

· XXXX ·



冷轧工艺参数对 SUS301L 不锈钢板厚度偏差的影响

王长波¹, 李玉峰¹, 李具仓¹, 张亚成², 邱国兴², 邢相栋²

(1 甘肃酒钢集团宏兴钢铁股份有限公司钢铁研究院, 嘉峪关 735100;

2 西安建筑科技大学冶金工程学院, 西安 710055)

摘要:为研究冷轧工艺参数对 SUS301L 不锈钢板厚度偏差的影响, 基于 ABAQUS 有限元软件建立了二十辊冷轧机 1/4 对称模型, 采用控制变量法分析了前张力、后张力和轧制速度对钢板厚度均匀性的影响。厚度波动采用厚度偏差的标准差进行量化。结果表明, 当前张力从 130 MPa 增至 160 MPa 时, 标准差由 6.46×10^{-3} 降至 6.19×10^{-3} ; 继续增加至 190 MPa 时, 标准差升至 7.22×10^{-3} 。后张力为 85 MPa 时, 标准差最小, 为 5.75×10^{-3} ; 超过 115 MPa 时, 板形恶化。轧制速度在 6~7 m/s 范围内厚度最为均匀。6 m/s 时, 标准差为 5.75×10^{-3} ; 轧制速度增至 8 m/s 时, 标准差升至 8.06×10^{-3} 。冷轧最优工艺参数为: 前张力 160 MPa、后张力 85 MPa、轧制速度 6~7 m/s; 该工艺参数组合下钢板厚度分布最均匀, 浪纹等板形缺陷风险最低。

关键词: SUS301L 不锈钢; 冷轧; 厚度偏差; 有限元模拟; 工艺参数优化

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N260056 **中图分类号:** TG335. 5

Effect of Cold Rolling Process Parameters on the Thickness Deviation of SUS301L Stainless Steel Plate

Wang Changbo¹, Li Yufeng¹, Li Jucang¹, Zhang Yacheng², Qiu Guoxing², Xing Xiangdong²

(1 Iron and Steel Research Institute, Jiuquan Iron and Steel Group Co., Ltd., Jiayuguan 735100, China;

2 School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 71005, China)

Abstract : To investigate the effect of cold rolling process parameters on the thickness deviation of SUS301L stainless steel plate, a quarter-symmetry model of a 20-high cold rolling mill was established using ABAQUS finite element software. The control variable method was employed to analyze the effects of front tension, back tension, and rolling speed on the thickness uniformity of the steel plate. The standard deviation of the thickness deviation was used to quantify the thickness fluctuation. The results show that as the front tension increases from 130 MPa to 160 MPa, the standard deviation decreases from 6.46×10^{-3} to 6.19×10^{-3} ; when the front tension is further raised to 190 MPa, the standard deviation increases to 7.22×10^{-3} . A minimum standard deviation of 5.75×10^{-3} is obtained at a back tension of 85 MPa, and the flatness deteriorates when the back tension exceeds 115 MPa. The thickness distribution is most uniform when the rolling speed is in the range of 6~7 m/s, with a standard deviation of 5.75×10^{-3} at 6 m/s. When the speed increases to 8 m/s, the standard deviation rises to 8.06×10^{-3} . Comprehensive analysis indicates that the optimal combination of process parameters for achieving the most uniform thickness distribution of the SUS301L stainless steel plate is a front tension of 160 MPa, a back tension of 85 MPa, and a rolling speed of 6~7 m/s. This study provides a theoretical basis for improving thickness uniformity and reducing waviness and other shape defects in actual production.

Key Words : SUS301L Stainless Steel; Cold Rolling; Thickness Deviation; Finite Element Modeling; Process Parameter Optimization

SUS301L 不锈钢作为典型的亚稳态奥氏体不锈钢, 其凭借高强度、良好成形性及优异的焊接性能, 成为轨道交通车体、航空构件等高端装备的关键结构材料。在实际生产中, 该钢种通常需经过多道次冷轧变形以获得不同强度和规格的板材^[1-2]。然而, 冷轧过程中带钢沿长度方向的厚度偏差会直接影

响成品板形质量与后续加工性能。厚度偏差过大会导致钢板边部减薄、中心凸度超标, 进而引发板形缺陷^[3]。冷轧过程中, 工艺参数的合理设定是控制板形质量的关键。前张力、后张力及轧制速度作为二十辊冷轧机最主要的调控参数, 其变化直接影响变形区的应力状态、金属流动规律及辊缝形状^[4]。

基金项目: 嘉峪关市科技局技术攻关类“揭榜挂帅”项目资助(24-02)

作者简介: 王长波(1986—), 男, 学士, 工程师;

E-mail : Wangchangbo@jiugang.com;

收稿日期: 2026-04-15

通信作者: 邱国兴(1985—), 男, 博士, 副教授;

E-mail : guoxingqiu2008@126.com

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

系统研究上述参数对 SUS301L 不锈钢冷轧板厚度偏差的影响规律,对于优化轧制工艺、提高产品板形质量具有重要意义。

随着计算机仿真技术的快速发展,有限元方法已成为提升试验效率、降低试验成本与材料消耗的重要手段^[5-7]。在不锈钢冷轧板形控制方面,已有学者开展了大量数值模拟研究。姜晓艳等^[8]基于有限元法,以四辊轧机为例,分析了 304 不锈钢冷轧过程中弯辊力对压下量、应力及应变分布的影响,发现大正弯支撑辊弯辊力有助于使轧件边部与中部应力趋于均匀,从而改善板形。董丽丽等^[9]利用 ANSYS/LS-DYNA 模拟了 2 mm 厚 304 不锈钢薄带在四辊冷轧过程中张力对板形的作用,结果表明前张力增加可提高带钢平直度,后张力的改善效果更为显著。赵娜娜等^[10]采用同一软件对 4 mm 厚 304 不锈钢带四辊冷轧过程进行模拟,得到最优前张力为 30 MPa、后张力为 17 MPa;增大前后张力均能减小边部减薄量,而摩擦系数增大会加剧边部减薄。刘楠等^[11]通过有限元分析,从平直度与板凸度两个维度,研究了弯辊力、前/后张力及其组合、摩擦系数、轧辊直径等参数对 SK85 板材六辊冷轧过程的影响,并提出了相应轧制工艺窗口。李博、冯莹莹,等^[12-13]借助 ABAQUS 软件探讨了二辊平整轧制参数对带

钢残余应力场的影响,指出轧辊与带钢间接接触摩擦润滑条件对厚度方向纵向残余应力的分布与数值有显著影响,而压下率与工作辊辊径仅影响其数值大小;当前后张力相等时,张力绝对值影响可忽略,但不等时差值影响显著,不可忽略。钢板冷轧过程中张力是影响板形质量的关键因素。上述研究多集中于四辊、六辊轧机,目前针对二十辊轧机冷轧研究仍较为有限。

本研究基于 ABAQUS 有限元软件构建二十辊冷轧机模型,以厚度偏差的标准差为评价指标,探究前张力、后张力及轧制速度对 SUS301L 不锈钢板厚度分布均匀性的影响,以期为实际生产提供理论依据。

1 冷轧过程有限元模型建立

1.1 几何模型建立

利用 Abaqus 软件对 SUS301L 不锈钢板及二十辊轧机辊系进行建模^[14]。由于轧机整体为弹性辊系模型,各个轧辊均会发生变形,因此无法将其简化,需建立完整辊系。但为了进一步减少计算时间,考虑到二十辊轧机有高度的对称性,因此将模型简化为原完整轧机的 1/4。本文所研究的 SUS301L 不锈钢板、二十辊冷轧机的尺寸及模型参数见表 1。

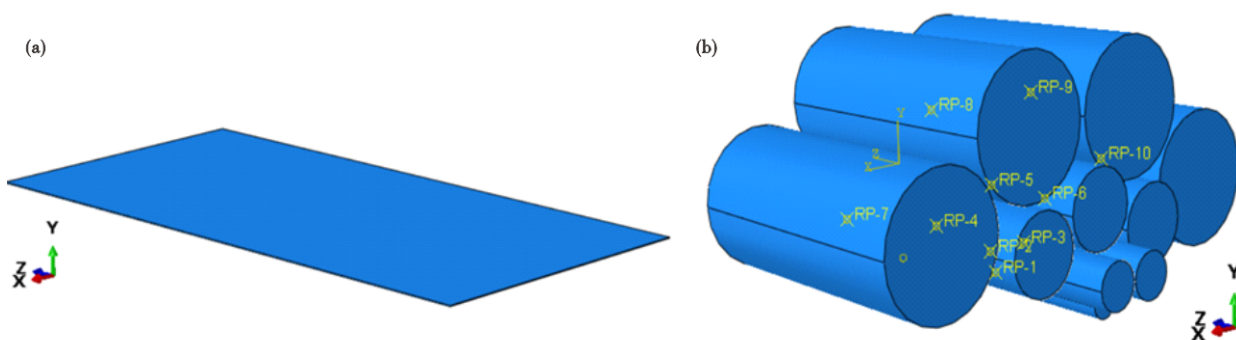


图1 冷轧过程有限元模型:(a)SUS301L不锈钢板,(b)二十辊冷轧机辊系 1/4 模型

Fig. 1 Finite element model of cold rolling process : (a) SUS301L stainless steel plate, (b) quarter-symmetry model of a 20-high cold rolling mill

表1 轧机与 SUS301L 不锈钢板模型参数

Table 1 Model parameters of rolling mill and SUS301L stainless steel plate

名称	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	直径/mm	弹性模量/GPa	泊松比
SUS301L 钢板	300	1 250	3	—	200	0.3
工作辊	1 404	—	—	63.5	220	0.3
第一中间辊	1 580	—	—	102	220	0.3
第二中间辊	1 444	—	—	173	220	0.3
支撑辊	1 280	—	—	300	236	0.3

利用 Abaqus 自带的建模模块 part 进行建模, SUS301L 不锈钢板和二十辊冷轧机辊系模型如图 1 所示。

1.2 材料属性定义

为了降低有限元模拟的计算量,同时准确反映 SUS301L 不锈钢的冷轧过程并获取最佳轧制效果,在有限元模型构建过程中,必须对轧制几何模型、材料属性定义、网格划分及边界条件设定等核心步骤进行合理的分析与处理。

在 ABAQUS 软件中定义材料弹塑性参数时,应采用材料的真实应力-应变曲线^[15]。为了确保数值计算结果的准确性,应保持应力单位与几何建模所用单位一致,并在整个模拟过程中采用国际单位制,以避免单位混乱。SUS301L 不锈钢的真实应力-应变曲线如图 2 所示,轧辊的材料属性见表 1。在获取材料真实应力-应变曲线后,可在 Property 界面中定义材料的密度、弹性模量、泊松比及塑性参数,并通过界面将这些属性分配给各个部件。

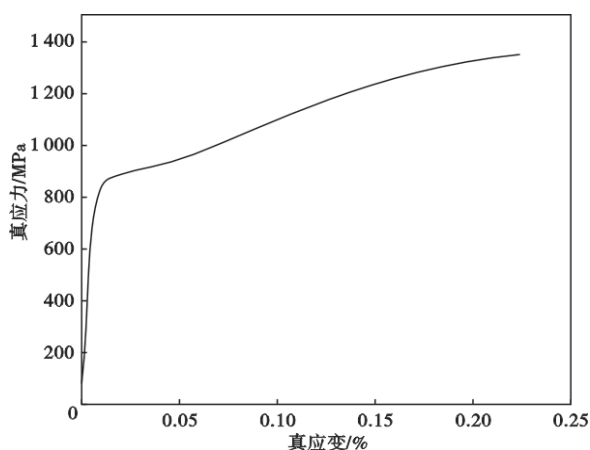


图2 SUS301L 不锈钢真应力-应变曲线

Fig. 2 True stress-strain curve of SUS301L stainless steel

1.3 几何模型装配

首先通过旋转和平移将钢板与轧辊相切。随后,在轧辊轴线中心位置创建参考点,并将该点的坐标设置为(0, 0, 0)。根据冷轧压下率,确定轧辊需要平移的距离,即参考点的新坐标。由于冷轧机模型为沿钢板厚度和宽度方向建立的 1/4 模型,因此,上下辊的压下率为整体压下率的一半。最后,平移钢板以使其与轧辊产生适当的咬入,从而设置了合适的压下率。作为 1/4 模型,需要对二十辊冷轧机模型在 Y 轴方向施加对称约束,还需沿钢板厚度方向施加对称约束^[16]。图 3 为 SUS301L 不锈钢板

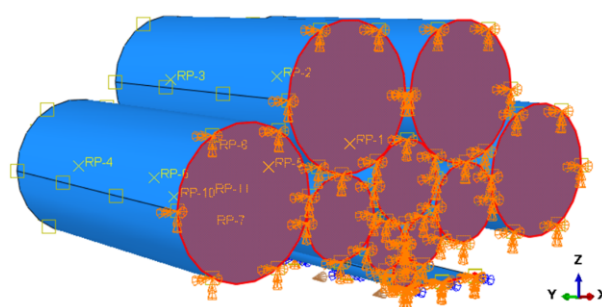


图3 冷轧机装配模型

Fig. 3 Cold rolling mill assembly model

冷轧过程的装配图。

1.4 冷轧过程中张力施加

在 Load 模块打开载荷管理器,为钢板施加前张力和后张力,X 轴负方向为前张力方向,X 轴正方向为后张力方向;接着打开预定义场管理器,为钢板施加合适的初始速度。轧制开始后,钢板以给定的初始速度沿 X 轴负方向移动,直到被辊缝咬入。此时,撤销初始速度,钢板在前张力和后张力的作用下轧制,直至轧完离开辊缝^[17]。前张力、后张力的施加以及钢板初始速度的设定如图 4 所示。

1.5 模型网格划分

针对 SUS301L 不锈钢冷轧过程的复杂变形与接触问题,采用差异化网格策略^[18]。钢板使用八节点六面体减缩积分单元,厚度方向划分为 4 层,轧向和宽度方向网格根据变形梯度进行过渡,边部与咬入端局部细化,以提高板形指标提取精度。二十辊冷轧机辊系采用 C3D8R 单元,接触区网格细化,远离接触区适当增大网格尺寸,以保证精度与计算效率的平衡。图 5 为二十辊冷轧机和钢板划分网格后装配模型图。

2 模拟结果提取和分析

2.1 任务提交及后处理

完成几何建模、材料定义、装配、分析步与相互作用设置、载荷与边界条件施加及网格划分后,在 JOB 模块中创建计算任务并提交任务^[19]。计算过程通过监控器跟踪进度,计算完成后,在 Visualization 模块中沿钢板长度方向提取钢板在不同张力下厚度偏差的分布数据,建立路径如图 6 所示。数据导出后进行计算及绘图,为后续工艺优化提供数据支持。

2.2 厚度偏差分布评价指标

厚度偏差反映的是钢板沿厚度方向的位移变

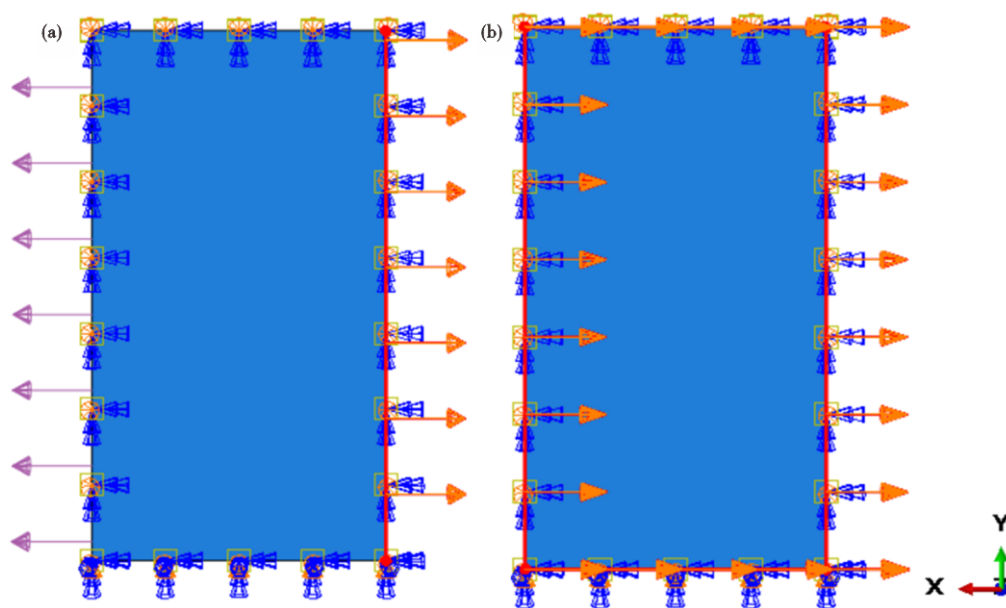


图4 钢板载荷施加:(a)施加前后张力,(b)设定钢板初始速度

Fig. 4 Loading of steel plate: (a) application of front and back tensions, (b) setting of the initial speed of the steel plate

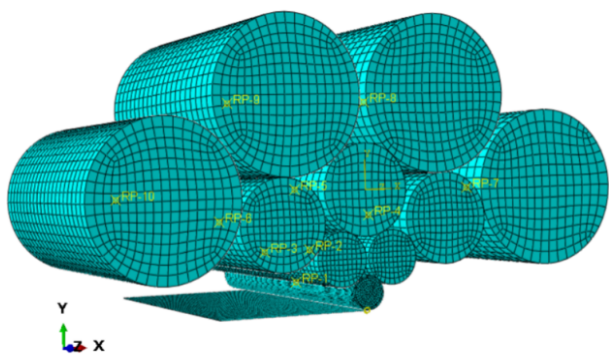


图5 二十辊轧机与SUS301L钢板装配模型

Fig. 5 Assembly model of 20-high mill and SUS301L steel plate

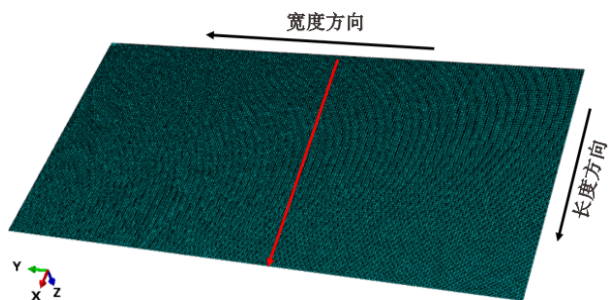


图6 钢板厚度偏差的提取路径

Fig. 6 Extraction path of steel plate thickness deviation

化。本文通过标准差量化其分布均匀性。如式(1),标准差 s 作为表征数据离散程度的经典统计量,其数值大小直接反映了观测值相对于其平均值的平均偏离幅度,可对不锈钢冷轧厚度偏差的分布

均匀性实现直接有效的度量。

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / (N - 1)} \quad (1)$$

式中, s 为样本标准差,表征钢板厚度偏差的波动量值; N 为样本容量,即沿钢板长度方向提取的数据点总数; x_i 表示第 i 个数据点的观测值,具体指钢板上第 i 个节点的厚度。 $\bar{x}$ 为所有数据点算术平均值,其具体计算如式(2)。

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i / N \quad (2)$$

2.3 前张力对厚度偏差的影响

本研究所选前张力、后张力及轧制速度范围,均依据钢厂二十辊冷轧机实际生产SUS301L不锈钢板的工艺统计数据确定:生产常规区间为前张力140~180 MPa、后张力80~120 MPa、轧制速度5~7 m/s。为系统揭示各参数对厚度偏差的影响规律,本文对参数范围进行适当调整,前张力扩展至130~190 MPa,后张力扩展至70~130 MPa,轧制速度扩展至4~8 m/s。

研究前张力对SUS301L不锈钢冷轧板形的影响时,应保持其他轧制参数不变。根据企业生产实际及经验,设定模拟道次的压下率为7.8%,后张力设定为100 MPa,轧制速度为6 m/s,摩擦系数为0.08。图7为其他冷轧参数不变,前张力在130~190 MPa,沿钢板长度方向提取的钢板厚度偏差分布情况。由图7可以看出,随着前张力的增

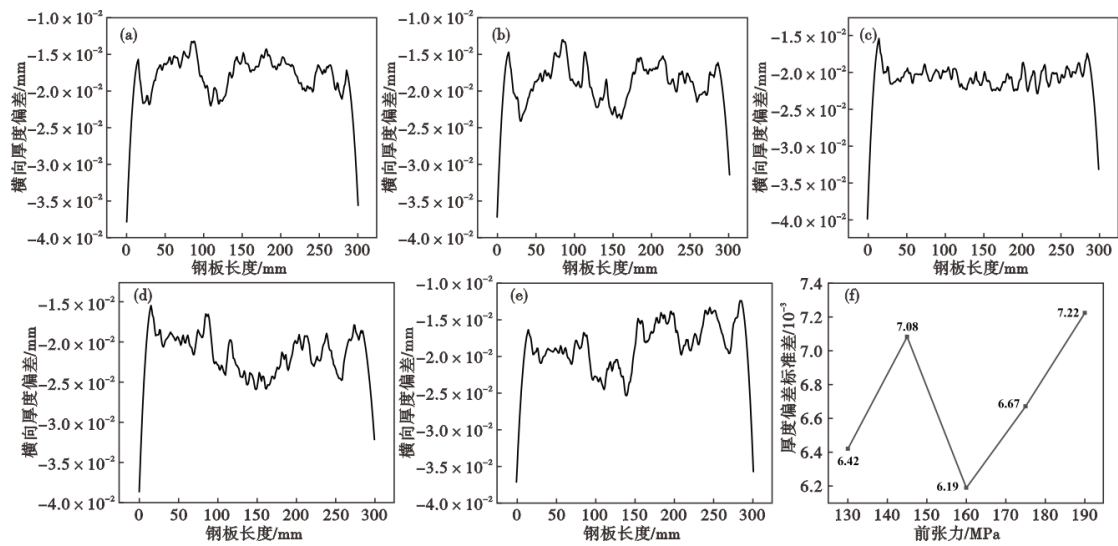


图7 前张力对钢板厚度偏差分布的影响: (a)130 MPa, (b)145 MPa, (c)160 MPa, (d)175 MPa, (e)190 MPa, (f)厚度偏差标准差

Fig. 7 Effect of front tension on thickness deviation distribution of steel plate : (a) 130 MPa, (b) 145 MPa, (c) 160 MPa, (d) 175 MPa, (e) 190 MPa, (f) standard deviation of thickness deviation

大,轧制压力和压下变形量逐渐减小,与实际生产中的轧制规律基本相符。当前张力从 130 MPa 增至 160 MPa 时,钢板厚度偏差波动逐渐趋于平稳。如图 7(c) 所示,前张力为 160 MPa 时变形分布较为均匀,钢板厚度偏差的标准差为 6.19×10^{-3} 。然而,当前张力继续增加至 175、190 MPa 时,厚度偏差的分布变得不均匀,标准差分别为 6.67×10^{-3} 、 7.22×10^{-3} ,钢板两侧的厚度偏差波动增大,易引发两边剪薄现象。因此,适当增大前张力有助于缓解浪纹等板形缺陷,且在一定范围内,前张力越大,钢板板形质量越好^[20-21]。综合来看,前张力为 160 MPa 时,钢板的厚度偏差分布最为均匀,板形质量最佳。

2.4 后张力对厚度偏差的影响

图 8 为确定最佳前张力值为 160 MPa 后,不同后张力下钢板宽度方向的厚度偏差分布情况。由图 8 可以看出,保持前张力不变时,后张力增大导致轧制压力和压下变形减小。当后张力从 70 MPa 增加至 85~100 MPa 时,钢板厚度偏差波动减小,冷轧板形质量良好,出现浪纹缺陷的可能最小。当后张力增至 115~130 MPa 时,钢板中部厚度偏差波动加剧且分布不均,表明该范围内 SUS301L 不锈钢板的冷轧板形较差。由图 8(b) 可以看出,后张力为 85 MPa 时,钢板厚度偏差波动小,标准差为 5.75×10^{-3} ,轧后板形较为平整。在实际生产中,应将后张力控制在合理范围内以减少板形缺陷^[22-24]。

2.5 轧制速度对厚度偏差的影响

图 9 为固定其它冷轧参数不变,冷轧速度分别为 4、5、6、7、8 m/s 时,沿钢板长度方向上提取的钢板厚度偏差的分布情况。由图 9 可以看出,轧制速度在 4~8 m/s,随着轧制速度的增加,钢板厚度偏差波动逐渐平稳,尤其在 6 m/s 时,厚度偏差波动幅度最小,标准差为 5.75×10^{-3} ,表明此时钢板压下变形均匀,板形良好^[25-26]。当轧制速度增至 8 m/s 时,厚度偏差波动异常,标准差上升至 8.06×10^{-3} ,钢板变形不均匀。综合来看,6~7 m/s 为理想轧制速度范围,钢板的塑性应变、内外层等效应力及压下变形分布均匀,板形质量较好。

上述研究结果表明,前张力、后张力及轧制速度对 SUS301L 冷轧钢板厚度偏差均有显著影响。随着前张力从 130 MPa 增至 160 MPa,厚度偏差波动逐渐平稳,标准差由 6.46×10^{-3} 降至 6.19×10^{-3} ;前张力进一步增至 190 MPa 时,偏差波动加剧,标准差升至 7.22×10^{-3} ,说明前张力过大会导致钢板边部变形加剧。后张力在 85~100 MPa 范围内时厚度偏差波动较小,最佳值为 85 MPa,此时标准差为 5.75×10^{-3} ;后张力超过 115 MPa 时,中部厚度偏差明显增大,板形恶化。轧制速度在 6~7 m/s 时钢板厚度分布最均匀,6 m/s 时标准差为 5.75×10^{-3} ;速度增至 8 m/s 时,厚度偏差波动异常,标准差升至 8.06×10^{-3} ,说明轧制速度过高不利于板形控制。综上所述,前张力 160 MPa、后张力 85 MPa、轧制速度 6~7 m/s 为控制

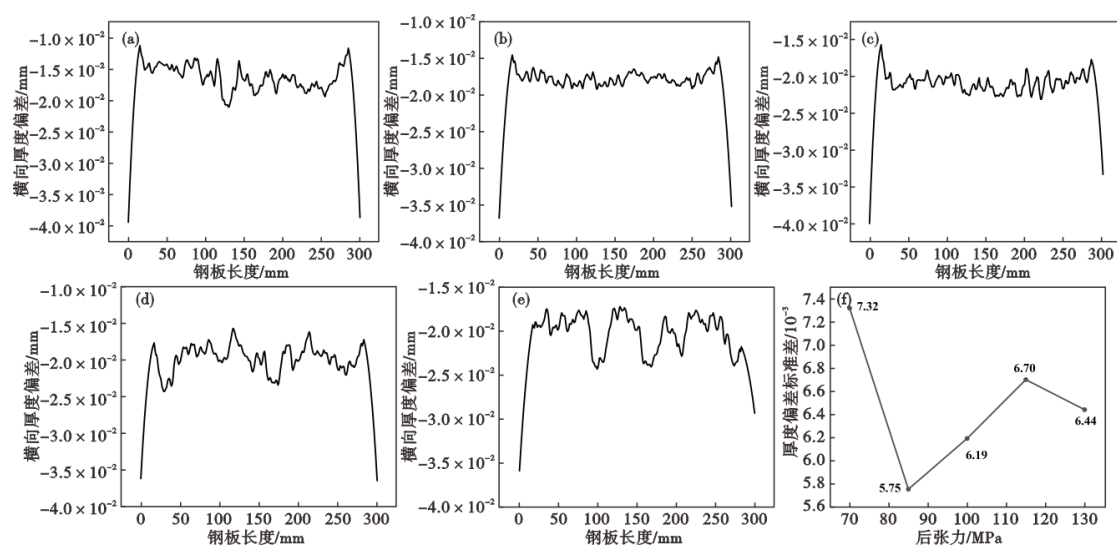


图8 后张力对钢板厚度偏差分布的影响: (a) 70 MPa, (b) 85 MPa, (c) 100 MPa, (d) 115 MPa, (e) 130 MPa, (f) 厚度偏差标准差

Fig. 8 Effect of back tension on thickness deviation distribution of steel plate : (a) 70 MPa, (b) 85 MPa, (c) 100 MPa, (d) 115 MPa, (e) 130 MPa, (f) standard deviation of thickness deviation

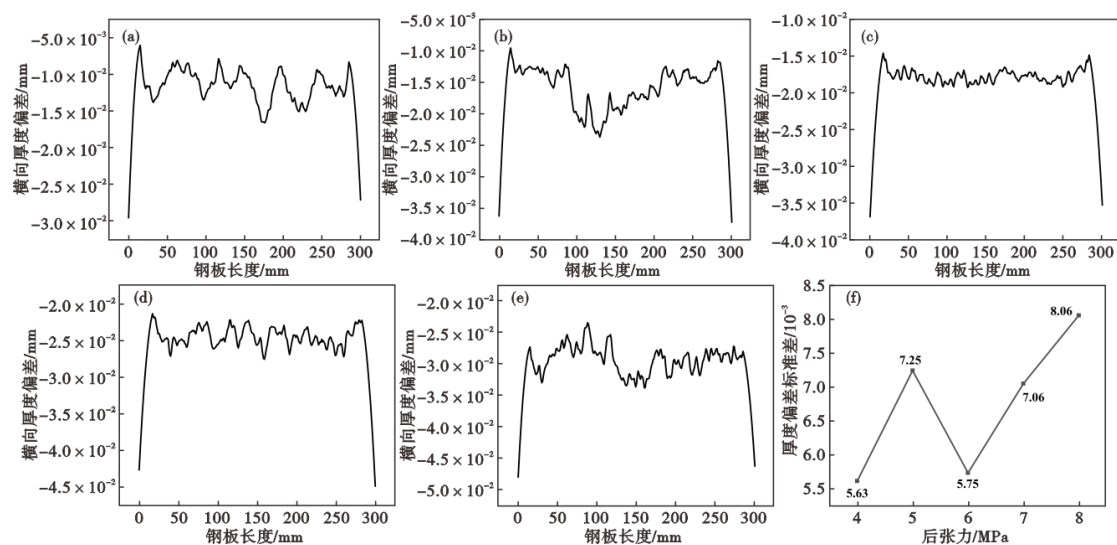


图9 轧制速度对钢板厚度偏差分布的影响: (a) 4 m/s, (b) 5 m/s, (c) 6 m/s, (d) 7 m/s, (e) 8 m/s, (f) 厚度偏差标准

Fig. 9 Effect of rolling speed on thickness deviation distribution of steel plate : (a) 4 m/s, (b) 5 m/s, (c) 6 m/s, (d) 7 m/s, (e) 8 m/s, (f) standard deviation of thickness deviation

厚度偏差的优选工艺参数,可有效改善钢板厚度均匀性,降低浪纹等板形缺陷风险。

3 结论

本研究基于ABAQUS有限元模拟软件,建立了SUS301L不锈钢板二十辊冷轧过程的1/4对称模型,研究了前张力、后张力和轧制速度对钢板厚度偏差的影响,并通过标准差量化厚度分布的均匀性。主要结论如下:

1) 前张力对钢板厚度偏差具有显著影响。当

前张力从130 MPa增至160 MPa时,厚度偏差标准差由 6.46×10^{-3} 降至 6.19×10^{-3} ,厚度分布趋于均匀;继续增大至190 MPa时,标准差升至 7.22×10^{-3} ,钢板边部变形加剧,板形恶化。因此,确定最佳前张力为160 MPa。

2) 后张力对钢板厚度偏差也具有一定影响。后张力为85 MPa时,厚度偏差最小,标准差为 5.75×10^{-3} ;在85~100 MPa,厚度偏差波动较小;超过115 MPa时,钢板中部厚度偏差显著增大,板形质量下降。

3)轧制速度对钢板厚度偏差分布均匀性影响较为显著。轧制速度在6~7 m/s时,钢板厚度分布最均匀,6 m/s时标准差为 5.75×10^{-3} ;速度增至8 m/s时,标准差升至 8.06×10^{-3} ,厚度偏差波动异常,不利于板形控制。

4)综合分析结果表明,前张力160 MPa、后张力85 MPa、轧制速度6~7 m/s时可以有效提高SUS301L不锈钢板厚度偏差的均匀性,减少浪纹等板形缺陷的产生。所建立的分析方法可为二十辊冷轧机冷轧工艺参数优化提供借鉴,具有较好的工程适用性。

参考文献

- [1] 贾晓飞,薛为林. 冷轧板带材生产技术现状及发展方向[J]. 产业创新研究, 2022(14): 142-144.
- [2] 焦晓飞,李群,王栋甲等. 高氮奥氏体不锈钢的研究进展及展望[J]. 特殊钢, 2025, 46(1): 16-32.
- [3] 阳江丽. 304不锈钢冷轧带钢生产技术及应用效果分析[J]. 科学技术创新, 2022(15): 181-184.
- [4] 白建光. 不锈钢带冷轧工艺的发展[J]. 轧钢, 2016, 33(3): 56-58.
- [5] 陆璐,王照旭,王辅忠,等. 塑性有限元法在金属轧制过程中组织演化模拟进展[J]. 材料导报, 2013, 27(3): 138-142.
- [6] 温金字,郭丽丽,赵颖,等. 基于有限差分法和有限元方法的镁合金轧制计算结果分析[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(5): 68-78.
- [7] 赵辉,李旭. 有限元分析在紧固件塑性成形领域中的应用[J]. 新技术新工艺, 2015(10): 60-63.
- [8] 姜晓艳,邢淑清,董丽丽,等. 张力在冷轧过程中对板带材压下量的影响[J]. 内蒙古科技大学学报, 2011, 30(4): 360-363.
- [9] 董丽丽,邢淑清,姜晓艳,等. 张力对冷轧304奥氏体不锈钢薄板板形影响的数值模拟[J]. 特殊钢, 2012, 33(3): 4-7.
- [10] 赵娜娜,麻永林,张奇,等. 304奥氏体不锈钢薄板带冷轧过程数值模拟[J]. 内蒙古科技大学学报, 2016, 35(2): 126-130.
- [11] 刘楠,李智斌,胡可柱,等. SK85高强度板材冷轧工艺参数对板形的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(6): 94-104.
- [12] 李博,张清东,张晓峰. 平整轧制过程工艺参数对带钢残余应力场的影响[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(5): 65-70.
- [13] 冯莹莹,周俊甫,郭学浩,等. 轧制碳钢/不锈钢复合板残余应力分布的数值模拟以及调控[J]. 机械工程材料, 2025, 49(4): 86-91.
- [14] 李俊琛,冯瑞,黄旭涛. 冷轧301L不锈钢板残余应力的数值模拟[J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(3): 11-15.
- [15] 李亚哲,董丽丽,麻永林. 304不锈钢板带冷轧过程数值模拟[J]. 内蒙古科技大学学报, 2011, 30(2): 171-174.
- [16] 魏栋,楚志兵,黄庆学,等. 基于DEFORM-3D的皮尔格冷轧不锈钢管有限元模拟及分析[J]. 塑性工程学报, 2016, 23(5): 89-95.
- [17] 楚志兵,吕阳阳,黄庆学,等. 冷轧不锈钢管二辊模具优化模型的建立与验证[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 5-10.
- [18] 苏宁,张志远,朱永霞. 冷轧不锈钢管残余应力有限元模拟分析[J]. 山西冶金, 2019, 42(3): 10-11.
- [19] 黄旭涛. 轨道车辆用301L不锈钢冷轧工艺的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [20] 陶加硕. 冷轧工艺对不锈钢性能影响的分析[J]. 新疆钢铁, 2024(2): 40-42.
- [21] 姜晓艳,亢志强,李志峰,等. 弯辊力对冷轧板带板形的影响分析[J]. 内蒙古科技大学学报, 2013, 32(2): 148-151.
- [22] 段丽霞. 304不锈钢薄带生产工艺改进[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- [23] 麻永林,李志峰,邢淑清,等. 退火张力对冷轧SUS304不锈钢带力学性能和残余应力的影响[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(5): 116-120.
- [24] 冯瑞. 301L不锈钢板冷轧参数对板形影响的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [25] 董丽丽,邢淑清,姜晓艳,等. 张力对薄板冷轧过程压下量影响的数值模拟[J]. 轧钢, 2012, 29(2): 21-24.
- [26] 周翠兰,刘红梅,白晋钢,等. 冷轧变形量对304不锈钢力学性能的影响[J]. 钢铁, 2012, 47(10): 70-75.