

薄铝带轧制工作辊边部接触的建模与仿真

管健龙, 何安瑞, 孙文权

(北京科技大学 国家高效轧制中心, 北京 100083)

摘 要: 为研究冷轧机在轧制薄铝带时工作辊边部接触对辊系受力和铝带断面形状的影响, 借鉴弹性悬臂梁法和影响函数法的处理思想, 建立了适用于实际生产在线控制的铝冷轧机辊系变形模型, 并对不同入口铝带厚度、弯辊力、工作辊的接触状态进行仿真研究. 仿真结果表明: 工作辊边部接触力随入口厚度增加而增加、随弯辊力增加而减小; 工作辊边部接触轧制时, 轧机出口铝带凸度和横向厚度小于非边部接触轧制, 有利于铝带边部减薄控制, 但降低了铝轧机边部板型调控能力, 在轧制中应尽量避免.

关 键 词: 薄铝带冷轧; 悬臂梁; 影响函数; 工作辊边部接触; 辊系变形; 边部减薄

中图分类号: TG 335.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)07-0942-05

Modeling and Simulation of Thin Aluminum Cold Rolling with Work Roll Edge Contact

GUAN Jian-long, HE An-rui, SUN Wen-quan

(National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Corresponding author: HE An-rui, E-mail: harui@ustb.edu.cn)

Abstract: A deformation model of roll system in aluminum cold rolling mill applied to online control in the actual production, was established by elastic cantilever beam method and the influence function method processing ideas. The influences of working roll edge contact on the forces acting on the roll system and the cross-sectional shape of aluminum strip in the process of thin aluminum strip rolled by cold rolling mill were studied. The simulation study of different inlet strip thickness, bending force and the contact state of working roll were carried out. The results showed that the contact force of working roll edge increases with the increasing thickness of the entrance, and decreases with the increase of the bending force. When the working roll edge contacts with rolling mill, the difference between outlet strip crown and lateral thickness is less than the non-contact rolling, and this process is useful to reduce edge drop. However, as it reduces the regulatory capacity of the aluminum rolling mill for the edge plate, it should be avoided.

Key words: thin aluminum strip cold rolling; cantilever beam; influence function; working roll edge contact; roll system deformation; edge thinning

铝合金冷轧产品具有密度低、抗腐蚀能力强、易于加工等特点, 广泛应用于家电、医药、航空航天等高精领域^[1]. 工作辊边部接触变形在薄铝带冷轧生产中十分常见, 与非传统冷轧轧制特性不同, 工作辊接触变形不仅改变了轧制力横向分布, 而且对工作辊挠曲变形、轧辊和铝带表面摩擦系数、铝带断面轮廓等有不同程度的影响^[2-3], 并且

大张力轧制对轧制力分布、承载辊缝和轧辊挠曲有较大的影响, 使生产过程更加难以控制. 因此, 传统的力学和变形模型不再适用薄铝带冷轧生产中发生工作辊边部接触的情况^[4]. 如何确定轧制力、边部接触应力、辊间接触力分布和铝带断面轮廓, 改善边部接触时铝带产品质量, 一直是困扰各铝厂的难题. 本文借鉴弹性悬臂梁法和影响函数

收稿日期: 2014-06-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-IC-14-005).

作者简介: 管健龙(1986-), 男, 北京顺义人, 北京科技大学博士研究生; 何安瑞(1972-), 男, 江西抚州人, 北京科技大学教授, 博士生导师.

法的一些处理思想,并加入张力因素,建立了可用于在线控制的辊系变形模型.根据铝冷轧厂实际生产数据,模拟工作辊发生边部接触的轧制过程,分析了各轧制参数对轧制力、辊间接触力和工作辊边部接触力分布的影响,并讨论了工作辊发生边部接触时,各轧制参数对冷轧机铝带出口断面轮廓的影响.

1 工作辊边部接触辊系变形模型

1.1 辊系离散化

单机架铝冷轧机在实际生产中,由于工作辊倾斜、非对称辊形等因素,不能认为操作侧与传动侧对称,为了满足在非对称条件下的弯矩平衡,引入了工作辊的中心倾斜角 θ ,对辊系及其受力进行离散化,如图1所示.

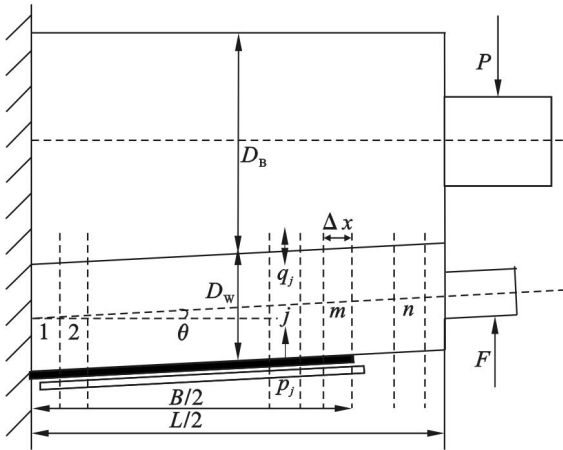


图1 铝冷轧机辊系离散化
Fig. 1 Roll system discrete of aluminum cold rolling mill

1.2 辊系弯曲变形计算

由于将工作辊与支持辊简化成简单的悬臂梁,辊系挠曲变形由弯曲变形和剪切变形两部分组成,根据梁的弯曲理论^[5],将工作辊与支持辊的弯曲与剪切微分方程向后差分等距离散化,整理后为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\varphi_{wi} - \varphi_{w(i-1)}}{\Delta x} &= \frac{M_{wi}}{E_w I_w}, \\ \frac{y_{wi} - y_{w(i-1)}}{\Delta x} &= \varphi_{wi} + \frac{\alpha F_{swi}}{G_w A_w} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\varphi_{bi} - \varphi_{b(i-1)}}{\Delta x} &= \frac{M_{bi}}{E_b I_b}, \\ \frac{y_{bi} - y_{b(i-1)}}{\Delta x} &= \varphi_{bi} + \frac{\alpha F_{sbi}}{G_b A_b} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: φ_i 为单元 i 的角位移; y_i 为单元 i 弯矩与剪力引起的位移总和.

工作辊与支持辊在辊系中线处的边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{w(0)} &= \theta, y_{w(0)} = 0; \\ \varphi_{b(0)} &= 0, y_{b(0)} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

与影响函数计算挠曲位移的方法相比,采用悬臂梁的计算方法避开了矩阵相乘运算,减少了数值运算量.

1.3 轧辊接触压扁计算

1) 工作辊间、工作辊与支持辊间的压扁计算.工作辊间的接触弧长 l_c 与辊身长度相比要小得多,因此半无限体模型不适用于工作辊间的压扁计算,并且在迭代中精度难以保证.因此在轧辊弹性变形理论中,一般将辊间接触压扁问题处理为两个无限长圆柱体接触问题.工作辊间压扁计算模型为^[6]

$$y_{ww}(i) = \frac{2q_{ei}(1-\nu_w^2)}{\pi E_w} \left(\frac{2}{3} + \ln \frac{2R_{wu}}{b} + \ln \frac{2R_{wd}}{b} \right). \quad (4)$$

其中: R_{wu}, R_{wd} 分别为上、下工作辊半径; q_{ei} 为上、下工作辊在单元 i 的边部接触压力; b 为上、下工作辊接触压扁宽度的一半,通过式(5)给出:

$$b(i) = \sqrt{\frac{8(1-\nu_w^2)q_{ei}}{\pi E_w} \frac{R_{wu}R_{wd}}{R_{wu}+R_{wd}}}. \quad (5)$$

由式(5)可知,辊间压扁量与单位辊间接触压力之间不是线性关系,且存在耦合关系.本文首先拟合出辊间压扁量与单位辊间接触压力间的函数关系,再在进行辊系弹性变形计算过程中反复迭代修正,回避了牛顿迭代过程.同理,工作辊与支持辊间的接触压扁可表示为

$$y_{wb}(i) = \frac{q_i}{\pi} \left[\frac{(1-\nu_w^2)}{E_w} \left(2 \ln \frac{2R_w}{b} - 1 \right) + \frac{(1-\nu_b^2)}{E_b} \left(2 \ln \frac{2R_b}{b} - 1 \right) \right]. \quad (6)$$

2) 工作辊和铝带之间的压扁计算.工作辊间、工作辊与铝带间的弹性压扁如图2所示,工作辊和铝带之间的接触弧 l_d 可以通过希区柯克模型推导.由于接触弧长远小于工作辊直径,因此工作辊可以近似为半无限体,工作辊与铝带之间的压扁可以通过式(7)计算:

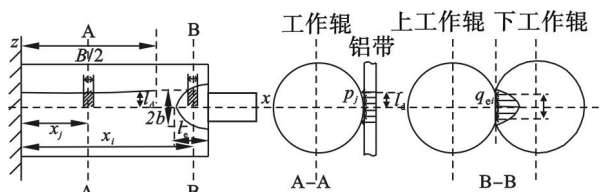


图2 工作辊间、工作辊与铝带间的压扁示意图
Fig. 2 Flattening between the upper and lower work rolls, the work roll and strip

$$y_{ws}(i) = \sum_j^m g_{ws}(i,j)p_j. \quad (7)$$

工作辊和铝带之间的压扁影响函数 $g_{ws}(i,j)$ 可以表示为^[7]

$$g_{ws}(i,j) = \varphi(|x_i - x_j|) + \varphi(|x_i + x_j|). \quad (8)$$

1.4 张力计算模块的嵌入

在冷轧过程中,横向流动主要集中在带钢边部,增加前后张力不仅可以减小金属的横向流动,而且可以减小轧制力、降低轧辊挠曲程度^[8]. 传统三维差分法模型中,假设在任意位置上,横向应变与纵向应变的比值为常数^[9],即 $d\varepsilon_y/d\varepsilon_x = \varepsilon_y/\varepsilon_x = a$. 但在轧制过程中,铝带边部由于失去了横向约束,横向流动与中部差异很大,因此,在计算轧件纵向延伸率与内应力时,需要将横向流动的影响加入进来.

定义横向流动因数为

$$G = G(x, y, z) = \varepsilon_z/\varepsilon_x. \quad (9)$$

半板宽范围 $[0, b]$ 内的横向流动因数为

$$\left. \begin{aligned} G(y) &= \frac{k_\tau \tau G_{\max}}{y_0^2} (b - y_0 - y)^2, b - y_0 < y < b; \\ G(y) &= 0, \quad 0 < y < b - y_0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中: τ 为张力分布; k_τ 为张力影响系数,通过拟合获得; G_{\max} 为对应最大横向流动因数; y_0 为横向流动作用范围.

通过简单分析可知:

$$d\varepsilon_y/d\varepsilon_x = \varepsilon_y/\varepsilon_x = -1/(1 + G). \quad (11)$$

用式(11)代替三维差分法模型中假设为恒定的 a 值,从而将张力因素合理地引入到轧件塑性变形计算中.

1.5 变形协调关系与静力平衡

在轧制压力和液压弯辊力的作用下,辊系弹性变形如图 3 所示. 工作辊、支持辊之间的弹性变形协调关系可以由式(12)计算^[10-11]:

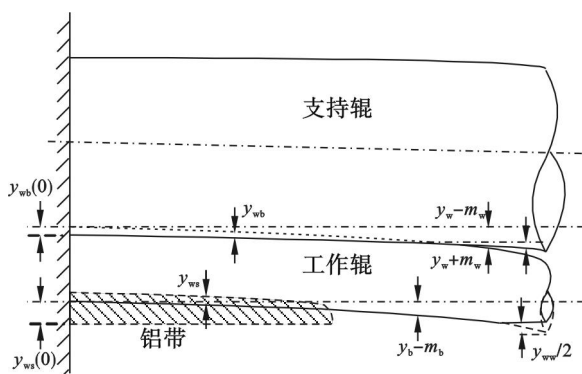


图 3 工作辊边部接触的辊系变形协调关系

Fig. 3 The roll system deformation coordination of work roll edge contact

$$y_{wb}(i) = y_{wb}(0) + y_b(i) - y_w(i) - m_b(i) - m_w(i). \quad (12)$$

式中: $y_w(i)$, $y_b(i)$ 分别为工作辊与支持辊的弯曲变形; $m_w(i)$, $m_b(i)$ 分别为包含轧辊原始辊形、热辊形的工作辊与支持辊综合辊形.

铝带的出口断面轮廓由轧制力、轧辊原始辊形、热辊形、工作辊与铝带间的局部压扁共同作用,因此,工作辊与铝带间的变形协调关系可以表示为

$$h(i) = h(0) + 2(y_{ws}(i) - y_{ws}(0)) - 2(m_w(i) - y_w(i)). \quad (13)$$

当轧制薄铝带时,工作辊可能在铝带边部附近发生接触变形,因此工作辊边部接触的变形协调关系可以通过工作辊辊形、工作辊与铝带中部的压扁表示:

$$y_{ww}(i) = 2y_{ws}(0) - h(0) + 2(y_w(i) - m_w(i)). \quad (14)$$

工作辊竖直方向静力平衡及力矩平衡关系为

$$\left. \begin{aligned} F + \sum_{i=1}^n \delta_i &= 0, \\ \sum_{i=1}^n l_x \times \delta_i \cos \theta - \frac{FL \cos \theta}{2} + M &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: M 为弯矩; δ_i 为工作辊与铝带、支持辊间所

受的等效应力, $\delta_i = \begin{cases} q_i - q_i, & i \leq M; \\ -q_i, & M < i \leq N. \end{cases}$

2 模型仿真分析

仿真程序基于快速辊系变形模型,对不同的入口铝带厚度、弯辊力、工作辊的接触状态进行仿真研究,获得轧制力、辊间压力、边部接触力和铝带横向厚度分布. 仿真初始数据如下: 轧辊直径为 400 mm, 支持辊直径为 1 150 mm, 工作辊、支持辊长度为 1 800 mm, 工作辊、支持辊初始凸度为 0 μm , 弯辊缸中心距为 2 700 mm, 工作辊、支持辊杨氏模量为 220 kN/mm², 泊松比为 0.3; 选择 5052 系 Al-Mg 防锈型铝合金作为研究对象, 原料厚度为 2.02 mm, 入口厚度分别为 0.46, 0.42, 0.35, 0.32 mm, 出口厚度为 0.3 mm, 铝带宽度为 1 400 mm, 前张力为 5.6 kN, 后张力为 5.4 kN, 轧制速度为 800 m/min, 摩擦系数为 0.056, 弯辊力为 -100, 0, 100, 200 kN.

2.1 入口厚度对辊系受力和铝带横向厚度分布的影响

对 5052 系列铝合金各工况进行模拟仿真, 入口厚度分别为 0.46, 0.42, 0.36, 0.32 mm, 出口厚

度为 0.3 mm,弯辊力为 0 kN,入口厚度对辊系受力与铝带出口横向厚度分布的影响如图 4 所示.铝带入口厚度增大,增加了压下率,单位轧制力由 1.2 kN/mm 增大到 3.3 kN/mm,单位辊间接触压力由 1.45 kN/mm 增大到 3.05 kN/mm;边部接触

力随铝带入口厚度减小而减小,当入口厚度为 0.32 mm 时,工作辊没有发生边部接触,边部接触力为 0 kN/mm;入口厚度增大时,铝带凸度随入口厚度增大而减小.

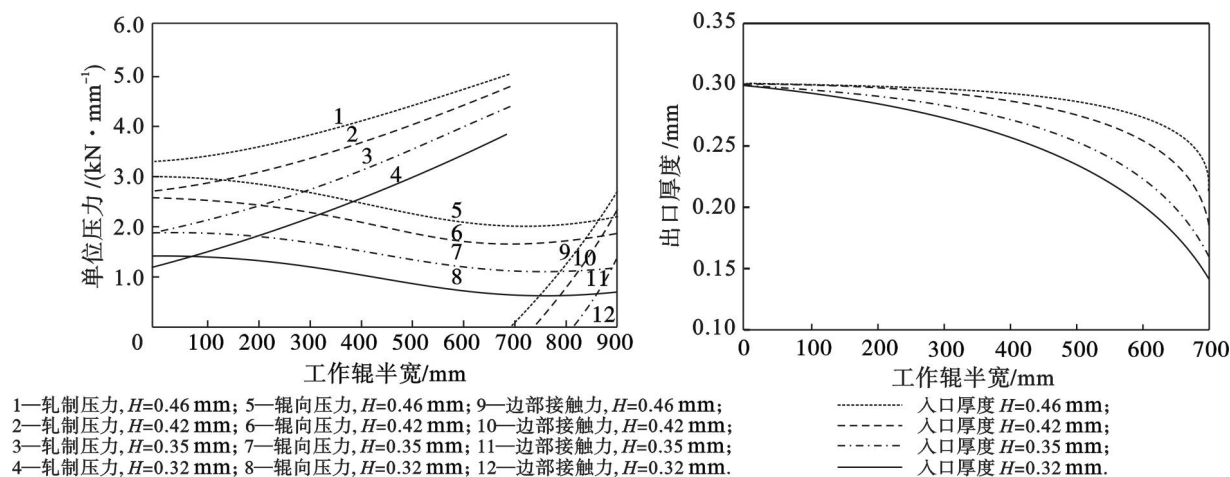


图 4 入口厚度对冷轧机辊系受力与铝带横向厚度分布的影响

Fig. 4 The influence of entry thickness on the stress of roll system and aluminum strip transverse thickness distribution

2.2 边部接触对辊系受力和铝带横向厚度分布的影响

入口厚度为 0.40 mm,出口厚度为 0.30 mm,弯辊力为 0 kN,仿真结果如图 5 所示.与非工作辊边部接触轧制相比,工作辊边部接触轧制降低了工作辊边部挠度 y_w ,铝带边部单位轧制力和铝带出口凸度减小;支持辊与工作辊之间的弹性压

扁 y_{wb} 在工作辊边部增大,单位辊间接触力由 1.8 kN/mm 增大到 2.3 kN/mm;边部接触对工作辊和支持辊中心位置挠曲影响较小,因此,对轧辊中部的轧制力和辊间接触力分布几乎没有影响;铝带冷轧采用微边浪轧制,由仿真结果可知,工作辊边部接触降低了轧机边部板型调控能力,在轧制中应尽量避免.

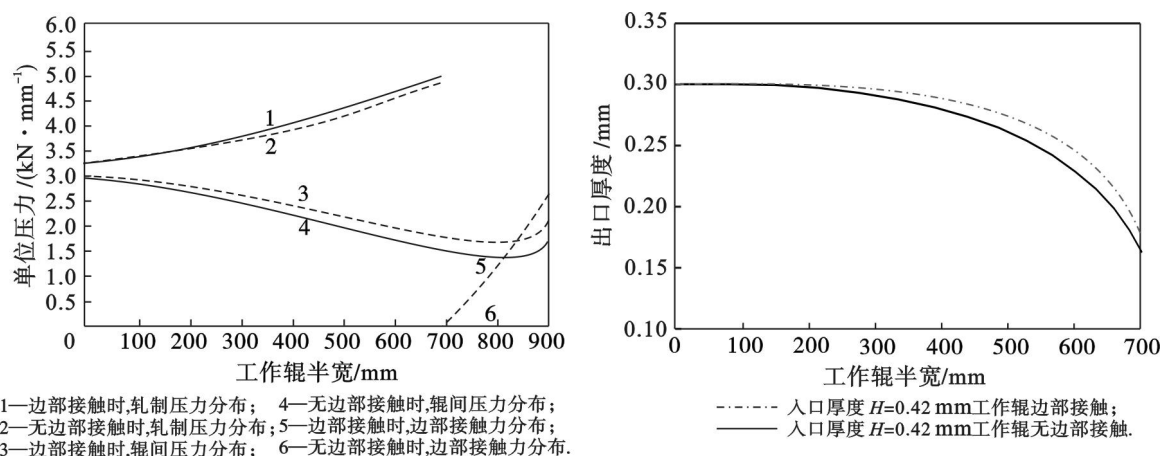


图 5 边部接触对辊系受力与铝带横向厚度分布的影响

Fig. 5 The influence of edge contact on the stress of roll system and aluminum strip transverse thickness distribution

2.3 弯辊力对辊系受力和铝带横向厚度分布的影响

对入口厚度为 0.42 mm,出口厚度为 0.30 mm,弯辊力分别为 -100, 0, 100, 200 kN 的工况进行仿真研究,仿真结果如图 6 所示.当弯辊力增大时,工作辊挠曲 y_w 在工作辊中部呈现增大

的趋势、在工作辊边部逐渐减小,而支持辊与工作辊之间的弹性压扁 y_{wb} 在工作辊中部减小、在工作辊边部增大,因此,工作辊边部接触工作时单位辊间接触压力先减小后增大;轧辊边部挠曲减小,增大了铝带边部辊缝,轧辊边部接触力减小;弯辊力对轧辊中部轧制力分布影响较小,轧辊边部轧制

力分布随弯辊力增大而减小。

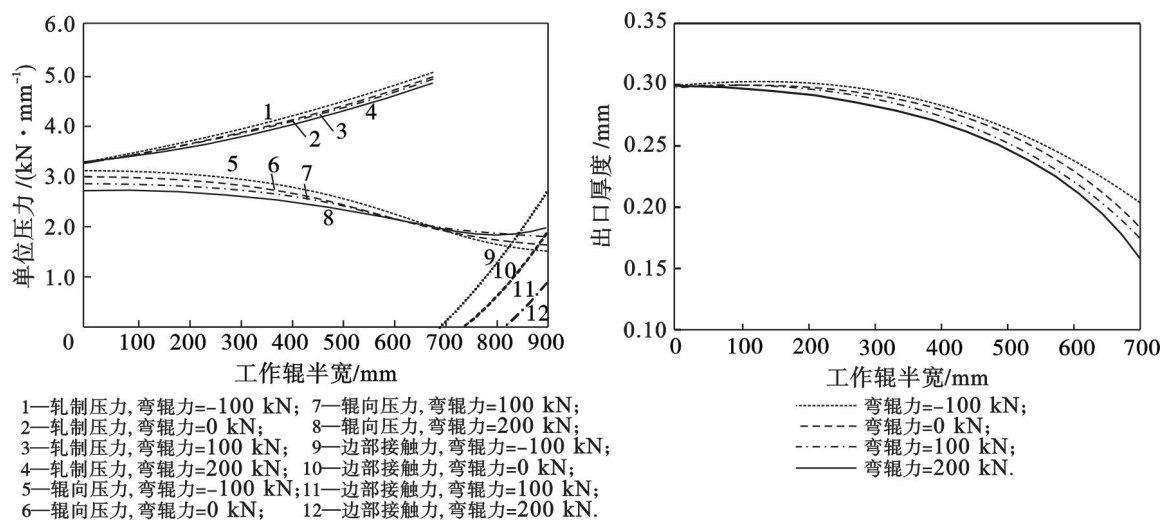


图 6 弯辊力对辊系受力与铝带横向厚度分布的影响

Fig. 6 The influence of bending force on the stress of roll system and aluminum strip transverse thickness distribution

3 结 论

1) 对单机架铝冷轧机辊系进行离散化,根据薄铝带冷轧机工作辊边部接触的特点,并考虑了张力对辊系变形的影响,借鉴弹性悬臂梁法和影响函数法的处理思想,建立了适用于实际生产在线控制的铝冷轧机辊系变形模型。

2) 结合现场生产数据,对铝带不同入口厚度、弯辊力,工作辊的接触状态进行仿真计算,实现了对轧制力、辊间压力、边部接触力和铝带横向厚度分布的求解。

3) 仿真结果表明工作辊边部接触力随入口厚度增加而增加、随弯辊力增加而减小;工作辊边部接触轧制时,轧机出口铝带凸度和横向厚差小于非边部接触轧制,有利于控制铝带边部减薄,但降低了铝轧机边部板型调控能力,在轧制中应尽量避免。

参考文献:

- [1] 蒋力. 铝板冷轧分段冷却热辊形仿真模型研究 [D]. 北京:北京科技大学,2013.
(Jiang Li. Simulation model of work roll's subsectional cooling thermal expansion during aluminum cold rolling [D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing, 2013.)
- [2] Qing X H, Cun L Z, Zheng Y J, et al. Four-high cold rolling mill for control of edge-drop and thrust force [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 145: 57-60.
- [3] Zhang Y, Yang Q, Wang X C, et al. Analysis of cold-rolled strip profile in UCM mill by finite element method [J]. *Key*

Engineering Materials, 2010, 443: 21-26.

- [4] Abdelkhalek S, Montmitonnet P, Potier-Ferry M, et al. Strip flatness modelling including buckling phenomena during thin strip cold rolling [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2010, 37 (4): 290-297.
- [5] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京:高等教育出版社,1992.
(Liu Hong-wen. Mechanics of materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992.)
- [6] 王国栋. 板形控制和板形理论 [M]. 北京:冶金工业出版社,1986.
(Wang Guo-dong. Strip shape control and shape theory [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986.)
- [7] Johnson K L. Contact mechanics [M]. London: Cambridge University Press, 1985.
- [8] 刘力文, 张树堂, 武志平, 等. 张力对冷轧板带变形的影响 [J]. *钢铁*, 2000, 35(4): 37-39.
(Liu Li-wen, Zhang Shu-tang, Wu Zhi-ping, et al. Influence of tension on the deformation of strip during cold rolling [J]. *Iron and Steel*, 2000, 35(4): 37-39.)
- [9] 杜晓钟. 高精度硅钢冷连轧机边部减薄机理及控制技术研究 [D]. 北京:北京科技大学,2009.
(Du Xiao-zhong. Research on mechanics of edge drop and its control technology in cold strip mill for high precision silicon steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2009.)
- [10] Edwards W J, Spooner P D. Analysis of strip shape [C]// Bryand G F. Automation of Tandem Mills. London: The Iron and Steel Institute, 1973: 177-182.
- [11] 李勇华, 邸洪双, 刘光明, 等. CVC 冷轧机承载辊缝凸度调节域计算模型 [J]. *轧钢*, 2011, 28 (2): 8-12.
(Li Yong-hua, Di Hong-shuang, Liu Guang-ming, et al. Model of CVC cold rolling mill loaded roll gap crown control room [J]. *Steel Rolling*, 2011, 28 (2): 8-12.)