

关于 4300mm 冷矫直机工艺软件的研发

张伟

太原重工股份有限公司

DOI:10.32629/jsse.v4i3.20985

[摘要] 本文围绕4300mm冷矫直机工艺软件开发展开系统性研究,阐述了项目实施的必要性与推广应用前景,分析了针对国内高端中厚板冷矫直工艺核心技术依赖进口、高强度矫直精度不足、设备运行效率管控薄弱等行业痛点,明确了软件开发的核心目标。针对微张力控制系统构建、矫直能力边界曲线精确预测及矫直机OEE(全局设备效率)数据分析三大关键技术难点,结合弹塑性弯曲理论、多约束非线性优化算法及物联网技术,提出了针对性的技术解决方案与实施路线,为中厚板生产领域冷矫直机工艺软件的国产化研发提供了完整的技术框架与可落地的实施方案,对打破国外技术垄断、提升我国高端装备制造水平具有重要意义。

[关键词] 冷矫直机; 工艺软件; 微张力控制; 矫直能力边界; OEE 分析; 智能化研发

中图分类号: TP317.3 **文献标识码:** A

Research and Development of Process Software for the 4300mm Cold Straightening Machine

Wei Zhang

Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd.

[Abstract] This article conducts a systematic study on the development of software for the 4300mm cold straightening machine process, elaborating on the necessity of project implementation and the prospects for promotion and application. It analyzes the pain points in the domestic high-end medium thick plate cold straightening process, such as the dependence on imported core technology, insufficient straightening accuracy of high-strength steel, and weak equipment operation efficiency control. The core objectives of software development are clarified. Aiming at the three key technical difficulties of constructing micro tension control system, accurately predicting straightening capability boundary curve, and analyzing straightening machine OEE (global equipment efficiency) data, combined with elastic-plastic bending theory, multi constraint nonlinear optimization algorithm, and Internet of Things technology, targeted technical solutions and implementation routes are proposed. This provides a complete technical framework and feasible implementation plan for the localization research and development of cold straightening machine process software in the field of medium and thick plate production, which is of great significance for breaking foreign technological monopolies and improving China's high-end equipment manufacturing level.

[Key words] cold straightening machine; Process software; Micro tension control; Straightening capability boundary; OEE analysis; Intelligent research and development

前言

中厚板作为核电、风电、海工装备、建筑桥梁及工程机械等国民经济关键领域的核心材料,具有品种多样、使用环境复杂、使用性能要求高的显著特点。随着我国国民经济的快速发展,上述关键领域对中厚板的需求量持续增长,对产品质量的要求也不断提升。

近年来,钢铁工业控轧控冷、加速冷却技术广泛应用,中厚板矫直温度逐步降低,部分高端品种钢屈服强度已突破1000MPa,

对冷矫直机的矫直精度与稳定性提出更高挑战。同时,GB/T709-2019《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》新增“较高不平度精度(PF.B)”要求,进一步提高了对冷矫直机工艺模型的标准。传统冷矫直机工艺已难以满足上述要求,亟需通过先进的工艺软件实现矫直过程的精准控制与优化。

冷矫直机是中厚板生产中保证成品板形的关键设备,其工艺先进性直接决定产品质量与交货水平。但长期以来,国内高端冷矫直机工艺软件主要依赖进口,不仅授权费用高昂、后期维护

依赖外方,难以满足国内企业个性化需求,还存在技术安全隐患。因此,研发一套具备自主知识产权的智能化、一体化冷矫直机工艺软件,实现国产化替代,成为当前行业发展的迫切需求。

1 项目背景与应用前景

1.1 项目实施必要性

中厚板热轧后经多道工序处理,内部会产生大量残余应力,进而出现边浪、中浪等板形变形,若不及时矫正会严重影响产品质量甚至导致报废。冷矫直机作为成品板形控制的最后一道关键设备,其工艺软件的性能直接决定产品质量、生产效率与生产成本,是中厚板生产的核心技术环节。

当前,国内冷矫直机工艺软件研发尚处于起步阶段,与国际先进水平差距明显,主要不足体现在四个方面:

第一,传统矫直工艺难以适配高强钢、品种钢,易出现矫直精度不达标、板形缺陷等问题,国内部分企业采用传统工艺矫直高强钢时,产品合格率仅为85%左右,远低于国际先进水平的98%以上。

第二,缺乏精准的矫直能力边界预测模型,传统经验公式预测精度低,无法精准判断设备对不同规格、材质钢板的适配性,导致设备产能利用率偏低,甚至出现过载运行,缩短设备使用寿命。

1.2 推广应用前景

中厚板广泛应用于国民经济关键领域,其市场需求与国民经济发展密切相关。目前,工业发达国家中厚板需求量占钢材总产量的14%~16%,日本达20%,我国当前占比为12.5%~15%,预计未来5年内将提升至16%~18%,市场增长空间显著。在国家“高端装备制造”“钢铁工业高质量发展”政策导向下,国内钢铁企业加快产品结构升级,高端品种板产量占比预计提升至10%~15%,进一步带动冷矫直机市场需求。当前国内冷矫直机年市场需求量保持在1亿~3亿元,且每年以8%~10%的速度增长。

2 研究现状与发展趋势

2.1 研究现状

国际上,德国、日本等工业发达国家在冷矫直机工艺软件研发方面技术成熟,以德国西门子、日本三菱为代表的企业,其软件可实现低碳钢、低合金钢矫直的高精度控制,能自动优化矫直参数,具备完善的设备效率分析功能。但国外企业对核心技术严格封锁,软件授权及维护成本高,且对国内高强钢、品种钢适配性较差,难以满足国内企业需求。

国内冷矫直机工艺软件研究尚处于起步阶段,多数企业依赖进口软件或传统经验化矫直工艺,自主研发能力较弱。部分科研院所与企业的研发成果多停留在实验室阶段,缺乏现场应用验证,难以产业化推广,主要差距体现在:现有软件对高强钢、品种钢适配性差;缺乏精准的矫直能力边界量化分析模型;未建立OEE数据分析体系;同时存在研发投入不足、专业人才短缺、产学研结合不紧密等问题,成果转化率较低。

2.2 发展趋势

随着我国钢铁工业向高端化、智能化、绿色化转型,冷矫直机工艺软件作为核心控制系统,呈现出三大发展趋势:

一是智能化,依托人工智能、大数据、物联网技术,建立多物理场耦合矫直模型,利用智能算法实现矫直参数自适应优化,减少人工干预,提升矫直精度与稳定性。

二是一体化,整合在线控制与离线分析功能,实现与二级控制系统、MES系统实时通讯,打通生产数据链路,实现生产全流程管控。

三是高效化,引入OEE数据分析体系,精准识别生产损耗环节,优化生产流程,降低停机损耗与次品率,提升设备产能利用率,实现节能降耗与提质增效。

3 项目研究

本项目研究一套适配4300mm冷矫直机的高端工艺软件,填补国内相关技术空白,实现冷矫直机工艺软件国产化,提升我国中厚板生产的智能化水平与产品竞争力,具体研究分为两个方面:

一是软件功能目标。开发一套可覆盖厚度5mm~25mm、宽度1500mm~4200mm、屈服强度 $\leq 1200\text{MPa}$ 中厚板的冷矫直机工艺软件,支持在线与离线两种使用模式。在线模式可与二级控制系统实时通讯,自动优化矫直参数;离线模式可进行参数模拟、工艺优化与数据复盘。软件具备微张力控制、矫直能力边界预测、OEE数据分析等核心功能,适配多种机型,具备拓展功能,操作界面简洁友好。

二是矫直精度目标。软件应用后,钢板不平度满足GB/T709-2019“较高不平度精度(PF.B)”等级要求,钢板表面无明显缺陷,残余应力 $\leq 150\text{MPa}$,产品合格率提升至98%以上,达到国际先进水平。

4 关键技术难点

4.1 微张力控制系统构建

4.1.1 技术难点

微张力控制系统构建面临的主要技术难点包括:一是多辊单独传动的参数设定复杂、相互影响因素多,易出现超调与系统震荡。二是在咬钢、抛钢阶段,钢板精细跟踪及负荷分配电机切入/切出配合难度大。三是品种钢、高强钢基础性能参数缺失导致矫直扭矩与矫直力预测误差较大。此外,负载时矫直机设备会发生复杂的弹性变形,进一步影响微张力控制精度,传统控制方法难以适配。

4.1.2 解决方案

针对上述技术难点,结合弹塑性弯曲理论与现场生产经验,提出以下解决方案:

一是基于弹塑性弯曲理论,建立辊组速度差辊式矫直过程解析模型。通过分析钢板在矫直过程中的弹塑性变形规律,明确各辊速度与压下量、钢板材质(屈服强度、弹性模量)、矫直温度等参数的量化关系,推导微张力控制的数学表达式,为微张力的精准控制提供理论支撑。

二是通过现场数据采集,建立工艺参数数据库。采集不同规格、材质(普通碳素钢、高强钢、品种钢)钢板的矫直工艺参数,包括压下量、矫直速度、微张力、矫直扭矩、矫直力等,建立完善的工艺参数数据库,为微张力控制算法的优化提供数据支撑。

三是开发自适应负荷分配算法,实现微张力稳定控制。基于解析模型与工艺参数数据库,开发自适应负荷分配算法,实时采集各矫直辊的运行状态与钢板的矫直情况,动态调整各电机的负荷比例与速度,确保微张力稳定在合理范围内,有效抑制系统震荡与参数超调问题。

4.2 矫直能力边界曲线精确预测

4.2.1 技术难点

矫直能力边界曲线精确预测面临的主要技术难点包括:一是多约束非线性优化问题求解难度大。二是受钢板厚度、宽度、屈服强度、弹性模量、矫直速度、压下量等多种参数影响因素多,预测误差大。三是缺乏有效的边界搜索方法,无法快速获取不同厚度钢板对应的最大可矫屈服强度。此外,矫直辊在矫直力作用下需克服轴承摩擦阻力、辊面与轧件间的滚动摩擦阻力及轧件塑性变形阻力,这些阻力的量化计算难度大,进一步增加了边界预测的复杂度。

4.2.2 解决方案

针对上述技术难点,采用多约束非线性优化算法与曲率积分法相结合的方式,提出以下解决方案:

一是建立多约束非线性优化模型。以钢板屈服极限最大化为目标函数,以辊系压下量、各辊反弯曲率及接触角为设计变量等条件,建立多约束非线性优化模型。

二是采用曲率积分法开展边界搜索,优化搜索效率。先读取钢板厚度值,设定初始压下量与屈服强度;其次计算当前参数下的塑性变形率,判断是否接近期望值(误差 $\leq 2\%$);

三是结合有限元模拟与现场试验,校准模型参数。利用ANSYS等有限元分析软件,建立冷矫直机矫直过程的三维有限元模型用于模拟不同矫直过程。

四是开发边界曲线可视化模块,提升实用性。直观展示不同厚度钢板对应的最大可矫屈服强度,方便现场操作人员快速判断钢板的可矫性,合理安排生产计划,提升设备产能利用率。

4.3 矫直机OEE数据分析

4.3.1 技术难点

矫直机OEE数据分析面临的主要技术难点包括:一是数据采集,如:设备运行时间、维护时间、产品产量、次品率等海量数据,且数据需关联班次、员工、设备、产品等多要素流程复杂,难以实现多要素关联。二是国内冷矫直机领域尚未建立标准化的OEE数据分析体系,缺乏成熟的应用案例。三是数据处理难度大,难以实现损耗的量化统计。

4.3.2 解决方案

针对上述技术难点,构建“数据采集-数据处理-分析应用”的全流程OEE数据分析体系,提出以下解决方案:

一是搭建现场数据采集系统,实现多要素数据精准采集。实时采集冷矫直机的运行状态(运行、停机、调试)、生产数据(矫直钢板数量、规格、时间、速度)、质量数据(次品数量、缺陷类型、缺陷原因)及设备维护数据(维护时长、故障原因、维护人员)。

二是建立标准化的OEE数据分析体系,统一计算标准与分析方法。可用率=(运行时间-停机时间)/运行时间 $\times 100\%$,表现性=(实际生产速度/理论生产速度) $\times 100\%$,质量指数=(合格产品数量/总生产数量) $\times 100\%$ 。实现损耗的量化统计。

5 软件整体开发与系统实现

基于上述核心技术模型与算法,完成4300mm冷矫直机智能化工艺软件整体开发,采用分层模块化架构设计,整体分为数据采集层、模型运算层、控制执行层、可视化应用层四大层级,各层级独立运行、数据互通,保障系统运行的稳定性与拓展性。

软件开发完成后,依托4300mm冷矫直机工业生产线开展多轮调试与试运行,持续优化算法参数、修复运行bug、优化人机交互逻辑。经过现场迭代验证,软件运行稳定可靠,参数响应及时,各核心功能模块协同运行顺畅,可完全适配不同规格、不同材质中厚板的矫直生产需求,各项技术与质量指标均达到预设目标,满足工业化规模化应用条件。

6 结论

本文以4300mm冷矫直机为研究对象,系统分析了项目应用前景,梳理了国内外研究现状与发展趋势,重点攻克了微张力控制、矫直能力边界预测及OEE数据分析三大关键技术难点,提出了科学可行的解决方案,形成了一套适配高端中厚板生产的国产化工艺软件。

从行业层面看,本项目成果可广泛应用于新建及现有中厚板生产线升级,降低我国钢铁工业对国外工艺软件的依赖,推动中厚板产品质量与生产效率双重提升,为国民经济关键领域提供高质量材料保障,具有显著的技术价值、经济效益与社会效益。未来可进一步拓展软件适配范围,持续提升其通用性与智能化水平,为我国钢铁工业高质量发展提供技术支撑。

【参考文献】

- [1]王建军,李建明,张勇.冷矫直机工艺控制技术研究进展[J].钢铁,2020,55(7):1-10.
- [2]西门子(中国)有限公司.冷矫直机智能化控制系统解决方案[R].2019.
- [3]刘军,赵伟,陈亮.基于弹塑性弯曲理论的微张力控制模型研究[J].机械工程学报,2021,57(12):156-163.
- [4]张宏,李丽,王强.冷矫直机矫直能力边界曲线预测方法[J].重型机械,2020,(4):32-37.
- [5]李明,赵刚.设备全局效率(OEE)在冷矫直机中的应用研究[J].冶金设备,2019,(5):45-49.
- [6]中华人民共和国国家标准.GB/T709-2019热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [7]三菱重工株式会社.冷矫直机工艺软件技术手册[Z].2018.
- [8]陈勇,周强,吴娜.高端冷矫直机工艺软件国产化研发实践[J].中国机械工程,2022,33(8):956-963.

作者简介:

张伟(1977—),男,汉族,山西新绛人,本科,职称:中级工程师,从事的研究方向:冶金设备技术专家。