

# 连退线上带钢张应力横向分布的有限元仿真

张清东 常铁柱 戴江波 王文广

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

**摘要** 为了获得带钢瓢曲发生的临界张力条件模型, 建立抑制其产生的有效工艺措施, 运用有限元中几何非线性屈曲计算方法, 结合冲压领域的弹塑性屈曲理论, 定量研究了退火炉内的七项关键因素——导向辊辊形、来料板形、带钢宽度、横向温差、焊缝位置、辊面摩擦系数和总张力——对带钢张应力横向分布的影响规律和作用机制。仿真发现导向辊辊形、带钢厚度等对张应力横向分布影响最为显著, 揭示了瓢曲行为与横向张应力分布的内在关系, 为制定抑制“热瓢曲”提供了有效的技术思路, 并取得了良好的现场控制效果。

**关键词** 连续退火炉; 张应力; 横向分布; 有限元法; 瓢曲

**分类号** TG 335.11

连续退火炉内带钢“热瓢曲”问题一直都是困扰生产的技术难题, 关于高温退火炉内带钢“热瓢曲”的产生机理、影响因素和抑制措施等, 目前仍是研究热点。带钢张应力横向分布是决定连续退火炉内带钢“热瓢曲”发生与否的关键因素之一, 而使之均匀化是防止带钢瓢曲产生的主要技术思路。本文运用有限元分析手段, 详细分析了退火炉内各相关因素对带钢张应力横向不均匀分布的影响。

## 1 带钢张应力横向分布与瓢曲行为

传统观点认为“热瓢曲”是退火炉内带钢横向温差所致的一种热变形现象, 而日本学者的场哲<sup>[1-2]</sup>认为导向辊的凸度在旋转过程中对带钢宽度方向的“挤压”导致了瓢曲的产生; 但笔者认为<sup>[3]</sup>上述观点并不完全正确, 因此首次提出了带钢瓢曲的力学机理类同于薄板冲压成形中的起皱、皱曲行为<sup>[4]</sup>, 即带钢纵向局部不均匀拉伸引起的横向诱导压应力导致了瓢曲现象的产生。

由于带钢张应力横向分布是带钢瓢曲力学行为的关键决定因素, 因此研究带钢横向瓢曲必须首先研究带钢张应力横向分布。

根据退火炉内带钢运行实际情况, 影响带钢横向张应力分布的因素有导向辊辊形、来料板形、带钢厚度、宽度、横向温差、焊缝位置、辊面摩擦和

总张力等。根据生产实际, 选取各主要影响因素设计了如表 1 的计算工况表。

表 1 不同因素组合下的工况表

Table 1 Operating mode table in different combinations

来料板形	中浪, 边浪
摩擦因数	0.1, 0.2
平均温度, $T/^\circ\text{C}$	OA 段 400, DF 段 700
张应力平均值, $\bar{\sigma}/\text{MPa}$	5, 10, 15
辊凸度, $C/\text{mm}$	0.5, 1, 1.5
焊缝位置, $H/\text{mm}$	$B/2, B, 2B,$
带厚, $h/\text{mm}$	0.15, 0.175, 0.20, 0.225, 0.25
带宽, $B/\text{mm}$	700, 800, 900, 1000, 1100, 1200

注: 材质为 T2.5; 横向温差为负凸度; OA 段表示过时效段, HF 段表示加热炉段。

## 2 张应力横向分布的有限元仿真

以国内某 1420 连续退火炉为对象, 如图 1 所示, 运用 Marc 通用有限元软件进行数值仿真计算, 主要考虑了表 1 中几种因素组合工况下对带钢张应力横向分布的影响规律。

### 2.1 有限元模型和影响指标的定义

考虑到连续退火炉内空间结构、载荷的重复性规律和对称性特点以及距离导向辊 2 m 以外带钢张应力横向分布的趋于均匀化特点, 从  $L/2$  位置(即上、下两炉辊距离的中点)截断, 取炉内带钢行程的一个周期来抽象简化, 建立了如图 2 所示的力学模型——“一段带钢包含两个导向辊”模型。文中用到的各参数如图 2 所示, 其中  $L$  为上下导向辊间距, 一般为 18 m;  $H$  为焊缝位置;  $C$  为

收稿日期: 2005-09-09 修回日期: 2006-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 598351700); 国家“九五”攻关项目 (No. 95-527-01-02-04)

作者简介: 张清东(1965—), 男, 教授, 博士生导师

导向辊凸度;  $a$  为导向辊平直段长度 500 mm;  $b$  为导向辊倾斜段长度, 525 mm.

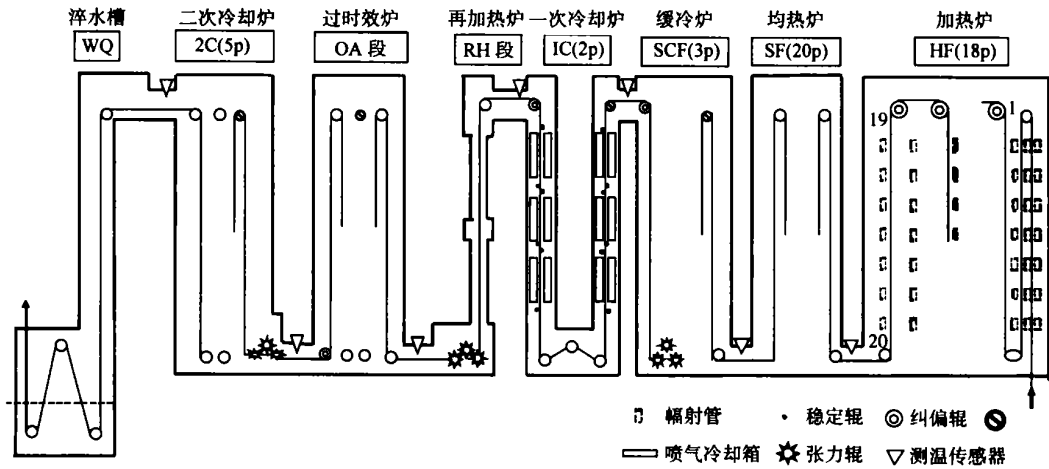


图 1 连续退火炉内各区段示意图

Fig. 1 Sketch map of each section in CAPL

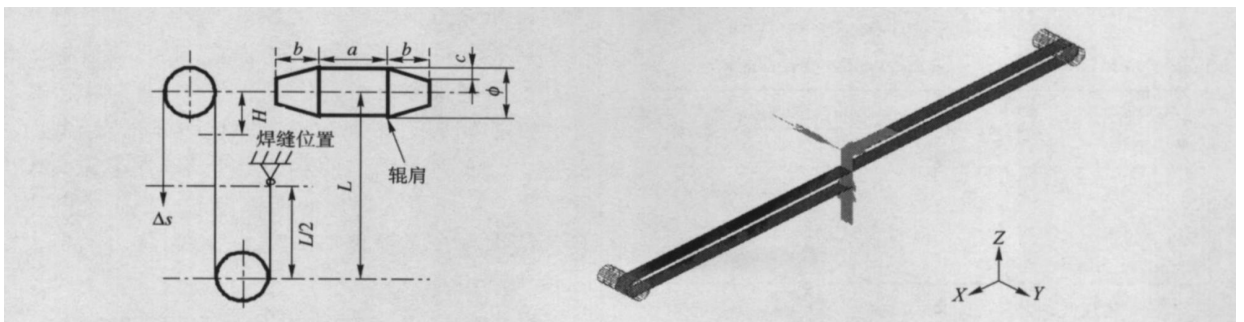


图 2 力学模型示意图和有限元模型

Fig. 2 Mechanical model and finite element model

(1) 材料弹性模量与温度的关系函数为<sup>[5]</sup>:

$$E(t) = 208\,570 - 0.209\,86t^2.$$

(2) 屈服应力与温度的函数<sup>[4]</sup>为:

$$\sigma_s = 46.9g \exp(-0.004\,474t) \quad (\text{MPa}).$$

式中,  $g$  为重力加速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ; 材料的线膨胀系数<sup>[5]</sup>  $\alpha = 10^{-5}$ , 泊松比  $\mu = 0.22$ . 在此忽略材料泊松比随温度的变化而变化的特性.

因此退火炉内最容易产生热瓢曲的区段——加热段 HF (700 °C) 和一次过时效段 (400 °C)——对应的带钢弹性模量分别为 105.74 GPa 和 175.04 GPa, 带钢屈服应力分别为 20.47 MPa 和 78.34 MPa.

在提取结构的临界载荷及模态上选用反迭代法直接迭代求解屈曲特征值方程的特征根和特征向量; 因屈曲涉及到几何非线性问题, 模型采用 Updated-Lagrange 格式增量分析法. 另外, 由宽度方向对称性, 带钢模型取 1/2 板宽划分网格.

(3) 约束. 为正确施加带钢截断边的载荷以及约束 ( $X$  为带钢宽度方向,  $Y$  为带钢长度方向,

$Z$  为带钢厚度方向), 通过各种约束情况下有限元计算结果的对比最终确定截断边  $Z$  方向的位移约束、绕  $X$  轴的旋转约束、绕  $Y$  轴的旋转约束、绕  $Z$  轴的旋转约束均为零, 两截断边中一截断边给刚性位移 ( $\Delta S$ ), 另一端铰支, 如图 2 所示; 1/2 板宽处施加对称约束.

(4) 影响指标的定义. 为方便描述张应力横向分布, 定义两个指标: 张应力分布不均匀度 (即带宽中间结点与侧边界结点的张应力之比) 和有效影响长度  $L_r$  (从带钢与导辊的切线到张应力不均匀度为 1 处所包含带钢长度). 另外, 本文用  $S_{0.5}, S_{1.0}$  分别表示辊下距离导向辊中心长度为 0.5, 1.0 m 的带钢横截面.

## 2.2 导向辊辊形对张应力横向分布的影响

根据现场实际辊形, 选取导向辊半径凸度  $C$  分别为 0.5, 1 和 1.5 mm 三种情况进行了比较分析<sup>[9]</sup>, 如图 3 所示. 其中凸度为 0.5, 1.0 mm 辊形对应  $a = 500$  mm,  $b = 525$  mm; 凸度为 1.5 mm 辊形对应  $a = 300$  mm,  $b = 200$  mm. 表 2 为对应工

况带钢温度  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，带钢规格  $0.175\text{ mm}\times 800\text{ mm}$ ，焊缝位置为  $B/2$ ，截断边的平均张应力的平均值约 5, 10, 15 MPa 时，由有限元计算出的导向辊凸度  $C$  对有效长度的影响。可见，辊形对张应力分布的影响明显，导向辊凸度越大，带钢上的张应力横向分布越不均匀。另外从应力分布云图发现，带钢在导向辊辊肩处存在明显的张应力集中。

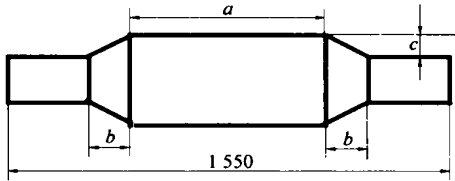


图3 导向辊辊形

Fig 3 Roll profile of the guide roll

表2 辊形对张应力分布的影响

Table 2 Effect of roll profile on distribution of tensile stress

平均张应力/MPa	$L_r/m$		
	$C_1=0.5\text{ mm}$	$C_2=1.0\text{ mm}$	$C_3=1.5\text{ mm}$
5	0.4	0.5	1.1
10	0.4	0.55	1.4
15	0.4	0.6	1.6

注：带钢规格  $0.175\text{ mm}\times 800\text{ mm}$ 。

### 2.3 来料板宽对张应力横向分布的影响

在宽度变化而其他参数不变的情况下，选取相应工况（OA 段带钢  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，板厚  $0.2\text{ mm}$ ，焊缝位置  $H=2B$ ）的有限元计算结果进行对比分析，可以得到带钢宽度对张应力横向分布的影响规律： $B$  越大，辊形的有效影响区域越大即  $L_r$  值越大，如表 3 所示。究其原因，当辊形确定后，导向辊中间平直段宽度即  $a$  值固定，带钢越宽时，辊形发挥作用的有效宽度相对于整个板宽就越窄，因而宽度方向上的张应力不均匀度增加，导致导向辊附近张应力不均匀度的增加，相应的  $L_r$  值也增大。

表3 带钢宽度对  $L_r$  值的影响

Table 3 Effect of strip width on  $L_r$

平均张应力/MPa	$L_r/m$	
	$B=900\text{ mm}$	$B=1000\text{ mm}$
4.98	0.65	0.95
10.01	0.80	1.15
15.06	0.85	1.25

注： $h=0.2\text{ mm}$ ， $C=0.5\text{ mm}$ 。

### 2.4 来料板形对张应力横向分布的影响

板形产生的实质是带钢横向各点在纵向上的不均匀延伸，不同的浪形对应不同张应力横向分布。生产实际中往往是辊形和板形同时作用改变带钢张应力横向分布。为此，用 pro/E 构建 20 IU（1 IU 相当于相对长度差为  $10^{-5}[7]$ ）平坦度下对应的双边浪和中浪曲面模拟来料板形；其中，绕在导向辊上的带钢则施加与平坦度等效的横向温度分布来模拟来料板形，然后导入 Marc 进行计算。来料板形采用三角函数描述， $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  下带钢的热膨胀系数为  $10^{-5}$  即 1 IU 大小，因此板形和温差的描述函数一致。对于  $0.15\text{ mm}\times 800\text{ mm}$  规格，浪宽  $400\text{ mm}$ ，HF 段  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，凸度  $0.5\text{ mm}$ ，从计算结果来看：中浪很容易导致带钢在辊肩处应力集中而使得在较小张力下进入塑性变形；而边浪中间平坦区和导向辊平直段接触良好，当边浪浪宽超过辊肩时还可以消除辊肩的影响，因此边浪板形对应的带钢张应力横向分布不均匀程度较中浪要小。如图 4 所示，带钢和导向辊相切处  $S_{0.0}$  横截面张应力分布因受辊形的影响最为不均，距导向辊中心  $0.5\text{ m}$ ， $1.0\text{ m}$  对应的横截面  $S_{0.5}$ ， $S_{1.0}$  处的张应力横向分布只受板形的影响，浪高越大的地方张应力越小。

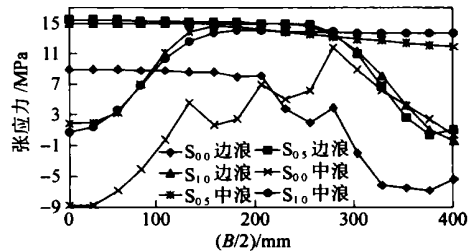


图4 20 IU板形下各截面张应力横向分布情况

Fig. 4 Transverse distribution of tension in different cross sections under 20 IU

### 2.5 横向温差对张应力横向分布的影响

根据实际测量结果，加热炉内横向温度最大温差为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最小  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而且顶辊室呈正凸度分布，底辊室呈负凸度分布。在带钢横向温度不均匀分布下，纵向纤维条产生的热胀不均也会导致张应力横向分布不均，而且随着横向温差的增大，带钢横向张应力分布不均的程度加剧<sup>[3,8]</sup>。因此，本文就  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  温差下，用余弦函数对炉内带钢横向温度分布进行热力耦合模拟，为避免温度对整体张力水平的影响，平均温度应为  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 5 为  $0.15\text{ mm}\times 800\text{ mm}$  规格， $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  负凸度温差情况下  $S_{0.0}$ ， $S_{0.5}$ ， $S_{1.0}$  截面张应力横向分布曲线， $S_{0.0}$  截面

与导向辊相切, 张力受辊形影响分布不均. 有限元计算结果表明, 在较低张力水平下, 带钢由于温差原因而不均匀热膨胀, 使带钢横向正负张应力同时存在, 边部高温受压, 压应力以边浪形式释放, 这与板形对张应力横向分布规律近似; 当张力水平达到一定值时, 不均匀热膨胀被张力消化, 温度高的地方延伸率大, 张应力也就小, 并与辊形作用相叠加表现出来. 正凸度温差对张应力分布的影响机制与负凸度温差相同, 只是在更小的张力水平下发生了中浪模式的板形屈曲.

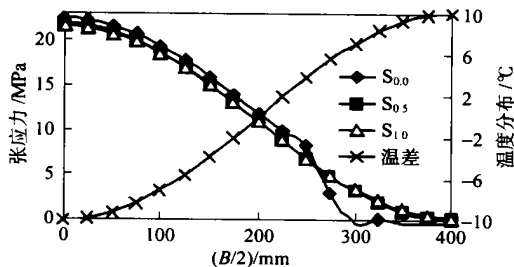


图 5 张应力横向分布和温度载荷分布

Fig 5 Transverse distribution of tension and temperature

### 2.6 焊缝对张应力横向分布的影响

根据现场实际情况, 在有限元模型中焊缝处有 5 cm 的带钢搭接(厚度为带钢厚度的 2 倍), 因而这段区域的刚度要比其他处大, 这时焊缝起了均匀化张应力分布的作用; 但是由于焊缝前后带钢规格不同, 存在约 100 mm 的宽度差, 这样在带钢的拉伸过程中, 是一个特殊区域, 应区别对待.

从数值计算结果看, 在有焊缝端随着焊缝位置  $H$  的增大,  $L_r$  值也跟着增大, 而无焊缝端不受另一端焊缝位置变化的影响(焊缝  $H$  位置如图 2 所示, 无焊缝端则为对应带钢另一端), 可见焊缝对张应力横向分布不均的影响是局部的. 表 4 为 0.25 mm × 1 200 mm 规格, HF 段(700 °C), 凸度 0.5 mm, 焊缝位置分别为  $B/2$ ,  $B$  和  $2B$  时计算

表 4 焊缝位置对  $L_r$  值的影响

Table 4 Effect of weld position on  $L_r$

平均张 应力 / MPa	有焊缝端 $L_r / m$			无焊缝端 $L_r / m$		
	$H = B/2$	$H = B$	$H = 2B$	$H = B/2$	$H = B$	$H = 2B$
4.77	1.45	1.60	3.40	1.55	1.55	1.55
9.68	1.75	2.00	3.75	1.75	1.75	1.8
14.67	1.75	2.05	3.85	1.8	1.8	1.8

结果. 另外, 当焊缝位置  $H = B/2$  时, 有焊缝端  $L_r$  值比无焊缝端  $L_r$  值小, 可见焊缝的刚性阻隔作用在这里起了主要作用, 它一定程度上减弱了

辊形对张应力不均匀分布的影响, 而且焊缝后的张应力横向分布趋于均匀化.

### 2.7 辊面摩擦对张应力横向分布的影响

对来料无板形缺陷、规格为 0.175 mm × 800 mm、焊缝位置为  $B/2$ 、凸度为 1.5 mm 工况分别取摩擦因数为 0.1, 0.2 进行模拟. 有限元计算结果表明, 摩擦系数大小对带钢横向张应力分布以及  $L_r$  值的影响并不明显, 只是随着摩擦系数的加大两导辊之间的横向总张力减小(如图 6), 这样当张力波动时辊面摩擦阻力往往帮助实现了较大的张力过载, 更容易使带钢发生屈曲.

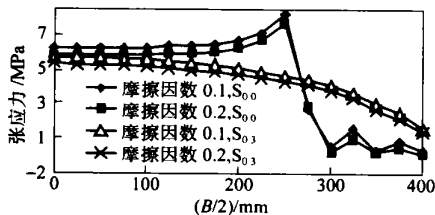


图 6 不同摩擦系数下带钢横向张应力分布

Fig. 6 Transverse distribution of tension with different friction coefficients

## 3 结论

运用非线性有限元建立了退火炉内带钢瓢曲的力学分析模型, 从诱发瓢曲的关键性因素——张应力横向分布不均——入手, 深入研究了连续退火炉内各相关因素对张应力横向分布的影响规律和作用机制, 发现导向辊辊形、带钢厚度等对张应力横向分布影响很显著, 特别是辊形的作用导致与辊肩接触的带钢局部区域张应力集中, 诱发了带宽方向压应力的形成, 在一定张力条件下最终发生了瓢曲力学行为. 同时, 通过有限元计算结果分析还得出了一系列重要的结论, 为制定抑制“热瓢曲”的工艺措施提供了有效的技术思路, 并取得了良好的现场控制效果.

### 参 考 文 献

- [1] 的场哲, 阿高松男, 青木至, 等. 連続焼鈍ラインのヒートハックル先生に及ぼすロールクラウソの影響. 鉄と鋼, 1994, 80(8):61
- [2] 的场哲, 阿高松男, 青木至. 連続焼鈍ライン内の挫屈・蛇行におよぼすロールクラウソの影響. CAMP-ISIJ, 1992, 5(5):1459
- [3] 戴江波. 冷轧宽带钢连续退火炉生产线上瓢曲变形的研究 [学位论文]. 北京:北京科技大学, 2005
- [4] 徐星. 承受非均匀拉伸的矩形板的弹塑性皱曲分析 [学位论文]. 北京:北京大学, 1989

- [5] 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. 华东冶金学院学报, 1994, 11(2): 81
- [6] 戴江波, 张清东, 王俊飞. 连续退火炉内导向辊辊形对带钢张力横向分布影响的研究 // 钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 53
- [7] 邹家祥. 冶金机械设计理论. 北京: 冶金工业出版社, 1998
- [8] 戴江波, 张清东, 陈先霖, 等. 连续退火炉内带钢的热态大挠度变形分析. 机械工程学报, 2003, 39(12): 71

## Finite element simulation of the transverse distribution of tensile stress in the strip during continuous annealing process

ZHANG Qingdong, CHANG Tiezhu, DAI Jiangbo, WANG Wenguang

Mechanical Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

**ABSTRACT** To set up the critical tension model of buckling and find the effective technologic measures to prevent the buckling, the effect and acting mechanism of seven major factors, roll profile, strip shape, strip width, transverse distribution of temperature, weld position, friction on the roll, and total tension, on the transverse distribution of tensile stress in a continuous annealing furnace were simulated by using the finite element method of geometrical nonlinear buckling calculation and the theory of elastic-plastic buckling in the field of stamping. The simulation results show that roll profile and thickness of the strip are the two most remarkable factors influenced on the transverse distribution of tension stress. The relationships between buckling and transverse distribution of tensile stress are revealed, and a valuable technologic measure was provided to control the “heat buckling” and proved to be well effective online.

**KEY WORDS** continuous annealing furnace; tensile stress; transverse distribution; finite element method; buckling