

钢材质量提升: 带钢边部加热装备与关键技术综述

Enhancing Steel Quality: Overview of Strip Edge Heating Equipment and Key Technologies

供稿|徐言东¹, 白金龙¹, 王晓晨¹, 张国良², 朱长江², 刘洋¹ / XU Yandong¹, BAI Jinlong¹, WANG Xiaochen¹, ZHANG Guoliang², ZHU Changjiang², LIU Yang¹

内容导读

本文重点分析了感应加热技术在提升热轧带钢质量与成材率中的核心作用。边部加热技术通过精准补偿边部温降,可显著改善带钢温度均匀性,细化边部晶粒,降低边裂缺陷率,从而提升成材率。本文系统阐述了边部加热器的系统组成、应用效果分析、仿真研究及配套系统,特别是磁-热-结构全耦合模型等仿真技术的应用,可有效缩短工艺设计周期并降低设备调试能耗。此外,控制参数的智能化升级,结合数字孪生与强化学习算法,重塑工艺调控范式。最后,本文展望了边部加热技术的未来发展趋势,包括多物理耦合场求解、控制参数优化、设备选型逻辑等方向。

我国热轧板带钢产品年产量已超3亿t,支撑国民经济各个领域的发展,具有重要战略地位。热轧过程中的温度控制是成品带钢性能的关键工艺要素之一,优化其宽度方向的温度分布不仅能够防止板坯边部因温度过低而导致塑性下降及引发的边部裂纹,改善板坯边部的机械性能,而且可以防止板坯横断面上晶粒组织不均匀,进而减少后道工序的切边量、提高成材率,并抑制轧辊的不均匀磨损^[1-2]。感应加热技术通过线圈产生的交变磁场,在轧制材料上诱导产生焦耳热,以补偿轧件边缘的温度下降,从而有效改善因边缘快速降温导致的宽度方向上温度分布不均的问题^[3-4]。

在当前阶段,感应加热技术具有以下优点:

(1) 对于实际坯料加热,感应炉的热效率可达到65%~75%,而火焰炉和各种室式炉的热效率只有30%左右,因此能耗更低;(2) 感应炉无需煤炉、燃气炉等需要的预热过程,可长时间连续工作,也可根据需要在生产过程中灵活启停,使用便利、操作简单,自动化与智能化前景良好;(3) 采用非整体式加热模式,支持针对性区域加热,应用灵活性显著。该技术适用范围广,不仅涵盖传统钢铁材料(如铁、钨、钼等)加工,也可扩展至高化学活性的铝、钛、锆、铌等金属的热处理领域。凭借高效的升温速率,该工艺能在短时间内使工件达到目标温度,从而大幅减少表面氧化和脱碳等工艺缺陷的发生。这种特性使其在金属加工领域具有显著的技术

作者单位: 1. 北京科技大学工程技术研究院, 北京 100083; 2. 泰尔重工股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000

术优势和行业推广价值；感应加热设备综合以上优点，可在不大幅改动产线的情况下采用产线集成式部署方案，支持自动化协同运作，通过生产管控效率的显著提升，有效降低人工干预需求。此外，其能源转换效率高，符合绿色制造标准，在实现产能利用率最大化的同时，显著改善作业环境^[5]。

在当今时代，随着新能源汽车等战略性新兴产业的快速发展，市场对高牌号无取向硅钢等高端产品的需求日趋旺盛。该类钢种具有硬且脆的特性，其薄规格产品在轧制过程中更容易出现边部温降，从而引发边裂问题，亟须通过产线升级以解决此类问题，对边部加热技术的产业化应用提出了新的要求。然而，早期国内的硅钢热轧产线（宝钢、鞍钢、首钢、太钢、武钢等）均依赖从日本 TMEIC 公司等进口边部加热器，单台价格达数千万元。国产边部加热器研究刚刚起步，国内新增热轧带钢产线的数量逐年增长，见图 1，随着行业对高端产品需求不断提升，市场将持续扩大。

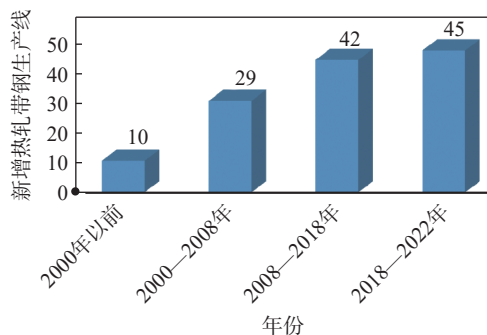


图1 国内新增热轧带钢生产线数量

边部加热器系统组成概述

典型的带钢边部加热器根据加热头形式可分为 U 形和 C 形，见图 2。其中，U 形加热器出现较早，但由于其加热效率低、对板形适应力较弱，在 20 世纪末逐渐被在大间隙时仍具有高的热效率的 C 形加热器所取代。相比于 U 形加热器，C 形加热器的优势在于能够通过调节上下感应器的间隙使加热能量集中，在提高加热效率的同时，有效减小使用过程中产生的电弧，因此使用更为可靠^[6]。

边部加热器系统主要由感应加热器本体、电气及控制系统、冷却水系统和翘扣头检测装置组成^[7]，

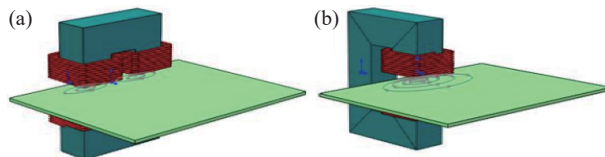


图2 边部加热器加热头形式：(a) U 形；(b) C 形

其典型结构见图 3。其中，供电和传动系统的高压开关柜和整流变压器负责向边部加热器提供电流，而该系统的低压负荷中心则主要对搭载加热器的小车进行驱动，并为加热器间隙调整和冷却水系统提供电源；自动控制系统主要包括基础自动化系统和过程自动化系统；冷却水系统由纯水冷系统和净环水冷系统组成，纯水冷系统直接冷却边部加热器及其配套装置，净环水冷系统则用于冷却纯水，以保证纯水在安全的温度范围内；翘扣头检测装置用于保证边部加热器的安全。

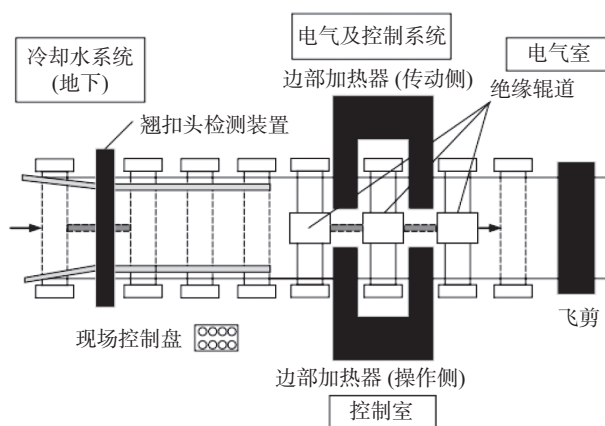


图3 边部加热器系统结构^[7]

对于翘扣头检测装置，常见的机械式翘扣头检测装置如图 4 所示，在边部加热器入口处设有双高度检测机构（即图中 1 号、2 号翘头检测器），其触杆末端集成了角位移监测模块。当带材头部接触检

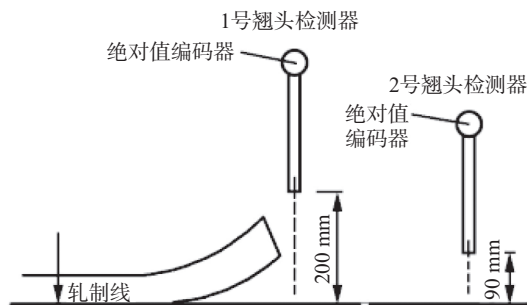


图4 机械式翘扣头检测示意图^[8]

测杆时, 绝对值编码器将机械位移转化为电信号, 控制系统据此执行加热单元的启停及开口度动态调节。光学检测装置则利用位于传动侧和操作侧的2台红外摄像机, 在板坯抵达边部加热工位前的测量点位测定其实际位置并产生一个模拟信号, 该信号被转换为板坯的上下边缘与轧制线的距离^[8]。

边部加热器的应用实效分析

在带钢边部加热技术方面, 国内边部加热器生产厂家的应用业绩较少, 尚处于起步阶段。当前, 行业内生产硅钢质量排名靠前的企业(如鞍钢等)均使用日本TMEIC公司生产的边部加热器技术, 但由于该设备在实际投用中应用效果差异很大, 且成材率有波动, 促使应用厂家与高校等研究机构开展合作, 对其进行针对性的分析、研究与改进。

低碳软钢产品边部加热效果分析

白丽杨等^[9]通过开展低碳软钢边部加热器启停

状态的对比实验, 系统探究了边部加热器介入对低碳软钢组织性能的影响机理。该研究通过工艺参数与材料性能的关联分析, 为边部加热技术的优化提供了实验依据。

对两个钢种低碳软钢板带进行取样, 分别命名为A01和A02, 取样硬度测试结果见图5, 曲线左侧对应的是传动侧, 右侧对应的是操作侧, D1~D13为沿宽度方向进行取样的不同取样位置, 其中D1~D5分别对应距离传动侧10、20、30、40、50 mm的取样点, D6、D7、D8为1/4、1/2、3/4板宽处, D9~D13分别对应距离操作侧50、40、30、20、10 mm的取样点。从结果来看, 边部加热器的投用对硬度分布影响显著。未投用边部加热器时, 2种钢种的硬度曲线两侧呈下降趋势; 而投用边部加热器后, 硬度曲线两侧则呈平稳趋势。该对比直观展示了边部加热技术对改善带钢整体硬度均匀性的显著效果。

由图6中钢卷对比可见, 带钢中部与边部晶粒

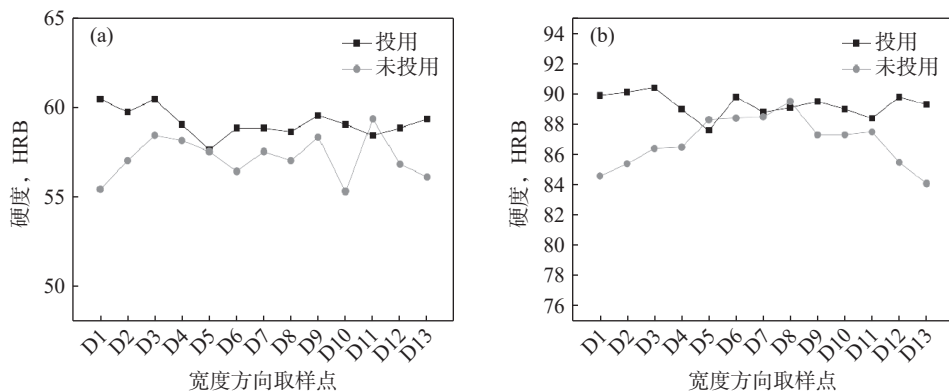


图5 边部加热器硬度效果^[9]: (a) A01板; (b) A02板

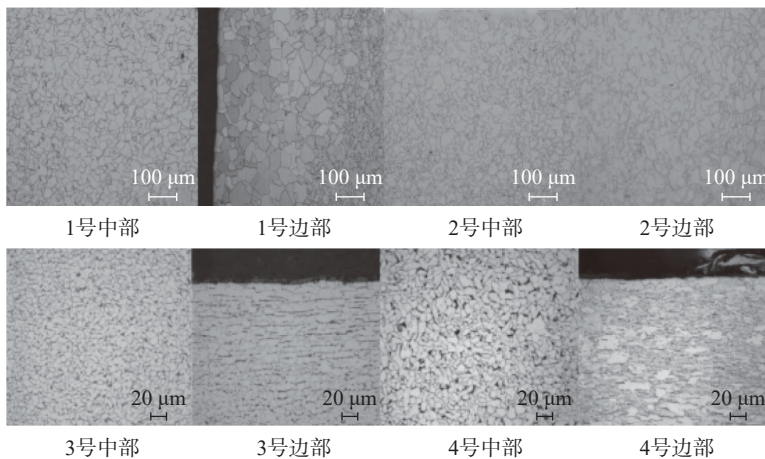


图6 边部加热器对晶粒均匀度贡献^[9]

大小存在明显差异。其中, 1、2号卷为 A01 钢种, 3、4号卷为 A02 钢种, 其中 2、4号卷投入边部加热器进行生产。未投入边部加热器生产的 1、3号卷, 边部出现粗晶及混晶现象; 而投入边部加热器生产的 2、4号卷, 其带钢中部与边部的晶粒尺寸差异较小, 边部晶粒较 1、3号卷显著细化。在未启用边部加热器的工况下, 3号卷边部出现混晶现象, 而 4号卷的混晶现象则得到显著改善。这表明边部加热器的启用能够有效细化边部晶粒, 抑制粗晶或混晶现象, 促进晶粒尺寸的均匀化。

以上研究虽针对低碳软钢产品, 但其结论对于边部加热器效果的分析仍具有推广价值。

边部加热器的参数优化

已知边部加热器对带钢产品的质量有所提升, 其参数优化自然成为研究重点。边部加热器的核心部件为感应加热装置, 通过调整该装置的工艺参数实现加热工艺优化。可调的工艺参数主要包括功率设定值、边部重叠量及开口度。其中, 功率设定值是二级模型下发的参数, 通过在操作画面中输入目标边部温升值, 模型将自动计算并设定感应加热器的功率; 边部重叠量和开口度的定义见图 7, 即轧制线至上线圈中心点的垂直距离定义为边部重叠量, 感应加热器铁芯的中心线与板坯边部的距离为开口度^[10]。

刘洋等^[11]针对翘头检测信号与感应加热装置的连锁条件, 结合实际生产逻辑对边部重叠量、开口度与功率设定值进行优化。研究遵循保证边部质量、控制边部加热温度和加热范围的原则, 通过多

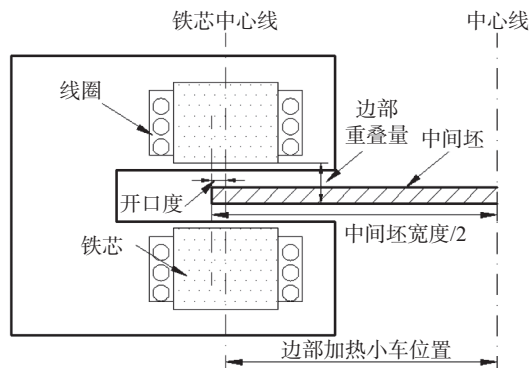


图 7 边部加热器参数定义^[10]

次单变量生产试验进行探索, 以获取最优参数组合。通过对功率设定值、边部重叠量及开口度的优化, 在保证边部质量的同时, 有效降低了硅钢的边降(即带钢边缘区域的厚度减薄现象), 显著提高了成材率, 达到了节能降耗、降低成本的目的。

边部加热器参数调整前后对边部加热器投用产线后产品温差的优化效果见图 8。可见, 带钢头部的断面温差均值显著降低; 而带钢中部由于控制逻辑上无变化, 其断面温差基本不变; 同板温差也出现相同幅度的显著下降。因此, 边部加热器的参数优化能够显著提升带钢全长方向的温度均匀性。

张志鸿等^[12]为保证河钢邯钢冷轧 980 MPa 级及以上高强钢的质量, 采用了边部加热器, 利用边部加热感应技术对热轧基料边部进行快速升温。研究基于边部加热器结构和原理, 从其加热效率的影响因素入手, 通过二级系统加热温度补偿设定、空气间歇值调整及开口度优化, 使冷轧 980 MPa 级以上高强钢酸轧后边裂缺陷降低了 73%, 产品质量得到

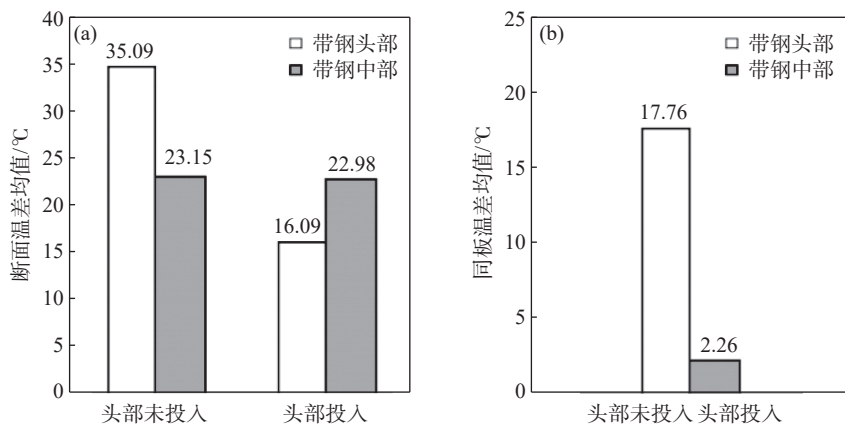


图 8 边部加热器温差优化效果^[11]: (a) 断面温差; (b) 同板温差

显著提升。

经由以上例证可以看出，边部加热器的参数优化对于产品质量的提升具有较为显著的效果。目前，该类参数优化研究一般采用现场实验与仿真分析相结合的手段进行。

边部加热器关键技术研究

边部加热仿真研究

感应加热技术研究往往依赖于一系列繁琐的实验，且成本较高。因此，仿真技术在该领域具有重要研究价值。当前，研究人员通过有限元方法在感应加热领域开展了系统性研究，例如，张雪彪等^[13]持续开展感应加热技术在船舶曲面外板成型中的应用探索，基于 COMSOL 和 ANSYS 平台构建了钢板高频感应加热的多物理场耦合模型，重点模拟了电磁-热-力学场的交互作用机制；张浩^[14]利用 ANSYS 软件，在考虑钢板与边部加热器相对运动的条件下对 C 形边部加热器进行三维磁热耦合数值模拟，并据此研究了不同参数对边部加热效果的影响。

温度场作为连接电磁激励与材料响应的中间变量，其精确建模直接影响仿真结果的工程可信度。在感应加热过程中，材料电导率、磁导率等物性参数随温度呈现显著的非线性变化。张浩^[14]针对 C 形边部加热器的研究表明，通过引入温度相关的材料本构关系，可有效修正传统模型在高温区的预测偏差。此外，考虑工件与加热器的相对运动后，动态热源加载策略可有效降低温度梯度分布的预测误差。

电磁场分析的核心挑战在于准确捕捉高频交变磁场在导电材料中的趋肤效应。通过矢量磁位法与边缘元法的结合，现代有限元模型可实现薄层内的电磁参数解析。在钢板高频感应加热模拟中，此类精细化模型能够清晰呈现集肤深度随频率的变化规律，为加热器参数设计提供理论支撑。为平衡计算精度与效率，常需采用自适应时间步长算法。

电磁场与温度场的强耦合特性决定了单场分析的局限性。当钢板温度超过居里点（约 768℃）时，其相对磁导率发生 3 个数量级的突变，这种物性跃迁将导致电磁功率密度骤降。若仅进行电磁场分析而忽略温度反馈，将严重高估加热效率；反

之，若孤立分析温度场，则无法解释非对称加热模式下的热源分布特征。

因此，在当前阶段，边部加热仿真研究的关键在于：（1）物理模型的有效建立，其三维物理模型与网格划分应有效反映真实边部加热设备与物料的结构与热效应；（2）物性参数的设定，模型的材料属性中有大量参数与温度相关，在仿真过程中需重点考虑温度对材料属性的影响；（3）多物理场的耦合设定，鉴于电磁场与温度场的强耦合特性，在仿真模型建立中必须考虑多物理场耦合分析。在满足以上关键条件的前提下，仿真分析可作为边部加热参数优化的重要支撑，对降低参数优化分析的成本提供有力帮助。

边部加热器的配套系统研究

为了实现边部加热器与热轧产线的有机结合与高效运行，针对其控制需求设计对应的配套控制系统势在必行。张世厚^[15]提出了包含自动控制、人工介入调整与辊道绝缘检查功能的控制系统，并进行了人机界面（HMI）初步设计，初步实现了边部加热器的实际投用范例；闫丰梅^[16]则进一步将辊道传动控制根据边部加热需求进行调整，并通过集成传感器实现了热轧控制系统与边部加热控制系统的同步跟踪，基于边部加热需求以控制软件的改进，实现了粗轧减速逻辑控制和轧线保护功能，有效保障了边部加热器与热轧产线的协同运行。边部加热器控制系统设计的关键在于满足边部加热器与原本产线的协同性，并确保人工介入的可靠性需求。目前投用的控制系统设计已相对成熟，后续改进趋势是与生产管理系统、数字孪生系统等系统协同的信息化、智能化方向发展。

边部加热与绝缘辊道设计之间存在精密的工程耦合关系。电磁感应边部加热器通过感应器在板坯边缘产生交变磁场，从而激发涡流实现定向加热。该过程对辊道绝缘性能提出严苛要求，否则易引发电弧放电现象。在连续加热过程中，辊道作为热传导介质对板坯温度场产生双重影响：一方面，辊道与板坯接触面的热传导造成边缘温度梯度变化；另一方面，辊道材料的电磁参数在高频感应加热中对磁场分布有显著影响。孙长飞等^[17]采用了中空辊结

构的辊道系统, 辊体内部设置冷却通道, 端部通过旋转接头、软管及绝缘套管连接外部管路; 在轴承座与辊道架的接合面以及辊道与电机联轴器的连接部位, 配置绝缘块、绝缘套及绝缘垫圈, 形成多级绝缘防护, 有效抑制了电弧放电, 满足了边部加热设备的兼容性与耦合性要求。

边部加热器关键技术研究展望

➤ 带钢边部-整体智能加热仿真模型的多物理耦合场求解

尽管耦合分析技术已取得显著进展, 但多物理场全耦合求解仍面临计算资源消耗大、收敛性难以保证等挑战。当前研究趋势集中于: (1) 开发快速求解算法; (2) 构建材料物性参数的智能预测数据库; (3) 融合机器学习实现自适应网格划分。随着计算硬件与数值方法的协同进步, 有限元分析将在感应加热工艺的数字孪生体系中发挥更为核心的作用, 推动该技术向更高效、更智能的方向演进。

➤ 控制参数优化研究

智能控制算法的应用可能重塑边部加热工艺调控范式。基于数字孪生的控制系统将实现三大突破: (1) 采用模型预测控制(MPC)算法, 通过集成带钢厚度、速度、温度3个维度的数据, 提升边部温差控制精度; (2) 开发自适应功率分配策略, 通过实时监测集肤效应深度, 动态调整C形边部加热器各相位的电流相位差, 提高加热均匀性; (3) 引入深度强化学习框架, 建立轧辊状态-边部温降-加热功率的多变量映射模型。

➤ 整体工艺设备选型逻辑

设备选型正从“经验驱动”向“数据驱动”转型。典型选型决策树包含以下4大层级: (1) 工艺需求层, 根据钢种特性确定频率范围; (2) 设备性能层, 通过电磁-热-结构耦合仿真评估设备性能; (3) 生产适配层, 结合轧线速度规划加热器动态响应时间, 并结合轧线环境进行配套设计; (4) 全生命周期成本层, 建立包含能效比、维护周期、备件国产化率等指标的多目标优化模型。

➤ 测控智能化改进

配套设备的检测关键——翘扣头检测系统正从传统机械检测手段向光学检测演进。通过工业相机

结合结构光、形状检测模型等新技术, 系统实现了非接触、视觉化的智能检测甚至翘曲曲线预测, 从而从被动检测转向智能化预测, 为工艺优化提供了数据基石^[18-24]。可以预见, 加热器本身结构与辅助设备可借助物联网技术, 结合多传感器的跟踪系统, 实现边部加热系统乃至轧制全周期的智能化检测与控制。信息层面的优化将为全线设备维护与整体工艺、质量优化提供支撑平台^[25-27]。

结束语

通过回顾带钢边部加热技术的发展历程, 揭示了感应加热在提升热轧带钢质量中的核心作用。边部加热技术通过精准补偿边部温降, 可有效提高成材率。多物理场耦合仿真技术的突破, 特别是磁-热-结构全耦合模型的应用, 可有效缩短设计周期并降低设备调试能耗。控制参数的智能化升级, 结合数字孪生与强化学习算法, 正重塑工艺调控范式, 实现从“事后调优”到“事前预测”的跨越; 与此同时, 多元化检测设备的投入, 也推动工艺调控从“人工程序化”向“无人智能化”转变。展望未来, 随着数字孪生等工业前沿技术的融合, 边部加热技术将持续发展, 为高端制造提供更精准、更绿色、更智能的热处理解决方案。

参考文献

- [1] 彭文, 张丽, 李旭东, 等. 边部感应加热过程中的轧件热行为与温度均匀性研究. 机械工程学报, 2024, 60(2): 119
- [2] 黄基彬, 卢杰. 浅谈冷轧机边部电磁感应加热系统. 设备管理与维修, 2023(1): 112
- [3] 焦坤, 富聿晶, 刘宏亮, 等. 炉内边部加热器对热镀锌加P高强度钢力学性能及表面质量的影响. 金属世界, 2021(4): 63
- [4] 任宝鹏, 王磊, 高吉, 等. 边部加热对奥氏体工艺轧制Ti-IF钢冷轧后板形的影响. 江西冶金, 2025, 45(4): 288
- [5] 黄化伟. 电感应加热线圈优化设计及变频电源控制研究[学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2015
- [6] 王剑. 数控钢卷边部加热装置的研究[学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2011
- [7] 崔建利, 黄玲, 赖宏. 边部加热器的主要系统组成及应用. 冶金能源, 2013, 32(3): 38
- [8] 李微. 边部加热器在热轧宽带钢生产中的应用. 冶金设备, 2009(S2): 33
- [9] 白丽杨, 夏小勇, 孙照阳, 等. 边部加热器对低碳软钢产品性能的影响. 安徽冶金科技职业学院学报, 2018, 28(4): 30

- [10] 赵阳, 赵林, 郭薇, 等. 兼顾热轧硅钢边裂与边降的工艺优化//“第十届中国钢铁年会”暨“第六届宝钢学术年会”论文集. 上海, 2015: 715
- [11] 刘洋, 杨荃, 王晓晨, 等. 边部加热器在热轧硅钢生产中的应用与优化. 钢铁, 2016, 51(2): 90
- [12] 张志鸿, 李成亮, 李爱民, 等. 边部加热器在热连轧的应用. 河北冶金, 2021(3): 69
- [13] 张雪彪, 王俊淇, 汪巧. 钢板感应加热工艺中加热顺序对于变形的影响. 西北工业大学学报, 2024, 42(6): 1057
- [14] 张浩. C型边部加热器性能仿真研究[学位论文]. 唐山: 华北理工大学, 2019
- [15] 张世厚. 边部加热器控制系统设计及应用//2009年全国热轧板带生产技术交流会议论文集. 昆明, 2009: 85
- [16] 闫丰梅. 边部加热器配套轧线控制软件的研究与应用. 科技创新与生产力, 2010(6): 95
- [17] 孙长飞, 李久慧. 绝缘辊道的设计. 重型机械, 2017(2): 77
- [18] 沈际海, 张健民. 基于图像测量的热轧板坯翘头头控制系统设计与实现. 冶金自动化, 2013, 37(6): 43
- [19] 王晓晨, 徐细华, 孙伟, 等. 板带热连轧高精度非对称控制技术的研发及应用. 轧钢, 2025, 42(3): 98
- [20] 徐言东, 韩爽, 谢再兴, 等. 棒材生产线的智能化改造与探索. 冶金自动化, 2021, 45(2): 83
- [21] 徐言东, 洪荣勇, 程知松, 等. 棒线材连轧生产线钢坯无头焊接轧制改造模式探讨. 轧钢, 2022, 39(3): 71
- [22] 王晓晨, 徐言东, 程知松, 等. 长材智能工厂建设的架构设计与关键技术. 冶金自动化, 2022, 46(6): 57
- [23] 徐言东, 王晓晨, 程知松, 等. 高速棒材生产线智能化创新建设及其关键技术. 轧钢, 2023, 40(6): 25
- [24] 王晓晨, 白金龙, 徐言东, 等. 长材表面标识字符识别技术研究. 中国重型装备, 2024(4): 38
- [25] 罗兴壮, 罗庆革, 杨剑洪, 等. 节镍型奥氏体不锈钢冷轧断带原因分析及控制措施. 金属世界, 2020(2): 37
- [26] 张建华, 高文刚. 热轧镰刀弯产生原因分析及控制措施. 金属世界, 2013(5): 47
- [27] 聂玉珠, 信晓兵, 李秀景, 等. 薄规格热轧带钢板形影响因素及控制方法. 金属世界, 2013(6): 12
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51975043); 北京市自然科学基金资助项目(3182026); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-19-002A3)。
- 作者简介:** 徐言东(1964—), 男, 学士, 正高级工程师, 1984年毕业于沈阳大学机械制造专业, 主要研究方向: 轧钢设备开发。通信地址: 北京市海淀区学院路30号北京科技大学; E-mail: xuyandong1964@163.com。
- 通信作者:** 白金龙(2001—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 带钢轧制、残余应力表征。通信地址: 北京市海淀区学院路30号北京科技大学; E-mail: 13109862559@163.com。