

电脉冲短时热处理对等轴组织热轧 TC4 组织转变和绝热剪切特性的影响

高伶俐, 刘金旭, 李 远, 李树奎, 骆雨萌

(北京理工大学, 北京 100081)

摘 要: 研究了不同温度及保温时间电脉冲热处理对等轴组织热轧 TC4 钛合金微观组织和力学性能的影响。研究发现, 电脉冲热处理能在 5 min 内将材料的原始等轴组织转变成魏氏组织, 且温度越高, 组织转变所需的时间越短; 在组织转变前, 原始热轧组织发生了一定程度的再结晶, 转变成魏氏组织后晶粒随着温度的升高及保温时间的延长而长大。电脉冲热处理后的材料其准静态压缩塑性和动态压缩塑性均显著提高, 绝热剪切敏感性显著降低, 且随着热处理温度的升高及保温时间的延长, 材料的准静态和动态压缩塑性呈现下降的趋势。经过 1000 °C/5 min 电脉冲处理的钛合金综合力学性能最好, 与原始热轧 TC4 钛合金相比, 绝热剪切临界破坏应变提高了 133%, 绝热剪切破坏的临界单位体积吸收功提高了 192%。

关键词: 热轧 TC4 合金; 电脉冲热处理; 力学性能; 绝热剪切敏感性

中图分类号: TG166.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)08-2150-05

钛合金具有密度小、比强度高、耐蚀性能好及低温变形性能好等诸多优点, 因而广泛应用于航空航天、船舶、机械加工及兵器工业等领域^[1]。然而, 钛合金材料在涉及冲击载荷的高速变形中经常出现绝热剪切破坏的现象, 绝热剪切带的出现和发展常常意味着材料承载能力的下降或丧失, 是材料出现断裂的先兆^[2]。国内外学者针对如何降低钛合金的绝热剪切敏感性开展了大量的研究工作^[3,4], 指出钛合金的微观组织特征显著影响其力学性能以及绝热剪切敏感性。传统的热处理工艺对钛合金微观组织的调控及性能的改善作用十分有限, 电脉冲热处理技术作为一种新型的改善金属材料组织和性能的方法, 在材料制备、加工、成形和使用过程中的作用开始受到重视。许多研究表明电脉冲处理能够影响材料的回复、再结晶、相变、晶粒细化等行为, 能提高金属材料的塑性变形能力, 是改善材料组织和性能的有效方法^[5,6]。

放电等离子烧结 (Spark Plasma Sintering, SPS) 是一种集等离子活化、电阻加热、热压为一体的新的烧结方法, 采用放电等离子烧结设备对金属材料进行电脉冲热处理的工艺, 具有升温速度快、热处理时间短、节能环保等特点, 可以产生常规热处理无法实现的特殊效果。目前将 SPS 技术应用于钛合金的电脉冲热处理的研究较少, 尚缺乏系统深入的研究。

本研究以等轴组织 TC4 钛合金热轧板材作为原始材料, 采用放电等离子烧结设备对等轴组织热轧 TC4 钛合金进行电脉冲热处理, 利用轧制过程中材料内部储存的大量变形能为 TC4 在热处理过程中的再结晶提供足够的驱动力, 系统地研究电脉冲热处理温度及保温时间对热轧钛合金力学性能和绝热剪切特性的影响, 并分析相应的机理。

1 实 验

原始材料采用轧制态的 TC4 钛合金, 相变点为 960 °C。轧制前, 材料的组织为等轴组织, 轧制温度 840 °C, 轧制方向为单向轧制, 总变形量为 78%。轧板各方向如图 1 所示。R 向为轧制方向; T 向处于轧制平面内且垂直于 R 向; N 向为板厚方向。经热轧后, TC4 钛合金内部的微观组织为变形后的等轴组织, 如图 2 所示, 初生 α 相沿着热轧方向被拉长。

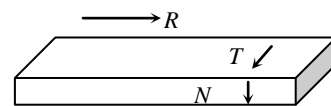


图 1 TC4 轧板方向说明

Fig.1 Directions of the flattened strip

收稿日期: 2015-08-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51571033)

作者简介: 高伶俐, 女, 1989 年生, 硕士生, 北京理工大学材料学院, 北京 100081, 电话: 010-68913937, E-mail: nuoyu1990@163.com

从轧板上取样, 采用 SPS 设备对试样进行电脉冲热处理, 可控的脉冲电流通过试样, 试样被迅速加热, 升温速率为 100 °C/min, 断电后, 试样快速冷却。整个过程在 10 Pa 的高真空环境下进行。具体工艺参数如表 1 所示。

采用 LECO 系列的 OlympusPEM-3 型光学显微镜和 S-4000 场发射扫描电子显微镜对电脉冲热处理后试样的微观组织进行观察。

采用北京科技大学的 MTS 电液伺服试验机进行室温准静态压缩力学性能测试, 应变率控制在 $10^{-3} s^{-1}$, 获得试样在准静态单轴压缩加载条件下的真应力-应变曲线。采用分离式霍普金森压杆 (简称 SHPB) 系统进行动态压缩力学性能测试。应变率控制在 $2500 s^{-1}$, 获得试样在高应变率加载条件下的真应力-应变曲线。压缩实验采用的试样均为 $\Phi 5 mm \times 5 mm$ 的圆柱形试样。

采用电脉冲热处理后 TC4 钛合金的动态压缩真应力-应变曲线塑性变形阶段的积分值, 即 AB 段与横轴之间的面积, 如图 3 所示, 来表示材料发生绝热剪切破坏前的临界单位体积吸收功。积分值越高, 材料发生绝热剪切破坏的临界单位体积吸收功越高, 材料的绝热剪切敏感性越低。

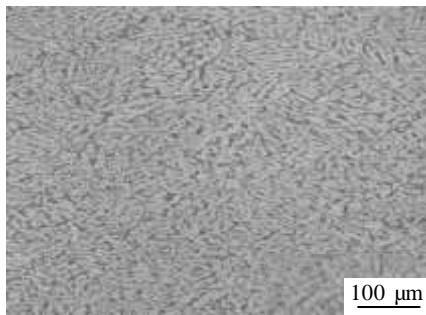


图 2 TC4 钛合金原始热轧组织 OM 照片 (T 向)

Fig.2 OM micrograph of the original hot-rolled Ti-6Al-4V alloy (T direction)

表 1 电脉冲热处理工艺参数

Table 1 Heat treatment parameters for the hot-rolled TC4 alloys

| Temperature/°C | Holding time/min |
|----------------|------------------|
| 900 | 5, 10, 20 |
| 1000 | 5, 10, 20 |
| 1100 | 5, 10, 20 |

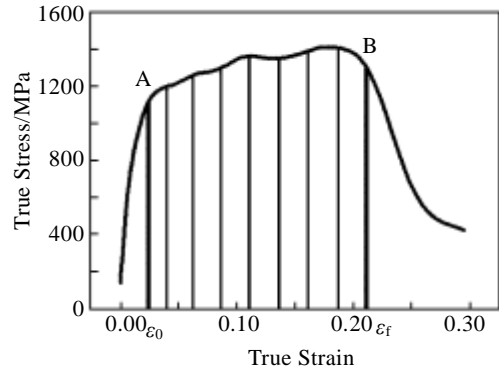


图 3 动态压缩真应力-真应变曲线积分示意图

Fig.3 Diagram of integration of stress-strain curves obtained from the dynamic compression tests

2 结果与讨论

2.1 微观组织分析

图 4 为原始热轧 TC4 钛合金经 900 °C 不同保温时间电脉冲热处理后的微观组织。从图 4a 中可以看出, 保温 5 min 后的钛合金内部发生了一定程度的再结晶, 同时保留了部分沿热轧方向被拉长的晶粒。保温时间超过 10 min (包括 10 min) 后合金的显微组织开始转变成典型的魏氏组织, 且保温时间越长, 原始 β 晶粒越大, 保温 10 min 后合金内部的平均晶粒尺寸为 100 μm , 保温 15 min 后合金内部的平均晶粒尺寸则增大到 150 μm 左右, 如图 4b 和图 4c 所示。

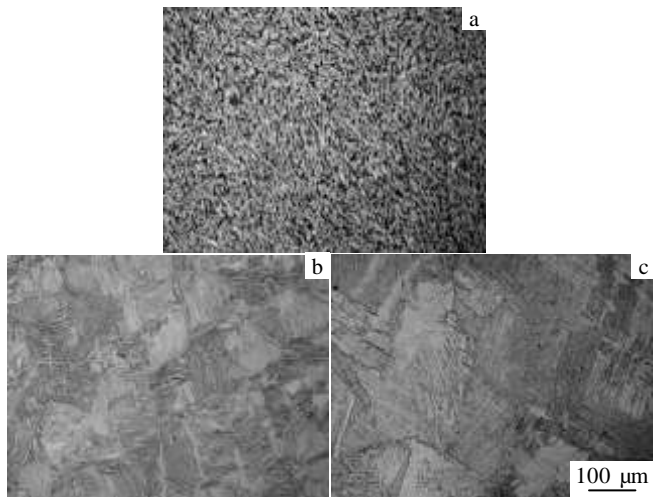


图 4 900 °C 电脉冲热处理后 TC4 微观组织照片

Fig.4 Optical microstructures of TC4 alloys after electric pulse heat treatment at 900 °C: (a) 5 min, (b) 10 min, and (c) 20 min

图 5 与图 6 分别为 1000 和 1100 °C 电脉冲处理后钛合金的微观组织照片。由图可以看出，经 1000 和 1100 °C 电脉冲处理时保温 5 min 即完全转变成了魏氏组织，且随着 SPS 温度的升高及保温时间的延长，合金中原始 β 晶粒的尺寸有所增加。

由以上分析可以看出，当合金内部组织完全转变成网篮组织后，原始 β 晶粒的尺寸随着保温时间的延长而增大，这主要是由于时间越长，原子扩散越充分，原子从较小晶粒晶界的一侧具有较高压力的点阵位置离开并转移到长大的晶粒的点阵位置上，晶界局部推进一个小的距离，晶界迁移的总结果是减少晶粒数，从而增大平均晶粒尺寸和降低总晶界能^[7]。

图 7 为 1000 °C/20 min 和 1100 °C/20 min 电脉冲处理后试样微观组织的扫描电镜照片。由图可以看出，

1000 °C/20 min 处理后合金中沿着原始 β 晶界向晶粒内部生长的次生 α 板条的平均宽度为 10 μm ，而 1100 °C/20 min 处理后次生 α 板条的宽度增长到了 30 μm ，这说明随着 SPS 温度的升高，合金中次生 α 板条的宽度亦有所增加。

2.2 静态力学性能分析

图 8 为电脉冲热处理前后 TC4 钛合金在准静态压缩条件下得到的真应力-应变曲线。由图可以看出，原始热轧试样的准静态压缩临界失效应变为 0.17，经电脉冲热处理后材料的临界失效应变均有一定程度的提高，塑性得到显著改善，强度有所降低。图 8a 为经 900 °C 不同保温时间电脉冲热处理后试样的准静态真应力-应变曲线。由图可以看出保温 10 min 的试样塑性最好，临界失效应变达到 0.33，保温 5 min 的试样临界失效



图 5 1000 °C 电脉冲热处理后 TC4 微观组织照片

Fig.5 Optical microstructures of TC4 alloys after electric pulse heat treatment at 1000 °C: (a) 5 min, (b) 10 min, and (c) 20 min

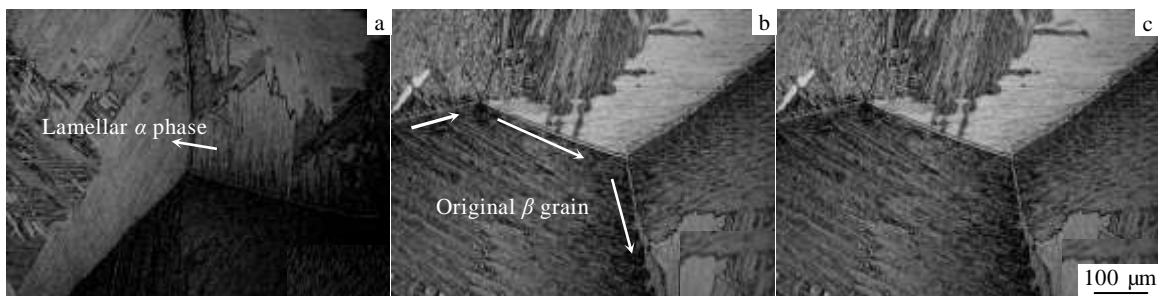


图 6 1100 °C 电脉冲热处理后 TC4 微观组织照片

Fig.6 Optical microstructures of TC4 alloys after electric pulse heat treatment at 1100 °C: (a) 5 min, (b) 10 min, and (c) 20 min

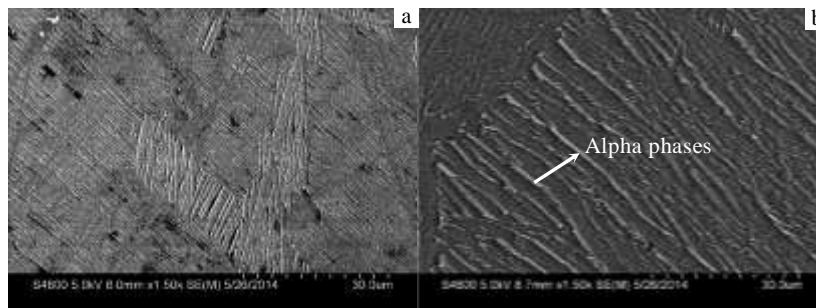


图 7 电脉冲热处理后 TC4 微观组织的扫描电镜照片

Fig.7 SEM images of TC4 alloys after electric pulse heat treatment: (a) 1000 °C/20 min, and (b) 1100 °C/20 min

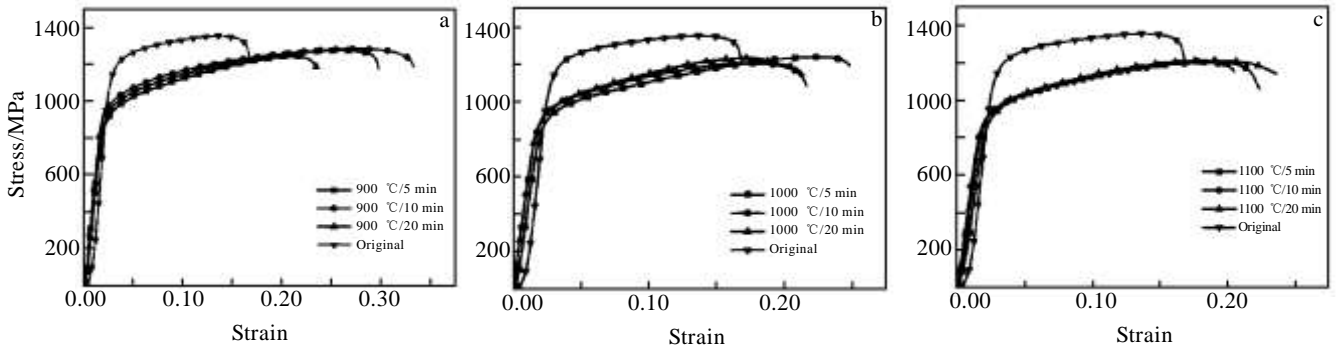


图 8 静态压缩真应力-真应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves obtained from the quasi-static compression tests: (a) 900 °C, (b) 1000 °C, and (c) 1100 °C

应变为 0.3, 保温 20 min 的试样临界失效应变为 0.25。图 8b 为经 1000 °C 电脉冲热处理后试样的真应力-应变曲线, 与 900 °C 处理的试样相比, 塑性略有下降。保温 5 min 的试样临界失效应变为 0.25, 保温 10 和 20 min 的试样临界失效应变均为 0.22。图 8c 为经 1000 °C 电脉冲热处理后试样的真应力-应变曲线, 与 1000 °C 处理的试样相比, 塑性略有下降; 且随着保温时间的延长, 临界失效应变有所降低, 保温 5 min 的试样临界失效应变为 0.24, 保温 10 和 20 min 的试样临界失效应变分别为 0.22 和 0.20。经 900 °C/5 min SPS 处理的试样保温时间较短, 试样的显微组织与原始热轧组织差别不大, 因此塑性提高幅度不大; 而一旦试样内部发生相变后, 原始热轧组织转变成了典型的魏氏组织, 材料抵抗裂纹扩展的能力迅速增强, 塑性显著提高。另外, 随着保温时间的延长, 合金内部晶粒进一步长大, 导致塑性降低。

2.3 动态力学性能分析

电脉冲热处理前后 TC4 钛合金在动态压缩加载条件下的真应力-应变曲线如图 9 所示。从图中可以看出, 原始热轧试样的绝热剪切临界破坏应变为 0.18, 经 900 °C/5 min 处理后动态压缩塑性虽有提高, 但提高幅度略低于经 10 和 20 min 处理的试样; 经 1000 和

1100 °C 处理后试样的动态压缩塑性相对原始热轧试样亦有所提高, 且随着保温时间的延长, 提高的幅度有所降低。经 1000 °C/5 min 处理后试样的绝热剪切临界破坏应变达到 0.42, 相对原始热轧试样提高了 133%。

2.4 绝热剪切敏感性分析

TC4 钛合金在高应变率加载条件下的主要失效形式为绝热剪切破坏。图 10 为电脉冲热处理前后材料发生绝热剪切破坏前塑性变形阶段的积分值柱状图。图中平行于 X 轴的横线代表原始热轧试样的积分值。由图可以看出, 经过电脉冲热处理的试样, 发生绝热剪切破坏的临界单位体积吸收功 (E) 远高于原始热轧试样。原始热轧 TC4 钛合金绝热剪切破坏的临界单位体积吸收功为 160 J/cm³, 经 1000 °C/5 min 处理后的试样绝热剪切破坏的临界单位体积吸收功达到 468 J/cm³, 相对原始热轧试样提高了 192%。这主要是因为电脉冲热处理后除 900 °C/5 min 外, 其余全部转变成魏氏组织, 而裂纹在层片组织中运动方向的变化比在球状组织中更频繁, 裂纹的总长度增加, 材料抵抗裂纹扩展的能力相应提高, 因此金属发生塑性变形直至绝热剪切破坏需要做更多的功^[8]。然而, 过长时间和过高温度的电脉冲热处理对试样动态塑性及绝热剪切敏感性的提高作用有限。

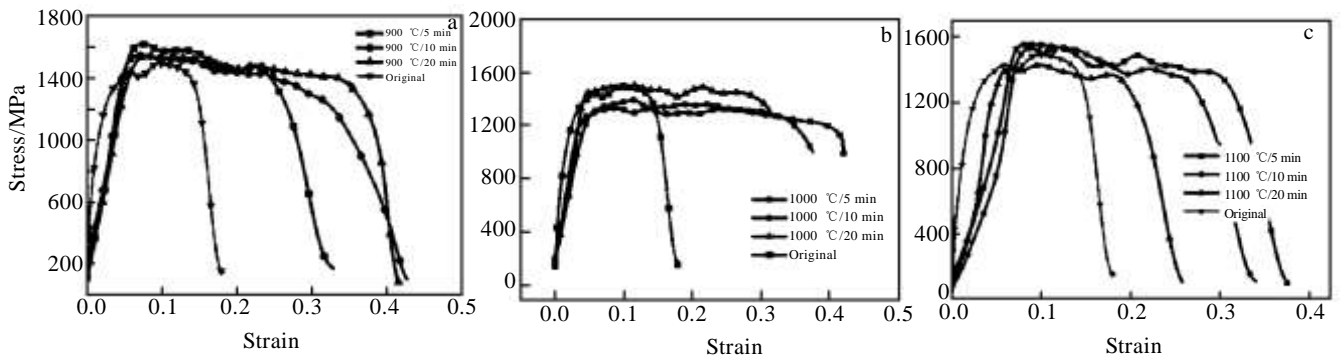


图 9 动态压缩真应力-真应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves obtained from the dynamic compression tests: (a) 900 °C, (b) 1000 °C, and (c) 1100 °C

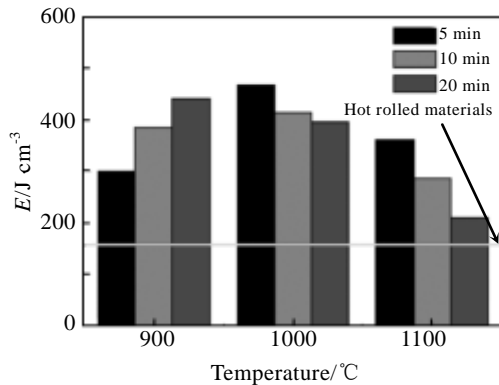


图 10 电脉冲热处理前后材料发生绝热剪切破坏前塑性变形阶段的积分值柱状图

Fig.10 Absorbing energy (E) of unit volume of TC4 before adiabatic shear failure before and after electric pulse heat treatment

3 结 论

1) 电脉冲热处理可以使热轧等轴组织 TC4 钛合金在 5 min 内组织转变成魏氏组织, 且温度越高, 转变成魏氏组织所需要的保温时间越短; 组织转变为魏氏组织前, 原始组织发生少量再结晶; 转变成魏氏组织之后, 原始 β 晶粒和 α 集束会随着热处理温度的上升和保温时间的延长而长大。

2) 电脉冲热处理可以提高热轧等轴组织 TC4 钛合

金的准静态压缩塑性, 但强度降低; 提高热处理温度及延长保温时间, 合金内部晶粒进一步长大, 材料塑性的提高幅度大大降低。电脉冲热处理对提高钛合金的抗绝热剪切破坏能力有显著作用。当热处理工艺为 1000 °C /5 min 时, 试样的绝热剪切临界破坏应变达到 0.42, 相比原始热轧 TC4 钛合金提高了 133%, 单位体积吸收功达到 468 J/cm³, 相比原始热轧 TC4 钛合金提高了 192%。

参考文献 References

- [1] Martinez F, Murr L E, Ramirez A *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 454(455): 581
- [2] Shahan A R, Taheri A K. *Materials & Design*[J], 1993, 14(4): 243
- [3] Lee D G, Lee S, Lee C S. *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 366(1): 25
- [4] Chichili D R, Ramesh K T, Hemker K J. *Acta Materialia*[J], 1998, 46: 1025
- [5] Pei C H, Fan Q B, Cai H N. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 489: 401
- [6] Huo D M, Li S K, Fan Q B. *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 42(3): 0457
- [7] Porter D A, Easterling K E, Sherif M Y. *Phase Transformation in Metals and Alloys*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009
- [8] Dodd B, Bai Y L. *Adiabatic Shear Localization*[M]. London: Elsevier, 2012

Effects of Electric Pulse Heat Treatment on Mechanical Properties and Adiabatic Shear Banding of Hot-rolled Equiaxed TC4 Alloy

Gao Lingli, Liu Jinxu, Li Yuan, Li Shukui, Luo Yumeng
(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The effects of electric pulse heat (EPH) treatment on microstructures and mechanical properties of hot-rolled equiaxed TC4 alloy were investigated. Results show that the original equiaxed microstructure of hot-rolled TC4 alloy turns into the typical lamellar microstructure through EPH within 5 min, and the time microstructure transformation needs becomes shorter with the increasing heat treatment temperature. Recrystallization happens in the equiaxed microstructure before microstructure transformation; after microstructure transformation, the prior beta grains grow with higher temperature and longer holding time. The results of quasi-static and dynamic compression tests indicate that the fracture strain value of alloys after EPH treatment is significantly improved, which decreases with the increasing temperature and holding time, while the susceptibility to the adiabatic shear bands (ASBs) of the hot-rolled TC4 titanium alloy is obviously decreased. Compared with the original hot-rolled titanium alloy, the adiabatic shear fracture strain of the alloy after EPH treatment at 1000 °C for 5 min is increased by 133%, and the energy absorbed by materials before adiabatic shear failure is increased by 192%.

Key word: hot-rolled TC4 alloy; electric pulse heat treatment; mechanical properties; adiabatic shear susceptibility

Corresponding author: Liu Jinxu, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-68913937, E-mail: liujinxu@bit.edu.cn