

张力对冷轧 304 奥氏体不锈钢薄板板形影响的数值模拟

董丽丽 邢淑清 姜晓艳 麻永林

(内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010)

摘要 为研究张力对单道次冷轧 304 奥氏体不锈钢薄板(成分: 0.053C, 0.55Si, 1.50Mn, 0.030P, 0.002S, 17.02Cr, 8.01Ni, 0.50Cu, 0.08Mo)板形的影响, 基于显示动力学有限元法, 采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对 2 mm 薄带钢的 4 辊轧机冷轧过程进行模拟和分析。结果表明, 在压下量为 0.06 mm, 前张力 13 ~ 40 MPa, 后张力 1 ~ 18 MPa 的轧制工艺下, 轧后板带边部主要受压应力作用, 中间部分受拉应力作用, 带钢将产生微小的边浪; 前张力由 15 MPa 增大至 21 MPa 时, 带钢沿板宽方向应变值趋于均匀, 增大前张力可改善带钢的平直度, 后张力增大亦有助于改善板形, 其效果较前张力明显。

关键词 奥氏体不锈钢 薄板 冷轧 张力 有限元法 板形

Numerical Simulation of Effect of Tension on Profile Shape of Cold Rolled 304 Austenite Stainless Steel Strip

Dong Lili, Xing Shuqing, Jiang Xiaoyan and Ma Yonglin

(School of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract In order to study the effect of tension on profile shape of single pass rolling strip of 304 austenite stainless steel (成分: 0.053C, 0.55Si, 1.50Mn, 0.030P, 0.002S, 17.02Cr, 8.01Ni, 0.50Cu, 0.08Mo), based on explicit dynamic finite element method, the simulation and analysis on cold rolling process of 2 mm steel strip with four high mill have been carried out by ANSYS/LS-DYNA software. Results show that with reduction 0.06 mm, forward tension 13 ~ 40 MPa and backward tension 1 ~ 18 MPa rolling process, the edge of rolled strip is acted under compressive stress and the middle part is acted under tensile stress led to produce tiny edge wave; with increasing forward tension from 15 MPa to 21 MPa, the strain of strip along width direction trends towards uniform, i. e. increasing forward tension is available to improve the flatness of strip, and increasing backward tension is also available to improve the profile shape of strip and its effect is more obvious that increasing forward tension.

Material Index Austenite Stainless Steel, Strip, Cold Rolling, Tension, Finite Element Method, Profile Shape

带钢产品质量主要由板形和板厚两个指标来衡量。目前, 板厚自动控制技术已基本成熟。相比之下, 板形问题显得日益突出。板形精度是冷轧带钢的一项主要的质量指标, 也是决定产品市场竞争力的重要因素。目前, 板形控制技术^[1]已成为带钢生产的核心技术之一, 也是当前轧制技术研究开发的前沿和热点。均质带材经塑性变形后, 其纵向延伸不均会导致带材弹复后仍有较大的内能, 内能释放的结果引起轧后带材产生形状缺陷。改善金属流动方式, 减小残余应力^[2], 是改善板形的关键环节。张力及其控制是板形控制系统的核心。轧制中, 合理的张力能使延伸较小部分金属的局部应力超过屈服应力, 从而避免带材因部分金属延伸不均而造成波浪, 保证轧出的带材平直。

张力对于板形尤其是冷轧薄板板形的影响研究具有重要的意义^[3]。自 20 世纪 70 年代末意大利的 Borghesi 等人^[4]首次提出用改变后张力的方法改善板形开始, 已有了一定的研究。本文采用弹塑

性有限元法^[5], 基于 ANSYS/LS-DYNA 软件, 选用钢厂实际生产的轧前厚度为 2 mm 的 304 奥氏体不锈钢冷轧板, 模拟其单道次轧制过程, 得到了不同张力制度情况下轧件应力应变情况及变化规律。

1 轧制模型的建立及单元体的离散

参照钢厂的实际情况, 轧件材质选用 304 奥氏体不锈钢冷轧板, 成分见表 1。轧机选用 4 辊轧机, 轧辊材质为 W6Mo5Cr4V2 高速钢^[6]。轧件尺寸为长 200 mm × 宽 400 mm × 厚 2 mm。轧辊的参数如表 2 所示。

由于在冷轧过程中轧制力非常大, 轧辊的弹性压扁^[7]不可忽视。建立模型时, 轧辊选用弹性辊,

表 1 304 奥氏体不锈钢成分/%

Table 1 Chemical composition of 304 austenite stainless steel /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
0.053	0.55	1.50	0.030	0.002	17.02	8.01	0.50	0.08

表2 4辊轧机轧辊尺寸/mm
Table 2 Roll size of four high mill /mm

轧辊	直径	长度
工作辊	辊身	210
	辊颈	10
支撑辊	120	210

可以模拟出轧辊的弹性压扁变形。考虑实际轧制过程和几何参数的对称性,建立1/4有限元模型。有限元模型分为4部分,(1)弹塑性带钢;(2)弹性体工作辊辊身;(3)刚性体支撑辊辊身;(4)刚性体工作辊辊颈。轧制模型的材料物理性能见表3。单元体离散^[8]后的模型如图1所示。

表3 轧制模型的材料物理性能
Table 3 Physical properties of materials for rolling model

材料部位	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服应力/ MPa	切向模量/ MPa
轧件	7.93	193 000	0.313	272	1 630
工作辊辊身	8.16	218 000	0.3		
工作辊辊颈和 支撑辊	8.16	218 000	0.3		

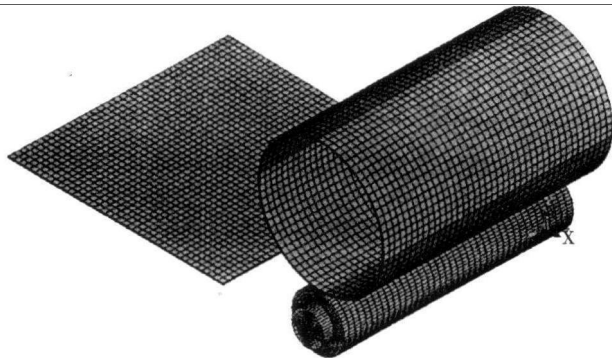


图1 轧制模型
Fig. 1 Rolling Model

接触^[9],一是轧件与工作辊辊身之间的接触,二是工作辊辊身与支撑辊辊身的接触。这两类接触服从库伦摩擦定律,摩擦因数恒定。参照实际生产情况,选取动摩擦系数为0.08,静摩擦系数为0.09。

3 轧制过程中张力的施加

张力的施加是轧制过程模拟中必不可少的条件^[10]。通常所说的张力包括前张力和后张力。在轧制过程中的变形区内,带钢由入口至出口逐渐受到压缩,中性面之后带钢主要受到后张力的作用,是主要的变形区^[11]。在中性面之前带钢主要受前张力的影响。由于轧制过程中带钢本身的加工硬化程度和影响区域的关系,前张力和后张力在轧制过程中起着不同的作用。施加张力时,对轧件头部节点建立一个集合,施加前张力;对轧件的尾部节点建立一个集合,施加后张力。张力施加情况如图2所示。参考实际生产情况,初次计算时选取前张力为21 MPa,方向与轧制过程轧件前行的方向一致。后张力设定为9 MPa,方向与轧制过程轧件前行的方向相反。

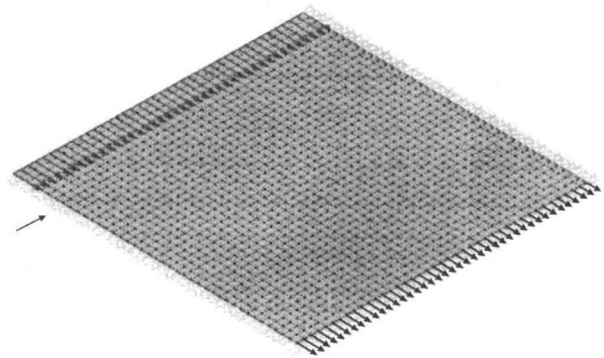


图2 轧件模型上张力的施加示意图
Fig. 2 Schematics of tension loading on rolling stock model

2 边界及初始条件

为了模拟轧制过程,轧辊必须绕轴线转动,板材必须向前运动。这样,对于轧辊只能约束中心点,使其在各个方向的位移为0,并且绕Z轴线转动。轧辊转动的线速度为1.5 m/s。在轧件模型的底部(即实际轧制过程的中心线上)施加Y方向0位移约束,在轧件模型顶部(即实际板材的宽度中心线上)施加约束使其X方向位移为0。根据轧机现场的实际情况,轧件的初始速度取1.5 m/s。

轧件的咬入和轧制过程的建立,是靠轧件和轧辊之间的摩擦来实现的。要正确地模拟轧制过程,必须首先处理好摩擦问题。轧制模型主要存在两类

4 张力对板形的影响情况分析

为了研究张力对轧制后板形的影响,分别按照前张力恒定仅后张力变化、后张力恒定仅前张力变化,张力差恒定前后张力同时增大或减小3种情况,取7组不同的对比数据。数据大小如表4所示。分别按照表4的数据调试程序并进行计算,模拟张力作用下的轧制过程。

轧制过程结束后对模拟结果输出并进行分析。有限元模拟的轧制过程得出7种张力情况下轧件的总体压下量均为0.06 mm左右。为研究轧制过程轧件上节点在宽度方向上的金属流动情况,也就是

表 4 前后张力设定/MPa

Table 4 Forward and backward tension setting /MPa

项目	张力		张力		张力	
	前	后	前	后	前	后
前张力恒定	21	5	21	9	21	12
后张力恒定	15	9	21	9	40	9
张力差恒定	13	1	21	9	30	18

轧制后板带应力应变的分布,在轧件宽度方向上建立路径 1,如图 3 所示。

图 4 所示为张力差恒定 12 MPa 不变,前张力 13、21、30 MPa 对应后张力分别为 1、9、18 MPa 时,路径 1 上节点轧制方向的应力和应变的变化曲线。

由图 4(a)可以看出,路径 1 上节点轧制方向的应力分布,其量值波动较大。板带边部主要受压应力作用,中间部分受拉应力作用。拉应力最大值分布在距板带边部 0.05 m 处,压应力最大值出现在板带边缘处。图 4(b)应变变化曲线显示轧件边部产生较大的变形,随后轧件变形趋于稳定,符合轧制变形规律。板带材的板形取决于其延伸率沿宽度方向是否相等,当延伸率不等时,就产生板形缺陷。延伸较大的部分被迫受压,延伸较小的部分被迫受拉。如图 4 所示,沿宽度方向边部的延伸率大于中部,则在此轧制工艺下的带钢将产生边浪。

由图 4(b)还可以看出,张力差恒定 12 MPa 不变,随着前后张力的同时增大,带钢沿板宽方向应变值趋于平均,对应着带钢的平直度得到改善。现场实际采用的前张力 21 MPa、后张力 9 MPa 轧制工艺下板形最优。

图 5 所示为后张力恒定 9 MPa 不变,前张力分别为 15、21、40 MPa 时沿路径 1 上节点轧制方向应力和应变的变化曲线。

图 5(a)为轧后板带的应力分布情况,随着前张力由 15 MPa 到 21 MPa 再到 40 MPa 时,应力量值波动逐渐趋于平均,可见增大前张力可以改变带钢的应力状态,改善带钢的平直度。但是当前张力增大到 40 MPa 时,对应图 5(b)应变值震荡较

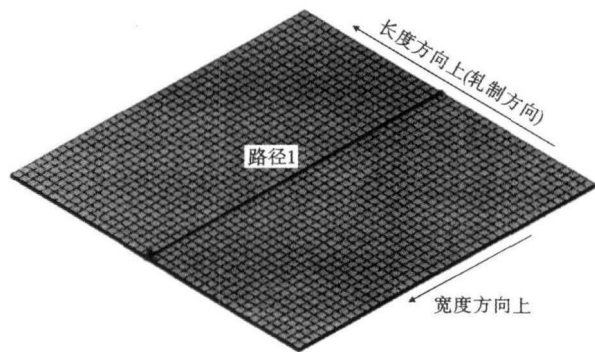


图 3 路径 1 的位置
Fig. 3 Position of route 1

大,变形不均匀,从而可见前张力过大会影响板形均匀性。在轧制过程中,要根据实际生产情况选取合适的前张力。

图 6 所示为前张力恒定为 21 MPa,后张力分别为 5、9、12 MPa 时沿路径 1 上节点轧制方向应力和应变的变化曲线。

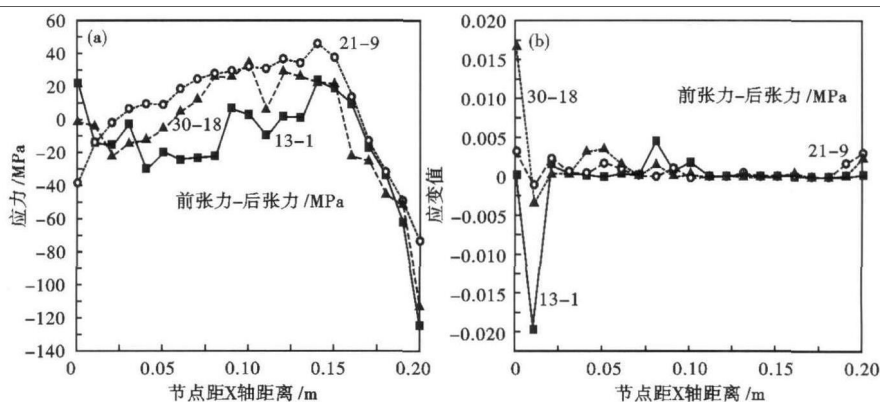


图 4 前后张力差恒定时应力(a)和应变(b)的变化曲线
Fig. 4 Curves of change of stress (a) and strain (b) with constant difference between forward and backward tension

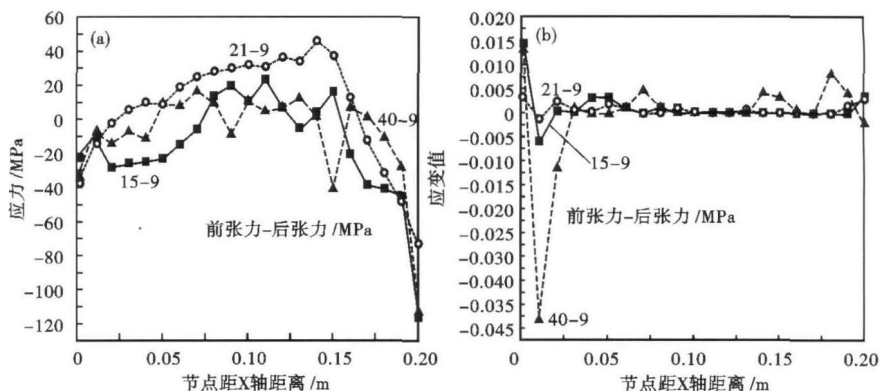


图 5 后张力恒定时应力(a)和应变(b)的变化曲线
Fig. 5 Curves of change of stress (a) and strain (b) with constant backward tension

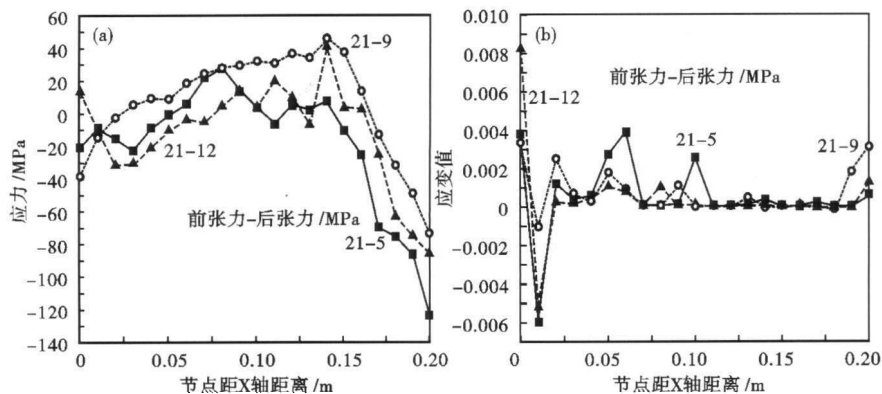


图6 前张力恒定时应力(a)和应变(b)的变化曲线

Fig. 6 Curves of change of stress (a) and strain (b) with constant forward tension

图6(a)为轧后板带的应力分布情况,随着后张力由5 MPa增大到9 MPa时,应力量值波动逐渐趋于平均,可见增大前张力可以改变带钢的应力状态,改善带钢的平直度。后张力继续增大到12 MPa时,应力量值波动又开始增大,可见在轧制过程中,改变后张力虽然可以改善板形,但是后张力过大时相反还会影响带钢的平直度,所以要根据实际生产情况,选取合适的后张力值。图6(b)显示前张力恒定为21 MPa不变,后张力分别为5、9、12 MPa时,随着后张力的增大,带钢沿板宽方向应变值趋于平均,对应着带钢的平直度得到改善。而且对比图6及图5变化

边浪。

(2)张力差恒定12 MPa不变,随着前后张力的同时增大,带钢沿板宽方向应变值趋于平均,对应着带钢的平直度得到改善。

(3)前张力从15 MPa增大到21 MPa时,带钢沿板宽方向应变值趋于平均,增大前张力可以改善带钢的平直度。后张力增大也有助于板形的改善,而且作用效果较前张力明显。

内蒙古科技大学材料加工过程创新团队基金项目(52303001)。

参考文献

- 李登超. 不锈钢带材生产技术. 北京:化学工业出版社,2008
- Yanagimoto J, Kiuchi M. Computer Aided Simulation of Rolling Process by Lagrange Multiplier Rigid-plastic Finite Element Method. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 1991, 32(8):1000
- 刘立文,张树堂,武志平. 张力对冷轧板带变形的影响. 钢铁, 2000, 35(4):38
- Li G J. Spread Analysis in Rolling by the Rigid-plastic Finite Element Method, Numerical Methods in Industrial Forming Processes. Swansea: Pineridge Press, 1982
- 盛太和,喻海良,范训益. ANSYS有限元原理与工程应用实例大全. 北京:清华大学出版社,2006
- 刘立志,刘相华,姜正义. 利用显示动力学有限元法模拟平板轧制过程. 塑性工程学报, 2001, 8(1):51
- 刘才,杜凤山,连家创. 薄板带张力轧制时金属流动的计算机模拟. 钢铁, 1992, 27(1):35
- 王廷溥,齐克敏. 金属塑性加工学. 北京:冶金工业出版社,2001
- Liu Deyi, Shen Guangxian, Yu Chunxiao, et al. Study on the Multiple Boundary Element for Three-dimensional Elastic Contact Problem with Friction. Advance in Boundary Element Techniques IV, Queen Mary: University of London, 2003, 34(9):155
- 刘立志,刘相华,王国栋. 轧制过程的显式动力学有限元模拟. 东北大学学报, 2001, 22(3):327
- 时旭. 薄带钢冷轧过程的弹塑性有限元模拟:[博士论文]. 沈阳:东北大学, 2005

董丽丽(1987-),女,硕士研究生,2009年辽宁科技大学毕业,不锈钢板带冷轧工艺研究。

收稿日期:2011-11-09

量值可见,后张力改善板形的作用效果较前张力明显。但是当后张力增大到40 MPa时,轧件边部产生较大不均匀变形,所以要根据实际情况选取合适的后张力。

5 结论

(1)板带边部主要受压应力作用,中间部分受拉应力作用。拉应力最大值分布在距板带边部0.05 m处,压应力最大值出现在板带边缘处。本文轧制工艺下的带钢将产生微小的