

UCM 轧机板形调控机构对轧制压力分布影响

王青龙, 孙杰, 王振华, 张殿华
(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以某 1 420 mm 带钢冷连轧机为原型,采用三维弹塑性有限元法对 UCM 轧机冷轧过程进行了模拟,分析了不同板形调控机构对轧制压力分布的影响. 结果表明:在工作辊弯辊作用下,轧制压力在带钢边部的峰值消失且在中部逐渐增加,使马鞍型三维分布变为凸型分布;中间辊弯辊对轧制压力的影响相对较小,基本没有改变其分布形式;中间辊横移消除了轧制压力在带钢边部骤增的趋势,使其在接触变形区的分布更平缓. 三者对轧制压力的影响程度:工作辊弯辊 > 中间辊横移 > 中间辊弯辊,这与其调控功效对比结果一致,表明板形调控机构通过影响轧制压力分布来改变带钢板形的工作机理.

关 键 词: UCM 轧机;弹塑性有限元;工作辊弯辊;中间辊弯辊与横移;轧制压力

中图分类号: TG 335.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)03-0345-06

Effect of Flatness Actuators in UCM Mill on Rolling Pressure Distribution

WANG Qing-long, SUN Jie, WANG Zhen-hua, ZHANG Dian-hua
(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: WANG Qing-long, E-mail: wqlneu@163.com)

Abstract: Based on a 1 420 mm tandem cold rolling mill in a domestic plant, rolling processes in an UCM mill were simulated by 3D elastic-plastic finite element method(FEM). Effects of work roll bending(WRB), intermediate roll bending(IRB) and intermediate roll shifting(IRS) on the rolling pressure were investigated. The results showed that peak values of rolling pressure near the strip edge disappear and the central rolling pressure increases with increasing of WRB, and the saddle-shaped distribution of rolling pressure becomes a convex-shaped distribution. Rolling pressure is hardly affected by IRB, and its distribution form is not changed basically. The sharply increased trend of rolling pressure near the strip edge is eliminated due to IRS, and the steep pressure field becomes smooth. Rankings of effects of the three actuators on rolling pressure are: WRB > IRS > IRB, which is in good agreement with the comparison of actuator efficiencies, and it shows that the working mechanism of controlling strip shape is achieved by affecting the rolling pressure distribution.

Key words: UCM mill; elastic-plastic FEM; work roll bending(WRB); intermediate roll bending(IRB) and intermediate roll shifting(IRS); rolling pressure

随着近些年下游产业对冷轧带钢成品质量要求的提高,冷轧带钢的尺寸精度尤其是板形质量要求越发苛刻. 因此,高精度的板形控制轧机被广泛地应用到冷轧带钢生产线中,其中具有代表性的是三菱-日立公司在 HC 轧机基础上发展而来的 UCM 轧机^[1]. 在带钢轧制过程中,轧制压力在变形区的分布直接影响着有载辊缝的形貌,并最终影响出口带钢的形状^[2]. 为了深入分析轧机板形调控机构的控制能力及工作原理,必须对板形调控机构投入时的轧制压力分布规律进行研究.

有限元算法始于 20 世纪 60 年代,随着计算机技术及有限元软件的发展,被广泛应用到金属

板带材、型线材、管材轧制过程的解析,在精确计算轧制参数、提高轧制模型精度、优化轧制过程等方面发挥了重要的作用^[3-5].此外,由于显式动力有限元克服了隐式静力有限元求解收敛困难、计算时间长等缺点,能有效地处理大变形和大规模接触问题,因此更适合分析包含轧件大变形过程的轧制领域^[6-7].近年来,国内外学者采用有限元法对板带轧制过程的解析做了广泛的研究工作,其研究成果有力地促进了带钢凸度和板形控制技术的发展^[8-11].Moazeni 等^[12]通过带钢轧制过程的三维有限元模型分析了带钢横向不均匀变形导致的板形问题. Tran 等^[13]采用有限元模拟方法验证了其提出的实验方法分析带钢残余应力与边浪等缺陷之间的关系. Linghu 等^[14]采用弹塑性有限元法建立 CVC 轧机的仿真模型,研究了不同板形调控机构对带钢凸度、边降等的影响.

本文以国内某 1 420 mm 带钢冷连轧生产线的六辊 UCM 轧机为原型,基于弹塑性有限元法建立了带钢轧制过程的三维仿真模型,耦合分析了带钢的弹塑性变形和轧辊的弹性变形,并采用轧制实验验证了模型的精度. 根据模拟结果分析了工作辊弯辊、中间辊弯辊与横移对轧制压力在稳定变形区分布的影响规律.

1 三维有限元模型建立

1.1 模拟轧制的工艺参数设定

六辊 UCM 轧机配备的板形调控技术主要有:工作辊弯辊(WRB)、中间辊弯辊(IRB)、中间辊横向移动(IRS)、轧辊倾斜(RT)和轧辊分段冷却(RSC). 轧机实际尺寸参数如表 1 所示,主要的板形调控机构如图 1 所示.

表 1 轧机的尺寸参数						
Table 1 Dimensional parameters of the mill						
项目	工作辊		中间辊		支撑辊	
	辊身	辊颈	辊身	辊颈	辊身	辊颈
长度/mm	1 420	248	1 410	288	1 420	780
直径/mm	425	240	490	280	1 300	780

带钢的初始厚度为 3.6 mm,宽度为 1 000 mm. 轧制过程工艺参数为:压下率 30%,轧制速度 140 m/min,前张力 90 MPa,后张力 50 MPa,摩擦系数 0.06. 研究内容为轧机不同板形调控机构对轧制压力分布的影响,因此各调控机构的调节量从零到最大值等分设定为五组,如表 2 所示.

1.2 材料模型、单元类型选择与网格划分

实际轧制实验用带钢为 SPCC 钢,轧辊材料

为镀铬合金锻钢. 带钢在轧制中发生弹塑性变形,因此模型中将其设置为弹塑性体,采用双线性各向同性硬化材料,弹性模量为 207 GPa,泊松比为 0.362,屈服应力为 255 MPa,正切模量为 700 MPa;轧辊发生弹性压扁和挠曲变形,因此辊身和辊颈均设置为弹性体,采用线弹性各向同性材料,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3;工作辊驱动转轴、中间辊和支撑辊辊颈处的限位体不参与轧制变形过程,因此设置为刚性体,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3.

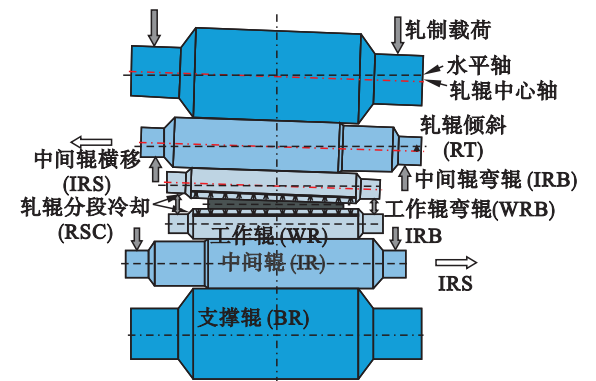


图 1 UCM 轧机板形调控机构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of flatness actuators for UCM mill

表 2 板形调控机构设定值						
Table 2 Set values of flatness actuators						
板形调控机构	设定值					
中间辊横移/mm	0	47.50	100.00	152.50	205.00	
工作辊弯辊/kN	0	112.70	225.40	338.10	450.80	
中间辊弯辊/kN	0	134.75	269.50	404.25	539.00	

模型均采用等参六面体单元 SOLID164. 轧辊、驱动转轴和限位体的单元均设置为减缩积分模式并采用黏性沙漏控制来提高计算效率和增强模型鲁棒性. 带钢在轧制过程中发生大规模不可逆塑性变形,其单元设置为全积分模式. 为提高计算效率并保证计算精度,模型采用局部网格细化,带钢与轧辊接触面、轧辊间接触面网格细化以防止接触初始穿透问题发生.

整个三维有限元模型由 2 884 572 个单元和 3 132 084 个节点构成,如图 2 所示,在显式动态求解器 LS-DYNA 中求解. 模拟计算平台的硬件和软件配置如下:CPU 型号为 Intel(R) Xeon(R) E5-2643 v3 @ 3.4 GHz, RAM 为 64 GB,操作系统为 Windows Server 2008 R2 standard. 此外,采用并行计算技术,模拟一次带钢轧制过程大约耗费 36 h.

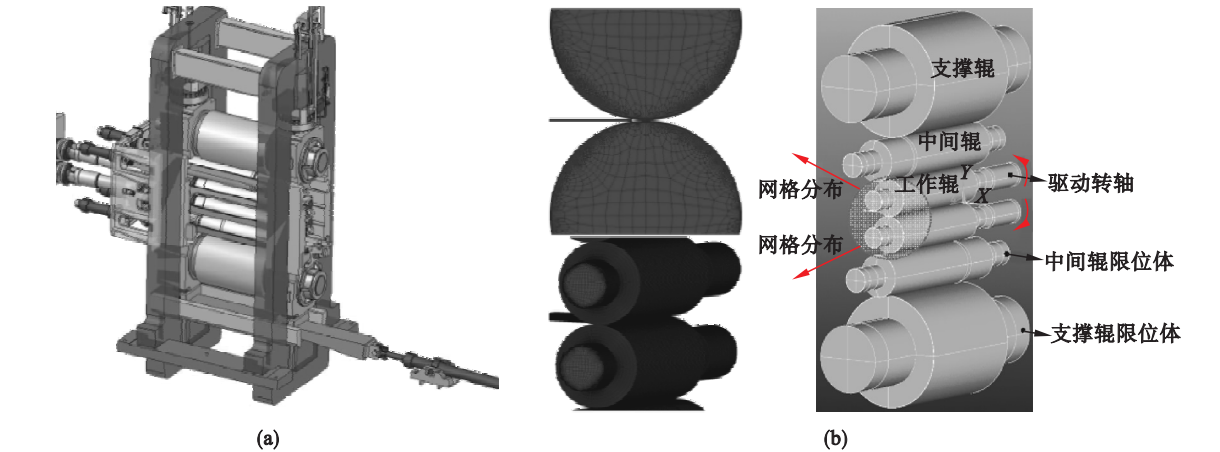


图 2 UCM 轧机的实际配置和三维有限元模型
Fig. 2 Subsidiary facilities and 3D FE-model of the UCM mill
(a)—生产现场轧机配置图；(b)—轧机的三维有限元模型。

2 结果与讨论

2.1 模型精度的轧制实验验证

验证实验所用的带钢原始厚度为 3.00 mm，宽度为 1 210 mm，钢种同样是 SPCC 钢。轧制工艺参数从二级过程控制计算机中获取，如表 3 所示。带钢经过轧制后，轧机停机然后分别截取一机架和二机架出入口处带钢试样，测量其平均厚度，以减少因偶然因素导致的误差。实际带钢的测量部位和模型中带钢的测量部位如图 3 所示。

表 3 验证实验的轧制工艺参数

Table 3 Rolling process parameters of validated experiments

道次	压下率 %	前张力 MPa	后张力 MPa	WRB kN	IRB kN	IRS mm
1	35.82	142.89	56.04	150.00	92.50	20.00
2	39.54	141.27	136.52	166.45	69.07	20.00

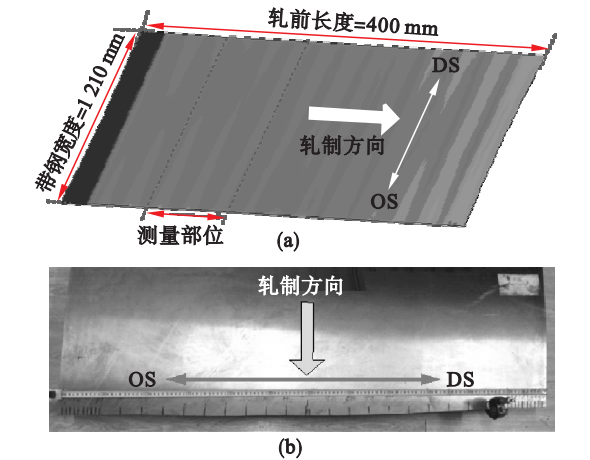


图 3 验证实验带钢测量部位示意图
Fig. 3 Measured locations of the strip sample
(a)—模型中带钢试样的测量部位；
(b)—带钢试样测量部位。

模型中入口带钢的横向厚度是根据实测值输入。图 4 为出口带钢的横向厚度分布有限元值与实际测量值的对比，轧后带钢实测横向厚度分布曲线与模拟计算的厚度分布曲线趋势一致，基本吻合。图 4a 中两者绝对误差不超过 19 μm ，相对误差不超过 1%；图 4b 中二者的绝对误差小于 11 μm ，相对误差小于 1%。同时，从图 4 可知，随着带钢厚度减小，有限元计算的厚度误差波动增大。因此，从上述带钢横向厚度的实测值与有限元值对比结果可知，基于该 UCM 轧机三维有限元模型分析带钢轧制过程是可信的，但出口带钢厚度必须大于 1 mm 才能保证模型的精度。

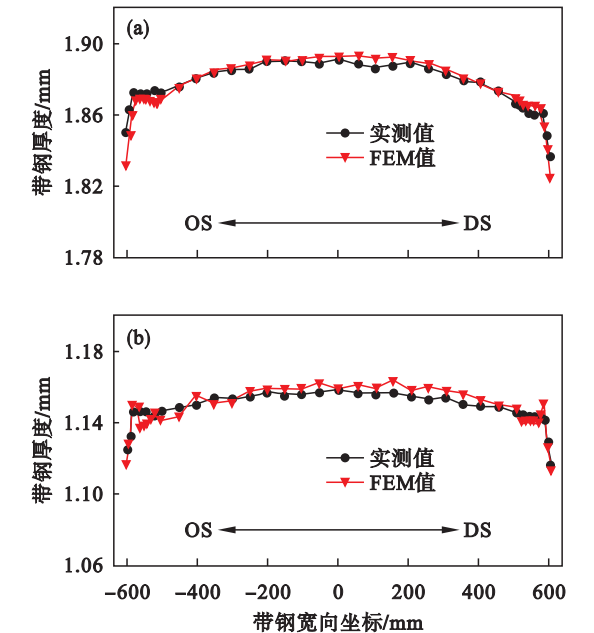


图 4 带钢横向厚度实测值与 FEM 值对比
Fig. 4 Comparisons of the thickness profile between measured value and FEM value
(a)—一道次出口带钢；(b)—二道次出口带钢。

2.2 板形调控机构对轧制压力分布的影响

投入不同工作辊弯辊力时,轧制压力在工作辊与带钢接触变形区的三维分布如图 5 所示. 由图 5a 可见,无弯辊力作用时轧制压力分布的一般形式:在轧机入口位置带钢的边部先是出现很小的轧制压力,随即中部跟着出现;进入后滑区之后,轧制压力在带钢中部增加速率明显小于带钢边部附近的增加速率,但带钢最外端却形成一个边部轧制压力骤降区;在中性面附近轧制压力达到最大,此时其沿带钢宽向由中部向边部缓慢增加并且在边部附近骤增形成犄角型峰值区;越过中性面进入前滑区,轧制压力迅速下降且在带钢中部率先消失,随即边部减小到零. 另一方面,在整个接触变形区范围内边部轧制压力骤降区一直存在,使得轧制压力关于带钢中心线呈马鞍型对称分布. 由图 5b~图 5e 可知,随着工作辊弯辊力逐渐增加,轧制压力在带钢中部变大而在边部变小,沿带钢宽向由中部向边部变大的趋势逐渐变为减小的趋势,带钢外端的犄角型峰值区逐渐减小直至完全消失,马鞍型分布变为凸型分布. 但弯辊力对边部轧制压力骤降区的影响相对较小.

进一步研究轧制压力发生的上述变化,沿带钢宽向和轧制方向分别截取中性面和边部峰值处

的轧制压力得到其沿宽向和接触弧方向的分布如图 6 和图 7 所示. 根据图 6 中轧制压力分布的变化趋势将其分为中部区、边部区和边部骤降区,由图可明显观察到,工作辊弯辊力未投入时边部区轧制压力由中间向端部骤增并出现峰值随即迅速下降. 随着弯辊力增加,轧制压力在边部区由中间向两边骤增趋势变为减小趋势且峰值随之消失,在中部区略微增大,而在边部骤降区稍有减小但其分布趋势基本未变. 由图 7 可知在轧机入口处轧制压力首先在弹性变形区呈线性增加,进入塑性变形区后缓慢增长,随着带钢向出口方向移动,轧制压力在中性点位置达到最大,然后迅速减小至轧机出口完全消失. 从图 7 可知随着工作辊弯辊力的增大,轧制压力在整个接触弧上逐渐减小,但其分布形式没有发生改变.

同样,当中间辊弯辊力投入时,根据轧制压力三维分布,得到不同中间辊弯辊力作用下轧制压力沿宽向与接触弧方向的分布如图 8 和图 9 所示. 同工作辊弯辊对轧制压力的影响相比,中间辊弯辊力对其影响很小,由图可以观察到随中间辊弯辊力增大,轧制压力在两个方向上的分布只是发生了轻微的变化,沿宽度方向分布的趋势基本没有发生改变,且峰值只稍微减小并未消失.

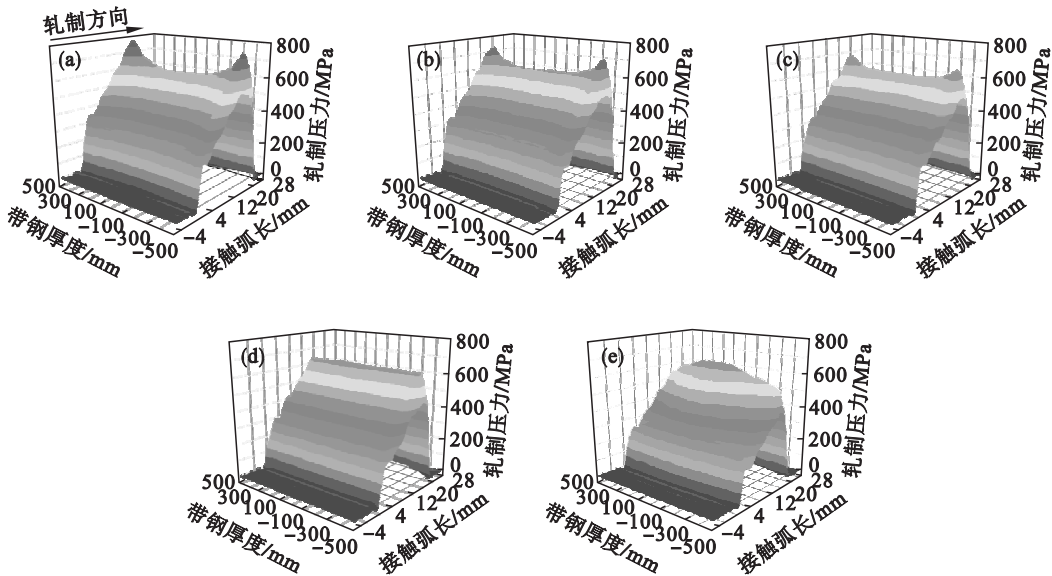


图 5 工作辊弯辊对轧制压力三维分布的影响
Fig. 5 Effect of WRB on the 3D distribution of rolling pressure

(a)—WRB = 0; (b)—WRB = 112. 70 kN; (c)—WRB = 225. 40 kN; (d)—WRB = 338. 10 kN; (e)—WRB = 450. 8 kN.

当中间辊横移值不同时轧制压力沿宽向和接触弧方向的分布如图 10 和图 11 所示,从图可知,随着中间辊横移量的增大,沿宽度方向轧制压力在边部区骤增的趋势逐渐减缓且峰值减小,沿接

触弧方向轧制压力也有相应减小,但其分布的趋势基本没有改变. 从以上讨论可以得到工作辊弯辊、中间辊弯辊和横移对轧制压力的影响程度对比:工作辊弯辊 > 中间辊横移 > 中间辊弯辊,这与

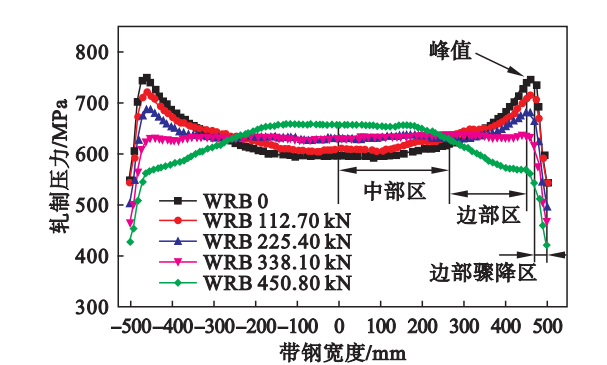


图6 工作辊弯辊对轧制压力沿带钢宽向分布的影响
Fig. 6 Effect of WRB on rolling pressure across strip width

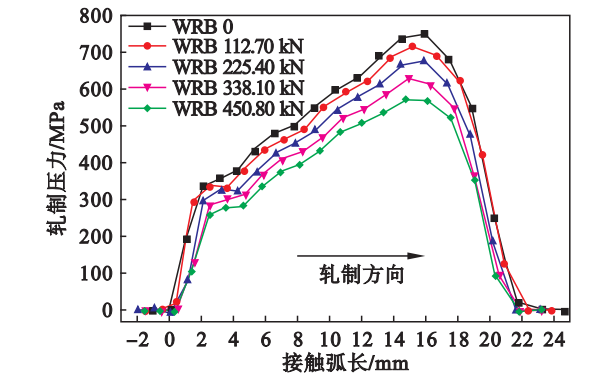


图7 工作辊弯辊对轧制压力沿接触弧分布的影响
Fig. 7 Effect of WRB on rolling pressure along contact arc

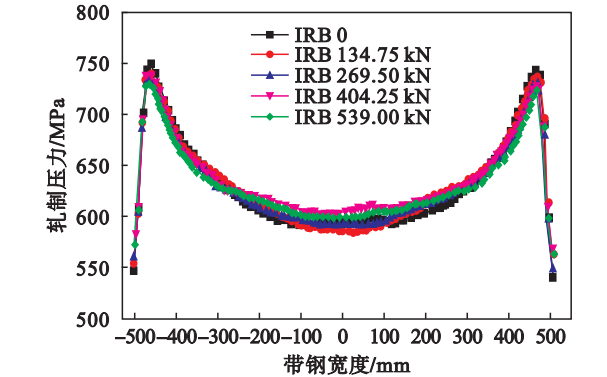


图8 中间辊弯辊对轧制压力沿带钢宽向分布的影响
Fig. 8 Effect of IRB on rolling pressure across strip width

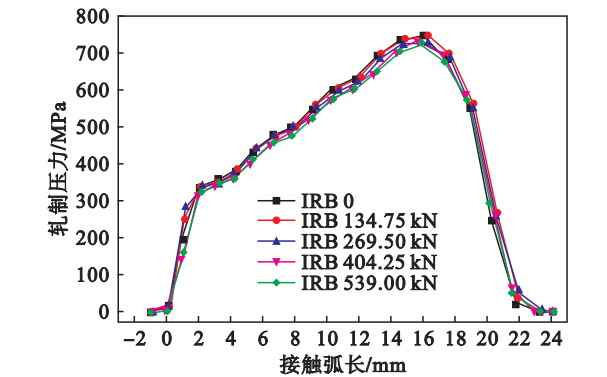


图9 中间辊弯辊对轧制压力沿接触弧分布的影响
Fig. 9 Effect of IRB on rolling pressure along contact arc

文献[15]中三者的板形调控功效对比结果相符,如图12所示.因此,工作辊弯辊与中间辊弯辊和横移对轧制压力分布的影响导致带钢在辊缝中的变形发生变化,进而使出口带钢的板凸度和板形得到调节,其影响程度的大小最终决定了它们的板形调控功效.

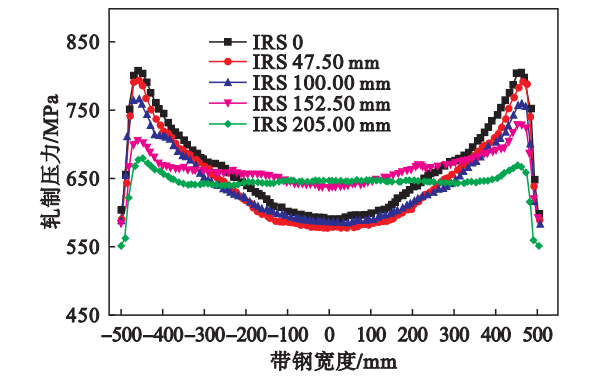


图10 中间辊横移对轧制压力沿带钢宽向分布的影响
Fig. 10 Effect of IRS on rolling pressure across strip width

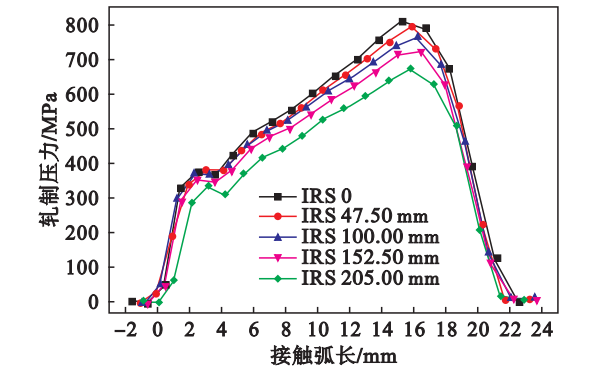


图11 中间辊横移对轧制压力沿接触弧分布的影响
Fig. 11 Effect of IRS on rolling pressure along contact arc

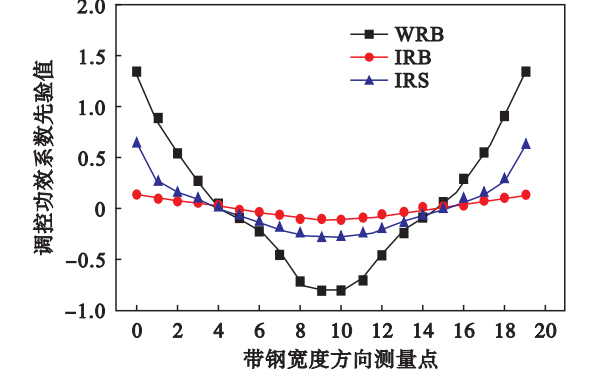


图12 调控功效系数的先验值曲线
Fig. 12 Curves of apriori efficiencies of actuators

3 结 论

1) 基于某1 420 mm 带钢冷连轧机,采用弹性有限元建立了六辊 UCM 轧机轧制带钢过程

的三维数值仿真模型,耦合分析了带钢的弹塑性变形和轧辊的弹性变形,模拟了不同板形调控机构投入时宽带钢轧制的过程。

2) 根据实际轧制工艺参数,设置了验证模型精度的轧制实验。两道次出口带钢横向厚度分布有限元值与实测值的相对误差小于 1.0%,验证结果表明采用该有限元模型分析带钢的轧制过程是可信的,计算误差在允许范围之内。

3) 分析结果表明工作辊弯辊改变了轧制压力的三维分布形式,随工作辊弯辊力增大,带钢边部轧制压力峰值迅速下降,中部轧制压力缓慢上升,轧制压力马鞍型分布逐渐变为凸型分布;中间辊弯辊对轧制压力的影响相对较小,当弯辊力达到最大时还可明显观察到在带钢边部的犄角型压力峰值;中间辊横移对轧制压力的影响程度处在三者之间,随中间辊横移值增大,轧制压力在带钢边部骤增的现象逐渐消失。工作辊弯辊与中间辊弯辊和横移对轧制压力的影响程度与它们的板形调控功效相对应,表明其通过影响轧制压力分布来改变带钢在辊缝中变形最终达到调控出口带钢板形的目的。

参考文献:

- [1] Kajiwa T, Nishi H, Yoshimura Y, et al. 6-high type rolling mill for cold rolling [C]// 60 Excellent Inventions in Metal Forming. Berlin: Springer, 2015: 239 – 244.
- [2] Sun J, Liu Y M, Hu Y K, et al. Application of hyperbolic sine velocity field for the analysis of tandem cold rolling [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 108/109: 166 – 173.
- [3] Kobayashi S, Oh S I, Altan T. Metal forming and the finite-element method [M]. New York: Oxford University Press, 1989: 3 – 7.
- [4] Ataka M. Rolling technology and theory for the last 100 years: the contribution of theory to innovation in strip rolling technology [J]. *ISIJ International*, 2015, 55(1): 89 – 102.
- [5] 刘相华. 塑性有限元在金属轧制过程中应用的进展 [J]. *金属学报*, 2010, 46(9): 1025 – 1033.
(Liu Xiang-hua. Progress and application of plastic finite element method in metals rolling process [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(9): 1025 – 1033.)
- [6] 刘立忠, 张旻翔, 刘相华, 等. 隐式静力和显式动力有限元在轧制过程模拟中的应用 [J]. *塑性工程学报*, 2001, 8(4): 81 – 83.
(Liu Li-zhong, Zhang Min-yi, Liu Xiang-hua, et al. Application of implicit static and explicit dynamic FEM in the simulation of rolling process [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2001, 8(4): 81 – 83.)
- [7] 谢红飙, 肖宏, 张国民, 等. 用显式动力学有限元法分析压下率对板带轧制压力分布的影响 [J]. *钢铁研究学报*, 2002, 14(6): 33 – 35.
(Xie Hong-biao, Xiao Hong, Zhang Guo-min, et al. Analysis on rolling pressure distribution of strip with different reductions by explicit dynamic FEM [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2002, 14(6): 33 – 35.)
- [8] Montmitonnet P. Hot and cold strip rolling processes [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, 195(48/49): 6604 – 6625.
- [9] Malik A S, Grandhi R V. A computational method to predict strip profile in rolling mills [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 206(1/2/3): 263 – 274.
- [10] Abdelkhalek S, Montmitonnet P, Potier-Ferry M, et al. Strip flatness modelling including buckling phenomena during thin strip cold rolling [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2010, 37(4): 290 – 297.
- [11] Abdelkhalek S, Montmitonnet P, Legrand N, et al. Coupled approach for flatness prediction in cold rolling of thin strip [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2011, 53(9): 661 – 675.
- [12] Moazeni B, Salimi M. Investigations on formation of shape defects in square rolling of uniform thin flat sheet product [J]. *ISIJ International*, 2013, 53(2): 257 – 264.
- [13] Tran D C, Tardif N, Limam A. Experimental and numerical modeling of flatness defects in strip cold rolling [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015, 69: 343 – 349.
- [14] Linghu K Z, Jiang Z Y, Zhao J W, et al. 3D FEM analysis of strip shape during multi-pass rolling in a 6-high CVC cold rolling mill [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74(9/10/11/12): 1733 – 1745.
- [15] Wang P F, Qiao D M, Zhang D H, et al. Optimal multi-variable flatness control for a cold rolling mill based on a box-constraint optimisation algorithm [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2016, 43(6): 426 – 433.