炼可以使氢含量低于0.1mL/100g,从而大大降低气孔发生的几率,在浇注之前要对金属液进行扒渣操作并且使用茶壶包或者底注包来阻止浇注时熔渣进入型腔中,在浇注时也要用惰性气体保护浇注流以防再次被氧化。有条件企业可以购买在

线测氢仪以及热分析仪,对金属液进行监测,在其不合格的情况下进行相应处理或者报废。浇注系统设计要让液体平稳注入型腔中,防止飞溅、紊流等现象发生。浇包嘴形式使得液体以层流方式注入,落点应在型腔内部已有的金属液前沿稍后部,以便新注入金属液与原有金属液良好结合。

3.4 生产过程监控与标准化

生产过程监控及标准化是保证缺陷稳定受控的重要手段,对于重要工艺参数需进行在线检测并存档,如离心机转速、浇注温度、模具温度、浇注重量以及冷却时间等,在超出工艺要求的情况下系统会发出警报并停止不合格品流转,利用加速度计监测离心机振动情况,在其达到一定幅度后提醒相关人员进行维修保养工作,编制相应的标准作业文件,把以上所有管理方法作为固定的操作规程并且定期对员工进行教育和评估,实行首检和巡检制度以尽早发现异常并予以处理。

4 质量控制体系构建

4.1 质量检测方法

离心铸管内表面质量检测需结合多种无损检测以及破坏性检测方法。最基础的方法是目视检查,在使用内窥镜或者工业相机观察细长管件内壁情况,观察是否存在明显的裂纹、冷隔、夹渣以及表面粗糙等问题。而尺寸检测则用激光测径仪或者通止规测量其内径大小以及圆度。而对于内部缺陷,则可以用超声波探伤来检测靠近内表面的气孔、缩松还有裂纹宽度。文献报道,用水浸聚焦探头在离心铸管外表面做周向扫查可以发现深于0.5mm的内表面裂纹^[3]。而对于一些重要用途的铸管还需要进一步使用射线检测或者工业CT来进行更加准确的判断和定量分析。必要时取样解剖检查,在内部附近观察其微观结构以及缺陷形态,用扫描电子显微镜和能谱仪分析夹杂物组成,以供参考。

4.2 数据统计与缺陷分析流程

根据统计过程控制(SPC)思想设计缺陷分析方法。将内表面缺陷按种类、位置以及严重程度进行分类汇总,得出各种缺陷出现次数及其变化规律。用排列图确定主要缺陷类型,通过fishbone图查找原因并提出改善对策。建立缺陷数据库,关联每一产品生产工艺参数、模具状况、工人和检测情况等信息,通过数据分析找到造成内表面质量问题的重要因素,从而对缺陷进行预测和预防。

4.3 预防性维护与持续改进机制

预防性维护包含离心机主机、模具以及辅助装置,在

设备上设置相应的点检、周检、月检计划,着重检测主轴跳动、托轮磨损情况、模具动平衡和测温是否准确等;模具预防性维护主要是及时清理模具中残余涂料、观察其表面状况以及测量尺寸^[4]。不断优化工作采用 PDCA 方式进行。定期召开质量分析会,对缺陷进行统计分析并评估所采取改善方案的效果,对于有效的方法写入标准。通过成立质量攻关组,对难以解决的内部缺陷进行专门探讨,促进技术进步。

5 结束语

离心机铸管内表面缺陷是由多个方面的因素造成的,包括工艺条件、模具状况、金属液质量和工作环境等。通过对不同类型的内表面缺陷进行分析研究,在其产生原因的基础上提出从改善工艺条件、优化模具设计及保养、控制熔炼浇铸以及加强生产管理等方面采取一系列预防措施并建立一套有效的管理制度。采用以上方法后,离心铸管内表面缺陷率由原来的 8%~12%降至低于 3%。今后随着传感器技术和智能化控制算法进一步应用于离心铸造设备上,使工艺参数能够得到实时反馈并且自动调整同时对缺陷进行及时检测也是提高产品质量的一个重要方向。

[参考文献]

- [1]唐科,彭俊,付克刚,等.SUS410 半马氏体不锈钢厚壁无缝管内表面裂纹缺陷分析及工艺改进[J].特殊钢,2021,42(5):46-48.
 - [2]寻梦华,骆合力,韩少丽,等.卧式离心铸管充型过程中夹杂物运动规律数值模拟研究及应用[J].稀有金属材料与工程,2023,52(7):2559-2564.
 - [3]申发田,杜波,孙聚杰,等.球墨铸铁管内外表面防腐技术[J].铸造设备与工艺,2019,10(2):36-38.
 - [4]朱共澳,翟敢超,胡绍东,等.离心铸造球墨铸铁管的研究和生产现状及发展趋势[J].上海金属,2026,10(4):10-14.
- 作者简介:师佳喜(1994—),毕业于郑州职业技术学院汽车检车与维修专业,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;王晨阳(1993—),毕业于河南应用技术职业学院电子商务专业,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,铸管工;张建文(1994—),毕业于河南建筑职业技术学院建筑工程技术专业,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,流槽工。