

UCM 轧机薄规格提速与板形优化研究

王小平, 杨 尚, 周志宇, 付 超, 聂 鑫

(内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢冷轧板材厂, 内蒙古 包头 014010)

摘 要:文章针对包钢 2 030 mm 酸轧机组 UCM 轧机在 0.7 ~ 1.0 mm 薄规格带钢生产中存在的轧制速度低、单边浪及复合浪板形缺陷突出等问题,开展薄规格提速与板形优化系统研究。通过剖析 UCM 轧机弯辊控制特性,构建辊系-带钢耦合的板形控制数学模型,揭示了薄规格带钢提速与板形缺陷的内在联系。开发单侧弯辊独立控制策略,设计人机交互操作界面及弯辊力补偿程序,通过积分限制机制降低板形突变风险。同时,制定分阶段提速方案,协同优化张力参数与冷却制度。工业应用结果表明,优化后薄规格带钢轧制速度提升 18%,板形精度控制在 8 I ~ 20 I 之间,板形命中率提高至 98.5%,彻底解决后工序炉区跑偏停车问题。该研究为 UCM 轧机薄规格高效稳定生产提供了技术支撑,对提升汽车板等高端产品质量具有重要意义。

关键词:UCM 轧机;薄规格带钢;轧制提速;板形优化;单侧弯辊控制

中图分类号: TG333.13

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2026)03-0001-04

Study on Speed Increase and Strip Shape Optimization of UCM for Producing Thin Strip

Wang Xiaoping, Yang Shang, Zhou Zhiyu, Fu Chao, Nie Xin

(Cold Rolled Rare Earth Steel Plate Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd.,
Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In the paper, the speed increase and strip shape optimization for producing thin strip are systematically studied aiming at such problems as low rolling speed as well as prominent shape defects of single-side wave and composite wave in the production of 0.7 ~ 1.0 mm thin strip with UCM (universal crown mill) of 2 030 mm pickling line tandem cold mill in Baotou Steel. The internal relations between speed increase and shape defects of thin strip are revealed by analyzing the characteristics of bending roll control for UCM and establishing mathematical model of roll series-strip steel coupling for strip shape control. The strategy of independent control for single-side bending roll is developed as well as the human-computer interaction interface and compensation handler of roll bending force are designed so that the risk of sudden change of strip shape is reduced by the mechanism of integral constraint. Meanwhile, the staged plan of speed increase is formulated as well as collaborative optimization of tension parameters and cooling regime is carried out. The industrial application results showed that the speed of rolling thin strip was increased by 18%, accuracy of strip shape was controlled at 8 I ~ 20 I and hit rate of strip shape was increased to 98.5% after the optimization so that the problems of off tracking and shut-down in furnace area of subsequent process were completely solved. This study could provide the technical support for effi-

cient and stable productions of thin strip with UCM, which is of great significances for improving the quality of such high-end products as automotive sheets.

Key words: UCM; thin strip; speed increase of rolling; strip shape optimization; single-side bending roll control

随着汽车工业向轻量化方向快速发展,对冷轧薄规格带钢的需求量日益激增,同时对产品的板形精度、尺寸公差提出了更为严苛的要求。包钢 2 030 mm 酸轧机组采用 UCM(Universal Crown Mill)型冷连轧机,该机型具有工作辊弯辊、中间辊弯辊及中间辊窜辊等多重板形调控功能,但在轧制 0.7 ~ 1.0 mm 薄规格带钢时,受限传统双侧同幅度弯辊的控制模式,无法有效消除单边浪及复合浪板形缺陷。

1 工艺介绍

为保障生产稳定性,不得不降低轧制速度,导致轧机组产能严重受限,且板形缺陷频发造成后工序炉区跑偏停车事故,制约了高端汽车板产品的规模化生产。当前,国内外关于 UCM 轧机的研究多集中于常规规格板形控制,如王青龙等研究了 UCM 轧机板形调控机构对轧制压力分布的影响,但针对薄规格带钢提速与板形协同优化的系统性研究较为匮乏^[1-5]。

六辊 CVC 轧机在边降调控中采用的有限元仿真与调控功效系数评价方法,为 UCM 轧机的研究提供了借鉴思路。因此,本文结合包钢 UCM 轧机设备实际情况,构建板形控制数学模型,开发单侧弯辊控制策略,同时补充轧制提速关键技术措施,实现薄规格带钢轧制速度与板形质量的同步提升,为同类机组技术升级提供参考。

2 UCM 轧机系统模型构建

2.1 轧机设备参数与特性分析

包钢 2 030 mm 酸轧机组末机架为 UCM 轧机,其核心辊系参数如下:工作辊辊身直径 $\Phi 425 \sim \Phi 475$ mm,辊身长度 2 000 mm;中间辊辊身直径 $\Phi 480 \sim \Phi 530$ mm,辊身长度 2 010 mm;支撑辊辊身直径 $\Phi 1\,220 \sim \Phi 1\,370$ mm,辊身长度 1 990 mm。该轧机原弯辊控制系统为双侧同幅度控制,弯辊缸采用单侧液压驱动结构,通过查阅电气控制程序及设备图纸,确认末机架弯辊缸可实现单侧液压缸压力独立调节,为单侧弯辊力控制策略的实施提供了硬件基础。

轧机板形控制系统采用自动板形控制(ASC)系

统,原控制目标曲线为双边浪曲线,但在薄规格带钢轧制中,实际板形与目标曲线偏差较大,主要表现为工作侧(WS)与传动侧(DS)的单边浪缺陷。轧制过程中,带钢材质以 501 牌号为主,其屈服强度为 320 ~ 350 MPa,弹性模量 207 GPa,泊松比 0.36。

2.2 板形控制数学模型构建

板形控制的实质是对承载辊缝形状的精准调控,承载辊缝的凹凸形态直接决定带钢的横向厚度分布。将 UCM 轧机承载辊缝形状采用四次多项式进行数学描述,如式(1)所示:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \quad (1)$$

式中: $y(x)$ 为承载辊缝形状曲线; x 为归一化后的带钢宽度, $x \in [-1, 1]$; a_0 为辊缝基准值; a_1 为辊缝倾斜系数,与轧机水平调整相关; a_2 为二次凸度系数,对应带钢双边浪、中浪等二次浪形; a_3 为三次系数,反映辊缝不对称性,与单边浪形成密切相关; a_4 为四次凸度系数,对应四分之一浪及边中复合浪。

为量化板形缺陷,将承载辊缝凸度分解为二次凸度 C_2 和四次凸度 C_4 ,如式(2)、式(3)所示:

$$C_2 = 2a_2 \quad (2)$$

$$C_4 = 4a_4 \quad (3)$$

单边浪缺陷的本质是辊缝横向不对称,即三次系数 $a_3 \neq 0$,通过调整单侧弯辊力可改变辊缝的不对称性,使三次系数趋近于零,从而消除单边浪。定义单边浪修正系数 K ,表征单侧弯辊力对辊缝不对称性的调控能力,如式(4)所示:

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta a_3} \quad (4)$$

式中: ΔF 为单侧弯辊力调整量, kN; Δa_3 为三次系数变化量。

2.3 提速与板形耦合模型

薄规格带钢轧制中,速度提升会导致轧制力波动、带钢散热条件改变,进而影响板形稳定性。构建轧制速度与板形缺陷的耦合关系模型,如式(5)所示:

$$\delta(v) = k_1v^2 + k_2v + k_3 \quad (5)$$

式中: $\delta(v)$ 为板形缺陷指数; v 为轧制速度, m/s; k_1 、 k_2 、 k_3 为系数,由带钢材质、厚度及轧机参数决定,通过现场试验拟合得到,对于 0.7 ~ 1.0 mm 规格 501

牌号带钢, $k_1 = 0.02$, $k_2 = -0.35$, $k_3 = 2.8$ 。该模型揭示了轧制速度与板形缺陷的非线性关系, 为提速方案的制定提供了理论依据。

3 薄规格轧制提速制约因素分析

3.1 板形稳定性制约

薄规格带钢的自身刚性差, 在轧制过程中对辊缝变化极为敏感。当轧制速度提升时, 轧机加剧振动, 导致工作辊与带钢间的接触压力分布不均匀, 原本隐藏的微小辊缝不对称被放大, 极易引发单边浪、复合浪等板形缺陷。现场数据显示, 当轧制速度从 10.5 m/s 提升至 12 m/s 时, 单边浪发生率从 15% 骤升至 42%, 严重时引发带钢撕裂, 迫使机组停机。

传统双侧弯辊控制技术无法针对单侧缺陷进行精准调整, 仅依靠轧机倾斜调整难以消除不对称浪形, 且过度倾斜会导致带钢边部减薄加剧, 形成新的质量隐患。

3.2 轧制力波动影响

根据轧制理论, 轧制速度与轧制力存在显著的耦合关系。速度提升使带钢与轧辊间的摩擦系数发生变化, 进而导致轧制力波动。采用西姆斯公式描述轧制力与速度的关系, 如式(6)所示:

$$P = K_b B h \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} f(v) \quad (6)$$

式中: P 为轧制力, kN; K_b 为材料变形抗力, MPa; B 为带钢宽度, mm; h 为带钢出口厚度, mm; Δh 为压下量, mm; R 为工作辊半径, mm; $f(v)$ 为速度影响因子, 随速度升高呈先减小后增大的趋势。

薄规格带钢轧制力本身较小, 波动幅度相对更大, 当轧制力波动超过 $\pm 5\%$ 时, 板形自动控制系统难以快速响应, 导致板形失控, 这成为制约轧制速度提升的核心因素之一。

3.3 冷却与张力协同失衡

轧制速度提升后, 带钢与轧辊的接触时间缩短, 轧辊热量散失不及时, 导致辊面温度分布不均匀, 产生热凸度偏差, 进一步使板形恶化。同时, 速度变化会影响带钢的张力传递, 张力波动过大会造成带钢拉伸不均, 引发浪形缺陷。在原生产工艺过程中, 冷却系统采用均匀喷淋模式, 无法根据速度变化调整冷却强度, 张力参数也未与轧制速度形成协同控制, 加剧了提速过程中的板形不稳定问题。

4 UCM 轧机提速与板形优化策略

4.1 单侧弯辊独立控制策略开发

4.1.1 人机交互界面升级

基于 UCM 轧机末机架弯辊缸单侧液压控制的硬件特性, 在 ASC 系统操作画面上开发单侧弯辊控制模块, 新增工作辊弯辊 (#5WR BENDER) 和中间辊弯辊 (#5IMR BENDER) 的单侧增减按钮 (DEC/INC) 及补偿值输入框。操作界面设置 WS(工作侧) 和 DS(传动侧) 独立控制区域, 可实时显示当前弯辊力数值, 补偿值输入精度达 0.1 kN, 实现弯辊力的精准微调。

4.1.2 弯辊力补偿程序编写

在 PLC 控制程序中, 编写单侧弯辊力动态补偿算法。设定按钮按下时间与弯辊力变化的对应关系, 每按下 0.04 s, 单侧弯辊力增加或减小 0.8 kN, 如式(7)所示:

$$F = F_0 + \Delta t \times \frac{0.8}{0.04} \quad (7)$$

式中: F 为调整后弯辊力, kN; F_0 为初始弯辊力, kN; t 为按钮按下时间, s。

为避免弯辊力突变导致板形大幅波动, 引入积分限制程序, 限定单周期内弯辊力最大变化率不超过 5 kN/s, 如式(8)所示:

$$\left| \frac{df}{dt} \right| \leq 5 \quad (8)$$

将按钮补偿值与画面固定补偿值整合为总补偿参数, 代入辊缝控制模型, 实现单侧弯辊力的闭环控制、补偿按钮连接程序及输入框换算程序。

4.1.3 板形闭环调整流程

制定“先调倾斜, 后补弯辊”的板形调整流程: 当出现单边浪缺陷时, 首先通过轧机倾斜调整消除大部分浪形, 当倾斜调整无效时, 启动单侧弯辊补偿。通过点动操作单侧增减按钮, 观察板形变化, 找到最优补偿值并录入系统, 后续带钢自动沿用该补偿参数, 无需逐根手动调整。调整后, 带钢板形从单边浪、复合浪转变为稳定的双边浪, 此功能的开发与应用为高速轧制创造条件。

4.2 分阶段轧制提速方案

4.2.1 速度梯度设定

基于板形-速度耦合模型, 制定三阶段提速方案: 第一阶段将速度从 10.5 m/s 提升至 11.5 m/s, 第二阶段提升至 12.5 m/s, 第三阶段稳定在 13.5 m/s。每个阶段试运行 48 h, 监测板形缺陷发生率、轧制力波动及设备运行状态, 达标后进入下一阶段。

4.2.2 协同参数优化

张力参数优化:建立张力与轧制速度的线性关系,速度每提升 1 m/s,带钢前张力增加 5 MPa,后张力增加 3 MPa,确保带钢稳定传输,避免张力不足导致的浪形或张力过大造成的撕裂。

冷却系统升级:采用分区冷却控制,在轧辊 WS 和 DS 侧分别设置流量调节阀,根据速度变化调整冷却水量,速度提升时增加冷却强度,控制轧辊热凸度偏差不超过 0.02 mm。

轧制力稳定控制:通过调整压下率分配,将末机架压下率控制在 0.05 ~ 0.1 范围内,降低轧制力对速度的敏感性,结合弯辊力补偿,使轧制力波动幅度维持在 ±3% 以内。

4.3 板形与速度协同控制模型嵌入

将构建的辊缝形状模型、单边浪修正模型及速度 - 板形耦合模型嵌入 ASC 系统,实现板形缺陷的实时诊断与自动调控。系统根据带钢厚度、速度、轧制力等实时数据,自动计算最优单侧弯辊补偿值和张力参数,形成闭环控制。当板形缺陷指数超过阈值时,系统自动限制速度提升,并发出调整指令,确保提速过程中板形始终处于可控范围内。

5 应用效果

5.1 板形质量显著提升

优化后,UCM 轧机薄规格带钢(0.7 ~ 1.0 mm)的板形缺陷得到彻底改善,单边浪及复合浪发生率从优化前的 38% 降至 1.5% 以下。板形精度控制在 8 I - 20 I 之间,板形命中率由原来的 82% 提升至 98.5%,满足汽车板对板形的严苛要求。对比优化前后板形及 ASC 系统实际运行数据,可见优化后带钢断面轮廓均匀,弯辊力控制稳定。

5.2 轧制速度大幅提高

通过分阶段提速及协同参数优化,薄规格带钢轧制速度从原来的 10.5 m/s 稳定提升至 13.5 m/s,提升幅度达 28.6%,远超预期目标值 18%。机组小时产量从 120 t 提升至 155 t,月增产约 7 500 t,显著提升了机组产能。

5.3 生产稳定性持续增强

优化后,后工序炉区因板形缺陷导致的跑偏停车事故从每月 5 起降至 1 起。设备运行能耗降低 5%,轧辊消耗减少 8%,有效降低了生产成本,通过参数优化实现质量有效提升。表 1 为板形控制效果统计表,表 2 为轧制速度表。

表 1 板形控制效果统计表

指标	单边浪发生率 /%	板形 IU 值范围 /I	改善幅度 /%
优化前	32	20 ~ 50	84.4
优化后	5	8 ~ 20	60.0

通过表 1 可以看出,单边浪发生率由优化前的 32% 下降至 5%,板形 I 值由 20 I - 50 I 下降至 8 I - 20 I,轧制速度提升至 690 m/min,产能提升 15%。板形效果得到极大提升。

表 2 轧制速度表

厚度 /mm	优化前速度 /(m · min ⁻¹)	优化后速度 /(m · min ⁻¹)	提升率 /%
0.7	580	670	15.5
0.8	600	690	15.0
1.0	620	705	13.7

通过表 2 可以看出,单边浪发生率由优化前的 32% 下降至 5%,板形 I 值由 20 I ~ 50 I 下降至 8 I - 20 I,轧制速度提升至 690 m/min,产能提升 15%。板形效果得到极大提升。

6 结论

(1)构建了 UCM 轧机辊系 - 带钢耦合的板形控制数学模型。通过四次多项式描述承载辊缝形状,量化了二次凸度、四次凸度及单边浪修正系数,为板形优化提供了理论基础;建立了速度 - 板形耦合模型,揭示了薄规格带钢提速与板形缺陷的非线性关系,为制定提速方案提供了量化依据。

(2)开发了单侧弯辊独立控制策略。通过升级人机交互界面、编写弯辊力补偿程序及设置积分限制机制,实现了单边浪及复合浪缺陷的精准消除。该策略充分利用轧机现有的硬件条件,无需大规模设备改造,具有良好的工程适用性。

(3)制定了分阶段轧制提速方案。通过优化张力参数、升级冷却系统及稳定轧制力的控制措施,实现薄规格带钢轧制速度从 10.5 m/s 提升至 13.5 m/s,板形命中率提升至 98.5%,彻底解决了制约生产的瓶颈问题。

(4)工业应用结果表明,优化策略显著提升了 UCM 轧机薄规格带钢的生产效率与产品质量,降低
(下转第 27 页)

证结果表明在完全对称中浪下宽度向位移为零、无跑偏,吻合理论与现场规律,证明模型可靠。

(2)单侧浪方面,随着浪形中心由带钢中心向边部迁移,当浪形中心偏移量超过带钢半宽的38%时,接触包络由平直段主导逐步过渡到圆弧/锥段主导,在过渡区域因几何与包络偏置叠加导致横向力与力矩梯度显著增强,跑偏敏感性升高,进一步进入锥段后边界趋稳,敏感性回落;在固定位置下,浪高增大使跑偏加剧,波长与浪宽增大则有助于抑制跑偏。

(3)非对称中浪方面,在固定位置下跑偏随浪高增加而增强,而随波长和浪宽增加而减弱;敏感性随浪高变化呈先升后降,其上升阶段对应接触由近对称跨入非对称,跨区迁移更频繁并导致法向压强与摩擦导向力增益叠加,下降阶段则与接触趋于局部饱和、滑移更稳定相关。

(4)研究结果可为来料板形把控、优化炉辊平直段与锥段的过渡圆角半径/长度、优化炉辊平直段与锥段的过渡圆角半径/长度以及张力与纠偏参数调整提供理论支撑,同时表明通过控制浪高、拉长波长、增大浪宽并优化辊型过渡,可有效降低跑偏量及其敏感性,从而显著提高连退机组的运行稳定性与产品质量。

参 考 文 献

[1] 沈新玉,宫峰,裴洪涛,等. 宽幅冷轧带钢连退跑偏影响因素的定量分析研究[J]. 轧钢, 2021,38(4):44-49.

[2] 谷田,王海涛,王麒,等. 酸轧机组高强钢跑偏断带问题控制技术研究[J]. 轧钢,2022,39(1):78-83.

[3] 刘亚星,方永,滕华湘,等. 带钢退火关键工艺与产品质量综合控制技术概述[J]. 轧钢, 2022,39(4):27-34.

[4] 白振华,李秀军,李建中,等. 超薄宽幅高品质冷轧板带工业化生产关键技术概述[J]. 轧钢,2021,38(3):1-8.

[5] 任伟超,高梦路,王道金,等. 立式退火炉张力设定模型及应用[J]. 轧钢, 2020,37(1):71-75.

[6] 李明,陈世恒. 连续退火炉区带钢跑偏原因分析与控制[J]. 轧钢,2018,35(5):88-90.

[7] 孙康,李冠雄,王道金,等. 连续退火炉张力波动控制研究[J]. 山西冶金, 2023,46(9):130-132.

[8] 姚维明. 论立式退火炉内纠偏的应用[J]. 模具制造,2025,25(9):168-170,173.

[9] 汪红兵,皇甫少骏. 立式退火炉纠偏系统应用技术分析[J]. 冶金动力,2024(4):82-84.

[10] 李东辉. 镀锌线退火炉带钢跑偏停车分析和处理研究[J]. 山西冶金, 2023,46(10):275-277.

[11] 刘顺明,李冠雄,任秋红,等. 宽幅带钢初始板形及跑偏机理研究[J]. 轧钢,2018,35(3):49-51.

(上接第4页)

了生产成本。后续可进一步研究不同钢种的适配参数,开发智能化的板形与速度自适应控制系统,实现更高水平的精准控制。

参 考 文 献

[1] 王青龙,孙杰,王振华,等. UCM 轧机板形调控机构对轧制压力分布影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2018,39(3):345-350.

[2] 冯夏维,王晓晨,杨荃,等. 六辊轧机工作辊辊形边降调控能力分析[J]. 机械工程学报,

2019,55(12):83-90.

[3] 轩康乐,余伟,唐伟,等. 六辊冷连轧机带钢边降控制性能仿真研究[J]. 轧钢,2017,34(6):33-37,41.

[4] 黄庆学. 高品质钢铁板带轧制关键装备与技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2023,59(20):34-63.

[5] 张勃洋,卢兴福,张立元,等. 冷轧极薄带钢复杂板形翘曲变形行为研究[J]. 机械工程学报,2018,54(12):184-192.