

# 可逆式冷轧内应力仿真及立辊侧轧变形控制研究

赵丽丽, 张以都

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

**摘要:** 基于有限元软件 Msc. Marc, 采用弹-塑性大变形有限元法, 建立三维可逆式轧制有限元模型, 仿真出可逆式两道次冷轧中咬入-抛出-反转过程应力的产生及变化, 解决了实际生产中铝合金厚板可逆式冷轧咬入困难及变形难以控制的难题。仿真结果与实验测试结果比较验证了该有限元模型的合理性。可逆式多道次轧制可以减小上道次轧制应力, 轧制应力沿厚度方向呈 M 型分布。控制宽展的立辊侧轧引起的狗骨形截面可通过侧轧后再小压下量平轧进行矫正, 得到平直度符合公差的板材。

**关键词:** 可逆式; 冷轧; 残余应力; 宽展; 平直度; 立辊侧轧

**中图分类号:** TG335.14

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-5053(2006)02-0008-04

为了减轻重量、改进性能、缩短制造周期和提高产品的可靠性, 现代大型武器(军用飞机、坦克以及各类舰艇等)越来越多地采用整体加工的复杂零件代替装配式组合件。这些整体加工的复杂零件往往长达数米, 而加工后最薄的地方只有几毫米, 在航空制造中, 经常出现因工件变形过大无法校正而导致报废, 降低工作效率, 增加加工成本。大型结构件工装过程的变形控制研究已经成为困扰军工、航空企业的难题。

引起加工变形的因素主要有毛坯内应力的大小与分布、数控加工残余应力的大小与分布以及零件最终的几何形状<sup>[1]</sup>等。目前有关残余应力研究文献基本局限在残余应力控制、消除和测量方法, 针对具体铝合金厚板可逆式冷轧过程中应力产生及变化的研究少之甚少。可逆式冷轧是企业生产中常用到的一种复杂的非线性轧制过程, 伴随大的塑性变形, 传统解析法不可能得到轧制过程中以及轧制完毕轧件内应力的分布及大小的精确解, 有限元法是解决这一复杂问题的有力工具

本工作基于 Msc. Marc 平台, 建立有效的三维轧制模型, 仿真出可逆式两道次冷轧中咬入-抛出-反转过程应力的产生及变化, 解决了实际铝合金厚

板可逆式冷轧变形难以控制以及轧制初期难以咬入的难题, 并对立辊侧轧的变形控制进行研究。

## 1 可逆式轧制三维有限元模型

### 1.1 有限元模型中的参数

图 1 为板材平轧典型模型, 该模型主要有以下几类参数:

板料  $H$ —板料入轧前高度  $h$ —板料入轧后高度  
 $b$ —板料入轧前宽  $B$ —板料入轧后宽  
轧辊  $R$ —轧辊半径  $\omega$ —辊角速度  
 $L$ —轧制区长度  $\alpha$ —咬入角

轧制区长度  $L$  表征轧制过程中板料与轧辊的接触弧线长:

$$l \approx \sqrt{R \cdot \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \approx \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad \Delta h = H - h$$

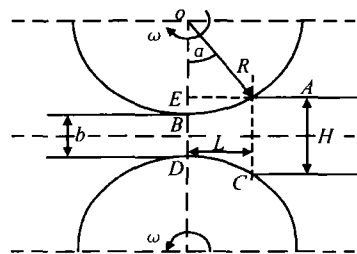


图 1 板材平轧的典型模型

Fig. 1 Typical model of board plane rolling

### 1.2 实现仿真轧制过程的条件

#### 1.2.1 咬入条件

依靠回转的轧辊与轧件之间的摩擦力, 轧辊将轧件拖入轧辊之间的现象称为咬入。咬入过程是整

收稿日期: 2005-03-11; 修订日期: 2005-05-23

基金项目: 国防基础科研项目(59975008)

作者简介: 赵丽丽(1977—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为: 铝合金预拉伸板残余应力研究, 铝合金厚板数控加工变形控制研究及大型薄壁件工装过程变形控制研究, (E-mail) lily\_zhao@me.buaa.edu.cn.

个轧制模拟过程中最关键一环,是否能顺利完成咬入过程是整个有限元模拟成败的关键。图 2 是部分板料金属进入类塑性工程区后的作用力简图。

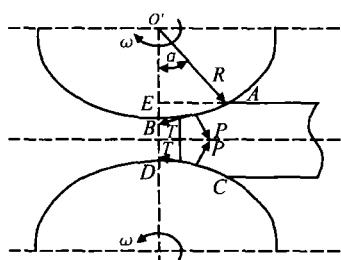


图 2 轧制作用力图解

Fig. 2 Scheme of rolling forces

设摩擦系数  $f = T/P$ , 式中,  $T$  为摩擦力,  $P$  为正压力。图 2 中所示的初始咬入过程有:

$$T_x = T \cdot \cos\alpha \quad P_x = P \cdot \sin\alpha$$

式中,  $T_x, P_x$  分别为  $T$  和  $P$  沿  $x$  方向的分量。

为了让板材顺利咬入, 必须有  $T_x > P_x$ , 即初始咬入时, 如果  $\tan\alpha < f$ , 理论上板料就能够被顺利咬入。金属进入变形区后的过程需要  $\beta > \phi$ , 其中,  $\beta$  为摩擦角 ( $\tan\beta = f$ ),  $\phi$  为正压力  $P$  与竖直方向的夹角 ( $\alpha/2 < \phi < \alpha$ )。

可见, 理论上只要初始过程中能够顺利进入咬入, 便能够完成整个咬入过程。

### 1.2.2 咬入等效工艺

实际的数值模拟过程中很难实现上述咬入过程, 通常需要引入外力解决问题。通过降低咬入角  $\alpha$  的方法解决轧制模拟中的咬入问题。

先压后轧 这种工艺的实质是增加板料与轧辊之间的接触面积, 使轧制从点对面接触迅速进入面对面接触, 从而能够顺利完成整个轧制过程(图 3a)。

强迫咬入 即用外力将轧件强制推入轧辊中, 由于外力作用使轧件前端被压扁(图 3b), 相当于减小了前端接触角, 改善了咬入条件。当板料能够顺利进入咬合过程后, 卸去送进力, 让板料正常进入轧

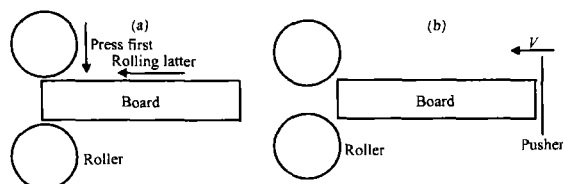


图 3 轧制咬入模型

(a) 先压后轧; (b) 强迫咬入

Fig. 3 Model of rolling biting

(a) press first and rolling later; (b) force biting

制过程。

### 1.2.3 可逆式轧制的实现

可逆式多道次轧制需要在前道次轧件抛出后反方向轧制。在每个轧制周期内采用低速咬入轧件-稳定速度轧制-低速抛出-反方向低速咬入-反方向稳定速度轧制-反方向低速抛出, 图 4 即为整个可逆式两道次轧制过程中速度示意图。

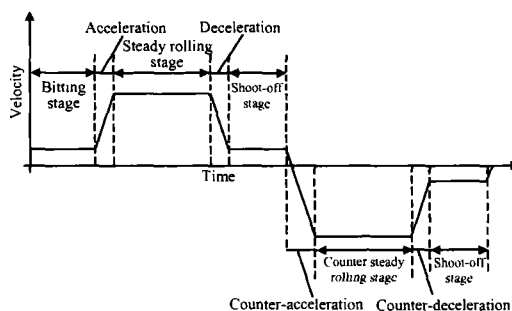


图 4 一个轧制周期内速度示意图

Fig. 4 Sketch of rolling velocity in one rolling period

## 2 仿真结果

轧制板材为硬铝合金 7075, 弹性模量 71GPa, 泊松比 0.28, 轧件 500mm × 150mm × 30mm, 轧辊半径 100mm, 轧辊角速度 0.3。

图 5 为轧制过程中等效应力分布图, 从图中可知, 轧制时产生了很大的加工应力, 最大等效应力高达 455.9MPa, 主要分布在轧辊的斜下方(轧制方向), 而在远离轧辊即稳定轧制区域内, 等效应力一般在 329 ~ 138MPa 之间, 且沿厚度方向对称分布, 板材前端部由于是在外力作用下进入轧辊的, 因此应力分布不均匀, 且无规律可寻, 与稳定轧制区域内等效应力分布有很大差别, 结果不可取。

图 6 和 7 为轧辊卸载后, 释放掉所有卡具(仅留下中部点上的固定约束, 防止有限元仿真中的刚体运动)得到的应力分布。图 6 为轧制方向应力等值线图, 经过两道次可逆式轧制后, 轧制方向应力明

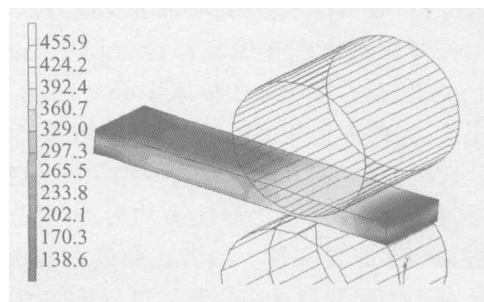


图 5 轧制过程中等效应力分布图/MPa

Fig. 5 Equivalent stresses of rolling process

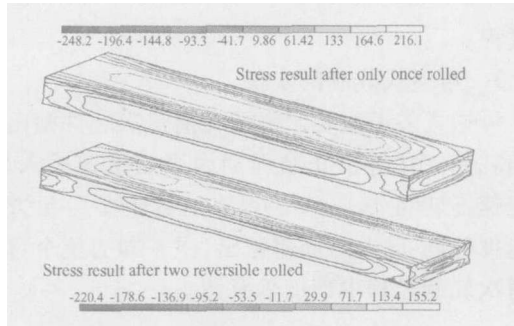


图6 轧制方向应力等值线图/MPa

Fig. 6 Stress isoline in rolling direction

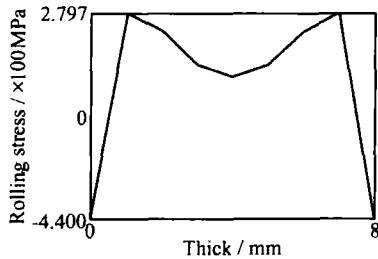


图7 轧制稳定区域厚度方向轧制应力变化曲线

Fig. 7 Curve of rolling stress in thick direction

显减小:最大拉伸应力从 216.1MPa 降低为 155.2MPa,主要分布在板材的表面;最大压缩应力也从 -248.2MPa 降低到 -220.4MPa,主要分布在偏离厚度中心对称轴 1/4 处。这是因为经过前道次加工后,材料硬化,屈服应力增加,再次轧制后,原有的部分应力得到释放,最终得到了更均匀的应力分布。此外,由于两道次轧制方向相反,反方向轧制时的挤压也部分抵消了原有轧制方向(与二道次方向相反)应力。仿真中还得到了横向(宽度)方向应力分布,结果显示多道次可逆式两道次轧制也同样减小前道次横向应力的尺寸,横向应力仅为轧制方向应力的 70%,表现出应力的各向异性。

图 7 中曲线为利用点跟踪方式得到的可逆式两道次稳定轧制区域内沿厚度方向一组点轧制应力变化曲线。图中可以看出,沿厚度方向轧制应力呈 M 型曲线分布,表层为压应力,心部为拉应力。轧制方向最大拉伸应力出现在偏离厚度方向中心对称轴 1/4 处,约为 279.7MPa,在板厚中心处出现一个局部最小值,大约为十几 MPa,这一仿真结果与浙江大学王秋成教授的裂纹柔度法实测结果<sup>[3]</sup>趋势相同(图 8),在厚度方向上轧制应力均为 M 型分布,验证了仿真结果的真实性的。二者在数值上有所差距,主要是由于实验数据是在轧制后进行拉伸消除了部分残余应力,导致应力值降低。

在轧制过程中,为了控制宽展,改善边部质量,

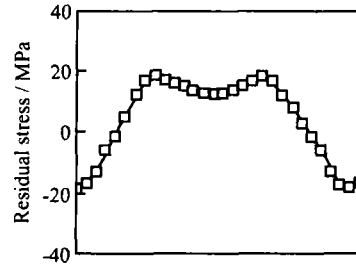


图8 7075T7351 轧制应力消除后实验结果

Fig. 8 Experiment results of 7075T7351 rolled stress after stress release

通常需要对轧件进行滚边,即立辊侧轧。在立辊侧轧时,金属流动非常不均匀,减宽量仅部分转化为工件的延伸,而其余部分引起轧件厚度不均匀的变化。工件厚度的这种不均匀增加显著降低了立辊侧轧过程中的调宽效率,也增加了实现严格的宽度公差和高成材率的难度。图 9 即为可逆式两道次轧制采用立辊侧轧和不采用立辊侧轧得到的工件横截面轮廓图的比较。从图中可以看出,当没有立辊侧轧时,轧件宽展方向两端自由变形,因平轧辊厚度压下而产生的厚度变形由于两端金属自由流动而更多产生了宽展,使得两端厚度明显小于中间厚度,形成了鼓形截面;当有平辊侧轧时,由于边部侧压,使得在接近轧件边部发生增厚,形成了狗骨形断面,狗骨峰处高度的大小及狗骨峰距边部位置与立辊侧压下量有关。

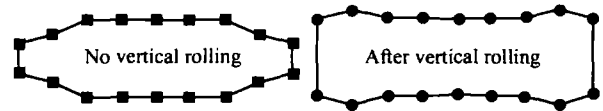


图9 有无侧辊轧制时轧件截面轮廓图

Fig. 9 Comparison of section skeleton map

立辊侧轧控制宽展的同时使轧件表面平直度降低,增加了实现严格控制板材平面度的难度,给后续加工带来更多的麻烦。为此在立辊侧轧的基础上再以小压缩量平轧,不仅可以消除表面的不均匀变形,而且近似于抛光的小压缩量平轧也可以适当降低轧件内残余应力的尺寸,使应力分布更加均匀。图 10 为在立辊侧轧后小压缩量平轧得到的板子厚度方向应变图,从图中可知,在侧轧-平轧过后,板材的平直度很好,只有在板材宽度方向的端部有小量的突出,宽度方向中间部分应力基本一致。

图 11 为轧制稳定区域内宽展方向表面一组点在平轧-侧轧后以及平轧-侧轧-再平轧后得到的压下量的曲线。可逆式平轧得到的曲线平直度很好,轧件宽度边部金属自由流动,边部压下量略大于中

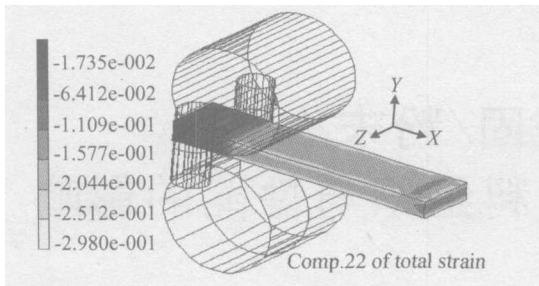


图10 立轧-平轧后厚度方向应变图

Fig. 10 Strain of thick direction after vertical and plane rolling

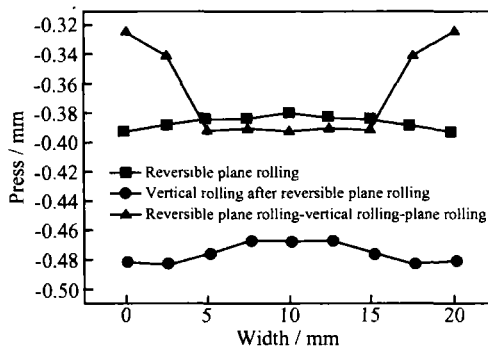


图11 压下量变化曲线

Fig. 11 Curve of depress

间压下量;可逆式平轧后立辊侧轧得到的曲线在边部增厚,表面平直度比较差;可逆式平轧、侧轧后再0.2mm压下量平轧得到的曲线表面度虽然没有单独平轧得到的表面度好,但是较立辊侧轧后得到的表面平直度有很大的改观。

### 3 结论

(1)利用“整体式仿真”方法,采用外力推入,解

决实际生产中轧制咬入困难的难题,仿真结果除在轧件端部出现应力不均匀外,其他处均符合实际情况。

(2)可逆式多道次轧制可以明显减小前道次轧制产生的残余应力,厚度方向轧制应力呈M型分布,表面为压缩应力,心部为拉伸应力,最大拉应力分布在距中性面1/4厚度处。

(3)控制宽展的立辊侧轧导致轧件表面平直度下降,出现狗骨形截面,侧压后采用小压缩量平轧改善表面不均匀变形,同时使板材内应力分布更为均匀。

### 参考文献:

- [1] 金兹伯格 V B. 高精度板带材轧制理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社,2000. 211 - 224.
- [2] NAKSOO KIM, BYUNGSEOK KANG, SEUNGYOON LEE. Prediction and design of edge shape of initial strip for thick tube roll forming using finite element method [J]. Materials Processing Technology, 2003(142): 479 - 486.
- [3] 王秋成,柯映林,章巧芬. 7075 铝合金板材残余应力深度梯度的评估[J]. 航空学报, 2003, 7: 336 - 338.
- [4] ZHAO Li-li, ZHANG Yi-du. Computer simulation of residual stress of cold rolling pre-stretch board [A]. Proceeding of the World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004 (V4). 3511 - 3513.
- [5] 刘宏民. 三维轧制理论及其应用-模拟轧制过程的条元法[M]. 北京:科学出版社, 1999. 58 - 75.
- [6] 方博武. 金属冷热加工的残余应力[M]. 北京:高等教育出版社, 1991. 83 - 93.
- [7] WEN S W, HARTLEY P, PILLINQER I, et al. Finite element analysis of four-roll pass cold rolling [J]. Journal of Engineering Manufacture, 1992, 206 (B2): 133 - 141.

## Simulation of Residual Stress of Reversible Cold-Rolling and Deformation Control Study on Vertical Rolling

ZHAO Li-li, ZHANG Yi-du

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The residual stresses of aluminum alloy thick-board in the rolling process of biting, shoot and reversing were simulated by using highly non-linear software Msc. marc, elas-plastic large deformation finite element method (FEM) and established three-dimensional model. In addition, the difficulties to bite during initial stage of rolling in FEM and to control the deformation due to vertical rolling were solved too. The established three-dimensional model was proved to be effective by comparing the results of FEM simulation and experimentation. The only once rolled stress could be decreased by reversible rolling and the rolled stress on thick direction was M distribution. Dog-bone section deformation due to vertical rolled could be rectified by small press horizontal rolled after vertical rolling to assure the required precision of board.

**Key words:** reversible; cold rolling; residual stresses; spread; flatness; vertical rolling