

UCMW 机组冷连轧过程板形形成机理及预报模型

宋君¹, 董广², 丁相阳³, 王奎越¹, 曹忠华¹, 孙杰³

(1. 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102211; 2. 鞍钢股份有限公司 数智发展部, 辽宁 鞍山 114021;
3. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 针对带钢横向方向不均匀塑性变形引起的带钢板形缺陷, 对冷连轧过程中带钢板形问题展开机理研究, 考虑前后机架带钢的遗传特性, 建立适合于 UCMW (Universal Crown Mill with Work roll shifting) 机组的冷连轧过程板形预报模型, 实现对冷连轧机组各个机架出口板形的定量预报, 为分析板形影响因素提供理论基础。结果显示, 板形预报曲线与实测结果的分布趋势相同, 单元预报误差在 2 I 以内, 整体板形误差在 4 I 以内, 说明该模型具有较高的预报精度, 能够满足现场生产板形情况的预报需求与模拟分析。通过准确的板形预报, 可以实现对带钢板形缺陷的有效控制, 从而直接提高产品的平整度和表面质量。

关键词: UCMW 机组; 冷连轧; 带钢; 板形预测; 辊系变形; 预报模型

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.07.026

中图分类号: TG335.12

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 07-0243-08

Formation mechanism and prediction model of strip flatness in cold tandem rolling process of UCMW mill

Song Jun¹, Dong Guang², Ding Xiangyang³, Wang Kuiyue¹, Cao Zhonghua¹, Sun Jie³

(1. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China;

2. Digital Intelligence Development Department, Angang Steel Company Limited, Anshan 114021, China;

3. The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: For the strip flatness defects problem of strip steel caused by uneven plastic deformation in the transverse direction of strip steel, the mechanism for the strip flatness problem of strip steel during the cold tandem rolling process was studied. Considering the hereditary characteristics of strip steel between stands, a strip flatness prediction model suitable for UCMW (Universal Crown Mill with Work roll shifting) was established for the cold tandem rolling process, which realized the quantitative predictions of strip flatness at the exit of each stand in the cold tandem rolling mill and provided a theoretical basis for analyzing the factors influencing the strip flatness. The results show that the predicted strip flatness curves are consistent with the measured distribution trends, with the unit prediction errors within 2 I and the overall strip flatness errors within 4 I. This indicates that the model has high prediction accuracy and can meet the requirements for predicting the strip flatness condition in actual production and simulation analysis. The strip flatness defects of strip steel are controlled effectively by the accurate strip flatness prediction, which directly improves the flatness and surface quality of the product.

Key words: UCMW mill; cold tandem rolling; strip steel; strip flatness prediction; roll system deformation; prediction model

作为工业制造的关键基础材料, 冷轧带钢以其优异的力学性能和较高的表面光滑度被广泛应用于多个重要行业, 如汽车制造、建筑业、家用电器、电子产品制造及轻工业等^[1]。这些行业对冷轧带钢的高质量和高产量有着迫切需求, 这不仅是现代经

济发展的需求, 也体现了国家在钢铁行业的实力。冷轧过程中的板形控制是一大技术挑战, 它结合了轧制技术、机械工程及计算机控制等多学科知识, 成为了国际上众多学者不断研究的重要领域^[2]。板形是衡量冷轧带钢产品质量的重要指标之一, 也是决定其市场竞争力的关键因素。良好的板形质量可以保证产品尺寸精度、表面质量和外观一致性, 提高产品的使用价值和市场竞争力。反之, 不良的板形可能导致产品尺寸不一致、表面瑕疵、成品品质下降, 甚至无法满足客户的需求, 严重影响产品的市场竞争力和企业的声誉。冷连轧过程中, 板形的

收稿日期: 2024-06-05; 修订日期: 2024-06-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFB3304800)

作者简介: 宋君 (1980-), 男, 博士, 教授级高级工程师

E-mail: junjun.s@163.com

通信作者: 孙杰 (1984-), 男, 博士, 教授

E-mail: sunjie@ral.neu.edu.cn

形成涉及到多种因素的复杂相互作用。其中, 轧机辊系的弹性变形、轧制参数的调整、材料的塑性变形等因素均会对板形产生影响。通过深入理解板形的形成机理^[3], 可以为制定有效的板形控制策略提供科学依据。因此, 针对板形预测与控制的研究大量涌现。

卜赫男等^[4]应用粒子群算法优化小波神经网络, 并以此网络为基础学习器, 使用 Bagging 方法构建了一个集成学习预测模型, 旨在预测冷连轧带钢的板形。该研究对比了这一集成学习预测模型与未优化的小波神经网络以及单独学习器的效果, 结果表明, 集成学习预测模型在预测带钢出口板形的准确性和泛化能力方面均表现得更为优越, 与实际测量值的差异也更小。丁肇印等^[5]提出了一种冷轧带钢板形预测的新模型, 该模型基于类别特征的梯度提升算法, 并通过贪婪搜索与交叉验证方法优化超参数。并将这一模型与自适应提升模型、梯度提升决策树和深度神经网络模型进行了比较, 结果表明, 类别特征梯度提升模型的均方根误差为 0.666 I, 90.397% 样本点的预测结果的绝对误差小于 1 I, 显示了其在冷轧带钢板形预测中的优越鲁棒性和高准确性。张文雪等^[6]提出了一种基于动态矩阵控制 (Dynamic Matrix Control, DMC) 算法的冷轧板形多变量模型预测控制方法, 并建立了预测模型。利用偏最小二乘 (Partial Least Squares, PLS) 和主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 计算的板形调控功效系数进行了验证, 并对比了同一套轧机在输入 PLS 和 PCA 计算功效系数时的模拟模型匹配和失配情况。通过两条不同趋势的板形偏差曲线, 分别输入至 DMC、最优控制算法和遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 模型, 进行板形优化效果对比。结果显示, DMC 模型在匹配时的标准差为 0.63 和 0.25 I, 失配时的标准差为 2.20 和 1.81 I, 调节时间约为 100 ms, 证明了其具有高精度和高效率。张殿华等^[7]指出, 现有数学模型难以充分描述板形控制的非线性和强耦合特征, 同时钢铁大数据中的价值未被充分挖掘, 为了提高板形控制水平, 设计了一种结合经验模态分解和小波变换的轧制数据降噪方法, 准确提取有效信息, 并提出使用正交信号校正改进的偏最小二乘算法实时优化板形调控功效系数。通过数据治理和高精度调控系数获取, 建立了与六辊轧机系统映射的数字孪生模型, 结合深度神经网络算法, 提出了板形设定智能优化方法。最终, 构建的板形控制信息物理系统将板形标准差由

3.42 I 降至 1.91 I。王青龙^[8]以某厂 1450 mm 冷连轧机组为研究对象, 深入探讨了其板形控制系统。建立了板形预设定控制模型和相关补偿模型, 并提出了多变量最优板形闭环反馈和前馈控制模型。选取该机组中的 UCM (Universal Crown Mill) 轧机进行研究, 运用弹塑性有限元法对带钢冷轧过程进行了数值模拟。通过模拟计算, 得到了不同工况下轧后带钢横向厚度分布, 并对比分析了不同板形调节机构对带钢整体中心凸度、局部凸度和边部减薄的影响, 获得了不同调节量下带钢横向厚度改变量的分布曲线, 并基于此得到了板形调控功效系数曲线。雷彤^[9]通过深入分析板形形成机理和影响因素, 结合先进的数值模拟技术, 建立了适用于冷连轧机组的板形预测模型。通过优化轧制参数、工艺流程和辊系设计, 实现了对板形的精确控制。研究结果表明, 采用该优化控制技术可以显著提高冷连轧带钢产品的板形质量。Abdelkhalek S 等^[10]开发了一种基于渐近数值方法 (Asymptotic Numerical Method, ANM) 的壳体有限元模型, 用于模拟分析带钢中由残余应力引起的板形缺陷, 并研究了张力和屈服变形对板形质量的影响。Nakhoul R 等^[11]采用耦合有限元方法分析了轧制前后带钢的应力和应变, 并研究了非均匀温度环境对带钢板形的影响。蔡玉强等^[12]选取某工厂的四辊轧机作为研究对象, 运用 ANSYS 软件结合显示动力学有限元法, 对带钢冷轧过程进行了模拟, 研究弯辊力对冷轧的影响。结果显示, 增加支撑辊的支撑力有助于平稳轧件边部和中部的应力分布, 进而改善轧件的板形。Malik A S 和 Grandhi R V^[13]提出了一种预测带钢静态横向厚度分布的计算方法, 并利用有限元模型对该方法计算的带钢横截面形状进行了验证。

本文针对冷连轧过程中的带钢板形展开研究, 考虑带钢在连续机架间传递时的遗传属性, 构建一个适用于 UCMW (Universal Crown Mill with Work roll shifting) 连轧机组的板形预报模型, 能够对冷连轧机组中每个机架的出口板形进行精确预测, 为分析和理解板形影响因素提供了定量的理论支持。

1 冷轧过程带钢板形形成机理

冷轧过程中, 在轧机压下系统施加轧制力后, 机组的上下辊系跟随运动, 发生支撑辊弹性挠曲、各辊系之间的弹性压扁、中间辊弹性挠曲、工作辊弹性挠曲等一系列的变化, 如图 1 所示。从而, 在

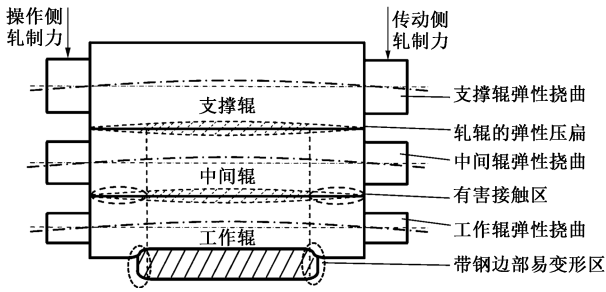


图1 冷轧过程板形形成机理

Fig. 1 Formation mechanism of strip flatness in cold rolling process

上下工作辊间形成有载辊缝，上、下工作辊辊缝横向分布则决定了带钢经轧制变形区时的塑性变形情况。因此，冷轧带钢的板形形成机理即为：入口带钢进入轧机的轧制变形区后，在上、下工作辊间有载辊缝的作用下，使得出口带钢在宽度方向上发生不同程度的塑性变形。在微观上表现为带钢沿宽度方向所受的张应力不均匀，在宏观上表现为带钢在张应力小的区域对应出现浪形缺陷。

此外，需要说明的是，随着轧制过程的进行，轧辊在辊间强挤压力的作用下会发生两方面的变化：

(1) 工作辊磨损，影响轧辊的实际辊型，从而影响到有载辊缝的形状，在轧辊服役期间属于不可恢复性变形；

(2) 工作辊热辊型，即因摩擦热与变形热导致轧辊发生一定程度的热膨胀，同样会影响到轧辊的实际辊型，从而影响有载辊缝的形状，轧辊热辊型是随着连续工作时间的逐渐累积而形成的结果，属于可恢复性变形。

因此，轧辊工作状态的实时辊型是辊型初始值、磨损量以及热凸度三者共同作用的结果。可以看出，带钢板形的变化是在原始辊型、轧辊挠曲、轧辊压扁、工作辊磨损以及工作辊热辊型共同作用下的结果。

2 单机架 UCMW 轧机成品板形预报模型的建立

由冷轧过程带钢板形的形成机理可知，要想求得轧机出口板形情况，需要根据有载辊缝与出口带钢轮廓一一对应的关系，建立求解有载辊缝的数学模型。与此同时，考虑到 UCMW 轧机的设备与工艺特点，由于窜辊、工作辊单锥度辊和不对称弯辊等因素的存在，有载辊缝并非是呈上下、左右对称分布的。因此，则需建立非对称状态下的上、下工作辊辊缝横向分布、板形预报模型。由于篇

幅有限，本节的部分模型推导详细过程可参考文献[3]。

2.1 单机架 UCMW 轧机上、下工作辊辊缝横向分布计算模型

为建立单机架 UCMW 轧机上、下工作辊辊缝横向分布计算模型，设定相关设备参数、来料参数以及工艺参数。设备参数包括：工作辊直径 D_w 、工作辊辊长 L_w 、中间辊直径 D_m 、中间辊辊长 L_m 、支撑辊直径 D_b 、支撑辊辊长 L_b 。来料参数包括：来料入口厚度 H 、带钢宽度 B 、成品出口厚度 h 、带钢强度 σ 。工艺参数包括：上工作辊窜辊量 δ_s 、下工作辊窜辊量 δ_x 、上工作辊弯辊力 S_s 、下工作辊弯辊力 S_x 、入口张力 T_r 、出口张力 T_c 。

(1) 原始辊型曲线

采用分段离散法进行计算，共计分段 $2n+1$ 段（单元总数， $n+1$ 为中间单元），根据收集轧辊磨削参数，拟合得到工作辊、中间辊、支撑辊的原始辊型曲线分别为 $y_w(j)$ 、 $y_m(j)$ 、 $y_b(j)$ ，其中 j 为其中的任意第 j 单元， $0 \leq j \leq 2n+1$ ，每单元的宽度为 $\Delta x = L_w / (2n+1)$ 。当工作辊发生窜辊时，对应分段标号的辊型也发生改变，上、下工作辊在发生窜辊时的辊型曲线如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} y_{sw}(j) = y_w \left[j - \frac{\delta_s(2n+1)}{B} \right] \\ y_{xw}(j) = y_w \left[j + \frac{\delta_x(2n+1)}{B} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中： $y_{sw}(j)$ 为上工作辊在发生窜辊时的辊型曲线； $y_{xw}(j)$ 为下工作辊在发生窜辊时的辊型曲线。

(2) 轧辊挠曲计算

在轧制力与弯辊力的作用下，轧辊会发生一定程度的挠曲（图2）。在此，设定上辊系中的工作辊、中间辊、支撑辊第 j 单元的挠曲分别为 $f_{sw}(j)$ 、 $f_{sm}(j)$ 、 $f_{sb}(j)$ ，根据各轧辊的受力分析得到相应的挠曲计算表达式，如式 (2) 所示。

$$\begin{cases} f_{sw}(j) = \sum_{k=1, k \neq j}^{2n+1} [q_{smw}(k) - q_z(k)] G_w(j, k) - S_s G_s(j) - \theta_{sw} x(j), 1 \leq j \leq 2n+1 \\ f_{sm}(j) = \sum_{k=1, k \neq j}^{2n+1} [q_{smb}(k) - q_{smw}(k)] G_m(j, k) - \theta_{sm} x(j), 1 \leq j \leq 2n+1 \\ f_{sb}(j) = - \sum_{k=1, k \neq j}^{2n+1} q_{smb}(k) G_b(j, k) + F_b G_F(j), 1 \leq j \leq 2n+1 \end{cases} \quad (2)$$

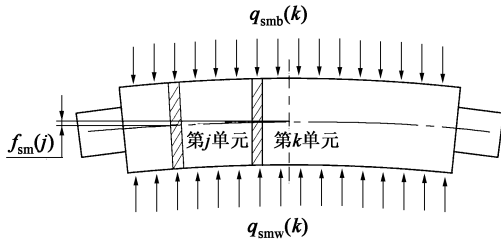


图 2 轧辊受力分析及挠曲原理图

Fig. 2 Stress analysis of roll and principle diagram of deflection

式中: $q_{smw}(k)$ 为上辊系中工作辊与中间辊在第 k 单元的辊间力, kN; $q_z(k)$ 为上工作辊与带钢在第 k 单元的轧制压力, kN; $G_w(j, k)$ 为工作辊第 k 单元载荷对第 j 单元挠度的影响函数, 其中 $0 \leq j \leq 2n+1$, $0 \leq k \leq 2n+1$, $k \neq j$; $G_s(j)$ 为弯辊力对第 j 单元挠度的影响函数; θ_{sw} 为上工作辊刚性转角, rad; $x(j)$ 为刚性位移; $q_{smb}(k)$ 为上辊系中中间辊与支撑辊在第 k 单元的辊间力, kN; $G_m(j, k)$ 为中间辊第 k 单元载荷对第 j 单元挠度的影响函数; θ_{sm} 为上中间辊刚性转角, rad; $G_b(j, k)$ 为支撑辊第 k 单元载荷对第 j 单元挠度的影响函数; F_b 为支撑辊一侧的支撑力, kN; $G_f(j)$ 支撑辊支撑力对第 j 单元挠度的影响函数。

设定下辊系中的工作辊、中间辊、支撑辊第 j 单元的挠曲分别为 $f_{xw}(j)$ 、 $f_{xm}(j)$ 、 $f_{xb}(j)$, 其表达式与上辊系类似, 在此不再赘述。基于此, 实现对 UCMW 轧机上、下辊系各轧辊挠曲的计算。

(3) 轧辊压扁计算

如图 3 所示, 以第 j 单元为研究对象, 该单元在轧制压力的作用下, 两轧辊之间被压扁变形, 并形成一定的压扁宽度, 从而使得该单元的轧制压力呈现为轧辊压扁宽度上的分散力。以中间辊与工作辊为例, 根据赫兹公式, 中间辊与工作辊间第 j 单元的压扁宽度 $b_{mw}(j)$ 如式 (3) 所示。

$$b_{mw}(j) = \sqrt{\frac{2}{\pi} q_{mw}^*(j) \left(\frac{1-v_w^2}{E_w} + \frac{1-v_m^2}{E_m} \right) \frac{D_w D_m}{D_w + D_m}} \quad (3)$$

式中: $q_{mw}^*(j)$ 为中间辊与工作辊间第 j 单元受到的集中载荷, kN; v_w 为工作辊的泊松比; E_w 为工作辊的杨氏模量, Pa; v_m 为中间辊的泊松比; E_m 为中间辊的杨氏模量, Pa。

将轧辊压扁看作平面应变问题, 工作辊受到中间辊作用的辊间力与带钢作用的轧制力、中间辊受到工作辊作用的辊间力与支撑辊作用的辊间力、支撑辊受到中间辊作用的辊间力。通过推导得到各轧

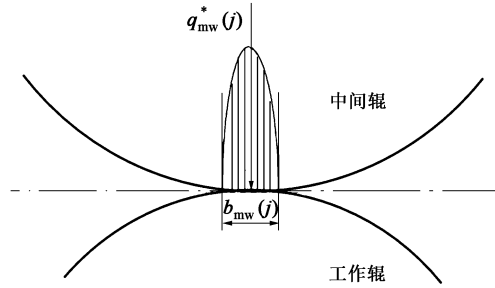


图 3 辊间压扁分析图

Fig. 3 Analysis diagram of roll flattening

辊在辊间力与轧制力作用下的压扁变形量, 如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} \Delta R_w(j) = \frac{2q_{mw}^*(j)(1-v_w^2)}{\pi E_w} \left(\ln \frac{D_w}{b_{mw}(j)} + 0.407 \right) \\ \Delta R_m(j) = \frac{2q_{mw}^*(j)(1-v_m^2)}{\pi E_m} \left(\ln \frac{D_m}{b_{mw}(j)} + 0.407 \right) \\ \Delta R_b(j) = \frac{2q_{mb}^*(j)(1-v_b^2)}{\pi E_b} \left(\ln \frac{D_b}{b_{mb}(j)} + 0.036 \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta R_w(j)$ 为工作辊第 j 单元压扁量, mm; $\Delta R_m(j)$ 为中间辊第 j 单元压扁量, mm; $\Delta R_b(j)$ 为支撑辊第 j 单元压扁量, mm; E_b 为支撑辊的杨氏模量, Pa; v_b 为支撑辊的泊松比; $q_{mb}^*(j)$ 为中间辊与支撑辊间第 j 单元受到的集中载荷, kN; $b_{mb}(j)$ 为中间辊与支撑辊间第 j 单元的压扁宽度, mm。

进一步, 可以得到工作辊与中间辊间的压扁系数 $K_{mw}(j)$ 与中间辊与支撑辊间的压扁系数 $K_{mb}(j)$, 如式 (5) 和式 (6) 所示。

$$K_{mw}(j) = 2 \left[\frac{1-v_w^2}{\pi E_w} \left(\ln \frac{D_w}{b_{mw}(j)} + 0.407 \right) + \frac{1-v_m^2}{\pi E_m} \left(\ln \frac{D_m}{b_{mw}(j)} + 0.407 \right) \right] \quad (5)$$

$$K_{mb}(j) = 2 \left[\frac{1-v_m^2}{\pi E_m} \left(\ln \frac{D_m}{b_{mb}(j)} + 0.407 \right) + \frac{1-v_b^2}{\pi E_b} \left(\ln \frac{D_b}{b_{mb}(j)} + 0.036 \right) \right] \quad (6)$$

(4) 工作辊磨损计算

工作辊磨损包括工作辊与带钢间的磨损和工作辊与中间辊间的磨损, 磨损形式分为滑动磨损与滚动磨损。工作辊的磨损是经过轧制多卷带钢不断累积的结果, 设定工作辊在换辊周期内经轧制 a 卷带钢后第 j 单元的磨损量横向分布函数为 $W(j)$, 工作辊磨损计算模型如式 (7) 所示。

$$W(j) = \alpha_0 \sum_{r=1}^a \left\{ \frac{q_z(j)L_r}{(1+f_{qr})\pi D_w} \left(k_1 \left(f_{vr} + C_{wr} \left(\frac{j}{0.5B_r} \right)^4 \right) + k_2 l'_r \right) + 2b_{mw} \frac{L_r q_{mwr}(j)}{\pi D_w} \left(k_3 \left| 1 - \frac{D_{mr}(j)w_{mr}}{D_{wr}(j)w_{wr}} \frac{D_m}{D_w} \right| + k_4 \right) \right\} \quad (7)$$

式中: α_0 为 UCMW 轧机工况影响系数; $q_z(j)$ 为轧制第 r 卷带钢时上工作辊与带钢在第 j 单元的轧制压力, kN; L_r 为轧制第 r 卷带钢的总长度, m; f_{qr} 为轧制第 r 卷带钢的平均前滑系数; k_1 为轧制变形区滑动摩擦因数; f_{vr} 为轧制第 r 卷带钢时工作辊与带钢间的相对滑动距离, mm; C_{wr} 为轧制第 r 卷带钢时横向流动影响系数; B_r 为轧制第 r 卷带钢时的带钢宽度; k_2 为轧制变形区滚动摩擦因数; l'_r 为轧制第 r 卷带钢时变形区平均接触弧长, mm; $q_{mwr}(j)$ 为轧制第 r 卷带钢时中间辊与工作辊在第 j 单元的辊间压力, kN; k_3 为辊间的滑动摩擦因数; $D_{mr}(j)$ 为轧制第 r 卷带钢时第 j 单元的中间辊直径, mm; $D_{wr}(j)$ 为轧制第 r 卷带钢时第 j 单元的工作辊直径, mm; w_{mr} 为轧制第 r 卷带钢时中间辊平均转速, ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$); w_{wr} 为轧制第 r 卷带钢时工作辊平均转速, ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$); k_4 为辊间的滚动摩擦因数。

(5) 工作辊热辊型计算

冷轧过程中, 由于轧制变形区工作辊与带钢间产生摩擦热和变形热, 在摩擦热与变形热持续产生的过程中, 热量不断向轧辊内部渗透, 引起热膨胀, 直到轧制稳定阶段, 工作辊形成一定的热辊型。工作辊热辊型的动态变化直接影响出口带钢的板形分布情况, 在带头轧制阶段, 由于热辊型还未形成, 容易出现边浪缺陷; 在带中轧制阶段, 热辊型形成稳定, 也有可能中浪缺陷。因此, 为准确计算 UCMW 轧机出口带钢的板形, 必须考虑工作辊热辊型的影响。

由轧制变形区工作辊与带钢间摩擦热引起的第 j 单元的温升 $T_{mc}(j)$ 计算公式如下:

$$T_{mc}(j) = \mu \cdot q_z(j) \cdot \frac{\pi D_w(j) w_w}{60} \cdot \frac{t_r c_w \rho_w}{c_s \rho_s} \quad (8)$$

式中: μ 为工作辊与带钢间的摩擦因数; $q_z(j)$ 为上工作辊与带钢在第 j 单元的轧制压力, kN; $D_w(j)$ 为第 j 单元的工作辊直径, mm; w_w 为工作辊平均转速, ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$); t_r 为轧制变形区平均接触时间, s; c_w 为工作辊比热容, ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$); ρ_w 为工作辊密度, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); c_s 为带钢比热容, ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$); ρ_s 为带钢密度, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

由轧制变形区带钢变形引起的第 j 单元的温升

$T_{bx}(j)$ 计算公式如下:

$$T_{bx}(j) = \frac{\sigma_s \cdot \log [H(j)/h(j)] \cdot c_w \rho_w}{c_s \rho_s} \quad (9)$$

式中: σ_s 为带钢变形抗力, MPa; $H(j)$ 为第 j 单元的来料入口厚度, mm; $h(j)$ 为第 j 单元的成品出口厚度, mm。

利用铁摩辛柯位移公式, 设定轧辊初始温度为 T_0 , 则工作辊的热辊型计算模型如下:

$$u_t(j) = 4(1 + v_w) \frac{\beta_t}{D_w} \int_0^{\frac{D_w}{2}} [T_{mc}(j) + T_{bx}(j) - T_0] r dr \quad (10)$$

式中: $u_t(j)$ 为第 j 单元的热辊型横向分布函数; β_t 为热膨胀系数。

(6) 上、下工作辊辊缝横向分布计算

设定上、下工作辊的实际辊型为 $g_s(j)$ 与 $g_x(j)$, 根据原始辊型曲线、工作辊磨损和工作辊热辊型的计算模型, 得到上、下工作辊的实际辊型表达式, 分别如式 (11) 和式 (12) 所示。

$$g_s(j) = y_{sw}(j) - W_s(j) + u_{st}(j) \quad (11)$$

$$g_x(j) = y_{sx}(j) - W_x(j) + u_{xt}(j) \quad (12)$$

式中: $W_s(j)$ 为上工作辊第 j 单元的磨损量横向分布函数; $u_{st}(j)$ 为上工作辊第 j 单元的热辊型横向分布函数; $W_x(j)$ 为下工作辊第 j 单元的磨损量横向分布函数; $u_{xt}(j)$ 为下工作辊第 j 单元的热辊型横向分布函数。

在上述轧辊挠曲、轧辊压扁、实际辊型等计算模型的基础上, 通过辊系间的变形协调关系实现对上、下工作辊辊缝横向分布的定量计算。即辊系间存在如下变形协调关系:

①上工作辊的挠曲变形与上中间辊挠曲变形、上工作辊和上中间辊辊间压扁以及两辊的实际辊型是协调相等的关系, 即:

$$f_{sw}(j) = f_{sm}(j) + K_{mw}(j) [q_{smw}(n) - q_{smw}(j)] - \left[\left(g_s(j) - \frac{D_w}{2} \right) + \left(y_m(j) - \frac{D_m}{2} \right) \right] \quad (13)$$

式中: $q_{smw}(n)$ 为上辊系工作辊与中间辊在第 n 单元的辊间力, kN。

②上中间辊的挠曲变形与上支撑辊挠曲变形、上中间辊和上支撑辊辊间压扁以及两辊的实际辊型是协调相等的关系, 即:

$$f_{sm}(j) = f_{sb}(j) + K_{mb}(j) [q_{smb}(n) - q_{smb}(j)] - \left[\left(y_m(j) - \frac{D_m}{2} \right) + \left(y_b(j) - \frac{D_b}{2} \right) \right] \quad (14)$$

式中: $q_{\text{ymb}}(n)$ 为上辊系中间辊与支撑辊在第 n 单元的辊间力, kN。

③下工作辊的挠曲变形与下中间辊挠曲变形、下工作辊和下中间辊辊间压扁以及两辊的实际辊型是协调相等的关系, 即:

$$f_{\text{xw}}(j) = f_{\text{xm}}(j) + K_{\text{mw}}(j) [q_{\text{xmw}}(n) - q_{\text{xmw}}(j)] - \left[\left(g_{\text{x}}(j) - \frac{D_{\text{w}}}{2} \right) + \left(y_{\text{m}}(j) - \frac{D_{\text{m}}}{2} \right) \right] \quad (15)$$

式中: $q_{\text{xmw}}(n)$ 为下辊系工作辊与中间辊在第 n 单元的辊间力, kN; $q_{\text{xmw}}(j)$ 为下辊系中工作辊与中间辊在第 j 单元的辊间力, kN。

④下中间辊的挠曲变形与下支撑辊挠曲变形、下中间辊和下支撑辊辊间压扁以及两辊的实际辊型是协调相等的关系, 即:

$$f_{\text{xm}}(j) = f_{\text{xb}}(j) + K_{\text{mb}}(j) [q_{\text{xmb}}(n) - q_{\text{xmb}}(j)] - \left[\left(y_{\text{m}}(j) - \frac{D_{\text{m}}}{2} \right) + \left(y_{\text{b}}(j) - \frac{D_{\text{b}}}{2} \right) \right] \quad (16)$$

式中: $q_{\text{xmb}}(n)$ 为下辊系中间辊与支撑辊在第 n 单元的辊间力, kN; $q_{\text{xmb}}(j)$ 为下辊系中支撑辊与中间辊在第 j 单元的辊间力, kN。

基于以上变形协调关系, 结合辊系间的力与力矩平衡方程以及带钢前张应力横向分布, 即可实现对上、下工作辊辊缝横向分布的求解, 如式 (17) 所示。

$$f_{\text{yz}}(j) = f_0 - f_{\text{sw}}(j) - f_{\text{xw}}(j) \quad (17)$$

式中: $f_{\text{yz}}(j)$ 为上、下工作辊辊缝横向分布函数; f_0 为上、下工作辊辊缝初始设定值, mm。

2.2 单机架 UCMW 轧机板形预报模型

根据冷轧过程板形形成机理, 入口带钢进入轧机的轧制变形区后, 在上下工作辊辊缝的作用下, 使得出口带钢在宽度方向上发生不同程度的塑性变形。也就是说, 轧制过程工作辊与带钢间同样存在压扁变形, 其压扁系数如式 (18) 所示。

$$\begin{cases} K_{\text{wz}}(j) = \theta \left\{ \ln \frac{2[g_{\text{s}}(j) + g_{\text{x}}(j)]}{\Delta h + 16\theta q_{\text{z}}(j)} + \frac{32\theta q_{\text{z}}(j)}{\Delta h + 16\theta q_{\text{z}}(j)} \right\} \\ \theta = \frac{1 - v^2}{\pi E} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $K_{\text{wz}}(j)$ 为工作辊与带钢间的压扁系数; Δh 为带钢压下量, mm; E 为带钢杨氏模量, Pa; v 为带钢泊松比。

这样, 在工作辊与带钢接触区域, 轧机出口带钢厚度横向分布与上下工作辊辊缝横向分布、工作

辊与带钢间压扁以及工作辊辊型同样是协调相等的关系, 即:

$$h(j) = h(n+1) - f_0 + f_{\text{yz}}(j) - 2K_{\text{wz}}(j) \times [q_{\text{z}}(n+1) - q_{\text{z}}(j)] + [g_{\text{s}}(j) + g_{\text{x}}(j) - D_{\text{w}}] \quad (19)$$

式中: $h(n+1)$ 为带钢第 $n+1$ 单元 (轧辊中间点位置) 出口厚度; $q_{\text{z}}(n+1)$ 为工作辊与带钢在第 $n+1$ 单元 (轧辊中间点位置) 的轧制压力。

与此同时, 带钢板形一般是通过前张应力横向分布来表征, 即出口带钢厚度薄的单元较为松弛而承受的张应力较小, 出口带钢厚度厚的单元较为绷紧而承受的张应力较大。因此, 轧机出口带钢前张应力横向分布与出口带钢厚度横向分布存在一一对应的关系, 如式 (20) 所示。

$$\sigma_{\text{c}}(j) = \frac{T_{\text{c}}}{BH} + \frac{E}{1 - v^2} \left(1 + \frac{H(j)}{H} - \frac{h(j)}{h} - \frac{L_j}{L} + u'_j - \frac{\Delta B}{B} \right) \quad (20)$$

式中: $\sigma_{\text{c}}(j)$ 为出口带钢前张应力横向分布; L_j 为出口带钢第 j 单元纵向长度, mm; L 为带钢轧前纵向长度, mm; u'_j 为带钢横向位移增量分布值, mm; ΔB 为带钢宽展量, mm。

进一步, 轧机出口板形同样与带钢前张应力横向分布存在一一对应的关系, 因此, 出口带钢板形可表示为前张应力的函数, 如式 (21) 所示。

$$B(j) = \frac{\frac{T_{\text{c}}}{BH} - \sigma_{\text{c}}(j)}{E} \times (1 - v^2) \times 10^5 \quad (21)$$

在给定来料参数、设备参数以及工艺参数的前提下, 通过以上模型实现单机架 UCMW 轧机出口板形的定量预报。

3 UCMW 机组冷连轧过程板形预报模型的建立

冷连轧机组前一机架的出口带钢即为后一机架的入口来料。因此, 带钢在冷连轧过程中, 从第一机架依次到最后一机架的板形具有遗传性。根据单机架 UCMW 轧机成品板形模型, 考虑冷连轧过程上下游间的遗传特性, 建立适合于 UCMW 机组的冷连轧过程成品板形预报模型。

UCMW 冷连轧机组各个机架轧制过程中的板形预报原理为: 在给定设备参数、工艺参数与来料参数的前提下, 根据单机架板形预测模型, 即可实现对各个机架出口板形的定量计算与预报。设定冷连

轧机组第 1 机架至第 5 机架的出口板形分别为 $B_1(j)$ 、 $B_2(j)$ 、 $B_3(j)$ 、 $B_4(j)$ 和 $B_5(j)$ 。

根据单机架 UCMW 轧机板形预报模型可知，轧机出口板形可以表示为：

$$\begin{cases} B(j) = f_{bx}(X_1, X_2, X_3) \\ X_1 = [D_w, D_m, D_b, L_w, L_m, L_b] \\ X_2 = [\Delta h, T_r, T_c, S_s, S_x, \delta_s, \delta_x, \mu] \\ X_3 = [B_0(j), H, h, B, \sigma] \end{cases} \quad (22)$$

式中： f_{bx} 为单机架 UCMW 轧机板形计算函数； X_1 为设备参数； X_2 为工艺参数； X_3 为来料参数； $B_0(j)$ 为来料板形。

第 $i-1$ 机架出口板形（当 $i=0$ 时，则为热轧来料板形）即为第 i 机架的入口板形，这样，各机架出口板形 $B_1(j)$ 、 $B_2(j)$ 、 $B_3(j)$ 、 $B_4(j)$ 和 $B_5(j)$ 可以表示为：

$$B_i(j) = f_{bx}[B_{i-1}(j), X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}], \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (23)$$

式中： X_{i1} 为第 i 机架的设备参数； X_{i2} 为第 i 机架的工艺参数； X_{i3} 为第 i 机架的来料参数。

基于此，即可实现对 UCMW 机组冷连轧过程各个机架出口板形的定量预报。

需要说明的是，上述模型的求解是通过不断迭代耦合得到最终的结果，具体迭代计算过程如图 4 所示（ ε 为误差范围），具体迭代过程如下：

- （1）收集 UCMW 轧机设备参数 X_1 ；
- （2）收集给定轧制工艺参数与来料参数 X_2 、 X_3 ；
- （3）设定带钢出口厚度横向分布 $h_0(j)=h$ ；
- （4）计算轧制力横向分布；
- （5）计算轧辊挠曲、轧辊压扁、工作辊磨损与热辊型；
- （6）计算上、下工作辊辊缝横向分布；
- （7）计算带钢出口厚度分布；
- （8）将计算的带钢出口厚度分布 $h(j)$ 与设定的带钢出口厚度分布 $h_0(j)$ 的差值作为度量，若其不满足精度要求，则重复上述计算；
- （9）输出上、下工作辊辊缝横向分布 $f_{yz}(j)$ ；
- （10）计算前张应力横向分布 $\sigma_c(j)$ ；
- （11）计算出口板形、从而实现板形预报。

4 UCMW 机组冷连轧过程板形预报精度分析

为说明板形预报模型的预报精度，选择现场生产的典型 50aw600 钢种进行验证，带钢参数如表 1 所示。该钢种作为一种用途广泛的带钢材料，其生产过程对板形要求较高，生产过程中需要严格控制

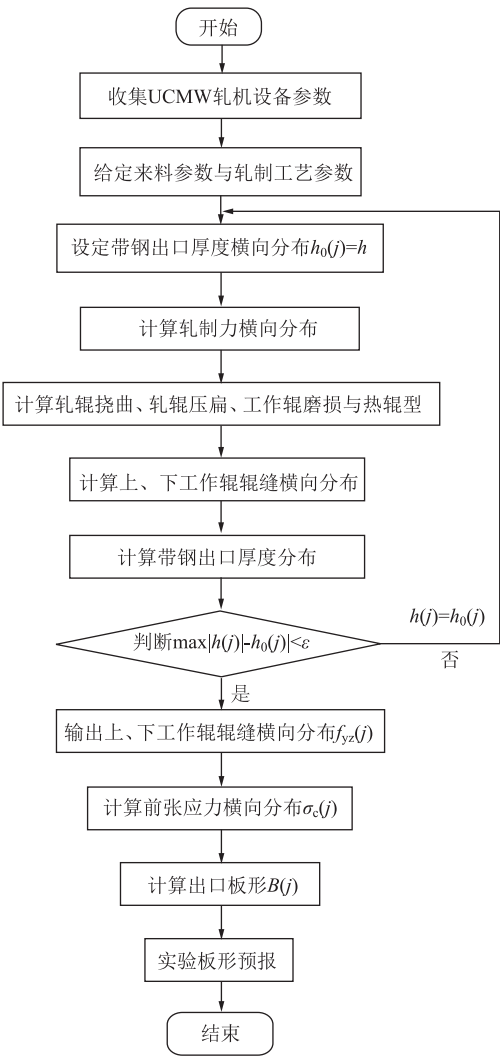


图 4 单机架 UCMW 轧机板形计算流程图
Fig. 4 Flow chart of strip flatness calculation for single stand UCMW mill

表 1 带钢参数

Table 1 Parameters for strip steel				
参数	来料厚度/mm	带钢宽度/mm	成品厚度/mm	带钢强度/MPa
数值	2.5	1080	0.5	600

板形，以确保最终产品的质量符合要求。板形辊为接触式压磁板形辊，检测通道数为 37 通道。

根据机组设备参数与现场生产工艺数据进行计算，并与现场实测成品板形进行对比。板形实际值和板形预报值对比如图 5 所示。从图 5 中可以观察到，选取的实际成品板形为典型的松边轧制板形，板形呈现两边高中间低的形状。根据误差柱状图可以看出，宽度在 $-110 \sim 0$ mm、 $110 \sim 220$ mm、 $385 \sim 550$ mm 范围内误差值较大，而宽度在 $-550 \sim -110$ mm 范围内误差值较小。并且实测误差有正有负，但负

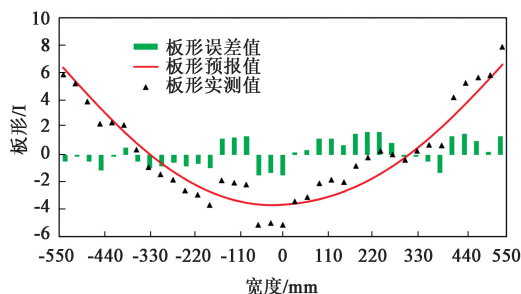


图 5 板形预报值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between predicted and measured values of strip flatness

误差值（表示实测值低于预报值）的出现频率和幅度更大。每个通道的预报误差在 2 I 以内，整体板形误差在 4 I 以内，说明该板形预报模型具有较高的预报精度。总的来说，板形预报曲线与实测结果分布趋势相同，可以正确预测出轧制过程中会产生何种板形，能够满足现场生产板形预报需求与模拟分析。

5 结论

(1) 综合原始辊型、轧辊挠曲、轧辊压扁、工作辊磨损、工作辊热辊型，建立了非对称状态下的单机架 UCMW 轧机上、下工作辊缝横向分布计算模型。

(2) 冷轧带钢出口厚度的横向分布与前张应力横向分布存在对应关系。并且，前张应力横向分布与轧机出口板形也密切相关。基于此，本文通过辊缝横向分布计算模型建立了单机架板形预报模型。

(3) 根据单机架板形模型，考虑冷连轧机组前后机架间带钢的遗传特性，本文建立了适合于 UCMW 机组冷连轧过程的各机架出口板形预报模型，结果显示，该模型能够将单元预测误差控制在 2 I 以内，而整体的板形误差控制在 4 I 以内，实现了对带钢冷连轧过程各机架出口板形定量模拟计算与预报。

参考文献：

- [1] 苏亚红. 我国冷轧板带生产状况及展望 [J]. 冶金信息导刊, 2007 (5): 44-48, 38.
Su Y H. Cold-rolled strip production and prospects of China [J]. Metallurgical Information Guide, 2007 (5): 44-48, 38.
- [2] 宋加. 我国冷轧及涂镀层板带市场及今后建设发展几个问题的探讨 [J]. 上海金属, 2007, 160 (5): 1-9.
Song J. Discussion on the market and development of cold milling and coating plate strip in China [J]. Shanghai Metal, 2007, 160 (5): 1-9.
- [3] 王国栋. 板形控制和板形理论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.
Wang G D. Profile Control and Profile Theory [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986.
- [4] 卜赫男, 蔺明宇, 闫注文. 基于神经网络集成学习的冷连轧板形预测 [J]. 轧钢, 2021, 38 (1): 65-69.
Bu H N, Lin M Y, Yan Z W. Flatness prediction based on ensemble learning of neural network for tandem cold rolling [J]. Steel Rolling, 2021, 38 (1): 65-69.
- [5] 丁肇印, 丁成砚, 孙杰, 等. 基于类别特征梯度提升的冷轧带钢板形预测模型 [J]. 轧钢, 2022, 39 (6): 99-105.
Ding Z Y, Ding C Y, Sun J, et al. Prediction model of cold rolled strip flatness based on CatBoost [J]. Steel Rolling, 2022, 39 (6): 99-105.
- [6] 张文雪, 齐东旭, 崔健. 冷轧板形多变量模型预测控制 [J]. 冶金自动化, 2023, 47 (5): 103-114.
Zhang W X, Qi D X, Cui J. Multivariable model predictive control of cold rolled strip shape [J]. Metallurgical Industry Automation, 2023, 47 (5): 103-114.
- [7] 张殿华, 魏臻, 王军生, 等. 冷轧板形数字孪生模型与协调优化信息物理系统 [J]. 鞍钢技术, 2023 (5): 1-11.
Zhang D H, Wei Z, Wang J S, et al. Digital twin model for cold-rolled strip shape and coordinated optimization information physics system [J]. Angang Technology, 2023 (5): 1-11.
- [8] 王青龙. 冷轧板形控制系统与调控功效有限元模拟 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
Wang Q L. Flatness Control System and Finite Element Simulation of Control Efficiency for Cold Rolling [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [9] 雷彤. 2030 冷连轧机组板形优化控制技术研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
Lei T. Study on Shape Optimization Control Technology of 2030 Cold Tandem Rolling Mill [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.
- [10] Abdelkhalek S, Zahrouni H, Legrand N, et al. Post-buckling modeling for strips under tension and residual stresses using asymptotic numerical method [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 104: 126-137.
- [11] Nakhoul R, Montmitonnet P, Legrand N. Manifested flatness defect prediction in cold rolling of thin strips [J]. International Journal of Material Forming, 2015, 8 (2): 283-292.
- [12] 蔡玉强, 李哲丞, 鞠康. 弯辊力对冷轧带钢板形的影响 [J]. 华北理工大学学报 (自然科学版), 2016, 38 (1): 43-47.
Cai Y Q, Li Z C, Ju K. Influence of roll bending force on shape of cold rolled strip [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 38 (1): 43-47.
- [13] Malik A S, Grandhi R V. A computational method to predict strip profile in rolling mills [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206 (1-3): 263-274.