

带钢平整过程中C翘机理及治理策略

杨永辉¹ 张冀¹ 谭海龙¹ 牛百草¹ 白振华^{1,2,3*}

1.燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心,秦皇岛,066004

2.燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室,秦皇岛,066004

3.燕山大学深圳研究院,深圳,518055

摘要:为了解决带钢在平整过程中出现C翘缺陷问题,优化了带钢平整过程中的工艺参数,开发了一套带钢C翘预报及治理策略。从轧制过程、工艺润滑制度及防皱辊/防颤辊对带钢受力的影响三个方面分析了C翘的形成机理;在半平面无限体假设下对带钢进行受力分析,得到出口带钢水平方向各处厚度上的应力分布,得到带钢厚度方向上最大和最小横向延伸量,进而通过几何关系得到带钢C翘的高度;找到一组最优防皱辊/防颤辊的高度设定值使综合控制目标函数最小,控制带钢厚度方向的延伸量,达到了减小C翘高度的目的。将模型及治理策略应用到国内某平整机组,C翘高度预报误差控制在10%以内,机组最大翘曲范围从1.4~6.5 mm降低到0.9~4.5 mm。结果证明C翘预报及治理策略满足生产需求,翘度值明显减小,降低了机组因翘曲造成的返修率。

关键词:带钢;平整;防皱辊;防颤辊;横向延伸;C翘

中图分类号: TG335.21

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



C-warping Mechanism and Treatment Strategies in Leveling Processes of Strip Steels

YANG Yonghui¹ ZHANG Ji¹ TAN Hailong¹ NIU Baicao¹ BAI Zhenhua^{1,2,3*}

1.National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

2.State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

3.Yanshan University Shenzhen Research Institute, Shenzhen, Guangdong, 518055

Abstract: In order to solve the problems of C-warping defects in strip steels in the leveling processes, the processing parameters in the strip leveling processes were optimized, and a set of C-warping prediction and treatment strategies for strip steels were developed. The formation mechanism of C-warping was analyzed from three aspects: rolling, processing lubrication systems and the influences of anti-wrinkle rollers and anti-trembling rollers on the forces of strip steels. The stress distribution of the horizontal direction of the outlet strips in the thickness was obtained, based on the stress analysis of the strips under the assumption of half-plane infinite body, the maximum and minimum transverse elongation in the thickness direction of the strips were obtained, and the height of the C warp of the strips was obtained through the geometric relationship. A set of optimal height settings of anti-wrinkle rollers and anti-trembling rollers were sought to minimize the objective function of the comprehensive control, and the elongation in the direction of strip thickness was controlled, so as to reduce C-warp. The model and treatment strategies were applied to a leveling unit in China, and the prediction errors of C warpage height are controlled within 10%, and the maximum warpage ranges of the unit are reduced from 1.4~6.5 mm to 0.9~4.5 mm. The results show that the C warpage prediction and treatment strategy meet the production demands, and the warpage values are significantly reduced, which reduces the repair rate caused by warpages.

Key words: strip steel; leveling; anti-wrinkle roller; anti-trembling roller; transverse extension; C-warp

收稿日期:2025-01-16

基金项目:河北省自然科学基金重点项目(E2024203125);河北省科学技术研究与发展计划—科技支撑计划(23280101Z);河北省高等学校科学技术研究(CXY2023012);河北省重大科技成果转化专项(22281001Z);辽宁省教育厅高等学校基本项目(LJKZZ20220040);中央引导地方科技发展资金(236Z1024G)

0 引言

带钢作为一种常见的钢铁产品,在生产与应用过程中面临着多种挑战^[1-3]。C翘问题作为一种带钢常见的质量缺陷,给生产过程造成了不小的损失^[4-5]。在带钢平整过程中,带钢上下辊系、

传动、工艺润滑制度等在上下表面存在差异,造成沿厚度方向的水平应力不均匀分布,导致发生不均匀的横向延伸,从而出现 C 翘变形^[6-7]。这种变形不仅会影响带钢的尺寸精度和表面质量,还会对后续的加工和应用性能造成不利影响^[8-9]。因此针对带钢平整过程中 C 翘缺陷,需要对其产生机理进行深入研究,与此同时寻求有效的预防和控制策略,有效降低生产中 C 翘缺陷^[10-12]。

对于 C 翘的治理,国内外有许多学者进行过相应研究。其中在热镀锌生产过程中,钱胜等^[13]研究了热镀锌过程带钢 C 翘对板形的影响机理,建立了 C 翘影响模型;孙永旭等^[14]分析了 C 翘缺陷形成机理、C 翘的影响因素,提出了相应的带钢 C 翘治理措施。在连退过程中,张宝平等^[15]采用调节防翘辊压下量的方法,实现了治理带钢翘曲的目标。在平整过程中,管现亮等^[16]研究得到张力为影响热轧平整 C 翘的关键影响因子,轧制力、弯辊力为重要影响因子,并得到工艺参数的最优组合。但目前关于平整过程中带钢 C 翘的理论研究相应较少,导致在平整过程中 C 翘缺陷只能根据以往经验进行粗略控制,会出现 C 翘调节不足或过度的情况。因此如何结合 C 翘形成的机理及现有的平整设备对生产过程中产生的 C 翘缺陷进行有效预报及治理为本文重点。

1 C 翘形成机理简析

在平整过程中,由于上下辊系不可避免地会产生不对等磨损、上下双支承辊传动不能保证转速完全一致、上下工艺润滑制度也存在差异,因此在变形区内带钢上下表面所受单位轧制压力的分布、摩擦力的大小及分布等不同,最终造成带钢厚度方向水平应力分布不均匀,致使带钢上下表面金属流动性差,在厚度方向会产生剪切变形,进而诱导厚度方向上的横向不均匀延伸,而带钢上下表面横向延伸的差异会形成 C 翘缺陷。进一步,大的张应力对应较大的横向延伸,小的张应力对应较小的横向延伸,当带钢上表面横向延伸小于下表面横向延伸时,表现为上 C 翘类型;下 C 翘类型与此相反。带钢 C 翘形成过程如图 1 所示,在带钢上建立图 1 所示的坐标系, y 、 z 轴分别为带钢宽度方向与带钢厚度方向。

1.1 轧制过程对带钢受力的影响分析

在平整轧制过程中,不可避免地会发生非对称轧制,导致上下工作辊的压扁曲线不同。在带钢平整轧制过程中,入口弹性变形区、塑性变形区以及出口弹性变形区的长度均发生变化,带钢上

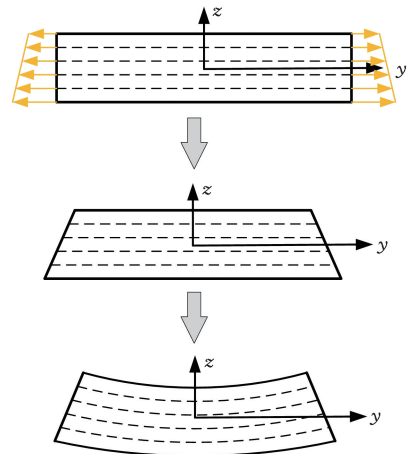


图 1 带钢 C 翘形成过程

Fig.1 The formation process of C-warp of strip steel

下表面中性点的位置亦不同,在相应的变形区内,带钢上表面单位轧制压力与下表面存在差异。建立非对称平整轧制轧辊压扁与单位轧制压力简图及相应的直角坐标系,如图 2 所示。

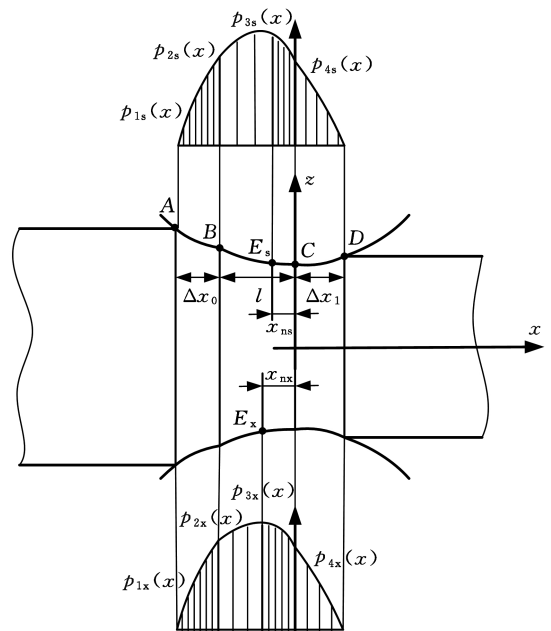


图 2 非对称平整轧制轧辊压扁与单位轧制压力简图

Fig.2 Schematic diagram of asymmetrical flat rolling roll flattening and unit rolling pressure

在图 2 中, E_s 、 E_x 分别代表带钢上下表面中性点; x_{ns} 、 x_{nx} 分别为上下中性点距 z 轴的距离,mm; $A-B$ 代表入口弹性变形区, Δx_0 为带钢入口弹性变形区长度,mm; $B-C$ 代表塑性变形区, l 为带钢塑性变形区长度,mm; $C-D$ 代表出口弹性变形区, Δx_1 为带钢出口弹性变形区的长度,mm。

将整个轧制过程划分为四个区域:入口弹性区与后滑区交接区域,即 $A-B$ 区;塑性变形区与后滑区交接区域,即 $B-E_s$ 区;塑性变形区与前滑区交接区域,即 E_s-C 区;出口弹性区与前滑区交接区域,即 $C-D$ 区。对于带钢表面,各区域上下

辊单位轧制压力分布^[17]如下:

$-l - \Delta x_0 \leq x \leq -l$ 时

$$\left. \begin{aligned} p_{1s}(x) &= \frac{C_1}{1 - \exp(-\frac{2\mu_{1s}\nu\Delta x_0}{h_0(1-\nu)})} (1 - \exp(x - l - \Delta x_0)) \\ p_{1x}(x) &= \frac{C_1}{1 - \exp(-\frac{2\mu_{1x}\nu\Delta x_0}{h_0(1-\nu)})} (1 - \exp(x - l - \Delta x_0)) \end{aligned} \right\} (1)$$

$-l < x \leq -x_{ns}$ 时

$$\left. \begin{aligned} p_{2s}(x) &= C_1 \exp(\int_x^0 \frac{\mu_{2s}}{g_s(x)} dx) \\ p_{2x}(x) &= C_1 \exp(\int_x^0 \frac{\mu_{2x}}{g_x(x)} dx) \end{aligned} \right\} (2)$$

$-x_{ns} < x < 0$ 时

$$\left. \begin{aligned} p_{3s}(x) &= C_2 \exp(\int_x^0 \frac{\mu_{3s}}{g_s(x)} dx) \\ p_{3x}(x) &= C_2 \exp(\int_x^0 \frac{\mu_{3x}}{g_x(x)} dx) \end{aligned} \right\} (3)$$

$0 \leq x \leq \Delta x_1$ 时

$$\left. \begin{aligned} p_{4s}(x) &= \frac{C_2}{1 - \exp(-\frac{2\mu_{4s}\nu\Delta x_1}{H_1(1-\nu)})} (1 - \exp(x + \Delta x_1)) \\ p_{4x}(x) &= \frac{C_2}{1 - \exp(-\frac{2\mu_{4x}\nu\Delta x_1}{H_1(1-\nu)})} (1 - \exp(x + \Delta x_1)) \end{aligned} \right\} (4)$$

式中: $p_{1s}(x)$ 、 $p_{1x}(x)$ 、 $p_{2s}(x)$ 、 $p_{2x}(x)$ 、 $p_{3s}(x)$ 、 $p_{3x}(x)$ 、 $p_{4s}(x)$ 、 $p_{4x}(x)$ 为各区域上下辊单位轧制压力, MPa; μ_{1s} 、 μ_{1x} 、 μ_{2s} 、 μ_{2x} 、 μ_{3s} 、 μ_{3x} 、 μ_{4s} 、 μ_{4x} 为不同轧制区域内带钢上下表面摩擦因数; C_1 为后压力计算常数; C_2 为前压力计算常数; E 为弹性模量, MPa; ν 为泊松比; h_0 为带钢入口厚度, mm; H_1 为带钢出口厚度, mm; V_A 为轧辊在 A 点的弹性变形位移, mm; V_B 为轧辊在 B 点的弹性变形位移, mm; V_C 为轧辊在 C 点的弹性变形位移, mm; V_D 为轧辊在 D 点的弹性变形位移, mm; $g_{s,x}(x)$ 为上下工作辊的压扁曲线, 用二次曲线表示^[18]。

1.2 工艺润滑制度对带钢受力的影响分析

考虑到带钢轧制过程中压扁曲线不同对轧制时可形成油膜厚度的影响, 同时, 由于重力的因素在相同工艺润滑条件下, 下表面的离水展着率小于上表面的离水展着率, 导致带钢上下表面摩擦因数不同, 造成在相应区域内带钢上下表面由轧制压力产生的摩擦力不同, 因此有摩擦因数 μ 与油膜厚度 ξ 的关系^[19] 如下:

$$\left. \begin{aligned} \mu &= a + b \exp(B_\xi \xi) \\ \xi &= \frac{h_0 + h_1}{2h_0} k_c \frac{3\theta\eta_0(v_r + v_0)}{\alpha[1 - \exp(-\theta(K - \sigma_0))]} + k_{rg}(1 + K_{rs})Ra_{r0} \exp(-B_L L) \end{aligned} \right\} (5)$$

式中: a 为液体摩擦影响系数; b 为干摩擦影响系数; B_ξ 为摩擦因数衰减指数; h_1 为轧制区域带钢厚度, mm; k_c 为工

艺润滑影响系数; θ 为黏度压缩系数; η_0 为大气压下动力黏度, Pa·s; v_r 为轧辊表面线速度, m/s; v_0 为带钢速度, m/s; α 为咬入角, rad; K 为带材的变形抗力, MPa; σ_0 为后张力, MPa; k_{rg} 为不平度夹带影响系数; K_{rs} 为压印率; Ra_{r0} 为工作辊原始粗糙度, μm ; B_L 为工作辊粗糙度衰减系数; L 为工作辊换辊后的轧制长度, km。

对于带钢上下表面, 各区域摩擦力分布如下:

$-l - \Delta x_0 \leq x \leq -l$ 时

$$\left. \begin{aligned} f_{1s}(x) &= \mu_{1s} p_{1s}(x) \\ f_{1x}(x) &= \mu_{1x} p_{1x}(x) \end{aligned} \right\} (6)$$

$-l < x \leq -x_{ns}$ 时

$$\left. \begin{aligned} f_{2s}(x) &= \mu_{2s} p_{2s}(x) \\ f_{2x}(x) &= \mu_{2x} p_{2x}(x) \end{aligned} \right\} (7)$$

$-x_{ns} < x < 0$ 时

$$\left. \begin{aligned} f_{3s}(x) &= -\mu_{3s} p_{3s}(x) \\ f_{3x}(x) &= -\mu_{3x} p_{3x}(x) \end{aligned} \right\} (8)$$

$0 \leq x \leq \Delta x_1$ 时

$$\left. \begin{aligned} f_{4s}(x) &= -\mu_{4s} p_{4s}(x) \\ f_{4x}(x) &= -\mu_{4x} p_{4x}(x) \end{aligned} \right\} (9)$$

式中: f_{1s} 、 f_{1x} 、 f_{2s} 、 f_{2x} 、 f_{3s} 、 f_{3x} 、 f_{4s} 、 f_{4x} 为不同轧制区域内带钢上下表面摩擦力。

1.3 防皱辊 / 防颤辊对带钢受力的影响分析

在防皱辊 / 防颤辊的作用下, 带钢以一定的角度包裹在上工作辊上, 在轧制变形区以外, 带钢张力提供带钢与上工作辊之间的正压力, 形成附加摩擦力, 造成带钢上下表面受力非对称的状况。对轧制变形区以外带钢上表面进行受力分析并建立受力简图, 见图 3。入口侧带钢与上工作辊的接触包角为 α_{bz} 、出口侧带钢与上工作辊的接触包角为 α_{bc} 。

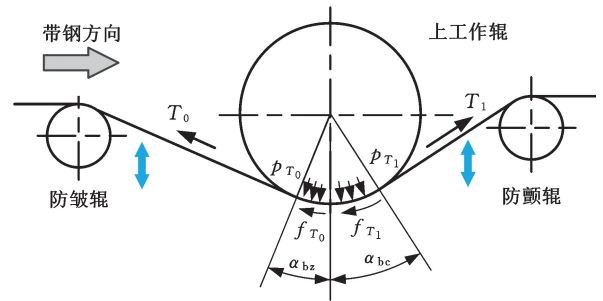


图 3 轧制变形区以外带钢上表面的受力简图

Fig.3 Schematic diagram of the force on the upper surface of the strip outside the rolling deformation zone

将正压力、摩擦力处理为均匀分布的形式, 则可得包裹区域正压力分布 $p_{T_0}(x)$ 、 $p_{T_1}(x)$ 以及摩擦力的分布 $f_{T_0}(x)$ 、 $f_{T_1}(x)$ 如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} p_{T_0}(x) &= 2T_0 \sin(\alpha_{bz}/2) / (R_{ws} \alpha_{bz}) \\ p_{T_1}(x) &= 2T_1 \sin(\alpha_{bc}/2) / (R_{ws} \alpha_{bc}) \\ f_{T_0}(x) &= \mu_s p_{T_0}(x) \\ f_{T_1}(x) &= \mu_s p_{T_1}(x) \end{aligned} \right\} (10)$$

式中： μ_s 为防皱辊、防颤辊区域内摩擦因数； R_{ws} 为上工作辊半径。

防皱辊 / 防颤辊的辊形直接影响带钢与上工作辊的接触包角，进而影响带钢横向的压力及摩擦力。

2 C 翘预报模型的建立

2.1 带钢厚度方向水平应力分布模型

现构建平整过程中带钢轧制模型如图 4 所示。将带钢在厚度方向均等划分为 n 个单元，沿宽度方向均等划分为 m 个单元，则第 i 个单元的纵坐标轴中心位置如下：

$$z_i = \frac{2i-1}{2} \frac{h}{n} \quad (11)$$

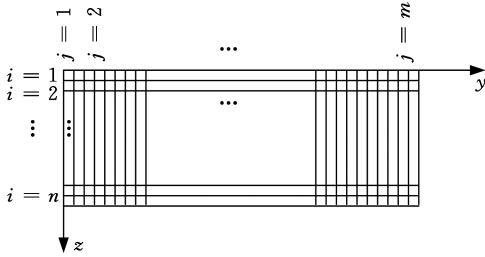


图 4 带钢离散模型

Fig.4 Discrete model of strip thickness direction

基于带钢半平面无限体假设，得到轧制区域带钢厚度方向上水平应力分布 σ_i 如下式所示：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= \sigma_i^s + \sigma_i^x + \sigma_i^w \\ \sigma_i^s &= \sum_{j=1}^4 \left[-\frac{2z_i}{\pi} \int \frac{x^2 p_{ks}(x)}{(x^2 + z_i^2)^2} dx - \frac{2}{\pi} \int \frac{x^3 f_{ks}(x)}{(x^2 + z_i^2)^2} dx \right] \\ \sigma_i^x &= \sum_{j=1}^4 \left\{ \frac{2(h-z_i)}{\pi} \int \frac{x^2 p_{kx}(\xi)}{[x^2 + (h-z_i)^2]^2} dx - \frac{2}{\pi} \int \frac{x^3 f_{kx}(x)}{[x^2 + (h-z_i)^2]^2} dx \right\} \\ \sigma_i^w &= -\frac{2z_i}{\pi} \int \frac{x^2 p_{T_0}(x)}{(x^2 + z_i^2)^2} dx - \frac{2}{\pi} \int \frac{x^3 f_{T_0}(x)}{(x^2 + z_i^2)^2} dx - \\ &\quad \frac{2z_i}{\pi} \int \frac{x^2 p_{T_1}(x)}{(x^2 + z_i^2)^2} dx - \frac{2}{\pi} \int \frac{x^3 f_{T_1}(x)}{(x^2 + z_i^2)^2} dx \\ z_i &= \frac{2i-1}{2} \frac{h}{n} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中： σ_i^s 为轧制区下表面各力作用下带钢出口厚度方向上水平应力分布； σ_i^x 为轧制区上表面各力作用下带钢出口厚度方向上水平应力分布； σ_i^w 为防皱辊和防颤辊作用区域内各力作用下带钢出口厚度方向上水平应力分布； $p_{ks}(x)$ 、 $p_{kx}(\xi)$ 分别为轧制中各区域带钢上下表面轧制力； $f_{ks}(x)$ 、 $f_{kx}(x)$ 分别为轧制中各区域带钢上下表面摩擦力； h 为带钢厚度，mm。

考虑到平整过程中带钢宽度方向上横向应力分布受到带钢温度分布、板形及辊形的影响，带钢在宽度方向上横向应力分布 σ_j 为

$$\sigma_j = \frac{E}{(1-\nu^2)} \left[\alpha (T_j - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m T_j) + 10^{-5} \sum_{k=0}^6 a_{kb} y_j^k + \frac{D_{ssj} + D_{xsj}}{2 \times 10^5 h_0} l_0 \right] \quad (13)$$

式中： α 为热膨胀系数； T_j 为带钢温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $\sum_{k=0}^6 a_{kb} y_j^k$ 为板形分布曲线； D_{ssj} 、 D_{xsj} 为上下工作辊实际辊型分布，mm； l_0 为轧制区域长度，mm。

综上，带钢厚度方向应力分布为

$$\sigma_{ij} = \frac{\sigma_i \sigma_j}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sigma_j} \quad (14)$$

σ_{ij} 只是带钢出口的应力分布，要求得应力大小还需添加相应约束条件，如下式所示：

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sigma_{ij} = T_1 \quad (15)$$

2.2 横向 C 翘翘曲高度计算模型

当各小单元中所受应力大于带钢屈服极限时，在相应位置就会产生塑性变形，并根据体积不变原理，得到相应小单元的横向塑性拉牵量 $\Delta b'_{ij}$ ，并对每层小单元的拉牵量叠加得到带钢厚度方向每一层的塑性拉牵量 $\Delta B'_i$ ：

$$\left. \begin{aligned} \Delta b'_{ij} &= \frac{B_0}{m} \frac{(1-\nu^2)}{E_{ij}} (\sigma_{ij} - \sigma_s) l_0 \\ \Delta B'_i &= \sum_{j=1}^m \Delta b'_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中： σ_s 为带钢屈服极限，MPa； B_0 为带钢宽度。

考虑后张力对带钢宽度的影响，由采利柯夫公式可得到各小单元带钢的宽展量 $\Delta b''_{ij}$ ，并对每层的宽展量叠加得到带钢厚度方向上每层的宽展量 $\Delta B''_i$ ：

$$\left. \begin{aligned} \Delta b''_{ij} &= 2C_B C_{\sigma ij} \left(\sqrt{R_w \Delta H} - \frac{\Delta H}{2\bar{\mu}} \right) \left(\frac{H_1^2}{(\Delta H)^2} \ln \frac{H_0}{H_1} - \frac{H_0}{\Delta H} + \frac{1}{2} \right) \\ \Delta B''_i &= \sum_{j=1}^m \Delta b''_{ij} \\ C_B &= 1.34 \left(\frac{B_0}{\sqrt{R_w \Delta H}} - 0.15 \right) \exp \left(\left(0.15 - \frac{B_0}{\sqrt{R_w \Delta H}} \right) + 0.5 \right) \\ C_{\sigma ij} &= 1 - \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_s} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中： C_B 为宽度对宽展量的影响系数； $C_{\sigma ij}$ 为张力对宽展量的影响系数； R_w 为轧制工作辊半径，mm； ΔH 为轧制后的厚度变化量，mm； $\bar{\mu}$ 为轧制区域平均摩擦因数。

结合带钢横向拉牵及宽展量，得到轧制过程中带钢每一层横向延伸量 ΔB_i ：

$$\Delta B_i = \Delta B'_i - \Delta B''_i \quad (18)$$

通过比较每一层的塑性拉牵量得到单层最大拉牵量 $\Delta B_{i\max}$ 和最小拉牵量 $\Delta B_{i\min}$ ，建立最大表面横向延伸差与 C 翘翘曲高度的几何关系模型，如图 5 所示。当带钢表面横向延伸量存在差异

时,认为带钢横向延伸量小的一侧按圆筒形状弯曲,直到上下表面呈同一圆心、同一圆心角的圆弧形状,且带钢最大层与最小层拉窄量之间的出口厚度 H_1 构成内外圆的半径差。带钢表面宽度与圆弧弧长的平衡关系如下:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_c R &= B_0 + \Delta B_{i_{\min}} \\ \alpha_c (R + H_1) &= B_0 + \Delta B_{i_{\max}} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: α_c 为圆心角; R 为内圆半径, mm; $R + H_1$ 为外圆半径, mm。

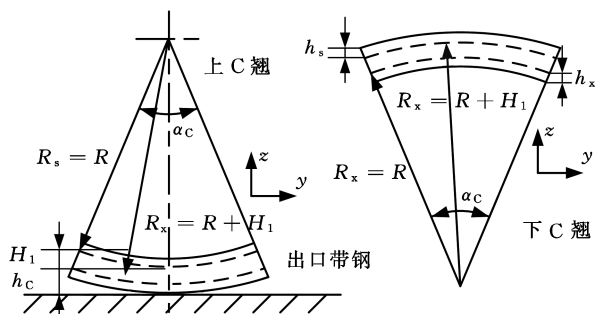


图 5 翘曲度计算模型

Fig.5 Calculation model of warpage

由式(19)可得到带钢的拱弯方向、圆心角 α_c 及外圆半径 $R + H_1$, 进而根据几何关系可得到带钢的翘曲高度 h_q 如下:

$$\left. \begin{aligned} h_q &= h_c - |h_x, h_s|_{\max} \\ h_c &= (R + H_1) \left(1 - \cos \frac{\alpha_c}{2}\right) \\ h_x &= h - \frac{2i_{\max} - 1}{2} \frac{h}{n} \\ h_s &= \frac{2i_{\max} - 1}{2} \frac{h}{n} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: i_{\max} 为最大拉窄量所在层数; i_{\min} 为最小拉窄量所在层数; h_c 为最大拉窄量所在层数翘曲高度, mm; h_s 为最大拉窄量所在层数离带钢表面的距离, mm; h_x 为最小拉窄量所在层数离带钢表面的距离, mm。

在现场实际应用中,如若考虑重力等其他因素对翘曲高度的影响,需对式(20)进行修正,即

$$h'_q = k_c h_q \quad (21)$$

式中: k_c 为重力等其他因素对翘曲高度的影响系数。

最终,根据带钢上下表面摩擦因数模型、带钢厚度方向水平应力分布模型、带钢上下表面延伸量计算模型、横向 C 翘翘曲高度计算模型,可实现对翘曲类型及翘曲高度的预报。

3 C 翘治理策略研究

在来料规格、平整设备参数、平整规程以及工艺润滑制度确定的情况下,带钢的翘曲高度是防皱辊、防颤辊高度的函数,即

$$h_q = f_{h_{q1}}(h_{tz}, h_{tc}) \quad (22)$$

式中: h_{tz} 为防皱辊设定的高度, mm; h_{tc} 为防颤辊设定的

高度, mm; h_q 为翘曲高度, mm。

以防皱辊、防颤辊高度调节为控制手段,提出控制目标:① 翘曲高度尽可能地接近零;② 保证防皱、防颤有效作用的情况下,尽可能保证平整轧制整体的稳定性。

假设保证防皱辊、防颤辊有效作用且不打滑,带钢不颤动的最小、最大调节高度分别为 h_{tz}^{\min} 、 h_{tz}^{\max} 、 h_{tc}^{\min} 、 h_{tc}^{\max} , 建立平整轧制稳定性控制目标函数,即防皱辊、防颤辊高度综合控制目标函数如下:

$$F_w(Y) = \beta_w \frac{|h_{tz} - [h_{tz}^{\min} + 0.5(h_{tz}^{\max} - h_{tz}^{\min})]|}{h_{tz}^{\max} - h_{tz}^{\min}} + (1 - \beta_w) \frac{|h_{tc} - [h_{tc}^{\min} + 0.5(h_{tc}^{\max} - h_{tc}^{\min})]|}{h_{tc}^{\max} - h_{tc}^{\min}}$$

$$Y = \{h_{tz}, h_{tc}\}$$

$$h_{tz}^{\min} < h_{tz} < h_{tz}^{\max} \quad h_{tc}^{\min} < h_{tc} < h_{tc}^{\max}$$

式中: $F_w(Y)$ 为防皱辊、防颤辊高度综合控制目标函数; β_w 为防皱辊高度控制系数; $1 - \beta_w$ 为防颤辊高度控制系数; Y 为翘曲控制变量。

结合防皱辊、防颤辊高度综合控制目标函数,建立翘曲控制目标函数如下:

$$F(Y) = \beta_q F_q(Y) + (1 - \beta_q) F_w(Y)$$

$$F_q(Y) = |h_q(Y) - 0|$$

$$Y = \{h_{tz}, h_{tc}\} \quad h_{tz}^{\min} < h_{tz} < h_{tz}^{\max} \quad h_{tc}^{\min} < h_{tc} < h_{tc}^{\max}$$

式中: $F(Y)$ 为翘曲控制目标函数; $F_q(Y)$ 为翘曲高度控制函数; $F_w(Y)$ 为翘曲高度约束控制函数; β_q 为翘曲高度控制系数; $1 - \beta_q$ 为翘曲高度约束控制系数。

这样,防皱辊、防颤辊高度调节的翘曲控制问题就变为在防皱辊、防颤辊可调高度范围内寻找一组 Y , 使得翘曲控制目标函数 $F(Y)$ 最小,此时令 $Y_y = \{h_{tzy}, h_{tcy}\}$, 即为防皱辊高度、防颤辊高度的最优设定值。

4 现场应用

将上述预报模型及治理策略应用到某厂平整机组的实际生产中,并结合现场生产及工艺特点,开发出一套应用于该机组平整过程中带钢翘曲预报及优化模型,该机组主要设备参数如表 1 所示。其中,工作辊、中间辊、支承辊无特殊辊面形状加工,轧辊均为平辊,且为了提高轧制过程中辊系的稳定性,使中间辊具有一定的偏移量。此外,该平整机可通过调整支承辊上的压下螺丝,使辊系发

表 1 平整机组主要设备参数

Tab.1 The main equipment parameters of the leveling unit

工作辊 辊径/ mm	中间辊 辊径/ mm	支承辊 辊径/ mm	电机 功率/ kW	平整机 最大速度/ (m · min ⁻¹)		带钢最大 张力/kN	
				入口	出口	入口	出口
560	610	1250	250	170	175	450	450

生倾斜,从而控制非对称的板形缺陷。在无弯辊力的情况下,该平整机最大轧制力可达 21.56 MN。该机组可轧宽度为 700~1400 mm,可轧厚度为 0.6~2.5 mm,延伸率 $\delta \leq 2\%$ 。

为检验翘曲高度预报的精度,随机选取同时期存在翘曲的 10 卷钢卷,检测平整后带钢的实际翘曲高度,并利用模型对翘曲情况进行预报,将预报值与实测值进行对比,翘曲预报精度分析见表 2。从表中可以看出,对于该机组带钢生产过程中翘曲高度的预报精度误差在 10% 以内,满足实际生产需求。

表 2 翘曲预报精度

Tab.2 Warpage prediction accuracy

卷号	钢种	厚度/mm	宽度/mm	翘曲高度		精度误差/%
				实测/mm	预报/mm	
1	1180DP	1.0	930	1.6	1.7	6.3
2	1180DP	1.2	1075	2.2	2.4	9.1
3	1180DP	2.0	1256	2.7	2.6	-3.7
4	980DP	2.0	985	3.2	3.3	3.1
5	980DP	1.6	1061	3.5	3.4	-2.9
6	780DP	1.4	1020	3.1	3.2	3.2
7	780DP	2.0	1145	3.8	4.1	7.9
8	980QP	1.5	1250	5.3	5.2	-1.9
9	980QP	1.2	1000	4.6	4.7	2.2
10	980QP	1.0	1184	5.0	5.1	2.0

为验证策略在平整过程翘曲控制的应用效果,以典型钢种 780DP、典型规格 1.2 mm×1200 mm 带钢为例,选取不同生产批次、不同钢卷的典型翘曲治理进行详细分析,优化前后带钢翘度对比如表 3 所示。从表中可以看出,优化后带钢翘曲高度明显减小,成品带钢质量得到了提高。

表 3 优化前后带钢翘度对比

Tab.3 Comparison of strip warpage before and after optimization

卷号	优化前		优化后		翘曲类型	优化前翘高/mm	优化后翘高/mm
	h_{tz} /mm	h_{fc} /mm	h_{tz} /mm	h_{fc} /mm			
1	110	130	122	139	下 C 翘	4.6	2.4
2	110	130	132	145	下 C 翘	3.3	1.6
3	110	130	102	121	上 C 翘	5.9	3.6
4	110	130	98	118	上 C 翘	4.2	3.1

5 结论

1)详细分析了轧制、工艺润滑制度以及防皱辊防颤辊对带钢受力的影响,得到带钢在平整过程中 C 翘的形成机理及表面最大横向延伸量差,从而确定了 C 翘翘曲的高度的预报模型。建立了调节防皱辊防颤辊的高度对 C 翘缺陷进行治理的方法。

2)分析得到了平整过程中 C 翘缺陷的产生主要原因为带钢表面在厚度方向受到不均匀应力,产生不同程度的横向延伸,进而发生翘曲。

3)将模型应用到实际生产中,平整过程中翘曲预报精度误差控制在 10% 以内,通过应用 C 翘治理策略,机组成品带钢翘曲高度明显减小。

参考文献:

- [1] 康永林.“十三五”中国轧钢技术进步及展望[J].钢铁,2021,56(10):1-15.
KANG Yonglin."13th Five-Year Plan" China's Steel Rolling Technology Progress and Prospects[J].Iron and Steel,2021,56(10):1-15.
- [2] 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.
BAI Zhenhua,LI Xiujun,LI Jianzhong. Overview of Key Technologies for Industrial Production of Ultra-thin Wide High-quality Cold-rolled Strip [J]. Steel Rolling,2021,38(3):1-8.
- [3] 曹秉宇,宋美娟,丁一,等.冷轧板带轧机的发展历史与现状[J].中国金属通报,2020(4):10-11.
CAO Bingyu ,SONG Meijuan,DING Yi ,et al. Development History and Current Situation of Cold-Rolled Strip Mill[J].China Metal Bulletin,2020(4):10-11.
- [4] 刘清梅,张福明.钢铁工业减碳与 CO₂ 资源化利用技术的研究进展[J].钢铁,2024,59(2):13-24.
LIU Qingmei ,ZHANG Fuming. Research Progress on Carbon Reduction and CO₂ Resource Utilization Technology in Iron and Steel Industry[J].Iron and Steel,2024,59(2):13-24.
- [5] LIU Bo, YANG Bin, ZHAO Yelong, et al. Low-pass U-Net: a Segmentation Method to Improve Strip Steel Defect Detection [J]. Measurement Science and Technology,2023,34(3):035405.
- [6] 郭贺松,孙建亮,叶春林,等.基于 SAE-DBN 混合深度网络的热轧带钢表面缺陷预报[J].钢铁,2023,58(8):120-128.
GUO Hesong ,SUN Jianliang ,YE Chunlin,et al. Surface Defect Prediction of Hot-rolled Strip Based on SAE-DBN Hybrid Depth Network [J]. Iron and Steel,2023,58(8):120-128.
- [7] CHAZHOOR A A P, HO E S L, GAO B, et al. A Review and Benchmark on State-of-the-art Steel Defects Detection [J]. SN Computer Science, 2023, 5: 114.
- [8] 崔熙颖,王植,滕华湘,等.冷连轧过程碎边浪缺陷形成机理及智能综合控制技术[J].冶金自动化,2022,46(6):111-119.

- CUI Xiying, WANG Zhi, TENG Huaxiang, et al. The Formation Mechanism of Broken Edge wave Defects in the Cold Continuous Rolling Process and Intelligent Comprehensive Control Technology[J]. Metallurgical Automation, 2022, 46(6):111-119.
- [9] 白振华, 崔熙颖, 王伟, 等. 横切机组矫直过程板形变化机理及其预报模型[J]. 中国机械工程, 2021, 32(20):2514-2519.
- BAI Zhenhua, CUI Xiying, WANG Wei, et al. Plate Shape Change Mechanism and Prediction Model of Cross-cutting Unit Straightening Process[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(20):2514-2519.
- [10] FISCHER F D, RAMMERSTORFER F G, FRIEDL N, et al. Buckling Phenomena Related to Rolling and Levelling of Sheet Metal[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(10):1887-1910.
- [11] 管现亮, 王凤琴, 刘子英, 等. 热轧带钢残余应力相关板形缺陷机理分析及攻关措施[J]. 中国冶金, 2020, 30(5):35-41.
- ZAN Xianliang, WANG Fengqin, LIU Ziyang, et al. Mechanism Analysis and Tackling Measures of Plate Shape Defects Related to Residual Stress of Hot-rolled Strip Steel[J]. Metallurgical China Metallurgy, 2020, 30(05):35-41.
- [12] 钱胜, 张文军, 林威, 等. 热镀锌连退过程 C 翘机理及其预报模型[J]. 钢铁, 2021, 56(9):88-95.
- QIAN Sheng, ZHANG Wenjun, LIN Wei, et al. C-warping Mechanism and Prediction Model of Hot-dip Galvanizing Continuous Retreat Process[J]. Iron and Steel, 2021, 56(9):88-95.
- [13] 钱胜, 林威, 胡万通, 等. 热镀锌冷却过程对 C 翘带钢影响及其优化技术[J]. 中国机械工程, 2022, 33(8):986-992.
- QIAN Sheng, LIN Wei, HU Wantong, et al. Effect of Hot-dip Galvanizing Cooling Process on C Warp Strip and Its Optimization Technology[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(8):986-992.
- [14] 孙永旭, 钱胜, 白振华. 镀铝锌机组 C 翘影响因素研究[J]. 冶金设备, 2020(4):47-50.
- SUN Yongxu, QIAN Sheng, BAI Zhenhua. Study on the Influencing Factors of C-warping of Aluminum-zinc Unit[J]. Metallurgical Equipment, 2020(4):47-50.
- [15] 张宝平, 周莲莲. 连续退火生产线带材翘曲治理方案的研究[J]. 中国冶金, 2007(7):55-57.
- ZHANG Baoping, ZHOU Lianlian. Research on Strip Warpage Control Scheme of Continuous Annealing Production Line[J]. Metallurgical China, 2007(7):55-57.
- [16] 管现亮, 孙冀洲, 王凤琴, 等. 热轧平整带钢 C 翘机理分析及措施[J]. 轧钢, 2020, 37(5):21-24.
- ZAN Xianliang, SUN Yizhou, WANG Fengqin, et al. Analysis and Measures of C-warping Mechanism of Hot-rolled Flat Strip[J]. Steel Rolling, 2020, 37(5):21-24.
- [17] 白振华, 刘宏民, 李秀军, 等. 平整轧制工艺模型[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- BAI Zhenhua, LIU Hongmin, LI Xiujun, et al. Flat Rolling Process Model[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
- [18] 张孝彦, 张冀, 王卓, 等. 平整过程中异步轧制轧制压力计算模型[J]. 钢铁, 2024, 59(1):108-116.
- ZHANG Xiaoyan, ZHANG Ji, WANG Zhuo, et al. Calculation Model of Asynchronous Rolling Pressure in the Process of Leveling[J]. Iron and Steel, 2024, 59(1):108-116.
- [19] 白振华, 周庆田, 窦爱民, 等. 冷连轧高速轧制过程中摩擦因数机理模型的研究[J]. 钢铁, 2007, 42(5):47-50.
- BAI Zhenhua, ZHOU Qingtian, DOU Aiming, et al. Research on Friction Factor Mechanism Model in High-speed Rolling Process of Cold Continuous Rolling[J]. Iron and Steel, 2007, 42(5):47-50.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 杨永辉, 男, 1997 年生, 博士研究生。研究方向为连续退火、平整。E-mail: 2636981928@qq.com。白振华* (通信作者), 男, 1975 年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为冷热轧、连续退火、平整。E-mail: bai_zhenhua@aliyun.com。

本文引用格式:

杨永辉, 张冀, 谭海龙, 等. 带钢平整过程中 C 翘机理及治理策略[J]. 中国机械工程, 2025, 36(6):1345-1351.

YANG Yonghui, ZHANG Ji, TAN Hailong, et al. C-warping Mechanism and Treatment Strategies in Leveling Processes of Strip Steels[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1345-1351.