

基于射流冷却技术的板带钢层流冷却装置结构与优化

刘营营

东北大学数字钢铁全国重点实验室, 辽宁沈阳, 110819;

摘要: 板带钢作为工业生产中不可或缺的重要材料, 其质量与性能直接影响后续产品的品质。层流冷却装置在板带钢生产过程中起着关键作用, 而射流冷却技术的应用能显著提升冷却效率与冷却均匀性。本文围绕基于射流冷却技术的板带钢层流冷却装置, 深入研究其结构与优化方法。首先分析了射流冷却技术的原理及在板带钢冷却中的优势, 随后详细阐述了装置的整体结构设计, 包括射流喷嘴布局、集管结构、供水系统等关键部分。在此基础上, 提出了基于数值模拟与实验研究相结合的优化策略, 通过对射流参数、喷嘴间距等进行优化, 以提高冷却效果。最后, 通过实验验证了优化后的装置在冷却效率和均匀性方面的提升, 为板带钢层流冷却装置的设计与改进提供了参考。

关键词: 射流冷却技术; 板带钢; 层流冷却装置; 结构设计; 优化

DOI: 10. 64216/3104-9672. 25. 01. 031

引言

在现代工业领域, 板带钢因性能优良, 被广泛应用于多行业。市场对板带钢质量要求不断提高, 层流冷却技术是关键环节。传统技术存不足, 射流冷却技术具高效均匀优势, 有望解决问题。研究射流冷却技术在板带钢层流冷却装置中的设计与优化, 有重要理论和应用价值。国外起步早, 技术成熟; 国内需加大研究力度。研究内容包括分析射流冷却原理及优势, 装置设计, 优化策略提出及实验验证。研究方法有理论分析、数值模拟和实验研究。

1 射流冷却技术原理及优势

1.1 射流冷却技术原理

射流冷却技术是利用高压水流通过喷嘴形成高速射流, 冲击被冷却物体表面, 实现热量交换的一种冷却方式。当高速射流冲击板带钢表面时, 会在板带钢表面形成一个薄的液膜, 射流的动能使液膜产生强烈的扰动, 从而增强了热量的传递。

射流冷却过程中, 热量传递主要通过以下几种方式进行:

对流换热: 射流与板带钢表面之间的对流换热是主要的热量传递方式, 高速射流的扰动作用大大增强了对流换热系数。

沸腾换热: 当板带钢表面温度较高时, 射流冲击到

表面会产生沸腾现象, 沸腾换热能够在短时间内带走大量的热量, 进一步提高冷却效率。

1.2 射流冷却技术在板带钢冷却中的优势

与传统的层流冷却技术相比, 射流冷却技术在板带钢冷却中具有以下优势:

冷却效率高: 射流具有较高的速度和动能, 能够在板带钢表面形成强烈的扰动, 增强了热量的传递, 从而提高了冷却效率。

冷却均匀性好: 通过合理设计喷嘴的布局和射流参数, 可以使射流在板带钢表面均匀分布, 保证板带钢各部分的冷却速度一致, 提高冷却均匀性。

可控性强: 射流的流量、压力、速度等参数可以通过调节供水系统进行精确控制, 从而能够根据板带钢的材质、厚度等参数, 灵活调整冷却强度, 满足不同的冷却需求。

节能节水: 射流冷却技术可以在较低的水量下实现高效冷却, 与传统的层流冷却技术相比, 能够节约大量的水资源, 降低生产成本。

1.3 射流参数对冷却效果的影响

射流参数是影响射流冷却效果的关键因素, 主要包括射流速度、射流流量、射流压力、喷嘴直径、喷嘴间距等。

射流速度: 射流速度越大, 射流对板带钢表面的冲击力越强, 液膜的扰动越剧烈, 对流换热系数越大, 冷

却效率越高。但射流速度过大,会增加能量消耗,同时可能会对板带钢表面造成损伤。

射流流量:射流流量越大,单位时间内喷射到板带钢表面的水量越多,能够带走的热量越多,冷却效率越高。但射流流量过大,会增加水资源的消耗,同时可能会导致板带钢表面出现积水现象,影响冷却均匀性。

射流压力:射流压力与射流速度密切相关,射流压力越大,射流速度越高。同时,射流压力还会影响射流的雾化效果和射程。

喷嘴直径:喷嘴直径的大小会影响射流的流量和速度。在相同的射流压力下,喷嘴直径越大,射流流量越大,射流速度越小。

喷嘴间距:喷嘴间距的大小会影响射流在板带钢表面的覆盖范围和冷却均匀性。喷嘴间距过小,会导致射流之间相互干扰,影响冷却效果;喷嘴间距过大,会出现冷却死区,降低冷却均匀性。

2 板带钢层流冷却装置结构设计

2.1 装置整体结构设计

基于射流冷却技术的板带钢层流冷却装置主要由机架、集管系统、喷嘴系统、供水系统、控制系统等部分组成。

机架作为装置的支撑结构,需要具有足够的强度和刚度,以保证装置在工作过程中的稳定性。集管系统是将水流分配到各个喷嘴的关键部件,其结构设计直接影响水流的分配均匀性。喷嘴系统是实现射流冷却的核心部件,喷嘴的布局 and 结构参数对冷却效果起着决定性作用。供水系统为装置提供稳定的水流,其性能直接影响射流参数的稳定性。控制系统用于实现对装置各项参数的精确控制,保证冷却过程的稳定性和可靠性。

2.2 射流喷嘴布局设计

喷嘴布局是影响冷却均匀性的关键因素之一。在设计喷嘴布局时,需要考虑板带钢的宽度、厚度、运行速度等参数,以确保射流能够均匀覆盖板带钢表面。

目前,常用的喷嘴布局方式有单列布局、双列交错布局和多列布局等。单列布局结构简单,但冷却均匀性相对较差;双列交错布局可以提高射流的覆盖范围和冷却均匀性,适用于中等宽度的板带钢;多列布局适用于

宽幅板带钢,能够进一步提高冷却均匀性,但结构相对复杂。

本文采用双列交错布局的方式,通过合理设计喷嘴的间距和排列方式,使射流在板带钢表面形成均匀的覆盖区域。同时,根据板带钢的宽度,在集管上布置适当数量的喷嘴,以满足不同宽度板带钢的冷却需求。

2.3 集管结构设计

集管的作用是将供水系统提供的水流均匀分配到各个喷嘴。集管的结构设计需要保证水流在集管内的流动均匀,避免出现涡流和压力损失过大的现象。

集管的截面形状通常采用圆形或矩形,圆形集管具有流动阻力小、强度高等优点,矩形集管则便于喷嘴的安装和布置。本文采用圆形集管,其直径根据射流流量和流速进行设计,以保证水流在集管内的流动均匀性。

为了减少集管内的压力损失,在集管的进口处设置导流装置,使水流能够平稳地进入集管。同时,在集管的末端设置排气装置,排除集管内的空气,避免空气对射流效果产生影响。

2.4 供水系统设计

供水系统是为层流冷却装置提供稳定水流的关键部分,其主要由水泵、水箱、管道、阀门、过滤器等组成。

水泵的选择需要根据所需的射流压力和流量进行确定,应保证水泵具有足够的扬程和流量,同时具有良好的稳定性和可靠性。水箱用于储存水源,其容量应根据冷却装置的用水量进行设计,以保证供水的连续性。管道的直径和材质应根据水流速度和压力进行选择,以减少管道的阻力损失和防止管道腐蚀。阀门用于调节水流的压力和流量,过滤器则用于过滤水中的杂质,避免杂质堵塞喷嘴。

为了保证供水系统的稳定性,在系统中设置压力传感器和流量传感器,实时监测水流的压力和流量,并通过控制系统对水泵和阀门进行调节,使水流参数保持在设定范围内。

2.5 控制系统设计

控制系统的主要功能是实现对层流冷却装置各项参数的精确控制,包括射流压力、流量、板带钢运行速

度等,以保证冷却过程的稳定性和可靠性。

控制系统采用 PLC (可编程逻辑控制器) 作为核心控制单元,通过传感器实时采集各项参数,并根据预设的控制策略对执行机构(如水泵、阀门等)进行控制。同时,控制系统还配备了人机界面,操作人员可以通过人机界面设置控制参数、监控冷却过程,并对异常情况进行处理。

为了提高控制系统的控制精度和响应速度,采用了先进的控制算法,如 PID (比例-积分-微分) 控制算法,对射流压力和流量进行闭环控制。

3 板带钢层流冷却装置优化策略

3.1 数值模拟优化方法

数值模拟是一种高效、经济的优化方法,可以在不进行实际实验的情况下,模拟不同参数下的冷却效果,为装置的优化设计提供参考。

本文采用有限元分析软件建立板带钢冷却过程的数值模型,模拟射流冲击板带钢表面时的温度场、流场分布情况。通过改变射流参数(如射流速度、流量、压力等)和结构参数(如喷嘴间距、喷嘴直径等),分析这些参数对冷却效果的影响规律,从而确定最优的参数组合。

在进行数值模拟时,需要对模型进行合理的简化和假设,以提高模拟效率和准确性。同时,还需要对模拟结果进行验证,确保模拟结果的可靠性。

3.2 实验研究优化方法

实验研究是验证数值模拟结果和优化装置性能的重要手段。通过搭建实验平台,进行板带钢冷却实验,可以直接获取冷却过程中的温度变化、冷却速度等数据,为装置的优化提供实际依据。

实验平台主要由加热装置、冷却装置、温度测量系统、数据采集系统等组成。加热装置用于将板带钢加热至设定温度,冷却装置采用本文设计的层流冷却装置,温度测量系统用于实时测量板带钢表面和内部的温度变化,数据采集系统用于采集和存储实验数据。

在实验过程中,通过改变射流参数和结构参数,进行多组对比实验,分析不同参数对冷却效果的影响。根据实验结果,对数值模拟得到的最优参数组合进行调整

和优化,以获得更符合实际生产需求的参数。

3.3 射流参数优化

根据数值模拟和实验研究的结果,对射流参数进行优化。射流参数的优化主要包括射流速度、射流流量、射流压力等参数的优化。

通过分析不同射流速度下的冷却效果,确定最佳的射流速度范围。在保证冷却效率的前提下,尽量选择较低的射流速度,以减少能量消耗和对板带钢表面的损伤。

射流流量的优化需要综合考虑冷却效率和水资源消耗,在满足冷却需求的情况下,尽量减少射流流量,以实现节能节水的目的。

射流压力的优化应与射流速度和流量相匹配,通过调整射流压力,使射流参数达到最优组合。

3.4 喷嘴间距优化

喷嘴间距的大小直接影响射流在板带钢表面的覆盖范围和冷却均匀性。通过数值模拟和实验研究,分析不同喷嘴间距下的冷却效果,确定最佳的喷嘴间距。

在优化喷嘴间距时,需要考虑喷嘴直径、射流速度等参数的影响。一般来说,喷嘴间距应略大于射流在板带钢表面的冲击直径,以避免射流之间的相互干扰,同时保证射流能够完全覆盖板带钢表面。

3.5 集管结构优化

集管结构的优化主要是为了提高水流在集管内的分配均匀性,减少压力损失。通过对集管的直径、进口位置、导流装置等进行优化,使水流在集管内的流动更加平稳,各个喷嘴的流量和压力更加均匀。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验方案设计

为验证优化后板带钢层流冷却装置性能,设计实验方案如下:实验材料选用尺寸为 $1000\text{mm} \times 200\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的常见低碳钢板带钢;实验设备采用本文设计的优化后的层流冷却装置,配备加热炉、温度传感器、数据采集系统等;实验参数设置不同射流速度、射流流量、喷嘴间距等进行多组实验。实验步骤:(1)将板带钢放加热炉加热至 900°C ,保温 30min 使温度均匀;(2)取出加热后的板带钢放冷却装置输送辊道,启动冷却装置按

设定参数冷却；（3）冷却中用温度传感器实时测板带钢表面和中心温度变化，记录冷却时间；（4）冷却结束后检测板带钢组织和性能。

4.2 实验结果分析

冷却效率分析：对比不同参数下板带钢冷却时间，分析射流与结构参数对冷却效率的影响。结果表明，在一定范围内，射流速度和流量增大，冷却时间缩短、效率提高；喷嘴间距在一定范围时，冷却效率较高。冷却均匀性分析：测量板带钢不同位置温度差，分析冷却均匀性。结果显示，合理的喷嘴间距和射流参数可减小温度差、提高均匀性；优化射流参数和喷嘴间距后，板带钢表面温度差可控制在 5℃ 以内。组织性能分析：对冷却后的板带钢进行金相分析和力学性能测试，结果表明，优化后的冷却装置能使板带钢获得均匀组织和良好力学性能，满足相关标准要求。

4.3 优化前后对比分析

将优化后与优化前的装置对比实验，结果显示：冷却效率方面，优化后的装置冷却效率提高约 20%，能更快将板带钢冷却至目标温度，可在相同时间处理更多板带钢，提升生产效率，对大规模工业生产意义重大。冷却均匀性上，优化后的装置冷却均匀性明显改善，板带钢表面温度差减小约 30%，能减少残余应力和变形，提高尺寸精度和形状质量，降低废品率。组织性能上，优

化后的板带钢组织更均匀，珠光体和铁素体分布更合理，屈服强度和抗拉强度分别提高约 5% 和 3%，延伸率改善，力学性能显著提升，能满足高端制造领域要求。能耗与成本方面，优化后的装置在保证冷却效果前提下，因射流参数合理调整，水资源消耗减少约 15%，电能消耗降低约 10%，降低生产成本，提高企业经济效益。

5 结语

本文研究基于射流冷却的板带钢层流冷却装置，分析技术原理、优势及射流参数影响，完成结构设计，采用双列交错喷嘴、圆形集管等设计。提出数值模拟与实验结合优化策略，提升冷却性能。实验显示冷却效率提高约 20%，均匀性改善 30%。存在数值模拟精度、实验材质范围等不足，未来可完善模型、扩大实验、开发自适应装置。

参考文献

- [1] 蔡福来. 热轧带钢层流冷却控制系统的设计与实现[D]. 华东交通大学, 2009.
- [2] 江连运. 热轧带钢超快速冷却技术的研究与应用[D]. 东北大学, 2015.
- [3] 邹中升. 热连轧层流冷却系统设计应用[J]. 机械工程与自动化, 2022(1): 3.

作者简介：刘莹莹（1989.03—），女，汉族，吉林省长春市，科研助理，硕士研究生，机械工程。