

平三角孔型轧制钛合金棒材温度场的有限元模拟

帅美荣 秦建平

(太原科技大学材料科学与工程学院, 太原 030024)

摘要 采用 MSC. Marc 有限元软件和接触分析技术, 对 TC4 钛合金 (0.08C、6Al、4V、0.3Fe、0.05N、0.015H, 余量 Ti) $\Phi 32$ mm 棒材在平三角孔型中的三维热变形过程进行了模拟仿真, 并定量分析了轧件温度场的变化。结果表明, 开轧温度 950 $^{\circ}\text{C}$ 时, TC4 棒材在平三角孔型中稳定轧制, 变形均匀, 但沿横断面温度出现梯度, 最低温度 910 $^{\circ}\text{C}$, 最高 966 $^{\circ}\text{C}$ 。

关键词 钛合金 平三角孔型 温度场 有限元模拟

Finite Element Simulation of Temperature Field of Titanium Alloy Rod during Rolling Process with Flat Triangle Pass

Shuai Meirong and Qin Jianping

(School of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

Abstract MSC. Marc finite element simulation software and contact analysis technique were used to simulate the three-dimensional heat deformation of TC4 titanium alloy (0.08C, 6Al, 4V, 0.3Fe, 0.05N, 0.015H, balance Ti) $\Phi 32$ mm rod during rolling process with flat triangle pass and quantitatively to analyze the temperature field of rolling stock. Results showed that with beginning rolling temperature 950 $^{\circ}\text{C}$, the deformation of TC4 rod in flat triangle pass was stable and uniform, but there existed a temperature gradient along cross section of rod with lowest temperature 910 $^{\circ}\text{C}$ and highest temperature 966 $^{\circ}\text{C}$.

Material Index Titanium Alloy, Flat Triangle Pass, Temperature Field, Finite Element Simulation

钛合金棒材在平三角孔型中轧制发生热变形, 金属流动比较复杂。影响这一变形过程的因素涉及到许多参数, 如压下量、变形速度、温度及摩擦等, 所以对该过程进行理论解析是十分困难的。过去多采用试验的方法进行研究, 但试验方法所需费用较大, 耗时较长。

近年来, 随着计算机技术及数值计算方法的发展, 基于有限元法的数值模拟技术越来越成为金属塑性加工过程解析的有力工具。本文采用 MSC. Marc 热力耦合弹性有限元软件和接触分析技术, 在建立有限元模型、边界条件和相关初始条件的基础上, 对钛合金棒材连轧过程中热变形的特点和温度场进行了三维模拟仿真, 并对结果进行了讨论

1 有限元模型及边界条件的建立

1.1 孔型及有限元模型的建立

将 $\Phi 32$ mm, 长度 350 mm 的钛合金圆棒材送入平三角孔型中轧制, 钛合金为 TC4, 主要化学成分 (%) 为: 0.08C、6Al、4V、0.3Fe、0.05N、0.015H, 其余含量为 Ti, 平三角孔型尺寸如图 1(a) 所示, 其它轧制工艺参数如表 1 所示。

由于热轧中轧辊弹性变形较小, 故将轧辊作为

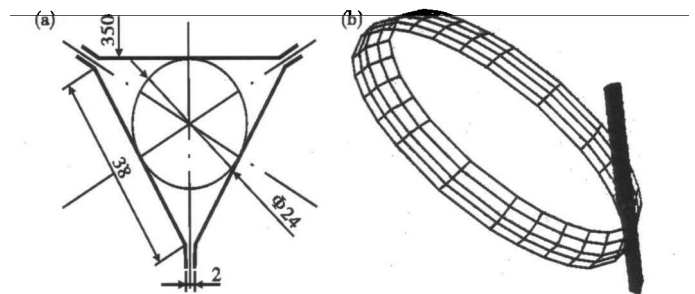


图 1 (a) 平三角孔型; (b) 有限元模型

Fig. 1 (a) Schematic of flat triangle pass; (b) model of simulation with finite element method

表 1 轧制工艺参数

Fig. 1 Rolling process parameters

轧件材质	伸长率/%	轧辊转速/(r · min ⁻¹)	开轧温度/ $^{\circ}\text{C}$
TC4	1.24	20	950

刚性接触体定义, 轧件作为弹塑性接触体定义。轧辊和轧件之间采用剪切摩擦模型, 摩擦因子取 0.7。针对热力耦合大变形问题, 选择 8 节点 6 面体等单元划分网格, 采用更新的 Lagrange 算法, Prandtl-Reuss 流动方程以及 Von Mises 屈服准则^[1]。根据对称性, 可取 1/6 轧件, 1/6 轧辊作为模拟对象, 轧件

长度 350 mm, 轧件沿长度方向 150 等分, 横截面上等分成 36 个单元, 共采用 5 400 个单元, 6 493 个节点。有限元模型如图 1(b) 所示。

1.2 边界条件的建立

由于在热轧过程中, 轧件的空冷时间较长, 所以轧件与环境的换热十分重要。轧件与环境间的换热主要是对流和辐射, 根据参考文献[2], 边界条件可统一表示为:

$$q = H(t - t_{\infty}) \quad (1)$$

式中: q - 热流密度; t, t_{∞} - 分别为轧件表面温度、环境温度; H - 等效热传导系数, 可写成对流换热系数与辐射换热系数之和。即:

$$H = h + h_r \quad (1a)$$

式中: h - 对流换热系数, 一般为 $0.01 \sim 0.1$ [$\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]; h_r - 辐射换热系数。

根据辐射定律写成:

$$h_r = E\sigma(t + t_{\infty}) \times (t^2 + t_{\infty}^2) \quad (1b)$$

式中: E - 黑度; σ - 斯忒藩-波尔兹曼常数, 其值为 5.67×10^{-11} [$\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$]。

轧辊和轧件的接触主要考虑热传导, 接触热传导 q_c 可描述为:

$$q_c = h_c(t - t_i) \quad (2)$$

式中: h_c - 接触热传导系数, 该系数与界面的表面状况和接触压力的大小有关。在本文计算中, h_c 取 20 [$\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]; t_i - 与轧件表面接触的变形工具表面温度。

轧件的对称面采用绝热处理, 金属的变形以及轧辊与轧件的接触摩擦会产生变形热, 热功转换系数取 0.9 ^[3]。

2 模拟结果与分析

2.1 轧件各阶段的变形特点

轧件在平三角孔型轧制发生变形, 不同阶段的网格畸变情况如图 2 所示。

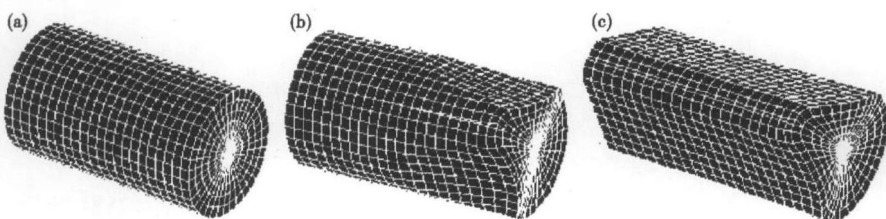


图 2 轧件网格畸变过程
Fig. 2 Grid distortion process of rolling stock

来料是圆棒材(图 2a), 当轧件刚刚咬入, 进入平三角孔型(倒三角), 轧件与轧辊接触的 3 个区域首先发生变形, 促使金属向辊缝区域流动, 所轧出的产品在对应轧辊接触面区域减薄, 在对应辊缝区域增厚, 这一现象正好可以通过下一孔型(正三角)来补偿(图 2b); 另外, 开轧时接触表面的金属首先发生变形, 然后变形逐渐向位于心部、侧面及辊缝区域的金属渗透, 由于接触表面金属纵向流速大于其他区域金属的流速, 导致轧件前端断面不平整(图 2b); 随着轧制的继续进行, 不平整程度得到缓解。整个轧制过程平稳, 轧件沿纵向, 周向变形均匀(图 2c)。

2.2 轧制过程温度分布的特点

轧件在孔型中稳定轧制, 图 3 是当增量步为 90 步时, 轧件横断面及节点号。

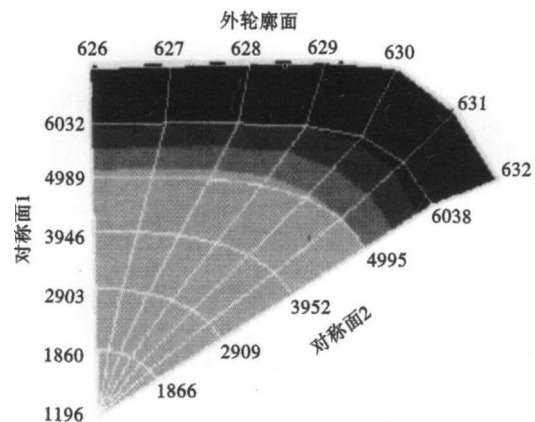


图 3 轧件横断面及节点号(90 步)
Fig. 3 Cross section of rolling stock and node number at increment 90

轧件在平三角孔型中发生变形, 一方面与周围环境和轧辊等接触体发生热交换, 另一方面由于轧件塑性变形生热和摩擦生热, 均导致轧件的温度分布不均匀, 以下从几个方面进行分析:

从图 4(a, b) 可以看出, 轧件变形前(0 ~ 80 步), 外轮廓面主要与周围环境存在对流和辐射, 各

节点温度约为 923 $^\circ\text{C}$, 下降 27 $^\circ\text{C}$, 下降幅度相同。当与低温轧辊接触时(80 ~ 90 步), 节点 626、627、628、629 与轧辊接触发生剧烈热传导, 温度骤然下降, 最低为 910 $^\circ\text{C}$, 而对应辊缝区域节点 630、631、632, 不与轧辊

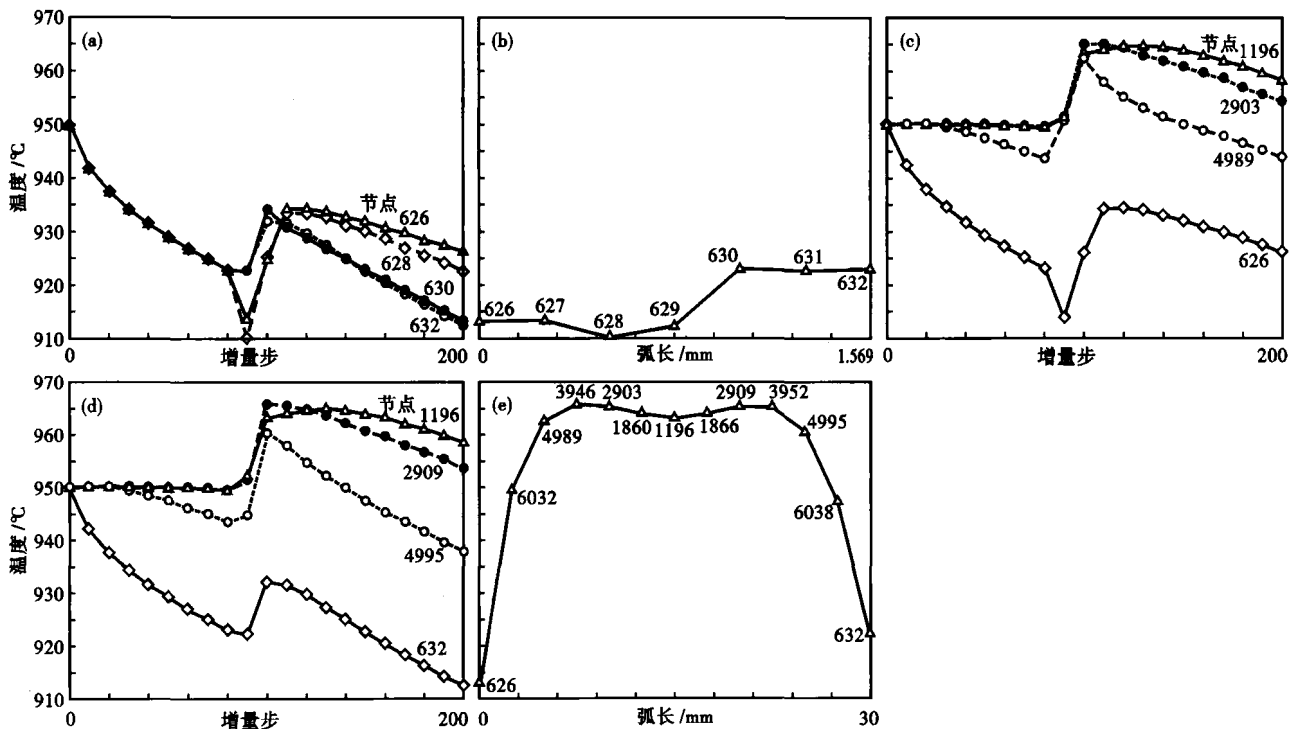


图4 轧件中部横断面不同节点的温度变化曲线:(a) 断面外轮廓面节点,0~200步;(b) 断面外轮廓面节点,90步;(c) 轧件对称面1上节点,0~200步;(d) 轧件对称面2上节点,0~200步;(e) 轧件对称面1、2上节点,90步

Fig.4 Curves of variances in temperature at different nodes of middle cross section of rolling stock: (a) nodes along outside contour of cross section, increment 0~200; (b) nodes along outside contour of cross section, increment 90; (c) nodes along symmetrical face 1 of rolling stock, increment 0~200; (d) nodes along symmetrical face 2 of rolling stock, increment 0~200; (e) nodes along symmetrical face 1 and 2 of rolling stock, increment 90

直接接触,温度基本不变。当脱离轧辊(90~110步)后,轧件外轮廓面受高温心部的热传导,温度上升很快,达到约934℃。随着轧制的进行(110~200步),轧件直接暴露与环境发生热交换,温度下降。

从图4(c,d)也可以看出,在简化轧件的对称面1、2上,轧件变形前(0~80步),节点626、632与环境发生热传导,温度下降幅度大。在与轧辊接触后(80~90步),节点626由于热传导,温度继续下降,节点632对应辊缝位置,所受影响不大,而对称面1上的节点4989、2903,对称面2上的节点4995、2909,以及中心节点1196由于轧件发生热变形,温度均不同程度的上升。在轧制过程结束后,节点1196温度最高约959℃。

结合图4(e)还可以看出,当增量步为90步时,以中心节点1196为对称点,两个对称面上的对应节点温度相当。说明从表面节点到心部节点,按照变形发生的先后次序出现了温度梯度,节点3946、3952,大约在接触面以下15mm处,由于塑性变形效应温度最高达966℃。

3 结论

(1) 钛合金棒材在平三角孔型中稳定轧制,轧

件沿纵向、周向变形均匀。

(2) 钛合金棒材在平三角孔型轧制过程中,温度分布不均匀,轧件与轧辊接触的瞬间,位于轧件与轧辊接触区域的节点由于热传导,温度低至910℃,对应辊缝区域的节点,温度923℃,而位于轧件对称面节点,由于塑性变形生热,温度均不同程度的上升,最高达966℃。

参考文献

- Galantucci L M, Tricarico L. Thermal-mechanical Simulation of a Rolling Process With a FEM Approach. *Journal of Material Processing Technology*, 1999, 92: 494
- 李胜祇, 孙中建, 李连诗. 实心坯二辊斜轧过程三维热力耦合分析. *北京科技大学学报*, 2000, 22(1): 52
- Wertheimer T B. Thermal Mechanically Coupled Analysis in Metal Forming Processes. Pittman J F T, Wood R D, Alexander J M, et al. *Numerical Methods in Industrial Forming Processes*. Swansea: Pineridge Press Ltd, 1982: 425

帅美荣(1978-),女,硕士,讲师,2006年太原科技大学毕业,轧制理论、轧制过程仿真研究。

收稿日期:2009-02-12