

水冷球墨铸铁管生产线节能降耗与工艺优化研究

黄帅 薛鹏飞 任俊海 金建军 乔秀丽

安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司, 河南 安阳 455133

[摘要]水冷球墨铸铁管由于具有良好的力学性能以及抗蚀性等优点,被广泛应用于市政供水、排水等行业。但是,生产线能耗水平高、能耗低的问题越来越明显。文中针对冷球墨铸铁管生产线进行研究并对其典型工艺流程以及能耗情况进行详细的研究,在此基础上确定了冶炼、离心浇筑、退火为主要能耗部分,进而从冶炼系统的节能改造、智能控温及精准加热、冷却系统节水节能等方面开展节能降耗关键技术的研究。此外还分别就球化及孕育工艺条件、离心浇铸参数选择、冷却方式及冷却曲线以及热处理参数的选择等提出相应的工艺改进措施。分析得出在节能技术和生产工艺两方面相结合的情况下可以有效减少生产线综合能耗,并能维持产品的质量恒定。

[关键词]冷球墨铸铁管;节能降耗;工艺优化

DOI: 10.33142/ect.v4i3.19417

中图分类号: TF593.2

文献标识码: A

Research on Energy Conservation, Consumption Reduction, and Process Optimization of Water Cooled Ductile Iron Pipe Production Line

HUANG Shuai, XUE Pengfei, REN Junhai, JIN Jianjun, QIAO Xiuli

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

Abstract: Water cooled ductile iron pipes are widely used in industries such as municipal water supply and drainage due to their excellent mechanical properties and corrosion resistance. However, the problem of high and low energy consumption in production lines is becoming increasingly apparent. The article focuses on the production line of cold ductile iron pipes and conducts a detailed study of its typical process flow and energy consumption. Based on this, smelting, centrifugal casting, and annealing are identified as the main energy consuming parts. Furthermore, key energy-saving technologies such as energy-saving transformation of the smelting system, intelligent temperature control and precise heating, and water-saving and energy-saving of the cooling system are studied. In addition, corresponding process improvement measures were proposed for spheroidization and incubation process conditions, centrifugal casting parameter selection, cooling method and cooling curve, and heat treatment parameter selection. Analysis shows that the combination of energy-saving technology and production processes can effectively reduce the overall energy consumption of the production line and maintain a constant product quality.

Keywords: cold ductile iron pipe; energy conservation and consumption reduction; process optimization

引言

球墨铸铁管制造主要使用水冷金属型离心铸造法进行制造,其生产效率高、强度好、韧性佳等一系列优点使其备受青睐。但传统的生产设备存在着能耗种类繁多、余热回收不足、工艺条件凭经验确定等问题,节能效果有待提高。而国家提出双碳政策,进行冷球墨铸铁管生产线节能及节能减排工艺的研究有着非常重要的理论价值及实践意义,本文从生产线重要耗能部分出发,探讨节能技术和工艺优化相结合的控制方案,旨在通过此次研究给行业低碳发展贡献力量。

1 冷球墨铸铁管生产线能耗现状与问题分析

1.1 典型生产工艺流程及能耗构成

冷球墨铸铁管生产线包括有铁水熔炼、球化孕育、离心浇筑、退火处理、精整检验等工艺步骤。DN80 离心球墨铸管使用 10t 无芯工频电炉熔炼,出铁之前为了防止球化衰退按 25kg/t 添加硅铁合金,浇注使用水冷离心机以每

隔 60s 一支的速度进行浇注,球化包铁水温度控制在 1450~1480℃之间。其中熔炼是用高炉铁水或者生铁在中频电炉中被加热到 1480~1520℃的过程,在整个工艺过程中所消耗的能量大概占到总体能量消耗的 60%~70%左右,它是最大的耗能部分。球化与孕育是在特定的包体内完成的,必须要保证一定的温度间隔,温差要在 50℃以下,否则会破坏球化作用的效果。离心铸造过程是:管模高速转动 900~1200r/min,在离心力的作用下使铁水凝固成形,管模表面为水循环冷却,电耗占总用电量的 10%~15%。退火过程是:铸态管子加热到 920~960℃,目的是为了去除渗碳体,形成铁素体基体的组织,天然气或者高炉煤气作为热源使用在退火炉内对铸态管子进行加热,气耗占总用气量的 15%~20%。后处理过程包括了磨光、镀锌以及水压试验等工作,所消耗的能量分布较广,大约占 5%~10%,其中磨光和镀锌过程中的电力消耗较多,水压实验过程中的水耗量也比较大,而除尘过程中需

要大量的压缩空气来提供压力，所以气耗也比较高。从能源介质的角度来说，电能主要用来熔炼电炉、离心机运转所需的电动机、除尘风机及水泵等设备；天然气或高炉煤气用于退火炉加热；水用于管模的冷却、水压实验以及除尘系统中的补水等工作。不同的能源介质消耗的能量费用及碳排放系数相差极大，电能的碳排放系数是 0.61kgCO₂/kWh，天然气的碳排放系数是 2.16kgCO₂/m³，所以在节能措施的选择方面要以电力跟天然气为主，其次再考虑对水进行节约。

表 1 冷球墨铸铁管生产线各工序能耗构成

工序名称	主要设备	能源类型	能耗占比 (%)	能耗特点
熔炼工序	中频电炉/冲天炉	电能	60~70	连续运行、峰值负荷高
离心浇注	水冷离心机	电能	10~15	间歇运行、冲击负荷
退火处理	连续式退火炉	天然气	15~20	温度要求稳定、连续运行
后处理工序	打磨机/喷砂机/水压机	电能/水	5~10	分散、间歇运行

1.2 主要能耗环节识别与特征分析

熔炼过程中的主要节能装置就是中频感应电炉，它的工作效率与炉衬材质、线圈结构、功率因素等有关等。水冷离心球墨铸铁管是指球化的铁水倒入到金属模具中，在离心力作用下，球化铁水凝固成型并迅速冷却在管模内部，在管模外部通过喷淋或者浸入的方式进行冷却后制成的一种球墨铸铁管。离心铸造过程的主要用电为驱动管模旋转电动机用电及冷却水系统用电。退火工艺是使用连续式退火炉，炉子有加热区、保持区、快速降温区、缓冷区四个区域，各个区域温度控制精度决定了所耗燃气多少。另外，附属装置例如除尘风机、循环泵、空压机等尽管其单台设备容量不大，但是长时间不间断运行所带来的累计损耗也不可小觑。就能源介质而言，电力用于熔化、驱动、控制，而燃气或者高炉煤气用于退火炉加热，水用于管模具冷却以及水压试验。不同的能源介质价格高低及对应的碳排放强度不同，则相应的节能降耗策略应首先针对电能以及燃气。

2 生产线节能降耗关键技术研究

2.1 熔炼系统能效提升与余热利用技术

熔炼生产节能应该在设备及工艺两方面同时下功夫。高效炉型方面，使用新型中频感应电炉可以提升其功率因数、减少铜损与铁损；新型电炉其感应线圈采用了空心铜管设计，内部灌注循环冷却水，降低线圈温度的同时提高了电磁能转换率；炉衬采用干振料整体砌筑技术，降低气孔含量以及导热系数，从而有效地减小了热传导损耗。短流程工艺是熔炼工序中最直接有效的节能措施之一。通过对于离心球墨铸铁管生产线实施短流程工艺改造，采取高炉铁液直接投入到中频电炉调节合金成分并加热升温 and 升

温的短流程熔炼工艺，去除了高炉铁水铸锭以及生铁重熔步骤。此法省去铁液冷却凝固后重新融化的过程，每吨产量可以减少几百千瓦时的熔炼能耗，相比传统的冶炼-铸造-重熔-再铸造的长工艺而言，短工艺是一个更加经济，更加节省能源的生产工艺。在回收废热上，退火炉烟温高，有着很好的回收潜力，球墨铸管行业使用的是退火炉废热回收装置，运用了自动化控制系统，调整阀门开度大小便可以实现生产线上的砂芯干燥窑、外涂预热窑、外涂干燥窑等设备根据工艺所需温度来利用退火炉所排出废气的热量，能大幅度地降低退火炉排放烟气温度，收回的热量占到总耗能的较大份额。热管式换热器是最常用的一种余热回收装置，它传热效率高，而且体积小，无转动元件，安全可靠等优势明显。另外熔炼电炉冷却水带走的一部分热量还可以用来给工厂区在冬天提供暖气以及原材料加热。电炉冷却水排出时温度较为适宜，通过板式换热器可以将电炉放出的余热转变为供暖循环水的温度进而达到一定面积厂房冬天供热的效果。

2.2 智能温控与精准加热技术

温度控制是整条生产线的重要工序参数，在熔炼过程中利用红外测温以及 PLC 联动的技术对铁水温度进行即时监控并能够对加热装置的功率进行自我调节以预防因过度加热导致的能量损耗问题。过去的人工测温方式每炉次只做几次检测所以会出现一定的延迟误差及人为偏差的影响，而通过红外测温可以频繁地获取到温度信息并与 PLC 系统的控制相配合之后便能将铁水出炉时的温度变动幅度大幅减少，从而使得每次都能节省一些电力消耗；在离心浇筑时对管模预热温度也需保持在一个合适的范围内，过高会导致管模使用寿命缩短，过低会影响铁水流动性。用电磁感应加热代替燃烧型明火烧嘴加热，加热效率可以从低转为高，在很大程度上减少了预热时间，对浇注工艺参数进行固定，固定浇注温度区间、浇注速率，铸件厚大件浇注温度高一些、浇速慢一点，防止出现冷隔、缩孔等问题，而对于薄壁件就要加快浇注速率，防止产生浇不足的情况。退火炉各个阶段的温度调节精准度直接关系到产品的质量和燃气的消耗量，使用闭环控制系统可以使得温度波动幅度变得很小，先进的过程控制系统中加入了预测控制算法，通过对炉腔内物料数量以及输送速率的变化来进行预先调节燃气供应，从而降低了温度偏差过大这一情况的发生概率。炉压控制也很重要的一项节能措施，在炉内维持微正压可以避免冷风的进入，减少热量散失。

2.3 冷却系统节水节能优化技术

冷却系统为离心浇铸过程中的管模喷淋冷却以及退火炉后管道的强制性冷却。传统的冷却方法使用固定流量的供水，在此过程中造成大量水资源的浪费以及较高的电耗。节能措施有：依据管子的不同规格以及浇铸的速度调整冷却水量；用变频泵代替常压泵；通过冷却水塔循环系

统减少对新水的需求比例等。球墨铸铁管离心铸造工艺可以从浇注系统的改进,温度场分布的研究,转速参数的调整、冷却工艺的优化,金属液的净化处理以及自动化的控制系统的升级等方面来加以改善。变频调速技术的应用也是冷却系统节电的重要措施之一。冷却水泵及冷却塔风机的负载率因季节、负荷的不同而有所变化,在进行变频调节之后,流量小时水泵转速相应减低,因此其泵轴功率也会有较大的下降,节能效益明显,在此以标准型循环水泵为例,实施变频改造之后的节能比率可观,每年节约下来的电能也是十分可观。冷却塔风机采取双速电机或者变频电机,依据气温高低以及回水温度来自动转换工作状态,可以节约一定的电量。循环水系统的水质管控也关系到节能成效如何,循环水浓缩倍率如果维持在一定范围内,则会大大提升循环水量,降低排放水量。应用物理除垢杀菌法代替化学药剂,能够预防结垢和菌藻生长,保证换热器的良好换热性能。模具冷却水管的设计及其选用也需要进行改进,使用实心锥形喷嘴代替直接式喷嘴,既可以在不影响冷却作用的情况下节约用水;实际运行中,通过改进后的冷却装置不但能够达到省钱而且还能节电的目的。

3 生产工艺参数优化策略

3.1 球化与孕育工艺优化

球化是球墨铸铁管品质保证的关键步骤之一,在采用冲入法中球化剂固定用量大约占到铁水质量的 0.8%~1.2%,保证铁水温度维持在 1400~1450℃之间,如果温度过高会使球化剂烧毁,偏低会导致不完全的球化反应;球化剂放置在堤坝式的浇包底部,覆盖一层硅铁粉以及铁屑以免漂浮烧毁。球化反应属于放热反应,球化处理之后铁水温度会上升 10~20℃左右,因此要考虑到温度上升带来的影响。孕育处理采取随流孕育加瞬时孕育相结合的方法。球化处理完毕后马上投入一次孕育剂来抵消形成白口的趋势,其添加比例为 0.3%~0.5%。浇注时在型腔铸道内持续投入孕育剂以增强其作用时间,投入比例为 0.05%~0.1%,选用的孕育剂是硅铁并且加入 Zr 元素,当 Zr 的添加量达到 0.1%~0.3%的时候就会使球化的效果提升,Zr 元素可以使石墨颗粒更加细小、石墨数量增多,从而使球化的程度增加 2%~3%。改良过的球化孕育方法能够在维持球化率 >90%的基础上减少球化剂用量 0.1%~0.2%,从而减少了镁的损失导致的温降以及能耗。每生产一吨铁水就可以节约掉球化剂 1~2 公斤,降低了消耗电量大约 5~10 度左右。另外,在球化剂与孕育剂颗粒大小比例上进行调整,提升吸收性,降低残球球化剂混入到熔渣中含量,从而降低熔渣量 10%~15%,节约了相应处理熔渣能源消耗。

3.2 离心浇注参数优化设计

离心铸造的重要指标有:管模转速、浇注温度、浇

注量及冷却水量等。相互之间相互影响,彼此关联。管模以一定的转速旋转,铁水冲入模具内部后,在冷却水的作用下,会在靠近管模的一侧形成一层薄壳,当铸铁管在管模内冷却到 500~600℃左右时将铸铁管从管模内取出^[1]。若转速太慢,会造成铁水分布不均匀的问题,而转速太快又会使机器寿命缩短及耗电量增大。浇注温度下降 10℃,可以使电力消耗减少大约 5%左右,但是温度太低会造成石墨化不良现象的发生。而离心铸造工艺的主要目标是在保证产品质量的前提下尽量降低成本。管模旋转速度与管径成反比, DN100 管模具转速为 1100r/min、DN300 管模具旋转速度为 750r/min 左右。旋转频率每下降 50r/min,驱动电机电流也相应下降大约 8~10A 左右,以每年产量 5 万 t 来计算,可以节省能耗 8~10 万 kWh。浇注温度下降从 1420℃降到 1400℃每吨铁水可以节省耗电 15~20kWh 左右,在这过程中要关注球化衰退的风险问题,浇注时间最好控制在 10min 以内。

表 2 离心浇注关键工艺参数优化对比

参数名称	单位	传统取值范围	优化后推荐值	对能耗的影响	对质量的影响
管模转速	r/min	900~1200	950~1100	转速降低 10% 节电约 8%	影响铁水分布均匀性
浇注温度	℃	1380~1420	1390~1410	每降低 10℃ 节电约 5%	影响石墨球化效果
冷却水流量	m ³ /h	80~120	85~100	流量与水泵功耗正相关	影响管材组织致密性
浇注速度	kg/s	15~25	18~22	速度稳定减少空转	影响壁厚均匀度

3.3 冷却工艺及冷却曲线优化

退火方式直接关系到铸态组织中渗碳体的数量从而决定了后期退火消耗的能量,水冷金属型铸造冷却速度快,使管材在凝固时生成大量的渗碳体,渗碳体是硬度极高且非常脆的一种组织,在很大程度上会降低球墨铸铁的韧性和塑性^[2]。如果可以在铸态控制渗碳体量的话那么就可以减少退火的温度或者减少保温的时间。改善方案为:管模内表面喷涂一定厚度的涂料以达到减慢铁水最初冷却强度的目的;拔管温度由原来的 600℃增加到 650~700℃,用余热来做自回火。

3.4 热处理工艺参数优化

退火工序则是去除渗碳体、得到以铁素体为主的基体的重要环节,在当前水冷离心球墨铸铁管高温退火曲线都是加热段、保温段、快速冷却段、缓慢冷却段四个阶段组成的曲线来完成的退火过程,所需的热处理温度很高,使用了大量的煤气或者天然气等燃料^[3]。改进的方法就是:采取低温退火工艺,将退火温度由 930~960℃降低到 880~900℃之间,保温时长也要适当的减少;针对渗碳体含量不同的球铁管选择不同的退火方式,大大减少了退火

成本。根据不同状态下的渗碳体含量划分不同的退火工艺曲线可以更好的防止因过热退火而造成的能源的浪费现象的发生。

4 结语

节能降耗是冷球墨铸铁管生产线的一体化工作，不仅要依靠设备改造，更须结合生产过程以及企业管理进行全方位改进。本文在熔炼、离心浇注、退火这些重要环节提出短流程熔炼、余热利用、自动温度感应、参数选择等节能技术方案，在此基础上节约技术与工艺创新结合，在提高产品质量的基础上使整体能效下降 5%~10%，今后还需要继续研究数字能源管理系统与自动化制造的融合应用，建立节能降耗、产品合格率、生产效率三者共同考虑的优化机制，给球墨铸铁管行业清洁低

碳发展作出贡献。

[参考文献]

- [1]李健.球墨铸铁管离心浇注工艺的改进与应用[J].中国科技纵横,2025,20(18):82-84.
- [2]蒋余庆.基于PID控制的退火炉余热回收自动控制系统的研究[J].自动化应用,2024,65(9):68-77.
- [3]张建强,温慧,段建波,等.DN80 水冷离心球墨铸铁管生产工艺及缺陷防止措施[J].特种铸造及有色合金,2021,41(3):393-396.

作者简介:黄帅(1989.1—),毕业学校:河南理工大学;学历:硕士研究生;学位:硕士;所学专业:材料工程;当前就职单位:安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司;职务:铸管一作业部主任;职称:工程师。