

[文章编号] 1004- 0609(2001)06- 1078- 05

双金属复合带材轧制过程有限元模拟^①

李世芸, 张曙红, 张代明

(昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650093)

[摘要] 采用刚塑性有限元法, 以实验结果为依据, 以大型有限元软件 ANSYS 为分析工具, 对双金属复合带材轧制过程进行计算机数值模拟。分析了双金属复合带材同步或异步轧制过程中, 轧辊和轧件的应力、应变分布和轧件的塑性流动变形情况以及轧制力和力矩。以动画的方式模拟轧制过程, 给出了一种预测轧制结果、减少实验时间和费用的有效方法。

[关键词] 双金属带轧制; 数值模拟; 刚塑性有限元

[中图分类号] TB 331; TB 115

[文献标识码] A

复合轧制是制备金属复合板带的主要方法, 双金属复合带材轧制是将两种不同的金属板带通过轧制合成为复合板, 使其性能比各组成金属更为理想。用轧制方法使双金属固相复合, 就是采用塑性大变形方法使材料结合在一起。由于材料变形, 结合面积增大, 金属界面直接接触, 高压下一些金属的原子紧密结合, 当两种金属原子突破能量限产生金属键时就会产生粘结。目前, 国内外对双金属复合带材轧制方法及基本理论的研究主要集中在: 1) 轧制过程的变形关系^[1, 10, 11]; 2) 轧制力和轧制力矩的计算和测试^[2~4]; 3) 改善结合条件和增加结合强度^[5]; 4) 由实验确定工艺参数^[6, 7]等。作者在大量轧制实验的基础上, 引入虚拟轧制的概念, 在轧制前根据已知的轧制条件, 用有限元法, 通过计算机模拟轧制时的变形、应力、力矩等要素, 预测轧制的结果和产品质量, 并预测可能出现的问题, 为规模化工业轧制提供必要的参考依据。利用这一方法, 可以减少试制的费用和时间。

1 有限元模型的建立

由于用于轧制的两种金属不同, 双金属复合带材轧制是非对称且存在大变形、大位移、材料非线性、双向接触非线性、边界摩擦非线性等复杂问题。根据非线性连续介质力学的基本原理及有关的实验验证, 金属在塑性成型过程中, 弹性变形与塑性变形相比在总变形量中所占比例很小, 不大于总

变形量的 5%^[8]。忽略这部分弹性变形的影响, 采用刚塑性材料模型来求解^[9], 能够得到令人满意的精度, 作者采用刚塑性有限元法建立分析此轧制问题的力学模型。

1.1 刚塑性有限元法的本构方程及边界条件

刚塑性有限元法是从刚塑性体材料的变分原理出发, 按有限元模式把能耗率泛函表示为节点应变速度的非线性函数, 利用数学上的最优化理论得出满足极值条件的最优解, 从中进一步利用塑性力学的基本关系式得出变形速度场、应力场以及各种变形参数和力能参数。刚塑性有限元法以节点应变速度为未知数, 表面速度为边界条件, 采用 Lagrange 乘子法, 引入 Lagrange 乘子 λ 后, 张量形式的泛函为

$$\Pi = \iiint_V \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} dV - \iint_S y_i v_i dS + \iiint_V \lambda \dot{\epsilon}_{ij} \delta_{ij} dV \quad (1)$$

式中 $\bar{\sigma}$ 为 Mises 等效应力, $\dot{\bar{\epsilon}}$ 为等效应变速度, y_i 为表面力张量, v_i 为位移速度, λ 为 Lagrange 乘子, δ_{ij} 为 Kronecker 符号, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为应变速度, 根据马可夫(Markov)原理, 应变速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 与位移速度 v_i 的关系为

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (2)$$

式(1)泛函 Π 的物理意义是总能耗率, 第一项为材料内部的塑性变形功率, 第二项表示材料表面

① [基金项目] 云南省自然科学基金资助项目(98A037M)

[收稿日期] 2001- 04- 22; [修订日期] 2001- 06- 18

[作者简介] 李世芸(1965-), 女, 副教授, 硕士.

上外力的功率, 可以是轧件与轧辊之间的摩擦功率、作用于变形入口区或出口侧工件横断面上的张力功率和速度不连续面上的剪切功率等^[9], 第三项为拉格朗日修正功率。

对式(1)取变分

$$\delta\Pi = \iiint_V \delta(\bar{\sigma} \dot{\epsilon}) dV - \iint_S \bar{p}_i \delta w_i dS + \iiint_V \lambda \delta \dot{\epsilon}_{ij} \delta_{ij} dV + \iiint_V \lambda \dot{\epsilon}_{ij} \delta \delta_{ij} dV \quad (3)$$

根据最大塑性功原理, 当应力状态满足 Mises 屈服条件和 Levy-Mises 流动法则时^[9]:

$$\delta(\bar{\sigma} \dot{\epsilon}) = (\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk}) \delta \dot{\epsilon}_{ij} \quad (4)$$

将上式代入式(3), 有

$$\delta\Pi = \iiint_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \iint_S \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \iint_S \bar{v}_i \delta w_i dS + \iiint_V \lambda \delta \dot{\epsilon}_{ij} \delta_{ij} dV + \iiint_V \dot{\epsilon}_{ij} \delta \lambda \delta_{ij} dV \quad (5)$$

由应变速度与位移速度的关系式(2), 并利用格林公式, (5)中的第一项为

$$\begin{aligned} \iiint_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV &= \iiint_V \sigma_{ij} (\frac{1}{2} v_{i,j} + \frac{1}{2} v_{j,i}) dV \\ &= \iiint_V [\sigma_{ij} \delta(\frac{1}{2} v_{i,j}) + \sigma_{ij} \delta(\frac{1}{2} v_{j,i})] dV \\ &= \iiint_V \sigma_{ij} \delta w_{i,j} dV \\ &= \iint_S \sigma_{ij} w_{i,j} n_j dS - \iiint_V \sigma_{ij,j} \delta w_i dV \end{aligned} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)并整理, 有

$$\delta\Pi = \iint_S (\sigma_{ij} n_j - \bar{p}_i) \delta w_i dS - \iiint_V \sigma_{ij,j} \delta w_i dV - \iiint_V (\frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} - \lambda \delta_{ij}) \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \iiint_V \dot{\epsilon}_{ij} \delta_{ij} \delta \lambda dV \quad (7)$$

式(7)中, 因为变分 δw_i , $\delta \lambda$ 都是任意的, 要使泛函变分 $\delta\Pi = 0$, 取得驻值, 必须同时满足以下关系式:

$$\sigma_{ij} n_j - \bar{v}_i = 0 \quad (\text{在表面 } S \text{ 上}) \quad (8)$$

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} - \lambda \delta_{ij} = 0 \quad (10)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} \delta_{ij} = 0 \quad (\text{在体积 } V \text{ 内}) \quad (11)$$

$$\text{由(10)式, } \lambda = \frac{1}{3} \sigma_{kk}$$

说明 Lagrange 乘子等于平均应力(静水压力)。

式(8)表示应力边界条件, 式(9)为力平衡方程, 式(11)为体积不变条件。这样, 当满足速度边界条件和变形速度与位移速度关系的速度场就能够自动满足所有基本方程, 所以这个速度场就是真解。

1.2 收敛判据

以保证满足速度场精度为首要判据条件, 收敛判据为

$$\frac{\|\Delta v_k\|}{\|v_k\|} \leq \epsilon_u \quad (12)$$

$\|\Delta v_k\|$ 和 $\|v_k\|$ 分别表示速度增量 Δv_k 和速度 v_k 的欧氏范数:

$$\|\Delta v_k\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta v_i^2}$$

$$\|v_k\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2}$$

ϵ_u 为预先给定的小正数, 这里 $\epsilon_u = 0.0001$ 。

当迭代过程满足式(12)时, 可以保证所得的速度场能达到所要求的精度。

1.3 摩擦系数

在轧辊与轧件的接触中, 摩擦力大小和方向的确定非常复杂, 它与金属的成分、轧制速度及相对变形量等要素有关。常摩擦系数法难以正确全面地反映摩擦力的大小, 故采用根据大量实验测试得出的摩擦系数确定方法^[7], 即摩擦系数主要与轧件轧后的厚度及相对变形量有关, 回归公式为^[7]

钢-铝复合时:

$$\mu = -2.956034 + 3.804421h + 3.161998\epsilon$$

钢-铜复合时:

$$\mu = -25.99164 + 22.64265h + 34.23805\epsilon$$

式中 μ 为摩擦系数, h 为轧制后的厚度, ϵ 为相对变形量。

采用 Coulomb 定律来计算摩擦力, 即

$$\tau_f = \mu p \leq k$$

式中 τ_f —摩擦力, μ —摩擦系数, p —正压力, k —剪切屈服强度。

2 建模及求解方法

在板带轧制问题中, 由于板带宽度方向的尺寸

远大于其厚度，轧制问题可简化为二维平面应变问题。简化的几何模型及相关尺寸如图 1 所示，图中 H_1 和 H_2 为轧制前两种金属的厚度， h_1 和 h_2 为轧制后的厚度， h 为两轧辊的间隙($h = h_1 + h_2$)， R 为轧辊半径。要进行复合的两种材料分别为钢 Q235 和铜，并设定这两种材料为双线性随动强化塑性材料。轧辊材料为 45 钢，被假定为弹性材料。研究中以大型有限元分析软件 ANSYS 为工具，利用 ANSYS 的非线性、大变形、非线性接触等功能来模拟刚塑性有限元及相应的轧制问题。为减少单元数和计算费用，使带材的长度为轧辊的周长，便可模拟轧辊转过一圈的轧制过程，其余过程为该过程的重复。在 ANSYS 中进行几何建模并划分单元得到的有限元模型如图 2 所示。图中用平面四节点单元划分平面区域，划分方法为映射网格划分。引用接触单元“CONTACT 48”来模拟轧辊和带材的接触和摩擦，两种带材与上下辊分别形成一组接触对。在轧辊中心，用弹簧单元“SPRING 14”模拟轧

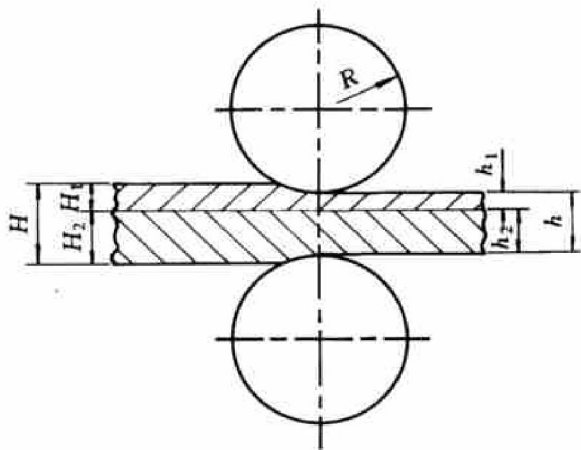


图 1 简化的几何模型
Fig.1 Simplified geometry model

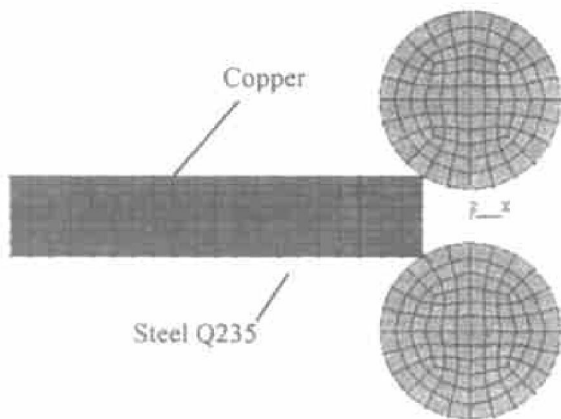


图 2 有限元模型
Fig.2 Finite element model

辊绕中心的转动，在同一时间范围内，使上、下辊绕各自中心按相反的方向转相同的或不同的角度，便可模拟同步轧制或异步轧制。约束轧辊中心在各个方向的移动，由于带材在轧制过程中前后有托辊支撑，约束中性面，使其只能沿水平方向移动。

3 模拟结果及实验验证

ANSYS 强大的后处理功能，可按照各种要求以云纹方式、图表方式、列表方式及动画方式显示所需的任何结果，其中的动画方式便是对轧制过程应力、应变、轧制力等要素的仿真模拟。图 3~ 6 所示为有关力学参数动画仿真结果某一时刻的云纹图。

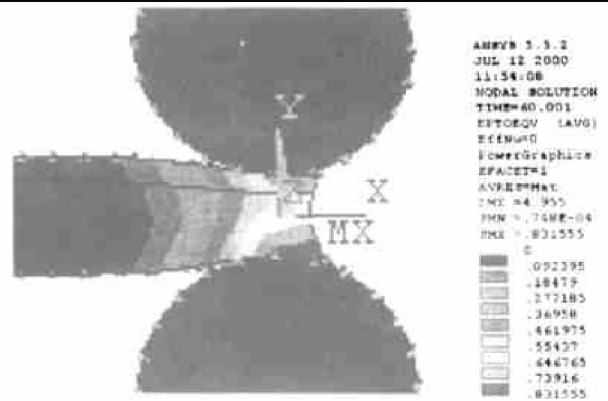


图 3 咬入时的等效应变分布
Fig.3 Strain distribution at entry

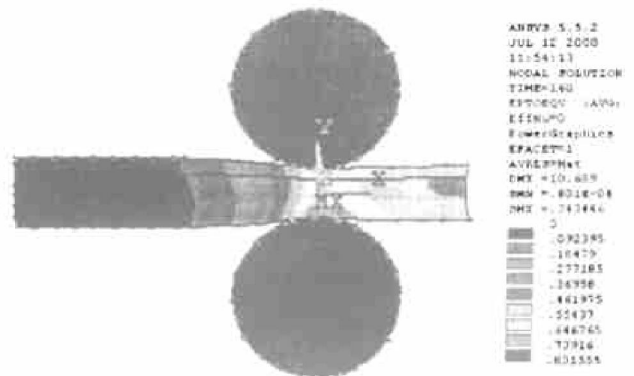


图 4 轧制过程中等效应变分布
Fig.4 Strain distribution during rolling

为验证有限元方法和解算过程的正确性及可靠性，我们在 SG836 四辊可逆式冷轧机上对铜-钢复合带材轧制进行实测，主要技术参数为：轧辊尺寸 $d45\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ ，轧制速度为 0.2 m/s ，最大轧制力矩 $175\text{ N}\cdot\text{m}$ ，轧件(铜、钢)厚度分别为 1 mm 和 5 mm 。实验目的：测试启动时及轧制中的轧制力和

轧制力矩的变化, 轧件的应力应变分布及塑性变形。主要测试仪器为: DY-15 动态电阻应变仪, 光线示波器, 3 × 120-3HA 型应变片等。

有限元模拟结果与实验结果比较如图 3~ 7。

图 3 所示为轧件咬入时的应变分布, 咬入时轧件的端头变形为凹弧状, 基材与下辊接触处的变形最大, 与实验观察结果吻合。

图 4 所示为轧制过程中某一时刻等效应变分布, 从中可看出, 在两轧辊之间的应变明显高于其它区域, 且最大应变出现在中性层与下轧辊之间, 与实测结果一致。

图 5 所示为轧制过程中两轧件的塑性变形分布, 反映出在两轧辊间, 两轧件塑性流动最为激烈, 并形象地反映出轧件塑性流动的方向及影响范围。

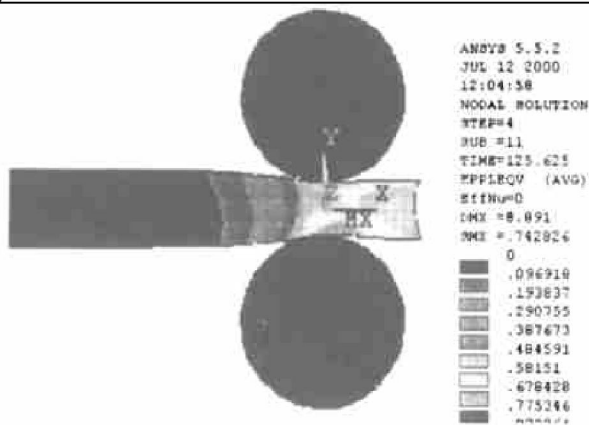


图 5 材料塑性流动分布

Fig. 5 Plastic flowing distribution

图 6 所示为轧制过程中等效应力的分布, 从分布情况看, 下轧辊与轧件的接触应力要明显大于上轧辊与上轧件的接触应力, 这也与实际测试情况相吻合。

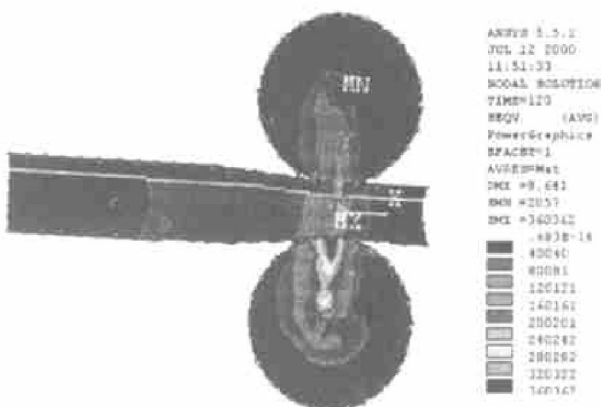


图 6 等效应力分布

Fig. 6 Stress distribution

图 7 所示为下轧辊中心处的轧制力和轧制力矩随时间变化情况的计算分析结果和实验结果比较, 两者的变化趋势是一样的: 轧制力在咬入时最大, 在随后的轧制过程中逐渐保持恒定, 而轧制力矩从开始轧制时的迅速增加, 随后逐渐保持恒定。从而说明本分析方法的正确性和可靠性。此外, 许多轧制方面的研究人员曾用各种理论对这两个要素进行过计算和测定, 在这里, ANSYS 的时间历程后处理可方便的给出, 这也是本方法的一大优点。

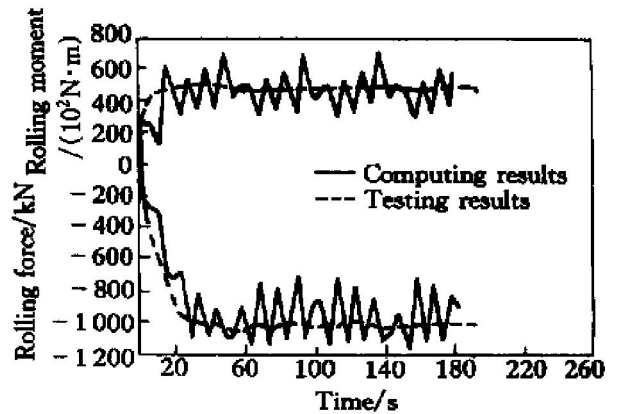


图 7 轧制过程中下轧辊中心轧制力和力矩的变化

Fig. 7 Variation of rolling force and moment at low-roller center during rolling

在 ANSYS 命令流中, 以参数方式记录材料性质、几何尺寸、轧辊转动速度等必须的要素。根据不同的轧制要求, 改变不同的参数, 并重新执行命令流, 便可得到不同基材、不同几何尺寸、不同的上下辊转速的同步或异步轧制的数值模拟和仿真结果。

4 结论

给出了一种对双金属复合材料轧制过程进行有限元模拟的方法。采用刚塑性有限元法, 以实验结果为依据, 以大型有限元软件 ANSYS 为分析工具, 分析了双金属复合材料轧制过程中, 轧辊和轧件的应力、应变分布, 轧件的塑性流动变形情况, 轧制力和力矩等力学要素。充分利用 ANSYS 的强大的后处理功能, 以动画方式给出有限元模拟结果, 从而得到了直观的、可视化的结果。该模拟方法可用于同步或异步轧制, 给出了一种有效方法来预测轧制结果和轧制质量, 预测可能出现的问题, 有助于减少试制时间和费用, 缩短试制周期, 并为解决问题提供必要的参考。

[REFERENCES]

- [1] HUANG Guan-jie, WAN Lin-yun. Study on the deformation rule of the aluminum-alloy composite sheets during rolling [J]. *Metal Forming Technology*, 1998, 16(1): 41- 45.
- [2] SHI Qing-nan, SUN Yong. A study of rolling force in composite rolling process with metallic powders and metallic sheets [A]. *Proceedings of the International Conference on Modeling and Simulation in Metallurgical Engineering and Materials Science [C]*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996. 788- 791.
- [3] MU Cheng-zhang(穆承章). 双金属复合轧制的应力分析及轧制力计算 [J]. *Journal of Beijing Institute of Iron and Steel(北京钢铁学院学报)*, 1990, 12(5): 23- 27.
- [4] WANG Ming-zong(王铭宗). 铝-钢双金属复合轧制层厚比与轧制力的研究 [J]. *Rolling Steel(轧钢)*, 1994 (6): 14- 17.
- [5] ZHANG Sheng-hua(张胜华). 铝/铜轧制复合板的界面结合新工艺 [J]. *Journal of Central South University of Technology(中南工业大学学报)*, 1991, 22(4): 353 - 357.
- [6] DUAN Kun-xiang(段坤祥). 双金属轧制压力的测试实验研究 [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology(昆明理工大学学报)*, 1997, 22(1): 54- 57.
- [7] ZHANG Da-ming(张代明). 粉镀轧制双金属复合带摩擦系数实验研究 [A]. *Proceedings of the National Conference on Theory and New Technology in Plastic Processing [C]*. Beijing: Editorial Department of Rolling Steel, 1996. 214- 218.
- [8] XIONG Shang-wu(熊尚武). 利用超薄单元处理奇异点的理论与应用 [J]. *Chinese Journal of Mechanical and Engineering(机械工程学报)*, 1998, 34(1): 82- 87.
- [9] LIU Xiang-hua(刘相华). 刚塑性有限元及其在轧制中的应用 [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994. 27- 74.
- [10] Huang Y M, Chen T H. Analysis of asymmetrical clad sheet rolling by stream function method [J]. *Int J Mech Sci*, 1996, 38(4): 443- 460.
- [11] Shen G, Aizawa T. Elastic-plastic contact analysis by the boundary element method [A]. *Boundary Element Method [C]*. Tokyo: Elsevier Science Press, 1993. 251- 260.
- [12] XIE Shui-sheng(谢水生). 金属塑性成形工艺的有限元数值模拟 [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.

Finite element simulation on rolling process of bimetal composite sheets

LI Shi-yun, ZHANG Shu-hong, ZHANG Da-ming

(Faculty of Mechatronic Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China)

[Abstract] A method to simulate the rolling process of bimetal composite sheets was given. Based on rigid-plastic finite element method, in terms of experiment results, and by the means of FEM software ANSYS, the deformations, stresses, strains, plastic flowing in sheets, rolling forces and rolling moments in symmetrical or asymmetrical rolling of bimetal composite sheets were analyzed. The results above were expressed in computer animated way. An effective approach to predict rolling results and to reduce test time and test cost is provided.

[Key words] rolling of bimetal composite sheets; numerical simulation; rigid-plastic finite element method

(编辑 朱忠国)