

# 离心铸造工艺参数对球墨铸铁管壁厚均匀性的影响

杜鹏亮 王景

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]**球墨铸铁管凭借其优良的力学性能、耐腐蚀性能成为工矿企业管网、市政给排水等领域的供水管材首选品类。伴随着市场对于球墨铸铁管质量标准的持续升级,壁厚的均匀性是评估管材耐久性、承载性能以及成本效益的关键指标。离心铸造技术工艺参数的精准调控直接影响铁液在管膜内的分布、凝固特性以及流动过程,对管壁厚度的均匀性具有决定性的影响。首先对离心铸造过程中核心工艺参数对球墨铸铁管壁厚均匀性的影响机制进行了系统性的分析,并根据实际生产过程,持续优化工艺参数,进而提升球墨铸铁管壁厚均匀性。

**[关键词]**离心铸造;球墨铸铁管;工艺参数;壁厚均匀性;影响机制

DOI: 10.33142/ec.v9i2.19053

中图分类号: TG245

文献标识码: A

## The Influence of Centrifugal Casting Process Parameters on the Uniformity of Wall Thickness of Ductile Iron Pipes

DU Pengliang, WANG Jing

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

**Abstract:** Ductile iron pipes have become the preferred category of water supply pipes for industrial and mining enterprise pipelines, municipal water supply and drainage, and other fields due to their excellent mechanical properties and corrosion resistance. With the continuous upgrading of quality standards for ductile iron pipes in the market, the uniformity of wall thickness is a key indicator for evaluating the durability, load-bearing performance, and cost-effectiveness of pipes. The precise control of process parameters in centrifugal casting technology directly affects the distribution, solidification characteristics, and flow process of molten iron in the pipe film, and has a decisive impact on the uniformity of pipe wall thickness. Firstly, a systematic analysis was conducted on the influence mechanism of core process parameters on the wall thickness uniformity of ductile iron pipes during centrifugal casting. Based on the actual production process, the process parameters were continuously optimized to improve the wall thickness uniformity of ductile iron pipes.

**Keywords:** centrifugal casting; ductile iron pipe; process parameters; uniformity of wall thickness; influence mechanism

### 引言

在球墨铸铁管规模生产的过程中,离心铸造技术因其独特的成型特点在大规模工业化生产过程中占据着主要地位。该技术的基本原理是通过利用离心机高速旋转而产生的离心力,促使熔融状态的球墨铸铁液沿着管模内壁实现均匀铺展、沉积、冷却凝固,最终形成球墨铸铁管,可以有效减少铸造缺陷,提高管材的力学性能。但是在具体的生产过程中,容易受到多种工艺参数的影响而导致壁厚的均匀性出现偏差,不仅会造成铁液的浪费,而且导致管材的局部强度无法达到标准的设计要求,在后续的使用过程中容易发生爆管等一系列重大安全隐患。鉴于此,研究离心铸造工艺参数对球墨铸铁管壁厚均匀性的影响对于优化实际生产过程中的工艺参数、确保安全生产、提高产品质量具有重要的意义。

### 1 离心铸造工艺原理与壁厚均匀性评价标准

#### 1.1 离心铸造工艺原理

球墨铸铁管离心铸造主要用卧式离心法,核心过程分

三个阶段:铁液浇注:合格球墨铸铁液经熔炼、球化、孕育处理后,匀速注入高速旋转的管模;离心成型:管模高速旋转产生离心力( $F=m\omega^2$ ,  $m$ 为铁液质量,  $r$ 为旋转半径,  $\omega$ 为角速度),使铁液克服重力与黏性阻力,沿管模内壁均匀铺展成液膜;冷却凝固:铁液在离心力作用下紧贴管模内壁冷却凝固,依次形成外层柱状晶区和内层等轴晶区,最终成均匀壁厚管材。

离心力大小由离心机转速、旋转半径等决定,直接影响铁液铺展与液膜均匀性;铁液流动性、冷却速度等也影响液膜稳定性与凝固过程,进而影响壁厚均匀性,这些因素均与工艺参数相关。结合国际标准(ISO2531)和国内规范,以壁厚偏差为核心评价球墨铸铁管壁厚均匀性,同时参考轴向和径向差异。本文评价标准:以设计壁厚为基准,轴向壁厚偏差 $\leq \pm 10\%$ ,径向 $\leq \pm 5\%$ ;任意截面最大与最小壁厚差不超过设计壁厚15%,视为合格。为直观呈现壁厚均匀性的评价指标,制定评价标准表,见表1:

表 1 壁厚均匀性的评价指标

评价指标	合格等级(一级)	合格等级(二级)	不合格
轴向壁厚偏差	≤±5%	±5%~±10%	>±10%
径向壁厚偏差	≤±3%	±3%~±5%	>±5%
最大与最小壁厚差/设计壁厚	≤10%	10%~15%	>15%

注：设计壁厚以 DN100~DN1000 规格球墨铸铁管为参考，常规设计壁厚为 6~15mm。

## 2 核心离心铸造工艺参数对球墨铸铁管壁厚均匀性的影响

离心铸造过程中，影响球墨铸铁管壁厚均匀性的工艺参数众多，其中离心机转速、浇注温度、浇注速度、管模预热温度、涂料参数是最核心的五大参数，各参数相互影响、相互制约，共同决定了铁液的流动、铺展和凝固过程，进而影响壁厚均匀性。以下分别对各参数的影响机制、影响规律进行详细分析，并结合图表呈现相关数据。

### 2.1 离心机转速的影响

离心机转速是影响球墨铸铁管壁厚均匀性的首要因素，转速过低，离心力不足，铁液难均匀铺展，出现“沉底”，导致径向、轴向壁厚偏差大；转速过高，离心力过大，液膜过薄、铁液飞溅，管模振动加剧，凝固速度异常，均影响壁厚均匀性，且增加管模负荷；转速波动大，离心力周期性变化，也会造成壁厚偏差。因此，需将转速控制在合理范围并保证稳定（波动误差≤±2r/min）。结合理论与试验，DN100~DN1000 规格管材（常规设计壁厚 6~15mm），最优转速范围 800~1200r/min，低于 800r/min，壁厚均匀性随转速升高而提升；800~1200r/min，壁厚均匀性最佳；高于 1200r/min，壁厚均匀性恶化。为直观呈现离心机转速对壁厚均匀性的影响，绘制转速与壁厚偏差的关系曲线图如图 1：

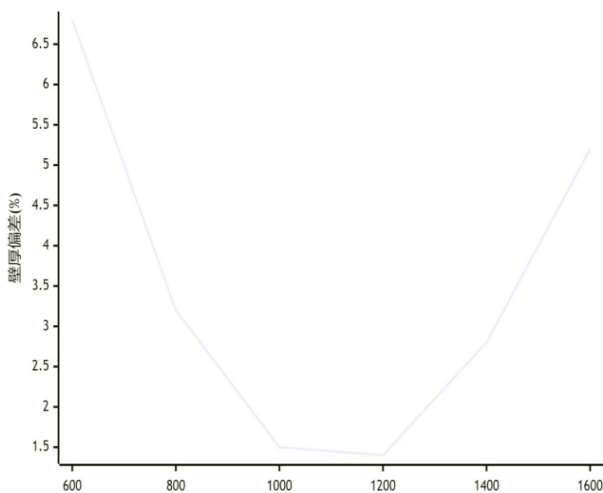


图 1 离心机转速对球墨铸铁壁厚偏差的影响

注：该曲线以 DN400、设计壁厚 8mm 的球墨铸铁管为例，横

坐标是离心机转速 (r/min)，纵坐标为平均壁厚偏差 (%)，呈现转速与壁厚均匀性的核心关系。此外，离心机转速与离心加速度对应，将离心加速度控制在 60~100g (g 为重力加速度)，可保铁液均匀铺展且避免管模受力过大，此对应的转速范围与最优范围一致，可辅助调控转速。

### 2.2 浇注温度的影响

浇注温度是影响铁液流动性与凝固速度的关键参数，通过改变黏性、表面张力及凝固时间，间接影响铁液在管模内的铺展与分布，进而影响球墨铸铁管壁厚均匀性。温度越高，铁液流动性越好，越易均匀铺展、减少偏差；但过高会延长凝固时间，导致二次流动、局部聚集，增加收缩量，出现缩孔缩松等缺陷，影响均匀性。温度过低，铁液流动性差，难均匀铺展，易出现局部偏薄、浇不足等问题，且凝固过快，补缩作用减弱，加剧不均匀性，还易提前凝固形成冷隔、夹渣等缺陷。此外，浇注温度对承插口部位壁厚影响更显著，因该部位结构特殊，温度波动会致铁液分布不均。球墨铸铁管浇注温度最优范围为 1380~1450℃，低于 1380℃时，温度升高，均匀性提升；1380~1450℃时，均匀性最佳；高于 1450℃时，均匀性恶化且缺陷概率增加。

绘制浇注温度与壁厚均匀性合格率先的关系曲线图，清晰呈现浇注温度对壁厚均匀性的影响，见图 2、表 2：

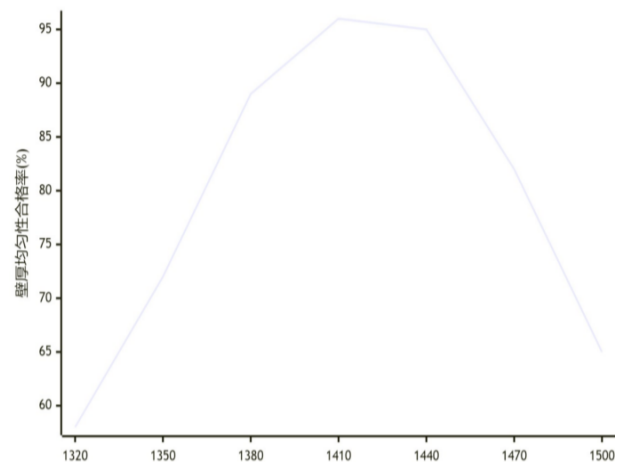


图 2 浇注温度对球墨铸铁管壁厚均匀性合格率先的影响

注：该曲线以 DN500、设计壁厚 10mm 的球墨铸铁管为参考，横坐标为浇注温度 (°C)，纵坐标为壁厚均匀性合格率先 (%)。

表 2 不同温度下承插口与直管段的壁厚偏差对比

浇注温度 (°C)	直管段壁厚偏差 (%)	承口壁厚偏差 (%)	插口壁厚偏差 (%)
1350	±4.2	±3.8	±5.3
1400	±1.8	±2.1	±2.3
1450	±2.0	±4.5	±2.1

注：此表以 DN400、设计壁厚 8mm 的球墨铸铁管为参照，偏差值为 3 组试验平均值。

### 2.3 浇注速度的影响

浇注速度影响铁液填充与液膜形成,是轴向壁厚均匀性的核心参数,离心铸造需等角速度、等流量匀速填充。浇注过快,铁液易聚集、冲击涂料致脱落、飞溅,破坏均匀性;浇注过慢,铁液提前凝固,出现冷隔等缺陷,且铺展有限致浇不足。此外,浇注速度与离心机转速、主机行走速度等的配合精度也影响壁厚均匀性。DN100-DN1000规格球墨铸铁管,浇注速度最优范围 0.5-1.5kg/s,低于 0.5kg/s,均匀性随速度升高而提升;0.5-1.5kg/s,均匀性最佳;高于 1.5kg/s,均匀性恶化。可绘制关系曲线图并补充最优范围表直观呈现浇注速度对壁厚均匀性的影响,见图 3、表 3:

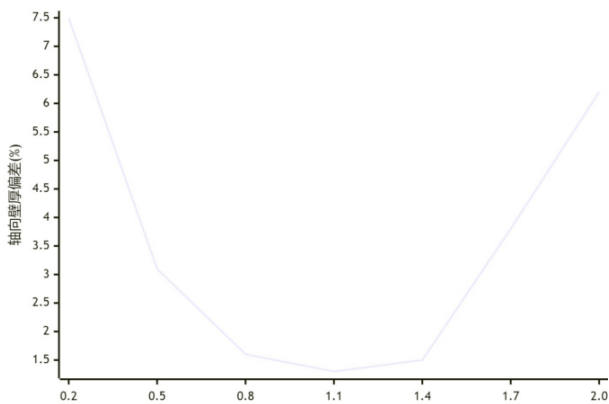


图 3 浇注速度对球墨铸铁管轴向壁厚偏差的影响

注:该曲线以 DN600、设计壁厚 12mm 的球墨铸铁管为参考,横坐标为浇注速度 (kg/s),纵坐标为轴向壁厚偏差 (%)。

表 3 不同规格管材的最优浇注速度范围表

管材规格 (DN)	设计壁厚 (mm)	最优浇注速度范围 (kg/s)
100~300	6~8	0.5~0.9
300~600	8~12	0.9~1.2
600~1000	12~15	1.2~1.5

注:该表为常规工况下的最优浇注速度范围,在具体的实际生产过程中需要紧密围绕离心机转速、浇注温度进行适当的调整。

### 2.4 管模预热温度的影响

管模预热温度对铁液的冷却速度以及凝固过程有着直接的影响,进而影响铁液的铺展效果和壁厚均匀性。管模预热核心是减小铁液与管模内壁温差,避免铁液瞬间凝固、保证均匀铺展,减少热应力防止变形,确保壁厚均匀。预热温度过低,铁液易瞬间凝固、流动性下降,出现冷隔等缺陷,涂料层易脱落,加剧壁厚偏差;预热温度过高,铁液冷却慢、易二次流动,影响球化效果、增加管模热疲劳损伤,间接影响壁厚均匀。此外,预热不均匀会使铁液冷却速度和凝固时间不同,导致壁厚偏差,轴向受影响显著。管模常用 45 钢,结合球墨铸铁凝固特性,其预热温度最优范围 200~300℃。具体影响规律:低于 200℃,随

温度升高温差减小、冷却合理,铁液铺展改善,壁厚偏差减小、均匀性提升;200~300℃,铁液冷却、凝固适宜,能均匀稳定凝固,壁厚偏差最小、均匀性最佳;高于 300℃,随温度升高冷却过慢、二次流动加剧,壁厚偏差增大、均匀性恶化,且管模热疲劳损伤风险上升。可绘制预热温度与径向壁厚偏差关系曲线图,补充预热温度与涂料结合强度关系表以清晰呈现影响,见图 4、表 4:

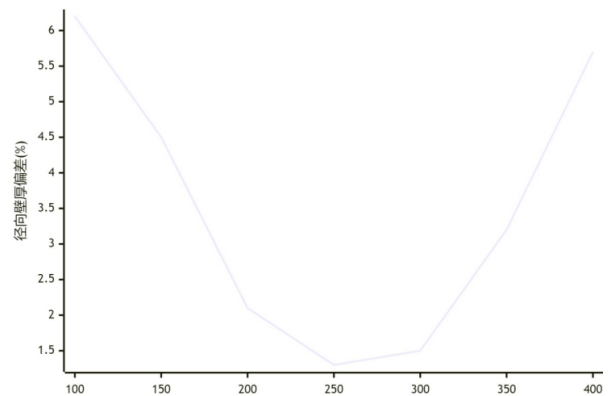


图 4 管模预热温度对球墨铸铁管径向壁厚偏差的影响

注:以 DN300、设计壁厚 8mm 的球墨铸铁管为参考,绘制曲线,横坐标为管模预热温度 (℃),纵坐标为径向壁厚偏差 (%)。

表 4 管模预热温度与涂料结合强度的关系

管模预热温度 (℃)	涂料结合强度 (MPa)	涂料脱落率 (%)
150	1.2	8.5
250	2.8	1.2
350	2.5	2.1

注:涂料为锆英粉+水玻璃复合型,厚度 0.3~0.5mm,脱落率=浇注后脱落面积/管模内壁面积。

### 2.5 涂料参数的影响

离心铸造球墨铸铁管管模内壁涂料作用为隔热、润滑、脱模及调节铁液冷却速度,其参数(厚度、黏度、成分)影响铁液冷却与铺展,进而影响壁厚均匀性。涂料厚度是核心参数,过厚使铁液冷却慢、易二次流动致局部壁厚偏厚,还易脱落开裂混入铁液形成夹渣,且厚度不均会使冷却速度不同致壁厚偏差;过薄则隔热不足使铁液瞬间凝固、润滑不够致脱模困难和表面划伤,还易被冲刷脱落影响冷却稳定性。涂料黏度也有影响,过大涂抹不均致冷却不均、增加流动阻力;过小易流淌、附着力不足易脱落。涂料成分影响隔热和润滑性能,锆英粉隔热优于石英砂,锆英粉+水玻璃复合涂料性能稳定利于提升均匀性,杂质多会影响性能。结合工艺,涂料参数最优范围:厚度 0.3~0.5mm,黏度 15~25s(涂-4 杯),锆英粉+水玻璃复合(锆英粉 60%~70%,水玻璃 20%~30%)。具体规律:低于 0.3mm 随厚度增加均匀性提升;0.3~0.5mm 均匀性最佳;高于 0.5mm 均匀性恶化且脱落风险增加。可绘制涂料厚度与壁

厚均匀性偏差关系曲线图, 补充参数最优范围汇总表, 见图 5、表 5:

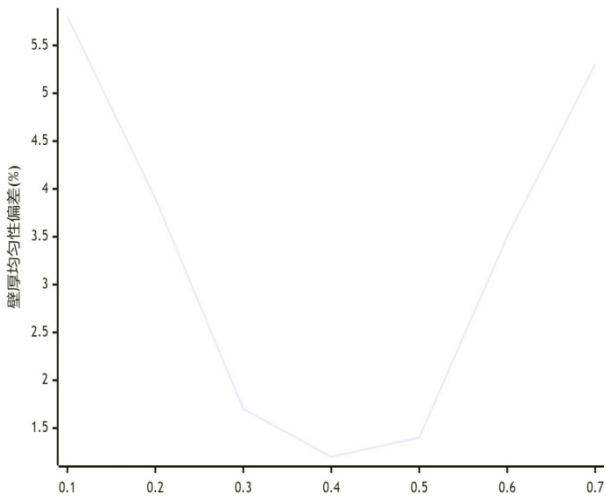


图 5 涂料厚度对球墨铸铁管壁厚均匀性偏差的影响

注: 该曲线以 DN400、设计壁厚 8mm 的球墨铸铁管为参考绘制曲线, 横坐标为涂料厚度 (mm), 纵坐标为平均壁厚均匀性偏差 (%)。

表 5 涂料参数最优范围

涂料参数	最优范围	影响说明
涂料厚度	0.3~0.5mm	影响铁液冷却速度和铺展效果, 厚度不均会导致壁厚偏差
涂料黏度	15~25s (涂-4 杯)	影响涂料涂抹均匀性和附着力, 黏度异常易导致涂料脱落
涂料成分	锆英粉 60%~70%+水玻璃 20%~30%	保证隔热和润滑性能, 提升冷却速度均匀性

### 3 工艺参数的协同作用与优化原则

离心铸造中, 各工艺参数相互影响制约, 协同决定球墨铸铁管壁厚均匀性, 如离心机转速与浇注速度、浇注温度与管模预热温度、涂料参数与其他参数等均需协同匹配, 主机轴向行走速度与扇形包翻转速度协同控制也关键。工艺参数优化原则包括: 以离心机转速和浇注速度为核心优先优化; 优化时同步调整相关参数确保协同匹配; 保证各参数稳定减少波动; 围绕管材的规格和设计壁厚实施针对性的优化; 在保证均匀性前提下同时也要充分考虑经济性, 在满足标准要求的前提下, 对涂料的厚度进行合理的控制, 控制管模的预热温度以及浇筑的温度, 以降低能耗与生产成本。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

本文系统分析了离心铸造核心工艺参数得出以下结论:

(1) 离心机转速对壁厚均匀性影响最为显著, 转速过高会加剧管模振动和铁液飞溅, 转速过低会导致铁液铺展不均, 最优转速范围为 800~1200r/min。

(2) 温度过高会延长凝固时间, 浇注温度过低会降低铁液流动性, 均会影响铁液铺展和凝固, 导致壁厚不均, 浇注温度最优范围为 1380~1450°C。

(3) 浇注速度过慢会导致冷隔和浇不足, 速度过快会导致铁液聚集和涂料脱落, 因此, 需与管材规格匹配, 最优范围为 0.5~1.5kg/s。

(4) 管模预热温度的最优范围为 200~300°C, 温度过低会导致铁液瞬间凝固, 温度过高会延长凝固时间, 且会影响管模寿命, 均会影响壁厚均匀性; 同时需保证管模预热均匀, 避免局部温度偏差。

(5) 涂料参数异常会影响铁液冷却速度和铺展效果, 对厚壁的均匀性产生影响。涂料参数的最优范围为: 厚度 0.3~0.5mm, 黏度 15~25s (涂-4 杯)。

(6) 各工艺参数相互制约, 因此, 需要遵循针对性、匹配性、稳定性等相关原则, 对工艺参数进行合理的优化, 确保各参数处于最优范围, 降低工艺参数对球墨铸铁管的壁厚均匀性的影响。

### 4.2 展望

伴随着市场对薄壁球墨铸铁管的壁厚均匀性、管材质量的要求不断提高, 在未来的研究中, 以充分结合智能化技术手段以此实现工艺参数的实时调节以及精准化控制, 从而避免因人为操作造成的误差, 确保厚壁的均匀性。采用数值模拟技术, 模拟不同工艺参数组合对铁液流动、铺展和凝固过程的影响。优化设备的性能、研发新型涂料, 从而为厚壁均匀性的稳定性提供支撑, 推动球墨铸铁管行业的高质量发展。

### [参考文献]

[1]金柱,陈娟.熔模铸造铸态 QT600-10 的生产工艺[J].现代铸铁,2019,39(2):1-4.  
[2]陈子华.球墨铸铁预处理技术原理及生产应用实例[J].现代铸铁,2010,30(5):31-36.  
[3]文博,尹彦普,朱峰.船用大型球墨铸铁件典型缺陷的影响因素研究[J].现代铸铁,2019,39(3):13-18.  
[4]喻光远,肖恭林,陈琳,等.高强高韧超低温球墨铸铁的研究与开发[J].铸造,2019,68(3):258-263.  
[5]郝文源,陶群南,岳江峰,等.离心球墨铸铁管全自动在线全程壁厚检测系统的开发[J].无线互联科技,2021,18(2):35-36.  
[6]王峰.球墨铸铁的应用及技术发展[J].湖北理工学院学报,2021,37(6):54-58.  
作者简介: 杜鹏亮 (1982.1—), 毕业院校: 北京科技大学, 所学专业: 计算机科学与技术, 当前工作单位: 安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司, 职务: 统计; 职称级别: 助理工程师。