

双相钛合金微观应力-应变分布的数值模拟

臧新良¹, 赵希庆¹, Park Joongkeun², 高玉魁³, 杨庆祥¹

(1. 燕山大学 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

(2. Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701 South Korea)

(3. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 测量了 $\alpha+\beta$ 型 Ti-8Mn 双相钛合金的应力-应变曲线, 设计了成分与 Ti-8Mn 双相钛合金中 α 和 β 相成分相近的单相 α 钛合金和 β 钛合金, 根据这 2 个单相钛合金的应力-应变曲线, 计算了 Ti-8Mn 双相钛合金的应力-应变曲线并与测量值进行了对比。结果表明: 二者吻合得很好, 说明所建立的有限元模型是有效的。根据上述模型, 对在 β 相内存在一个 α 相的情况下, 沿不同截面应力-应变的分布进行了数值模拟。结果表明: 在外加应力的作用下, 最小应力出现在中心 α 相内, 最大应力出现在 $\alpha-\beta$ 边界, 随着向两侧距离增加, 应力值逐渐减小, 而应变分布与应力分布相反。

关键词: 双相钛合金; 应力应变; 数值模拟

中图分类号: TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)06-1058-04

钛合金具有强度高、密度低、耐腐蚀性能好、可热处理、可冷热加工等性能, 因此, 得到了广泛的应用^[1,2]。双相钛合金的力学性能像屈服强度、断裂强度等性能都已经进行了广泛的研究^[3]。然而, 进行大量的实验既浪费财力又浪费时间, 而且, 由于在每一个晶粒内部, 甚至在每一个相内的塑性应变也是不均匀的^[4], 所以, 很难采用实验的方法说清楚双相钛合金中微观的应力、应变分布^[5]。因此, 根据 $\alpha+\beta$ 型 Ti-8Mn 双相钛合金的组织, 采用有限元方法对其应力-应变曲线进行弹塑性分析, 并模拟了双相钛合金微观应力-应变分布。

1 实验材料和模拟方法

以 Ti-8Mn 双相钛合金为研究对象, 其成分见表 1。为了模拟钛合金的应力-应变曲线, 设计了成分与 Ti-8Mn 合金中 α 相和 β 相成分相近的单相 α 钛合金和 β 钛合金。

表 1 Ti-8Mn 双相钛合金的成分

Table 1 Components of Ti-8Mn dual-phase titanium Alloy (wt%)

Mn	C	O	N	H	Other	Ti
6.50~9.00	<0.20	<0.20	<0.07	<0.015	0.60	Bal.

拉伸试样制成 $\phi 8 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的标准试样, 然后在万能液压伺服试验机上进行拉伸试验, 对单相 α 、 β 和 $\alpha+\beta$ 双相钛合金的应力-应变曲线进行了测量, 见图 1 所示。

图 2 为 Ti-8Mn 双相钛合金微观组织照片。其微观组织是在 β 相的基体上, 均匀地分布着 α 相。按照真实测得的钛合金显微组织建立模型划分网格, 所建立的模型比较复杂, 而且随所选取的微观组织不同而不同。因此, 为了简化计算, 采用 ANSYS 软件, 建立了模拟钛合金的二维有限元模型。采用三角单元, 浅色为 β 相, 深色为 α 相。共划分了 392 个三角网格, 节点总数为 225 个, 如图 3 所示。

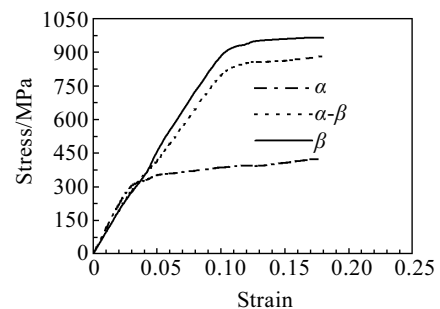


图 1 单相 α 、 β 和 $\alpha-\beta$ 双相钛合金的应力-应变曲线
Fig.1 Stress-strain curves of single-phase α , β and $\alpha-\beta$ dual phase titanium alloys

收稿日期: 2008-06-29

基金项目: 人事部回国留学基金项目(2004)

作者简介: 臧新良, 男, 1963 年生, 博士, 副教授, 燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004, 电话: 0335-8387471, E-mail: zangxl@ysu.edu.cn; 通讯作者: 杨庆祥, 教授, E-mail: qxyang@ysu.edu.cn

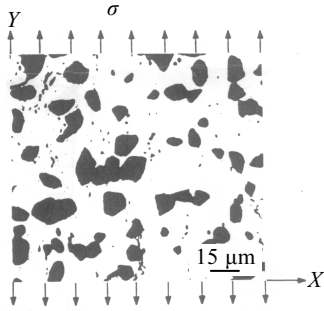


图 2 Ti-8Mn 双相钛合金显微组织照片

Fig.2 Microstructure photograph of Ti-8Mn dual-phase titanium alloys

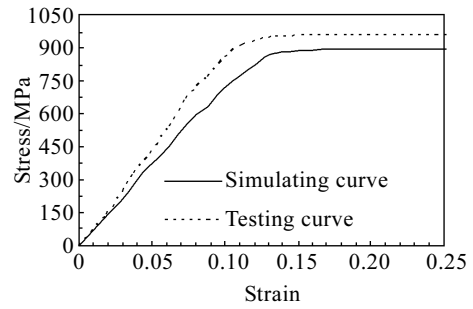


图 4 Ti-8Mn 双相钛合金实测和模拟应力-应变曲线

Fig.4 Measured and simulated stress-strain curves of Ti-8Mn dual-phase titanium alloy

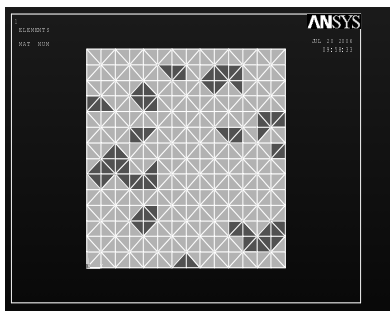


图 3 网格划分与模型建立

Fig.3 Modeling and meshing

在这一模型中，两相所占体积分数与实测 Ti-8Mn 双相钛合金的相同，即 α 的体积分数为 17%。沿垂直方向进行逐渐加载，根据钛合金的应力-应变曲线，载荷应力分别为 276, 414, 552, 690, 827, 965 MPa。

根据图 1，单相 α 和单相 β 的弹性模量取为 1500 和 1333，泊松比为 0.3。选择具有多线性随动强化模型表示钛合金中 2 个相的性能，从图 1 的单相 α 和 β 应力-应变曲线均匀塑性部分各取 5 个点值列于表 2。

2 数值模拟结果

2.1 Ti-8Mn 双相钛合金实测和模拟应力-应变曲线比较及微观模型的建立

Ti-8Mn 双相钛合金实测和模拟应力-应变曲线见图 4。可见模拟得到的 Ti-8Mn 双相钛合金应力-应变曲线和试验测得的应力-应变曲线很接近。说明模型建

表 2 用于模拟的单相 α 钛合金和 β 钛合金的 5 个应力-应变值
Table 2 Stress-strain values in single-phase α and β titanium alloys used in simulation

Alloy	Strain/Stress	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Single phase α	Strain	0.027	0.03	0.035	0.06	0.2
	Ti alloy	Stress/MPa	276	297	331	345
Single phase β	Strain	0.09	0.1	0.11	0.12	0.2
	Ti alloy	Stress/MPa	827	896	945	965

立和模拟假设是合理的，模拟结果是有效的。

虽然模拟曲线和实测曲线很接近，但是还是有一些偏差，偏差的产生可能有以下几个原因：(1) 实际上的 Ti-8Mn 双相钛合金其微观组织是三维分布且形状不规则，很难用有限元建立其模型，本文中简化为二维模型必然产生一定的误差；(2) 建立网格时是通过节点建立规则的网格，与实际组织有一定差别。且网格的数量对结果也有影响；(3) 模型中 α 相形状理想化了，分布与实际不完全相同，而且体积分数也有一定偏差，加上局部分布的不均匀，必然造成模拟结果的偏差；(4) 模型中没有考虑晶界和相界面的影响；(5) 定义材料属性时 Ti-8Mn 双相钛合金中的 α 和 β 相是由单相的 α 、 β 钛合金分别替代的，而单相中的晶粒比对应双相中的晶粒要细小，这就造成实际材料属性和模拟时的材料属性存在一定差异。

为了给出钛合金微观组织中单相的应力-应变分布，根据图 2，取其中仅有 α 相的区域，建立有限元模型，如图 5。其中浅色为 β 相，深色为 α 相。选取不同的截面，见图 5 中 E-E、F-F、G-G，模拟在不同外加应力条件下沿不同截面下的应力-应变分布。

2.2 微观应力分布

图 6a、6b 和 6c 分别为 E-E、F-F、G-G 面上不同载荷下的应力分布曲线。图 7a、7b 和 7c 分别为加载

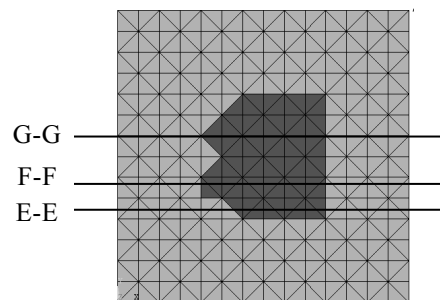


图 5 建立的微观模型

Fig.5 Microstructure model

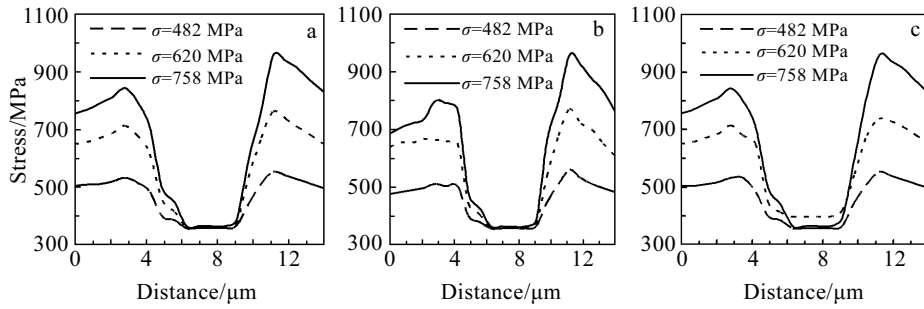


图 6 不同截面的微观应力分布曲线

Fig.6 Microscopic stress distribution curves on different sections: (a) F-F section, (b) E-E section, and (c) G-G section

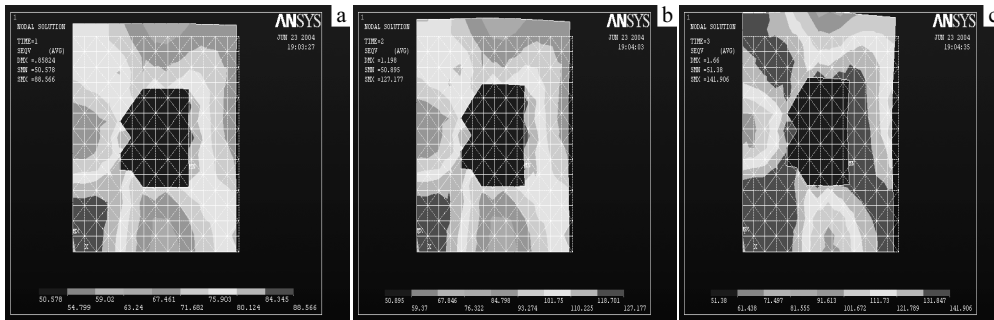


图 7 不同载荷下各相中的微观应力分布

Fig.7 Microscopic stress distribution of different phase with different load: (a) 482 MPa, (b) 620 MPa, and (c) 758 MPa

482、620、758 MPa 时微观应力的分布。图下方标尺表示根据颜色不同，从左到右应力由小到大变化。

结合图 5，从图 6 可以看出，不同载荷下的曲线在 α 相部分差不多完全重合；在界面附近应力变化很大，在曲线上两相交界面处陡降，最大应力在 β 相内，而最小应力在 α 相内，且随着载荷增加最大应力不断增加，而最小应力却变化不大。从图 7 中可以看出， α 相（中心深色）中应力较小且分布均匀，而 β 相（四周浅色）中应力较大。

2.3 微观应变分布

由图 6 可以看出，3 个截面上应变分布相似，故只取 E-E 截面对等效应变进行模拟。

图 8 为不同载荷下 E-E 截面上的等效应变分布曲

线。图 9a、9b 和 9c 分别为载荷 482、620、758 MPa 下各相中的应变分布。图下方标尺表示根据颜色不同，

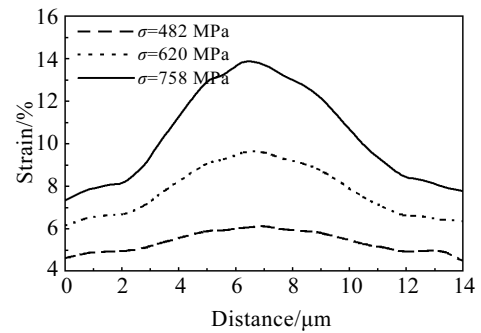


图 8 E-E 面上的应变分布曲线

Fig.8 Strain distribution curve on E-E section

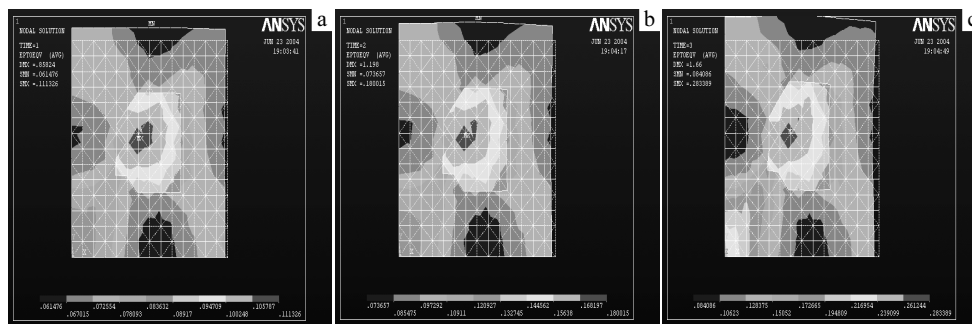


图 9 不同载荷下各相中的微观应变分布

Fig.9 Microscopic strain distribution of different phase with different load: (a) 482 MPa, (b) 620 MPa, and (c) 758 MPa

从左到右应变由小到大变化。

结合图 5, 从图 8 可以看出, α 相内应变要比 β 相内大得多, 应变最大值在 α 相中心, 由内向外有明显的梯度。应变最小值在未固定的一边上的 β 相内。由图 9 可以看出, 随着载荷增加应变也跟着增加, 而 α 相内应变增加较快, β 相内较慢。

3 结 论

1) 利用金相显微组织建立的有限元模型所计算的含 17% α 的 α - β Ti-8Mn 合金的应力-应变曲线与实验测得的 α - β Ti-8Mn 应力-应变曲线基本吻合, 证明了模型的有效性。

2) 对 β 相中仅存在一个 α 相的情况下, 可以模拟应力-应变沿不同截面的分布。在外加应力的作用下,

最小应力出现在中心 α 相内, 最大应力出现在 α - β 相界, 随着向两侧距离增加, 应力值逐渐减小。而应变分布与应力分布相反。

参考文献 References

- [1] Cao Chunxiao (曹春晓). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 1999, 14(5): 1
- [2] Qu Helei(曲恒磊), Zhou Yigang(周义刚), Zhou Lian(周 廉). *Materials Review*(材料导报)[J], 2005, 19(2): 94
- [3] Li Mingqiang(李明强), Xi Zhengping(奚正平), Li Changliang(李长亮) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属与工程)[J], 2007, 36(3): 480
- [4] Lütjering G. *Mat Sci Eng*[J], 1998, A243: 32
- [5] Evans W J. *Mat Sci Eng*[J], 1998, A243: 89

Numerical Simulation on Distribution of Micro Stress-Strain in Dual-Phase Titanium Alloys

Zang Xinliang¹, Zhao Xiqing¹, Park Joongkeun², Gao Yukui¹, Yang Qingxiang¹

(1. Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(2. Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 350-701, South Korea)

(3. Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The stress-strain curve of ($\alpha + \beta$) Ti-8Mn alloys was measured, and α and β titanium alloys, whose compositions were close to those of α and β phase in the dual phase titanium alloy (Ti-8Mn) were designed. According to the above mentioned design, the stress-strain curve of Ti-8Mn alloy was calculated and compared with measuring one. The results show that they are in good agreement, which indicates that the model established is available. According to the model above, the distributions of stress and strain were simulated along different sections when only one α grain was distributed in the β crystal. And the result illustrates that the minimum stress exists at the center of α crystalline grain, while the maximum stress exists at the crystal boundary. The stress decreases gradually with increasing of the distance away to dual sides, while the distribution of strain is in opposition to the stress distribution.

Key words: dual phase titanium alloy; stress-strain; numerical simulation

Biography: Zang Xinliang, Ph. D., Associate Professor, College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, P. R. China, E-mail: qx yang@ysu.edu.cn; Corresponding Author: Yang Qingxiang, Professor, Tel: 0086-335-8387471; Fax: 0086-335-8074545, E-mail: yqxsfys@yahoo.com