

水冷球墨铸铁管生产过程质量检测与过程控制研究

黄 帅

安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司, 河南 安阳 455133

[摘要] 水冷球墨铸铁管具备良好的力学性能以及耐腐蚀能力, 广泛应用于市政供水、排水管网建设等相关设施之中。它的生产流程包括熔炼、球化、离心浇铸、退火热处理和表面处理等多个步骤, 对产品的质量检验及工艺管理覆盖了整个生产和加工阶段。文中详细介绍了水冷球墨铸铁管生产加工工艺过程, 在此基础上对裂纹、重皮、夹渣及针孔等因素造成的产品质量问题进行了研究, 并针对全流程的质量管理体系设计、重要环节的关键技术参数改进、在线检测和智能检测仪器的应用、质量跟踪和信息化管理系统的构建和从业人员训练和作业规程改进等五个方面, 提出了对生产过程中质量管理的整体解决方案, 旨在提高水冷球墨铸铁管产品质量水平和生产效率提出建议。

[关键词] 水冷球墨铸铁管; 生产工艺; 质量检测; 过程控制; 在线监测

DOI: 10.33142/ec.v9i4.19464

中图分类号: TG255

文献标识码: A

Research on Quality Inspection and Process Control of Water Cooled Ductile Iron Pipe Production Process

HUANG Shuai

Angang Group Yongtong Ductile Cast Iron Pipe Co., Ltd, Anyang, He'nan, 455133, China

Abstract: Water cooled ductile iron pipes have good mechanical properties and corrosion resistance, and are widely used in municipal water supply, drainage network construction and other related facilities. Its production process includes multiple steps such as melting, spheroidizing, centrifugal casting, annealing heat treatment, and surface treatment. The quality inspection and process management of the product cover the entire production and processing stage. The article provides a detailed introduction to the production and processing process of water-cooled ductile iron pipes. Based on this, the product quality problems caused by factors such as cracks, heavy skin, slag inclusion, and pinholes are studied. Five aspects are proposed, including the design of a quality management system for the entire process, improvement of key technical parameters in important links, application of online and intelligent detection instruments, construction of quality tracking and information management systems, training of practitioners, and improvement of operating procedures. The overall solution for quality management in the production process is proposed, aiming to provide suggestions for improving the quality level and production efficiency of water-cooled ductile iron pipes.

Keywords: water cooled ductile iron pipes; production process; quality inspection; process control; online monitoring

引言

水冷球墨铸铁管是应用水冷金属型离心铸造方法制造的球墨铸铁管, 适用于城市建设中的城市自来水管、下水管道等多种工程项目。中国城镇化建设快速推进, 市场上对良好品质的球墨铸铁管需求日益旺盛, 在此基础上, 使用者对于产品所具有的强度、形位公差以及抗蚀年限也有更多诉求。水冷球墨铸铁管的制造过程经过多个复杂的步骤, 每一个步骤工艺参数的变化都会对成品的质量造成很大的影响; 怎样在保障生产速率的前提下能够做到质量可控, 成为当前球墨铸铁管厂家需要克服的主要难题, 这

一类产品比较容易产生裂纹、重皮、夹渣三种缺陷问题。裂纹形成同离心铸造相关, 浇注工艺制度不当造成; 重皮的发生与铸件浇注温度及浇注转速相关; 夹渣与金属成分含量以及扒渣工艺有关。本文针对生产工艺流程进行系统梳理质量检验以及过程把控重点, 对常见质量缺陷产生的机理进行探究, 提出针对性改进方法。

1. 水冷球墨铸铁管生产工艺流程分析

1.1 原材料选择与质量要求

球墨铸铁管的最终产品质量同原料中的生铁质量相关, 生产中一定要挑选低磷低硫生铁, 保证好碳、硅、锰、

磷、硫以及球化剂等各元素含量处在良好的水平上，达到石墨球化的良好效果。铁水中每一个步骤都要严格把控质量与温度，每次每包都要通过直读光谱对成分做测定检验，使铁水完全满足铸造要求，然后调节废钢的碳含量，按一定比例添加进中频感应炉内融化。原材料质量的好坏决定着后面流程工序的质量好坏。

1.2 熔炼与球化处理工艺

铸造工序主要是用无芯工频电炉或者中频感应电炉来对铁水进行熔炼，在生产的相应管子内径尺寸下添加相应的材料，电炉将铁水调制、加热到符合工艺的要求。DN80 离心球墨铸铁管使用的是 5t 无芯工频电炉熔炼，出铁前为了防止球化衰退加入 25kg/t 的硅铁合金，球化包铁水温度控制在 1450~1500°C 之间。球化是向铁水中加入球化剂让石墨变成球体的一种重要的技术手段，球化剂的用量、球化温度以及球化保持的时间都会影响到球化的程度。减少铁液中的硫含量，降低硫化物生成的概率，需要控制硫含量小于 0.02%，球化剂中稀土含量建议在 1%~2% 左右。同时提高铁水扒渣、挡渣的效果，把铁水中残余镁含量控制到 0.040%~0.060% 之间。球化处理后及时对铁水进行扒渣，清除漂浮于铁水表面的反应物，防止夹渣缺陷出现在铸管内壁。

1.3 离心浇注成型工艺

离心浇注是水冷球墨铸铁管制造的关键成形工步。利用水冷金属型离心机进行浇注，在水冷条件下，高温铁水不断地被注入高速转动的铸管模内腔，同时冷却水对铁水进行冷却，使铁水逐步凝固成为球墨铸铁管，浇注时管模按照预定的速度高速旋转，高温铁水受到离心力的影响均匀铺开于铸管模内表面。在水冷金属型离心铸造工艺中，要避免高速度的浇注转速，调整合适的翻包速率及主机走速，保证管模打点深度为 0.25~0.3mm，直径为 4~5mm，点与点之间的距离为 0.5~0.7mm^[1]。浇注开始时，在流槽入口处加注硅钙合金作为孕育剂，促使石墨球化并使晶粒变细。铸好的球墨铸铁管马上做铸造成缺陷表面检查、称

重，保证铸管质量。

1.4 水冷却过程控制要点

水冷环节是水冷金属型离心铸造工艺与热模法相区别的主要标志，在铁水浇入的同时，管模外壁借助水冷设备实施强制性的冷却从而使液态的铁水快速结壳成形。浇注速度的快慢直接影响着铸管内部金相组织结构以及残留应力大小程度。调整好浇注温度以及机身冷却水进出口温度，减少两次浇铸之间的时间间隔。机身上部冷却水入口温度设在 28~36°C，下部冷却水出口温度设置在 50~57°C 左右。

1.5 退火与热处理工艺

退火工艺是消除铸件中的残余自由渗碳体，得到铁素体基体组织的过程。水冷离心球墨铸铁管因冷却速率快，铁液急速结晶形成凝固过程中金相组织含有 15~25vol% 的共晶渗碳体，因而其断面呈“白口化”，伸长率低；一般退火工艺为高温石墨化退火，将铸管加热到 900~950°C，恒温一段时间后慢慢冷却，渗碳体转变为石墨和铁素体，再在 720~760°C 的温度中进行共析，最终获得 90%~95% 的铁素体以及 5%~10% 的珠光体，伸长率满足国家标准。退火炉的温度曲线控制和炉内气氛调节是保证退火质量的关键。

1.6 表面处理与防腐工艺

退火之后的球墨铸铁管马上开展压痕检查、外观检查、压扁测试、拉力试验、硬度检测、金属组织分析等等，对于达不到标准的管道予以作废，不能够流入到下一环节。

表面处理为球墨铸铁管出厂防护的一个重要步骤，有外壁喷锌、沥青涂层及内壁水泥砂浆衬里等几种方式，根据客户需求用高压喷枪对管子外表层喷射锌粉，达到 ISO 2531 国际标准 (130g/m²)。外层防腐一般采用“锌层+沥青漆”的复合式防腐手段。调整过的管道依照公司标准做水压实验，以验证管道能够承受的内部压力值。内壁水泥砂浆衬里使用双轨水泥衬里机离心衬涂，衬涂全程由电脑操作并实时监控，保障了水泥衬里的质量。

表 1 水冷球墨铸铁管各工序关键工艺参数与质量要求

工序名称	关键工艺参数	质量要求	常用检测手段
原材料选择	硫含量<0.02%、磷含量低	低硫低磷优质生铁	直读光谱分析
熔炼与球化	球化温度 1450~1500°C、残镁 0.040%~0.060%、硅铁 25kg/t	球化率≥80%	炉前快速分析、金相检验
离心浇注	打点深度 0.25~0.3mm	壁厚均匀、无气孔夹渣	超声测厚
水冷却过程	进水 28~36°C、出水 50~57°C	组织均匀、无裂纹	红外测温、水流量监测
退火与热处理	高温退火 900~950°C、低温 720~760°C	铁素体 90%~95%、珠光体 5%~10%	硬度测试、拉伸试验、金相分析
表面处理与防腐	喷锌 130g/m ² 水压测试	防腐达标、承压可靠	涂层测厚仪、水压试验

表 2 水冷球墨铸铁管主要质量缺陷与影响因素对应关系

质量缺陷类型	主要产生环节	影响因素	可采用的检测方法	控制措施
裂纹	浇注、冷却	冷却速度不均、流槽位置不合理、碳当量偏低	磁粉探伤、着色渗透	优化冷却曲线、加强随流孕育、控制碳当量
重皮	离心浇注	浇注温度过低、浇注转速过高	涡流检测、目视检查	合理控制浇注温度、调整适宜的浇铸转速
夹渣	球化处理、浇注	含硫量>0.02%、扒渣不彻底、残镁量过高	超声波探伤、X射线	控制硫含量、控制残镁 0.040%~0.060%
针孔	浇注	管模水分、模粉挥发物、孕育剂未预热	涡流检测、水压试验	预热烘烤管模、控制模粉、孕育剂水分
球化不良	球化处理	球化剂不足、铁水停留时间长、原铁水硫高	金相分析	控制球化剂加入量、缩短球化后停留时间
渗漏	浇注、冷却	夹渣、针孔、裂纹等铸造缺陷综合作用	水压试验	加强过程控制、100%水压试验

2. 水冷工艺过程中的质量影响因素分析

水冷球墨铸铁管制造中常见的质量问题有裂纹、重皮、夹渣、针孔、球化不良等问题，这些质量问题的发生与多种生产工艺过程相互交叉有关，其中裂纹是最为普遍的水冷离心球墨铸铁管的质量问题之一，引起其发生的原因在于：

- (1) 冷却速度不一致。
- (2) 机械阻碍。
- (3) 铸造组织不均匀。
- (4) 流槽设置不合理。
- (5) 高脆性断裂等。

一旦出现水冷离心球墨铸铁管的裂纹现象，不仅缩短了使用寿命降低了内在的质量同时也增加了企业生产的费用。在水冷的过程中如果冷却的速度过快或者模具温度分布不均匀，则会使得铸管内部存在巨大的热应力，当热应力超过金属材料的强度界限之后就会造成裂纹^[2]。缩短铁液在高温下的停留时间，提高孕育尤其是随流孕育的效果，随流孕育剂加入量保持铁液重量的 0.1%~0.25%；保证管模粉的均匀分布，控制管模内表面用料 20~30g/m²。夹渣缺陷主要跟铁液中含硫量大、扒渣不到位、残存镁量过多有关。重皮缺陷与铁液温度及浇注速度有关系，温度过低或者速度过快都容易引起重皮现象的发生。针孔缺陷受管模内的潮气、模粉的挥发残留物以及孕育剂量不足的影响，渗漏缺陷则是由于夹渣、针孔、裂纹这些铸造缺陷引起的，严重降低铸铁管的合格率和承受水压力的能力。

3. 生产过程质量控制策略与优化措施

3.1 建立全过程质量控制体系

品质管理应该从原材料选取、生产加工、检验检测直到产品出厂整个流程都要进行质量管理。质量管控应该覆盖原材料选择、生产过程，检测检验直至产品的出厂全程。原材料上，要严格选取国标标准的高纯生铁、球化剂、孕育剂等原料，保证铁液中化学成分稳定，特别是碳、硅、

锰、磷、硫以及球化元素的含量满足一定的范围之内，保证良好的石墨球化形态。公司需要建立健全各道工序的质量考核体系，在标准之上设定更加严苛的企业标准。严格遵守 ISO 9001 质量管理体系以及 GB/T 13295、ISO 2531 等一系列的国内外标准来保证整个球墨铸铁管产品的高质量、持久性使用寿命。

3.2 关键工序参数优化与标准化控制

熔炼温度、球化处理工艺、浇注系统的合理设计是提高产品质量的前提。使用先进的中频感应电炉熔炼来使铁水温度稳定，用上动态秤称重及计算机自动浇注机，可以使每根铸管壁厚一致、无砂眼、气孔等问题^[3]。各个工序重要参数要标准化管理，尽量减少人的波动影响。采取这些相应做法可以使得球墨铸铁管质量得到很大提升，裂缝、重皮、夹杂等问题都大大减少，降低了许多废品的发生，成材率也大大提高。

3.3 在线监测与智能检测技术应用

在线检测及智能检测方法应用也是提高产品质量控制的有效途径。其质检过程分为目视检验、尺寸检验、水压试验、金相检验、力学性能试验及涂覆层检验，超声波在线检测仪器，可在线动态检测球墨铸铁管各个部位的壁厚及球化率情况，探测壁厚使用的是反射式测厚法，探测球化率则通过透射方式测定球墨铸铁管某一区域的声速值，再依据声速与球化率之间的线性公式推算出具体球化率数值，壁厚及球化率的结果能够清晰迅速地呈现在仪表上，能够对整个球铁管的壁厚和球化率进行全范围、自动化、高速度检测，可靠性、稳定性高。运用超声波可以完成球铁管内径、外径、壁厚及球化率在整个长度上全自动高速测量问题，在一定程度上解决了过去金相法取样检测无法反应整个水管质量状况的问题。铸管还需做 100% 的压力试验检验强度。保证承压能力达标。检测仪器准确程度及检测频次是影响产品质量检测结果的重要因素之一。

3.4 质量追溯与信息化管理系统建设

健全的质量追溯制度是保证产品质量不断提升的安全防线。“球墨铸铁管道区块链质量追溯”试验是运用区块链技术对产品全程跟踪的一种新模式,目的是保障球墨铸铁管道从原材料到成品每一个阶段的数据都是真实的并且不能被恶意修改。使用第三方检测实验室的服务能检查出球墨铸铁管道的力学特性、化学成分、尺寸偏差等主要参数是否达到国标以及行业内相关标准。扫描管体表面的二维码就可以获取每一根管道的身份信息、生产工艺情况及质量状况^[4]。基于数字孪生的思想,每一条管线一出生就拥有了自己唯一的一个身份编码,一旦发生质量问题可以追溯到这个铸管的生产日期以及批次甚至是每道工序都可以追踪到,保证产品质量以追溯。

3.5 人员培训与操作规范提升

人力资源水平及操作规范化是质量管理措施落实到位的保证。公司应当定期地对操作人员进行工艺技术的培训以及质量意识的教育,让每个人都能深刻明白自己岗位的质量管理重点所在。要有严格的工艺规程及检验标准,每一个节点,每一个工序都应该有明确的操作规定以及检验的规定并进行充分的过程记录;另外还应该建立起质量激励体系,把质量指标跟个人绩效联系起来,激发全员积极参与质量管理工作的积极性。

4 结语

水冷球墨铸铁管质量检验及过程管控覆盖从原材料到表面防腐全过程。文章总结各环节质量控制重点,探究裂纹,夹渣等常见的质量问题产生的原因,从质量管理体系,参数调整,自动化检测系统,产品质量追溯,人才培养五个方面入手进行改进措施建议,发现超声波探伤,区块链追溯等新技术的应用正在引领质量管理走向信息化,智能化的新阶段,在以后的工作中要进一步加强工艺规范化建设,检测手段科技化,企业管理信息化,做到质量与效率并重的目标追求。

[参考文献]

- [1]王爽,郑万,季军,等.水冷离心球墨铸铁管气孔缺陷形成原因分析[J].特种铸造及有色合金,2025,45(7):1073-1080.
- [2]乔秀丽.球墨铸铁管喷锌机举升装置的优化改进[J].山西冶金,2022,45(4):100-102.
- [3]闫现臣,刘斌,张三辉,等.水冷金属型球墨铸铁管高效离心浇注机设计[J].金属加工(热加工),2017,15(2):67-69.
- [4]江宏.水冷金属型离心球墨铸铁管的生产分析[J].机电信息,2018,20(15):106-107.

作者简介:黄帅(1989.01—),男,河南理工大学材料工程专业硕士,工程师,现就职于安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司,任铸管一作业部主任。