

Ti-6Al-4V 合金多道次热轧过程有限元模拟与实验

胡明^{1,2}, 董利民², 张志强², 雷晓飞², 杨锐², 沙玉辉¹

(1. 东北大学 材料各向异性及织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

(2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要:采用热力耦合方法对 Ti-6Al-4V 合金进行了多道次热轧模拟,研究了不同道次温度和等效塑性应变的分布特点。模拟结果表明,轧制过程表面温度低于心部的温度,随轧制道次的增加,表面温度整体表现为降低过程,中心温度整体表现为先升高后降低过程。中心位置比表面位置的等效塑性应变大,表面位置与中心位置的等效塑性应变均随变形道次的增加而增大。结果表明,随着轧制道次的增加,中心显微组织变形大于表面。中心区域组织易于发生动态球化。

关键词: Ti-6Al-4V 合金; 有限元模拟; 轧制

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)03-0956-06

双相 α/β 钛合金 Ti-6Al-4V 具有比强度高、耐腐蚀和力学性能优异等特点^[1], 广泛地应用于航空航天、化工、船舶制造及日用品等领域。该合金棒材用于制造飞机紧固件^[2], 具有显著减重效果, 市场需求大。目前, 钛合金棒材轧制方式主要有: 二辊往复式轧制、二辊连轧及三辊 Y 型连轧^[3]。其中, 二辊往复式轧制较好的适应钛合金棒材生产量较小, 产品规格较多的特点^[2]。然而, 二辊往复式轧制由于孔型特性, 道次变形量较大, 轧制过程容易产生组织不均匀及表面缺陷, 轧制难度大^[4]。生产技术人员较多的依靠生产经验调整轧制工艺, 对合金轧制过程温度、应变分布及变化特点了解较少。

近年来, 有限元法广泛地用于金属轧制变形领域, 能够准确模拟轧制过程温度、应力及应变分布, 在优化轧制工艺过程方面发挥了重要作用^[5]。帅美荣等^[6]采用 MSC.Marc 研究了二辊 Y 型轧机四机架连轧 TC11 钛合金过程, 宽展、应力分布、轧制力和轧制力矩。王亚芹等^[7]采用 ANSYS/LS-DYNA 模拟了三辊 Y 型轧机平三角-圆孔型系统轧制 TC4 钛合金工艺, 研究了棒材的金属流动、应力应变和轧制力等参数。但目前为止, 尚未见文献对二辊往复式轧制 Ti-6Al-4V 合金进行模拟研究。

本研究利用 ABAQUS 对 Ti-6Al-4V 合金进行多道次轧制热力耦合模拟。研究了轧制过程温度和等效塑性应变分布及变化特点, 并与实况轧制变形结果进行了对比。

1 实验

轧制实验材料为 Ti-6Al-4V 合金, 名义成分为 Ti-6.2Al-4.6V, 显微组织如图 1 所示。通过金相法测得的相转变温度约为 995 °C。 $\Phi 25$ mm 的合金棒材由二辊横列式轧机轧制为 $\Phi 10$ mm 棒材。轧制道次为 10 道次, 孔型采用椭圆-箱型交替分布, 每道次轧后, 轧棒旋转 90°进入下一道次, 终轧道次孔型为圆形。轧制初始温度为 900 °C, 轧后空冷至室温。截取 6 道次和 10 道次合金棒材用于显微组织观察。

采用线切割方法切割棒材的纵截面, 用 150#、600#、1000#和 2000#砂纸磨亮金属表面, SiO₂ 纳米悬浮液抛光 20 min, 5%HF + 10%HNO₃ + 85%H₂O 的腐蚀液腐蚀 10 s, 随后进行扫描电镜观察。

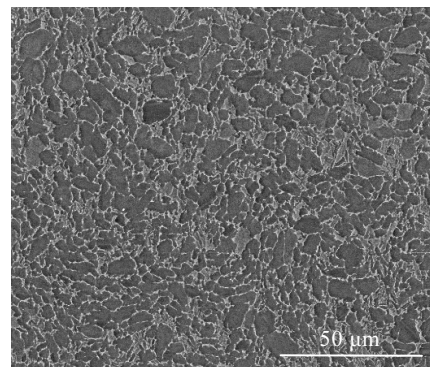


图 1 Ti-6Al-4V 合金坯料显微组织

Fig.1 Microstructure of as-received Ti-6Al-4V alloy

收稿日期: 2019-03-20

作者简介: 胡明, 男, 1991 年生, 博士, 东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819, 电话: 024-23971962, E-mail: mh13s@imr.ac.cn

2 有限元模拟方法

2.1 有限元模型

多道次热轧属于复杂的非线性热力耦合成型问题,因此,选用 Dynamic, Temp-disp, Explicit 分析步,使用 ABAQUS/Explicit 求解。热传递计算采用显示向前差分时间积分法,力学响应采用显示中心差分积分法。由于模型具有对称性,对三维有限元模型做了必要的简化,轧棒采用 1/4 的 $\Phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 模型,轧棍直径为 280 mm,棍缝为 1 mm,其中初轧状态部分模型如图 2 所示。轧棒使用 C3D8RT 单元,轧棍变形不考虑,设置为钢体。道次间隔时间设置为 0.8 s。

2.2 热物理参数

热力耦合模拟需要用到较多的热物理参数,为保证实验参数准确性,密度、杨氏模量、泊松比、比热容、热导率和线膨胀系数均由实验测得。合金密度为 4.403 g/cm^3 ,杨氏模量、泊松比、比热容、热导率和线膨胀系数如表 1 所示。塑性功转化为体积热系数为 0.9。

2.3 Ti-6Al-4V 合金本构模型

轧制温度、应变及应变速率对轧制应力有较大的影响,因此本实验采用应变补偿的 Arrhenius 型本构模型^[8]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A}\right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A}\right)^{2/n} + 1\right]^{1/2} \right\} \quad (2)$$

式中, Z 是 Zener-Hollomon 参数, Q 是热变形激活能, T 是绝对温度, R 是理想气体常数, $\dot{\epsilon}$ 是真应变速率, σ 是真应力, α 、 n 和 A 是材料常数。具体的计算方法和结果见文献^[9]。

2.4 接触和边界条件

定义轧棍与轧棒为面面接触,轧棍为主面,轧棒

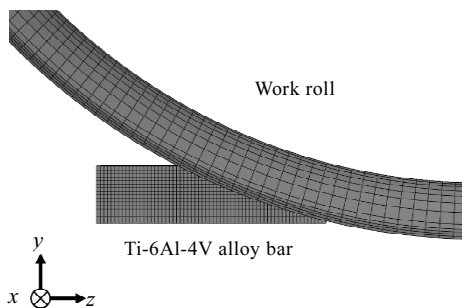


图 2 初轧状态有限元模型

Fig.2 Finite element model for initial rolling state

表 1 Ti-6Al-4V 合金热物理参数

Table 1 Thermal physical parameters of Ti-6Al-4V alloy

Temperature/ °C	Young's modulus/ GPa	Poisson's ratio	Thermal conductivity/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	Coefficient of thermal expansion/ $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Specific heat/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$
20	113	0.29	5.42	-	451
100	109	0.29	6.47	8.98	470
200	104	0.29	7.59	9.42	489
300	989	0.29	8.71	9.76	508
400	944	0.3	9.73	10.0	523
500	899	0.3	10.6	10.2	529
600	850	0.31	11.2	10.4	528
700	797	0.3	11.7	10.7	521
800	735	0.28	12.3	11.0	514
900	663	0.29	12.9	11.2	509
1000	585	0.29	13.7	11.3	506

外表面为从面。摩擦系数为 0.2,摩擦力做功产生表面热流,功热转换系数为 0.5。轧棍与轧棒间的接触换热系数为 $5 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ 。轧棒与环境间对流换热系数为 $0.02 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ 。轧棒的表面辐射率为 0.8。

定义轧棒初始轧制温度为 900 °C,轧制初始速度为 $560 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对 1/4 轧棒采用对称约束。轧棍转速为 $4 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 。轧棍温度为 20 °C。

3 实验结果

3.1 轧制温度场

各道次轧后中间位置横截面的温度分布如图 3 所示。1 道次轧后,棒材横截面成椭圆形,中心温度梯度分布呈椭圆形,椭圆度较大,中心温度升高至 930 °C 左右,表面温度降低至 830 °C 左右。2 道次轧后,轧材横截面成箱形,中心温度梯度分布呈椭圆形,椭圆度较小,中心温度升至 950 °C 左右,表面温度为 800 °C 左右。3 道次轧后,轧材横截面成不完整椭圆形,中心温度梯度分布呈椭圆形,椭圆度较大,中心温度有所降低,为 930 °C 左右,表面温度为 790 °C 左右。4 道次轧后,轧材横截面成箱形,中心温度梯度分布呈椭圆形,椭圆度较小,中心温度为 915 °C 左右,表面温度为 765 °C 左右。5 道次轧后,轧材横截面成不完整椭圆形,中心温度梯度分布呈椭圆形,椭圆度较大,中心温度为 890 °C 左右,表面温度为 780 °C 左右。6 道次轧后,轧材横截面成箱形,中心温度梯度分布呈椭圆形,椭圆度较小,中心温度为 880 °C 左右,表面温度为 750 °C 左右。7 道次轧后,轧材横截面成不完整椭圆形,中心温度梯度分布呈椭圆形,椭圆度较大,中心温度为 850 °C 左右,表面温度为 765 °C 左右。8 道次轧后,轧材横截面成箱形,中心温度梯度分布呈椭圆形特点,椭圆度较小,中心温度为 830 °C 左

右, 表面温度为 730 °C 左右。9 道次轧后, 轧材横截面成不完整椭圆形, 中心温度梯度分布呈椭圆形, 椭圆度较小, 中心温度为 760 °C 左右, 表面温度为 670 °C 左右。10 道次轧后, 轧材横截面成圆形, 两侧带有凸起, 中心温度分布呈椭圆形, 椭圆度较小, 中心温度为 700 °C 左右, 表面温度为 650 °C 左右。

中间位置表面节点 A 和中心节点 B 温度随时间变化如图 4 所示。表面温度随时间的变化, 降温升温交替, 中心温度随时间的变化, 升温降温交替。1 道次轧后, 中心和表面最大温差约为 250 °C, 最小温差约为 80 °C。2 道次轧后, 中心和表面最大温差约为 290 °C, 最小温差约为 120 °C。3 道次轧后, 中心和表面最大温差约为 330 °C, 最小温差约为 100 °C。4 道次轧后, 中心和表面最大温差约为 310 °C, 最小温差约为 100 °C。5 道次轧后, 中心和表面最大温差约为 300 °C, 最小温差约为 50 °C。6 道次轧后, 中心和表面最大温差约为 290 °C, 最小温差约为 80 °C。7 道次轧后, 中心和

表面最大温差约为 270 °C, 最小温差约为 30 °C。8 道次轧后, 中心和表面最大温差约为 270 °C, 最小温差约为 50 °C。9 道次轧后, 中心和表面最大温差约为 270 °C, 最小温差约为 40 °C。10 道次轧后, 中心和表面最大温差约为 220 °C, 最小温差约为 25 °C。

3.2 轧制等效塑性应变场

各道次轧后中间位置横截面的等效塑性应变分布如图 5 所示。1 道次轧后, 中心等效塑性应变约为 0.6, 表面等效塑性应变约为 0.3。2 道次轧后, 中心等效塑性应变约为 1.3, 表面等效塑性应变约为 0.6。3 道次轧后, 中心等效塑性应变约为 1.9, 表面等效塑性应变约为 0.9。4 道次轧后, 中心等效塑性应变约为 2.5, 表面等效塑性应变约为 1.1。5 道次轧后, 中心等效塑性应变约为 3.3, 表面等效塑性应变约为 1.5。6 道次轧后, 中心等效塑性应变约为 4.2, 表面等效塑性应变约为 1.6。7 道次轧后, 中心等效塑性应变约为 5.0, 表面等效塑性应变约为 2.0。8 道次轧后, 中心等效塑性应变约为 6.0, 表面等效塑性应变约为 2.2。9 道次轧后, 中心等效塑性应变约为 6.3, 表面等效塑性应变约为 2.3。10 道次轧后, 中心等效塑性应变约为 6.5, 表面等效塑性应变约为 2.5。各道次轧后, 等效塑性应变分布不均匀, 成不规则形状。

中间位置表面节点 A 和中心节点 B 等效塑性应变随时间变化如图 6 所示。表面和中心等效塑性应变均随时间的变化, 增加平稳交替。1 道次轧后, 中心和表面等效塑性应变差约为 0.25。2 道次轧后, 中心和表面等效塑性应变差约为 0.7。3 道次轧后, 中心和表面等效塑性应变差约为 1。4 道次轧后, 中心和表面等效塑性应变差约为 1.5。5 道次轧后, 中心和表面等效塑性应变差约为 1.8。6 道次轧后, 中心和表面等效塑性应变差约为 2.5。7 道次轧后, 中心和表面等效塑性应变差约为 3。8 道次轧后, 中心和表面等效塑性应变

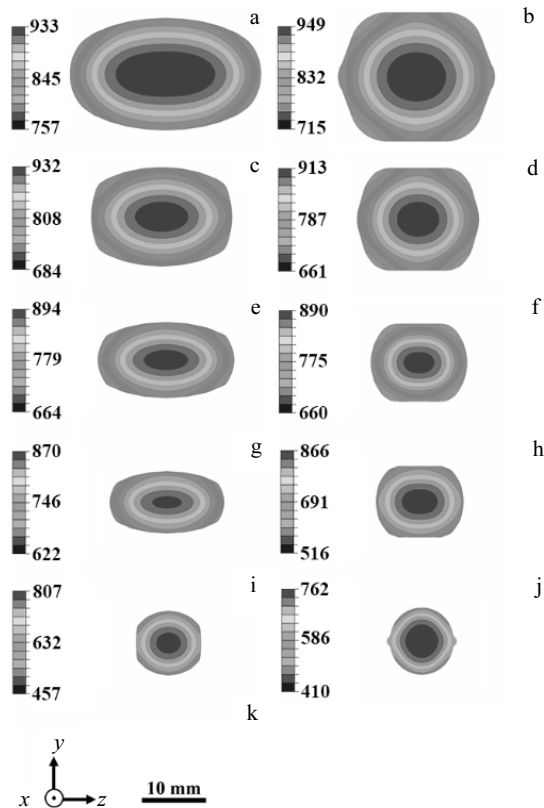


图 3 各道次轧后中间位置横截面温度场分布

Fig.3 Temperature field distributions of rolling bar in the cross section of middle position: (a) 1 pass, (b) 2 passes, (c) 3 passes, (d) 4 passes, (e) 5 passes, (f) 6 passes, (g) 7 passes, (h) 8 passes, (i) 9 passes, (j) 10 passes, and (k) coordinate system and ruler

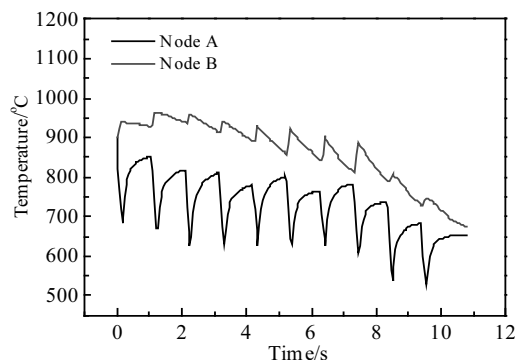


图 4 中间位置表面节点 A 和中心节点 B 温度随时间变化关系

Fig.4 Relationship of temperature with time of node A and B

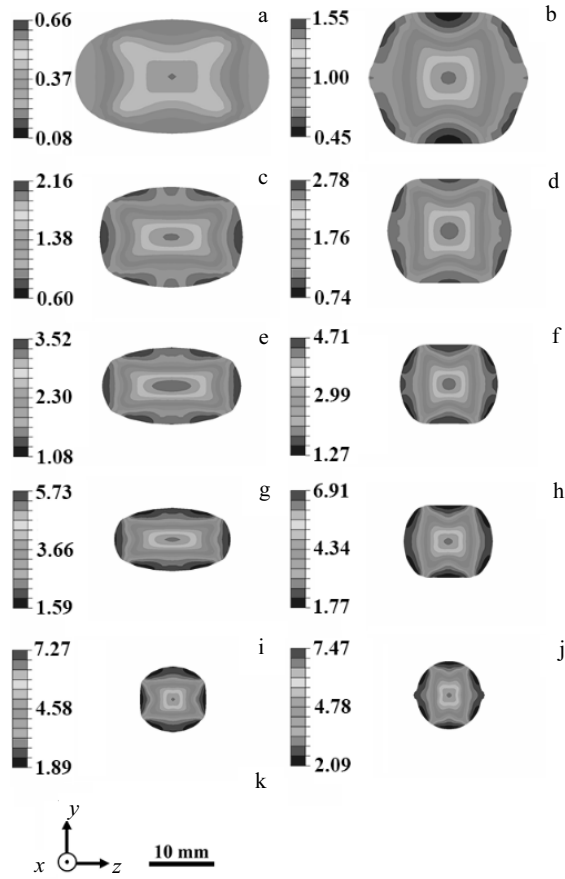


图 5 各道次轧后中间位置横截面等效塑性应变场分布

Fig.5 Equivalent plastic strain field distributions of rolling bar in the cross section of middle position: (a) 1 pass, (b) 2 passes, (c) 3 passes, (d) 4 passes, (e) 5 passes, (f) 6 passes, (g) 7 passes, (h) 8 passes, (i) 9 passes, (j) 10 passes, and (k) coordinate system and ruler

差约为 3.8。9 道次轧后,中心和表面等效塑性应变差约为 4.1。10 道次轧后,中心和表面等效塑性应变差约为 4。

3.3 轧制显微组织

为验证模拟结果的准确性,对初始温度为 900 °C、尺寸为 $\Phi 25$ mm 的合金棒材进行了轧制实验。其 6 道次和 10 道次近表面区域与中心区域的纵截面的显微组织如图 7 所示。显微组织成纤维状,6 道次近表面区域 α 晶粒纵向长度比中心区域小。由于 10 道次变形量较大,纵向晶粒大小难以清晰辨认,但图 7c 和 7d 可以看出 10 道次近表面区域 α 晶粒横向尺寸大于中心区域。6 道次和 10 道次近表面区域的球化组织比例均小于中心区域。

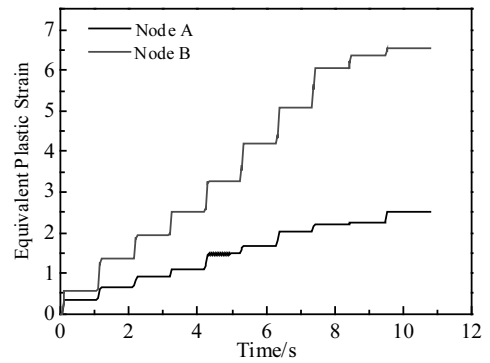


图 6 节点 A 和节点 B 等效塑性应变随时间变化关系

Fig.6 Relationship between equivalent plastic strain and time of node A and B

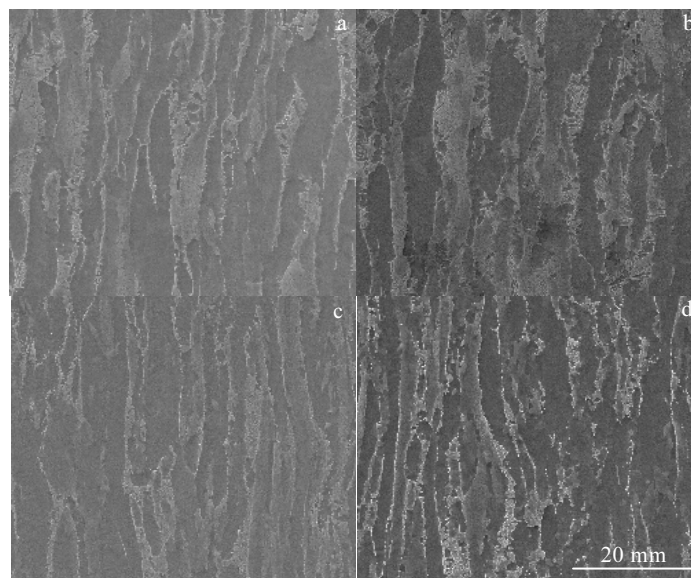


图 7 6 道次和 10 道次纵截面显微组织

Fig.7 Microstructure of 6 passes (a, b) and 10 passes (c, d) in longitudinal section marginal area (a, c) and central area (b, d)

4 分析与讨论

4.1 轧制过程温度变化

轧制过程中, 各道次轧棒的表面温度和中心温度相差较大, 且不同道次轧棒的温度变化较大。其温度主要受轧辊的接触传热、环境的热传递、热辐射、摩擦热及塑性变形热的作用。轧辊的接触传热、环境的热传递和热辐射均能使合金热量散失、温度降低。摩擦热和塑性变形热均能使合金热量增加、温度升高。

由图 3 结果表明, 随轧制道次的增加, 表面温度降低, 主要原因是轧辊温度较低, 热传递过程带走大量的热量, 热量快速散发, 虽然存在摩擦生热, 但产生热量远小于接触传热散失热量, 最终表现为温度降低; 中心温度先升高后降低, 主要原因是前几道次合金棒材心部塑性变形产生大量的热量, 短时间不易散发, 热量集聚在中心, 温度升高, 后几道次塑性变形产生的热量小于热传递扩散损失的热量, 温度降低。

由图 4 结果表明, 表面温度随时间变化特点为降温升温交替, 变化幅度约为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。主要原因是轧制接触阶段, 表面与轧辊接触传热的温降作用大于塑性变形热和摩擦生热, 温度大幅下降, 轧制脱离阶段, 由于心部温度高, 热量传递至表面, 表面温度升高。中心温度随时间变化特点为升温降温交替, 变化幅度约为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。主要原因是轧制接触阶段, 塑性变形生热, 且中心不与轧辊接触, 温度升高, 轧制脱离阶段, 由于表面温度低, 热量传递至表面, 中心温度降低。中心和表面温差随时间变化较大, 各道次最大温差发生在轧制接触结束时刻, 最小温差发生在下一道次轧制接触开始时刻。主要原因是轧制接触阶段, 轧辊接触传热和塑性变形热能加剧温度的变化, 温差加大; 轧制脱离阶段, 轧棒温度通过自身热传导, 趋向于温度平衡, 温差较小。

通过上述分析可知, 多道次轧制过程, 棒材温度发生较大变化, 前几道次温升较大, 容易过热, 可通过改善孔型、减小变形量、降低轧制速度等方式控制过热。终轧阶段温度降至 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, 远低于初轧温度, 可通过更换导热系数较小轧辊、增加保温罩等方式进行改进。

4.2 轧制过程等效塑性应变变化

轧制过程中, 各道次轧棒的表面等效塑性应变和中心等效塑性应变相差较大。其等效塑性应变主要与金属流动有关。其 1 道次等效塑性应变的分布特征示意图如图 8 所示, 可将其大致分为 3 个具有不同变形程度的区域: I 区、II 区和 III 区, 变形程度排序为 II

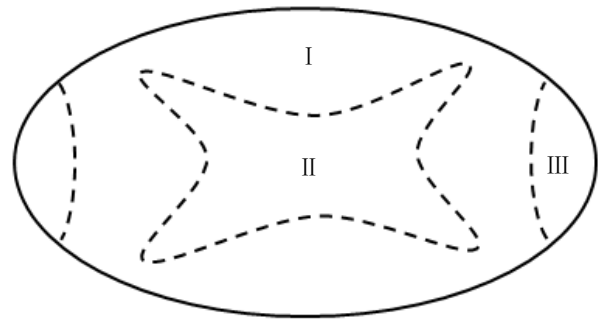


图 8 1 道次等效塑性应变的分布特征示意图

Fig.8 Schematic diagram of equivalent plastic strain distribution characteristic of 1 pass

区 $>$ I 区 $>$ III 区。II 区处于与轧制压力大致成 45° 交角的最有利的变形区, 易于发生塑性变形。2 道次等效塑性应变的分布特征为中心较大, 上下表面较小, 类似地也存在图 8 II 区 (有利变形区) 的形貌特征。结合 1 道次和 2 道次等效塑性应变的分布特征, 可知等效塑性应变的分布受轧辊孔型影响较大, 当孔型为椭圆时, 上下表面易于变形; 当孔型为箱型时, 上下表面难于变形。此外, 各道次轧制过程中, 表面与中心的等效塑性应变均随变形道次的增加而增加, 中心等效塑性应变的增长速率较大。轧制阶段, 等效塑性应变快速增加。轧制间隙, 等效塑性应变保持不变。

4.3 轧制显微组织

轧制过程中由于轧辊的接触作用, 轧棒沿长度方向伸长, 径向尺寸减小。随着变形量的增加, α 晶粒尺寸沿径向减小, 轴向伸长。中心区域显微组织变形大于近表面区域。中心区域温度较高, 组织动态球化容易发生, 因此中心区域球化比例较高。实验结果与模拟结果基本一致。

5 结论

1) 轧制过程表面和心部的温度变化有较大的不同, 表面温度小于心部的温度。表面区域温度变化受轧辊接触传热和自身热传递影响较大, 温度变化过程为降温、升温交替过程, 整体表现为温度降低过程。中心位置温度变化主要受塑性变形热和自身热传递作用。温度变化过程为升温、降温交替过程, 整体表现为温度先升高后降低过程。棒材轧制前几道次, 温升较大, 容易过热, 可通过改善孔型、减小变形量、降低轧制速度的方式控制过热。

2) 各道次轧制过程中, 表面位置与中心位置的等效塑性应变均随变形道次的增加而增加。中心位置的等

等效塑性应变大于表面位置,且增加的速率较大。等效塑性应变的分布受轧辊孔型影响较大,当孔型为椭圆时,上下表面易于变形;当孔型为箱型时,上下表面难于变形。中心位置位于易变形区,等效塑性应变大。

3) 随着变形量的增加, α 晶粒尺寸沿径向减小,轴向伸长。中心区域显微组织变形大于近表面区域。中心区域温度较高易于组织动态球化。

参考文献 References

- [1] Huang Boyun(黄伯云), Li Chenggong(李成功), Shi Likai(石力开) et al. *Chinese Material Engineering Dictionary*(中国材料工程大典第4卷)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 601
- [2] Liu Shifeng(刘世峰), Liu Quanming(刘全明), Zhang Zhaohui(张朝辉) et al. *Hot Working Technology*(热加工技术)[J], 2014, 43(3): 5
- [3] Hu Haiping(胡海萍), Sun Jixian(孙吉先), Zhu Weichang(朱为昌) et al. *Journal of University of Science and Technology Beijing*(北京科技大学学报)[J], 1999, 21(4): 372
- [4] Guo Lafeng(郭拉风), Yuan Meini(原梅妮), Liang Minjie(梁敏洁). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2011, 35(2): 196
- [5] Zhou Li(周丽), Wang Changzhou(王唱舟), Zhang Xingxing(张星星) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2015, 51(7): 889
- [6] Shuai Meirong(帅美荣), Qin Jianping(秦建平). *Modern Manufacturing Engineering*(现代制造工程)[J], 2008(3): 102
- [7] Wang Yaqin(王亚芹), Liu Xinyu(刘欣玉), Pan Lu(潘露). *Rare Metals and Cemented Carbides*(稀有金属与硬质合金)[J], 2014, 42(6): 38
- [8] Sellars C M, McTegart W J. *Acta Metallurgica*[J], 1966, 14(9): 1136
- [9] Hu Ming, Dong Limin, Zhang Zhiqiang et al. *Metals*[J], 2018, 8(4): 256

Finite Element Simulation and Experiment of Multipass Hot Rolling for Ti-6Al-4V Alloy

Hu Ming^{1,2}, Dong Limin², Zhang Zhiqiang², Lei Xiaofei², Yang Rui², Sha Yuhui¹

(1. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The multipass hot rolling simulation of Ti-6Al-4V alloy was carried out by thermo-mechanical coupling method. The distribution characteristics of temperature and equivalent plastic strain at different passes on the cross section were studied. The simulation results show that the temperature of surface is lower than that of the center. With the increase of the rolling pass, the temperature of surface area decreases, while the temperature of the center increases first and then decreases. Equivalent plastic strains in both surface and center increase with the increase of the rolling passes. The equivalent strain in the center is larger than that in the surface. The experimental results show that with the increase of the rolling pass, the deformation of microstructure in the central region is larger than that in the surface region. The temperature in the central region is higher, where dynamic spheroidization occurs more easily.

Key words: Ti-6Al-4V alloy; finite element simulation; rolling

Corresponding author: Dong Limin, Ph. D., Professor, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China, Tel: 0086-24-23971265, E-mail: lmdong@imr.ac.cn