

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170374

冷连轧机 ESS 辊型板形控制性能分析

任新意¹, 王松涛¹, 高慧敏¹, 熊爱明¹, 唐 伟¹, 黄华贵²

(1. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司冷轧部, 河北 唐山 063200; 2. 燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 以某 2 230 mm 六辊五机架冷连轧机为研究对象, 采用 ABAQUS 有限元软件平台建立了具有中间辊 ESS 辊型的三维非线性轧机仿真模型。通过数值模拟, 分析了工作辊弯辊、中间辊弯辊和中间辊横移等板形调控手段综合作用下的板形控制域的变化规律。同时, 系统研究了不同工作辊弯辊力、中间辊弯辊力和中间辊横移量等参数对带钢二次凸度和四次凸度的调控性能。现场应用结果表明, ESS 辊型轧机对带钢板形和横向厚度均具有良好的控制作用。

关键词: 冷连轧; 板形; 横向厚度; ESS 辊型; 调控性能; ABAQUS

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)03-0050-07

Analysis on shape control performance of cold tandem mill with ESS roll profile

REN Xin-yi¹, WANG Song-tao¹, GAO Hui-min¹, XIONG Ai-ming¹,
TANG Wei¹, HUANG Hua-gui²

(1. Cold Metal Department, Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063200, Hebei, China;
2. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: Taking the six-high five-stand cold tandem mill of 2 230 mm as research object, the three-dimensional nonlinear mill simulation model with intermediate roll using ESS profile wase stablished through the ABAQUS finite element software platform. By numerical simulation, the variation law of the shape regulation region was analyzed under the combined action of shape control means including work roll bending, intermediate roll bending and intermediate roll transverse movement. Meanwhile, the control performance of different parameters including work roll bending force, intermediate roll bending force and intermediate roll transverse movement value to quadratic crown and quartic crown of the strip was researched systematically. The application results show that the mill with ESS profile has a good control effect on the shape and transverse thickness of the strip.

Key words: cold tandem rolling; strip flatness; transverse thickness; ESS profile; regulation performance; ABAQUS

带钢的板形精度是衡量冷轧产品质量的重要技术指标,直接影响到机组的稳定运行和生产成本,从而最终影响企业的市场竞争力^[1]。其次,酸轧冷硬带钢的初始板形缺陷还会引起退火炉内的跑偏、瓢曲等系列问题,因此,良好的带钢板形是保证后处理线稳定通板的重要前提^[2]。而随着板形基础理论和板形控制技术的不断发展,严格控制带钢的横向厚度控制精度,实现带钢断面形状的“矩形化”,成为冷轧高端产品新的发展趋势,也是未来板形研究的方向和难点^[3]。

近年来,国内外学者已针对带钢横向厚度精度控制做了大量研究工作。常安等^[4]采用影响函数法建立了六辊冷轧机的轧辊弹性变形解析模型,系统分

析了工作辊横移对边部减薄的影响规律,为匹配带钢工艺特性而确定最佳工作辊横移位置提供了参考依据;张岩等^[5]以鞍钢 1 500 mm 改造 UCMW 型冷连轧机组为研究对象,系统研究了带钢边部减薄的原因,同时采用单锥度辊策略对边部减薄进行控制,显著提高了硅钢产品的成材率;郑虎平^[6]针对带钢边部减薄的问题,以攀钢四机架 HC 轧机为研究对象,在单锥度工作辊 K-WRS 技术的基础上,通过开发双锥度工作辊边降控制新技术,提出辊型配置的优化方案,取得了良好的控制效果;何安瑞等^[7]通过建立六辊轧机耦合有限元仿真模型,针对传统 UCM 轧机在带钢横向厚度控制上的不足,开发了具有高次曲线函数的边部变凸度 EVC 工作辊辊型,现场应用后的带钢

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51027003, 51005197)

作者简介: 任新意(1982—), 男, 博士, 高级工程师; **E-mail:** xinyiren99866@163.com; **收稿日期:** 2017-07-24

平均横向厚度差有了大幅下降。

德国西马克五机架六辊CVC冷连轧机组采用柔性辊缝控制技术,尤其对宽规格带钢具有良好的板形控制能力^[8],成为国内新建冷轧生产线的主流机型。同时,针对带钢横向厚差控制能力较差的问题,预留开发了ESS(enhanced shifting strategy)边降控制技术^[9]。但由于配套的ESS辊型磨削技术存在较大难度,目前国内钢铁企业较少现场使用,缺乏相关基础研究和工艺技术的参考依据。因此,本文以某2 230 mm冷连轧机组为对象,采用有限元软件数值模拟分析了轧机ESS辊型对承载辊缝凸度调节域的变化规律,并系统研究了不同板形控制手段对带钢二次板形、四次板形和边部减薄的调控性能,现场应用结果表明,对带钢的横向厚度和板形精度均具有良好的控制作用。

1 六辊ESS轧机有限元建模

某2 230 mm冷连轧机组由德国西马克公司总体设计,采用六辊五机架串列式配置,中间辊包括CVC辊型曲线和ESS辊型曲线两种形式^[10]。机组具有工作辊正负弯辊、中间辊正负弯辊、中间辊轴向横移和轧辊精细冷却等板形调控手段,可以有效保证轧制带钢板形的平直度。ESS中间辊辊型是在轧辊端部400 mm长度范围内采用平台直线设计,辊身其他长度范围内采用CVC多项式曲线设计,两者通过直径1 000 mm的圆弧曲线连接,ESS辊型对轧制带钢的边部减薄具有良好的控制作用。CVC与ESS中间辊辊型如图1所示。某2 230 mm冷连轧机组各个辊型轮廓曲线如图2所示。

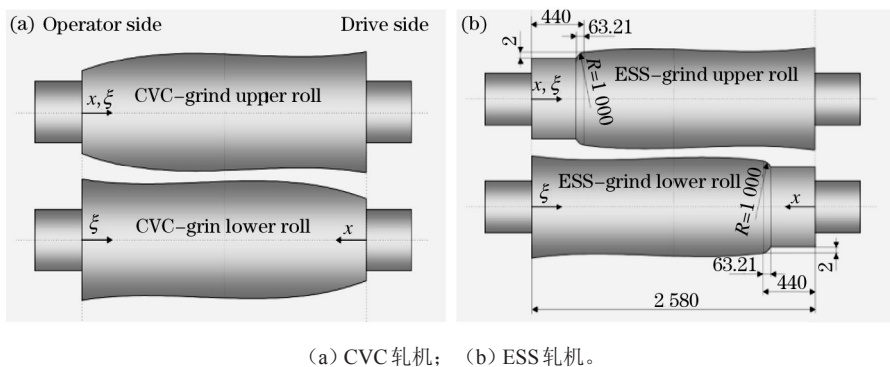


图1 CVC轧机与ESS轧机中间辊辊形示意图

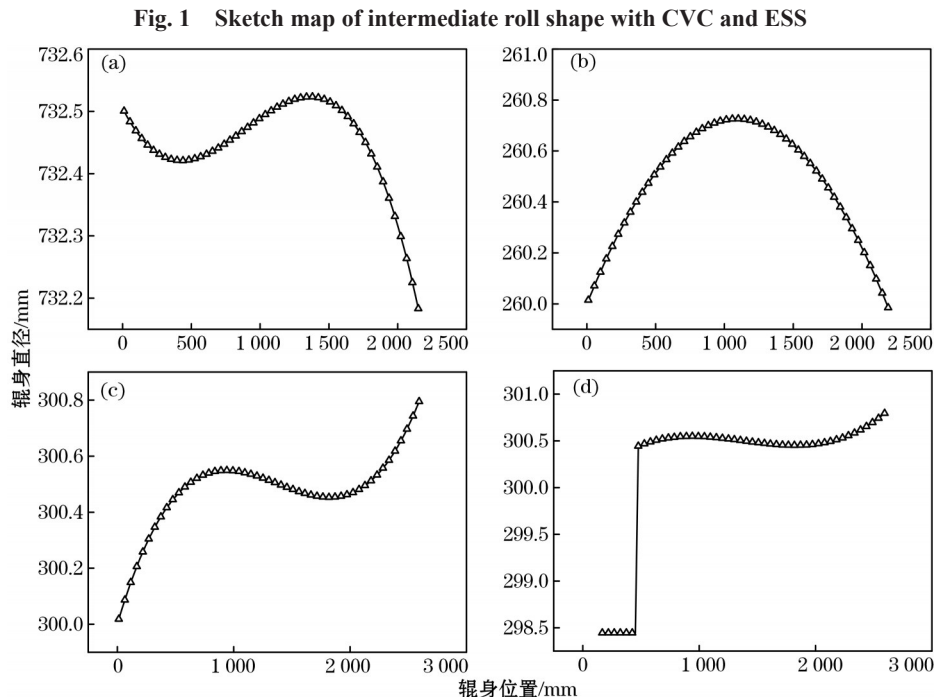
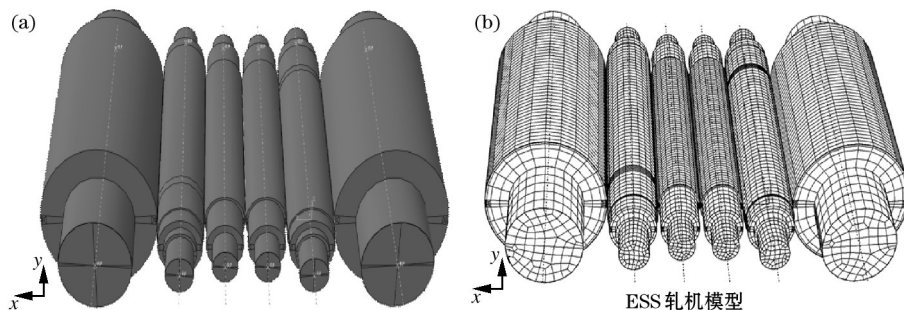


图2 2 230 mm六辊冷连轧机辊型曲线

Fig. 2 Roll shape curves of 2 230 mm six-high cold tandem mill

以某 2 230 mm 六辊五机架冷连轧机组为研究对象,采用非线性弹塑性有限元分析方法^[11],综合考虑工作辊液压弯辊力、中间辊液压弯辊力和中间辊轴向横移等边界条件,采用结构化(Structured)和扫

略(Sweep)相结合的网格划分技术。在轧辊与轧辊接触处,网格细化过渡区采用扫略(Sweep)网格划分技术,过渡区采用中轴(Medial axis)算法,建立 ESS 轧机六辊辊系变形仿真模型,如图 3 所示。



(a) 几何模型; (b) 有限元模型。

图 3 2 230 mm 六辊 ESS 轧机三维有限元模型

Fig. 3 Three-dimensional finite element model of 2 230 mm six-high ESS mill

2 带钢凸度调节域分析

将承载辊缝形状用四次多项式曲线表示^[12],即

$$gf(x) = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 \quad x \in [-1, +1] \quad (1)$$

式中: $gf(x)$ 为承载辊缝形状曲线; x 为归一化后的带钢宽度。

将承载辊缝凸度分解为二次凸度和四次凸度,分别用 CW_2 和 CW_4 表示,即

$$\begin{cases} CW_2 = -(a_2 + a_4) \\ CW_4 = -a_4/4 \end{cases} \quad (2)$$

在轧制过程中,板形控制的实质是对承载辊缝形状的控制。承载辊缝的二次凸度对应于带钢的二次浪形,四次凸度对应于带钢的四次浪形^[13]。轧机中间辊采用 ESS 辊型时,其横移位置量定义与常规 CVC 辊型相同,即当上、下中间辊辊身重合时,横移量为 0;当上中间辊向传动侧窜动、下中间辊向操作侧窜动时,横移量为正值,反之则横移量为负值。轧机采用 ESS 辊型时,中间辊横移量对轧机辊缝凸度调节域^[14]的影响规律如图 4 所示。

由图 4 可知,随着中间辊横移量的逐渐增加,带钢凸度控制域明显增大,且控制域变得狭长。当中间辊负向窜动时,带钢凸度控制域向右上方移动,即二次凸度和四次凸度整体分布均增大;当中间辊正向窜动时,带钢凸度控制域向左下方移动,即二次凸度和四次凸度整体分布均减小。

轧机采用不同中间辊辊型时的凸度调节域对比结果如图 5 所示,不同带钢宽度下的辊缝凸度域变化情况如图 6 所示。

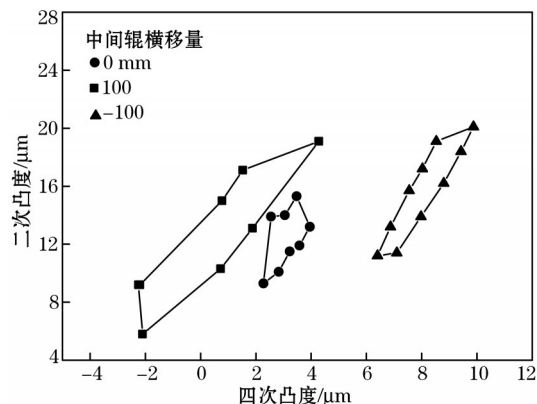


图 4 2 230 mm 六辊 ESS 辊型轧机凸度调节域

Fig. 4 Adjusting range of roll gap of 2 230 mm six-high mill with ESS profile

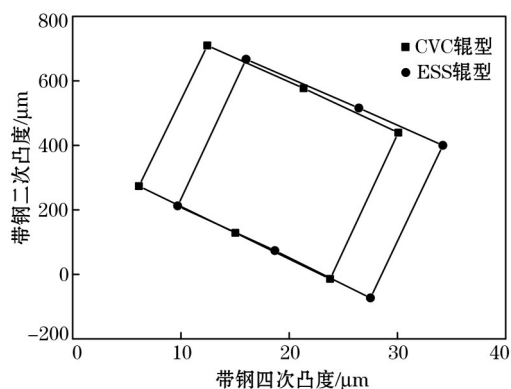


图 5 轧机辊缝凸度调节域对比结果

Fig. 5 Comparison of adjusting range of roll gap crown

由图 5 可知,采用 ESS 辊型与 CVC 辊型时,由二次凸度和四次凸度所形成的封闭面积无明显变化,即轧机的板形调控域基本相同。但是采用 ESS 辊型时,带钢的凸度调节域向二次凸度减小、四次

凸度增大的方向平移。由图6可知,轧机辊缝凸度调节域的面积随着带钢宽度的增加而增大,即轧机对宽规格带钢具有更好的板形调控作用。此外,需要根据带钢的实际生产宽度要求,匹配设计ESS辊型的阶梯平台长度,从而充分发挥ESS辊型对边部减薄现象的调控能力。

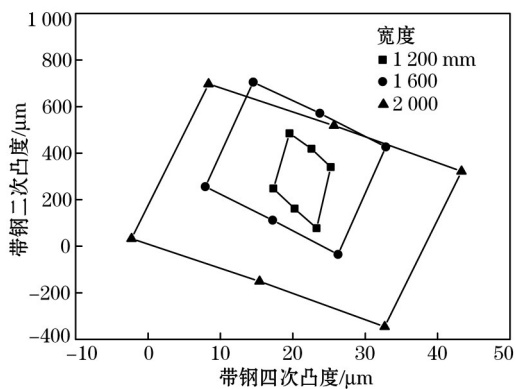


图6 不同带钢宽度的辊缝凸度调节域

Fig. 6 Adjusting range of roll gap crown with different strip width

3 带钢板形调控特性分析

3.1 带钢二次板形调控特性分析

采用所建立的有限元仿真模型,当中间辊弯辊力为0 kN,工作辊弯辊力分别为-350、0、500 kN时,带钢二次凸度随中间辊横移量的变化规律如图7所示。

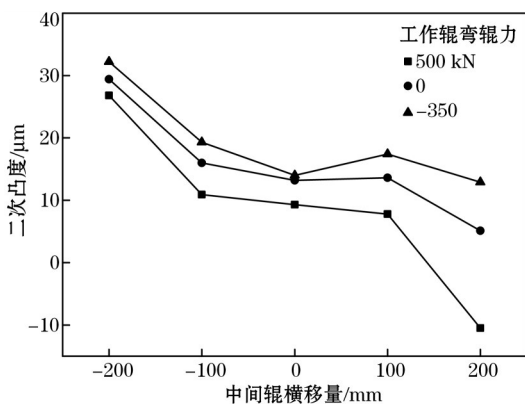


图7 不同工作辊弯辊力下中间辊横移量对带钢二次凸度的影响规律

Fig. 7 Influence of intermediate roll shifting on quadratic crown of strip in different working roll bending force

由图7可知,带钢的二次凸度随中间辊横移量的增大而减小。当工作辊弯辊力为负时,由于负的弯辊力作用使得在中间辊正向横移量不大时,带钢凸度略微增加。当中间辊正向横移量增大到

一定程度时,工作辊弯辊力对带钢二次凸度的调控被横移所引起的调控覆盖,中间辊横移量对带钢凸度控制最明显。中间辊横移量越大,带钢二次凸度越小。

当工作辊弯辊力为0 kN,中间辊弯辊力分别为-450、0、600 kN时,带钢二次凸度随中间辊横移量的变化规律如图8所示。

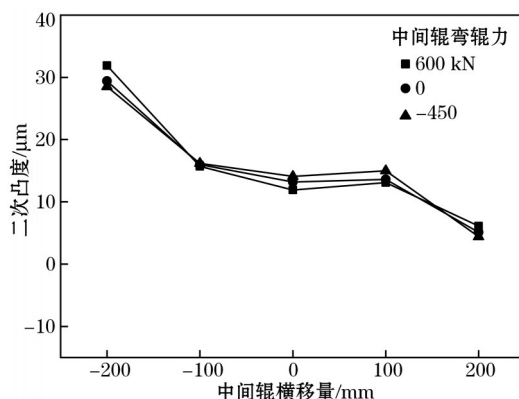


图8 不同中间辊弯辊力下中间辊横移量对带钢二次凸度的影响规律

Fig. 8 Influence of intermediate roll shifting on quadratic crown of strip in different intermediate roll bending force

由图8可知,中间辊弯辊力对带钢二次凸度的调控能力很弱,随着中间辊横移量的变化,中间辊弯辊力对带钢二次凸度的调控规律有所改变。在横移量绝对值较小的范围内,随中间辊弯辊力的增大,带钢二次凸度逐渐减小;当中间辊横移量的绝对值增大到一定范围后,随中间辊弯辊力的增大,带钢二次凸度反而逐渐增大。

当中间辊弯辊力分别为-450、0、600 kN时,不同中间辊横移量作用下的带钢二次凸度随工作辊弯辊力的变化规律如图9所示。

由图9可知,带钢的二次凸度随中间辊横移量的增大而减小。随着中间辊横移量绝对值的变大,工作辊弯辊力对带钢二次凸度的调控能力逐渐增强,即在中间辊横移量为零时,工作辊对带钢二次凸度的调控能力最弱,而中间辊弯辊力对带钢二次凸度的调控能力最强。

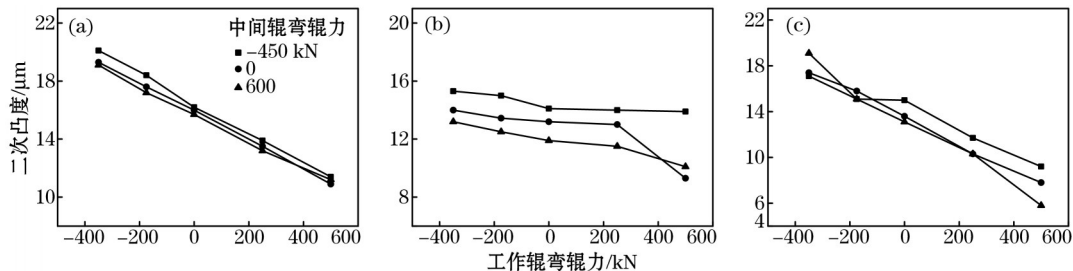
3.2 带钢四次板形调控特性分析

采用所建立的有限元仿真模型,当中间辊弯辊力为0 kN,工作辊弯辊力分别为-350、0、500 kN时,带钢四次凸度随中间辊横移量的变化规律如图10所示。

由图10可知,当工作辊弯辊力为正时,随着中

间辊横移量的增加,带钢四次凸度逐渐变小;当工作辊弯辊力为负时,中间辊正向窜动对带钢四次凸

度的调控能力较弱,工作辊弯辊力对带钢四次凸度的调控起主要作用。



(a) 中间辊横移量为-100 mm; (b) 中间辊横移量为0 mm; (c) 中间辊横移量为100 mm。

图9 不同中间辊弯辊力下工作辊弯辊力对带钢二次凸度的影响规律

Fig. 9 Influence of working roll bending force on quadratic crown of strip in different intermediate roll bending force

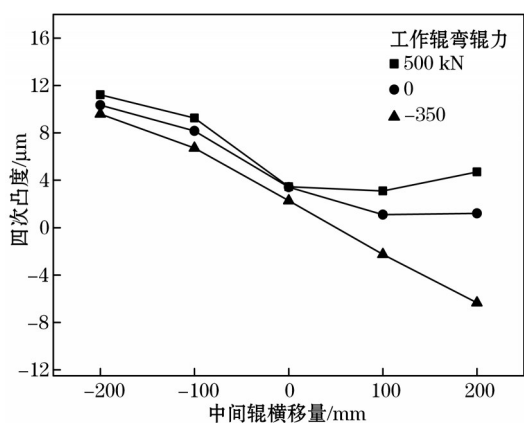


图10 不同工作辊弯辊力下中间辊横移量对带钢四次凸度的影响规律

Fig. 10 Influence of intermediate roll shifting on quartic crown of strip in different working roll bending force

当工作辊弯辊力为0 kN,中间辊弯辊力分别为-450、0、600 kN时,带钢四次凸度随中间辊横移量的变化规律如图11所示。

由图11可知,中间辊弯辊力对带钢四次凸度的调控能力比工作辊弯辊力调控能力弱,且中间辊弯

辊力对带钢四次凸度的调控能力与工作辊弯辊力作用相反。

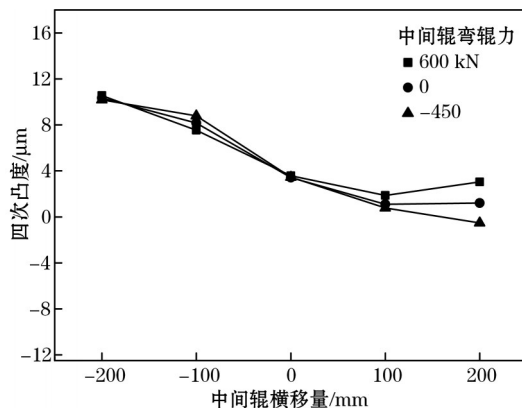
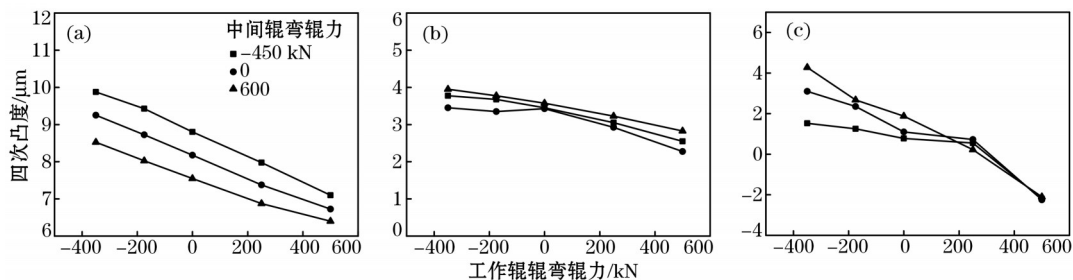


图11 不同中间辊弯辊力下中间辊横移量对带钢四次凸度的影响规律

Fig. 11 Influence of intermediate roll shifting on quartic crown of strip in different intermediate roll bending force

当中间辊弯辊力分别为-450、0、600 kN时,不同中间辊横移量作用下的带钢四次凸度随工作辊弯辊力的变化规律如图12所示。



(a) 中间辊横移量为-100 mm; (b) 中间辊横移量为0 mm; (c) 中间辊横移量为100 mm。

图12 不同中间辊弯辊力下工作辊弯辊力对带钢二次凸度的影响规律

Fig. 12 Influence of working roll bending force on quartic crown of strip in different intermediate roll bending force

由图12可知,带钢的四次凸度随工作辊弯辊力的增加而变小,且中间辊负向窜动对带钢四次凸度

的控制作用明显大于中间辊正向窜动。当中间辊横移量为0 mm时,中间辊弯辊力对带钢四次凸度

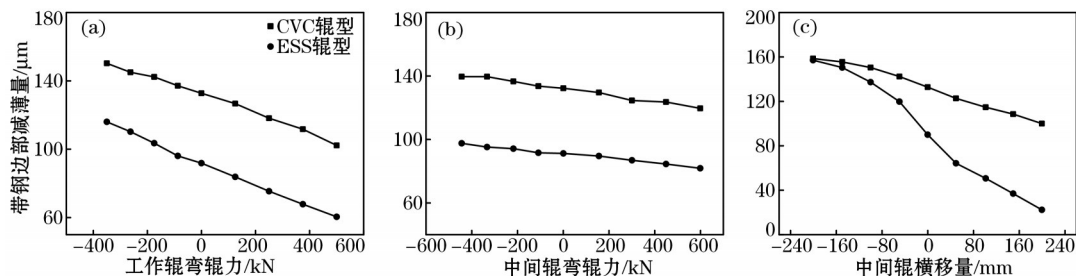
的调节能力最弱;当中间辊横移量为负时,无论工作辊弯辊力的正负,中间辊弯辊力对带钢四次凸度的调控能力基本不变;当中间辊横移量为正时,工作辊弯辊力为正时中间辊对带钢四次凸度的调节能力远远小于工作辊弯辊力为负时的调控能力。

4 带钢边部减薄调控特性分析

带钢的边部减薄是由于轧辊的弹性压扁变形和轧件的边部金属流动所引起的^[15]。ESS中间辊辊型是在常规CVC辊型基础上,通过减小轧辊在辊身边部的有效直径,从而减小了轧辊与带钢之间在边部区域的接触应力,进而对控制带钢边部减薄具有良好的控制作用。采用所建立的有限元仿真模型,

对比分析不同板形调控手段对带钢边部减薄的影响规律,结果如图13所示。

由图13(a)和(b)可知,在相同的弯辊力作用下,采用ESS辊型时的带钢边部减薄量明显小于采用CVC辊型时的带钢边部减薄量,当弯辊力从负值向正值变化过程中,带钢的边部减薄控制效果更加明显,且工作辊弯辊力比中间辊弯辊力对带钢边部减薄的影响程度更大。由图13(c)可知,带钢的边部减薄量随着中间辊横移量的增大而逐渐减小。当中间辊横移量为负值时,ESS辊型与CVC辊型对带钢边部减薄的影响差别不大;而当中间辊横移量为正值时,采用ESS辊型对带钢边部减薄的影响明显大于CVC辊型。



(a) 不同工作辊弯辊力下的边部减薄对比; (b) 不同中间辊弯辊力下的边部减薄对比; (c) 不同横移量下的边部减薄对比。

图13 不同辊型对带钢边部减薄的对比结果

Fig. 13 Contrast results of edge drop of strip with different roll profiles

5 现场应用实践

以某2 230 mm酸轧机组生产滑轨用系列产品为例,选取同批次、同钢种、同规格的两卷热轧原料,带钢钢种为SS330T,宽度为1 250 mm,厚度为1.75 mm。将采用常规CVC曲线和ESS曲线的中间辊分别用于冷连轧机的前两个机架进行对比试验。此外,考虑到带钢轧制过程参数对带钢横向厚

差和板形精度的影响,采用手动模式设定轧制规程保持不变,从而确认不同辊型对带钢横向厚度差的控制效果。带钢的轧制规程二级设定参数见表1。

轧机采用ESS中间辊辊型后,实测带钢横向厚度差为17 μm,平均板形幅值为12 IU,满足客户带钢横向厚度差小于20 μm、板形幅值小于15 IU的要求,取得了良好的控制效果。带钢横向厚度差和板形情况分别如图14和图15所示。

表1 轧制规程预设参数

Table 1 Presetting parameters of rolling schedule

参数	入口	1号机架	2号机架	3号机架	4号机架	5号机架
带钢厚度/mm	6.0	4.498	3.279	2.360	1.766	1.75
压下率/%		23.9	27.1	28.0	25.1	1.3
轧制速度/(m·min ⁻¹)		180	247	343	463	472
轧制力/kN		20 685	19 647	18 937	18 169	10 880
工作辊弯辊力/kN		50	50	50	50	50
中间辊弯辊力/kN		299	300	300	300	300
中间辊横移/mm		60.6	37.7	-14.8	-12.7	-62.9
总张力/kN	165	651	528	412	331	87

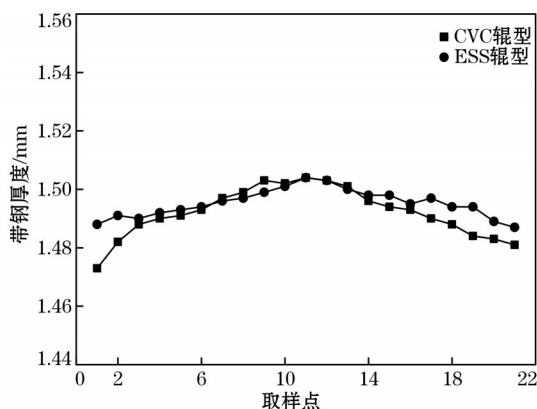


图 14 带钢横向厚度分布情况

Fig. 14 Transverse thickness distribution of strip

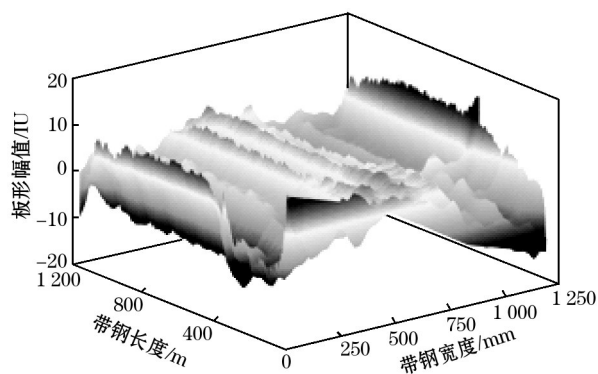


图 15 带钢板形控制情况

Fig. 15 Flatness control performance of strip

6 结论

(1) 具有 ESS 辊型的中间辊轴向横移对带钢的板形控制域有显著影响,随着中间辊轴向横移量的增大,带钢的板形控制域明显增大。

(2) 带钢的二次凸度随中间辊横移量的增大而减小。工作辊弯辊力为负时,当中间辊的横移量较小时,带钢的二次凸度会略微增加。而当中间辊横移量增大到一定程度时,则带钢二次凸度明显减小。中间辊弯辊力对带钢二次凸度的调控能力较弱。

(3) 随着中间辊横移量的增大,带钢的四次凸度变小。带钢的四次凸度随工作辊弯辊力的增加而变小,且中间辊负向移动时对带钢四次凸度的控制作用明显大于中间辊正向移动。中间辊弯辊力对带钢四次凸度的调控能力与工作辊弯辊力作用相反。

(4) 相同弯辊力作用下,采用 ESS 辊型比 CVC 辊型的带钢边部减薄量更小,当弯辊力从负向正的变化过程中,带钢的边部减薄控制效果更加明显,且工作辊弯辊力比中间辊弯辊力对带钢边部减薄的影响程度更大。

(5) 现场生产情况表明,采用中间辊 ESS 辊型的轧机对带钢的板形和横向厚差均有良好的控制作用。

参考文献:

- [1] 彭艳,牛山.板带轧机板形控制性能评价方法综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(6): 26. (PENG Yan, NIU Shan. Review on assessment methods for shape control performance of strip rolling mills[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(6): 26.)
- [2] 任新意,高慧敏,唐伟,等.基于模式识别的超宽带钢初始板形与连退跑偏[J]. 钢铁, 2016, 51(8): 49. (REN Xin-yi, GAO Hui-min, TANG Wei, et al. Ultra wide strip wandering in continuous annealing furnace and initial shape based on pattern recognition[J]. Iron and Steel, 2016, 51(8): 49.)
- [3] 武战军,马晓宝,王东城.冷轧带钢来料断面对张应力与出口断面的影响[J]. 中国冶金, 2017, 27(4): 17. (WU Zhan-jun, MA Xiao-bao, WANG Dong-cheng. Effect of incoming section on cold rolling strip tension stress and delivery section[J]. China Metallurgy, 2017, 27(4): 17.)
- [4] 常安,邸洪双,佟强,等.工作辊横移对带钢边部减薄的影响[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2008, 29(1): 85. (CHANG An, DI Hong-shuang, TONG Qiang, et al. Effect of work roll shift on strip's edge drop[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2008, 29(1): 85.)
- [5] 张岩,高健,吴鲲鹏,等.单锥度辊冷轧机边部减薄控制应用研究[J]. 冶金自动化, 2016, 40(1): 45. (ZHANG Yan, GAO Jian, WU Kun-kui, et al. Application research for edge drop control on cold mill of single taper roll[J]. Metallurgical Industry Automation, 2016, 40(1): 45.)
- [6] 郑虎平.冷轧机双锥度工作辊边降控制研究[J]. 轧钢, 2012, 29(4): 11. (ZHENG Hu-ping. Research on edge drop control by double taper work roll of cold rolling mill[J]. Steel Rolling, 2012, 29(4): 11.)
- [7] 何安瑞,邵健,孙文权,等.冷轧无取向硅钢横向厚差控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 25. (HE An-rui, SHAO Jian, SUN Wen-quan, et al. Transverse thickness deviation control of non-oriented silicon steel during cold rolling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(10): 25.)
- [8] 黄华贵,史英钦,任新意,等.工作辊凸度对超宽六辊 CVC 轧机板形调控性能的影响[J]. 钢铁, 2014, 49(7): 88. (HUANG Hua-gui, SHI Ying-qin, REN Xin-yi, et al. Influence of initial crown of work roll on strip shape adjusting performance of ultra-wide 6-h CVC mill[J]. Iron and Steel, 2014, 49(7): 88.)
- [9] 杨光辉,张杰,曹建国,等.2 180 mm 冷连轧机各机架对成品板形的影响[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(11): 1111. (YANG Guang-hui, ZHANG Jie, CAO Jian-guo, et al. Effect of different stands of 2 180 mm tandem cold rolling mill on shape control of product[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(11): 1111.)

(下转第 95 页)