

脉冲强磁场拉伸时 TC4 钛合金的 塑变能力和微观组织

李桂荣, 王芳芳, 王宏明, 黄 超

(江苏大学, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 在磁感应强度 (B) 1、3 和 5 T 条件下对 TC4 钛合金进行拉伸实验处理, 研究了 B 值对合金延伸率、相特征、晶体结构和位错密度等的影响。结果表明: 拉伸过程脉冲强磁场的施加提高了钛合金的延伸率, 当 $B=3$ T 时, 合金的延伸率达到最大值 12.41%, 较未施加磁场试样增长了 23.98%, 且 $B=3$ T 为延伸率从上升到下降的转折点。磁场处理促进了 β 相向 α 相的转变, 并促进了晶面向着易滑移方向产生了择优取向。位错密度随 B 值变化呈现先增后减的趋势, 在 3 T 时达到最大值。分析认为位错密度的变化首先是因为磁场下位错应变能增加, 其次是磁场促进了自由基对从 S 态向 T 态的转变, 并从量子尺度分析了最优 B 值为 3 T 的理论依据。

关键词: 脉冲强磁场; 钛合金; 塑性; 微观组织; 位错

中图分类号: TG135⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)04-1119-05

自 20 世纪 50 年代, 钛及钛合金作为一种重要的金属结构材料而兴起, 具有质量轻、比强度大、耐腐蚀等一系列优异的特性, 在航空航天业中得到广泛地应用, 主要用于制作飞机结构中梁、接头、液压管道、紧固件、风扇叶片、压缩机叶片、机翼结构等^[1]。其中 TC4 钛合金是国内外应用最广泛的一种中等强度的 $\alpha+\beta$ 型钛合金, 具有优良的综合力学性能、成形性能和焊接性能, 被称为“万能合金”。目前, TC4 钛合金的研究正朝着高性能、低成本化方向发展, 然而, 钛合金塑性加工具有变形抗力大、常温塑性差、屈服极限和强度极限比值高、回弹大等特点^[2], 因此提高钛合金的塑性变形能力, 成为目前亟待解决的问题。

近二十年来, 随着材料科学技术的发展, 各种外场条件比如电磁场、超声场、微波场等被逐渐运用于新材料的设计与研发领域^[3]。其中脉冲强磁场具有绿色无污染, 超强力、热和量子尺度效应, 为改善材料微观组织和强度、塑性和韧性提供了新途径。本实验以 TC4 钛合金为研究对象, 以脉冲强磁场作为外加物理场, 研究在脉冲强磁场下钛合金的拉伸性能, 优化出提高钛合金拉伸性能的磁场参数, 为提高钛合金塑性变形能力提供了可行性途径及理论基础, 同时为将脉冲强磁场用于新型结构材料的设计提供了理论依据。

1 实 验

实验所选用材料为 TC4 钛合金板材, 其主要化学成分为 (6.2%Al-4.1%V-2.3%Zr, 质量分数)。将材料加工成如图 1 所示尺寸的拉伸试样。为尽量减少初始或加工过程导致的残余应力对试验结果的干扰, 需对材料进行去应力退火 (120 °C, 保温 2 h, 随炉冷却至室温)。将 TC4 钛合金拉伸试样置于磁场装置的螺线管工作线圈中, 并装在电子万能试验机上。固定磁场作用时间为 600 s, 脉冲数 (N) 为 30, 通过设置电压值, 向拉伸试样施加不同磁感应强度 (0、1、3 和 5 T) 的脉冲强磁场, 优化出钛合金拉伸性能达到最优的磁感应强度。

在磁场拉伸下拉断试样与未施加磁场拉断试样的断口处截取 10 mm, 进行组织观察。采用 X-350A 型 X 射线应力测定仪测量拉伸断口的半高宽以获得位错

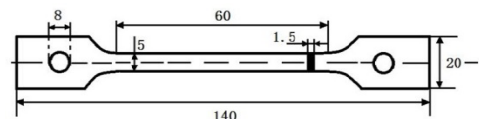


图 1 拉伸试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen

收稿日期: 2017-04-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51371091, 51001054, 51174099); 江苏大学大学生实践创新训练项目 (2015 年); 江苏大学工业中心大学生创新实践基金 (ZXJG201585)

作者简介: 李桂荣, 女, 1976 年生, 博士, 教授, 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013, E-mail: liguirong@ujs.edu.cn

密度，然后比较其变化。对截取断口处试样进行打磨、抛光和腐蚀后，采用 XJG-05 金相显微镜观察 TC4 试样的组织形貌及晶粒度大小。腐蚀剂由 5 mL HF, 10 mL HNO₃ 和 85 mL H₂O 的混合溶液组成。用 M438-110624 金相分析软件计算金相组织中各相的百分含量。

2 结果与分析

2.1 磁场拉伸对力学性能的影响

图 2 是磁场拉伸条件下不同 B 值时 TC4 钛合金的力学性能，其中图 2a 为工程应力-应变曲线图，可见 B 值对材料性能产生了显著影响。图 2b 是 TC4 钛合金延伸率随 B 值的变化图，由实验数据计算得磁场拉伸条件下合金的平均延伸率为 11.03%，较未施加磁场拉伸试样的 10.01% 提高了 10.19%，特别地，当 $B=3$ T 时，钛合金的延伸率最高达到 12.41%，较未施加磁场拉伸试样提高 23.98%，即经过脉冲强磁场处理后，材料的塑性得到显著提高，且当 $B=3$ T 时合金的塑性达到最高。

2.2 磁场拉伸对相特征的影响

图 3 是磁场拉伸后试样拉伸断口处的金相显微组织图，图 3a~3d 分别对应 $B=0、1、3$ 和 5 T 试样的显微组织。其中浅灰色的区域为 α 相，深灰色的区域为 β 相。

计算得到，随着 B 值的逐渐增加，TC4 钛合金中 α 相的体积分数依次为 49.7%、53.5%、55.9%、50.5%。可见 α 相体积分数随 B 值增加呈现先增加再减少的趋势，在 $B=3$ T 时达到最大， α 相所占比例较 0 T 试样

增加 12.5%。该现象表明：磁场促使 β 基体中生成了条状的次生 α 相。由于这些次生相相互独立，组织上无关联，减少了滑移阻力，提高了钛合金的塑形。

2.3 磁场拉伸对晶体结构的影响

图 4 是磁场拉伸条件下 B 值为 0、1、3 和 5 T 时

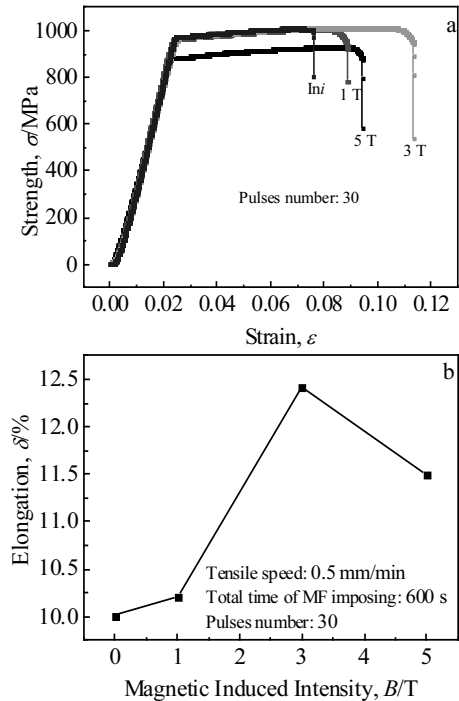


图 2 磁场拉伸中不同 B 值时的 TC4 钛合金拉伸性能 ($N=30$)
Fig.2 Effect of B on the tensile properties of TC4 titanium alloy during the magnetic field tensile test (at $N=30$): (a) stress-strain and (b) elongation

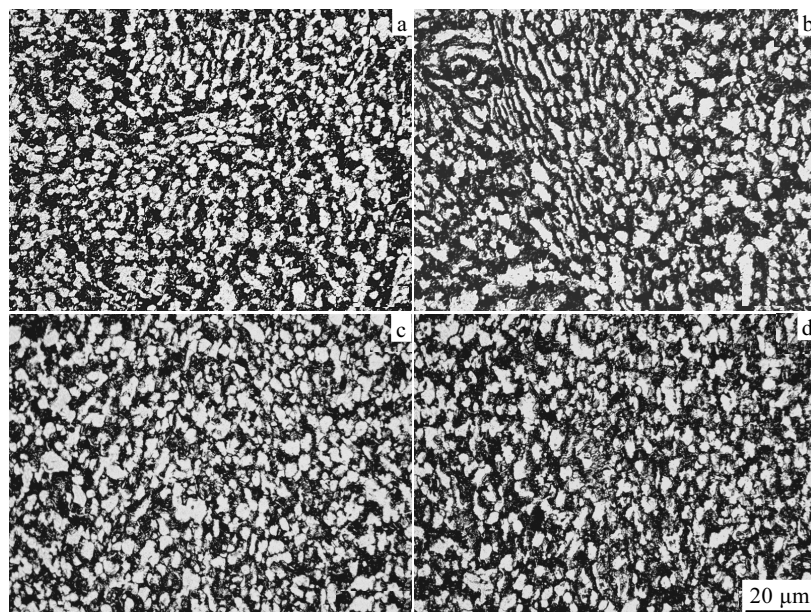


图 3 磁场拉伸后不同 B 值时试样拉伸断口处的微观结构

Fig.3 Microstructures of tensile fracture of samples subjected to different B : (a) 0 T, (b) 1 T, (c) 3 T, and (d) 5 T

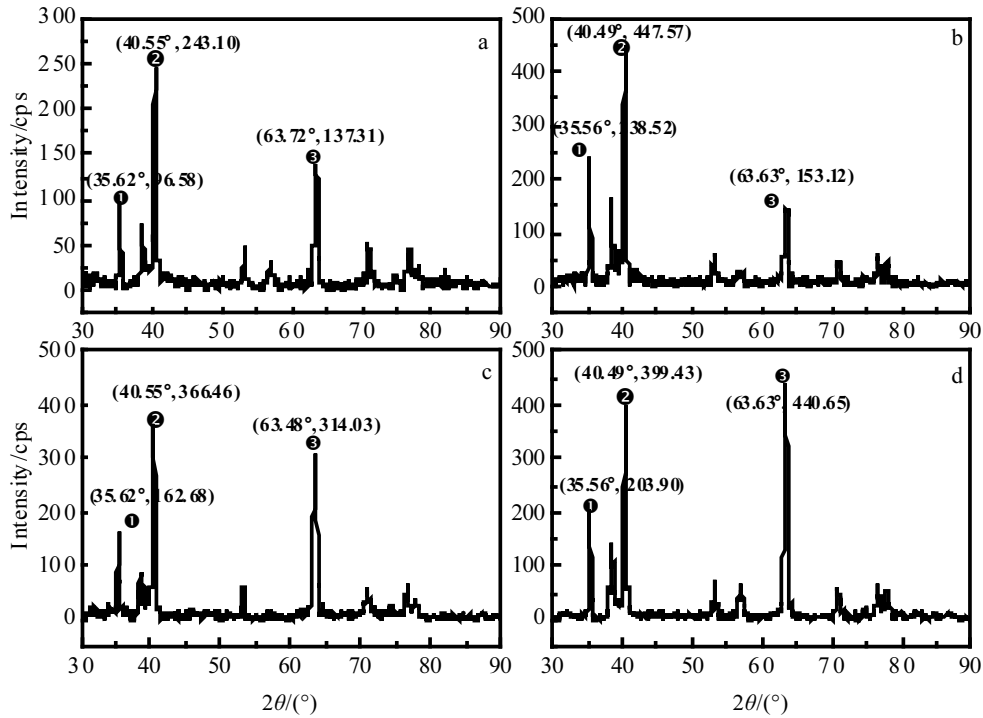


图 4 磁场拉伸条件下不同 B 值时断口处试样的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of fractured samples subjected to different B : (a) 0 T, (b) 1 T, (c) 3 T, and (d) 5 T

($N=30$) 拉伸试样断口处的 XRD 衍射图谱。由图可见，TC4 钛合金的相种类没有发生明显的变化，仍然是 α -Ti 和 β -Ti 相结构，但不同晶面对应的衍射峰强度发生了明显的变化。观察图中出现在 2θ 值为 $35^\circ\sim 36^\circ$ 、 $40^\circ\sim 41^\circ$ 以及 $63^\circ\sim 64^\circ$ 处的三强峰①②③衍射峰强度，其对应的晶面指数依次为(100)、(101)和(110)。在 0 T/3 T 图中三峰强度依次为 96.58/162.68、243.10/366.46、137.31/314.03。对比延伸率数据可知，磁场下(100)、(101)和(110)晶面增强，呈现出择优取向趋势，此时滑移趋于容易，材料延伸率提高，说明磁场可以改变晶格结构，促使易滑移面的择优取向，进而提高材料塑性变形能力。

2.4 磁场拉伸对位错密度的影响

根据 Dunn 公式^[4]：

$$\rho = \frac{L_2}{4.35 \times b^2} \quad (1)$$

其中： ρ 为位错密度； L 为峰半高宽值； b 为伯格斯矢量。根据公式 (1) 可知： ρ 与 L^2 成正比，测试结果显示：当 B 为 0、1、3 和 5 T 时， L^2 分别 0.1245、0.1390、0.1580 和 0.1521，图 5 是 L^2 与 B 的关系图。当 $B=3$ T 时， L^2 达到最大值，较未施加磁场时的位错密度值高 26.95%，增幅明显。对比图 2b，可见位错密度随 B 的变化与延伸率随 B 变化的规律一致。

位错密度增加的原因显然与磁场作用直接相关。

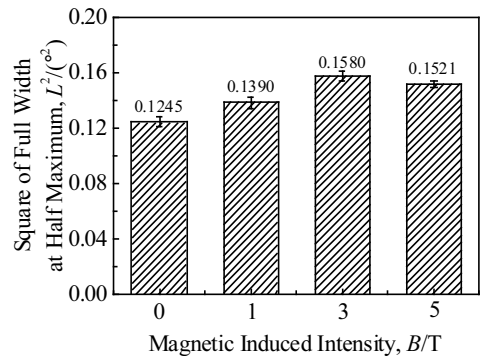


图 5 磁场拉伸条件下拉伸试样中 L^2 与 B 的关系图

Fig.5 Dependence of L^2 on the B in the fractured samples subjected to the magnetic field tensile test

当将合金试样置于脉冲强磁场中拉伸时，在脉冲强磁场施加每个脉冲磁感应强度的瞬间，拉伸试样内部将会产生感应电流。感应电流与其产生洛伦兹力，使得 TC4 钛合金内部产生一定的磁压强。其大小满足公式 (2)^[3]：

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (2)$$

其中： μ_0 为材料真空磁导率，数值为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m，将 $B=4$ T 代入公式，得磁压强 P 值为 6.37 MPa。在脉冲强磁场作用下，磁压强远远达不到常规钛合金的屈服

强度，因此磁场力效应并不是导致材料中产生大量位错的根本原因。

从位错应变能的角度对位错的增殖进行分析，TC4 钛合金材料在脉冲强磁场下拉伸时，试样发生剧烈的塑性变形，因此在材料内部存在大量的势能，尤其是位错存在区域最为明显。位错的存在使其周围的晶体发生不同程度的畸变，储存大量的能量，称为位错应变能。当将晶体看作是均匀连续介质、内部无间隙且晶体内部应力、应变等参量是连续变化时，材料内部位错应变能 E_M 可以表示为^[5]：

$$E_M = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{r_1}{r_0} (1-\nu \cos^2 \theta) \quad (3)$$

式中： G 是拉梅常数， b 是柏氏矢量， ν 是泊松比， r_1 和 r_0 分别代表位错线的内外半径， θ 代表 b 与位错线交角。可以看出，只有应力存在时位错的应变能与 b^2 和 r_1 成正比。当存在磁场时，含有顺磁性中心的位错核心会被磁场磁化，产生磁应力。在磁场和应力场耦合时，应当考虑磁场与位错的交互作用。此时位错应变能 E_H 可进一步表示为^[6]：

$$E_H = \frac{bH_0 h_0 r_0}{8(1-\nu)} (\mu-1)(1-2\nu) \quad (4)$$

式中 H_0 表示外部磁场强度， h_0 表示位错磁化产生的磁感应强度， μ 表示位移向量。当应力场和磁场同时存在时，位错的应变能 E 综合表现为：

$$E = E_M + E_H \quad (5)$$

由公式(5)可见，磁场条件下位错应变能增加。然而位错的能量并不能以热量的形式在晶体内部消耗掉^[7]，增加的位错应变能一方面增强了钛合金内部位错间的交互作用、增强了位错的运动并使位错发生了增殖；另一方面可以使位错从钉扎中心完成退钉扎或者直接通过障碍，使得晶体内部可移动的位错数量增加，即位错运动灵活性增加，有助于提高位错密度。

在 TC4 合金，主要析出相是由铝钛金属间化合物组成，其具有典型的顺磁性，而这些析出相往往会阻碍位错的运动。对于顺磁性位错或析出相，在无磁场作用时，自由基对处于自旋方向相反的 S 态。在该状态下，位错克服障碍所需要的能量高，不易越过障碍，即处于钉扎状态。当试样在脉冲强磁场条件下拉伸时，材料内部原子核核外电子的自旋将受到磁场的影响，其自旋方向发生改变，转变为 T_0 、 T_+ 或 T_- 态，图 6 为电子自旋状态示意图。T 态时位错与障碍间结合能低，位错克服障碍所需能量低，位错较容易越过障碍实现退钉扎。位错移动阻力小，位错增殖数量和速度增加，表现为位错密度增加，这也是磁致塑性效应的本质。

磁场为位错的增殖和运动提供了部分能量，是 ρ

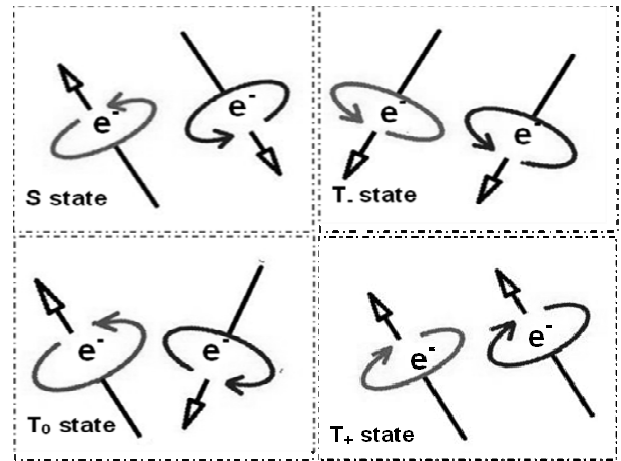


图 6 自由基对的 4 种状态

Fig.6 Four states of radical pairs

值增加的诱因，但 ρ 值并未随 B 值增加而增长，这是因为快速运动的位错易在晶界处堆积^[8]，一来会抑制 Frank-Read 位错源持续发射位错，二来会在晶界处发生动态再结晶消耗位错数量，不利于 ρ 值增加，因此 ρ 值随 B 的变化规律呈现出先增后减的趋势。

以下从自由基对角度讨论优化 B 值 (3 T) 的理论依据。在磁场中，自由基对密度 D 由密度矩阵决定：

$$i \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{h} |H_a, D| - i \frac{D}{t} \quad (6)$$

式中， i 表示矩阵矢量单位， t 为位错运动时间， h 是普朗克常数， $| \cdot |$ 表示矩阵， H_a 表示自由基对的自旋 Hamiltonian(汉密尔顿)函数。自由基对从 S 向 T_0 态转化过程中相应的能量变化 E_m 为：

$$E_m = \frac{1}{2} \Delta g \mu_B H \quad (7)$$

式中： Δg 表示自由基对状态的 g 因子差别，取 $10^{-3[9]}$ 。 μ_B 为玻尔磁子，取值 9.27×10^{-24} J/T， H 是磁场强度，单位 A/m。位错和障碍间形成了无关联的 4 种自由基对，因此可以假定初始条件下的密度矩阵是：

$$D_S(0) = D_{T_0}(0) = D_{T_+}(0) = D_{T_-}(0) = 1/4 \quad (8)$$

在内应力无序场驱动下位错进行运动，通过 S、T 态共振区通道时的时间函数是随机分布的。根据泊松时间分布得到磁场 H 下处于 S 态自由基对的平均数量 $D_S(H)$ 为：

$$D_S(H) = \frac{1}{t_0} \int_0^\infty D_S(t) \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) dt \quad (9)$$

其中， t_0 是自由基对穿越 S、T 共振区的平均时间。分析认为， $D_S(H)$ 是 $D_S(t)$ 的 Laplace 转化，可得到线性公式：

$$D_s(H) = \frac{1}{4} \frac{\left(1 + \frac{T_1}{T_0}\right) \left(1 + \frac{T_2}{T_0}\right) + \frac{H^2}{H_m^2}}{\left(1 + \frac{T_1}{T_0}\right) \left(1 + \frac{T_2}{T_0}\right) + \left(1 + \frac{t_0}{2T_1}\right) \frac{H^2}{H_m^2}} \quad (10)$$

其中 T_1 、 T_2 是纵向和切向的自旋弛豫时间, 对于金属中的自旋晶格弛豫可约取 $2.4 \times 10^{-9} \text{ s}^{[10]}$, T_0 是自由基对穿越 S、T 共振区的平均时间。其中 H_m 是临界磁场强度, 有:

$$H_m = \frac{h}{\Delta g \mu_B \sqrt{T_1 T_2}} \quad (11)$$

将 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $\Delta g \approx 10^{-3}$, $\mu_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$, $T_1 = T_2 \approx 2.4 \times 10^{-9} \text{ s}$ 代入公式 (11) 得到 H_m 为 $3 \times 10^6 \text{ A/m}$, 对应的 B 值为 3 T, 即为临界磁感应强度, 已通过实验证实该结论与理论相匹配。其含义为: 当 B 从 0 T 上升到 3 T 的过程中, 随磁感应强度增加, 磁场诱发自由基对从 S 态向 T 态转化的作用程度逐渐增加, 而当 B 高于 3 T 后磁场作用效果逐渐减少。该结论与图 2 所示实验现象相吻合。

3 结 论

1) 磁场作用下拉伸钛合金的平均延伸率为 11.03%, 较未施加磁场试样的 10.01% 提高了 10.19%, 当 $B = 3 \text{ T}$ 时, 延伸率达到最高。

2) 当 $B = 0, 1, 3$ 和 5 T 时, 合金中 α 相所占体积分数依次是 49.7%、53.5%、55.9% 和 50.5%, 总体来看磁场处理促使了 β 相向 α 相的转变, 独立相的出现有助于滑移。

3) 位错密度随 B 值 (0、1、3、5 T) 变化呈现先增加后减少的趋势, 位错密度在 $B = 3 \text{ T}$ 时达到最大值, 较未施加磁场时的位错密度高 26.95%。理论分析认为位错增殖的原因在于磁场下位错应变能增加, 磁场促进了自由基对从 S 态向 T 态转变。并从理论上分析了最优 3 T 的理论依据。

参考文献 References

- [1] Yi Xiaohong(衣晓红), Fan Zhanguo(樊占国), Zhang Jinglei(张景垒) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(9): 1631
- [2] Song Hui, Wang Zhongjin, Gao Tiejun. *Trans Nonferrous Met Soc China*[J], 2007, 17(1): 87
- [3] Li Guirong, Zhao Yutao, Dai Qixun *et al. Journal of University of Science and Technology Beijing*[J], 2007, 14(5): 460
- [4] Li Guirong, Li Yueming, Wang Fangfang *et al. J Alloy Compd* [J], 2015, 644: 750
- [5] Lubarda V A. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2003, 40(15): 3807
- [6] Liu Zhaolong, Fan Tianyou, Hu Haiyun. *Chinese Physics Letters*[J], 2006, 23(1): 175
- [7] Vattré A J, Demkowicz M J. *Acta Materialia*[J], 2013, 61(14): 5172
- [8] Ni S, Wang Y B, Liao X Z *et al. Acta Materialia*[J], 2012, 60(6-7): 3181
- [9] Molotskii M I. *Mat Sci Eng A*[J], 2000, 287(2): 248
- [10] Mullner P, Chernenko V A, Kostorz G. *J Magn Magn Mater* [J], 2003, 267(3): 325

Plasticity and Microstructure of TC4 Alloy Subjected to the High Magnetic Field Tensile Test

Li Guirong, Wang Fangfang, Wang Hongming, Huang Chao

(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The tensile test of TC4 alloy was carried out in the presence of a high pulsed magnetic field. The effects of magnetic induction intensity ($B = 0, 1, 3, 5 \text{ T}$) on the elongation, phase characteristics, crystal structure and dislocation density were investigated. The results show that the imposed magnetic field enhances the elongation. At 3 T the elongation arrives at the maximum of 12.41%, which is enhanced by 23.98% compared to that of 0 T sample. The 3 T parameter is ascertained as a traverse point from an increase tendency to a decrease one. Furthermore, the magnetic field accelerates the phase transformation from β to α together with the orientation preference of crystal plane along the slipping direction. The dislocation density first increases and then falls. At 3 T it arrives at the utmost. The phenomenon is attributed to the enhancement of dislocation strain energy in the presence of magnetic field. Next, the magnetic field promotes the transition from singlet to triplet state. At last the inevitability of optimized 3 T parameter was further discussed in the quantum view.

Key words: high pulsed magnetic field; titanium alloy; plasticity; microstructure; dislocation

Corresponding author: Li Guirong, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, P. R. China, E-mail: liguirong@ujs.edu.cn