

# 电脉冲热处理对网篮组织热轧 TC4 合金力学性能和绝热剪切特性的影响

田 雪, 刘金旭, 李树奎, 杨智明, 骆雨萌

(北京理工大学, 北京 100081)

**摘 要:** 利用 SPS 设备对网篮组织的热轧 TC4 合金进行电脉冲热处理, 研究了电脉冲热处理对 TC4 合金力学性能和绝热剪切特性的影响。结果表明, 电脉冲热处理对 TC4 合金的静态压缩强度、塑性和动态压缩屈服强度无明显影响, 对 TC4 合金的绝热剪切临界破坏应变和绝热剪切破坏前材料的单位体积吸收功有显著影响。经 900 °C 热处理后, TC4 合金的绝热剪切临界破坏应变和单位体积吸收功均达到最大值, 与未经热处理的热轧 TC4 合金相比分别提高了 57% 和 42%, 表明 TC4 合金的绝热剪切敏感性显著降低。微观分析表明, 电脉冲热处理可调节 TC4 合金的原始  $\beta$  晶粒尺寸、集束尺寸和板条宽度等细节组织特征, 经 900 °C 电脉冲热处理后, 热轧 TC4 合金的原始  $\beta$  晶粒尺寸显著细化,  $\beta$  转变组织集束尺寸增大,  $\alpha$  板条宽度保持不变。

**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:** TG146.2<sup>+</sup>3; TG166.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2016)01-0202-05

钛合金是以钛为基加入其他元素组成的合金。钛有两种同素异构体: 882 °C 以下为密排六方结构的  $\alpha$  钛, 882 °C 以上为体心立方结构的  $\beta$  钛。TC4 (Ti-6Al-4V) 合金是一种由  $\alpha$  和  $\beta$  两相组成的钛合金, 它是在钛中添加 Al、V 等元素而形成的。TC4 钛合金具有优良的耐腐蚀性、低密度、高比强度及较好的韧性和焊接性等一系列优点, 在航空航天、石油化工、造船、汽车、医药等领域均得到了较为广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。

但是, 钛合金具有较高的绝热剪切敏感性, 在高应变率加载条件下易发生绝热剪切破坏。针对钛合金的这一特点, 研究人员已开展了大量的研究工作, 包括钛合金的成分优化设计、形变强化和热处理等领域的研究, 并取得了一些有价值的成果, 但对钛合金绝热剪切特性的改善效果有限。

针对钛合金绝热剪切敏感性高的特点, 研究人员一直在寻找新的、更加有效的热处理方法, 以实现钛合金绝热剪切敏感性的大幅度降低。放电等离子烧结 (spark plasma sintering, SPS) 是一种新的烧结方法。采用脉冲电流对材料进行烧结, 具有升温速度快、压力大等优点。有研究表明, 采用电脉冲热处理可以细化材料的微观组织<sup>[3-6]</sup>。这是因为采用脉冲电流对材料进行加热, 可通过降低再结晶过程中的形核势垒来提高晶体

的形核率, 从而促进再结晶行为, 细化钛合金微观组织; 也有研究表明, 经电脉冲热处理的热轧 TC4 合金绝热剪切敏感性降低<sup>[7]</sup>; 此外, 电脉冲热处理工艺具有升温速度快以及保温时间短等优点, 这有利于抑制晶粒长大; 而且由于其特殊的电脉冲加热方式, 可以产生常规热处理无法实现的特殊效果。目前关于钛合金电脉冲热处理的研究较少, 尚缺乏系统深入的研究。

本实验以网篮组织热轧 TC4 合金作为原始材料, 利用大变形产生的畸变能来促进 TC4 在热处理时的再结晶过程, 并采用放电等离子烧结设备对 TC4 合金进行电脉冲热处理, 系统研究了电脉冲热处理温度对热轧钛合金静/动态力学性能和绝热剪切特性的影响, 并分析了相应的机理。

## 1 实 验

研究采用的原始材料为 TC4 钛合金。TC4 是目前国内外研究最为广泛的一种钛合金材料, 其综合力学性能良好, 且成本低廉。TC4 钛合金的具体成分见表 1。

在进行电脉冲热处理之前, 首先对 TC4 合金进行了热轧变形。TC4 合金的相变点为 980 °C, 轧制前 TC4 合金的微观组织类型为网篮组织。轧制方向为单向轧制, 轧制温度为 930 °C, 变形量为 78%。经热轧变形

收稿日期: 2015-01-12

基金项目: 总装共性技术基金 (9140A12040112BQ0101)

作者简介: 田 雪, 女, 1990 年生, 硕士生, 北京理工大学材料学院, 北京 100081, 电话: 010-68913937, E-mail: 1186033937@qq.com

表 1 TC4 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 alloy (wt%)							
Al	V	C	O	N	H	Ti	
6.24	3.97	0.020	0.081	0.004	0.0011	Bal.	

后，TC4 组织仍为网篮组织。

从轧板上切取试样，采用 SPS 设备 (Syntex 3.20) 对试样进行电脉冲热处理，热处理温度分别为 700、900、1100 °C，各试样的升温速度均为 100 °C/min，保温时间为 10 min。

采用北京科技大学的 MTS 电液伺服试验机进行常温准静态压缩力学性能试验。压缩试样为  $\Phi 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的圆柱形。在压缩过程中，应变率控制在  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。获得试样在准静态轴向压缩加载条件下的真应力-应变曲线。

采用北京理工大学动态力学实验室的分离式霍普金森压杆 (SHPB) 系统进行动态压缩力学性能测试，压杆示意图如图 1 所示。

动态压缩试验的试样为  $\Phi 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的圆柱形。试验采用的压力为 0.8 MPa，获得高应变率加载条件下的真应力-应变曲线，材料的应变率约为  $3000 \text{ s}^{-1}$ 。

采用单轴动态压缩加载条件下得到的真应力-真应变曲线积分的方法来计算试样在发生剪切破坏之前单位体积的吸收功，并用试样发生破坏的临界单位体积吸收功来表征 TC4 合金的绝热剪切敏感性，积分方法如图 2 所示。

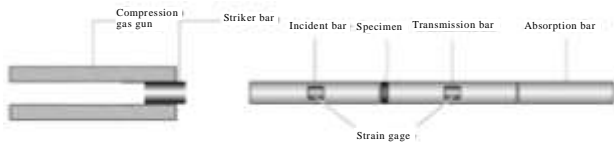


图 1 霍普金森压杆示意图

Fig.1 Schematic diagram of split hopkinson pressure bar

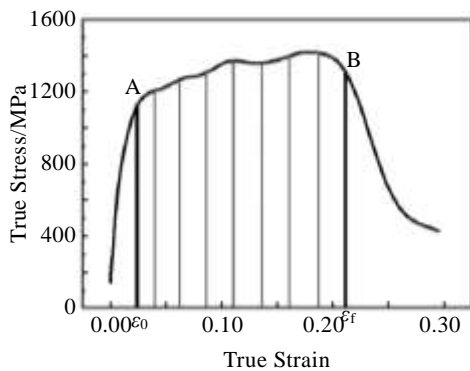


图 2 动态压缩真应力-真应变曲线积分示意图

Fig.2 Diagram of integration of stress-strain curves obtained from the dynamic compression tests

A 点为试样在动态压缩条件下发生塑性变形的起始点，B 点为试样塑性变形的终止点，用 AB 段与横轴之间面积的积分值来表征试样的绝热剪切敏感性。积分值越高，则试样在变形过程中吸收的能量越多，试样的绝热剪切敏感性越低，反之，则试样的绝热剪切敏感性越高。需要说明的是，塑性应变阶段以流变应力下降至最大流变应力的 90% 的点为终止点。

为了分析电脉冲热处理对 TC4 合金性能和绝热剪切敏感性影响的机理，本实验还对电脉冲热处理前后 TC4 合金的微观组织进行了观察和分析。按照金相试样的标准制备方法，经线切割、镶嵌、研磨、抛光和腐蚀等工序制备金相试样，并采用 LECO 系列的 OlympusPEM-3 型光学显微镜和图像输出系统对 SPS 热处理前后试样的微观组织类型和原始  $\beta$  晶粒尺寸进行观察和分析。

为了在较高放大倍数下观察到电脉冲热处理前后 TC4 合金的微观组织细节特征，又采用 S-4000 场发射扫描电子显微镜对电脉冲热处理前后试样的微观组织进行了观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 静态力学性能测试

对 TC4 合金进行静态压缩试验，对数据进行处理后得到的真应力-真应变曲线如图 3 所示。从图中可以看出，电脉冲热处理前后材料的屈服强度变化不大，均在 1000 MPa 左右，并且均表现出了应变硬化现象。原始热轧材料的临界破坏应变为 0.35；经电脉冲热处理后，材料的临界破坏应变在 0.35 左右浮动，但变化不大。由此可知，电脉冲热处理对热轧 TC4 合金的静态压缩力学性能影响较小。

### 2.2 动态力学性能测试

对 TC4 合金进行动态压缩试验，对数据进行处理

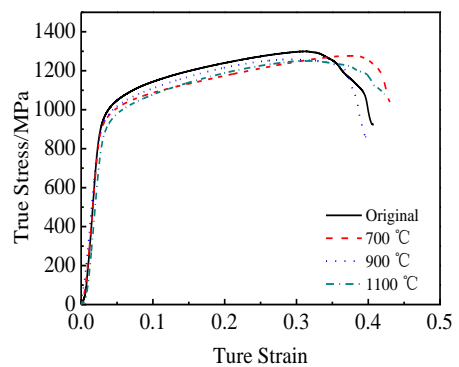


图 3 静态压缩真应力-真应变曲线

Fig.3 True stress-strain curves obtained from the quasi-static compression tests

后得到的真应力-真应变曲线如图 4 所示。从图中可以看出,电脉冲热处理前后,材料的动态压缩屈服强度相差不大,均在 1200 MPa 左右。但是 TC4 合金的绝热剪切临界破坏应变有了明显的变化,原始热轧材料的临界破坏应变为 0.14;经 700 °C 电脉冲热处理后,材料的临界破坏应变为 0.13;温度升高到 900 °C 时,材料的临界破坏应变为 0.22;当温度为 1100 °C 时,材料的临界破坏应变为 0.16。由此可知,电脉冲热处理对热轧 TC4 合金的动态压缩屈服强度影响不大,但是对材料的绝热剪切临界破坏应变有显著影响,并且当热处理温度为 900 °C 时,TC4 的临界破坏应变最大。

### 2.3 绝热剪切敏感性分析

采用图 2 所示的方法对电脉冲热处理前后材料的绝热剪切敏感性进行表征。计算得到的材料在发生绝热剪切临界破坏时的单位体积吸收功,结果见表 2。从表中可以看出,经 700 °C 电脉冲热处理后,材料的单位体积吸收功略有降低;当电脉冲热处理温度升高到 900 °C 时,材料的单位体积吸收功提高至 217 J/cm<sup>3</sup>,与原始材料相比提高了 42%;当电脉冲热处理温度为 1100 °C 时,与 900 °C 热处理相比,材料的单位体积吸收功又有所降低。

### 2.4 微观组织分析

图 5 为电脉冲热处理前后 TC4 合金微观组织的光镜照片。从图中可以看出,热轧 TC4 合金的原始  $\beta$  晶

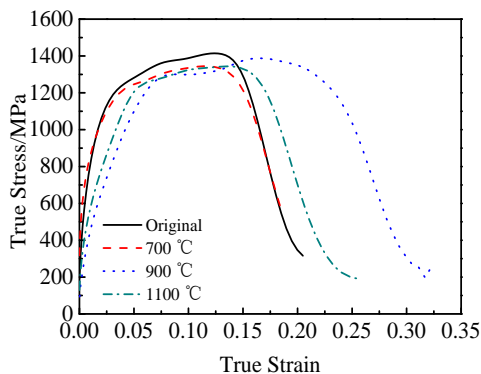


图 4 动态压缩真应力-真应变曲线

Fig.4 True stress-strain curves obtained from the dynamic compression tests

表 2 在发生绝热剪切破坏前,材料的单位体积吸收功

Table 2 Absorbing energy of unit volume of TC4 alloy before adiabatic shear failure

SPS temperature/°C	Absorbing energy of unit volume of TC4 alloy/J cm <sup>-3</sup>
Original	153
700	128
900	217
1100	162

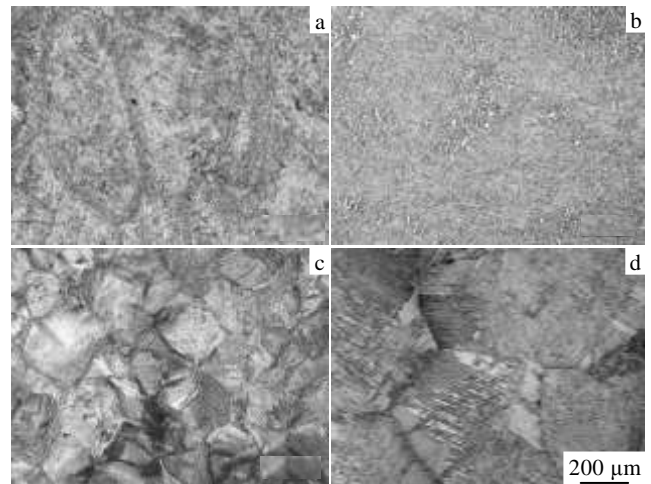


图 5 TC4 合金微观组织的光镜照片

Fig.5 Optical microstructures of TC4 alloy: (a) original material, (b) 700 °C, (c) 900 °C, and (d) 1100 °C

粒尺寸较大;当电脉冲热处理温度为 700 °C 时,材料的微观组织变化较小;当温度升高到 900 °C 时,材料的原始  $\beta$  晶粒尺寸大幅度减小;当热处理温度为 1100 °C 时,材料的原始  $\beta$  晶粒尺寸又有所增大。图 6 为电脉冲热处理前后 TC4 合金微观组织的扫描电镜照片。从图中可以看出,原始热轧材料的  $\alpha$  片层呈扭曲状;当热处理温度为 700 °C 时,材料的  $\alpha$  集束和  $\alpha$  片层尺寸变化较小;当温度升高到 900 °C 时,材料的  $\alpha$  集束尺寸和  $\alpha$  片层长度均明显增大;当热处理温度升高到 1100 °C 时,材料的  $\alpha$  集束尺寸又有所减小。

由此可知,电脉冲热处理可以有效调控 TC4 合金的微观组织。当电脉冲热处理温度较低时,对 TC4 合金微观组织影响较小;随着温度的升高,TC4 合金的原始  $\beta$  晶粒尺寸大幅度减小, $\alpha$  集束尺寸和  $\alpha$  片层长度明显增大;随着热处理温度继续升高,材料的原始  $\beta$  晶粒尺寸又逐渐增大, $\alpha$  集束尺寸有所减小。

TC4 合金在热轧变形过程中, $\alpha$  片层发生扭曲,储存了大量的畸变能。当电脉冲热处理温度较低时,原子扩散速度较慢,因此 TC4 合金的微观组织变化较小;当热处理温度升高到 900 °C 时,热轧 TC4 合金在高温下发生了再结晶,并且由于电脉冲热处理保温时间较短,抑制了晶粒的长大,因此晶粒尺寸显著降低;随着热处理温度的继续升高,TC4 合金的原始  $\beta$  晶粒长大,但是,因为保温时间短,所以晶粒长大的程度较小。

### 2.5 机理分析与讨论

#### 2.5.1 组织对力学性能的影响

原始  $\beta$  晶粒尺寸的减小有利于材料强度和塑性的

提高;  $\alpha$  集束尺寸的增大易导致位错的塞积, 在集束交

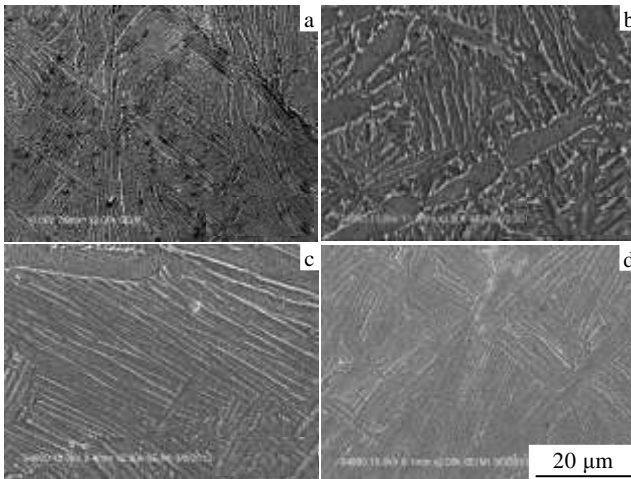


图6 TC4合金微观组织的扫描电镜照片

Fig.6 SEM microstructures of TC4 alloy: (a) original material, (b) 700 °C, (c) 900 °C, and (d) 1100 °C

界处产生局部应力集中, 这不利于提高材料的变形能力;  $\alpha$  片层长度的增大有利于增加位错滑动的距离, 进而提高材料的塑性变形能力。由微观组织分析可知, 经电脉冲热处理后, TC4合金原始 $\beta$ 晶粒尺寸、 $\beta$ 转变组织集束尺寸及 $\alpha$ 板条长度均发生了变化, 在以上各因素的综合作用下, 材料的静态压缩强度和塑性无明显变化。

然而, 经电脉冲热处理后, TC4合金的动态压缩力学性能发生了较大的变化。这是由于材料在静态压缩和动态压缩试验中的破坏机制不同, 在动态压缩条件下发生绝热剪切破坏。图7所示为TC4合金在动态压缩试验中发生破坏后的光镜照片。从图中可以看出, 材料破坏后出现绝热剪切带, 说明材料在动态压缩试验中发生的是绝热剪切破坏。因此, 经电脉冲热处理后TC4合金的静/动态力学性能表现出不同的变化。

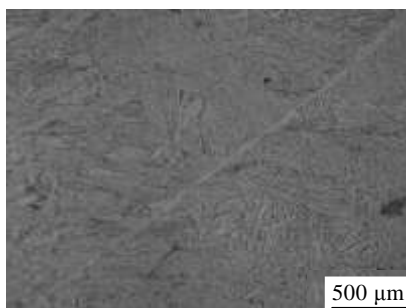


图7 TC4合金在动态压缩试验产生的绝热剪切带的OM照片

Fig.7 OM image of adiabatic shear band of TC4 alloy in dynamic compression tests

## 2.5.2 微观组织对绝热剪切敏感性的影响

材料在发生绝热剪切破坏前单位体积的吸收功由动态压缩应力-应变曲线积分得到。在本研究中, 由电脉冲热处理前后钛合金动态压缩力学性能的分析可知, 经电脉冲热处理后材料的动态压缩强度相差不大, 但是绝热剪切临界破坏应变发生明显的变化。因此, 材料的绝热剪切敏感性主要受绝热剪切临界破坏应变的影响, 绝热剪切临界破坏时的单位体积吸收功随温度的变化规律与临界破坏应变一致。

## 3 结论

1) 电脉冲热处理可调节TC4合金的原始 $\beta$ 晶粒尺寸、 $\beta$ 转变组织集束尺寸,  $\alpha$ 板条宽度保持不变。当电脉冲热处理温度较低时, 材料组织无明显变化; 随着温度升高, 材料的原始 $\beta$ 晶粒尺寸大幅度减小, 集束尺寸增大; 随着温度继续升高, 原始 $\beta$ 晶粒尺寸逐渐增大,  $\beta$ 转变组织集束尺寸有所减小。

2) 电脉冲热处理对TC4合金的静态压缩强度、塑性及动态压缩屈服强度无明显影响, 但对材料的绝热剪切临界破坏应变及绝热剪切敏感性影响显著。随着热处理温度的升高, 材料的绝热剪切临界破坏应变及临界破坏时的单位体积吸收功先升高后降低, 并且当热处理温度为900 °C时, TC4合金的临界破坏应变和单位体积吸收功最大, 绝热剪切敏感性最低。

## 参考文献 References

- [1] Wang Jinyou(王金友), Ge Zhiming(葛志明), Zhou Yanbang(周彦邦). *Titanium Alloys for Aerospace(航空用钛合金)*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985
- [2] Zhang Xiyan(张喜燕), Zhao Yongqing(赵永庆), Bai Chenguang(白晨光). *Titanium Alloys and Application(钛合金及应用)*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005
- [3] Conrad H. *Materials Science and Engineering A*[J], 2000, 287: 227
- [4] Zhang W, Wu B, Zhao W S et al. *Materials Science and Engineering A*[J]. 2006, 438-440: 320
- [5] Huo Dongmei(霍咚梅). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011
- [6] Huo Dongmei, Li Shukui, Fan Qunbo et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 530: 161
- [7] Wang Fuchi, Huo Dongmei, Li Shukui et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2013, 550: 133

## Effects of Electric Pulse Heat Treatment on Mechanical Properties and Adiabatic Shear Banding of Hot-Rolled Lamellar TC4 Alloy

Tian Xue, Liu Jinxu, Li Shukai, Yang Zhiming, Luo Yumeng  
(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The effects of electric pulse heat treatment performed by SPS equipment on mechanical properties and the susceptibility to adiabatic shear bands of hot-rolled lamellar TC4 alloy were studied. The results show that electric pulse heat treatment has little effect on the strength and ductility of TC4 alloy at the static compression loading, and it also has little effect on the yielding strength at the dynamic compression loading, but the heat treatment has evident effects on the susceptibility to adiabatic shear bands of the hot-rolled TC4. After electric pulse heat treatment at 900 °C, TC4 alloy exhibits the highest adiabatic shear failure strain under the dynamic compression loading and the highest energy absorption of unit volume before fracture. Compared with the hot-rolled TC4 alloy, the adiabatic shear failure strain of heat-treated TC4 increases by 57% and the energy absorption of unit volume increases by 42%, indicating that the susceptibility to adiabatic shear bands of TC4 significantly decreases. The microstructure analysis results reveal that the electric pulse heat treatment has obvious influences on the original  $\beta$  grain size and the detailed microstructure characteristics of TC4 alloy. After the heat treatment at 900 °C, the original  $\beta$  grain size decreases remarkably, while the transformed  $\beta$  colony size increases, but the width of  $\alpha$  plate shows no change.

**Key words:** 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