

# 20 辊轧机非对称冷却的板形预报模型 及影响因素分析

崔熙颖<sup>1</sup> 王文奇<sup>1</sup> 徐世浩<sup>1</sup> 刘阔<sup>1</sup> Sahal Ahmed ELMI<sup>1</sup> 白振华<sup>1,2,3\*</sup>

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,518000

**摘要:**针对 20 辊轧机成品带钢板形的边浪缺陷问题,提出多边界条件与乳化液传热系数耦合的温度场计算方法,建立了 20 辊轧机的上下工作辊异温热辊型计算模型。对支撑辊分段压下形式的辊系进行受力分析,阐明了多层辊系的变形协调关系。构建的薄板带 20 辊轧机精密轧制过程板形预报模型使计算精度提高 31.1%,揭示了上下工作辊原始凸度差异、一中间辊锥型、支撑辊背衬轴承压上等因素对薄板带板形的影响规律。

**关键词:**20 辊轧机;板形;温度场;轧辊凸度

**中图分类号:**TG331

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2025.07.022

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Prediction Model with Asymmetric Cooling and Analysis of Influencing Factors of Plate Shapes in 20-high Rolling Mills

CUI Xiying<sup>1</sup> WANG Wenqi<sup>1</sup> XU Shihao<sup>1</sup> LIU Kuo<sup>1</sup> Sahal Ahmed ELMI<sup>1</sup> BAI Zhenhua<sup>1,2,3\*</sup>

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.Shenzhen Research Institute, Yanshan University, Shenzhen, Guangdong, 518000

**Abstract:** Aiming at the edge wave defects in the shapes of finished strip steels produced by 20-high rolling mills, a temperature field calculation method was proposed coupled with multiple boundary conditions and emulsion heat transfer coefficients. A differentiated thermal crown calculation model for upper and lower work rolls in 20-high rolling mills was established. Mechanics analysis was conducted on the segmented reduction pattern of backup rolls, and the deformation coordination relationships in multi-layer roll systems were elucidated. The shape prediction model was developed, which improves computational accuracy by 31.1%, for precision rolling processes in thin-strip 20-high rolling mills. The influence patterns of factors, such as original crown difference between upper and lower work rolls, taper configuration of the first intermediate rolls, and backing bearing reduction of backup rolls on thin-strip shape formation, were revealed.

**Key words:** 20-high rolling mill; shape; temperature field; roll crown

### 0 引言

随着钢铁生产向绿色化和轻量化发展,20 辊轧机以其刚度高、压下量大、板形控制能力强的特点而成为高品质薄板带生产的主力,因此 20 辊轧机板形控制时考虑因素的研究也愈发深入<sup>[1-3]</sup>。森吉米尔 20 辊轧机的上下辊系非对称冷却,轧制

稳定时的热凸度表现不一致,因此需要考虑轧辊温度场,建立更精准的板形模型。

针对 20 辊轧机板形模型的研究方法主要有影响函数法和有限元法<sup>[4-7]</sup>。文献[8-10]采用影响函数法建立了 20 辊森吉米尔轧机的辊系变形和辊间接触压力计算模型,计算了轧辊-轧件一体化辊系变形和接触应力。文献[11-13]则通过优化有限元法建立更有针对性的板形和带钢厚度预报模型。上述研究考虑了板形模型在不同工况及参数下的适应性,提高了板形预报精度,具有较好

收稿日期:2024-07-05

基金项目:河北省自然科学基金(E2024203125);河北省高等学校科学技术研究项目(CXY2023012);河北省重大科技成果转化专项(22281001Z,23280101Z)

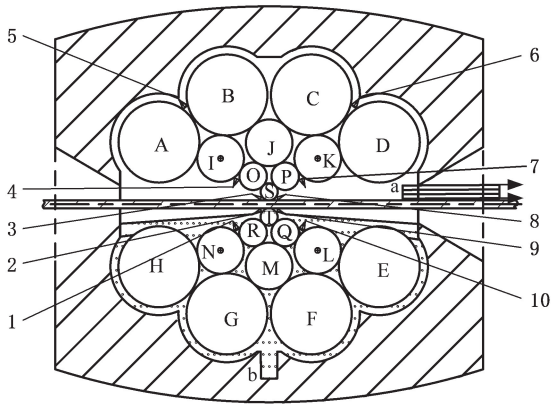
的参考价值,但没有考虑 20 辊森吉米尔轧机轧制稳定时润滑方式导致的上下辊系非对称热辊型对模型的影响,预报精度有待进一步提高。

板形影响因素研究集中在—中间辊窜辊和辊型对板形的影响<sup>[14]</sup>。文献[15-16]分析了一中间辊窜辊量和锥型对板形调控能力的影响,ZHOU 等<sup>[17]</sup>研究了一中间辊锥型和支撑辊分段减压组合方案。上述研究考虑了对板形影响较大且较为直接的因素,但没有研究冷却方式导致的上下辊系非对称辊凸度和支撑辊背衬轴承压方式对板形的影响。

本文在上下辊系非对称冷却的基础上研究辊系温度场模型和工作辊热凸度模型,分析辊系受力时考虑支撑辊分段的特点,建立一个更完善的 20 辊轧机板形预报模型,分析上下工作辊原始凸度差等因素对带钢板形的影响规律。

### 1 20 辊轧机热辊型模型的建立

20 辊轧机的轧辊辊系处在一个密闭的空间。如图 1 所示,正常轧制时,乳化液喷嘴喷射乳化液,对辊系和带钢进行冷却和润滑,然后由乳化液出口排出;下辊系浸没在乳化液中,保证对下辊系的冷却和润滑。工作辊凸度与冷却条件相关,轧制稳定后,辊系冷却方式的不同使上下辊系的热辊型存在差异,导致带钢上下表面的非对称轧制,可能出现图 2 所示的上工作辊凸度大于下工作辊凸度,影响有载辊缝分布,进而对板形产生影响。



1-10. 辊系乳化液喷嘴 a. 随带钢排出的乳化液  
b. 轧机的乳化液排出口 A~H. 支撑辊 I~N. 二中间辊  
O~R. 一中间辊 S, T. 工作辊

图 1 20 辊轧机上下辊系冷却示意图

Fig.1 Cooling diagram of upper and lower roll systems in 20-high rolling mill

#### 1.1 辊系温度场模型的建立

以工作辊为例,取辊身轴向的右上侧进行分析,建立以轴线中点为原点、以轴线为横轴、以轧辊半径为纵轴的二维温度场坐标系,如图 3 所示。

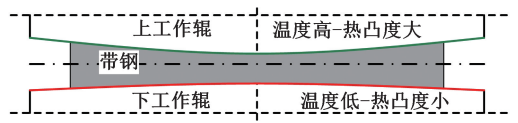


图 2 轧制过程中上下工作辊热辊型示意图

Fig.2 Hot roll profile of upper and lower working rolls in rolling process

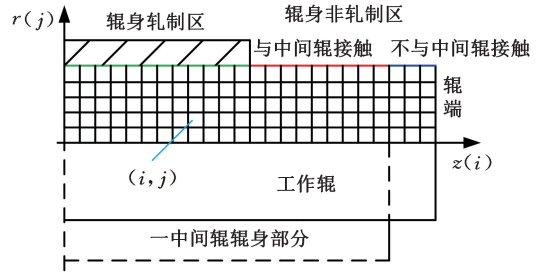


图 3 20 辊轧机下工作辊的二维温度场模型

Fig.3 2D temperature field model of working roll in 20-high rolling mill

对轧辊温度场模型(图 3)轧制区和非轧制区单元的微分方程进行差分,边界条件为从钢板传到工作辊的热量和冷却液带走的热量。整理后的轧辊热平衡差分方程为

$$\frac{T_{i,j+1}(t) - 2T_{i,j}(t) + T_{i,j-1}(t)}{(\Delta r)^2} + \frac{T_{i,j+1}(t) - T_{i,j-1}(t)}{2r_0 \Delta r} + \frac{T_{i+1,j}(t) - 2T_{i,j}(t) + T_{i-1,j}(t)}{(\Delta z)^2} = \frac{T_{i,j}(t) - T_{i,j}(t - \Delta t)}{\alpha \Delta t} \quad (1)$$

式中: $T_{i,j}(t)$  为单元  $(i, j)$  在时刻  $t$  的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$  为导热系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\rho$  为轧辊的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $r_0$  为单元  $(i, j)$  处的半径,  $\text{mm}$ ;  $\Delta r$  为划分单元的高度,  $\text{mm}$ ;  $\Delta z$  为划分单元的长度,  $\text{mm}$ ;  $\Delta t$  为温度变化量,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_p$  为轧辊的比热。

#### 1.2 边界条件的确定

以工作辊为例进行分析,20 辊轧机的工作辊除与带钢接触以外,还与 2 个—中间辊接触。按照不同的接触边界条件,将工作辊分为五部分,每部分采用前面所述离散单元法推导非稳态温度场计算公式,继而得到各部分的边界条件。

辊身轧制部分的边界条件为

$$-(\alpha_B + \alpha_S + 2\alpha_{T-P})R\Delta z T_{i,j}(t) + \left(\frac{\rho C_p r_0 \Delta r \Delta z}{\Delta t} - \frac{kR\Delta z}{\Delta r} - \frac{2kr_0 \Delta r}{\Delta z} + k\Delta z\right)T_{i,j}(t) + \frac{kr_0 \Delta r}{\Delta z}T_{i+1,j}(t) + k(R - \Delta r)\frac{\Delta z}{\Delta r}T_{i,j-1}(t) + \frac{kr_0 \Delta r}{\Delta z}T_{i-1,j}(t) = \frac{\rho C_p r_0 \Delta r \Delta z}{\Delta t}T_{i,j}(t + \Delta t) - R\Delta z(\alpha_B T_B - \alpha_S T_W - 2\alpha_{T-P} T_P) \quad (2)$$

辊身非轧制区与—中间辊接触部分的边界条件为

$$\left[k\Delta z - R\Delta z(\alpha_S + 2\alpha_{T-P} + \frac{k}{\Delta r}) - \frac{2kr_0 \Delta r}{\Delta z}\right]T_{i,j}(t) +$$

$$\begin{aligned} & \frac{\rho C_p r_0 \Delta r \Delta z}{\Delta t} T_{i,j}(t - \Delta t) + \frac{k r_0 \Delta r}{\Delta z} T_{i+1,j}(t) + \\ & k \Delta z \left( \frac{R}{\Delta r} - 1 \right) T_{i,j-1}(t) + \frac{k r_0 \Delta r}{\Delta z} T_{i-1,j}(t) = \\ & \frac{\rho C_p r_0 \Delta r \Delta z}{\Delta t} T_{i,j}(t) - R \Delta z (\alpha_S T_W + 2\alpha_{T-P} T_P) \quad (3) \end{aligned}$$

辊身非轧制区不与一中间辊接触部分的边界条件为

$$\begin{aligned} & (k \Delta z - \alpha_S R \Delta z - \frac{R}{\Delta r} - \frac{2k r_0 \Delta r}{\Delta z}) T_{i,j}(t) + \\ & r_0 \Delta r \left( \frac{\rho C_p \Delta z}{\Delta t} T_{i,j}(t - \Delta t) + \frac{k}{\Delta z} T_{i+1,j}(t) + \right. \\ & \left. \frac{k}{\Delta z} T_{i-1,j}(t) \right) + k \Delta z \left( \frac{R}{\Delta r} - 1 \right) T_{i,j-1}(t) = \\ & \frac{\rho C_p r_0 \Delta r \Delta z}{\Delta t} T_{i,j}(t) - \alpha_S (R \Delta z) T_W \quad (4) \end{aligned}$$

辊端部分的边界条件为

$$\begin{aligned} & [k \Delta z (1 - \frac{2R}{\Delta r}) - \frac{r_0 \Delta r}{\Delta z} (\alpha_{S-D} + k)] T_{i,j}(t) + \\ & \frac{k \Delta z R}{\Delta r} T_{i,j+1}(t) + \frac{k r_0 \Delta r}{\Delta z} T_{i-1,j}(t) + \\ & k \Delta z \left( \frac{R}{\Delta r} - 1 \right) T_{i,j-1}(t) = -\alpha_{S-D} \frac{r_0 \Delta r}{\Delta z} T_A + \\ & \rho r_0 \Delta r \Delta z C_p \frac{T_{i,j}(t) - T_{i,j}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (5) \end{aligned}$$

辊身非轧制部分与辊端角节点处的边界条件为

$$\begin{aligned} & [k \Delta z - (\alpha_S + k) \frac{R}{\Delta r} \Delta z - (\alpha_{S-D} + k) r_0 \frac{\Delta r}{\Delta z}] T_{i,j}(t) + \\ & k \Delta z \left( \frac{R}{\Delta r} - 1 \right) T_{i,j-1}(t) + \frac{k r_0 \Delta r}{\Delta z} T_{i-1,j}(t) + \\ & \frac{\rho C_p r_0 \Delta r \Delta z}{\Delta t} T_{i,j}(t - \Delta t) = \frac{\rho C_p r_0 \Delta r \Delta z}{\Delta t} T_{i,j}(t) - \\ & \frac{\alpha_S \Delta z R}{\Delta r} T_W - \frac{\alpha_{S-D} r_0 \Delta r}{\Delta z} T_A \quad (6) \end{aligned}$$

式中:  $\alpha_B$ 、 $\alpha_S$ 、 $\alpha_{T-P}$ 、 $\alpha_{S-D}$  分别为工作辊与带钢、冷却液、一中间辊、环境空气间的传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $T_B$ 、 $T_W$ 、 $T_P$ 、 $T_A$  分别为带钢、冷却液、一中间辊和环境空气的温度,  $^{\circ}C$ 。

### 1.3 轧辊与乳化液间传热系数的确定

乳化液油膜附着在上辊系轧辊上,因此传热系数受乳化液流速影响;下辊系全部浸没在乳化液中,乳化液与轧辊的传热系数不受乳化液流速影响。因此分别给出上下辊系轧辊与乳化液的传热系数:

$$h_i = C_{r,i} \frac{\lambda_c}{d} \left( \frac{v_h d}{u_h} \right)^{n_{r,i}} \left( \frac{C_w \eta}{\lambda_c} \right)^{m_{r,i}} \quad (7)$$

式中:  $C_{r,i}$ 、 $n_{r,i}$ 、 $m_{r,i}$  为模型系数,可通过系数回归的方法求得;  $v_h$  为乳化液流速;  $\lambda_c$  为乳化液的热导率;  $C_w$  为乳化液的比热容;  $u_h$  为乳化液的动力黏度; 下标  $i = 1$  表示上辊系,  $i = 2$  表示下辊系。

计算下辊系时取流速为 1,然后通过系数回归的

方法分别求得模型系数  $C_{r,i}$ 、 $n_{r,i}$ 、 $m_{r,i}$ ,进而得出上下辊系与乳化液的传热系数计算公式。

### 1.4 热辊型模型的建立

采用弹性理论公式计算轧辊热变形时,假设轧辊为无限长圆柱体,其温度相对于轧辊轴线对称分布,同时假设轧辊初始温度为  $T_{i,j}(t_0)$ ,则轧辊由于热膨胀形成的热凸度<sup>[18]</sup>为

$$u_r = 2(1 + \nu) \frac{\beta_r}{R} \int_0^R (T_{i,j}(t) - T_{i,j}(t_0)) r dr \quad (8)$$

式中:  $\nu$  为轧辊材料的泊松比;  $\beta_r$  为热膨胀系数;  $r$  为轧辊上某一点的半径;  $R$  为轧辊半径。

采用离散单元法可得轧辊在不同的设备特征参数及工艺特征参数下的温度场及热辊型曲线。

## 2 20 辊轧机板形模型的建立

不同的冷却条件导致轧制稳定后的上下工作辊凸度存在差异。结合 20 辊轧机支撑辊的分段结构,采用影响函数法建立辊系的弹性变形模型,形成更为完善的 20 辊轧机板形模型。

### 2.1 金属变形模型

带钢板形是内部横向应力分布不均的外在表现,前张力横向分布模型为<sup>[19]</sup>

$$\sigma_1(y) = \frac{\sigma_{T1}}{Bh} + \frac{E}{1 - \nu} \left( 1 + \frac{h(y)}{h} - \frac{H(y)}{H} - \frac{L(y)}{L} \right) \quad (9)$$

式中:  $\sigma_{T1}$  为总前张力;  $B$  为带钢宽度;  $h$  为出口平均厚度;  $E$  为弹性模量;  $h(y)$  为出口厚度分布;  $H(y)$  为入口厚度分布;  $H$  为入口平均厚度;  $L(y)$  为入口长度分布;  $L$  为入口平均长度。

### 2.2 考虑支撑辊分段的辊系弹性变形模型

首先分析上下辊系的受力及几何结构,得到各个轧辊间辊心连线的角度,以及各辊接触力之间的夹角方程<sup>[20]</sup>。然后对辊系进行受力分析,建立轧辊挠度方程和力与力矩平衡方程。

#### 2.2.1 横向分布力分析

采用分段离散法建立辊系弹性变形模型。将带材分成  $2n_B + 1$  段、背衬轴承分成  $2n_0 + 1$  段、二中间辊分成  $2n_{JK} + 1$  段、一中间辊分成  $2n_P + 1$  段、工作辊分成  $2n_S + 1$  段。带钢及各个轧辊的每段长度均相等,即

$$\Delta x = \frac{L_S}{2n_S + 1} = \frac{L_P}{2n_P + 1} = \frac{L_{JK}}{2n_{JK} + 1} = \frac{B_z}{2n_0 + 1} = \frac{B}{2n_B + 1}$$

式中:  $B_z$  为支撑辊背衬轴承宽度。

如图 1 所示,将上辊系沿辊心连线 S-P-J-C 方向作剖视图,得到辊间横向压力分布示意图(图 4),7 个鞍座对支撑辊 C 的力分别为  $F_{C1}$ 、 $F_{C21}$  和

$F_{C22}, \dots, F_{C7}, q_{BS}(j)$  为带钢与工作辊在第  $j$  单元的集中力,  $q_{SP}(j)$  为一中间辊与工作辊在第  $j$  单元的集中力,  $q_{JC}(j)$  为二中间辊 J 与支撑辊 C 在第  $j$  单元的集中力。

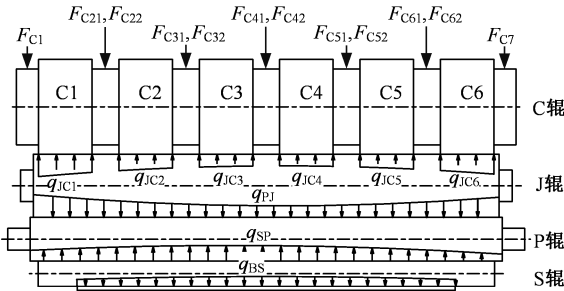


图 4 辊间横向压力分布示意图

Fig.4 Schematic diagram of lateral pressure distribution between rollers

### 2.2.2 轧辊挠度和变形协调方程的建立

20 辊轧机辊系为三维结构,对于多点受力的辊,在计算辊挠度时,将辊在不同接触点的受力及刚性位移向同一方向作投影(约定向上为正),得到各辊在不同辊心连线方向上的弯曲挠度方程,下面以工作辊 S 和支撑辊 C 为例进行分析。

工作辊 S 的挠度方程为

$$\left. \begin{aligned}
 f_{1,1}^{S_l}(i) &= \sum_{j=1}^{n_S+1} (q_{BS}(j) - 2q_{SP}(j)\cos\varphi_{SP2})G_S(i,j) - \theta_S x(i) \\
 & \quad i = 1, 2, \dots, n_S + 1 \\
 f_{1,1}^{S_r}(i) &= \sum_{j=n_S+2}^{2n_S+1} (q_{BS}(j) - 2q_{SP}(j)\cos\varphi_{SP2})G_S(i,j) + \theta_S x(i) \\
 & \quad i = n_S + 2, n_S + 3, \dots, 2n_S + 1 \\
 f_{2,1}^{S_l}(i) &= \sum_{j=1}^{n_S+1} (q_{BS}(j)\cos\varphi_{SP2} - 2q_{SP}(j)\cos^2\varphi_{SP2})G_S(i,j) - \theta_S x(i)\cos\varphi_{SP2} \\
 & \quad i = 1, 2, \dots, n_S + 1 \\
 f_{2,1}^{S_r}(i) &= \sum_{j=n_S+2}^{2n_S+1} (q_{BS}(j)\cos\varphi_{SP2} - 2q_{SP}(j)\cos^2\varphi_{SP2})G_S(i,j) + \theta_S x(i)\cos\varphi_{SP2} \\
 & \quad i = n_S + 2, n_S + 3, \dots, 2n_S + 1
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中:  $f_{1,1}^{S_l}(i), f_{1,1}^{S_r}(i), f_{2,1}^{S_l}(i), f_{2,1}^{S_r}(i)$  分别为工作辊 S 在第  $i$  单元与带钢、一中间辊 P 的辊心连线方向上左右侧的挠度; 上标 l, r 分别表示工作辊 S 的左侧和右侧;  $x_i$  为第  $i$  段到轧制中心线的距离;  $G_S(i, j)$  为工作辊 S 第  $j$  段载荷对第  $i$  段挠度的影响;  $\theta_S$  为工作辊的刚性转角;  $\varphi_{SP2}$  为工作辊 S 与一中间辊 P 辊心连线与竖直方向的角度。

支撑辊 C 为分段结构,有多个支撑力,且同时与二中间辊 J 和二中间辊 K 接触。第一个背衬轴承 C1 的挠度方程为

$$\left. \begin{aligned}
 f_{4,3}^{C_1 L}(i) &= \sum_{j=n_{C1}}^{n_{C1}+n_0-1} (q_{JC_1}(j) + q_{KC_1}(j))\sin(\varphi_{CJ1} - \varphi_{CK2})G_{C_1}(i,j) - F_{C1}\cos(\varphi_{PC-PJC})G_{FC_1} \\
 & \quad i = n_{C1} + 1, n_{C1} + 2, \dots, n_{C1} + n_0 - 1 \\
 f_{4,3}^{C_1 R}(i) &= \sum_{j=n_{C1}+n_0}^{n_{C1}+2n_0} (q_{JC_1}(j) + q_{KC_1}(j))\sin(\varphi_{CJ1} - \varphi_{CK2})G_{C_1}(i,j) - F_{C21}\cos(\varphi_{PC-PJC})G_{FC_2} \\
 & \quad i = n_{C1} + n_0, n_{C1} + n_0 + 1, \dots, n_{C1} + 2n_0 \\
 f_{4,2}^{C_1 L}(i) &= \sum_{j=n_{C1}}^{n_{C1}+n_0-1} (q_{JC_1}(j))\sin(\varphi_{CJ1} + \varphi_{CK2}) - q_{KC_1}(j)G_{C_1}(i,j) - F_{C1}\cos(\varphi_{PC-PKC})G_{FC_1} \\
 & \quad i = n_{C1} + 1, n_{C1} + 2, \dots, n_{C1} + n_0 - 1 \\
 f_{4,2}^{C_1 R}(i) &= \sum_{j=n_{C1}+n_0}^{n_{C1}+2n_0} (q_{JC_1}(j))\sin(\varphi_{CJ1} + \varphi_{CK2}) - q_{KC_1}(j)G_{C_1}(i,j) - F_{C21}\cos(\varphi_{PC-PKC})G_{FC_2} \\
 & \quad i = n_{C1} + n_0, n_{C1} + n_0 + 1, \dots, n_{C1} + 2n_0
 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: 下标 4.3 表示支撑辊 C 与二中间辊 J 的相互作用; 上标 C1 表示第 1 个背衬轴承; 上标 L, R 分别表示背衬轴承的左半部分和右半部分; 下标 4.2 表示支撑辊 C 与二中间辊 K 的相互作用;  $G_{C_1}(i, j)$  为支撑辊 C 第 1 个背衬轴承的第  $j$  段载荷对第  $i$  段挠度的影响;  $q_{KC_1}(j)$  为二中间辊 K 与支撑辊 C 上第一个轴承在第  $j$  单元的集中力;  $\varphi_{PC-PKC}$  为支撑辊 C 所受支撑力与二中间辊 K 和支撑辊 C 辊间接触压力的夹角;  $G_{FC_1}$  为支撑辊 C 上第 1 个背衬轴承  $C_1$  左侧的支撑力  $F_{C_1}$  对支撑辊第  $j$  段挠度的影响系数;  $\varphi_{PC-PJC}$  为支撑辊 C 所受支撑力与二中间辊 J 辊和支撑辊 C 辊间接触压力的夹角;  $\varphi_{CJ1}$  为支撑辊 C 和二中间辊 J 的辊心连线与水平方向的夹角;  $\varphi_{CK2}$  为支撑辊 C 和二中间辊 K 的辊心连线与竖直方向的夹角。

分析轧辊的几何变形,以工作辊 S 为例,工作辊与一中间辊的变形协调方程为

$$f_{S2,1} = f_{P2,1} + K_{SP}(q_{SP}(N_L + 1) - q_{SP}(i)) - (\Delta D_{S_i} + \Delta D_{P_i})/2 \quad (12)$$

式中:  $f_{S2,1}, f_{P2,1}$  分别为工作辊 S 和一中间辊 P 的挠度;  $K_{SP}$  为工作辊 S 与一中间辊 P 的辊间压扁系数;  $N_L$  为支撑辊中心线左侧对应于工作辊上的段数;  $q_{SP}$  为工作辊 S 和一中间辊 P 的辊间压力;  $\Delta D_{S_i}, \Delta D_{P_i}$  分别为工作辊 S、一中间辊 P 的辊型分布值。

对辊系进行力和力矩的平衡分析,得到辊系各轧辊的力和力矩平衡方程。计算过程中,首先计算出上下工作辊的热辊型分布  $\Delta D_{S_i}^{sh}, \Delta D_{S_i}^s$ , 再分别计算上下辊系变形协调关系。

工作辊、一中间辊、二中间辊和支撑辊的轧辊挠度方程、变形协调方程、力和力矩平衡方程等方程组中,方程的数量和未知数的个数均为  $2n_P + 4n_{JK} + 24n_0 + 49$ ,联立式(10) ~ 式(12),同时考

考虑变形协调方程、力和力矩的平衡方程,采用迭代计算的方法求解所需的轧制压力分布和相邻辊间的压力分布等未知参数。

### 2.3 板形模型的建立

将计算得到的上下工作辊的热辊型代入 2.2 节模型,求解出上下工作辊的挠曲变形,从而得到轧制过程中的有载辊缝分布

$$h_i = h_1 - f_{S_i}^{sh} - f_{S_i}^{xs} + (\Delta D_{S_i}^{sh} + \Delta D_{S_i}^{xs})/2 - 2(q_{BS}(n+1) - q_{BS}(i))K' \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} K' &= \frac{\theta}{\Delta x} \left( \ln \frac{4R_s}{\Delta h + 16\theta q'} + \frac{32\theta q'}{\Delta h + 16\theta q'} \right) \\ \theta &= \frac{1 - \nu^2}{\pi E} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: $K'$ 为工作辊与轧件间的压扁系数; $q'$ 为单位宽度轧制压力, $q' = p/B$ , $p$ 为轧制力; $E$ 为弹性模量,MPa。

结合金属塑性变形模型得到带钢的前张力横向分布,再将其代入板形模型,求得特定来料和轧制工艺参数下的出口带钢板形:

$$S_i = -10^5 \frac{1 - \nu^2}{E} (\sigma_{li} - \sigma_{T1}) \quad (15)$$

式中: $\sigma_{li}$ 为前张力横向分布,MPa; $\sigma_{T1}$ 为总前张力,MPa。

### 3 模型验证

首先验证热辊型模型的有效性,取轧机轧制第 5 道次后的上下工作辊为研究对象,某钢厂 20 辊轧机相关设备及温度参数如表 1 所示,表 2 所示为轧制工艺参数,利用热辊型模型得到上下工作辊热辊型曲线,如图 5 所示。检测刚下机的工作辊辊径,上下工作辊存在 135  $\mu\text{m}$  的辊径差。由此可以看出通过热辊型预报模型得到的工作辊

表 1 20 辊轧机相关设备参数

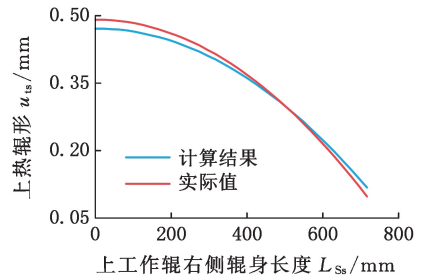
Tab.1 Equipment parameters of 20-high rolling mill

参数名	数值
工作辊辊径 $D_S/\text{mm}$	63.5
工作辊辊身长 $L_S/\text{mm}$	1444
工作辊原始凸度 $u_{s0}/\mu\text{m}$	30
一中间辊辊径 $D_{m1}/\text{mm}$	102
一中间辊辊身长 $L_{m1}/\text{mm}$	1600
一中间辊锥型深度 $\delta_m/\text{mm}$	1.0
一中间辊锥长 $l_m/\text{mm}$	200
轧件温度 $T_b/^\circ\text{C}$	60
带钢宽度 $B/\text{mm}$	1120
二中间辊直径 $D_F/\text{mm}$	102
二中间被动辊凸度 $u_{i0}/\mu\text{m}$	25
二中间被动辊长度 $L_J/\text{mm}$	1644
二中间主动辊凸度 $u_{i0}/\mu\text{m}$	10
支撑辊背衬轴承个数 $m_2$	6
背衬轴承直径 $D_C/\text{mm}$	299
冷却液温度 $T_w/^\circ\text{C}$	58
空气温度 $T_A/^\circ\text{C}$	30
工作辊初始温度 $T_S/^\circ\text{C}$	35

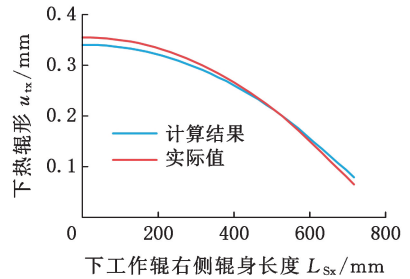
表 2 20 辊轧机轧制工艺参数

Tab.2 Rolling process parameters of 20-high rolling mill

参数	第 1 道次	第 2 道次	第 3 道次	第 4 道次	第 5 道次
入口厚度 $H/\text{mm}$	2.3	1.43	0.93	0.6	0.39
出口厚度 $h/\text{mm}$	1.43	0.93	0.6	0.39	0.257
轧制力 $p/\text{kN}$	4610	4230	3950	3500	3050
入口张力 $T_0/\text{kN}$	29	85	89	75	51
出口张力 $T_1/\text{kN}$	43	175	121	87	62
上一中间辊 辊量 $\delta_{cs}/\text{mm}$	77	76	73.3	14	54.5
下一中间辊 辊量 $\delta_{cx}/\text{mm}$	83.5	80	78.3	52.2	55.8



(a) 上工作辊



(b) 下工作辊

图 5 上下工作辊热辊型模拟曲线图

Fig.5 Simulation curve of thermal roller profile for upper and lower working rolls

热辊型计算值与热辊型实测值误差稳定在 5% 以下,证明了热辊型预报模型的正确性。

利用是否考虑热辊型差异的板形模型对特定来料及工艺参数下的成品带钢板形进行模拟计算,第 5 道次出口带钢的板形如图 6 所示。考虑热辊型差异的板形模型与实际板形更接近,板形模型精度比未考虑热辊型差异时提高 31.1%,证

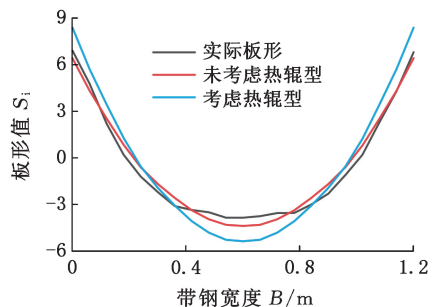


图 6 第 5 道次出口带钢的板形

Fig.6 Plate shape of the 5th export strip steel

明了本文板形模型的准确性。

#### 4 20 辊轧机板形的主要影响因素

##### 4.1 上下工作辊原始凸度差异

上下工作辊原始凸度差异影响工作辊的热辊型,进而影响成品带钢板形。利用板形模型定量模拟上下工作辊原始凸度差值与出口带钢板形之间的关系,其中,设定上工作辊凸度  $30 \mu\text{m}$  为基准凸度,下辊凸度减去上辊凸度的结果为凸度差。

20 辊轧机的主要设备参数如表 1 所示,主要轧制工艺参数如表 2 所示,在保持其他参数不变的情况下,模拟凸度差从  $-16 \mu\text{m}$  变为  $16 \mu\text{m}$  的板形变化如图 7 所示。

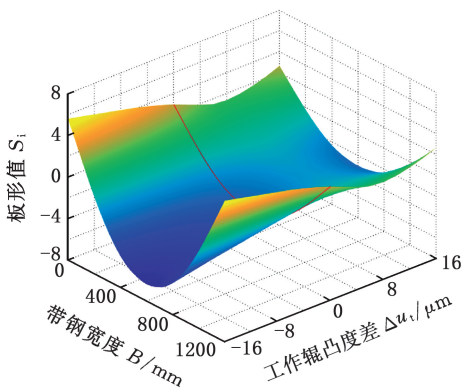


图 7 上下工作辊凸度差值对板形的影响

Fig.7 Effect of crown difference between upper and lower work rolls on plate shape

图 7 中的红色曲线表示工作辊凸度差为 0 时的板形分布。上下工作辊凸度差由 0 逐渐减小时,边浪有逐渐增大的趋势;上下工作辊凸度差由 0 逐渐增大时,边浪的变化趋势为先减小、后增大。凸度差为  $6.5 \mu\text{m}$  时,在形成热辊型后,上下工作辊热凸度趋于一致,改善板形;凸度差大于  $6.5 \mu\text{m}$  时,下工作辊的热凸度大于上工作辊的热凸度,出现矫枉过正的现象,呈现边浪加剧的趋势。

##### 4.2 一中间辊锥型

利用板形模型(式 15)、表 1 和表 2 所示数据,模拟图 8 所示的一中间辊锥型对 S-P 辊间接接触压力和带钢板形的影响,其中,四次曲线方程为

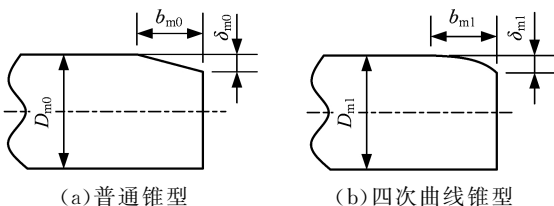


图 8 一中间辊的普通锥型和四次曲线锥型示意图

Fig.8 Schematic diagram of ordinary cone and quadric curve cone for an intermediate roller

$$D_{m1} = D_{m1} - 2\delta_{m1} \left( \frac{x - L_{m1} + b_{m1}}{b_{m1}} \right)^4, \quad x < L_{m1} \quad (16)$$

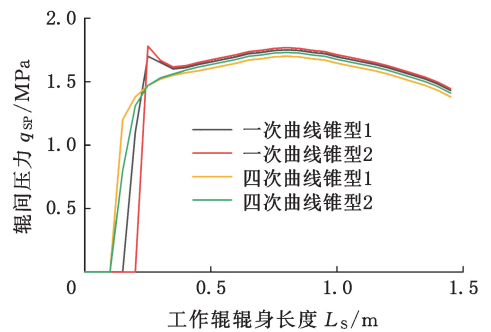
式中:  $D_{m1}$  为一中间辊直径;  $\delta_{m1}$  为锥型深度;  $L_{m1}$  为一中间辊辊身长度;  $b_{m1}$  为一中间辊锥型宽度。

表 3 所示 4 种锥型的一中间辊辊间压力和板形如图 9 所示。锥型深度 1 mm、宽度 200 mm 时,四次曲线的辊间压力分布更均匀,而一次曲线的板形控制效果更佳。锥型深度 1.5 mm、宽度 200 mm 时,四次曲线的辊间压力分布更均匀,且板形控制效果好于一次曲线。锥型的形式和宽度相同时,锥型深度 1.0 mm 的辊间压力分布均匀性好于锥型深度 1.5 mm,但板形控制效果劣于锥型深度 1.5 mm,且两者均未发生应力集中,因此 1.5 mm 的锥型深度能兼顾板形控制和轧辊寿命。这不仅改善了板形,而且解决了工作辊与一中间辊辊间的集中应力问题,延长了轧辊使用寿命。

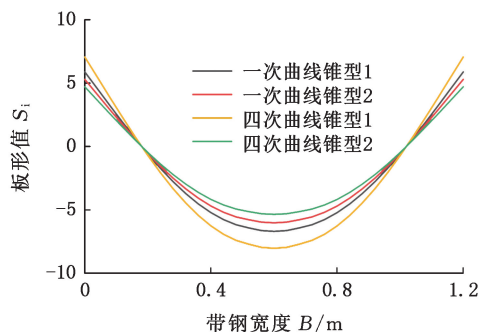
表 3 4 种锥型的特征参数表

Tab.3 Characteristic parameters for 4 types of cones

序号	锥型	锥型宽度 $b_m/\text{mm}$	锥型深度 $\delta_m/\text{mm}$
A	一次曲线锥型 1	200	1.0
B	一次曲线锥型 2	200	1.5
C	四次曲线锥型 1	200	1.0
D	四次曲线锥型 2	200	1.5



(a) 辊间压力横向分布



(b) 板形分布

图 9 一中间辊的辊间压力横向分布与板形分布

Fig.9 Lateral pressure distribution and plate shape distribution of intermediate rollers

##### 4.3 背衬轴承压入量对板形的影响规律

20 辊轧机支撑辊结构是由 6 个背衬轴承以

一定间隔排列而成,背衬轴承通过液压缸驱动齿条运动,进而控制偏心轮的转动来实现压下,如图 10 所示。轧制时,通过调节各个背衬轴承的压下量来改变支撑辊辊型,从而达到控制板形的目的。

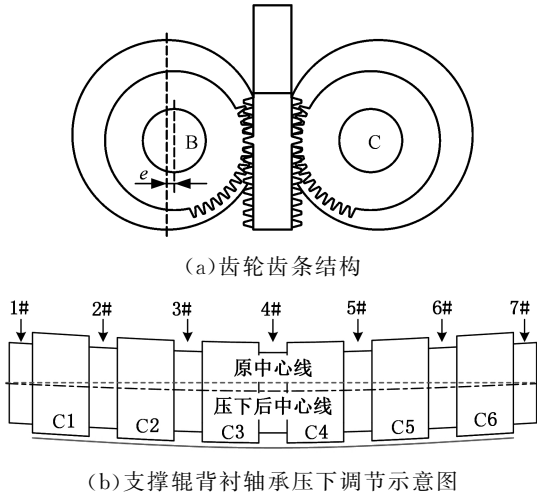


图 10 支撑辊背衬轴承压下调整方式示意图

Fig.10 Adjustment method for supporting roller backing shaft under pressure

为定量分析背衬轴承压下对板形的影响,在保持其他参数不变的情况下,分别模拟表 4 所示压下量分配方式,得到不同背衬轴承压下分配方式对板形的影响,如图 11 所示。

表 4 四种背衬轴承压下量分配方式

Tab.4 Four distribution methods for backing axes under pressure  $\mu\text{m}$

实验编号	实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	实验 5
1# 鞍座压下量 $\Delta w_1$	0	50	30	20	35
2# 鞍座压下量 $\Delta w_2$	0	40	50	30	30
3# 鞍座压下量 $\Delta w_3$	0	30	50	40	25
4# 鞍座压下量 $\Delta w_4$	0	20	40	50	20
5# 鞍座压下量 $\Delta w_5$	0	30	30	40	15
6# 鞍座压下量 $\Delta w_6$	0	40	20	30	10
7# 鞍座压下量 $\Delta w_7$	0	50	10	20	5

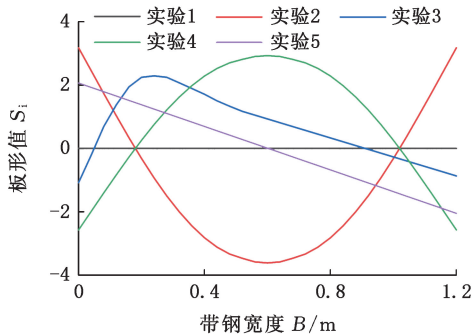


图 11 不同背衬轴承压下量分配方式的板形

Fig.11 Plate shapes of distribution methods under different backing bearing pressures

为方便表示背衬轴承压下量对板形的影响,以各鞍座压下量均为 0 为基准,将 5 组实验的实

际板形曲线与实验 1 的实际板形曲线作差,得到 5 组板形曲线(反映压下量分配方式改变产生的板形变化量),如图 11 所示。由图 11 可看出,与基态压下量的板形曲线相比,鞍座压下量越大的位置,板形值越大。由此得到如下鞍座压下量对板形的影响规律:

1) 实验 2 的带钢板形有向边浪发展的趋势。因此成品带钢为边浪缺陷时,可适当减小 1# 和 7# 鞍座的压下量或增大 3#~5# 鞍座的压下量,即通过增大辊凸度来减少边浪缺陷。

2) 实验 3 的带钢有出现左侧肋浪的趋势,可通过调节单侧压下量来处理肋浪等非对称浪形。

3) 实验 4 的带钢板形有向中浪发展的趋势,可通过减小 3#~5# 鞍座的压下量来治理中浪缺陷。

4) 实验 5 的带钢板形呈现左侧楔形的趋势,可通过调节支撑辊各鞍座的压下量调整支撑辊的倾斜,解决带钢的楔形问题。

## 5 结论

1) 建立了考虑上下辊系非对称冷却形式和支撑辊分段结构的 20 辊轧机板形预报模型,与未考虑热辊型时相比,考虑热辊型差异的板形模型计算精度提高 31.1%。

2) 通过调整上下工作辊凸度差可改善板形,为上下工作辊原始凸度设计奠定基础。

3) 将一中间辊锥型设置为特定形式的四次曲线可解决轧制过程中出现的辊间集中应力问题;锥型的宽度和深度相同时,四次曲线锥型对板形的调控效果比直线锥型更佳。

4) 通过改变 7 个鞍座的压下量得到不同工况下的板形曲线。与基准压下量的板形曲线相比,鞍座压下量越大的位置,板形值越大,可据此来解决带钢的中浪、双边浪、单边浪和四分之一浪的板形问题。

## 参考文献:

- [1] 康永林,朱国明,陈贵江,等.中国薄宽带钢无头轧制技术最新进展[J].钢铁,2023,58(7):1-8.  
KANG Yonglin, ZHU Guoming, CHEN Guijiang, et al. Latest Development of Wide Thin Strip Endless Rolling Technology in China[J]. Iron & Steel, 2023, 58(7):1-8.
- [2] 王伟,马乾伦,白振华,等.基于梯度提升决策树的冷轧高强钢卷力学性能预测[J].中国机械工程,2023,34(18):2222-2229.  
WANG Wei, MA Qianlun, BAI Zhenhua, et al.

- Mechanics Property Prediction of Cold Rolled High Strength Steel Coils Based on GBDT[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(18):2222-2229.
- [3] ZHANG Yufeng, ZHAO Meiyong, WANG Qinglong, et al. Analysis of Flatness Actuator Efficiency in Thin Strip Steel Tandem Cold Rolling by FEM Considering the Effect of Time-varying Work Roll Thermal Crown[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 128(9):4035-4047.
- [4] 李俊琛, 黄旭涛, 马国才, 等. 基于影响函数法的复杂辊系有载辊缝模型优化[J]. *兰州理工大学学报*, 2020, 46(6):22-27.  
LI Junchen, HUANG Xutao, MA Guocai, et al. Optimization and Research of Loaded Roll Gap Model of Complex Roll System Based on Influence Function Method[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2020, 46(6):22-27.
- [5] 周冠禹, 何安瑞, 刘超, 等. 20 辊轧机轧制宽幅工业纯钛带的变形行为研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(7):2333-2339.  
ZHOU Guanyu, HE Anrui, LIU Chao, et al. Modeling and Simulation of Wide Commercial Pure Titanium Strip Rolling on Sendzimir 20-high Mill[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(7):2333-2339.
- [6] 常铁柱, 韩培恋, 王建兵, 等. 20 辊轧机辊系变形和力能参数计算[J]. *冶金设备*, 2011(5):6-9.  
CHANG Tiezhu, HAN Peilian, WANG Jianbing, et al. Calculation of Mechanical Parameters and Deformation of Rolls for 20 High Mill[J]. *Metallurgical Equipment*, 2011(5):6-9.
- [7] 杨光辉, 张杰, 曹建国, 等. 20 辊森吉米尔轧机辊系变形的有限元分析[C]// 第七届(2009)中国钢铁年会大会论文集(中). 北京: 中国金属学会, 2009:354-358.  
YANG Guanghui, ZHANG Jie, CAO Jianguo, et al. Finite Element Analysis of the Deformation of the Roll System of a 20 Roll Sengimir Rolling Mill [C]// Proceedings of the 7th (2009) China Steel Annual Conference (Part 2). Beijing: Chinese Society of Metals, 2009:354-358.
- [8] 王军生, 白金兰, 赵阳, 等. 基于影响函数法的 20 辊森吉米尔轧机辊系变形解析[J]. *中国冶金*, 2024, 34(3):84-92.  
WANG Junsheng, BAI Jinlan, ZHAO Yang, et al. Rolls Deformation Analysis of 20-high SENDZIMIR Mill Based on Influence Function Method[J]. *China Metallurgy*, 2024, 34(3):84-92.
- [9] 王崇涛. 森吉米尔轧机板形控制的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2003.  
WANG Chongtao. Research on Shape Control of Sengimir Rolling Mill. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2003.
- [10] ZHAO Weimin, QIN Xiaofeng, QU Haixia, et al. Numerical Analysis of Contact Pressure between Rolls of Sendzimir Mill Based on Double Influence Function Method and Conjugate Gradient Techniques[J]. *Advances in Engineering Software*, 2023, 176:103388.
- [11] 张连军, 张清东, 于孟. 20 辊森吉米尔轧机板形调控性能研究[J]. *冶金设备*, 2008(1):40-43.  
ZHANG Lianjun, ZHANG Qingdong, YU Meng. Analysis on Shape Control Behavior of 20h Sendzimir Mill by Finite Element Method[J]. *Metallurgical Equipment*, 2008(1):40-43.
- [12] MALIKA 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.
- [13] CHOJ H, HWANG S M. A New Model for the Prediction of Roll Deformation in a 20-high Sendzimir Mill[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136(1):011004.
- [14] 杨华国. 基于 FEM 分析的 HZ21 型二十辊轧机辊系弹性变形研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.  
YANG Huaguo. Research on Elastic Deformation of HZ21 Twenty High Rolling Mill Roll System Based on FEM Analysis[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [15] 艾昊, 马正强. 20 辊轧机一中间辊锥度辊型在轧制过程中的作用及磨损研究[J]. *武汉工程职业技术学院学报*, 2015, 27(2):41-44.  
AI Hao, MA Zhengqiang. Research on Role and Wear of 1st IMR of Sendzimir Mill during Rolling Process[J]. *Journal of Wuhan Engineering Institute*, 2015, 27(2):41-44.
- [16] 李伟, 张冰. 20 辊轧机板形调控能力研究[J]. *边疆经济与文化*, 2014(5):169-170.  
LI Wei, ZHANG Bing. Study on Shape Control Ability of 20-high Rolling Mill[J]. *The Border Economy and Culture*, 2014(5):169-170.
- [17] ZHOU Guanyu, HE Anrui, YUAN Tieheng, et al. Research on the Generation and Control of High-order Flatness during the Controlling of Titanium Strip Profile by the Intermediate Taper Roll in a 20-high Mill[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 129(1):485-495.
- [18] 程其华, 徐建忠. 冷连轧机工作辊温度场与热凸度模型的研究[J]. *机械工程与自动化*, 2008(3):25-27.  
CHENG Qihua, XU Jianzhong. Research on Temperature Field and Thermal Convexity Model of Cold Chilled Rolling Mill Working Roll [J]. *Mechanical Engineering and Automation*, 2008(3):25-27.

- 验研究[J]. 福建工程学院学报, 2019, 17(1):7-12.
- LIU Qiong, HUANG Guoqin. Experimental Study on Drilling Processing of 2D C/C-SiC Composites [J]. Journal of Fujian University of Technology, 2019, 17(1):7-12.
- [18] 张彝阳. 陶瓷基复合材料高效制孔加工工艺及刀具磨损研究[D]. 天津:天津大学, 2022.
- ZHANG Benyang. Study on Efficient Drilling Technology and Tool Wear of Ceramic Matrix Composites[D]. Tianjin:Tianjin University, 2022.
- [19] CHEN Jie, AN Qinglong, MING Weiwei, et al. Hole Exit Quality and Machined Surface Integrity of 2D C<sub>f</sub>/SiC Composites Drilled by PCD Tools [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39(14):4000-4010.
- [20] ZHANG Benyang, SUI Tianyi, LIN Bin, et al. Drilling Process of C<sub>f</sub>/SiC Ceramic Matrix Composites:Cutting Force Modeling, Machining Quality and PCD Tool Wear Analysis [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 304: 117566.
- [21] DIAZ O G, AXINTE D A, NOVOVIC D. Probabilistic Modelling of Tool Unbalance during Cutting of Hard-heterogeneous Materials: a Case Study in Ceramic Matrix Composites (CMCS) [J]. Composites Part B:Engineering, 2018, 148:217-226.
- [22] 赵悦. 碳纤维复合材料小孔钻削力和工艺参数优化[D]. 沈阳:东北大学, 2017.
- ZHAO Yue. Optimization of Drilling Force and Process Parameters for Small Holes in Carbon Fiber Composites[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [23] ANAND R S, PATRA K. Cutting Force and Hole Quality Analysis in Micro-drilling of CFRP [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2018, 33(12):1369-1377.
- [24] YANG Haotian, ZHAO Guolong, NIAN Zhiwen, et al. Investigation of In-plane and Out-of-plane Micro-hole Drilling on 2D-Cf/SiC Composites[J]. Ceramics International, 2024, 50(7): 10753-10773.
- [25] 孟庆勋. CFRP 制孔损伤机理及钻头结构改型方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2018.
- MENG Qingxun. Study on Damage Mechanism of CFRP Drilling and Modification Method of Bit Structure [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [26] RAN Yichuan, KANG Renke, SUN Jiansong, et al. Insight into Crack Propagation Induced by Fiber Orientations during Single Grain Scratching of SiC<sub>f</sub>/SiC Composites Using FEM[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 177:107928.

(编辑 张 洋)

作者简介:杨昊天,男,2000年生,硕士研究生。研究方向为陶瓷基复合材料的磨削加工、微小孔钻削加工。发表论文 5 篇。E-mail:799275582@qq.com。赵国龙\*(通信作者),男,1987年生,教授、博士研究生导师。发表论文 100 余篇。E-mail:zhaogl@nuaa.edu.cn。

**本文引用格式:**

杨昊天,何文博,赵国龙,等.C<sub>f</sub>/SiC 复合材料微小孔的钻削加工特性[J]. 中国机械工程,2025,36(7):1600-1610.

YANG Haotian, HE Wenbo, ZHAO Guolong, et al. Drilling Characteristics of Micro Holes on C<sub>f</sub>/SiC Composites[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7):1600-1610.

**(上接第 1599 页)**

CHENG Qihua, XU Jianzhong. Research of the Model about Temperature Field and Hot Crown of Working Roll of Tandem Cold Mill[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2008(3):25-27.

[19] 窦爱民. 冷连轧机核心工艺数学模型的开发与研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2006.

DOU Aimin. Development and Research of Mathematical Models for Core Processes of Cold Rolling Mills [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006.

[20] 潘纯久. 二十辊轧机及高精度冷轧钢带生产[M]. 北京:冶金工业出版社, 2003.

PAN Chunjiu. Twenty-high Rolling Mill and Production of High Precision Cold Rolled Steel Strip [M]. Beijing:Metallurgical Industry Press, 2003.

(编辑 张 洋)

作者简介:崔熙颖,男,1992年生,博士。研究方向为 20 辊轧机薄板带轧制。发表论文 6 篇。E-mail:1339926909@qq.com。白振华\*(通信作者),男,1975年生,教授、博士研究生导师。研究方向为板带轧制。发表论文 100 余篇。E-mail:bai\_zhenhua@aliyun.com。

**本文引用格式:**

崔熙颖,王文奇,徐世浩,等.20 辊轧机非对称冷却的板形预报模型及影响因素分析[J]. 中国机械工程,2025,36(7):1592-1599.

CUI Xiying, WANG Wenqi, XU Shihao, et al. Prediction Model with Asymmetric Cooling and Analysis of Influencing Factors of Plate Shapes in 20-high Rolling Mills[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7):1592-1599.