

屈服强度对高强板矫平的影响

仲翔¹, 武凯¹, 孙宇¹, 张宏伟², 付维爱², 孔德文²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094; 2. 泰安华鲁锻压机床有限公司, 山东泰安 271000)

摘要: 高强度钢板的强化特性明显, 与普通板材相比更难矫平。为了解决上述问题, 建立了高强板矫平仿真模型, 模拟了不同屈服强度下高强板的矫平过程, 采用有限元法分析了板材在矫平过程中的应力变化规律, 以及屈服强度对矫平力、残余应力和平直度的影响。针对 1150 MPa 屈服强度的板材矫平效果很不理想的现象, 提出了 2 道次矫平方案。仿真结果表明: 高强板矫平过程中, 纵向应力占据主导地位, 而剪切应力可忽略不计; 在大变形方案下, 随着屈服强度的增加, 板材边部的应力集中现象越严重, 平直度越差; 2 道次矫平方案可以解决屈服强度为 1150 MPa 的超高强度钢板难以矫平的问题, 同时也减少了板材残余应力, 使应力分布更加均匀。

关键词: 高强板; 矫平; 屈服强度; 残余应力; 矫平道次

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.014

中图分类号: TG333 2⁺3; TG335 5⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0089-07

Influence of yield strength on leveling for high-strength plate

Zhong Xiang¹, Wu Kai¹, Sun Yu¹, Zhang Hongwei², Fu Weiai², Kong Dewen²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Tai'an Hualu Metalforming Machine Tool Co., Ltd., Tai'an 271000, China)

Abstract: High-strength steel plate has obvious strengthening characteristics, which is more difficult to level compared with ordinary plate. Therefore, in order to solve the above problems, the leveling simulation model of high-strength plate was established, and the leveling process of high-strength plate with different yield strengths was simulated. Then, the stress variation law of the plate in the leveling process was analyzed by finite element method, and the influences of yield strength on leveling force, residual stress and flatness of high-strength plate were also analyzed. Furthermore, for the unsatisfactory leveling effect of plate with the yield strength of 1150 MPa, a two-pass leveling scheme was proposed. The simulation results show that in the leveling process of the high-strength plate, the longitudinal stress is dominant, while the shear stress can be ignored. Under the large deformation scheme, with the increasing of yield strength, the stress concentration phenomenon at the edge of plate becomes more serious, and the flatness becomes worse. Thus, the two-pass leveling scheme can solve the straightening problem of ultra-high strength steel plate with the yield strength of 1150 MPa, at the same time, it reduces the residual stress of plate and makes the stress distribution more uniform.

Key words: high-strength plate; leveling; yield strength; residual stress; leveling pass

高强板的焊接性能、成形特性以及一些特殊的物理性能更加突出, 其广泛应用于船舶、桥梁、高压锅炉、石油平台等领域^[1]。矫平机是钢板轧制线上的重要一环, 其矫平工艺的好坏直接决定了矫后板材的质量。近年来, 随着控轧控冷技术的广泛使用, 板材的矫平温度降低、屈服强度增大, 对矫平工艺也提出了更高的要求, 因此, 研究屈服强度对

高强板矫平的影响很有必要。

近年来, 对于辊式矫平的研究越来越多。张立杰等^[2]基于有限元法研究了不同矫平方案和矫平速度下预矫平机的矫平效果, 认为矫平速度对矫后钢板的残余曲率和应力基本没有影响; 王福华等^[3]通过有限元法模拟了高强板的矫平过程, 发现仅改变上辊压下量, 矫后板材的纵向应力变化趋势基本不变; 王艳等^[4]和龚本月等^[5]通过有限元法研究了矫平过程中的应力变化规律, 并分析了压下量与矫后板材平直度的关系; 朱蔚等^[6]基于虚拟支点理论优化了矫平机工艺模型, 得到了更加合理的工艺参数; 崔丽等^[7]研究了高强板矫平过程中塑性变形率以及矫平力的变化规律, 认为塑性变形率和额定矫平力

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-07-15

基金项目: 2018 年度泰山英才领军人才项目

作者简介: 仲翔 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 353895098@qq.com

通信作者: 武凯 (1972-), 男, 博士, 教授

E-mail: wukai@mail.njust.edu.cn

为限制高强板矫平的决定因素；赵志毅等^[8]通过盲孔法研究了板材在不同工艺模型下粗矫与精矫后残余应力的变化规律，并在此基础上分析了不同矫平工艺对残余应力分布的影响；王勇勤等^[9]建立了一种以工作辊压下量为变量、以最小矫平力为目标函数的高强板矫平工艺优化模型，并通过生产试验验证了此模型的可靠性；杨雄等^[10]和詹光曹^[11]研究了高强板在不同矫平道次下的矫平效果，发现适当增加矫平道次可以改善板材的残余应力与平直度。上述学者大多研究了压下量与矫平精度的关系，而对于屈服强度对矫平过程的影响研究较少，现代矫平技术面临着不同强度下高强板的矫平任务，所以，研究屈服强度对高强板矫平的影响很有意义。

本文以华鲁锻压机床有限公司所提供的十一辊高强板矫平机 WD43M-40 × 2500（最大厚度为 40 mm）为研究对象，建立了高强板矫平有限元模型，分析了高强板矫平的应力变化规律以及屈服强度对高强板矫平的影响。

1 矫平压下量理论模型

合理设置矫平压下量可以更好地发挥矫平辊的作用，提高矫后板材的质量。矫平方案采用大变形方案^[12]。该方案的特点为：前几个矫平辊设置较大的相对反弯曲率，使轧件在成形开始即得到较大的反弯变形，把原始曲率变为同方向的单一曲率值，后面的工作辊采用小压下量慢慢减少曲率，从而达到矫平目的^[13]。

根据大变形方案计算各矫平辊压下量。首先，计算弯矩比^[14]，如式（1）所示：

$$\bar{M} = \frac{M}{M_l} = 1.5 - 0.5 / (C_0 + C_w)^2 \quad (1)$$

式中： \bar{M} 为弯矩比； M 为弯矩； M_l 为弹性极限弯矩； C_0 为板材原始曲率比； C_w 为压弯曲率比。

然后，根据材料力学公式计算弹复挠度 δ_f ，如式（2）所示：

$$\delta_f = \frac{l^2 M}{3EI} = \frac{l^2 M_l}{3EI} \bar{M} = \delta_l \bar{M} \quad (2)$$

式中： l 为辊距的 1/4； E 为弹性模量； I 为惯性矩； δ_l 为弹性极限挠度。

采用大变形矫平方案，残留曲率比大于 1，所以残留挠度 δ_c 为^[14]：

$$\delta_c = \frac{20C_c^4 - 18C_c^3 + 2C_c}{9C_c^4 - 6C_c^2 + 1} \delta_l \quad (3)$$

式中： C_c 为残留曲率比。

$$C_{0(i+1)} = C_{ci} \quad (4)$$

$$C_{ci} = C_{wi} - C_{fi} = C_{wi} - \left[1.5 - \frac{0.5}{(C_{0i} + C_{wi})^2} \right] \quad (5)$$

式中： $C_{0(i+1)}$ 为第 $(i+1)$ 辊的原始曲率比； C_{ci} 为第 i 辊的残留曲率比； C_{wi} 为第 i 辊的压弯曲率比； C_{fi} 为第 i 辊的弹复曲率比； C_{0i} 为第 i 辊的原始曲率比。

第 i 辊的压弯挠度 δ_i 如式（6）所示：

$$\delta_i = \delta_{fi} + \delta_{ci} \quad (6)$$

式中： δ_{fi} 为第 i 辊的弹复挠度； δ_{ci} 为第 i 辊的残留挠度。

之后，根据压弯挠度求解压下量。第 i 辊矫平单元的压弯挠度与压下量关系如图 1 所示，其中， $\delta_{(i-1)}$ 为第 $(i-1)$ 辊的压弯挠度； $\delta_{(i+1)}$ 为第 $(i+1)$ 辊的压弯挠度； ϕ_i 为第 i 辊的压下量。

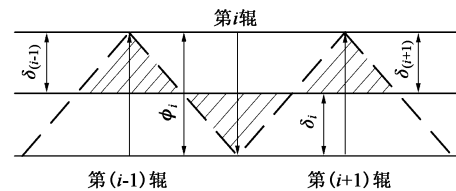


图 1 压弯挠度与压下量的关系

Fig. 1 Relationship between bending deflection and reduction amount

根据虚拟支点假设，矫平机上相邻两个辊子间的挠度即为两零点弯矩之间的挠度，所以， ϕ_i 可以按式（7）计算^[14]：

$$\phi_i = \delta_i + \frac{1}{2}(\delta_{(i-1)} + \delta_{(i+1)}) \quad (7)$$

选用的矫平机下排辊子固定，不用计算其压下量，但要求其压弯挠度：

$$\delta_i = \frac{1}{2}(\delta_{(i-1)} + \delta_{(i+1)}) \quad (8)$$

最后，计算第 2 辊以及第 $(i-1)$ 辊的压下量 ϕ_2 和 $\phi_{(i-1)}$ ^[14]。

$$\phi_2 = 2\delta_2 \quad (9)$$

$$\phi_{(i-1)} = 2\delta_{(i-1)} \quad (10)$$

选择板材的屈服强度为 690 MPa，原始曲率比为 3.5，压弯曲率比 $C_{w2} = C_{w3} = C_{w4} = 3.0$ 、 $C_{w5} = 2.8$ 、 $C_{w6} = 2.6$ ，结合板材基本参数进行计算，得到板材的压下量，如表 1 所示。

表 1 上排各辊的压下量 (mm)

Table 1 Reduction amounts of upper row rollers (mm)

| 参数 | 2 辊 | 4 辊 | 6 辊 | 8 辊 | 10 辊 |
|-----|------|------|------|------|------|
| 压下量 | 2.69 | 2.67 | 2.22 | 1.21 | 0.96 |

2 矫平过程仿真模型

建立 11 辊矫平机的仿真模型，如图 2 所示。矫平辊由于支撑辊的作用其变形可以忽略不计，所以设置为解析刚体，板材设置为可变形体。矫平辊和板材的基本参数如表 2 和表 3 所示，板材的初始位置在矫平机入口前。

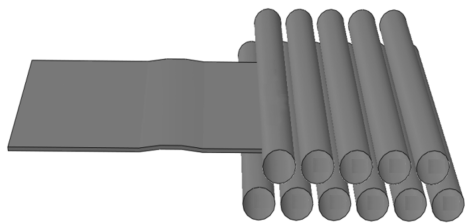


图 2 矫平机有限元模型
Fig. 2 Finite element model of leveler

表 2 矫平辊基本参数

Table 2 Basic parameters of leveling roll

| 参数 | 数值 |
|-------------------------|------|
| 辊数 | 11 |
| 辊长/mm | 2500 |
| 辊径/mm | Φ150 |
| 辊距/mm | 350 |
| 辊速/(r·s ⁻¹) | 1.5 |

表 3 板材基本参数

Table 3 Basic parameters of plate

| 参数 | 数值 |
|--------------------------|-------|
| 长度/mm | 2500 |
| 宽度/mm | 1500 |
| 厚度/mm | 35 |
| 密度/(kg·m ⁻³) | 7850 |
| 屈服强度/MPa | 690 |
| 杨氏模量/GPa | 210 |
| 硬化模量/MPa | 42000 |
| 泊松比 | 0.3 |

矫平过程分为 2 个分析步：分析步 1 设置为 0.1 s，赋予板材一个初速度，使其咬入矫平辊；分析步 2 设置为 20 s，撤去板材的初速度，板材前进的动力为与上、下辊之间的摩擦力。

板材的网格划分如图 3 所示。网格类型采用八节点线性六面体单元，缩减积分为 C3D8R，尺寸为

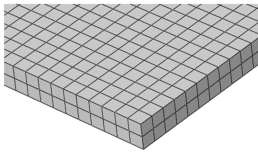


图 3 模型的网格划分
Fig. 3 Mesh generation of model

21 mm×21 mm×17.5 mm，共划分 16898 个网格单元。矫平辊设置为刚体，不用划分网格。

3 矫平过程应力分析

模拟屈服强度为 690 MPa 的高强板的矫平过程，通过矫平力对比验证模型的准确性，并且分析矫平过程中的应力变化规律。

3.1 矫平力验证

板材矫平过程主要分为：喂料、上辊下压、稳定矫平以及出料 4 个阶段^[4]，提取各矫平辊进入稳定矫平阶段时的矫平力，并与理论值进行对比，如图 4 所示。理论矫平力与仿真矫平力在首、尾辊处基本相同，而在中间的矫平辊，仿真矫平力略大于理论矫平力，这是由于：仿真模型存在如材料真实的应力-应变曲线以及实际工况等难以准确模拟的误差。仿真矫平力与理论矫平力误差为 7.5%，在可接受范围之内，证明了该仿真模型的可靠性。此外，矫平力在前几辊上升很快并达到最大值，之后则平缓下降，这是由于：前几辊设置了很大的压弯曲率比，使得前几辊矫平力很大，这与矫平辊的递减压下量分布一致。

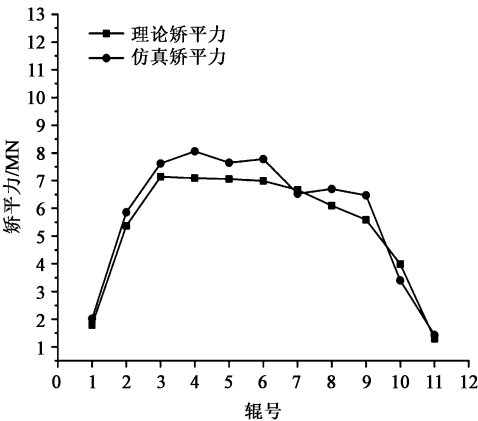


图 4 理论矫平力与仿真矫平力比较
Fig. 4 Comparison of theoretical and simulation leveling forces

3.2 应力分析

提取仿真过程中的 Mises 应力云图，如图 5 所

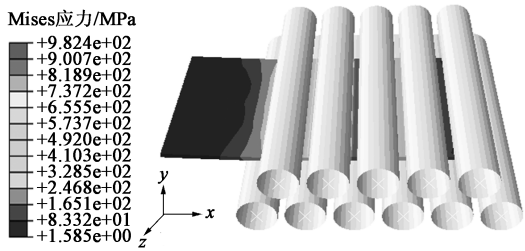


图 5 矫平过程中板材 Mises 应力分布云图

Fig. 5 Nephogram of Mises stress distribution for plate in leveling process

示。板材在矫平辊压弯的作用下连续交替弯曲，矫平过程为一个弹塑性变化过程。提取轧件刚刚全部进入矫平辊时刻的各向最大应力，如表 4 所示，其中 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为板材长度、厚度以及宽度方向上的拉伸应力， τ_{xy} 为 yz 平面上沿 y 向的剪切应力， τ_{xz} 为 yz 平面上沿 z 向的剪切应力， τ_{yz} 为 xz 平面上沿 z 向的剪切应力。

表 4 矫平过程中板材各向应力的最大值、最小值 (MPa)

Table 4 Maximum and minimum values of stress in various directions during leveling process for plate (MPa)

| 时间/ s | 类别 | 拉伸应力 | | | 剪切应力 | | | Mises 应力 |
|----------|-----|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | σ_x | σ_y | σ_z | τ_{xy} | τ_{xz} | τ_{yz} | |
| 7 | 最大值 | 1038 | 238 | 362 | 244 | 188 | 52 | 982 |
| | 最小值 | -1223 | -356 | -438 | -210 | -186 | -52 | 2 |

剪切应力较拉伸应力小，所以暂时不做分析。在第 7 s 时板材全部进入矫平辊，纵向拉伸应力的波动范围为 $-1223 \sim 1038$ MPa，厚度方向和宽度方向则分别为 $-356 \sim 238$ MPa、 $-438 \sim 362$ MPa。纵向拉伸应力的应力波动较其他应力大很多，最大应力差值达到 2261 MPa，为矫平过程主要的应力变化，厚度方向应力波动最小。这说明在矫平过程中，高强板的反弯变形主要以纵向纤维的变形为主，纵向拉伸应力在高强板矫平中占据主导地位。

从板材中部选择 1 个积分点（编号为 12790），绘制该点各向拉伸应力随时间的变化曲线，如图 6 所示。可以看到，在矫平过程中纵向拉伸应力的变化范围最大，为 $-900 \sim 600$ MPa，为主要的波动，宽度方向次之，厚度方向变化最小，平均仅有 -40 MPa。

此外，从第 5 s 至第 10 s，各向拉伸应力发生从大到小的拉压交替变化。这是因为：该点在第 5 s 到达压下量最大的 2 辊处，发生很大的压弯变形，所以应力波动最大；该点到达后几辊的矫平单元时，各向拉伸应力由于压下量的递减而减小。在第 10 s

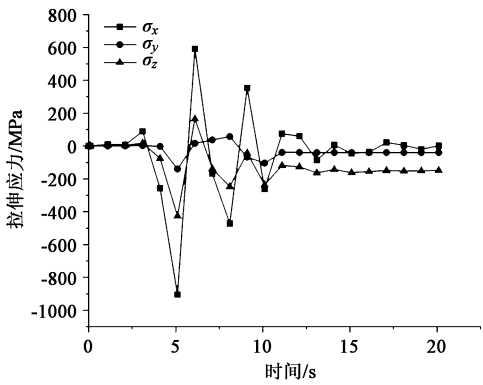


图 6 积分点 12790 的各向拉伸应力随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of tensile stress in various directions with time at integral point 12790

时到达第 8 辊处，板材基本仅发生弹性变形，各向拉伸应力开始稳定。

4 屈服强度对板材矫平的影响

为了分析不同屈服强度对于板材的矫平效果，分别模拟了高强板在 345、460、690 和 1150 MPa 这 4 种屈服强度的矫平，并分析他们的残余应力和平直度。板材的屈服强度以及对应压下量如表 1 和表 5 所示。

表 5 不同屈服强度下板材的压下量 (mm)

Table 5 Reduction amounts of plate under different yield strengths (mm)

| 屈服强度/MPa | 2 辊 | 4 辊 | 6 辊 | 8 辊 | 10 辊 |
|----------|------|------|------|------|------|
| 345 | 1.34 | 1.33 | 1.12 | 0.65 | 0.48 |
| 460 | 1.79 | 1.78 | 1.48 | 0.81 | 0.64 |
| 1150 | 4.52 | 4.45 | 3.71 | 2.03 | 1.60 |

4.1 矫平力对比

将模拟结果与 690 MPa 屈服强度的板材进行对比。提取矫平力，如图 7 所示。其中，690 MPa 屈服强度的板材的矫平力为 1150 MPa 时的 70% 左右，而 345 MPa 屈服强度下的板材矫平力仅为 1150 MPa 时的 33% 左右。可以看到：随着板材屈服强度的增加，所需矫平力也在不断增加，因此，矫平力为限制高强板矫平的一个因素。

4.2 矫后板材残余应力对比

矫平后设立单独的作业让板材进行回弹，回弹后板材的应力为残余应力。为了便于研究，在板材表面划分了 4 条应力分析路径 $a-a$ 、 $b-b$ 、 $c-c$ 、 $d-d$ ，如图 8 所示。

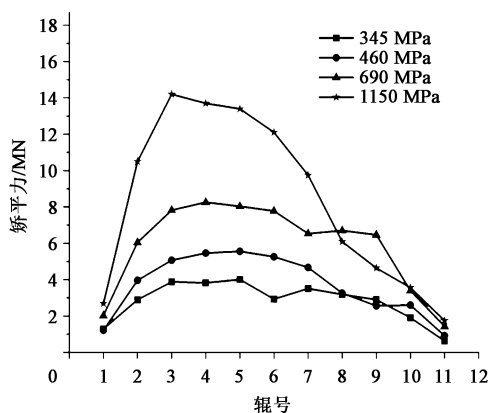


图7 不同屈服强度下板材的矫平力对比

Fig. 7 Comparison of leveling forces for plate under different yield strengths

纵向应力在矫平过程中占据主导地位, 为了便于分析, 取矫后板材的纵向残余应力代表残余应力。提取4种板材在不同分析路径上的纵向残余应力, 如图9所示。

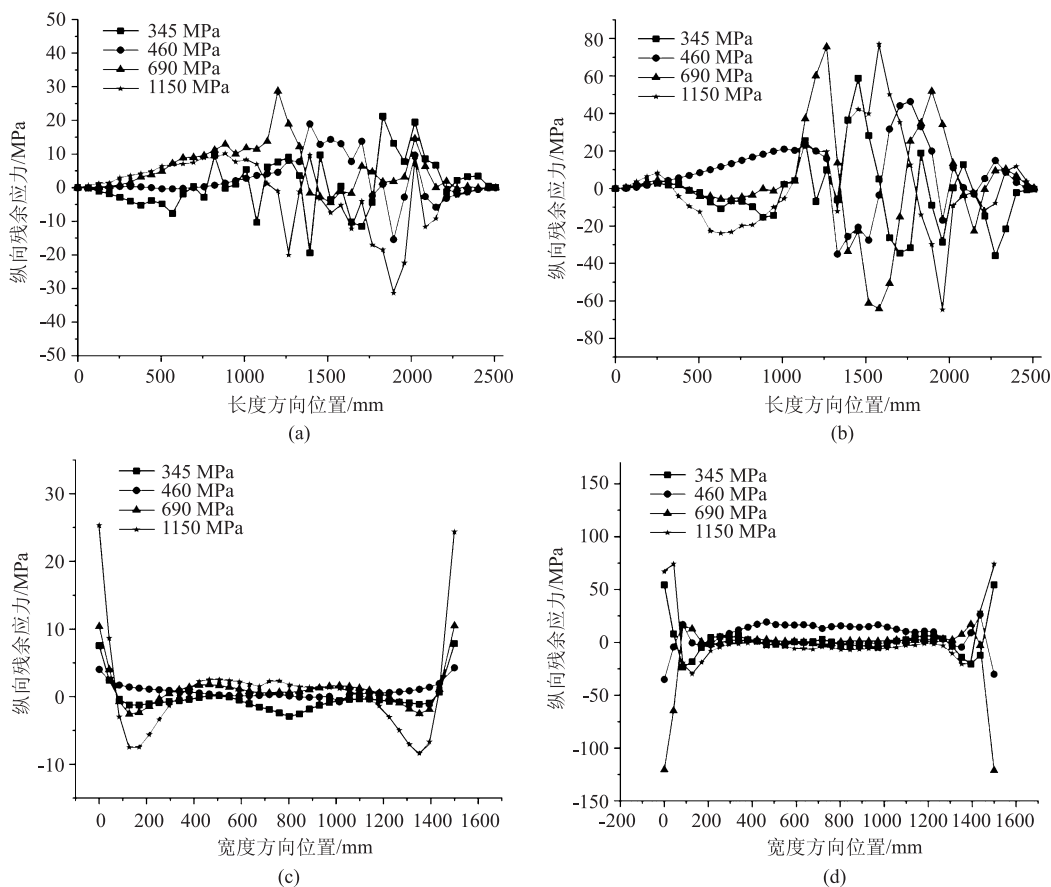


图9 不同屈服强度下板材在4条分析路径上的纵向残余应力

(a) a-a (b) b-b (c) c-c (d) d-d

Fig. 9 Longitudinal residual stresses along four analysis paths of plate under different yield strengths

图9c和图9d为板材宽度方向分析路径c-c和d-d上的残余应力。4种屈服强度下板材在两条分析路径上的残余应力分布比较相似。在板边均存在

应力集中现象, 并且集中程度随着屈服强度的增加而增加; 两条分析路径其余部位的残余应力分布比较均匀, 最大差值均不超过30 MPa。这是由于: 在

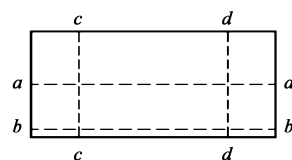


图8 板材表面分析路径

Fig. 8 Analysis paths of plate surface

由图9a和图9b可以得到: 4种屈服强度下的板材在路径a-a上的残余应力均很小, 应力最大差值在43 MPa之内, 分布比较均匀; 在路径b-b上, 690和1150 MPa屈服强度的板材残余应力范围为-65~80 MPa, 较其他两种屈服强度下板材残余应力更大, 且应力突变更严重。所以, 不同屈服强度下板材矫后的中部残余应力差别不大, 边部残余应力随着屈服强度的增加而增加, 并且屈服强度的增加会导致板材的边部残余应力分布更加不均匀。

矫平过程中, 轧件的中部纤维受到矫平辊以及边缘纤维的双重约束, 发生的塑性变形更加均匀, 所以, 在矫平后的残余应力相对于边部残余应力更小。而边部残余应力过大会导致应力分布不均匀, 从而影响板材的矫平质量。因此, 对于矫平精度要求很高的高强板, 可以对矫后板材做切边处理。

4.3 平直度对比

提取矫平前后轧件各单元节点的 y 向坐标, 如图 10 所示。345、460、690 和 1150 MPa 屈服强度的板材的 y 向坐标最大差值分别为 6.8、7.1、7.4 和 28.7 mm, 平直度分别为 2.7、2.8、3.0 和 $11.5 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ 。前 3 种屈服强度下板材能够满足 $10 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ 的平直度标准, 但 1150 MPa 屈服强度的板材矫后不能满足要求, 并存在明显的纵向弯曲缺陷。可以看到, 板材的平直度随着屈服强度的增加而下降, 这是由于: 板材的变形阻力随着屈服强度增加而增加, 导致屈服强度很大的板材未能够得到充分的弹塑性变形, 所以, 会出现超高强度板材难以矫平的现象。针对该情况, 提出 2 道次大变形矫平方案。

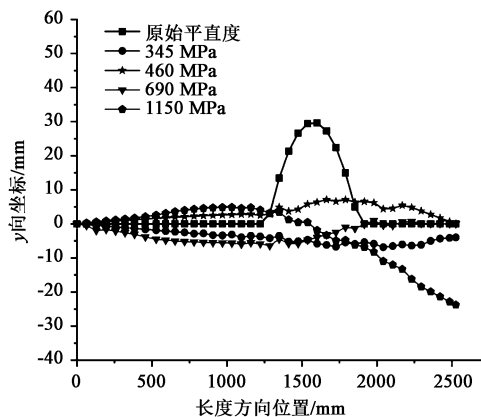


图 10 不同屈服强度下板材矫后平直度对比

Fig. 10 Comparison of flatness of plate under different yield strengths after straightening

4.4 2 道次矫平方案

一般来说, 增加矫平道次可以提高板材的矫平质量^[11]。对于屈服强度高达 1150 MPa 的板材, 单道次矫平工艺不能满足矫平要求, 因此, 采用 2 道次矫平方案。对比两个道次板材的残余应力与平直度, 如图 11 所示。由图 11a 和图 11b 可以看到, 板

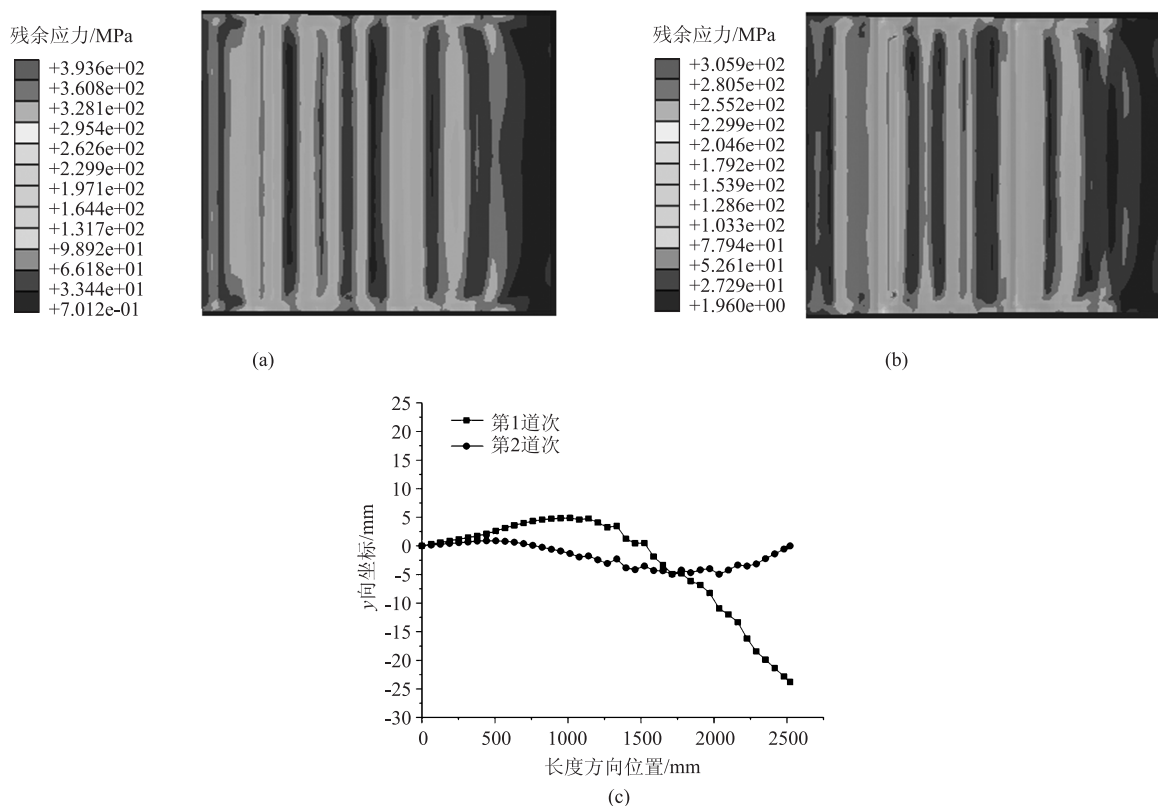


图 11 两道次矫平后板材残余应力云图与平直度对比

(a) 第 1 道次 (b) 第 2 道次 (c) 平直度

Fig. 11 Nephograms of residual stress and comparison of flatness for plate after two passes of leveling

(a) The first pass (b) The second pass (c) Flatness

材2道次矫后的残余应力比1道次减少了88 MPa,有了明显改善;图11c为板材在两个矫平道次下的平直度对比,第2道次矫后平直度为 $2.4\text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$,满足矫平要求。这是由于:板材在第1道次矫后留下的局部翘曲部位在第2道次矫平中得到了较大的弹塑性变形,从而使平直度得到改善。因此,2道次矫平方案可以改善残余应力分布并解决1150 MPa屈服强度下钢板难以矫平的问题。

5 结论

(1) 高强板矫平过程中,矫平辊对板材的反弯变形主要是纵向纤维上的变形,纵向拉伸应力在各向应力中占主导地位,剪切应力可忽略不计。

(2) 矫平力随着屈服强度的增加而增加,为限制高强板矫平的一个因素;不同屈服强度下高强板矫平后,中部残余应力差别不大,边部则存在应力集中现象,且集中程度随着屈服强度的增加而增加;在大变形方案下,板材的屈服强度越大,矫后平直度越差,对于屈服强度为1150 MPa的超高强度钢板,单道次大变形矫平方案不能满足平直度要求。

(3) 针对1150 MPa屈服强度的板材在单道次大变形方案下难以矫平的问题,提出2道次矫平方案。在该方案下,残余应力相对于单道次矫平下降很多,矫后板材平直度达到 $2.4\text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$,满足矫平要求。

参考文献:

- [1] 郝铁文. 宽厚板压平机技术发展进步 [J]. 一重技术, 2011, (6): 17-20.
Hao T W. Plate flattening press technology's evolution & advancement [J]. CFHI Technology, 2011, (6): 17-20.
- [2] 张立杰, 邓宏玉, 余伟, 等. 基于有限元方法的中厚板预矫直过程模拟研究 [J]. 冶金自动化, 2015, 39 (3): 71-75.
Zhang L J, Deng H Y, Yu W, et al. Simulation study of plate pre-straightening process based on finite element method [J]. Metallurgical Industry Automation, 2015, 39 (3): 71-75.
- [3] 王福华, 刘安中, 李友荣, 等. 辊式矫直机上辊压下规程的仿真分析 [J]. 武汉科技大学学报, 2009, 32 (4): 351-354.
Wang F H, Liu A Z, Li Y R, et al. Simulation analysis of upper rolling schedule of roll-type straightener [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2009, 32 (4): 351-354.
- [4] 王艳, 赵连磊, 崔西民, 等. 九辊矫直机矫直过程仿真分析及压下规程参数设计 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (1): 293-300.
Wang Y, Zhao L L, Cui X M, et al. Simulation analysis of straightening process and design of reduction schedule parameters for nine-roller straightener [J]. Journal of Plastic Engineering, 2019, 26 (1): 293-300.
- [5] 龚本月, 王志刚, 李友荣, 等. 中厚板矫直残余应力仿真 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17 (6): 116-120.
Gong B Y, Wang Z G, Li Y R, et al. Finite element analysis for the residual stress of plate during straightening process [J]. Journal of Plastic Engineering, 2010, 17 (6): 116-120.
- [6] 朱蔚, 杨建军, 潘恩海, 等. 中厚板矫直工艺模型初探 [J]. 锻压装备与制造技术, 2016, 51 (4): 36-39.
Zhu W, Yang J J, Pan E H, et al. Study on straightening process model of medium and heavy plate [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2016, 51 (4): 36-39.
- [7] 崔丽, 胡贤磊, 郭强, 等. 高强度中厚板辊式矫直策略分析 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2011, 32 (5): 671-674.
Cui L, Hu X L, Guo Q, et al. Analyzing roller leveling strategies for high-strength steel plates [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2011, 32 (5): 671-674.
- [8] 赵志毅, 贺佳, 杨晓臻, 等. 热轧高强度钢板矫直前后残余应力分布的研究 [J]. 物理测试, 2009, 27 (6): 1-4, 21.
Zhao Z Y, He J, Yang X Z, et al. Research on residual stress distribution of high strength hot rolled steel plate before and after straightening [J]. Physical Examination and Testing, 2009, 27 (6): 1-4, 21.
- [9] 王勇勤, 刘志芳, 严兴春. 中厚板热矫直工艺规程制定及优化策略 [J]. 材料科学与工艺, 2012, 20 (6): 81-86.
Wang Y Q, Liu Z F, Yan X C. Establishment of technology process and optimization strategy of plates during hot levelling [J]. Materials Science and Technology, 2012, 20 (6): 81-86.
- [10] 杨雄, 余伟, 唐荻, 等. 高强度中厚板不充分变形的矫直工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2021, 40 (9): 84-89.
Yang X, Yu W, Tang D, et al. Study on straightening process of insufficient deformation of high strength steel medium thick plate [J]. Hot Working Technology, 2021, 40 (9): 84-89.
- [11] 詹光曹. 矫直道次对钢板残余应力影响研究 [J]. 宽厚板, 2019, 25 (2): 41-43.
Zhan G C. Effect study of straightening pass on residual stress of steel plate [J]. Wide and Heavy Plate, 2019, 25 (2): 41-43.
- [12] 万川特. 中厚板矫直机矫直过程研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
Wan C T. The Straightening Process Research of Medium and Heavy Plate Straightening Machine [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [13] 李乐毅. 高强度中厚板辊式矫直方案研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2014.
Li L Y. Research on Roller Leveling Scheme of High Strength Plate [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science & Technology, 2014.
- [14] 崔甫. 矫直原理与矫直机械 [M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
Cui F. Straightening Principle and Straightening Machine [M]. 2nd Edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.