

TC4 合金等温成形过程模拟与组织预测

聂 蕾 李付国 方 勇

(西北工业大学 西安 710072)

文 摘 在试验研究的基础上,建立了能够反映锻造热力参数对材料成形性能影响的新型本构方程,并采用变形与传热耦合分析的刚塑性有限元数值模拟方法,全面系统地研究了 TC4 合金的等温成形过程。基于建立的该合金动态再结晶组织的演化模型,定量地预测了等温成形过程中 TC4 合金微观组织的演变情况,并分析讨论了宏观工艺参数对合金微观组织演变过程的影响,从而为 TC4 合金热成形工艺参数的优化设计和控制提供了基础。

关键词 TC4 合金,等温成形,过程模拟,组织预测

Process Simulation and Microstructure Prediction of Ti-6Al-4V Alloy in Isothermal Forging

Nie Lei Li Fuguo Fang Yong

(Northwest Polytechnical University Xi'an 710072)

Abstract Based on systematical experiment research, a new constitutive relationship reflecting effects of forging thermodynamic parameters on metal forming property, is proposed. Isothermal forming process of Ti-6Al-4V alloy is studied using rigid-plastic finite element method (FEM) of coupled analysis of deformation and heat transfer. Based on the proposed model of dynamic recrystal microstructure evolution, the microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy in the isothermal forming process may be predicted quantitatively. Influence of macroscopic process parameters on the microstructure evolution is also analyzed and discussed. These results can be provided for optimum design and control of thermoforming parameters of Ti-6Al-4V alloy.

Key words Ti-6Al-4V alloy, Isothermal forging, Process simulation, Microstructure prediction

前言

TC4 合金是一种广泛应用于航空工业的难变形材料,其综合机械性能良好,组织稳定性较高,但显微组织对热力参数极其敏感,难以预测和控制。由于金属高温变形时不仅形状发生改变,内部的显微组织也会经历一系列动态变化,进而影响到材料的综合性能;因此,正确理解热力参数对材料组织演变

的影响规律是合理制定锻造工艺,进行质量控制的基础。

近年来,国内外在这方面进行的研究极为活跃,但主要集中在试验研究方面。本文采用变形与传热耦合分析的刚塑性有限元数值模拟方法,建立了 TC4 合金显微组织演化模型,全面系统地研究了 TC4 合金的等温成形过程,计算结果与试验结果吻

收稿日期:2001-07-20;修回日期:2002-02-06

*航空基础科学基金:98H53 068;国防先进制造技术项目资助:18.8.4.1

聂蕾,1976 年出生,硕士研究生,主要从事宇航难变形材料成型过程模拟与质量控制的研究工作

宇航材料工艺 2002 年 第 5 期

— 45 —

合良好。在此基础上,深入探讨了在 TC4 合金锻造过程中,热力参数对显微组织的影响规律及组织演变过程,为进行具体成形件模锻过程的工艺优化设计和质量控制方案提供了基础。

1 有限元数值模拟方法

目前工程技术领域内常用的数值模拟方法有:有限单元法、边界元法、离散单元法和有限差分法等,从实用性和应用的广泛性角度出发,有限单元法是最常用且求解精度较高的工程计算方法之一。

材料的热塑性成形过程,是外加能量在材料内部的重新再分配过程,它涉及到热能和机械能,其中大量的机械能会通过塑性变形能转换成热能,而热能的分布又影响到机械能的转变和再分配,只有将变形模型与热分析耦合,才能更加合理地模拟合金的热成形过程。

2 有限元数值模拟模型

2.1 几何模型

等温压缩试验采用 $8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 圆柱形试样,考虑到变形材料各向同性,在 $12\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的矩形截面上建立轴对称有限元求解几何模型。

2.2 网格模型

在求解区域内,划分矩形有限元网格,取网格边长为 1 mm 。

2.3 材料模型

进行数值模拟的重要步骤是定义材料模型,本试验材料为 TC4 合金,其本构方程的表达形式为:

$$\sigma = \sigma_0 f^m f^{\dot{\epsilon}} f^T \quad (1)$$

式中, σ_0 为初始屈服应力; f^m 为等效应变; $f^{\dot{\epsilon}}$ 为等效应变速率; f^T 为变形温度。

利用实验数据回归出关于 f^m 、 $f^{\dot{\epsilon}}$ 和 f^T 的计算公式代入上式,即可得流动应力随各影响因素变化的本构关系式。

2.4 边界条件

等温压缩试验使用玻璃润滑剂,摩擦系数选取在 $0.3 \sim 0.5$; 由于是变形传热耦合分析,需定义材料的热物性参数和接触面间的对流换热系数等^[1]。

2.5 TC4 合金再结晶组织演化模型

在进行晶粒尺寸和体积分数的模拟计算时,采用了 Yada 模型,这是 80 年代由 H. Yada 等人建立

的一种关于再结晶过程和晶粒尺寸及分布的数学模型,最初仅限于碳锰低碳钢材料,后来逐渐改进并发展为一种分析材料热成形过程中再结晶和晶粒演变情况的通用模型。根据 Yada 模型基本公式^[2],利用试验数据回归出 TC4 合金动态再结晶的有关公式。

(1) 动态再结晶临界应变计算公式:

$$\ln \epsilon_{\text{growth}} = 0.0197e^{1988.3862/T} \quad (2)$$

(2) 动态再结晶体积分数的计算公式

当 $\ln \epsilon_{\text{growth}}$ 时,

$$V_f = 265.5860e^{-5422.2195/T} \quad (3)$$

(3) 动态再结晶晶粒尺寸计算公式

当 $\ln \epsilon_{\text{growth}}$ 时,

$$g = 37.7993f^{0.00417}e^{-10752202/T} \quad (4)$$

3 有限元数值模拟结果

3.1 计算条件

为研究热力参数对 TC4 合金显微组织演变过程的影响,对其等温压缩过程进行模拟,结合实际试验情况,制订方案如下。

试样尺寸: $8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$;

试样原始组织: + 两相组织,晶粒平均直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$;

变形温度 T : 860 、 890 、 920 ;

变形速度 v : 0.03 mm/s 、 0.08 mm/s 、 0.10 mm/s 、 0.15 mm/s ;

试样最大高度压缩率: 66.67% ;

摩擦系数 m : 0.3 、 0.4 、 0.5 。

3.2 再结晶组织

通过模拟试验,研究了 TC4 合金在不同热力参数下的流动情况和组织演变情况。从模拟结果可以看出,在变形过程中,圆柱体内的变形极不均匀,而且钛合金在热变形过程中组织演变机制比较复杂,同时发生再结晶和 α 相转变,各处的晶粒尺寸和体积分数也不相等^[3]。

3.2.1 变形速度的影响

变形速度对晶粒尺寸的影响见图 1,当其他条件相同时,变形速度增加,同一区域内的晶粒尺寸增加,且圆柱体内的组织不均匀程度加剧。这主要是由于钛合金热导率小,变形速度增加,变形热效应加大,使晶粒长大速度加快,易造成晶粒粗大。当局部出现过热时,易形成脆或高温魏氏体组织^[4]。

宇航材料工艺 2002 年 第 5 期

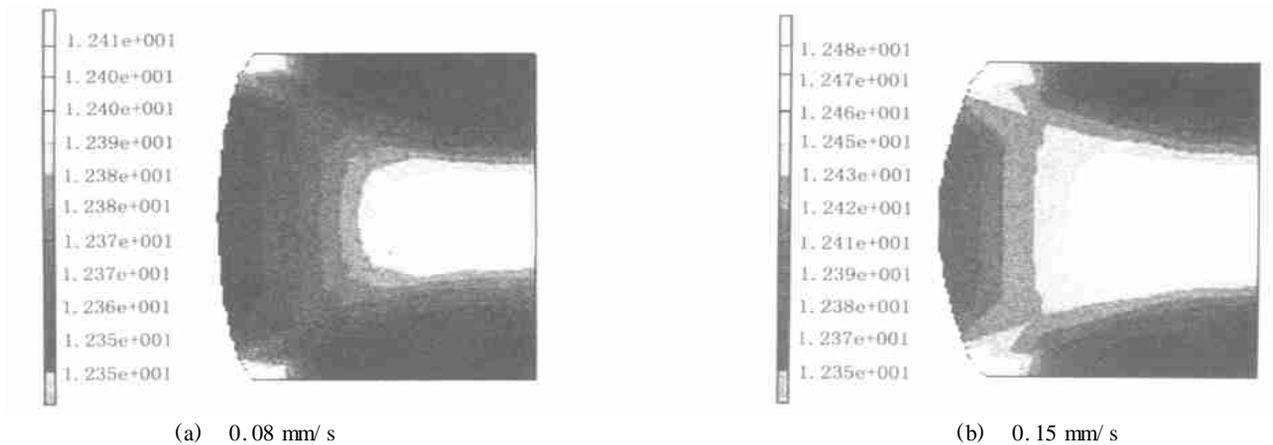


图 1 变形速度对晶粒尺寸的影响

Fig. 1 Influence of deformation velocity on grain size
 T 为 860 ; 为 39.14 % ; m 为 0.4。

3.2.2 变形温度的影响

试验是在 + 两相区进行的,由图 2 和图 3 可

见,随着变形温度的升高,同一区域的晶粒尺寸和相体积分数均有所增加。

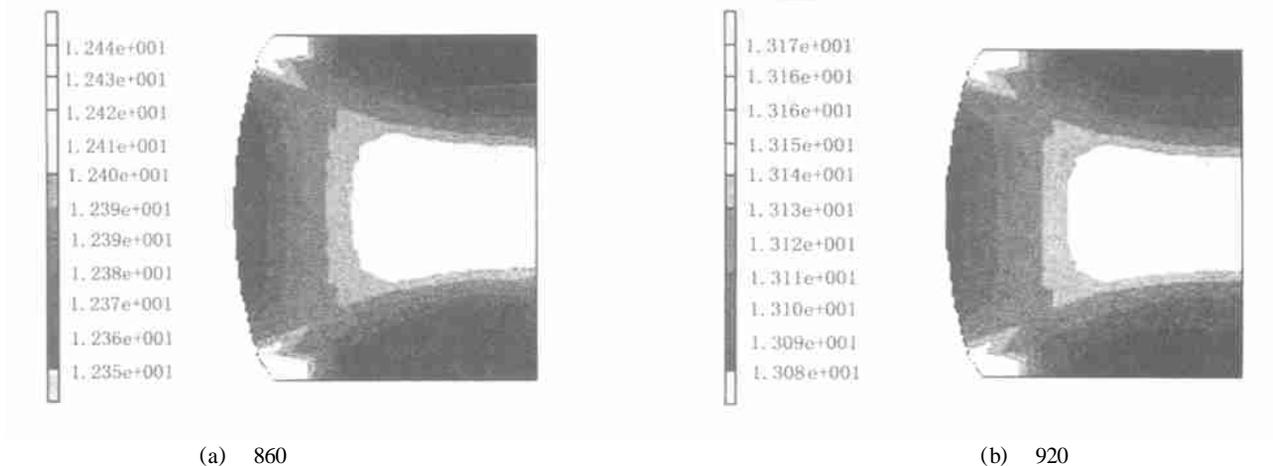


图 2 变形温度对晶粒尺寸的影响

Fig. 2 Influence of deformation temperature on grain size
 v 为 0.10 mm/s ; 为 39.14 % ; m 为 0.4。

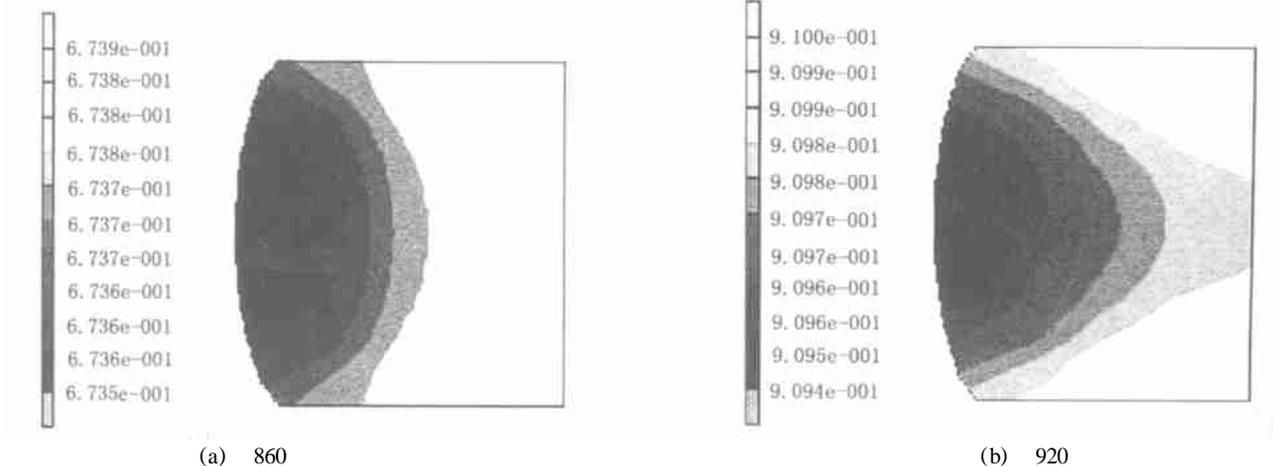


图 3 变形温度对 相体积分数 (10^2 %) 的影响

Fig. 3 Influence of deformation temperature on volume fraction of phase
 v 为 0.10 mm/s ; 为 39.14 % ; m 为 0.4。

这主要是变形温度升高,产生再结晶所需的激活能降低,再结晶进程加速,晶粒长大加速^[4],同时TC4合金的组成相比比例及晶格类型发生变化,即相百分数逐步增多。

3.2.3 变形程度的影响

由图4和图5可知,当变形程度达到一定值后,

显微组织出现细化现象,随着变形程度的增加,整个变形体内的晶粒尺寸和相体积分数相应增加,微观组织趋于均匀化。这主要是随着变形程度的增加,储存能增高,再结晶驱动力增大,速度加快,并且相不断转变为 β 相。

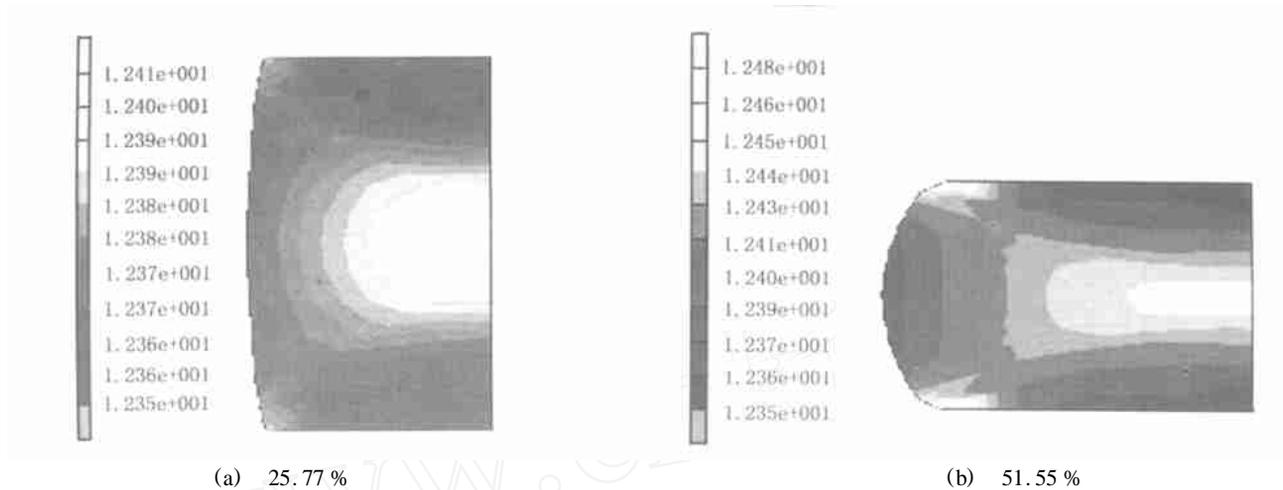


图4 变形程度对晶粒尺寸的影响

Fig.4 Influence of deformation degree on grain size
 T 为860 ; v 为0.10; m 为0.4。

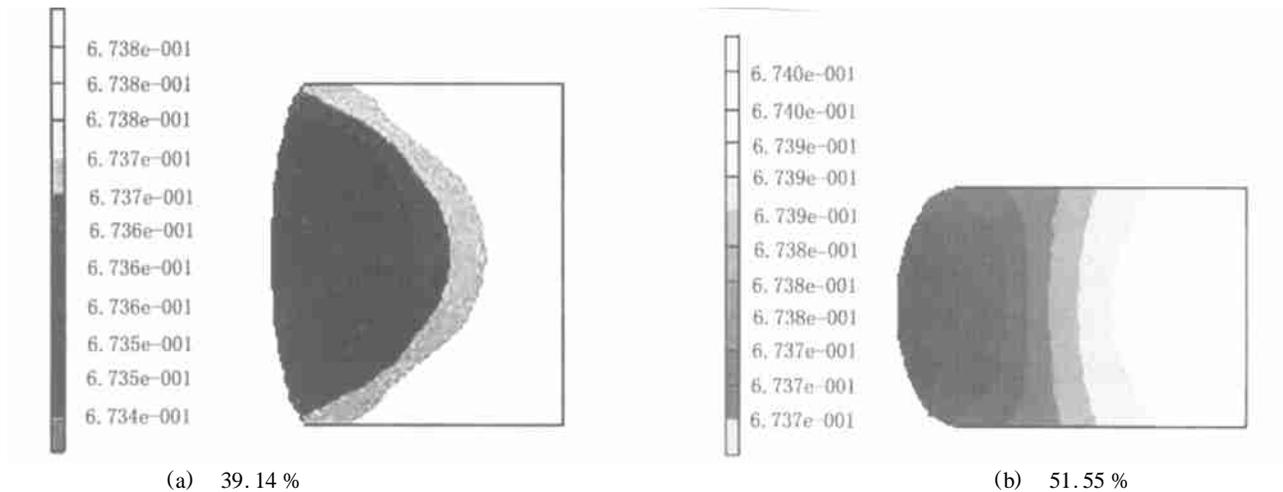


图5 变形程度对相体积分数(10²%)的影响

Fig.5 Influence of deformation degree on volume fraction of phase
 T 为860 ; v 为0.10; m 为0.4。

3.2.4 摩擦条件

由模拟结果可知,摩擦系数的变化对晶粒尺寸、相体积分数的影响比较细微,但它是影响材料塑性变形的一个重要因素。摩擦系数增大,金属流动更加困难,变形抗力增加,且变形不均匀现象加剧。

3.3 结果验证

TC4合金圆柱镦粗过程的模拟结果与试验结果吻合良好(见表1~表3)^[5],晶粒尺寸和相体积分数的模拟结果与试验结果误差均控制在15%以内,证明了本次模拟结果的正确性及工程应用价值。

表1 模拟结果与试验结果的比较*

Tab.1 Comparison of grain size between predictions and test results

变形速度 $v/\text{mm s}^{-1}$	晶粒直径		
	测试值/ μm	计算值/ μm	误差/ %
0.03	10.84	12.35	13.93
0.08	11.78	12.39	5.18
0.15	11.84	12.46	5.24

* 试样中心点处测量和计算值; 试验和计算条件: T 为 860 , 为 39.14%, m 为 0.3。

表2 模拟结果与试验结果的比较*

Tab.2 Comparison of grain size and phase volume fraction between predictions and test results

变形温度/ $^{\circ}\text{C}$	晶粒直径			相体积分数 $V/ \%$		
	测试值/ μm	计算值/ μm	误差/ %	测试值	计算值	误差
860	10.97	12.35	13.58	62.15	65.37	10.02
890	11.17	12.72	12.88	70.84	78.58	10.93
920	11.58	13.08	13.95	84.86	90.96	7.19

* 试样上端面中心点处测量和计算值; 试验和计算条件: v 为 0.10 mm/s, 为 39.14%, m 为 0.3。

表3 模拟结果与试验结果的比较*

Tab.3 Comparison of grain size and phase volume fraction between predictions and test results

变形程度/ %	晶粒直径			相体积分数 $V/ \%$		
	测试值/ μm	计算值/ μm	误差/ %	测试值	计算值	误差
25.77	11.82	12.78	8.12	70.05	78.55	12.13
39.14	11.67	12.80	9.68	70.46	78.58	11.52
51.55	11.44	12.83	12.15	70.71	78.61	11.17

* 试样中心点处测量和计算值; 试验和计算条件: T 为 890 , v 为 0.10 mm/s, m 为 0.3。

3.4 模拟结果的应用

TC4 合金热成形过程的设计与控制一体化技术应包括两部分内容, 其中设计是控制的基础, 控制是实现设计目标的保障。在热成形过程设计时应以成形后组织的均匀性为目标, 分析计算出影响目标函数的主要确定因素的确定性影响规律, 选定的组织均匀性函数 G 应能代表变形材料最终的组织 and 性能, 其表达式为:

$$G = \frac{\sqrt{\sum (d_i - d_{\text{avg}})^2 \cdot V_i}}{V_{\text{total}}} \quad (5)$$

式中, $d_{\text{avg}} = \frac{\sum d_i V_i}{V_{\text{total}}}$; G 为组织均匀性函数; d 为晶粒大小; V 为体积, 下脚标 i 和 total 分别代表单元及整个变形体区域。在热成形过程控制时应以设计的组织均匀性函数为目标, 控制设计目标的稳定性, 即控制成形组织的稳定性; 因此, 应基于设计出的确定规律的基础上, 重点考虑非确定性因素的非确定性影响规律。

4 结论

(1) 本文采用变形与传热耦合分析的刚塑性有限元数值模拟方法, 利用所建立的显微组织演化模型, 全面系统地研究了 TC4 合金的等温成形过程, 计算结果与试验结果吻合良好。

(2) 在进行晶粒尺寸和体积分数的模拟计算时, 采用了 Yada 模型, 系统深入地研究了 TC4 合金在不同热力参数下的显微组织演变情况, 并分析讨论了宏观工艺参数对合金微观组织演变过程的影响。

(3) 本文所建立的 TC4 合金宏观热力参数与微观组织间的映像关系, 为定量预测 TC4 合金热成形过程中的组织演变情况, 以及发展 TC4 合金工艺参数的优化设计和控制一体化技术提供了基础。

参考文献

- 1 Lee Rong-Shean, Huan Chang Lin. Process design based on the deformation mechanism for the non-isothermal forging of Ti-6Al-4V alloy. Journal of Material Processing Technology, 1998; 79 (2): 224 ~ 235
- 2 Hu ZM, Brooks J W, Dean T A. Experimental and theoretical analysis of deformation and microstructural evolution in the hot-die forging of titanium alloy aerofoil sections. Journal of Material Processing Technology, 1999; 88 (1): 251 ~ 265
- 3 Dunne F P E. Inhomogeneity of microstructure in superplasticity and its effect on ductility. Int. J. Plasticity, 1998; 14: 413 ~ 433
- 4 郭鸿镇. 合金钢与有色合金锻造. 西安: 西北工业大学出版社, 1999: 186 ~ 219
- 5 刘雪梅. 组织演变模型及其在钛合金高温变形中的应用. 西北工业大学硕士学位论文, 1999

(编辑 任涛)