

连续退火机组带钢瓢曲临界张力影响因素研究

刘宏扬, 葛锐, 范泽邦

(武汉科技大学 冶金与耐火材料国家重点实验室, 武汉 430080)

摘要: 带钢连续退火过程中张力是影响带钢瓢曲的关键参数之一, 合理的张力对确保带钢高效、稳定运行至关重要。为获得带钢发生瓢曲的临界张力, 制定抑制带钢瓢曲的有效工艺措施, 采用有限元软件 ABAQUS 建立“两辊一带”有限元模型, 模拟计算不同传送辊凸度、辊面平台区长度、摩擦系数和带钢宽度下带钢瓢曲的临界张力; 结合带钢表面应力分布、横向压缩应力分布, 分析传送辊凸度、辊面平台区长度、摩擦系数及带钢宽度对带钢瓢曲临界张力的影响规律。结果表明: 随传送辊凸度、摩擦系数、带钢宽度的增加, 带钢瓢曲临界张力呈现下降的变化趋势; 但随传送辊平台区长度的增加, 带钢瓢曲临界张力上升, 其中传送辊凸度对带钢瓢曲临界张力的影响最大。实际生产中, 为保障带钢高速通板的稳定性, 建议综合考虑传送辊凸度、辊面平台区长度、摩擦系数和带钢宽度等因素协同优化工艺, 确保各参数在最优范围。本文建立的带钢通板“两辊一带”模型已成功应用于宝钢冷轧退火生产线, 本文研究可为生产现场退火机组传送辊的选型优化、带钢实际张力制定及瓢曲问题的解决提供切实可行的技术指导。

关键词: 连续退火线; 带钢; 瓢曲; 临界张力; 带钢宽度; 传送辊; 辊凸度; 有限元法

中图分类号: TG 335.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24142



A Study of the Influencing Factors of Critical Tension for Strip Buckling in Continuous Annealing Unit

LIU Hongyang, GE Rui, FAN Zebang

(The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430080, China)

Abstract: During the continuous annealing process of strip steel, tension is one of the key parameters affecting the bending of the strip steel. Reasonable tension is crucial to ensure the efficient and stable operation of the strip steel. To obtain the critical tension for strip buckling and formulate effective process measures to suppress strip buckling, a “two-roller and one-strip” finite element model was established with the finite element software ABAQUS. The critical tension of strip steel buckling under different conveyor roller crown, roller surface platform length, friction coefficient between strip and conveyor rollers, and strip width was simulated and calculated. Combined with the distribution of surface stress and the magnitude of the transverse compressive stress on the strip, the influence of the transfer roller crown, roller surface platform length, friction coefficient, and strip width on the critical tension for strip buckling was analyzed. The results show that with the increase of the transfer roller crown, friction coefficient, and strip width, the critical tension of strip buckling tends to decrease. However, with the increase of the transfer

收稿日期: 2024-08-05

基金项目: 湖北省重点研发计划资助项目 (2023BCB080)

作者简介: 刘宏扬 (1999—), 男, 江西赣州人, 硕士生, 主要研究方向为金属材料加工成形。

通信作者: 葛锐 (1982—), 男, 湖北襄阳人, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料强韧化技术等。

引文格式: 刘宏扬, 葛锐, 范泽邦. 连续退火机组带钢瓢曲临界张力影响因素研究 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(1):9-17.

roller platform length, the critical tension of the strip steel buckling increases, among which the roller convexity has the greatest impact on the critical tension of the strip buckling. In actual production, to ensure the stability of high-speed strip steel passing through the plate, it is recommended to comprehensively consider factors such as roll convexity, roll surface platform area length, friction coefficient, and strip width to optimize the process, ensuring that all parameters are within the optimal range. The “two-roller and one-strip” model of strip steel through plate established in this article has been successfully applied to Baosteel’s cold rolling and annealing production line. This study can provide practical technical guidance for optimizing the selection of conveyor rollers for annealing units in production sites, determining the actual tension of strip steel, and analyzing and solving the problem of buckling.

Keywords: continuous annealing line; strip; buckling; critical buckling tensile; strip width; transfer roller; roller crown; finite element method

近年,带钢连续退火生产技术因其效率成本优势得到了快速发展和广泛应用。然而,带钢在连续退火过程中,因张力设置不合理常会发生带钢瓢曲问题^[1-4]。轻微的瓢曲影响带钢表面质量及机械性能,降低产品的合格率;严重的瓢曲会造成带钢断带迫使生产线停机,严重影响生产效率^[5-7]。目前,钢铁企业希望能够进一步提速增效,但由此带来的带钢瓢曲问题却成为制约其提速增效的技术瓶颈。因此,研究炉内因素对带钢瓢曲临界张力的影响规律,对于生产现场合理制定带钢张力和提高通板的稳定性具有重要指导意义。

连续退火生产线中,张力是决定带钢瓢曲的关键参数^[8-9],合适的张力可拉紧带钢,使带钢在运动过程中与传送辊紧密贴合;另一方面,由于传送辊有一定的凸度,带钢两端施加的张力给处于锥度区的带钢提供了一个朝带钢中心的“挤压力”,使带钢具有一定的自纠偏能力^[10-11]。然而,施加于带钢的张力与该“挤压力”为正相关的关系,张力过大导致的“挤压力”过大会使带钢表面形成不可恢复的瓢曲,这种使带钢发生不可恢复的塑性变形而产生瓢曲的临界张力称为“瓢曲临界张力”^[12]。瓢曲的产生原因以及连续退火炉内各因素对带钢瓢曲临界张力的影响规律一直是冷轧带钢连续退火领域研究的热点。许永贵等^[13-14]针对带钢的瓢曲问题,研究带钢表面横向温差分布,即带钢表面热变形不均匀而产生的“热瓢曲”,结果表明加热区段为带钢瓢曲出现的频发区域;的场哲等^[15]利用力学解析法提出带钢瓢曲的临界张力计算公式,该公式可为连续退火生产线张力的初步制定提供指导;Luo等^[16]利用数值计算的方法研究了带钢受热条件下产生的瓢曲变形,结果表明带钢瓢曲是由炉内温度、张力、辊形等多种因素共同作用的结果,但该研究局限于线性屈曲。随着信息技术的发展,Jacques等^[17]利用有

限元软件 ABAQUS 模拟分析带钢经过单辊时瓢曲的发展过程,并首次提出了带钢瓢曲的塑性积累机制;Yang等^[18]、Li等^[19]利用有限元软件 MARC 建立模型,分析不同传送辊类型对带钢瓢曲的影响,结果表明带有凸度的传送辊才会使带钢出现瓢曲;李会免等^[20]通过建立“一辊一带”有限元模型模拟连续退火炉内带钢横向张力分布,研究来料板形、传送辊辊形凸度与带钢张力之间的关系,结果表明合适的辊形凸度可均匀带钢横向张力分布,提高带钢通板的稳定性;张利祥等^[21]建立“一辊一带”有限元模型,研究了辊形与带钢尺寸对带钢瓢曲临界张力的影响。

综上所述:带钢瓢曲的原因较为复杂,通常受炉内温度、张力、辊形等多种因素影响;国内外学者普遍采用“一辊一带”仿真分析模型,研究带钢在连续退火线上的瓢曲过程。然而,冷轧连续退火炉通常包含多组传送辊,带钢通过传送辊在炉内上下往复运动,“一辊一带”分析模型与实际服役工况存在较大差异。因此,需建立更贴近实际工况的带钢通板分析模型,精确分析带钢瓢曲临界张力及影响因素。基于此,构建“两辊一带”有限元模型,模拟带钢在2个传送辊之间的通板运动过程,分析不同传送辊凸度、辊面平台区长度、带钢与传送辊之间的摩擦系数、带钢宽度对带钢瓢曲临界张力的影响规律,以期带钢实际生产工艺优化提供数据支撑,提高带钢连续退火生产技术的稳定性。

1 有限元模型

采用有限元软件 ABAQUS 进行建模仿真计算。其中:模拟对象为“两辊一带”通板模型,模型采用显式动力学求解,传送辊为带有一定凸度的 H 型辊;辊体采用解析刚体建模,力学模型与辊型如图 1(a),图中 T 表示带钢两端施加的张力。结合现场生产设

备实际状况, 设置传送辊直径为 $\Phi 650$ mm, 总长度为 1 550 mm, 辊面平台区长度为 300 mm, 辊凸度为 1.00 mm。带钢采用壳体单元, 单元类型为 S4R, 假定壳体单元大旋转、大位移、小应变, 忽略剪切挠度, 采用 Simpson 积分法计算。假定带钢各向同性, 遵循 Mises 屈服准则和相关流动定律。建立的有限元模型如图 1(b)。模拟材料为低碳电池钢, 其在 740 °C 连续退火炉内进行退火处理和通板运动。实验测得材料高温条件下的真应力真应变曲线如图 2, 材料的弹性模量为 32.4 GPa、泊松比为 0.3、屈服强度为 35 MPa。

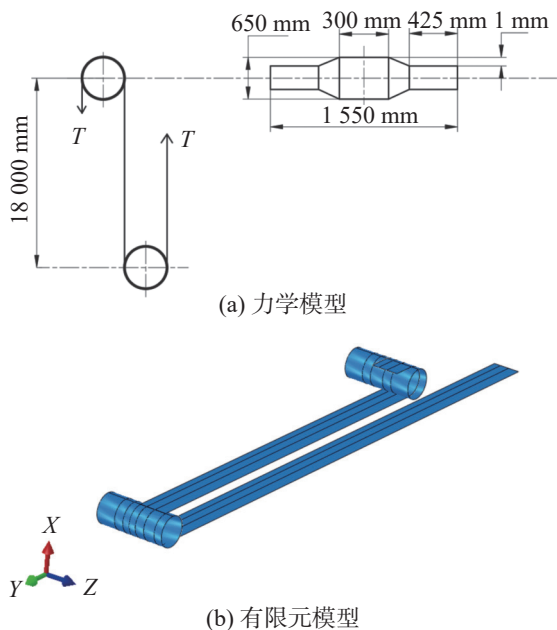


图1 力学模型示意图和有限元模型

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical model and finite element model

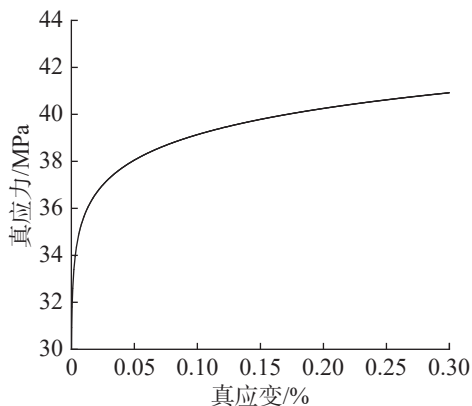


图2 740 °C 时电池钢材料的真应力真应变曲线

Fig. 2 True stress-strain curve of battery steel material at 740 °C

典型低碳电池材料带钢厚度为 0.4 mm、宽度为 1 200 mm, 两辊之间的长度为 18 000 mm, 带钢与传

送辊之间的摩擦遵循库仑摩擦定律, 摩擦系数为 0.2。模型具有几何对称性, 为提高计算效率, 仅选取带钢宽度的 1/2 作为分析对象。文献 [12,17] 中的研究发现瓢曲变形与应力集中主要发生在带钢中心区域, 因此对带钢中心部位的网格划分进行密集化处理。网格划分结果如图 3。

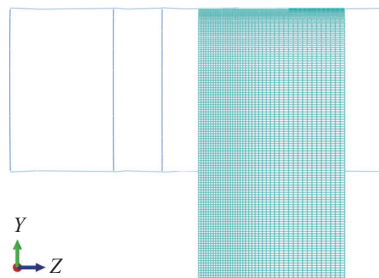


图3 带钢单元网格划分

Fig. 3 Grid division of strip steel unit

为研究传送辊凸度、辊面平台区长度、带钢与传送辊间的摩擦系数、带钢宽度对带钢瓢曲临界张力的影响, 设计不同工况参数, 如表 1。采用控制变量法, 探究单个因素的影响规律时, 设定模型其余参数为标准工况。标准工况为: 传送辊凸度 1.00 mm, 辊面平台区长度 300 mm, 带钢宽度 1 200 mm, 摩擦系数 0.2。通过施加不同的张力载荷, 仿真分析带钢表面应力分布和应变状况, 根据带钢表面是否出现半圆管形褶皱, 判断该张力条件下带钢是否出现瓢曲, 获得相应工况的带钢瓢曲临界张力。

表 1 设计的工况参数

Tab. 1 Design condition parameters

传送辊凸度/mm	辊面平台区长度/mm	摩擦系数	带钢宽度/mm
0.50	200	0.1	1 000
0.75	300	0.2	1 100
1.00	400	0.3	1 200
1.25	500	0.4	1 300
1.50			

2 结果与讨论

2.1 传送辊凸度对带钢瓢曲张力的影响

模拟计算传送辊凸度对带钢瓢曲临界张力的影响, 结果如图 4。图 4 显示: 在其余参数为标准工况的条件下, 传送辊凸度由 0.50 mm 增至 1.50 mm 时, 带钢瓢曲的临界张力由 10.25 MPa 降至 3.00 MPa, 临界张力随传送辊凸度的增加而下降。同样的张力作用下, 传送辊凸度较大时带钢更易发生瓢曲。

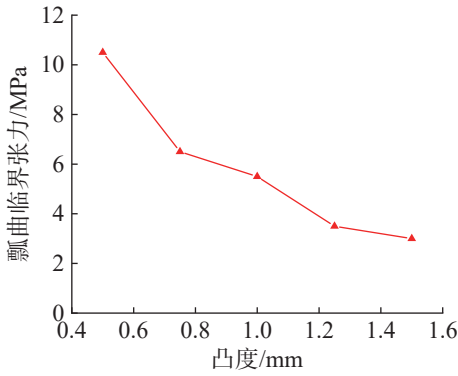


图4 传送辊凸度对带钢瓢曲临界张力的影响

Fig. 4 Effect of conveyor roller crown on the critical tension of strip steel curvature

带钢张力 5.50 MPa 条件下, 传送辊凸度对带钢表面应力分布及变形的影响如图 5。由图 5 可知: 随传送辊凸度的增加, 带钢表面应力逐步增加; 凸度增至 1.50 mm 时, 带钢表面应力最大达到 36.15 MPa, 表面出现明显的纵向瓢曲。由于传送辊凸度的存在, 导致带钢在横向出现速度差异, 根据线速度 (v) 公式 $v=\omega R$ 可知 (ω 为传送辊旋转角速度, R 为传送辊半径), 平台区带钢的速度大于锥度区, 边缘速度较低的带钢朝中心靠拢。

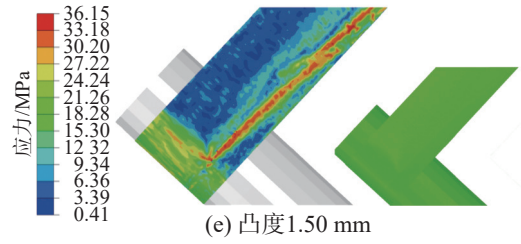
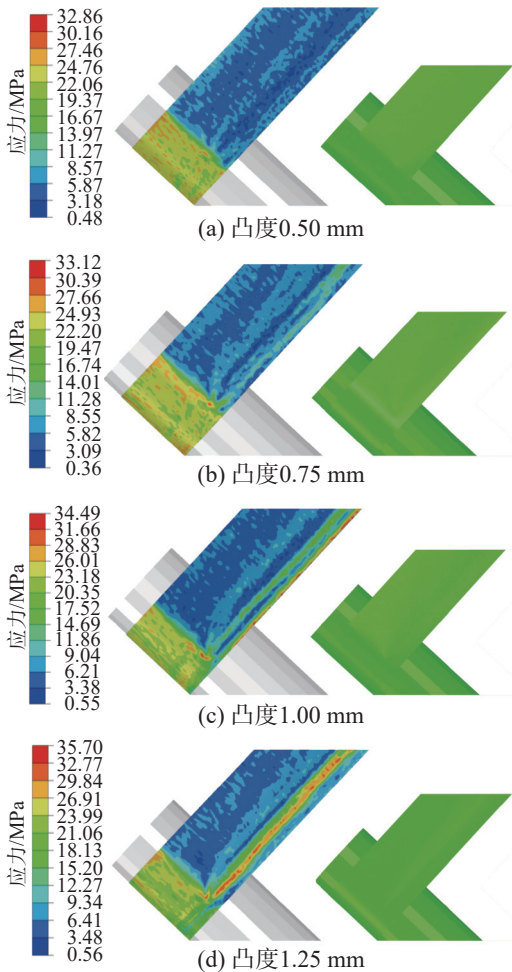
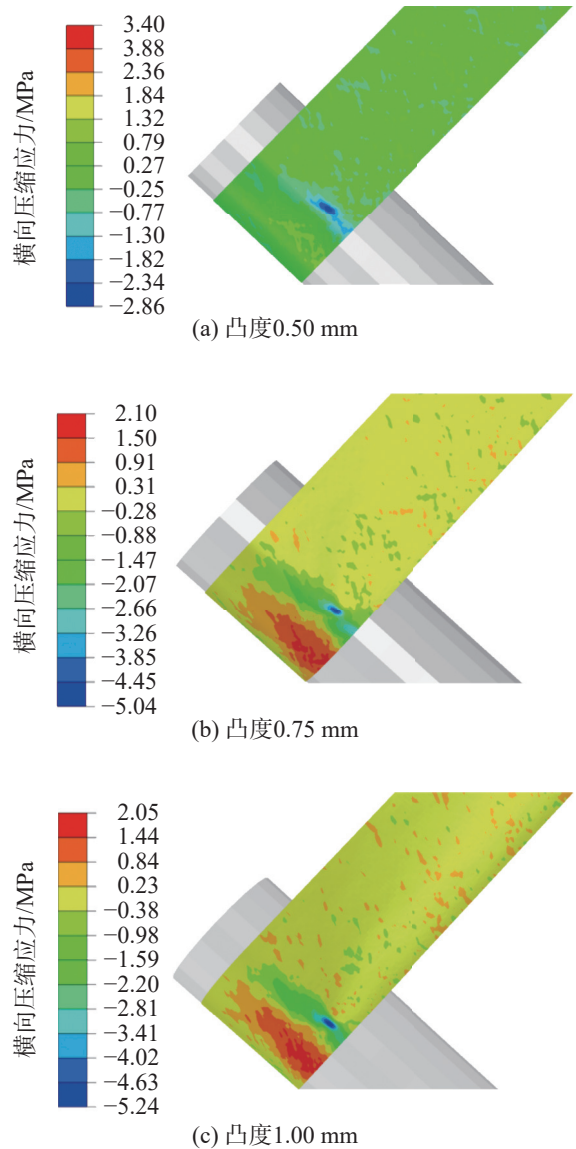


图5 不同传送辊凸度下带钢表面应力分布及变形

Fig. 5 Stress contours and deformation of strip steel surface under different conveyor roller crowns

图 6 为带钢张力 5.50 MPa 条件下, 传送辊凸度对带钢表面横向压缩应力分布的影响。由图 6 可知: 传送辊凸度由 0.50 mm 增至 1.50 mm 时, 带钢表面最大横向压缩应力由 2.86 MPa 增至 7.17 MPa, 随传送辊凸度的增加, 带钢表面横向压缩应力增大; 此外, 带钢横向张应力不均匀程度也增加, 从而引起带钢局部纵向拉伸不均匀现象, 致使带钢瓢曲的产生。



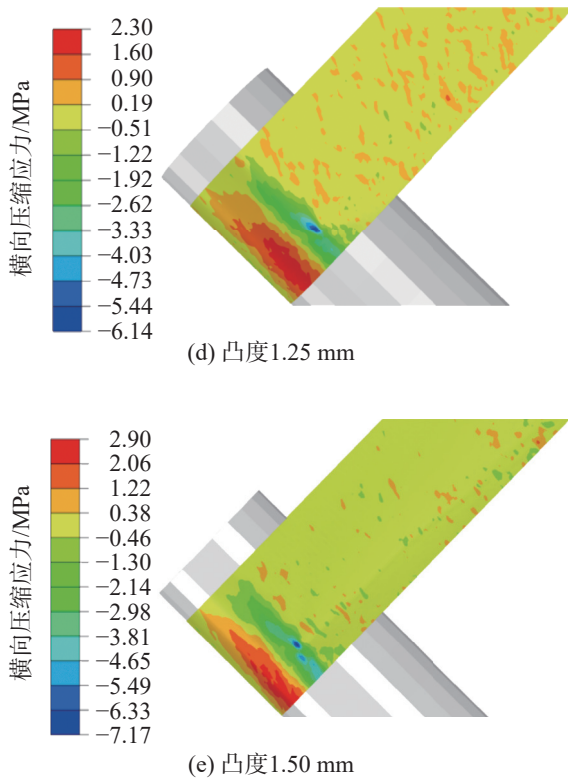


图 6 不同传送辊凸度下带钢表面横向压缩应力分布
 Fig. 6 Transverse compressive stress distribution on the surface of steel strip under different roller crowns

综上所述, 随传送辊凸度的增加, 带钢瓢曲临界张力逐渐降低。

2.2 平台区长度对带钢瓢曲张力的影响

模拟计算辊面平台区长度对带钢瓢曲临界张力的影响, 结果如图 7。

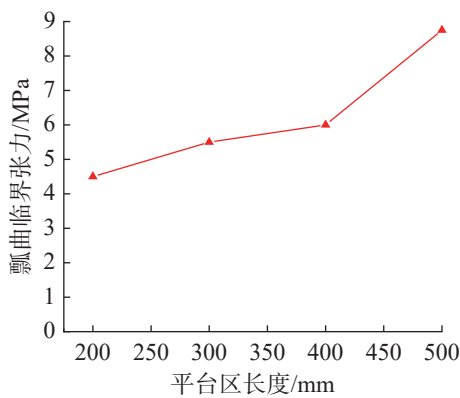


图 7 平台区长度对带钢瓢曲临界张力的影响
 Fig. 7 Effect of platform length on critical tension of strip steel curvature

图 7 显示: 在其余参数为标准工况的条件下, 平台区长度由 200 mm 增至 500 mm 时, 带钢瓢曲的临界张力由 4.50 MPa 增至 8.75 MPa; 随平台区长度的增加, 带钢瓢曲临界张力呈现上升趋势。

带钢张力 5.50 MPa 条件下, 辊面平台区长度对

带钢表面应力分布及变形的影响如图 8。由图 8 可知: 随辊面平台区长度的增加, 带钢表面应力逐渐降低; 当平台区长度由 200 mm 增至 500 mm 时, 带钢表面最大应力由 35.84 MPa 降至 30.11 MPa。这是由于辊面平台区长度增加, 带钢与传送辊之间的有效贴合面积增大, 使带钢表面横向张应力不均匀程度降低, 带钢中心部位的高应力状况得到缓解, 表面应力逐渐均匀, 塑性应变程度相应减小。

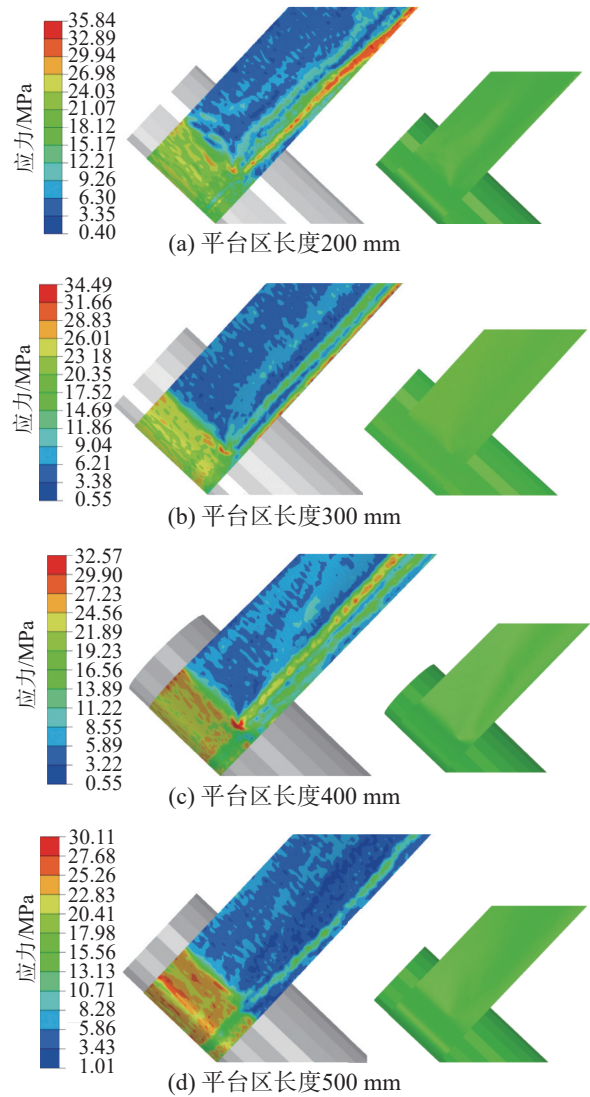


图 8 不同平台区长度下带钢表面应力分布及变形
 Fig. 8 Stress contours and deformation of strip steel surface under different platform lengths

图 9 为带钢张力 5.50 MPa 条件下, 辊面平台区长度对带钢表面横向压缩应力分布的影响。由图 9 可看出: 平台区长度由 200 mm 增至 500 mm 时, 带钢表面最大横向压缩应力由 6.35 MPa 降至 4.83 MPa。辊面平台区长度增大时, 处于传送辊锥度区域的带钢减少, 带钢表面横向压缩状态有所减缓。因此, 辊面平台区长度越长, 带钢瓢曲临界张力越大。

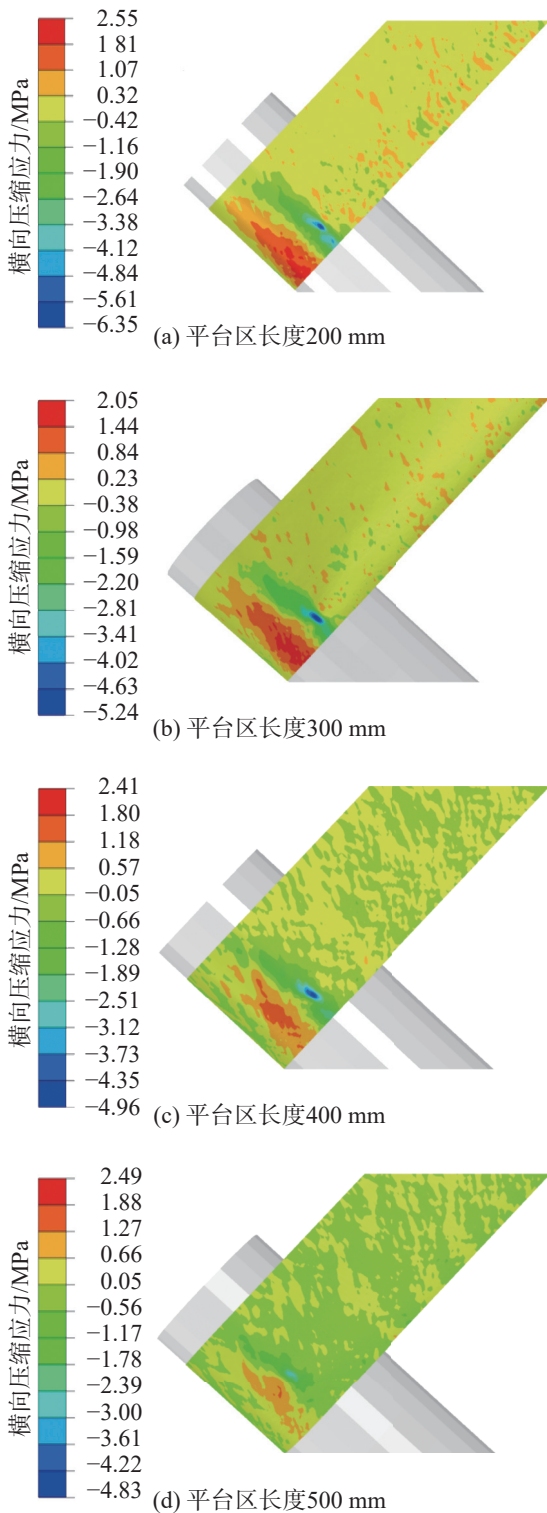


图9 不同平台区长度下带钢表面横向压缩应力分布

Fig. 9 Transverse compressive stress distribution on the surface of steel strip under different platform lengths

2.3 摩擦系数对带钢瓢曲临界张力的影响

模拟计算带钢与传送辊之间的摩擦系数对带钢瓢曲临界张力的影响,结果如图10。图10显示:在其余参数为标准工况的条件下,摩擦系数由0.1增

至0.4时,带钢瓢曲的临界张力由7.00 MPa降至3.00 MPa。表明带钢瓢曲临界张力随摩擦系数的增加呈下降趋势。

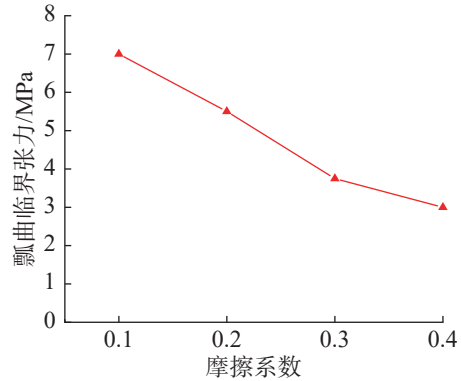


图10 摩擦系数对带钢瓢曲临界张力的影响

Fig. 10 Effect of friction coefficient on critical tension of strip steel curvature

带钢张力5.50 MPa条件下,摩擦系数对带钢表面应力分布及变形的影响如图11。对比图11(a)~(d)发现:随摩擦系数的增加,带钢表面高应力区域面积增加;摩擦系数为0.1时,带钢表面应力较为均匀,最大应力为33.09 MPa;摩擦系数为0.4时,最大应力达到36.89 MPa,带钢发生明显瓢曲。这是因为随摩擦系数的增加,当带钢出现屈曲时,屈曲舒展更困难,导致带钢在运动过程中塑性不断积累,当塑性积累达到一定程度最终会演变成瓢曲变形。图12为带钢张力5.50 MPa条件下,摩擦系数对带钢表面横向压缩应力分布的影响。

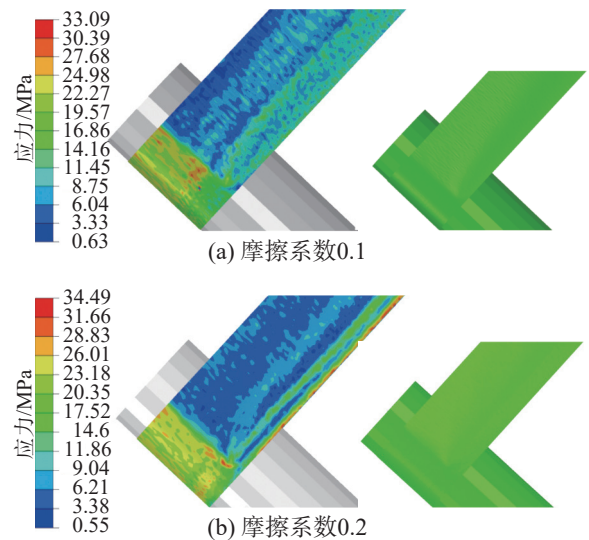


图11 摩擦系数对带钢表面应力分布及变形的影响

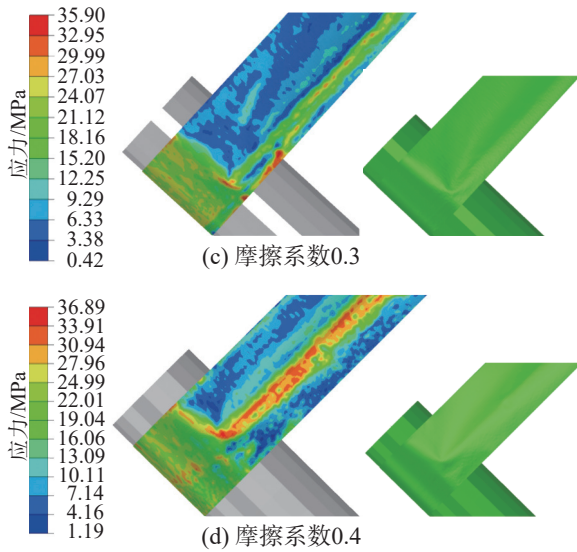


图11 不同摩擦系数下带钢表面应力分布及变形
 Fig. 11 Stress contours and deformation of strip steel surface under different friction coefficients

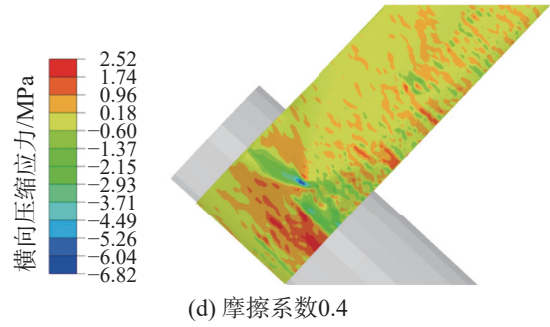


图12 不同摩擦系数下带钢表面横向压缩应力分布
 Fig. 12 Transverse compressive stress distribution on the surface of steel strip under different friction coefficients

由图 12 可知: 摩擦系数由 0.1 增至 0.4 时, 带钢表面横向压缩应力由 4.31 MPa 增至 6.82 MPa, 带钢表面处于高压压缩应力的区域明显增大。根据 Jacques 等^[17] 的研究, 摩擦系数增大导致带钢表面横向压缩应力增大的同时, 带钢屈曲幅度也增大, 瓢曲更易产生。因此, 摩擦系数越大, 带钢瓢曲临界张力越小。

2.4 带钢宽度对带钢瓢曲临界张力的影响

模拟计算带钢宽度对带钢瓢曲临界张力的影响, 结果如图 13。图 13 显示: 在其余参数为标准工况的条件下, 带钢宽度由 1 000 mm 增至 1 300 mm 时, 带钢瓢曲临界张力由 8.50 MPa 降至 4.50 MPa; 随带钢宽度的增加, 带钢瓢曲临界张力减小。在相同张力条件下, 宽度较大的带钢更易发生瓢曲。

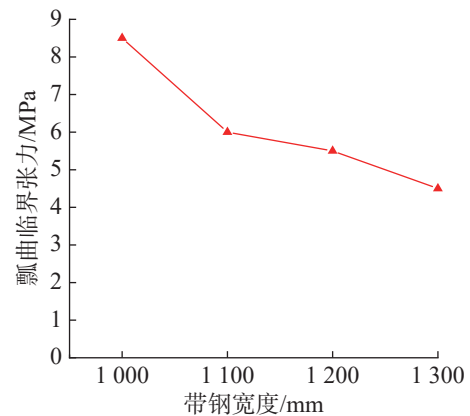
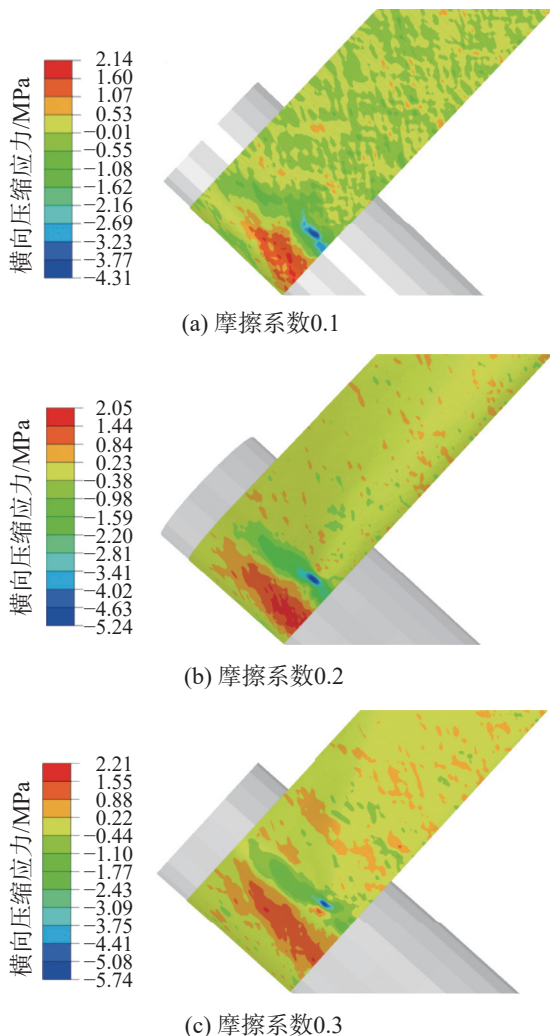


图13 带钢宽度对带钢瓢曲临界张力的影响
 Fig. 13 Effect of strip width on critical tension of strip steel curvature

带钢张力 5.50 MPa 条件下, 不同宽度带钢表面应力分布及变形如图 14。由图 14 可知: 随带钢宽度的增加, 带钢表面应力逐渐增大; 带钢宽度由 1 000 mm 增至 1 300 mm 时, 带钢表面最大应力由 31.51 MPa 增至 35.70 MPa; 带钢宽度为 1 300 mm 时, 带钢表面出现明显瓢曲。

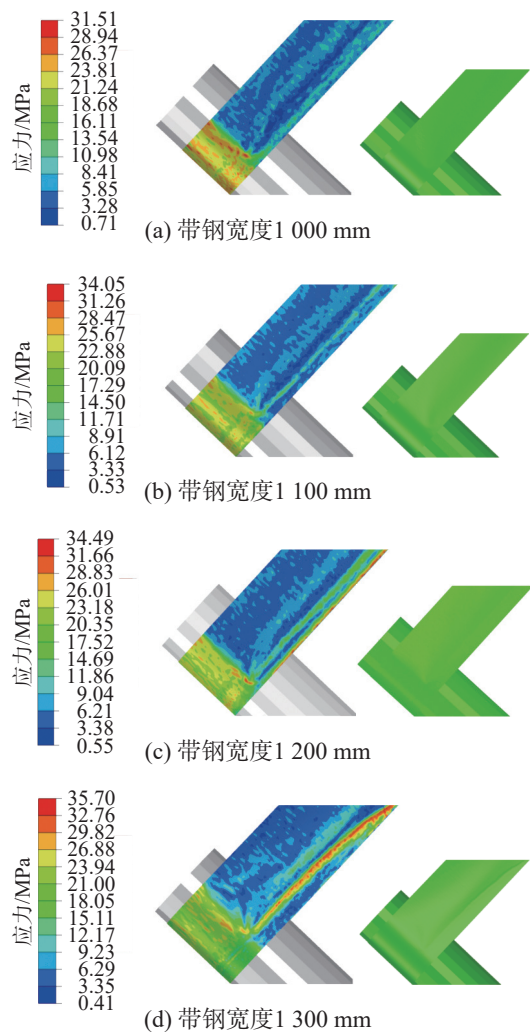
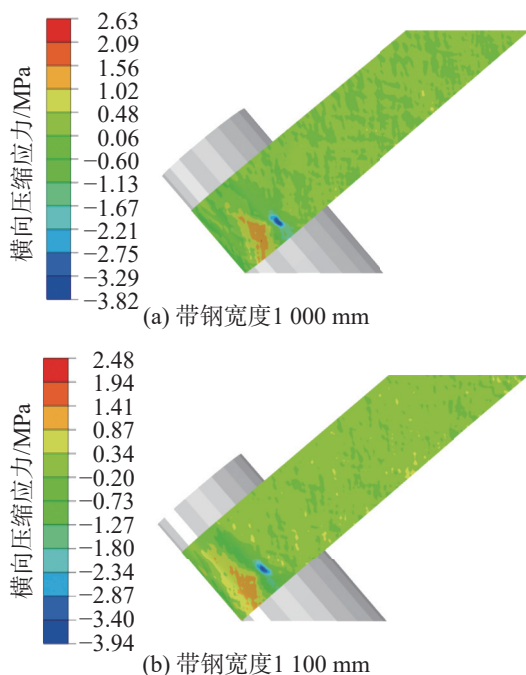
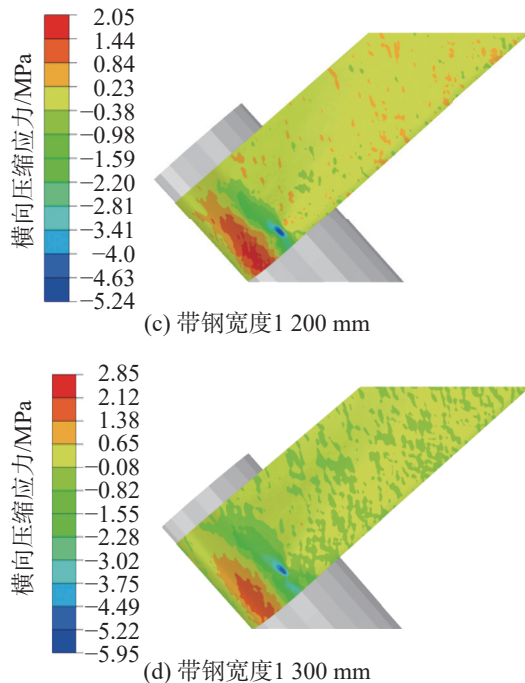


图14 不同带钢宽度下带钢表面应力分布及变形

Fig. 14 Stress contours and deformation of strip steel surface under different strip widths



(b) 带钢宽度1 100 mm



(d) 带钢宽度1 300 mm

图15 不同带钢宽度下带钢横向压缩应力分布

Fig. 15 Transverse compressive stress distribution on the surface of steel strip under different strip widths

图15为带钢张力5.50 MPa条件下,带钢宽度对带钢表面横向压缩应力分布的影响。从图15可知:带钢宽度由1 000 mm增至1 300 mm时,带钢表面最大横向压缩应力由3.82 MPa增至5.95 MPa,带钢表面横向压缩应力与带钢宽度成正比关系。这是由于辊面平台区长度固定,随带钢宽度增加,带钢横向与传送辊贴合的有效宽度减小,带钢横向拉应力不均匀性增加,致使带钢在辊肩易出现横向压缩应力区。通常情况下,带钢瓢曲是由弹性屈曲演变而来的,随带钢宽度的增加,带钢对屈曲部分的舒展阻滞作用更显著,屈曲更易演变成瓢曲。

综上所述,冷轧退火机组可通过降低传送辊凸度、增加辊面平台区长度、降低带钢与传送辊之间的摩擦系数、减小带钢宽度等方式来提高带钢瓢曲的临界张力。实际生产中,建议综合考虑传送辊凸度、辊面平台区长度、摩擦系数和带钢宽度等因素来协同优化带钢连续退火工艺,确保各参数在最优范围,保障带钢高速通板运行的稳定性。

3 结论

为提升连续退火带钢通板运行的稳定性,构建带钢“两辊一带”有限元仿真计算模型,分析传送辊凸度、辊面平台区长度、带钢与传送辊之间的摩擦系数、带钢宽度4个因素对带钢瓢曲临界张力的影响规律,得到如下主要结论:

1) 带钢由于受到横向压缩应力作用易发生起皱瓢曲。带钢表面最大横向压缩应力位于辊肩, 此处为带钢瓢曲高发区域; 带钢横向压缩应力随传送辊凸度、摩擦系数、带钢宽度的增加而增加, 但随辊面平台区长度的增加而降低。

2) 随传送辊凸度、摩擦系数、带钢宽度的增加, 带钢瓢曲临界张力下降; 但随辊面平台区长度的增加, 带钢瓢曲临界张力上升。

本文建立的带钢通板“两辊一带”模型已成功应用于宝钢冷轧退火生产线, 本文研究可为现场带钢张力的制定及带钢瓢曲问题的解决提供切实可行的技术指导。

参考文献:

- [1] 居发亮. 我国冷轧板带材生产技术现状及发展方向 [J]. *内燃机与配件*, 2018(16):121-122.
JU F L. Present situation and development direction of cold-rolled sheet and strip production technology in China[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2018(16):121-122.
- [2] 张理扬, 万照堂, 张文军. 冷轧超高强度钢退火板形优化技术研究进展 [J]. *金属热处理*, 2022, 47(11):230-237.
ZHANG L Y, WAN Z T, ZHANG W J. Research progress of annealed strip flatness optimization technology for cold-rolled ultra-high-strength steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2022, 47(11):230-237.
- [3] 刘亚星, 方永, 滕华湘, 等. 带钢退火关键工艺与产品质量综合控制技术概述 [J]. *轧钢*, 2022, 39(4):27-34.
LIU Y X, FANG Y, TENG H X, et al. Overview of key process and product quality comprehensive control technology of strip annealing[J]. *Steel Rolling*, 2022, 39(4):27-34.
- [4] 岳军. 浅析冷轧带钢退火技术的发展 [J]. *中国金属通报*, 2018(3):88-89.
YUE J. Analysis on the development of annealing technology for cold rolled strip[J]. *China Metal Bulletin*, 2018(3):88-89.
- [5] 何建锋, 王鲁, 李庆胜. 连续退火机组缓冷炉带钢瓢曲原因分析 [J]. *宝钢技术*, 2020(2):26-31.
HE J F, WANG L, LI Q S. Cause analysis of strip heat buckling in slow cooling furnace of continuous annealing line[J]. *Baosteel Technology*, 2020(2):26-31.
- [6] SAHAY S S, KAPUR P C. Model based scheduling of a continuous annealing furnace[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2007, 34(3):262-268.
- [7] 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.
- [8] 张利祥, 李俊, 张理扬. 连续退火/热镀锌带钢瓢曲机理研究 [J]. *金属热处理*, 2012, 37(3):77-80.
ZHANG L X, LI J, ZHANG L Y. Spooning distortion mechanism of strip during continuous annealing and hot galvanizing[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2012, 37(3):77-80.
- [9] WANG R, BAI Z H, DU J C, et al. Comprehensive tension setting optimisation technique for a cold rolled strip during continuous annealing[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2018, 45(6):523-527.
- [10] 白振华, 陈双玉, 钱承, 等. 连续退火过程带钢跑偏模型及其影响因素 [J]. *塑性工程学报*, 2016, 23(2):28-34.
BAI Z H, CHEN S Y, QIAN C, et al. Model and influence factors of strip running deviation in CAPL[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2016, 23(2):28-34.
- [11] BAI Z H, WANG R, DU J C, et al. Modelling of strip buckling in the continuous annealing process[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2017, 44(10):782-788.
- [12] 刘艳红. 连续退火生产线带钢稳定通板技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
LIU Y H. Research on stable plate passing technology for continuous annealing production line strip steel [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.
- [13] 许永贵, 陈守群, 孙中建. CAPL 炉内带钢热瓢曲机理的探讨 [J]. *华东冶金学院学报*, 1994, 11(2):1-6.
XU Y G, CHEN S Q, SUN Z J. Study and discussion of the mechanism for the hot-waved surface of strip in the CAPL furnace[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 1994, 11(2):1-6.
- [14] 赵永生, 许永贵, 顾锦荣, 等. 加热室炉温对带钢热瓢曲影响的研究 [J]. *华东冶金学院学报*, 1994, 11(2):81-88.
ZHAO Y S, XU Y G, GU J R, et al. Study on influence of the furnace temperature in the heating chamber on the hot waved surface of strip[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 1994, 11(2):81-88.
- [15] 的场哲, 阿高松男, 青木至. 连续烧钝ライン内の挫屈・蛇行におよすロールクラウソの影響 [J]. *CAMP-ISIJ*, 1992, 5(5):1459-1462.
- [16] LUO H, DUNBAR W S, MOORE J E. Buckling analysis of a heated steel strip in a continuous annealing furnace[J]. *J Manuf Sci Eng*, 1999, 121:326-335.
- [17] JACQUES N, ELIAS A, POTIER-FERRY M, et al. Buckling and wrinkling during strip conveying in processing lines[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 190(1/2/3):33-40.
- [18] YANG J, TANG D, SU L, et al. Effect of roller shapes on strip buckling in a continuous annealing furnace[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2011, 18(3):297-302.
- [19] 杨静, 苏岚, 唐荻, 等. 连退炉导向辊热凸度对辊形及带钢应力分布的影响 [J]. *沈阳工业大学学报*, 2011, 33(3):276-281.
YANG J, SU L, TANG D, et al. Influence of thermal crown of guide roller in continuous annealing furnace on roller shape and stress distribution of strip steel[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2011, 33(3):276-281.
- [20] 李会免, 刘建雄, 李俊洪. 连续退火炉内带钢横向张力分布研究 [J]. *热加工工艺*, 2010, 39(4):148-150, 158.
LI H M, LIU J X, LI J H. Research of transverse tension distribution on steel strip in continuous-annealing furnace[J]. *Hot Working Technology*, 2010, 39(4):148-150, 158.
- [21] 张利祥, 李俊, 张理扬. 连续退火机组带钢瓢曲临界张力的研究 [J]. *钢铁*, 2012, 47(6):42-45.
ZHANG L X, LI J. Study on strip critical buckling tensile in continuous annealing lines[J]. *Iron and Steel*, 2012, 47(6):42-45.