DOI: 10.3901/JME.2020.18.043

热轧高强带钢纵切后侧弯缺陷及其内应力重分布^{*}

周兵营^{1,2} 邵健^{1,2} 何安瑞^{1,2} 司小明³ 崔宇轩³ 闻成才³

- (1. 北京科技大学工程技术研究院 北京 100083;
2. 北京科技大学高效轧制国家工程研究中心 北京 100083;
3. 马鞍山钢铁股份有限公司第四钢轧总厂 马鞍山 243000)

摘要: 控轧控冷技术已经普遍应用于高强钢的生产过程当中。由于细晶强化的需求, 高强钢冷却速率快, 横向温度的不均和冷却不同步明显, 使得轧制和冷却过程中沿带钢横向分布的内应力差异控制难度大, 在后续的纵切分条过程中易导致侧弯缺陷, 这是高强钢生产中存在的共性难题。利用有限元软件 ABAQUS 结合 FORTRAN 子程序, 建立热轧高强带钢纵切过程的有限元模型, 并通过解析模型进行反向验证, 研究带钢纵切后侧弯缺陷及其内应力重分布。结果表明, 纵切后各分条侧弯与带钢内应力重分布紧密相关, 纵切打破带钢初始内应力的平衡状态, 各分条内应力重新分布并达到二次平衡状态, 同时产生侧弯缺陷。结合研究结论, 对某热轧厂高强钢平整过程进行工艺优化, 解决了汽车大梁钢 M510L 纵切后第一、第四分条向外侧弯问题, 验证了研究过程和结果的正确性。针对带钢纵切过程中内应力重分布的研究, 可为今后纵切缺陷的预防提供理论指导。

关键词: 高强带钢; 纵切; 侧弯; 应力重分布; 有限元

中图分类号: TG335

Lateral Bending and Stress Redistribution of High Strength Steel Strip after Longitudinal Slitting

ZHOU Bingying^{1,2} SHAO Jian^{1,2} HE Anrui^{1,2} SI Xiaoming³ CUI Yuxuan³
WEN Chengcai³

- (1. Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;
2. National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;
3. Fourth Steel Rolling Plant of Maanshan Iron and Steel Co., Ltd., Maanshan 243000)

Abstract: TMCP has been widely used in the production of high strength steel. Due to the demand for fine grain strengthening, high strength steel strip's fast cooling rate, uneven lateral temperature and unsynchronized cooling, make the control of the internal stress along the transverse during rolling and cooling difficult, and it is easy to cause lateral bending defect after longitudinal slitting, which is a common problem in the production of high strength steel strip. A finite element model is established by ABAQUS combined with FORTRAN subroutine, which is verified by analytical model. The results show that the relationship between the lateral bending and the stress redistribution after longitudinal slitting is closely related. The longitudinal slitting breaks the equilibrium of the initial stress of the strip, and the stress redistributes and reaches the second equilibrium. Combined with the research conclusions, the process optimization of high strength steel levelling in rolling mill is applied, and the outer lateral bending defect of the first and fourth strips of the M510L is well solved, further verifying the validity of the research process and results. The research on the stress redistribution during longitudinal slitting provides theoretical guidance for the prevention of slitting defects.

Key words: high strength steel strip; longitudinal slitting; lateral bending; stress redistribution; finite element method

^{*} 国家自然科学基金(51674028)和创新方法工作专项(2016IM010300)资助
项目。20190925 收到初稿, 20200107 收到修改稿

0 前言

目前控制轧制和控制冷却技术已广泛应用于生产高强度带钢^[1]。由于细晶强化的需求, 高强钢冷却速率快, 横向温度的不均和冷却不同步明显, 使得轧制和冷却过程中沿带钢横向分布的内应力差异控制难度大^[2], 在后续的纵切分条过程中易导致侧弯缺陷, 这是高强钢生产中存在的共性难题。板形问题实质是带钢残余应力的外在表现, 残余应力超过带钢的屈曲极限, 表现为可见板形缺陷, 反之则为潜在板形缺陷^[3]。下游用户对潜在板形缺陷带钢进行纵切分条时, 由于较大的残余应力, 导致带钢分条出现侧弯缺陷, 造成后续加工困难, 降低产品合格率^[4]。

YOSHIHARA 等^[5]通过调整层流冷却过程中的边部遮挡量, 使带钢纵向内应力在宽度方向的分布趋于均匀, 有效改善了带钢纵切后各分条的弯曲缺陷问题。YOSHIDA 等^[6]和 HIDVEGHY 等^[7]分别建立了带钢纵切后各分条侧弯与内应力关系的解析模型, 并通过试验进行对比, 验证了解析模型的准确性。PARK 等^[8-9]提出残余应力是带钢纵切后各分条弯曲缺陷产生的直接原因, 结合试验测量和解析方法, 验证了带钢纵切后变形与初始内应力分布的关系, 并通过调整平整工艺参数, 改善了带钢纵切后各分条弯曲缺陷问题。赵胜林^[10]分析了太钢 2 250 mm 生产线生产的热轧高强钢纵切后侧弯的原因, 结合带钢初始内应力和矫直工艺对残余应力的影响, 提出通过调整矫直工艺参数改善带钢纵切后侧弯的方法。孙力等^[11]利用解析法计算了带钢纵切后各分条侧弯和内应力分布的关系, 提出纵切后侧弯是带钢纵向内应力沿横向分布不均造成的。

由上述研究可知, 带钢内应力的横向分布不均匀是纵切侧弯的最主要影响因素已被广泛认同, 但不同的纵切方式、纵切条数、带钢规格、边界条件等对纵切侧弯的影响研究较少, 对纵切过程内应力重分布的研究可有效表征上述问题, 为今后纵切缺陷的预防提供理论指导。

1 模型建立

1.1 现象描述

纵切分条是圆盘剪将带钢顺着轧制方向分切成一定宽度的窄条的加工方式。板形质量良好的带钢, 纵切后各分条保持平直, 但是对于存在较大残余应力的带钢, 纵切往往伴随着内应力重分布的过程,

导致其发生整体屈曲变形, 产生特定的板形缺陷, 如侧弯、翘曲等。

带钢纵切后分条侧弯是纵向内应力沿横向分布不均造成的, 纵切过程伴随着内应力重分布过程, 其纵向内应力的变化情况可表达为

$$\sigma_i = \sigma_r + \Delta\sigma \quad (1)$$

式中, σ_i 为带钢作为一个整体时的初始内应力, 处于平衡状态; σ_r 为带钢纵切后分条的残余内应力, 处于二次平衡状态; $\Delta\sigma$ 为带钢纵切过程中内应力的变化量, 表现出来即侧弯。

图 1a 是纵切过程中带钢分条侧弯现象, 由图可知该带钢纵切后中间分条保持平直, 两边分条侧弯明显, 方向均为外弯。图 1b 是横切钢板纵切后分条侧弯现象。高强带钢纵切后分条侧弯不仅会影响产品质量, 还会造成加工困难, 甚至工件报废, 降低产品合格率。

图 1 热轧带钢分条侧弯现象

1.2 有限元建模

利用 ABAQUS 分析带钢纵切后各分条残余应力及侧弯变形情况, 按以下顺序进行建模。

(1) 选取单元。带钢纵切后发生弹性变形, 单元类型为 3D 可变形实体单元。

(2) 建立几何模型。根据现场测试带钢规格, 选取带钢长度 $L=5.00$ m、宽度 $B=1.22$ m、厚度 $h=0.0045$ m。

(3) 选取力学属性。以汽车大梁钢 M510L 为研究对象, 材料属性如表 1 所示。

表 1 M510L 汽车大梁钢力学性能参数

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa	抗拉强度/ MPa
M510L	210	0.3	455	540

(4) 划分网格。模型选用静态、通用分析步, 单元类型为正六面体, 网格单元类型为 C3D8R。

(5) 边界条件。如图 2 所示, 在长度的 1/2 处选取截面施加对称约束, 建立 1/2 模型, 带钢纵切后

选取分条侧弯量 $d(\text{mm})$ 。

图 2 纵切带钢对称约束及侧弯量的选取

(6) 加载。利用 ABAQUS 中 SIGINI 子程序接口施加不同分布形式的内应力。将带钢潜在浪形内

应力分布形式分为中浪内应力、双边浪内应力、单边浪内应力、1/4 浪内应力和边中复合浪内应力等, 用余弦函数可表示为^[12]

$$\sigma(x) = A \cos\left(\frac{2k\pi x}{B}\right) \quad (2)$$

式中, A 为内应力幅值(MPa), 取负值时为中浪和边中复合浪内应力分布形式, 取正值时为双边浪和 1/4 浪内应力分布形式; B 为带钢宽度(mm); k 为应力分布系数, $k=1$ 时, 为二次浪形, $k=2$ 时, 为四次浪形。

带钢 4 种典型内应力分布曲线如图 3 所示。

图 3 四种浪形内应力分布曲线

由于中浪和双边浪、边中复合浪和四分之一浪的内应力大小相等、方向相反, 沿横坐标轴对称分布, 故仅研究双边浪和边中复合浪内应力。

图 4 是利用子程序接口 SIGINI 将潜在中浪内应力赋予带钢后的应力云图。

图 4 中浪内应力分布带钢应力云图

(7) 模拟带钢纵切过程。利用 ABAQUS 生死单

元法 Model Change 消除剪切部分的单元。

(8) 求解。计算纵切之后的变形情况以及内应力在各分条内部的重分布情况。

2 有限元模型解析验证

2.1 带钢纵切后侧弯解析模型

根据 YOSHIDA 等^[6]建立的带钢纵切后分条侧弯与内应力的解析模型, 可得带钢纵切后侧弯量与纵向内应力之间的关系。

如图 5 所示, 其中 d 为带钢纵切后分条的侧弯量; R_1 、 R_2 分别为 x_1 、 x_2 处侧边的弯曲半径, Δx 为带钢纵切后分条的宽度; L 为带钢的长度。

图5 纵切后侧弯与内应力关系的解析模型

带钢无外力和外力矩作用,且只研究纵向应力,分条横截面内纵向残余应力和力矩都为0,即

$$\int_0^h \int_{x_1}^{x_2} \sigma dx dy = 0 \quad (3)$$

$$\int_0^h \int_{x_1}^{x_2} \sigma x dx dy = 0 \quad (4)$$

式中, h 为带钢厚度。

忽略纵切后各分条的残余应力,即带钢初始内应力等于纵切过程内应力的变化量,整理可得带钢内应力与纵切后分条侧弯的解析关系式如下

$$\sigma_i \approx \Delta \sigma = \frac{8Ed\Delta x}{L^2} \quad (5)$$

式中, E 为弹性模量。

文献[6]中分别对加速冷却工艺、热平整工艺和板材厚度不同的钢板进行纵切试验,以贴应变片的方式测得钢板内应力 σ_m ,通过测量纵切后各分条侧弯量 d ,然后利用式(5)计算得到内应力 σ_c ,结果表明两种方式所得的内应力值满足误差范围,验证了解析方法的可靠性。

2.2 带钢分条侧弯有限元模型的解析验证

为了更好地分析纵切过程内应力的演变规律,有限元模型按照顺序纵切方式进行分切,如图6所示。

图6 带钢顺序纵切方式

根据现场实测热轧高强带钢内应力大小,假定带钢初始内应力幅值在 0~150 MPa,分别对双边浪和边中复合浪内应力分布形式带钢进行有限元和解析模型计算。

图7是双边浪和边中复合浪内应力带钢纵切后分条侧弯与内应力幅值关系的有限元和解析模型计算结果。由图7可知,带钢纵切后分条侧弯与内应力成正比例关系。解析模型计算所得侧弯量比有限元模型偏小,其中双边浪误差为 8.64%,边中复合浪为 13.48%。

图8为带钢长度和宽度对纵切后分条侧弯量的

图7 内应力幅值与分条侧弯关系的有限元和解析计算结果

(a) 带钢长度与分条侧弯的关系

(b) 带钢宽度与分条侧弯的关系

图8 长度、宽度与分条侧弯关系的有限元及解析计算结果

关系曲线。由图 8a 可知, 当内应力相同时, 带钢纵切后分条侧弯量与长度成递增关系, 且长度越长, 对侧弯量影响越明显。当带钢长度为 8.00 m 时, 有限元模型与解析模型计算的侧弯量误差最大, 其中双边浪为 8.70%, 边中复合浪为 13.49%。由图 8b 可知, 带钢宽度越宽, 纵切后分条侧弯越小, 且随着宽度的增加, 分条侧弯量减小幅度越缓, 侧弯量与带钢宽度成反比关系。当带钢宽度为 1.02 m 时, 有限元模型与解析模型计算的侧弯量误差最大, 其中双边浪为 9.90%, 边中复合浪为 16.20%。

对比有限元模型, 解析模型计算的各分条侧弯量偏小。由解析方法的前提条件可知, 解析模型忽略了纵切后分条的残余应力分布, 即 $\sigma_r \approx 0$, 进而使得 $\sigma_i \approx \Delta\sigma$, 导致计算所得侧弯量偏小。带钢纵切后各分条初始内应力被部分释放, 但依然存在残余应力, 有限元法可以研究纵切过程中带钢内应力的变化规律。

3 分切后内应力重分布与侧弯的关系

3.1 内应力分布对带钢各分条侧弯的影响

根据有限元模型计算结果, 提取带钢不同阶段的纵向应力, 可得纵切过程中各分条的内应力。图 9a 是双边浪内应力带钢纵切后的应力云图, 图 9b 是纵切过程中的内应力演变情况。由图可知, 带钢初始内应力幅值 75 MPa, 第一次纵切将带钢分为 1/3 和 2/3 的分条, 由于纵切位置的拉应力被释放导致两个分条均发生内弯, 其中 1/3 分条向内侧弯 4.42 mm, 应力幅值减小为 15 MPa, 变成中部受压、两边受拉的平衡状态; 2/3 分条向内侧弯 3.15 mm, 应力幅值部分减小, 变为中部受拉、两边受压的平衡状态。第二次纵切将带钢分为均等的三个分条, 2/3 分条中部纵切位置的拉应力被释放, 使中间分条侧弯回复, 应力幅值减小为 22 MPa, 变为中间受拉、两边受压的对称分布的平衡状态, 而第三分条侧弯量增加到 4.42 mm, 应力幅值减小为 15 MPa, 变成和第一分条成对称关系的内应力分布形式。

图 10a 是边中复合浪内应力带钢纵切后的应力云图, 图 10b 是纵切过程中的内应力演变情况。由图可知, 带钢初始内应力幅值为 75 MPa, 第一次纵切后, 两个分条的应力平衡状态被打破, 左边 1/3 分条左侧受压, 右侧受拉, 导致向内侧弯 6.45 mm, 应力幅值减小为 49 MPa, 变为中部受拉、两边受压的平衡状态; 而右侧 2/3 分条由于左侧整体上的压应力略大于拉应力, 使得分条轻微向外侧弯, 侧弯量为 0.50 mm, 应力幅值略微增大为 81 MPa,

达到平衡状态。第二次纵切将带钢分为均等的三个分条, 2/3 分条中部纵切位置的应力被释放, 使得中间分条侧弯回复, 保持平直状态, 应力幅值减小为 64 MPa, 变成中部受压、两边受拉的对称分布, 而第三分条对应的初始内应力分布为左侧受拉、右侧受压, 故第三分条在第二次纵切后向内侧弯 6.45 mm, 应力幅值减小为 49 MPa, 变为中部受拉、两边受压的平衡状态。

图 9 双边浪带钢三等分纵切过程的内应力分布

图 10 边中复合浪带钢三等分纵切过程的内应力分布

带钢的纵向残余应力是纵向纤维变形的不均匀程度, 当带钢作为一个整体时, 这种变形不均受到彼此之间的约束而保持平衡。将带钢三等分纵切后, 内应力平衡状态被打破, 各分条通过变形释放部分残余应力, 进而达到二次平衡。

由应力云图可知, 双边浪和边中复合浪内应力带钢三等分纵切后中间分条的残余应力幅值分别为 21 MPa 和 62 MPa, 第一、第三分条分别为 15 MPa 和 49 MPa, 说明带钢纵切后各分条依然存在一定幅值的残余应力, 且高次浪形内应力带钢大于低次

浪形,这也是用解析方法计算高次浪形内应力带钢的侧弯量误差比低次浪形内应力带钢大的原因。

3.2 带钢四等分纵切后分条侧弯及内应力重分布

假定内应力幅值为 75 MPa, 双边浪内应力带钢四等分纵切后各分条侧弯及内应力重分布情况如图 11 所示, 由图可知, 四等分纵切时, 带钢第一和第四分条、第二和第三分条的初始内应力幅值相同, 且沿纵坐标轴方向对称分布, 所以两组分条侧弯量分别为 3.75 mm 和 3.26 mm, 侧弯方向均为内弯。四等分纵切后, 带钢各分条内应力幅值由 75 MPa 减小到 10 MPa, 说明在纵切过程中, 带钢大部分内应力被释放。

图 11 双边浪带钢四等分纵切过程的内应力分布

边中复合浪内应力带钢四等分纵切后各分条侧弯及内应力重分布情况如图 12 所示, 由图可知, 四等分纵切时, 带钢四个分条的内应力幅值相等, 第

图 12 边中复合浪带钢四等分纵切过程的内应力分布

一和第三分条与第二和第四分条内应力分布沿纵坐标轴方向对称分布, 故四个分条的侧弯量均为 9.01 mm, 侧弯方向为第一、第四分条内弯, 第二、第三分条外弯。四等分纵切后, 带钢各分条侧弯量较大, 这是因为各分条对应的初始内应力幅值较大, 且释放较为彻底, 内应力幅值从 75 MPa 减小到 14 MPa。

对比三等分纵切和四等分纵切后带钢各分条的残余应力幅值可知, 带钢纵切条数越多, 各分条的对应的残余应力幅值越小, 内应力释放越彻底。

4 现场验证

某钢厂热轧产线生产的 M510L 汽车大梁钢集中出现四等分纵切后第一、第四分条向外侧弯缺陷, 根据有限元计算结果可知, 纵切后第一、第四分条向外侧弯表明带钢存在潜在中浪的内应力缺陷。根据现场经验, 平整过程中采用大压下负弯辊可以改善中浪缺陷, 故此, 选取同批次钢卷以不同的弯辊力进行对比试验。

平整过程中板形控制以凸度和平坦度为主要内容, 最终以辊缝形状的控制来实现^[8, 13]。通过调整弯辊以控制辊缝形状, 改善带钢中浪内应力缺陷, 进而减小纵切后的分条侧弯, 原理如图 13 所示。

图 13 平整工作辊弯辊试验原理

试验选取四卷该批次钢卷, 其中两卷以较大的正弯辊力进行平整作业; 另两卷以较大的负弯辊力进行平整作业, 工艺参数如表 2 所示。

表 2 平整工艺参数对照表

卷号	分卷号	弯辊力/kN	轧制力/kN
M18101613R	81016131	240	3 200
	81016132	240-180	3 200
M18101614R	81016141	210	3 500
	81016142	180-300-240	3 500
M18101615R	81016151	(-180)-(-300)-(-210)	3 600
	81016152	-216	3 600
M18101616R	81016161	-120	3 200
	81016162	(-120)-(-180)	3 500

将两种平整模式下的带钢进行纵切分条，跟踪对比两种平整模式下带钢四等分纵切后各分条的侧弯量，随机取样结果如表 3 所示。

表 3 两种平整方式下带钢分条侧弯对比表

样本号	钢卷编号	平整方式	分条第一条侧弯量/mm	分条第四条侧弯量/mm
1	81016162	负弯辊	4	5
2	81016162	负弯辊	4	5
3	81016162	负弯辊	5	3
4	81016152	负弯辊	5	3
5	81016152	负弯辊	5	4
6	81016152	负弯辊	5	4
7	81016152	负弯辊	5	4
8	81016142	正弯辊	4	8
9	81016142	正弯辊	12	12
10	81016142	正弯辊	11	12
11	81016142	正弯辊	12	11
12	81016142	正弯辊	13	11

由表 3 可得，正弯辊压下带钢纵切后第一、第四分条侧弯量普遍大于 10 mm，表现为不合格；而负弯辊压下带钢纵切后分条侧弯量普遍小于 5 mm，满足质量要求。该钢厂对该批次钢卷采用优化的平整工艺参数，有效解决了 M510L 汽车大梁钢纵切后向外侧弯的缺陷。故可知，平整工作辊负弯使带钢潜在中浪内应力缺陷得到改善，进而减小带钢四等分纵切后的分条向外侧弯程度，验证了有限元计算结果的正确性。

5 结论

(1) 建立了热轧高强钢纵切后分条侧弯的有限元模型，并利用解析模型进行了验证。

(2) 带钢纵切后，各分条对应的初始内应力处于不平衡状态，分条的内应力被部分释放并重新分布，进而达到二次平衡。分条侧弯过程伴随着内应力重分布的过程，纵切后侧弯程度越大，释放的内应力越大。高次浪形纵切后各分条的残余应力大于低次浪形。纵切条数越多，各分条内应力释放越彻底，分条对应的残余应力越小。

(3) 对某热轧厂高强钢平整过程进行工艺优化，解决了汽车大梁钢 M510L 纵切后第一、第四分条外侧弯问题，验证了本论文研究过程和结果的正确性。

(4) 研究成果对轧后高强带钢内应力减量化以及纵切缺陷的预防具有指导意义和参考价值。

参 考 文 献

- [1] 王国栋. 以超快速冷却为核心的新一代 TMCP 技术[J]. 上海金属, 2008, 30(2): 1-5.
WANG Guodong. The new generation TMCP with the key technology of ultra fast cooling[J]. Shanghai Met, 2008, 30(2): 1-5.
- [2] 张清东, 李博, 张晓峰. 带钢平整轧制板形控制行为及效应的研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(8): 45-52.
ZHANG Qingdong, LI Bo, ZHANG Xiaofeng. Research on the behavior and effects of flatness control in strip temper rolling process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(8): 45-52.
- [3] 王国栋. 板形控制和板形理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.
WANG Guodong. Control and theory of plate shapes[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986.
- [4] 肖承香. 热连轧钢板纵切条时产生翘曲现象的初探及消除措施[J]. 宝钢技术, 2000(3): 1-5.
XIAO Chengxiang. Warp of hot rolled strip when slitted and its elimination measures[J]. Baosteel Technology, 2000(3): 1-5.
- [5] YOSHIHARA N, KAMIO H. Discussion on residual stress and camber after longitudinal cutting in steel plates[J]. Tetsu-to-Hagane, 1989, 75(8): 1316-1323.
- [6] YOSHIDA H, TAMARI T, ITO T. An analysis of temperature, thermal stress and shape defect during accelerated cooling in steel plates[J]. Tetsu-to-Hagane, 1997, 83(2): 121-126.
- [7] HIDVEGHY J, MICHEL J, BURSAK M. Residual stress in microalloyed steel sheet[J]. Metalurgija, 2003, 42(2): 103-106.
- [8] PARK K, KIM H, KIM K. Leveling condition in cut-to-length lines to produce low residual stress flat plate from hot rolled coils[J]. Transactions of Materials Processing, 2006, 15(4): 311-318.
- [9] PARK K, OH K. Effect of the leveling conditions on residual stress evolution of hot rolled high strength steels for cold forming[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2017, 896(1): 012117.
- [10] 赵胜林. 高强钢横切板纵剪分条时产生旁弯缺陷的原因分析[J]. 太钢科技, 2015(3): 31-35.
ZHAO Shenglin. Analysis of camber of high strength steel plates after longitudinal slitting[J]. Taigang Science and Technology, 2015(3): 31-35.

- [11] 孙力, 刘天武, 安会龙, 等. 汽车热轧大梁钢分条后出现侧弯的原因分析[J]. 中国冶金, 2018, 28(1): 49-53.
SUN Li, LIU Tianwu, AN Huilong, et al. Cause analysis on lateral bending of hot rolled steel strip for automobile beam after longitudinal cutting[J]. China Metallurgy, 2018, 28(1): 49-53.
- [12] LIU C, HE A, QIANG Y, et al. Effect of internal stress of incoming strip on hot rolling deformation based on finite element and infinite element coupling method[J]. Metals, 2018, 8(2): 92.
- [13] 赵坤鹏, 刘冀川, 韩明. 首钢京唐热轧 2250 mm 平整分卷线的张力控制和延伸率控制[J]. 轧钢, 2015, 32(6): 67-69.
ZHAO Kunpeng, LIU Jichuan, HAN Ming. Tension control and elongation control for skin pass mill in Shougang Jingtang 2250 mm hot strip mill[J]. Steel Rolling, 2015, 32(6): 67-69.
-
- 作者简介: 周兵营, 男, 1994 年出生。主要研究方向为有限元建模与仿真。
E-mail: s20171259@xs.ustb.edu.cn
邵健(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为板带轧机高精度板形质量控制。
E-mail: jianshao@ustb.edu.cn