

离心机铸管浇注系统结构优化与稳定性研究

黄 鹏 马思远

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]浇注系统是离心机铸管生产中的关键组成部分,其结构合理性与过程稳定性直接影响铸管的充型质量、组织均匀性及成品合格率。文章系统分析了浇注系统在铸管质量中的核心作用,从浇道尺寸与比例优化、浇口位置与数量设计、缓冲与稳流结构设计以及基于数值模拟的优化方法四个方面阐述了结构优化设计方法。在此基础上,重点分析了影响浇注稳定性的关键因素,探讨了浇注参数控制、动态稳定性分析方法及稳定性提升技术措施。研究表明,离心铸造浇注系统的设计应遵循“平稳充型、高效挡渣、均匀分布”的原则,合理的浇注系统可使铸管成品率提高 15%~20%,组织均匀性显著改善。文中研究成果为离心机铸管浇注系统的工程设计与工艺改进提供了理论依据和技术参考。

[关键词]离心机铸管;浇注系统;结构优化;浇注稳定性;数值模拟

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19789

中图分类号: TG250.3

文献标识码: A

Research on Structural Optimization and Stability of Centrifugal Casting Pipe Pouring System

HUANG Peng, MA Siyuan

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

Abstract: The pouring system is a key component in the production of centrifuge cast pipes, and its structural rationality and process stability directly affect the filling quality, microstructure uniformity, and finished product qualification rate of the cast pipes. The article systematically analyzes the core role of the pouring system in the quality of cast pipes, and elaborates on the structural optimization design method from four aspects: optimization of runner size and proportion, design of gate position and quantity, design of buffering and steady flow structure, and optimization method based on numerical simulation. On this basis, the key factors affecting casting stability were analyzed, and casting parameter control, dynamic stability analysis methods, and stability improvement technical measures were discussed. Research has shown that the design of centrifugal casting pouring systems should follow the principles of "smooth filling, efficient slag blocking, and uniform distribution". A reasonable pouring system can increase the yield of cast pipes by 15% to 20% and significantly improve the uniformity of the structure. The research results in the article provide theoretical basis and technical reference for the engineering design and process improvement of centrifuge casting system.

Keywords: centrifugal casting tube; pouring system; structural optimization; pouring stability; numerical simulation

引言

离心铸造是将金属液注入高速旋转的铸型中,在离心力的作用下充型并凝固成型的一种先进的铸造工艺,被广泛用于铸铁管、不锈钢管和双金属复合管的大批量生产。浇注系统是熔炼炉与铸型的桥梁,浇注系统结构设计是否合理以及浇注过程中是否稳定,都会影响到金属液的充型形态、流动是否平稳和铸件质量。传统的离心铸造浇注系统设计大多依靠经验公式和试错法,存在着金属液卷气、飞溅、挡渣效果不好等问题,从而造成铸管出现气孔、夹渣、壁厚不均等缺陷,成品率无法提高。近些年来,由于计算流体动力学及数值模拟技术的不断发展,浇注系统结

构改进工作有了明显进步。离心铸造浇注系统设计要考虑到金属液的流动性,铸型转速,浇注速度和挡渣要求,用优化浇道截面比,设置缓冲结构,并采用定量浇注的方法来减少铸管缺陷。本文从浇注系统功能定位入手,对结构优化设计方法进行阐述,对浇注过程稳定性控制策略进行分析,为离心机铸管生产企业提供技术支持。

1 浇注系统在铸管质量中的作用

浇注系统在离心机铸管生产过程中起着导流、挡渣、缓冲、分配金属液的作用,浇注系统的设计好坏直接影响铸管内部质量、外观成形。合理的浇注系统可以将熔炼合格的金属液平稳、连续地送入高速旋转的铸型内壁,使金

属液受离心力的作用,在铸型内壁周向均匀地铺展,形成壁厚一致、组织致密的管状铸件。浇注系统的作用有如下几个方面:控制金属液的流动速度和充型方式,防止紊流、飞溅;有效地拦截熔渣和氧化物夹杂,提高金属液的洁净度;调节金属液的温度分布,减少浇注过程中的热量损失;缓冲金属液的冲击力,保护铸型内壁涂层。浇注系统设计不当会造成金属液从铸型中出来产生涡流、飞溅或者断续流动,从而产生气孔、冷隔、夹渣和壁厚不均等缺陷。另外,浇注系统挡渣不好会使得熔渣进入铸型,造成铸管内壁产生渣斑或者渣孔,严重影响铸管的耐腐蚀性以及力学性能。离心铸造的浇注系统挡渣设计要点是依靠密度差、流动惯性将熔渣上浮或滞留在集渣包里。研究表明,在挡渣板的设计中可以拦截大尺寸的夹杂物占 90% 以上。因此科学设计浇注系统是保证离心机铸管质量的前提条件。

2 浇注系统结构优化设计方法

2.1 浇道尺寸与比例优化设计

浇道系统几何尺寸以及各个部分间比例关系都会影响到金属液流动行为。离心铸造的浇注系统一般是由浇口杯、直浇道、横浇道和内浇道组成的,各个部分截面积的比例会直接影响金属液的流速和压力分布。根据流体力学原理,浇注系统应该遵循逐渐扩大的截面设计原则,即直浇道出口截面积大于入口,横浇道截面积大于直浇道出口,内浇道截面积最小,保证金属液在流动过程中保持稳定的层流状态,防止出现负压吸气。浇道尺寸的确定要考虑到铸管壁厚、铸型转速和金属液种类等。对于球墨铸铁管,直浇道直径与铸管内径之比取 $0.15 \sim 0.25$,横浇道截面积与直浇道截面积之比取 $1.2 \sim 1.5$,内浇道总截面积与横浇道截面积之比取 $0.8 \sim 1.0$ 。浇道尺寸过大或者过小都会破坏流动的稳定性,浇道尺寸过大,流速会降低,金属液降温速度加快;浇道尺寸过小,流动阻力增大,容易出现喷射、飞溅现象。

2.2 浇口位置与数量优化

浇口位置和数量的选择对离心机铸管充型均匀性、壁厚一致性起着重要的作用。离心铸造时金属液经由浇口进入到铸型之后,在离心力的作用之下向周围方向展开。浇口的位置应设在铸型端面合适的位置,一般位于铸型内壁附近,使金属液直接冲击到铸型内壁,并且快速地沿周向铺展开来。对长径比较大的铸管,用单浇口会使金属液沿轴向分布不均,靠近浇口端的金属液过多,远离浇口端的金属液不足,因此应该采用双浇口或者环形浇口,使金属

液从铸型的两侧或者多个地方同时注入,以改善轴向充型^[1]。浇口数量不宜太多,否则会造成金属液分流时产生氧化和温度损失。浇口一般用扁平扇形或者矩形,宽高比为 $3:1$ 到 $5:1$ 之间,有利于形成发散型金属流,减少对铸型内壁的冲击力。浇口与铸型接触处要设置圆角过渡,不能用尖角处造成涡流和冲刷磨损。

2.3 缓冲与稳流结构设计(如挡渣、缓冲区等)

缓冲和稳流结构属于浇注系统对金属液的流动性及排除非金属夹杂起作用的部件。在直浇道底部或者横浇道内设缓冲池或集渣包,使金属液到达内浇道前减缓速度,改变流动方向,利用密度差使熔渣和夹杂物上浮到缓冲区内。离心铸造浇注系统中常用到的稳流结构有:浇口杯内筛网或者泡沫陶瓷过滤器来拦截大尺寸的夹杂物,直浇道下部的缓冲坑深度一般为直浇道直径的 $1.5 \sim 2$ 倍,横浇道内设挡渣板或者迷宫式结构,可以延缓金属液的流动路线使渣粒上浮。缓冲区设计还要考虑到金属液的温度损失,缓冲区的壁厚要适当增大或者采取保温措施,防止金属液在缓冲过程中降温太多造成流动性变差。对大型离心铸管在浇注系统中增加离心式旋流稳流器,用旋流产生的离心力把密度小的熔渣排到中心位置,再排除出去,使金属液更干净。合理的缓冲、稳流结构可以将铸管夹渣缺陷率降低 50% 以上。

2.4 基于数值模拟的优化方法

数值模拟技术已经成了浇注系统优化设计的重要工具,利用计算流体动力学软件对金属液充型过程进行三维仿真,可以清楚地看到流动形态、速度场、温度场和压力分布情况,预测出出现卷气、紊流、冷隔等缺陷的可能性,进而指导浇注系统结构的调整。常用的模拟软件有 ProCAST、Flow-3D、AnyCasting,设定金属液的物性参数、铸型转速、浇注温度和浇注速度等边界条件后,可以很好地模拟出金属液在旋转铸型中铺展的过程。模拟结果表明,当浇注速度与铸型转速匹配不好时,金属液会产生“爬坡”或者“回弹”,造成壁厚波动,优化浇口角度、浇道截面形状等可以降低金属液沿周向铺展速度差达 30% 以上。数值模拟也可以用来评价各种挡渣结构的效果,从而对缓冲池的几何尺寸和位置进行优化。基于数值模拟的浇注系统优化流程为建立三维模型、网格划分、边界条件设定、求解计算、结果分析,经过多次迭代可以很快得到最优方案,使浇注系统开发周期从数月缩短到数周。数值模拟已经在离心铸造中得到了广泛的使用,并且已经成为浇注系统设计不可少的一种工具。

表 1 影响离心机铸管浇注稳定性的关键因素

影响因素	作用机理	对稳定性的影响	控制措施
浇注速度	决定金属液充型动能和流动形态	过快导致紊流卷气, 过慢引起冷隔	采用定量浇注装置, 控制流速波动 $\pm 5\%$
浇注温度	影响金属液粘度和流动性	过高增加氧化吸气, 过低流动性差	炉前测温, 控制温度范围 $\pm 10^{\circ}\text{C}$
铸型转速	决定离心力场强度和金属液铺展	转速波动导致壁厚不均	变频调速电机, 闭环转速控制
浇道结构	控制金属液流动路径和压力分布	结构不合理引起涡流和飞溅	数值模拟优化, 定期检查磨损
金属液洁净度	夹杂物含量影响流动连续性	夹杂多易堵塞浇道、形成夹渣	炉外精炼、过滤除渣
环境温度	影响金属液在浇注过程中的温降	环境过低加速冷却	车间保温, 铸型预热

3 浇注过程稳定性分析与控制

3.1 影响浇注稳定性的关键因素

浇注过程的稳定性指的是金属液在浇注、充型过程中能保持预定的流动状态、温度范围、充型速度等的一种能力, 受很多因素的影响。表 1 给出了影响离心机铸管浇注稳定性的一些主要因素, 它们的作用机理以及相应的控制方法。从表中可以看出浇注速度、浇注温度、铸型转速、浇道结构这四个因素对浇注工艺影响最大, 它们的变化会引起充型形态的改变。金属液的洁净度及含气量对流动性及充型连续性有影响, 熔渣含量过多会造成浇道堵塞或者出现夹渣缺陷。环境因素车间温度、湿度以及铸型初始温度等都会对浇注稳定产生间接的影响^[2]。除此之外, 浇注操作的重复性, 每次浇注时间间隔、浇包倾斜角度是否一致等都会对批量生产的浇注稳定性造成影响。所以浇注过程的稳定控制要从设备、工艺、操作和环境四个方面一起着手。从统计结果可以看出, 浇注速度波动、浇注温度波动在影响浇注稳定的因素当中所占的比例分别为 35%、28%, 是主要的两个控制点。

3.2 浇注参数(速度、温度、时间)控制

浇注速度、浇注温度、浇注时间这三个浇注过程中最关键的可控参数之间存在着耦合关系, 必须一起考虑才能取得最佳效果。浇注速度要符合先快后稳的要求, 在浇注开始时应该较快, 以克服惯性阻力, 使金属液迅速进入铸型, 并开始铺展; 当金属液处于比较稳定的流动状态时, 要维持恒定的速度直到浇注结束为止。研究表明, 离心铸造球墨铸铁管理想浇注速度为 5~15kg/s, 浇注速度波动范围控制在 $\pm 5\%$ 以内, 过大或者过小的浇注速度都会导致铸型内出现冲击、反弹, 进而造成壁厚不均。浇注温度控制好才能保证流动性好, 凝固组织好。温度过高会加重金属液的氧化和吸气, 造成铸管有气孔和氧化夹杂; 温度过低金属液的流动性变差, 容易产生冷隔和浇注不足。对于球墨铸铁管, 浇注温度一般控制在 1350~1420 $^{\circ}\text{C}$, 不锈钢管要控制在 1500~1580 $^{\circ}\text{C}$ 。浇注时间越短越好, 可以

减小金属液在浇注过程中受到的温度变化以及氧化的影响, 单根铸管的浇注时间控制在 5~15s 内。采用定量浇注、自动控制技术可以达到浇注参数精确重复的目的, 从而大大提高批量生产的稳定性。

3.3 动态稳定性分析方法

动态稳定性分析就是对浇注过程中各种物理量实施实时监测和分析, 从而判定浇注过程是否处在可控的状态之中, 并找出其中的异常波动的原因。常用的动态稳定性分析方法有统计过程控制法、频谱分析法、时间序列建模法等。在离心铸造浇注过程中, 通过在浇口处安装流量传感器、热电偶和压力传感器来实时采集浇注速度、金属液温度和浇注压力等数据, 绘制出控制图, 计算出过程能力指数 Cpk, 当 Cpk 值大于 1.3 时说明过程稳定。频谱分析可以找出浇注速度的周期性波动, 从而确定是由于浇包倾转机构的机械故障引起的。利用时间序列分析法(ARIMA 模型等)可以对浇注温度变化趋势做出预测, 提前对温度超差情况进行预警。高速摄像技术可以用来观察金属液从浇口流出后的形状, 用图像处理算法定量分析射流的连续性、飞溅情况等^[3]。应用之后该企业的浇注过程不合格率由原来的 6.8%降到现在的 2.1%, 每年节省废品损失达 150 万元。实时监测数据可以同制造执行系统相连接, 达成质量追溯及工艺改善的目的。

3.4 稳定性提升技术措施

提高浇注过程稳定性的技术措施可以从设备升级、工艺改进、智能控制和操作规范四个方面着手。设备方面使用定量浇注系统代替人工浇注, 用伺服电机控制浇包倾转角度、速度来调节浇注流量。先进的离心铸造机具有闭环控制的浇注系统, 根据铸型转速、金属液温度自动调节浇注速度, 使充型过程一直保持在最佳状态, 还配有激光液位传感器, 对铸型内的金属液液位进行实时监测, 防止溢流或者浇注不足^[4]。工艺上制定出标准浇注参数表, 根据铸管规格、材质、铸型状态选合适的浇注速度、温度、时间, 及时检查、维护浇注系统以保证不结渣、无残余, 排

除废口。从智能控制方面,创建浇注过程数据库,用机器学习算法对历史数据加以剖析,形成浇注参数同铸管质量间的预测模型,达成浇注参数的自我改善。采用 BP 神经网络浇注参数预测模型,浇注质量预测准确率可以达到 92% 以上,给工艺调整提供可靠的依据。就操作规范而言,对浇注工人开展系统培训,确定浇包预热温度、浇注姿势、浇注节奏等操作规定,减小人为因素造成的波动。

4 结语

浇注系统结构改进和过程稳定性的控制,属于改善离心机铸管质量的中心技术途径。本文对浇注系统在铸管质量中所起的作用进行了系统的分析,从浇道尺寸和比例、浇口位置和数量、缓冲和稳流结构以及数值模拟方法四个方面论述了结构优化的设计方法。在此基础上,对影响浇注稳定性的主要因素进行了详细的分析,并且对浇注参数的控制、动态稳定性分析的方法以及提高稳定性技术措施进行了研究。经过研究得知,利用定量浇注、数值模拟改良、闭环控制等一系列先进技术,能极大提升金属液的充型稳定状况,削减铸造产生的缺陷,进而改进成品率。未

来工业互联网、人工智能技术的融合应用将会使得浇注系统越来越智能、自适应,给离心铸造行业的发展注入新的活力。

[参考文献]

- [1]李德臣,张继东.离心铸造浇注系统的设计与优化[J].铸造技术,2016,37(8):1689-1693.
- [2]刘宏伟,陈玉祥.数值模拟在离心铸造浇注系统设计中的应用[J].特种铸造及有色合金,2019,39(5):512-516.
- [3]赵永刚,王立军.离心铸造过程中浇注参数对铸管质量的影响[J].现代铸铁,2017(4):45-49.
- [4]孙晓东,刘振华.基于 Flow-3D 的离心铸造充型过程模拟[J].铸造设备与工艺,2020(3):18-22.

作者简介:黄鹏(1992—),毕业于武汉科技大学电气工程及其自动化专业,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;马思远(1996—),毕业于安阳工学院机电一体化专业,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。