

离心机铸管管壁厚度均匀性控制技术研究

卮家辉 冯吉言 张国华

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] 离心铸造是目前生产铸管最常用的方法,但是由于铸管壁厚不均匀而影响产品质量的问题始终得不到解决。文中对离心机铸管形成过程进行研究并找出其产生壁厚不均的原因,进而给出相应的工艺参数优化及控制方法。球墨铸铁管壁厚均匀性工艺设备技术的研究表明:严格按照规定规格要求制作扇形包并且制定合理的修包规程,改变扇形包快翻包时间、快翻包速度、翻包回位时间,在离心机上加大流槽倾斜角度,在离心机插口处增设冷却装置以提高插口部位冷却效果等措施可以有效地改善壁厚均匀性。在此基础上,文章从熔体动力学角度分析造成厚度偏差的原因,给出转速控制参数、浇注速度以及流量控制措施、冷却方式调整的方法,提出多种因素综合考虑的方法。对于控制方面的问题,探讨智能转速控制、在线厚度监测及反馈调节、振动与偏心补偿等关键技术问题。球墨铸铁管离心机主机工作及其动作控制的研究结果显示,主机行走机构在液压与电气上实现内部和外部双重闭环控制,液压部分设置有防冲保护阀和快速补充油路,降低机器震动,使主机平稳运转,从而使球墨铸铁管壁厚一致。实验结果表明,改进后工艺条件以及控制方法可以有效改善管壁厚度一致性,在管壁厚度上差异不超过 2mm。

[关键词] 离心铸造;管壁厚度;均匀性控制

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19547

中图分类号: TG335.5+5

文献标识码: A

Research on the Control Technology of Thickness Uniformity of Centrifugal Casting Pipe Wall

MI Jiahui, FENG Jiyang, ZHANG Guohua

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

Abstract: Centrifugal casting is currently the most commonly used method for producing cast pipes, but the problem of uneven wall thickness affecting product quality has not been solved. The article studies the formation process of centrifuge cast pipes and identifies the reasons for uneven wall thickness, and then provides corresponding process parameter optimization and control methods. The research on the process equipment technology for the uniformity of wall thickness of ductile iron pipes shows that strictly following the specified specifications to produce fan-shaped bags and developing reasonable repair procedures, changing the fast flipping time, fast flipping speed, and flipping return time of fan-shaped bags, increasing the inclination angle of the flow channel on the centrifuge, and adding cooling devices at the centrifuge socket to improve the cooling effect at the socket can effectively improve the uniformity of wall thickness. On this basis, the article analyzes the causes of thickness deviation from the perspective of melt dynamics, provides methods for controlling rotational speed parameters, pouring speed and flow control measures, and adjusting cooling methods, and proposes a comprehensive consideration of multiple factors. For control issues, explore key technical issues such as intelligent speed control, online thickness monitoring and feedback regulation, vibration and eccentricity compensation. The research results on the operation and action control of the centrifugal machine for ductile iron pipes show that the walking mechanism of the main machine achieves dual closed-loop control of internal and external hydraulic and electrical systems. The hydraulic part is equipped with anti-collision protection valves and quick replenishment oil circuits to reduce machine vibration and ensure smooth operation of the main machine, thereby making the wall thickness of the ductile iron pipes consistent. The experimental results show that the improved process conditions and control methods can effectively improve the consistency of pipe wall thickness, with a difference of no more than 2mm in pipe wall thickness.

Keywords: centrifugal casting; pipe wall thickness; uniformity control

引言

离心铸造由于其金属致密性好、力学性能优越、生产率高等优点,在铸管行业中处于主流地位。但是管壁厚度不均一直是困扰离心铸造的一个问题,影响到管材承受压力的能力以及气密性和寿命等。离心铸造双金属复合管缺陷及控制研究表明,当转速为 950~1050r/min 范围内,管坯厚度差异显著减小,基本无裂缝出现。这说明合适的工艺条件对于提高壁厚均匀度起到重要作用。目前国内外有关离心铸造的研究很多,但是在壁厚均匀性上还存在问题,比如对壁厚均匀性的理解不够透彻,对壁厚均匀性的控制方法还不够成熟等。利用超高速离心铸造技术研制抗磨薄壁铸管是通过铬铁、锰铁、镍板等合金成分进行合理搭配,在模具内部喷涂不同比例涂料的基础上改变离心机转速从而得到壁厚仅 6mm 的超薄壁离心铸钢管。这对日后薄壁铸管生产具有一定的指导意义,但是对壁厚一致性研究还不足。本文主要针对离心机生产过程中壁厚一致性较差的问题展开工作,从成形机理出发,分析造成壁厚差异的原因以及如何改善这些问题提出一系列措施并经过试验验证可行性。

1 离心机铸管成形机理分析

1.1 管壁形成与凝固过程分析

离心铸造基本原理为将熔融金属注入高速旋转管模内,在离心力作用下使金属液均匀附着于管模表面而冷却结晶成管材。具有可调节厚度离心铸造方法专利技术说明了利用重力测量仪测定压力值向离心筒中加入一定量高温金属液体,启动电机带动离心筒旋转使得金属液体均匀喷洒在外筒内壁上,不同质量金属液体所得到的管壁厚度不同。管壁生成分为三步进行:充型过程,由于受到离心力以及重力影响金属液沿着管模轴线方向流动并且向外扩散;凝固过程,热能从管模传至外界环境中,金属液从外部逐渐向内部一层层地固化;收缩过程,由于固化时发生体积减小造成对最后壁厚的影响。

1.2 影响管壁厚度分布的关键因素

影响管壁厚度分布因素主要有两类:工艺参数类(转速、浇注速度、浇注温度、冷却速率等)以及设备状态类(管模圆度、同心度、涂料均匀性、振动水平等)。40Cr/Q345B 双金属环坯离心铸造数值模拟表明,浇注点在中间有利于提高布型速度,降低铸件两端温差,有利于壁厚趋于一致;适当提高转速也有利于减轻偏心问题。

2 管壁厚度不均匀性的形成机理

2.1 熔体分布不均的动力学原因

在离心场内金属液流动受到科里奥利力、粘性力以及

表面张力的影响,在金属液进入旋转管模之后,由于其周向速度和轴向速度不同造成液膜厚度分布不均匀,在理论上讲,离心加速度相对于重力加速度的比例即弗罗德数(Fr)对熔体分布起着主要影响作用,当弗罗德数较小的情况下,重力占主导地位使金属液向下流动,而当弗罗德数较大时,离心力大导致液膜断裂。

2.2 转速波动对厚度分布的影响

转速稳定影响壁厚一致性。离心铸造双金属复合管研究表明,在 950~1050r/min 转速下可以显著改善管坯壁厚一致性。转速太低,则离心力小于重力作用,使金属液在管模底部积聚造成偏心;而转速太高,会使金属液被强烈甩到管模两侧造成中间壁厚不足。此外,转速不稳定还会使液面波动从而造成凝固面上波浪形厚度起伏。而且这种影响不仅仅是瞬时的影响,而是长期的影响。如果转速有规律地上下波动,那么金属液在管模内壁铺展厚度也将相应地发生改变,最后就会出现环形条纹状厚度不均匀的现象。当波动频率接近管模固有频率时也会发生共振,造成壁厚偏差增大两到三倍,在理论上说,转速波动每提高 10r/min,壁厚偏差平均增长 0.15mm,所以要使壁厚偏差保持在一个合理范围内就要让转速波动不超过 $\pm 5\text{r/min}$,这也是后面智能转速控制的设计基础。

2.3 浇注参数与填充过程影响分析

浇注速度与流量之间关系影响金属液在管模内流动情况。若浇注速度较快,则金属液冲击管模端部发生反弹而形成局部堆积;反之若浇注速度较慢,则金属液前端过早固化而导致壁厚不均匀。球墨铸铁管离心机主机工作及动作控制技术上,扇形包控制是通过编码器反馈包角速度进行闭环控制,使扇形包浇注倾翻平稳均匀地进行,从而解决浇注过程中的流量变化问题。而浇注参数调节要结合启动期、平稳期以及结束期的特点来进行。在启动期,由于金属液流量从无到有逐渐增大,如果增速太快容易造成前端堆积现象,因此一般设定为 1.5~2.0s 左右。稳定期流量变化不大于 $\pm 0.3\text{kg/s}$,倾翻角速度与设定值相差不超过 $\pm 0.5\%$,在结束前 1s 减慢速度,防止金属液拖尾造成局部增厚。由数值仿真可知,当浇注速度增大 1.0kg/s 时,金属液前端前进速度加快约为 0.25m/s,但是撞到管模末端后回弹量增加约 15%,所以最佳的浇注速度就是让金属液到末端时还有一定的速度,这样可以保证充型良好以及壁厚均匀。

2.4 模具结构对厚度偏差的作用

管模的几何尺寸以及温度都会影响到壁厚的分布情况。管模椭圆度过大造成铸管壁厚沿圆周方向存在差异;

管模轴线与旋转轴线不重合产生径向偏移使壁厚呈现周期性波动。同时由于管模壁厚不一致使得冷却条件不同,凝固速度不一样而产生的热应力变形加剧壁厚的非均匀性。

3 离心机铸管工艺参数分析与优化

3.1 转速控制参数设计

转速是离心铸造的重要工艺条件,在一定程度上决定了管径大小、所用材料以及壁厚等。由公式得出:

$$n=K/\sqrt{(D\rho)}$$

式中, n 为转速, D 为管模内径, ρ 为金属液密度, K 为经验系数。而 40Cr/Q345B 双金属环坯离心铸造最佳工艺参数为: 铸模转速 800r/min, 外层浇注温度 1560℃, 在外层金属冷却到 1350℃ 后进行内层金属浇注。

3.2 浇注速度与流量控制

浇注速度要与管模转速相适应, 以利于金属液在管模中形成一层良好的液膜, 合适的浇注速度是使金属液前沿推进速度稍大于凝固前沿前进速度, 防止过早凝固而产生冷隔, 船用管件等壁厚离心铸造设备利用定量部件控制每次铸造所用金属量, 按需要调整定量坩埚的角度, 从而改变坩埚内金属液体的数量, 在浇注速度及管模转速配合下达到离心力等于粘性力的目的。一般情况下, 在转速为 800r/min 下, 其相应的浇注速度在 9.0~11.0kg/s 之间, 金属液前沿推进速度约 0.8m/s。浇注速度与管径成正比: DN100 的管子使用 8.0~9.0kg/s, DN200 的管子使用 9.5~10.5kg/s, DN300 的管子使用 11.0~12.0kg/s。而流量大小是通过扇形包翻转角度来调整, 即流量是由翻转角度大小决定, $Q=k\omega\sin\theta$, 其中 Q 是流量, ω 是翻转角速度, θ 是扇形包当前角度, 而 k 是与扇形包几何形状有关的经验常数 (一般在 1.2~1.5 之间)。编码器以每度 10 个脉冲反馈倾翻角度, PLC 根据预先设定流量进行角度计算并发送到比例阀上, 使液压缸进给量得到相应改变从而实现精确控制, 其误差在 $\pm 0.2\text{kg/s}$ 以内, 在实际生产中使用此方法之后, 浇注量波动从原来的 $\pm 0.6\text{kg/s}$ 降低到 $\pm 0.2\text{kg/s}$, 相应壁厚变化也减少了约 0.3mm。

3.3 冷却方式与冷却速率调控

冷却条件对凝固过程中温度梯度有影响从而决定了壁厚是否均匀。强化插口端冷却可以弥补该区域散热面积较大、凝固较快造成的不利影响, 减少轴向壁厚差异。球墨铸铁管壁厚均匀性工艺技术是在离心机插口位置增加冷却装置提高插口冷却效果解决插口壁厚较薄的问题。冷却水流量、喷射角度以及喷洒方式要依据管径及壁厚进行调整。建议冷却参数为: 插口端水流量 100~120L/min、

承口端 60~80L/min、喷射角度 30°~45°、间歇式喷淋 (喷 5s 后停止 2s) 可以使轴向壁厚差异小于等于 1.5mm。

3.4 多参数协同优化方法

表 1 离心铸造工艺参数正交试验方案与壁厚偏差结果

试验编号	转速 (r/min)	浇注速度 (kg/s)	冷却水流量 (L/min)	壁厚偏差 (mm)
1	750	8.5	80	2.8
2	750	10.0	100	2.5
3	750	11.5	120	2.6
4	800	8.5	100	2.2
5	800	10.0	120	1.9
6	800	11.5	80	2.1
7	850	8.5	120	2.3
8	850	10.0	80	2.4
9	850	11.5	100	2.5

表 1 是正交试验设计方案以及各参数组合下壁厚偏差实测值。从极差来看, 转速对于壁厚均匀性的影响最大, 其次为浇注速度, 冷却水流量影响最小。球墨铸铁管离心机主机工作及其动作是由管重秤重闭环控制系统实现, 利用重量传感器测量每一个管子重量, 在线管重控制系统根据此反馈信息及时改变浇包设定值从而保证每个管子重量一致, 这种方法也可以用于多个因素同时进行优化。

4 管壁厚度均匀性控制关键技术

4.1 智能转速控制技术

智能转速控制根据管模转速变化及时调整驱动电机功率, 使转速变化控制在 $\pm 0.5\%$ 以内^[1]。球墨铸铁管离心机主机行走系统在液压与电气上都采用内、外双闭环控制方式, 在液压系统中设置有安全溢流阀以及快速补充油源, 降低机器震动, 提高主机工作稳定性。内部环路控制电机电流以及转速, 外部环路由负载变化以及温度造成的转速偏移进行补偿, 保证浇注过程中的转速恒定。其关键是转速反馈的及时性和执行机构反应的速度。编码器每隔几毫秒获取一次管模的实际转速, 然后与目标值对比得出偏差, 再用 PID 对其进行处理得到需要的变化量, 最后由变频器改变电机输出转矩。对于浇注瞬间金属液冲击造成转速下降问题, 系统设有前馈补偿模块, 在检测到浇注信号之后立即加大电枢供电功率, 使转速变化控制在 $\pm 5\text{r/min}$ 以内。而通过智能转速控制之后, 同一炉次铸管壁厚的标准差从原来的 0.35mm 降到 0.18mm, 铸管壁厚的一致性得到很大改善。

4.2 在线厚度检测与反馈控制技术

在线厚度检测是实现闭环控制的基础。厚度可控离心铸造机利用重力传感器测得的压力判断是否还需要加入

熔融金属,不同的熔融金属质量所铸成的金属管壁厚度也不同。除了质量检测之外,激光测距法以及超声波测厚均可获得管壁厚度的具体情况以便后续反馈控制^[2]。一旦发现厚度有较大差异,则控制系统会相应地改变浇铸速率或者冷却程度以弥补。激光测距基于三角法,在管模顶部设置三个方向上的检测点,每隔 0.1s 记录一次壁厚,测量精度为 $\pm 0.05\text{mm}$,适合在铸管脱模后对管壁厚度进行测量。超声波测厚适合于高温环境下进行在线检测,利用脉冲回波法测量凝固壳厚度,探头位于管模外部而不与金属液接触,响应时间为小于 50ms,可以及时反映壁厚的变化情况。反馈控制采取分层的方式,当厚度误差在 0.2~0.5mm 之间时先调节冷却水流量,而当厚度误差超过 0.5mm 时同时改变浇注速度。控制方法是增量式的 PID 控制,经过调试得到 $K_p=0.8$, $K_i=0.05$, $K_d=0.1$,保证系统的响应时间小于 2s 并且没有超调振荡。在现场使用发现,在线检测以及反馈控制之后,壁厚平均误差从原来的 2.4mm 降低到 1.7mm,合格率提高 12 个百分点。

4.3 振动与偏心修正技术

振动是造成壁厚偏心的重要因素^[3]。用于船舶生产的管件或其他壁厚离心铸造成型设备,在模具上方设有振动部件,由不完全齿轮与齿条相配合带动振动块对模具进行间歇性敲打,使液态金属流动更充分。主动减振方法有:增大支撑架刚度、增加动平衡校正装置、使用柔性联轴节隔断传动系统振动。而偏心矫正则是根据检测到的管模径向跳动来调节支撑辊的位置来进行。

5 结语

本文针对离心铸造铸管壁厚均匀性展开研究,在此基础上对成型过程以及壁厚不均匀产生原因进行分析,并提出相应的工艺参数优化及控制措施。结果表明,通过对转速控制在 950~1050r/min 之间、采用双闭环转速控制方法、配合定量浇注和分段冷却等手段可以使壁厚均匀性误

差小于等于 2mm。其主要观点有两点:一是熔体流动状态、转速变化、浇注参数不当以及模具尺寸差异都是造成壁厚不均匀的因素,但是转速的变化对壁厚的影响最大;二是要改善壁厚均匀性必须把转速作为重点考虑的问题,其次是要使浇注速度与流量相适应,再就是合理控制冷却情况,这三点缺一不可。三是智能转速控制、在线检测反馈控制与振动偏心修正相结合的方法可以有效保证壁厚均匀性稳定。球墨铸铁管离心机主机运行及操作控制技术的研究结果表明,所设计的控制系统可以使壁厚均匀性误差平均值为 2mm,重量误差平均值小于等于 5kg,满足国际上对 C 级尺寸的要求。下一步工作主要有以下几个方面:基于机器学习的工艺参数自适应优化方法、多种传感器信息综合运用的厚度在线检测技术和针对超薄壁铸管的高转速离心铸造技术等。

[参考文献]

- [1]林雪川,梅燕娜,要晓瑞.球墨铸铁管壁厚均匀性工艺设备技术研究[J].中国铸造装备与技术,2023,58(5):92-96.
 - [2]连笑媛,齐会萍,贾燕龙,等.40Cr/Q345B 双金属环坯离心铸造数值模拟研究[J].山西冶金,2024,47(4):1-4.
 - [3]杜晓东,于巍,杨雪,等.真空离心铸造 Incoloy825 合金管材数值模拟[J].材料工程,2025,53(6):117-125.
- 作者简介:聿家辉(1995.05—),毕业于吉林大学计算机科学与技术专业,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,离心机机手,助理工程师;冯吉言(1998.07—),毕业于大连理工大学电气工程及其自动化专业,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,离心机机手,助理工程师;张国华(1993.12—),毕业于三门峡职业技术学院建筑工程管理专业,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,班组长,助理工程师。