

基于屈服模型的连轧锥形工作辊轴向窜动调控及应用

于志刚¹, 王亮亮², 王小龙³, 谭 涛⁴

(1. 成都工业职业技术学院 汽车工程学院, 四川 成都 610213; 2. 重庆市汽车动力系统测试工程技术研究中心, 重庆 401120;
3. 成都大学 机械工程学院, 四川 成都 610106; 4. 成都雅骏新能源汽车科技股份有限公司, 四川 成都 610100)

摘要: 为了提高连轧锥形工作辊轴向窜动的控制精度, 在设置的机架间轧后屈服模型的基础上完成机架的同步计算过程, 建立了基于屈服模型的工作辊轴向窜动调控方案。在现场对模型精度进行了验证测试, 确定了窜辊边降调控的功效参数。通过影响函数法计算出辊系弹性变形程度, 获得出口断面和伸长率差值, 利用轧后屈服模块计算得到轧后屈服断面, 判断残差低于 $3\ \mu\text{m}$ 时完成迭代过程。通过模型验证得到, 位于边降区 $15\sim 115\ \text{mm}$ 范围内的断面的计算误差均在 $3\ \mu\text{m}$ 以内, 最大误差出现在距离带钢边部 $0\sim 15\ \text{mm}$ 的范围内。通过工业应用得到, 第2机架实现对边部特征点的最优调控功效, 在逐渐提高窜辊量的过程中, 第1、2机架的功效降低, 而第3机架的功效增大到最高。选择单点控制策略时, 可以获得明显的边部效果, 实现了长期稳定运行。

关键词: 轴向窜动; 连轧; 工作辊; 屈服模型; 边降调控

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.029

中图分类号: TG334 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 04-0207-05

Control and application of axial movement for conical work roller in continuous rolling based on yield model

Yu Zhigang¹, Wang Liangliang², Wang Xiaolong³, Tan Tao⁴

(1. College of Automotive Engineering, Chengdu Industrial Vocational and Technical College, Chengdu 610213, China;
2. Chongqing Automotive Power System Test Engineering Technology Research Center, Chongqing 401120, China;
3. School of Mechanical Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;
4. Chengdu Yajun New Energy Automobile Technology Co., Ltd., Chengdu 610100, China)

Abstract: In order to improve the regulation accuracy of axial movement for conical work roller in continuous rolling, on the basis of setting up the yield model after rolling between frames, the synchronous calculation process of frames was completed, and the regulation scheme of the axial movement for work roller based on the yield model was established. Then, the model accuracy was verified and tested on site, and the efficiency parameters for edge drop regulation of roller movement were determined. Furthermore, the elastic deformation degree of roller system was calculated by the influence function method, the difference between exit section and elongation was obtained, the yield section after rolling was calculated by the post-rolling yield module, and the iterative process was completed when the residual error was less than $3\ \mu\text{m}$. The model verification shows that the calculation errors of the sections located in the range of $15\sim 115\ \text{mm}$ from the edge drop zone are all within $3\ \mu\text{m}$, and the maximum error occurs in the range of $0\sim 15\ \text{mm}$ from the strip edge. Through the industrial application, the second frame realizes the optimal control efficiency of the edge feature points. During the process of gradually increasing the amount of roller movement, the efficiency of the first and second frames decreases, while the efficiency of the third frame increases to the highest. When the single point control strategy is selected, the obvious edge effect can be obtained, and the long-term stable operation is realized.

Key words: axial movement; continuous rolling; work roller; yield model; edge drop regulation

硅钢叠片被广泛应用在电机铁芯制造领域, 属于一种需要达到很高叠片率的功能材料。考虑到宽

板轧制过程中会产生边降的情况, 从而引起硅钢叠片率降低并造成更明晰的层间涡流损失^[1-3]。为克服上述缺陷, 需在硅钢薄带轧制期间, 采用锥形工作辊实现窜辊的效果, 由此消除边降并获得更优的叠片率^[4-5]。

根据目前的研究结果可知, 还需深入探讨新加窜辊功能所达到的边降调控效果。轧制宽厚比达到

收稿日期: 2022-02-14; 修订日期: 2022-03-24

基金项目: 四川省科技计划项目 (20KPZP0014)

作者简介: 于志刚 (1983-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: yuzhigang2021@126.com

500 : 1 以上时, 采用有限元仿真方法需要消耗很长的计算时间, 通常是进行单机架模拟测试^[6-9]。为了获得更高的模型分析精度, 则可以通过有限元方法来分析某一物理现象。其中, Lee J S 等^[10]利用有限元方法分析了热连轧过程中发生的组织屈服现象, 深入研究了机架间的金属流动性能并降低了带钢同板差异, 根据生产数据对比结果进一步优化了解析模型精度。吴琮等^[11]选择 ABAQUS 为六辊 UCM 冷轧机 1/2 辊系构建了有限元模型, 之后测试了各板形工艺参数下的辊间接触应力变化规律, 结果显示, 当中间辊与工作辊之间发生窜辊时, 更容易引起不均匀的轧辊表面接触应力, 对中间辊应用弯辊处理技术后可以获得更均匀的辊间接触应力。王晓晨等^[12]根据金属横向流动理论, 为边降区域构建了横向流动纯剪切增量模型, 需对边部轧后带钢进行缩宽与减薄处理以实现边部伸长率差的补偿效果。之后利用现场测试的方法对上述模型进行了验证, 获得了比原模型更高的控制精度。王青龙等^[13]选择 1420 mm 带钢连轧机作为研究对象, 针对 UCM 轧机冷轧方式构建了三维弹塑性有限元模型, 测试了各个板形调控机构引起的轧制压力的变化, 从而获得不同的带钢板形。

目前, 关于板形调控的研究多是通过有限元软件建立辊系模型进行力学计算, 对边降偏差方面的控制研究很少。为了提高连轧锥形工作辊轴向窜动的控制精度, 本文在分析引起带钢边降原因的基础上, 给出了边降偏差控制方案, 并进一步设置了机架间轧后屈服模型, 从而可以完成机架的同步计算过程。之后在现场对模型精度进行了验证测试, 确定了窜辊边降调控的功效参数。本研究有助于提高工作辊的调控精度, 尤其适用于一些较大压下量的工况。

1 调控方案

1.1 边降偏差控制方案

带钢边降是带钢边部区域受到工作辊压扁、三维横向流动、辊系与机架变形的综合影响而导致的结果。考虑到三维横向流动属于带钢固有性能^[9], 为了对工作辊弹性压扁情况进行弥补, 可以通过调控锥形工作辊的轴向窜动来实现, 由此达到有效控制带钢边降的作用, 再乘以调控功效系数从而获得上游 3 个机架对应的窜辊增量。但根据实际工业应用情况, 其会产生边部局部高点, 因此并不能改善

内部边降。五机架 UCMW 和 UCM 冷连轧机各点的边降偏差见图 1。图 1 中, ΔED 为边降偏差信号^[12], K 为调控功效系数矩阵, ΔS 为窜辊增量。

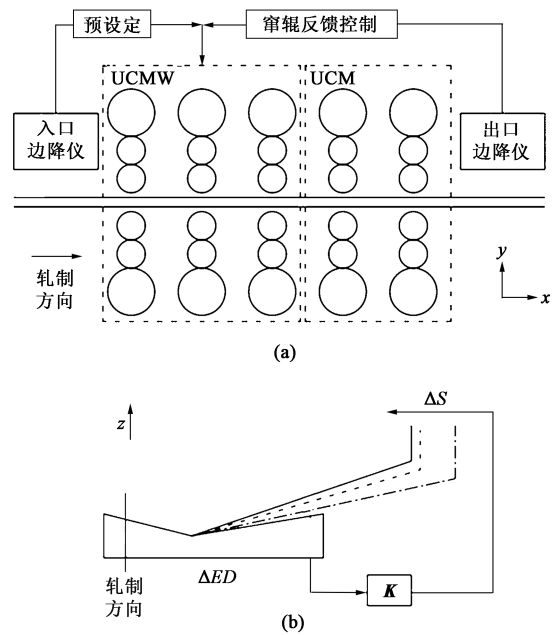


图 1 边降偏差控制方案

(a) 俯视图 (b) 主视图

Fig. 1 Scheme of edge drop deviation control

(a) Vertical view (b) Main view

为分析上游机架工作辊通过窜辊方式调节下游机架出口的效果, 为带钢-辊系-机架间变形过程构建了相应的耦合模型, 可以满足多机架连续计算的功能。

通过影响函数法建立辊系弹性变形区的应力-应变关系, 在弹性区的表达式为^[10]:

$$\begin{cases} \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - v(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \sigma_y = \frac{E(1-v)}{(1+v)(1-2v)} \left[\varepsilon_y + \frac{v}{(1-v)} (\varepsilon_x + \varepsilon_z) \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为 x 、 y 、 z 方向应变; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为 x 、 y 、 z 方向应力; E 为弹性模量; v 为泊松比。

首先, 通过式 (1) 求时间 t 的偏导, 消去未知量, 得到单位轧制力 p 的出口断面方程为:

$$\frac{dp}{dt} = - \left(1 - \frac{v}{1+v} \cdot \frac{G}{1+G} \right) \frac{E}{h_z} \cdot \frac{dh_t}{dt} + v \cdot \frac{2q_t}{h_t} \quad (2)$$

式中: h_t 为 t 时刻带钢在轧制区内的总厚度; q_t 为 t 时刻的摩擦应力; G 为横向流动因子; h_z 为 z 方向上的轧制区内总厚度。

1.2 连轧过程金属变形后屈服模型

在锥形工作辊出现窜动时将无法保证带钢的等比例凸度要求，使得带钢产生超过限定值的伸长率，从而导致带钢受到较大张力作用而发生屈服，需要构建轧后屈服模型，图 1 给出了变形后的带钢结构。由于辊缝中的金属组织发生了横向流动，以下为出口区域的条元伸长量^[14]：

$$l_1 = \frac{l_0 h_0 / h_1}{1 + \varepsilon_y} \tag{3}$$

$$A_x = \ln(l_1 / l_0) - \sum_{j=1}^n \ln(l_1 / l_0) / n \tag{4}$$

式中： l_0 与 l_1 分别为入口与出口的条元长度； h_0 与 h_1 分别为带钢各条元的入口与出口厚度； A_x 为 x 方向带钢伸长率； j 为各条元的编号， $j = 1, 2, 3, \cdots, n$ ； n 为沿宽度方向条元数量。

通过式 (5) 计算机架间带钢伸长率 dA_x 的差值：

$$\begin{cases} dA_x = A_x - \frac{R_{el}}{E}, \varepsilon'_x \geq \frac{R_{el}}{E} \\ dA_x = A_x + \frac{R_{el}}{E}, \varepsilon'_x \leq -\frac{R_{el}}{E} \end{cases} \tag{5}$$

式中： R_{el} 为屈服强度； ε'_x 为条元在 x 方向发生的应变； $\frac{R_{el}}{E}$ 为平均应变。

受应变率差的影响，当应力值大于屈服强度时会引起附加张力变形的结果。

轧板加工过程中，金属会在轧制段沿横向发生流动，还会在机架间出现三维流动的情况。当辊缝中产生横向流动的现象时，将导致边部相对中部的伸长率更小，促使机架间形成更强的塑性流动，同时引起机架间张力的改变，呈现互相耦合的状态。轧后屈服模型对预判实际轧制的变形程度以及控制压下量具有很好的指导意义。

1.3 调控流程

通过影响函数法计算出辊系弹性变形程度，获得出口断面和伸长率的差值，之后利用轧后屈服模块计算得到轧后屈服断面，判断残差低于 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时完成迭代过程。计算得到的断面、前张力、累计变形量、缩宽量输入后续机架中，具体流程见图 2。设置轧制方向的网格间距为 0.09 mm ，宽度方向的网格间距为 10 mm ，单机架计算过程所需时间约为 4 min 。

2 模型验证

将本文模型分析结果与之前报道的实验结果进行对比^[15]，上游机架输入信息见表 1，模型验证结

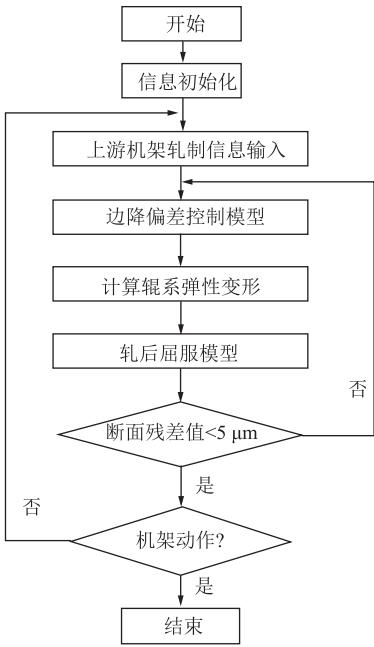


图 2 整体调控流程
Fig. 2 Overall control process

表 1 上游机架输入信息

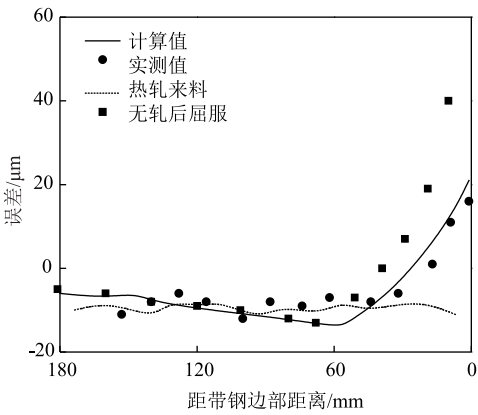
Table 1 Input information of upstream frame

参数	入口厚度/ mm	压下量/ %	后/前张力/ MPa	摩擦因数
数值	4.50	42	122/136	0.092

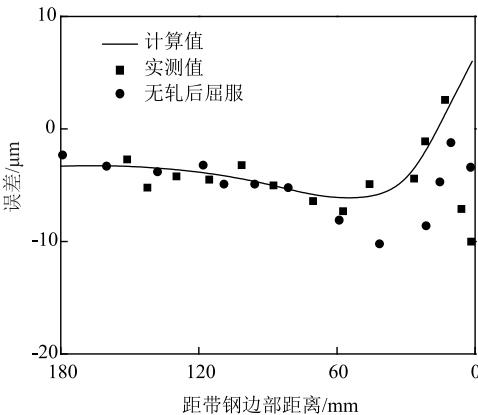
果见图 3。结果显示，考虑轧后屈服的影响，位于边降区 $15 \sim 115\text{ mm}$ 范围内的断面计算误差均在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 以内，最大误差出现在距离带钢边部 $0 \sim 15\text{ mm}$ 范围内，这是由于此时边部区域受到极端摩擦作用并出现了明显变形，导致横向流动因子偏离理论值的程度较大。图 3a 显示，因为机架间与轧制区中会发生横向流动的现象，从而减弱了锥形辊所能达到的边降调控程度。图 3b 显示，因为受到轧后屈服的影响，当上一机架工作辊发生窜辊时将会引起边部增厚并传输到下一机架中。

3 工业应用

边降调控功效表示采用上游机架窜辊值进行下游机架边降控制的效果。以距离带钢边部 200 mm 作为边降区，按照距边部分别为 50 mm 确定边降测试点，测试点 1~3 分别对应机架 1~3 的边降区 50 mm 位置。以同一辊形在第 1、2、3 机架下计算了各个窜辊值下的带钢伸长率差；之后计算下一机架的出口边降参数，各轧制参数见表 2。



(a)



(b)

图 3 模型验证结果

(a) 第 1 机架 (b) 第 2 机架

Fig. 3 Model validation results

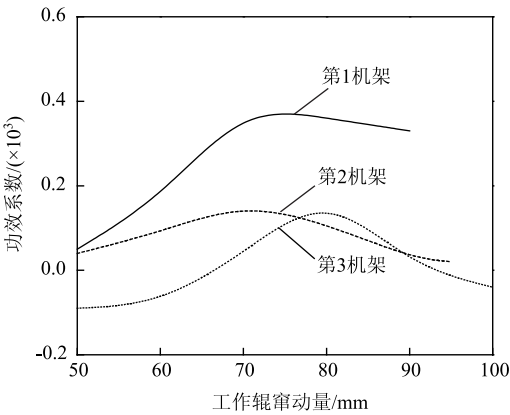
(a) The first frame (b) The second frame

表 2 轧制参数

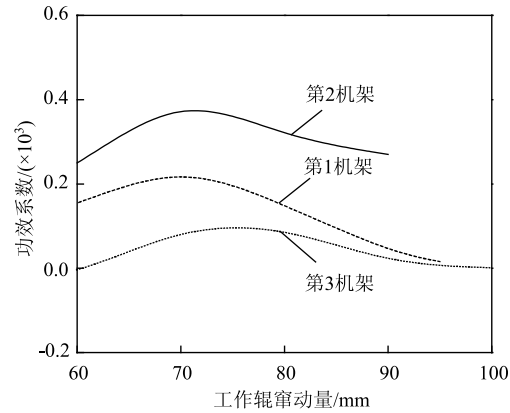
Table 2 Rolling parameters

机架号	入口厚度/ mm	压下量/ %	后/前张力/ MPa	摩擦因数
1	2.68	32	125/133	0.084
2	2.12	36	133/142	0.078
3	1.25	28	142/148	0.063

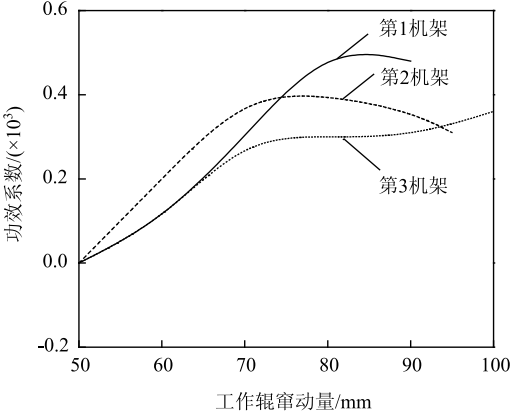
如图 4a 所示,对距离边部最近的测试点 1 进行测试,发现第 1 机架达到了最高窜辊效率,同时下游机架的窜辊功效系数接近 0。对图 4b 分析可以发现,对测试点 2 进行测试时,第 2 机架达到了最高效率,第 3 机架的窜辊功效系数接近 0。如图 4c 所示,在较小的窜辊量下,第 2 机架达到边部测试点 3 的最优调控功效,逐渐提高窜辊量的过程中,第 1、2 机架的窜辊功效系数降低,而第 3 机架的窜辊功效系数增大到最高。下游机架边降调控宽度发生递减,这是由于连轧机的机架间张力升高而引起的,下游机架形成了宽度更小的横向流动区,从而获得了更



(a)



(b)



(c)

图 4 不同特征点的窜辊功效系数分布

(a) 测试点 1 (b) 测试点 2 (c) 测试点 3

Fig. 4 Distributions of roller movement efficiency coefficients at different feature points

(a) Test point 1 (b) Test point 2 (c) Test point 3

小的边降调控范围。

根据上述研究结果,结合各测试点设计了一种新的边降配合控制策略,对其进行实际效果测试,得到图 5 所示结果,确保下游机架窜辊位置均在上游机架控制测试点以下。构建了下三角形形式的调控功效系数矩阵,选择单点控制策略时,可以获得明

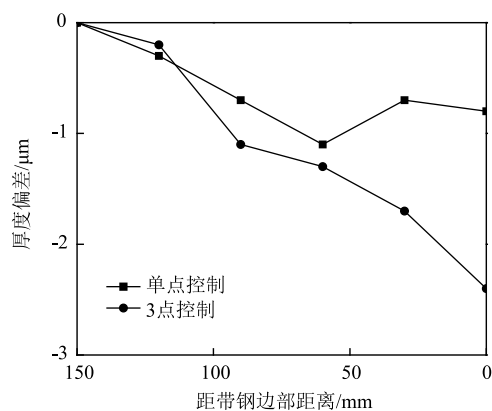


图5 厚度偏差分布

Fig. 5 Thickness deviation distribution

显的边部效果, 不过依然存在一定的内部偏差, 实现了长期稳定运行的状态。

4 结论

(1) 通过影响函数法计算出辊系弹性变形程度, 获得出口断面和伸长率差值, 利用轧后屈服模块计算得到轧后屈服断面, 判断残差低于 $3\ \mu\text{m}$ 时完成迭代过程。通过模型验证得到, 位于边降区 $15\sim 115\ \text{mm}$ 范围内的断面计算误差均在 $3\ \mu\text{m}$ 以内, 最大误差出现在距离带钢边部 $0\sim 15\ \text{mm}$ 的范围内。

(2) 通过工业应用得到, 第2机架达到边部特征点的最优调控功效, 逐渐提高窜辊量的过程中, 第1、2机架的功效降低, 而第3机架的功效增大到最高。选择单点控制策略时, 可以获得明显的边部效果, 实现了长期稳定运行。

参考文献:

- [1] 曹建国, 黄小海, 赵秋芳, 等. 板带轧机通用变凸度板形控制技术 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2020, 51 (10): 2772-2781.
Cao J G, Huang X H, Zhao Q F, et al. Universal variable crown technology for strip profile control in wide strip rolling mills [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2020, 51 (10): 2772-2781.
- [2] Hu Q, Wang X C, Yang Q. Design and application of automatic edge drop control system for 6-high tandem cold rolling mill [J]. Metall. Ind. Autom., 2016, 40 (1): 34.
- [3] 王付杰, 毛飞龙, 双远华, 等. 管材斜连轧过程的运动学分析及实验研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 215-222.
Wang F J, Mao F L, Shuang Y H, et al. Kinematic analysis and experimental study of pipe oblique continuous rolling process [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 215-222.
- [4] 王丰, 邱冬生, 颜家森, 等. 高端轴承制造组织性能的近净冷轧环工艺调控 [J]. 中国冶金, 2020, 30 (9): 129-135.
Wang F, Qiu D S, Yan J S, et al. Process control of near net cold

rolling ring for microstructure and properties of high-end bearing manufacturing [J]. China Metallurgy, 2020, 30 (9): 129-135.

- [5] 刘洁, 张志红. 铸态 Mn18Cr18N 钢轧制热压缩实验分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 197-201.
Liu J, Zhang Z H. Experimental analysis of rolling hot compression of as-cast Mn18Cr18N steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 197-201.
- [6] Cao J G, Chai X T, Li Y L, et al. Integrated design of roll contours for strip edge drop and crown control in tandem cold rolling mills [J]. J. Mater. Process. Technol., 2018, 252: 432.
- [7] Ma X B, Wang D C, Liu H M. Coupling mechanism of control on strip profile and flatness in single stand universal crown reversible rolling mill [J]. Steel Res. Int., 2017, 88 (9): 1600495.
- [8] 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.
Feng X W, Wang X C, Yang Q, et al. Analysis on control ability of roll shape edge drop of six-high mill [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (12): 83-90.
- [9] 杨利坡, 张永顺, 于华鑫, 等. 冷轧带钢板形调控虚拟系统及其应用 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (5): 82-88.
Yang L P, Zhang Y S, Yu H X, et al. Virtual control system of cold rolling strip profile and its application [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (5): 82-88.
- [10] Lee J S, Shin T J, Yoon S J, et al. Prediction of steady-state strip profile in flat rolling [J]. Steel Res. Int., 2016, 87 (7): 930-940.
- [11] 吴琼, 秦晓峰. 板形调控工艺对轧辊间接接触及磨损的影响 [J]. 太原理工大学学报, 2020, 51 (2): 242-247.
Wu Q, Qin X F. Influence of flatness control process on indirect contact wear of roller [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51 (2): 242-247.
- [12] 王晓晨, 冯夏维, 徐冬, 等. 薄带连轧工作辊窜辊边降调控功效 [J]. 工程科学学报, 2020, 42 (2): 242-248.
Wang X C, Feng X W, Xu D, et al. Control effect of work roll shifting edge drop in strip tandem mill [J]. Journal of Engineering Science, 2020, 42 (2): 242-248.
- [13] 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.
Wang Q L, Sun J, Wang Z H, et al. Effect of shape control mechanism on rolling pressure distribution of UCM mill [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2018, 39 (3): 345-350.
- [14] 管健龙, 何安瑞, 孙文权. 薄铝带轧制工作辊边部接触的建模与仿真 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2015, 36 (7): 942-946.
Guan J L, He A R, Sun W Q. Modeling and simulation of edge contact of work roll in thin aluminum strip rolling [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2015, 36 (7): 942-946.
- [15] Feng X W, Wang X C, Sun J Q, et al. Analysis of tapered work roll shifting technique in 5-stand UCMW tandem cold rolling process [J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2019, 23 (4): 291-299.