

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180208

极薄带轧制变形区接触轮廓及接触压力分析

任忠凯, 王 涛, 王跃林, 范婉婉, 付文石, 郭雄伟
(太原理工大学机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 轧制力模型的准确性对轧制过程中轧件厚度的控制起着决定性的作用。传统的轧制力模型假设轧辊为圆弧,但是随着极薄带厚度的减小,变形区接触弧长远远大于轧件厚度,此时轧件已被压扁为非圆弧形轮廓。针对上述问题,Fleck基于赫兹接触理论准确求解了变形区轧辊轮廓,从而建立了新的轧制力模型,但是,Fleck解析方法比较复杂,针对不同的轧制工况建立了不同的计算方法。为了建立简化的解析方法,不仅统一了整个变形区轧制压力与摩擦力的表达式形式,而且忽略了中性区弹性卸载现象。通过对比简化模型计算结果与Fleck模型计算结果、实测的变形区轮廓,验证了简化解析模型的准确性。利用该简化模型分析了不同因素对变形区接触弧轮廓及接触压力分布的影响。结果表明,随着来料厚度减小、工作辊弹性模量减小、压下量增大,变形区轧辊弹性压扁越来越严重。

关键词: 极薄带; 变形区轮廓; 接触压力; Fleck理论; 解析方法
文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)12-0062-07

Analysis of contact contour and contact pressure in deformation zone of ultra-thin strip rolling

REN Zhong-kai, WANG Tao, WANG Yue-lin, FAN Wan-wan,
FU Wen-shi, GUO Xiong-wei

(School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: The accuracy of the rolling force model plays a decisive role in the control of the strip thickness in the rolling process. The conventional rolling theories assumes that the roll is a circular arc. However, as the ultra-thin strip thickness decreases, the contact arc length of the deformation zone is much greater than the strip thickness, resulting in a non-circular contour. For the above problems, Fleck accurately solved the roll contour in the deformed zone based on the Hertzian contact theory, and established a new rolling force model. However, the Fleck's analytical method is more complex, where different calculation methods have been established for different rolling conditions. To establish a simplified analysis method, not only the expression forms of rolling force and friction force in the entire deformation zone are unified, but also the elastic unloading phenomenon in the neutral zone is ignored. Then, by comparing the results calculated by simplified model with the results calculated by Fleck model and measurements, the accuracy of the simplified analytical model is verified. The influence of different factors on the contact arc profile and contact pressure distribution in the deformation zone is analyzed by the simplified model. The results show that with the decrease of the inlet strip thickness and the elastic modulus of the work roll, and the increase of the reduction, the elastic flattening of the work roll in the deformation zone becomes more and more serious.

Key words: ultra-thin strip; contour in deformation zone; contact pressure; Fleck theory; analytic method

随着“中国制造2025”战略构想的提出,微机电、微制造等高新技术领域对优质极薄带有了更高要求^[1-5]。在极薄带轧制过程中,轧制力的计算是板形板厚控制的基础,轧制力模型的准确性对轧件厚度的控制起着决定性的作用^[6-7]。而变形区工作辊的弹性压扁对轧制压力的分布有很大影响,传统的轧制力模型假设轧辊在接触变形区依然保持为圆弧形轮廓,然后利用Hitchcock公式修正圆弧形轮廓的直径^[8-9]。但是难变形的极薄带轧制过程中,变形

区接触弧长远远大于轧件厚度,此时轧辊已被压扁为非圆弧形轮廓,所以传统的冷轧理论已经不再适用极薄带轧制。

为了在板形板厚控制过程中得到准确的轧制力,Fleck N A^[10-11]提出了新的轧辊压扁模型。Fleck基于赫兹接触理论准确求解得到轧辊在变形区接触压扁作用下的轧辊轮廓,避免了对变形区接触轮廓的假设。Fleck将极薄带轧制变形区划分为入口弹性区、入口塑性区、中性区、出口塑性区、出口弹性

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474190); 太原市重大科技专项资助项目(170203)

作者简介: 任忠凯(1988—),男,博士,讲师; **E-mail:** zhongkai_0808@126.com; **收稿日期:** 2018-05-23

通讯作者: 王 涛(1985—),男,博士,讲师; **E-mail:** tyutwt@163.com

滑时 $a=1$, 当轧件相对于轧辊前滑时 $a=-1$ 。

当轧辊与轧件间不发生相对滑动, 即进入黏着区时, 轧件与轧辊满足下列等式。

$$\varepsilon_R(x) - \varepsilon_s(x) = \frac{v_s - v_R}{v_R} = \zeta \quad (6)$$

$$\varepsilon_s(x) = \varepsilon_{sx}^e + \varepsilon_{sx}^p = \frac{(1-2\nu_s)(1+\nu_s)}{E_s} [\sigma_x + p(x)] - \ln(1 + \frac{h_i - h}{h_i}) \quad (7)$$

$$\varepsilon_R(x) = \frac{\partial u_x}{\partial x} \approx -\frac{1-2\nu_R}{(1-\nu_R) E_R} p(x) - \frac{2}{\pi E_R} \int_{-x_i}^{x_o} \frac{q(s)}{x-s} ds \quad (8)$$

式中: $\varepsilon_R(x)$ 为轧辊表面在 x 方向的应变值; $\varepsilon_s(x)$ 为轧件表面在 x 方向的应变值; ε_{sx}^e 为轧件表面在 x 方向的弹性应变值; ε_{sx}^p 为轧件表面在 x 方向的塑性应变值; E_s 为轧件的弹性模量; ν_s 为轧件的泊松比; ζ 为常数。

1.2 不同区域的控制方程

在入口、出口弹性区, 极薄带处于弹性状态, 由平面应变胡克定律推出竖直方向 z 的应变为

$$\varepsilon_s(z) = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} [p(x) - \frac{\nu_s}{1-\nu_s} \sigma_x] \quad (9)$$

极薄带在任意位置处垂直方向的真实应变值为

$$\varepsilon_{s,true} = \ln(1 + \frac{h_i - h}{h_i}) \quad (10)$$

联立式(1)、式(5)、式(9)、式(10)求解, 得

$$\frac{dp(x)}{dx} = -\frac{E_s}{2h_i - h} \cdot \frac{dh}{dx} - \frac{\nu_s}{1-\nu_s} \cdot \frac{2a\mu p(x)}{h} \quad (11)$$

在入口、出口塑性压下区, 轧件仍然发生相对滑动, 所以将式(2)、式(5)代入式(1), 得

$$\frac{dp(x)}{dx} = \frac{Y_s}{h} \cdot \frac{dh}{dx} - \frac{2a\mu p(x)}{h} \quad (12)$$

根据 Fleck 理论可知, 在中性区轧辊与轧件间不发生相对滑动, 因此, 中性区轧辊与轧件间的摩擦模型应满足式(6)。对式(6)两边求导, 得

$$\frac{dp(x)}{dx} = \left[\frac{(1-2\nu_R)(1+\nu_R)}{E_R} + \frac{2(1-2\nu_s)(1+\nu_s)}{E_s} \right]^{-1} \cdot \frac{1}{h-2h_i} \cdot \frac{dh}{dx} \quad (13)$$

将式(13)代入式(1)中, 得中性区摩擦力

$$q = \frac{Y_s}{2} \cdot \frac{dh}{dx} - \left[\frac{(1-2\nu_R)(1+\nu_R)}{E_R} + \frac{2(1-2\nu_s)(1+\nu_s)}{E_s} \right]^{-1} \cdot \frac{h}{2h-4h_i} \cdot \frac{dh}{dx} \quad (14)$$

基于式(5)和式(14)来判断塑性区与中性区的分界点, 在入口处轧件发生屈服后, 当式(14)计算的摩擦力小于式(5)计算的滑动摩擦时, 轧件从入

口塑性区进入中性区; 当式(14)计算的摩擦力大于式(5)计算的滑动摩擦时, 轧件从中性区进入出口塑性区。

2 简化模型与 Fleck 模型对比

极薄带轧制过程中变形区轮廓及接触压力简化模型的计算流程如图3所示。初始假设轧辊轮廓为圆弧形, 且必须大于实际的变形区长度。根据轧辊轮廓及轧件的入口、出口厚度确定 x_i 和 x_o , 依次进行迭代求解接触压力及变形区轮廓, 直到收敛为止。

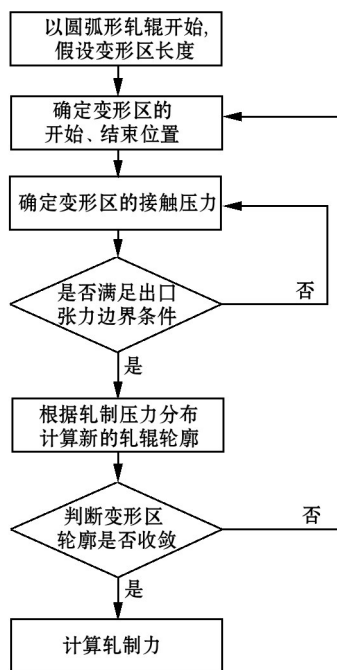


图3 计算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart

为了验证简化模型的准确性, 针对两种算例将简化模型计算结果与 Fleck 解析模型计算结果进行比较。计算工艺参数见表1(工作辊直径为 260 mm), 计算结果包括变形区轮廓及接触压力分布。图4所示

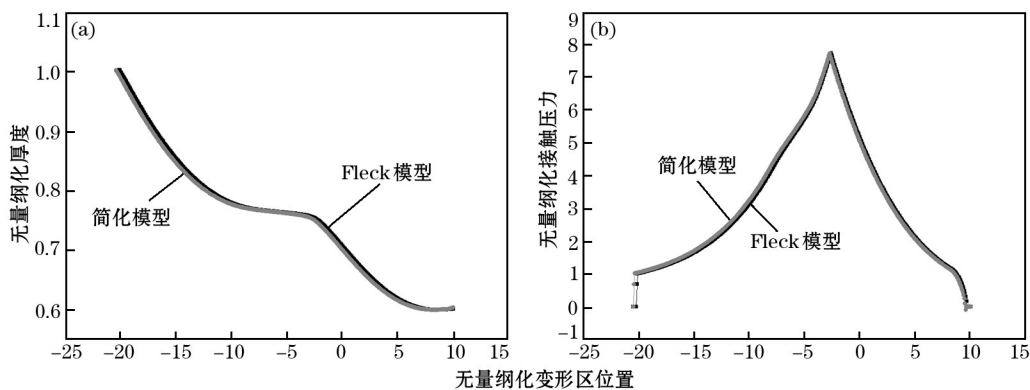
表1 计算工艺参数

Table 1 Parameters of calculation process

项目	数值
轧件厚度/mm	0.09、0.06
单道次压下率/%	40
轧件屈服强度/MPa	220
泊松比	0.3
前、后张力/MPa	0、0
轧辊弹性模量/GPa	230
轧件弹性模量/GPa	77
摩擦因数	0.04

为厚度为 0.09 mm 轧件的计算结果,图 5 所示为厚度为 0.06 mm 轧件的计算结果,2 个模型计算的接触

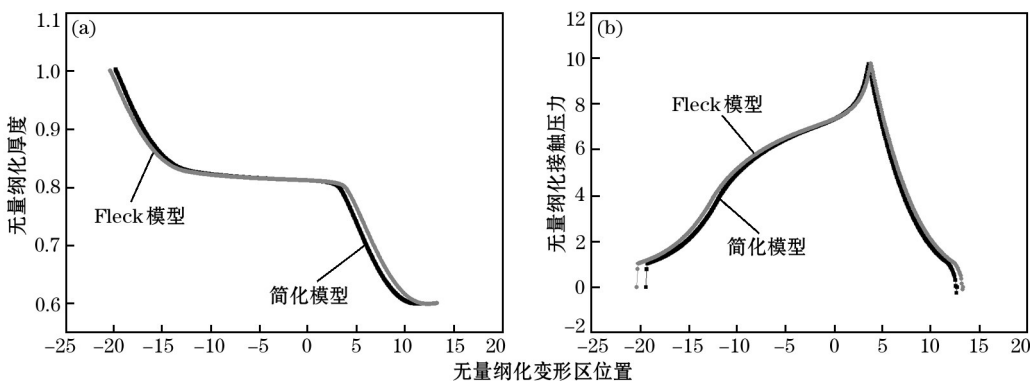
压力分布和变形区轮廓在整个变形区基本一致,从而证明了简化模型的准确性。



(a) 变形区轮廓; (b) 接触压力分布。

图 4 0.09 mm 极薄带对比

Fig. 4 Comparison of 0.09 mm ultra-thin strip



(a) 变形区轮廓; (b) 接触压力分布。

图 5 0.06 mm 极薄带对比

Fig. 5 Comparison of 0.06 mm ultra-thin strip

3 简化模型与试验结果对比

3.1 变形区轮廓的试验研究

为了进一步验证简化模型的准确性,使用实验室二辊轧机进行轧制试验。试验中轧辊直径为 220 mm,弹性模量和泊松比分别为 236 GPa 和 0.3。通过拉伸试验对轧件力学性能进行了测试,轧件种类及材料主要性能见表 2。

表 2 不同种类轧件及主要性能

Table 2 Main properties of different types of workpiece

厚度/mm	材料	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
0.39	Q235	196	0.260	500
0.28	SUS 304	204	0.285	450
0.19	SUS 304	200	0.285	443

轧制结束后,使用慢走丝线切割从轧后带材的中间部位截取一小部分作为试件,使用 2.6 μm (5 000 目)

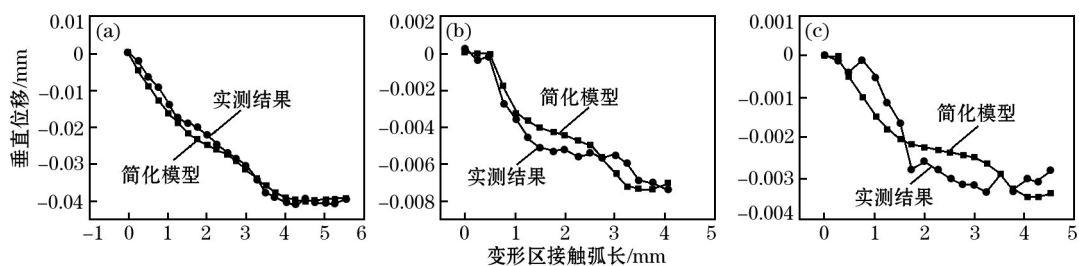
砂纸沿轧制方向打磨切片截面。切片打磨好之后,利用共聚焦激光扫描显微镜测量变形区轮廓。测量过程中,工作台每次移动 0.25 mm,每个位置附近测量 3 次,取其平均值。

3.2 结果对比

针对其中的 3 种试验工况进行了变形区轮廓的理论分析,理论分析与试验结果的对比如图 6 所示。图 6(a)所示为 0.39 mm 轧件在压下量为 15.1% 的对比,图 6(b)所示为 0.28 mm 轧件在压下量为 5.1% 的对比,图 6(c)所示为 0.19 mm 轧件在压下量为 2.4% 的对比。图 6 中对比结果表明,理论分析计算的变形区轮廓与试验结果基本吻合,从而证明了简化模型的准确性。

4 变形区影响因素分析

为了研究不同因素对轧件变形区接触轮廓及接触压力分布的影响,基于本文开发的简化模型分



(a) 0.39 mm 带材; (b) 0.28 mm 带材; (c) 0.19 mm 带材。

图 6 变形区接触轮廓对比

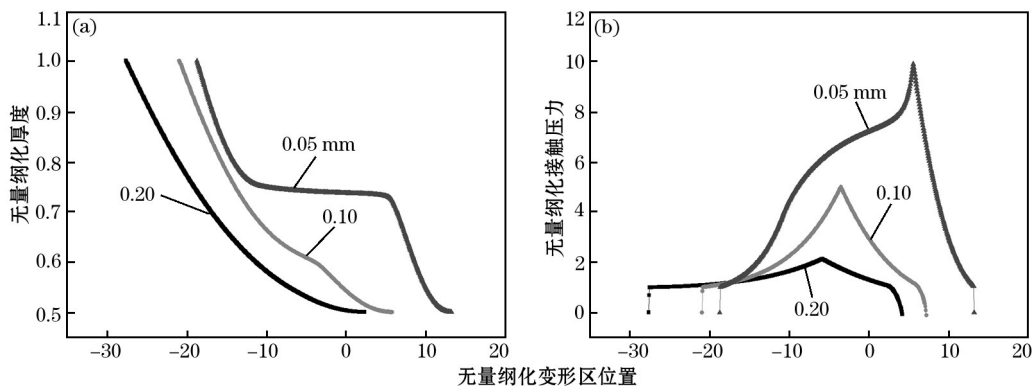
Fig. 6 Comparison of contact contours in deformed areas

析了轧件来料厚度、工作辊弹性模量、压下量对其的影响。

4.1 轧件厚度的影响

轧件来料厚度分别为 0.20、0.10、0.05 mm，压下率为 50%；轧件屈服强度为 230 MPa，轧件弹性模量

及泊松比分别为 77 GPa 和 0.3，计算结果如图 7 所示。由图 7 可知，随着来料厚度的减小，变形区轧辊弹性压扁越来越严重，逐渐被压平；随着轧辊弹性压扁的加剧，变形区接触压力急剧增大。这说明轧件入口厚度越薄越不易轧制。



(a) 变形区轮廓; (b) 接触压力分布。

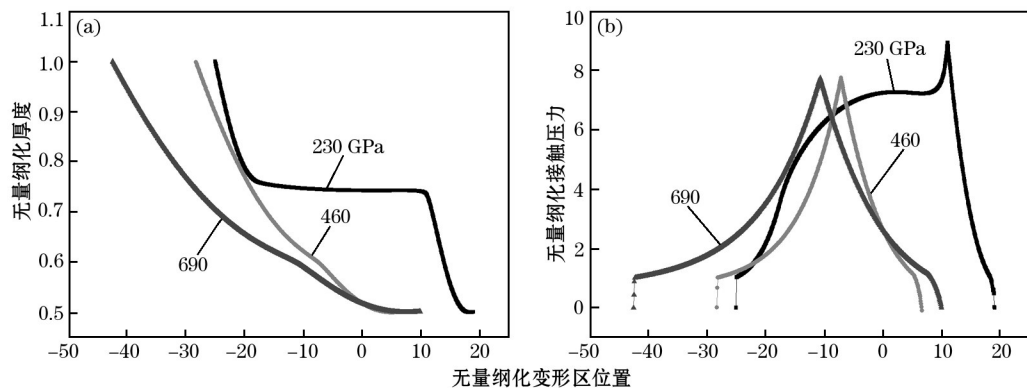
图 7 轧件厚度的影响

Fig. 7 Effect of strip thickness

4.2 工作辊弹性模量的影响

轧件来料厚度为 0.05 mm，压下率为 50%；轧件屈服强度为 230 MPa，轧件弹性模量及泊松比分别

为 77 GPa 和 0.3，轧辊弹性模量分别为 230、460、690 GPa，计算结果如图 8 所示。可以看出，随着轧辊弹性模量的减小，变形区轧辊弹性压扁加剧，逐渐



(a) 变形区轮廓; (b) 接触压力分布。

图 8 工作辊弹性模量的影响

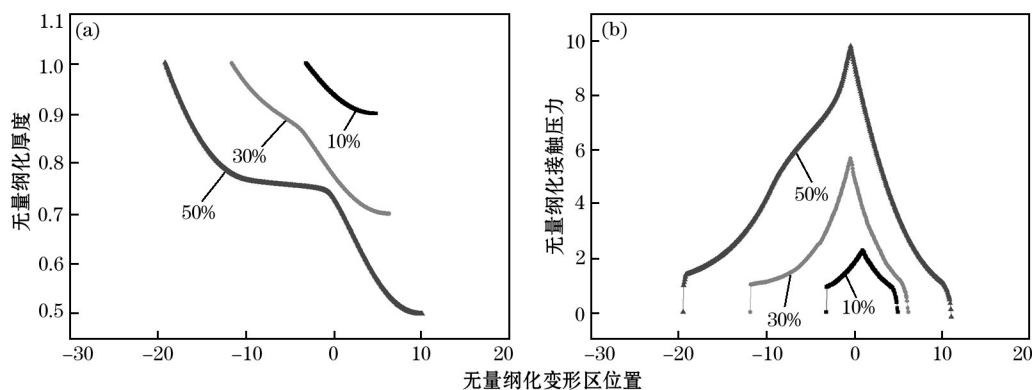
Fig. 8 Effect of elastic modulus of work roll

被压平,此时出现了中性区;随着轧辊弹性压扁的加剧,变形区接触压力急剧增大。这说明轧辊弹性模量越大越有利于轧件的塑性变形,轧件越容易轧薄。

4.3 压下量的影响

轧件来料厚度为 0.07 mm,压下率分别为 10%、

30%、50%;轧件屈服强度为 230 MPa,轧件弹性模量及泊松比分别为 77 GPa 和 0.3;轧辊弹性模量为 230 GPa,计算结果如图 9 所示。由图 9 可知,随着压下量的增大,变形区轧辊弹性压扁越来越严重,逐渐被压平。



(a) 变形区轮廓; (b) 接触压力分布。

图 9 压下量的影响

Fig. 9 Effect of reduction

5 结论

(1) 针对 Fleck 极薄带轧制力解析方法存在的缺点进行了改进,不仅在整个变形区统一了接触压力和摩擦力的表达式形式,而且忽略了中性区弹性卸载现象,从而简化了解析方法。该解析方法可以适用于任何形状的变形区轮廓,避免了对不同轧制工况的预判。

(2) 通过对比简化模型计算结果与 Fleck 解析模型计算结果、实测变形区轮廓,验证了简化模型的准确性。因此,基于简化的 Fleck 模型得到计算速度快、精度高、适合在线应用的极薄带轧制力模型。

(3) 利用简化模型分析了不同因素对变形区的影响。结果表明,随着来料厚度的减小、工作辊弹性模量的减小、压下量的增大,变形区轧辊弹性压扁越来越严重,甚至变形区出现了中性区;随着轧辊弹性压扁的加剧,变形区接触压力急剧增大。

参考文献:

- [1] 刘相华,赵启林,孙祥坤,等.极薄带微轧制技术研究与应用新进展[J].轧钢,2018,35(1):1. (LIU Xiang-hua, ZHAO Qi-lin, SUN Xiang-kun, et al. Prospect of micro rolling technologies for foil products[J]. Steel Rolling, 2018, 35(1):1.)
- [2] 刘相华,宋孟,孙祥坤,等.极薄带轧制研究与应用进展[J].机械工程学报,2017,53(10):1. (LIU Xiang-hua, SONG Meng, SUN Xiang-kun. Advances in research and application of foil

rolling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(10):1.)

- [3] 任忠凯,肖宏,刘晓.极薄带最小可轧厚度理论及试验分析[J].钢铁,2017,52(8):60. (REN Zhong-kai, XIAO Hong, LIU Xiao. Theoretical and experimental analysis of minimum thickness in ultra-thin strip rolling[J]. Iron and Steel, 2017, 52(8):60.)
- [4] 赵启林,刘相华.极薄带最小可轧厚度研究新进展[J].轧钢,2018,34(2):1. (ZHAO Qi-lin, LIU Xiang-hua. Prospect for possible minimum foil thickness by rolling[J]. Steel Rolling, 2018, 34(2):1.)
- [5] 赵文姣,闫洪伟,杨枕,等.提高轧制力设定精度的一种离线优化方法[J].中国冶金,2017,27(8):19. (ZHAO Wen-jiao, YAN Hong-wei, YANG Zhen, et al. An off-line optimization method for improving precision of rolling force setting[J]. China Metallurgy, 2017, 27(8):19.)
- [6] ZHI Y, WANG X, WANG S, et al. A review on the rolling technology of shape flat products[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9/10/11/12):4507.
- [7] WANG D C, LIU H M, LIU J. Research and development trend of shape control for cold rolling strip[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(5):1248.
- [8] Von Karman T. On the theory of rolling[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1925(5):139.
- [9] Hitchcock J H. Roll neck bearings[J]. Report of ASME Special Research Committee, 1935:33.
- [10] Fleck N A, Johnson K L. Towards a new theory of cold rolling thin foil[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1987, 29(7):507.
- [11] Fleck N A, Johnson K L, Mear M E, et al. Cold rolling of foil[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,

- Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1992, 206(2): 119.
- [12] Domanti S A, Edwards W J, Thomas P J, et al. Application of foil rolling models to thin steel strip and temper rolling[C]//Sixth International Rolling Conference. [S.l.]: Nagoya University, 1994: 422.
- [13] Langlands T A M, McElwain D L S. A modified Hertzian foil rolling model approximations based on perturbation methods[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(8): 1715.
- [14] Langlands T A M, McElwain D L S, Domanti S A. An approximate method for the solution of an influence function foil rolling model[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(8): 1139.
- [15] Liu Y, Lee W H. Mathematical model for the thin strip cold rolling and temper rolling process with the influence function method[J]. ISIJ International, 2005, 45(8): 1173.
- [16] 王东城, 彭艳, 刘宏民. 冷轧带钢平整机高精度高速度轧制力模型开发[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(1): 172. (WANG Dong-cheng, PENG Yan, LIU Hong-min. A high-resolution high-speed rolling force model for cold strip temper rolling mill[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(1): 172.)
- [17] 王东城, 王芸红. 基于非圆弧理论的平整机轧制力简化模型[J]. 中国机械工程, 2015, 26(19): 2677. (WANG Dong-cheng, WANG Yun-hong. Simplified rolling force model for temper rolling mill based on non-circular arc theory[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(19): 2677.)
- [18] Dbouk T, Montmitonnet P, Suzuki N, et al. Advanced roll bite models for cold and temper rolling processes[C]//International and European Rolling Conference. [S.l.]: University of Venice, 2013: 1.
- [19] Xie H, Manabe K, Furushima T, et al. Lubrication characterisation analysis of stainless steel foil during micro rolling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1/2/3/4): 65.
- [20] Lee S H, Lee K H, Ko D C, et al. Development of three-dimensional strip profile model for thin-foil cold rolling[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6(1): 312382.
- [21] Hwang Y M, Kan C C. Roll shape design for foil rolling of a four-high mill[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5/6/7/8): 1587.
- [22] 肖宏, 任忠凯, 刘晓, 等. 极薄带轧制变形区轧辊压扁试验与有限元模拟[J]. 钢铁, 2017, 52(1): 38. (XIAO Hong, REN Zhong-kai, LIU Xiao, et al. Experiment and finite element simulation of roll flattening in deformation zone for ultra-thin strip rolling[J]. Iron and Steel, 2017, 52(1): 38.)

普锐特冶金技术在宝钢投产第1条采用新开发的集成自动化方案的处理线

2018年8月,一条配备了普锐特冶金技术开发的一种集成自动化方案的镀锡板锡铬共线机组在上海宝山钢铁股份有限公司(宝钢)投产。这是这种专为处理线设计的新自动化方案的首次应用。新的集成自动化方案和功能强大的高端PLC相结合,极大地提高了工艺控制水平,而新的人机界面(HMI)方案将方便操作和诊断。电镀锡线配备的自动化系统将使其满足今后20年的生产需要。第1卷带钢的投产时间比原定时间表提前了2周。

普锐特冶金技术的供货范围包括了整条全自动电镀锡线的基础自动化(1级)和过程自动化(2级)以及HMI系统,涵盖了入口段、入口活套、电镀锡段、张力矫直机、出口段和磁力皮带输送机。另外,还提供了347套电机传动和251台齿轮电机,并安装了一套单独的安全控制系统。

宝山钢铁股份有限公司隶属于中国宝武钢铁集团有限公司,年产量为6540万t(2017年),是世界第二大钢铁企业,拥有包括了从原料直到最终产品每一个环节的完整钢铁生产链。为了满足市场对镀锡和镀铬产品不断增长的需求,宝钢决定新建一条镀锡板锡铬共线机组。它的设计年产能力为200000t,能够以450m/min的工艺速度处理厚0.12~0.36mm、宽700~1230mm的材料。宝钢镀锡板锡铬共线

机组是一条生产镀锡板和镀铬板的处理线(ETL/TFSL),产品主要用于食品包装罐制造。这条线的自动化程度极高,入口和出口段都安装了机器人。高度自动化使得入口操作人员和入口操作室都不再需要。

如今,充满挑战的市场要求生产企业持续改进生产运行,尤其是在自动化系统方面。新的技术方案,比如集成自动化方案、Profinet、使用方便和直观的HMI和功能强大的闭环控制,加上几十年积累的丰富诀窍,为打造一套创新性的自动化系统奠定了基础。

模块化设计的软件为当前和将来的投资提供了可靠保障,将使生产效率显著提高。这样的特点是最优化方案的关键因素,无论对新设备还是部分乃至全面自动化升级都是如此。普锐特冶金技术开发的创新性后处理线自动化方案采用了最新硬件,并且专门考虑了设备的统一性。这就保证了硬件的标准化,因而简化了维修和改进了系统诊断。

新闻联系人:

普锐特冶金技术(中国)有限公司

公共关系部

邓杨,电话:+86-21-6196 8600

电子邮件:deng.yang@primetals.com