

脉冲电流频率对预制缺陷 TC4 钛合金性能的影响

李细锋, 贾国朋, 姜 军, 陈 军

(上海交通大学, 上海 200030)

摘 要: 为了研究脉冲电流频率对预制缺陷 TC4 钛合金组织性能的影响规律, 首先采用室温预拉伸制备含孔洞缺陷的 TC4 试样, 然后选取不同频率的脉冲电流对预制缺陷的 TC4 试样进行通电处理, 对比通电前后板材内部的显微孔洞和基体组织的变化情况, 并对处理后的试样进行二次室温拉伸获得力学性能参数。结果表明: 当脉冲电流频率从 0 Hz 升至 140 Hz 时, TC4 内部孔洞体积分数由 2.21% 下降至 0.86%, 屈服强度由 916.7 MPa 提高到 990.9 MPa, 抗拉强度由 951.2 MPa 增加至 997.5 MPa, 延伸率提高 1.65 倍; 当脉冲电流频率从 140 Hz 提高到 160 Hz 时, 内部孔洞体积分数反而增至 1.99%, 屈服强度和抗拉强度则分别下降到 975.1 和 988.5 MPa, 延伸率降低了 37.70%。显微孔洞体积分数几乎决定了预制缺陷 TC4 钛合金的力学性能。

关键词: TC4 钛合金; 预制缺陷; 脉冲电流频率; 孔洞; 力学性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)08-2655-06

TC4 钛合金因高比强度、优良的抗蚀性和生物相容性广泛应用于空天、医疗、化工等领域^[1-3], 但钛合金室温塑性差, 在工作环境中容易累积变形损伤而造成失效, 因此对钛合金进行损伤缺陷修复, 延长钛合金服役寿命, 保证其可持久应用具有重要的意义^[4]。

脉冲电流处理具有瞬时输入能量高、处理时间短等优点, 在修复金属材料损伤方面已有一定的研究。Golovin 等^[5]研究了脉冲电流对硅钢裂纹扩展的动力学影响, 发现脉冲电流可以阻止裂纹的扩展, 利用脉冲电流可以实现裂纹止裂。Satapathy 等^[6]通过仿真研究不同脉冲电流强度对 7075 铝合金预制裂纹的影响规律, 发现脉冲电流可以使尖端裂纹钝化, 降低裂纹扩展倾向。Hosoi 等^[7]分析脉冲电流对奥氏体不锈钢裂纹的愈合作用, 发现脉冲电流可以有效降低裂纹尖端的塑性应变, 降低裂纹区域的位错密度和疲劳损伤程度。邱胜宝等^[8]通过研究脉冲电流频率对冷拔金属线材的影响规律, 发现在一定范围内提高脉冲电流频率可以改善冷拔线材的微观组织, 提高塑性, 相比退火热处理更加短时高效。以前关于脉冲电流裂纹修复的研究重点是电流密度^[9,10], 对脉冲电流频率的影响规律则涉及较少, 而且关注的对象主要是缺陷本身, 而脉冲电流对材料基体组织方面的影响研究则较少。

本研究通过改变脉冲电流频率, 观察预制缺陷

TC4 钛合金微观缺陷和基体组织的变化, 讨论脉冲电流频率对预制缺陷的 TC4 钛合金力学性能的影响规律及微观机理, 实现脉冲电流对 TC4 钛合金损伤缺陷的修复。

1 实 验

选用的实验材料是由宝钛提供的热轧退火态 TC4 细晶板, 板材厚度为 0.7 mm。借助电子背散射衍射 (EBSD) 技术得到该板材的晶粒取向图, 如图 1 所示。

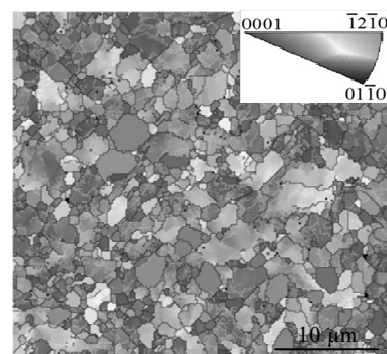


图 1 TC4 钛合金板材 EBSD 晶粒取向分布图和反极图
Fig.1 EBSD orientation map and inverse pole figure of TC4 titanium alloy sheet

收稿日期: 2018-08-05

基金项目: 航空科学基金项目 (20163657004)

作者简介: 李细锋, 男, 1980 年生, 博士, 副研究员, 上海交通大学模具 CAD 国家工程研究中心, 上海 200030, 电话: 021-62830509, E-mail: lixifeng@sjtu.edu.cn

通过 EBSD 线扫样品，可以得到目标区域内每个点的取向，并用不同的颜色表示。由于每个晶粒都是均匀结晶学取向的单元，因此取向一致的区域被认为是一个晶粒，由此可以确定出每个晶粒的大小和形状。由图可知，该 TC4 板材为晶粒尺寸小于 10 μm 的等轴晶组织。通过后处理软件 Channel 5 分析该 EBSD 图像，测得其平均晶粒尺寸约为 1.25 μm。

利用电火花线切割技术沿轧制方向加工 TC4 板材，得到拉伸试样，如图 2 所示。试样平行段长度为 35 mm，标距长度为 25 mm，宽度为 6 mm。为了让试样内部产生一定的变形缺陷（孔洞、微裂纹等），首先将试样在室温预先拉伸，应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，延伸率达到 10% 即停止（试样拉伸到 10.4% 开始颈缩），如图 3 所示。拉伸实验的设备为 CMT5305 型号 SANS 材料试验机，预拉伸后，试样标距横截面积变为 $5.7 \text{ mm} \times 0.66 \text{ mm}$ 。

对 TC4 预拉伸试样进行通电处理，电源设备为 TSGZ-2.0KVA 脉冲电源。将脉冲电流正负极分别加在预变形试样两端，用钢板进行固定，防止通电过程中试样发生变形。选取脉冲电流频率为 120, 140, 160 Hz，脉冲电压 40 V，通电时间 30 s，采用热电偶记录通电过程中试样的温度变化，对应的最高温度分别为 142, 160 和 177 °C，未经脉冲电流处理的记为 0 Hz。通电处理后，在部分预拉伸试样的标距段中央截取大小为 $6 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的长方形薄片，将薄片分为 A、B 两组。

将 A 组薄片进行镶样，随后放在 Buehler 自动磨抛机上进行研磨、抛光，抛光后的试样经乙醇清洗后，置于光学显微镜下观察试样的缺陷情况；将 B 组薄片打磨减薄至厚度约 70 μm，使用冲样机冲出直径为 3 mm 的小圆片，用 MPA-1A 型电解双喷减薄仪将圆片减薄制得透射试样，电解液成分为：6% 高氯酸+34% 正丁醇+60% 甲醇（体积分数）。使用 JEM-2100F 型场发射透射电镜观察试样显微结构的变化。另外部分预拉伸试样用于做室温二次单向拉伸实验，应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，得到不同条件下的应力-应变曲线，为了保证试验结果的一致性和可重复性，每种条件下的拉伸实验至少重复 3 次。

2 结果与讨论

2.1 脉冲电流频率对预制缺陷的影响

图 4 为脉冲电流处理前后，试样在光学显微镜下的孔洞分布。从图 4a 中可以看出，TC4 试样在经历室温预先拉伸后，内部均匀分布着许多孔洞，尺度在亚微米级水平。脉冲电流处理后，试样内部孔洞的大小、数量和形貌发生改变。脉冲电流频率为 120 Hz 时，如图 4b 所示，相比未经通电处理的试样，孔洞数量有一定程度的减少，且单个孔洞尺寸也有一定减小；当脉冲电流频率增加到 140 Hz 时，如图 4c，孔洞明显减少，且孔洞尺寸也明显减小，形状趋于球形；继续增大电流频率至 160 Hz，如图 4d，材料内部孔洞反而增

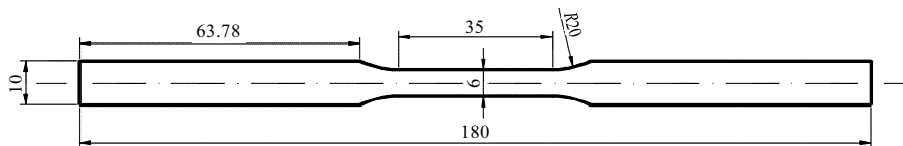


图 2 拉伸试样示意图

Fig.2 Schematic diagram of tensile specimen

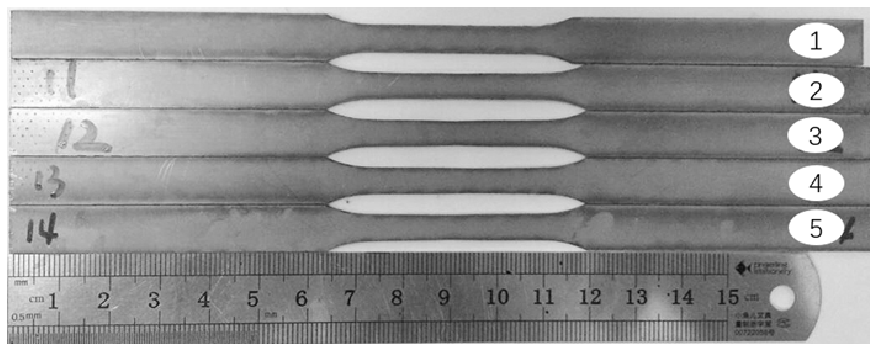


图 3 初始试样（1 号）和预拉伸后的试样（2~5 号）

Fig.3 Initial specimen (No.1) and pre-stretch specimens (No.2~No.5)

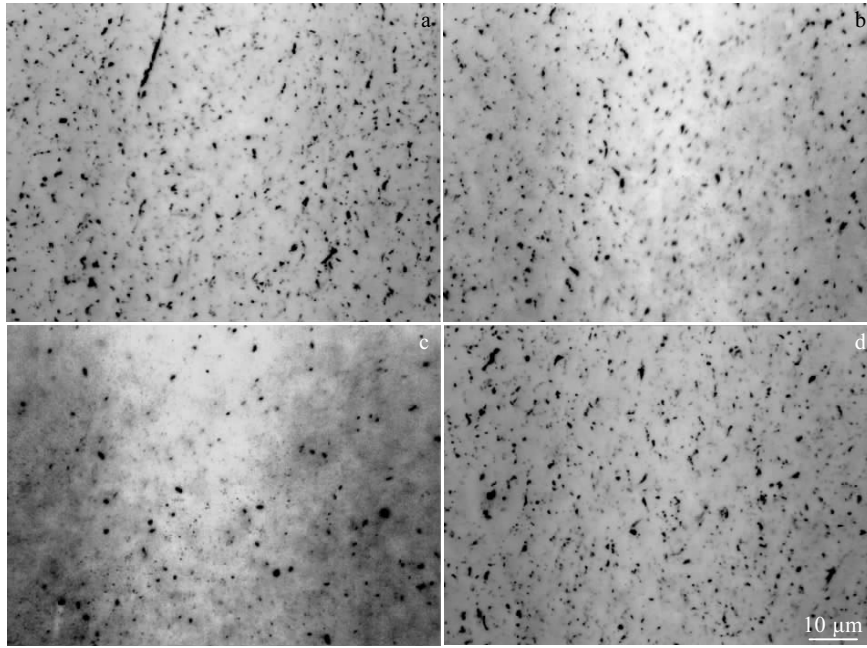


图 4 试样预拉伸后内部显微孔洞分布

Fig.4 OM images of void distribution in pre-stretch specimens: (a) as-received, (b) 120 Hz, (c) 140 Hz, and (d) 160 Hz

多，且局部区域出现尺寸较大的孔洞。

为了定量分析脉冲电流处理前后试样内部的孔洞数量，采用 Image J 软件对金相图片进行处理。图 5 展示了孔洞体积分数随脉冲电流频率的变化规律，由图可知，未经脉冲电流处理的试样孔洞体积分数为 2.21%，当脉冲电流频率升至 140 Hz 时，孔洞最少，体积分数为 0.86%，继续增大频率至 160 Hz，试样内部孔洞反而增多，体积分数增大至 1.99%，结果与图 4 中的变化规律一致。

孔洞体积的减小归因于孔洞的弥合，弥合机制一般认为有 2 种：一种是原子的扩散填充^[11]，脉冲电流促进原子扩散，将有效原子带入孔洞处，为孔洞的弥

合提供了物质基础。孔洞尖端处为原子活动最剧烈的区域，该区域分布大量的位错，累积变形大，储存的变形能较大。另外，在孔洞尖端处电流环流作用集中，局部温度较高，加速了原子的运动，这些为有效原子弥合孔洞提供了能量基础，弥合过程通常从孔洞尖端开始，因此，孔洞在脉冲电流作用下有球化的趋势^[12]。从图 4c 可以看出，频率为 140 Hz 时，孔洞的形状已普遍趋于球形，这种球化趋势减少了裂纹扩展的路径。

另一种弥合机制则是热压合机制，在孔洞区域，电阻较大，产生的焦耳热高于其它区域，因此孔洞区域的温度比周围基体高，热膨胀也较大，受周围基体的位置约束，孔洞区域的膨胀只能朝着孔洞内部进行，因此孔洞处于热压缩状态，孔洞体积缩小。脉冲电流产生的最大热压应力 σ_{max} 可由式(1)表示^[13]：

$$\sigma_{max} = E\alpha\Delta T \tag{1}$$

式中， E 是弹性模量， α 是热膨胀系数， ΔT 是平均温升。由于脉冲电流处理过程中升温速度快，热膨胀过程总是滞后于温升过程。随着电流频率的升高，瞬时温升幅度越大，热压应力越大。因此在一定的频率范围（小于 140 Hz）内，随着脉冲电流频率的加大，这 2 种弥合效应会愈加明显，孔洞的体积分数会持续下降，图 4a~4c 也证实了这一点。

当频率为 160 Hz 时，孔洞的体积分数反而增加，这是由于脉冲电流对原子的作用是间歇性的，频率越

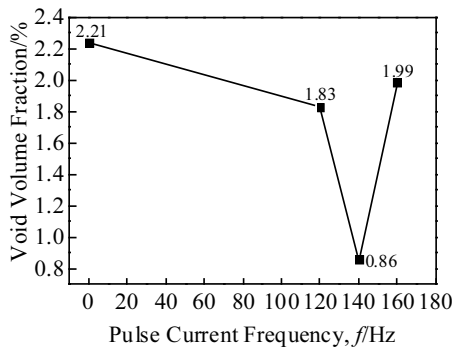


图 5 脉冲电流频率对孔洞体积分数的影响

Fig.5 Effect of pulse current frequency on void volume fraction

高，单位时间内施加脉冲的次数就越多，理论上有利于原子快速进入孔洞区域，但当脉冲电流频率过高时，前面即将进入孔洞区域的原子来不及到达孔洞表面，就被后面跟进的原子轰击离开，这样进入孔洞的有效原子便会十分有限^[14]。并且由图 4c 可以看出，孔洞在 140 Hz 处理条件下趋于圆形，尖端裂纹的弥合过程已经趋于饱和，继续提高频率，愈合效果反而变差。此外，过高的频率也会导致孔洞区域的温度过高，试样的实测温度也是随着脉冲电流频率的增大而升高，造成孔洞区域熔化，形成更大的孔洞。由图 4d 和图 5 可以看出，160 Hz 的脉冲电流处理后，试样内部的孔洞大小和数量已经接近未作处理的 TC4 试样。

2.2 脉冲电流频率对预制缺陷 TC4 钛合金力学性能的影响

脉冲电流处理前后试样的工程应力-应变及力学性能曲线如图 6 和图 7 所示。由拉伸曲线可以看到，未经电流处理的拉伸试样，延伸率只有 3.33%。脉冲电流处理后，试样的延伸率都得到了不同程度的提高，其中电流频率 140 Hz 时所对应的延伸率最大，达到了 5.49%，是未经处理试样的 1.65 倍。试样强度方面，脉冲电流处理后，试样的屈服强度和抗拉强度比未处理试样都有一定程度的提高，相比而言，电流频率大小对强度的影响不如对延伸率的影响显著。

由于 TC4 钛合金室温下拉伸曲线没有明显的屈服平台，因此取塑性应变达到 0.2% 时所对应的应力作为屈服强度。不同频率的脉冲电流处理对 TC4 板料力学性能参数（延伸率、屈服强度和抗拉强度）的变化趋势如图 7 所示，实验数据保持了很好的一致性，测量值的标准偏差都很小。从图中可以看到，脉冲电流处理能够提高钛合金的强度和延伸率，并且在变化趋势

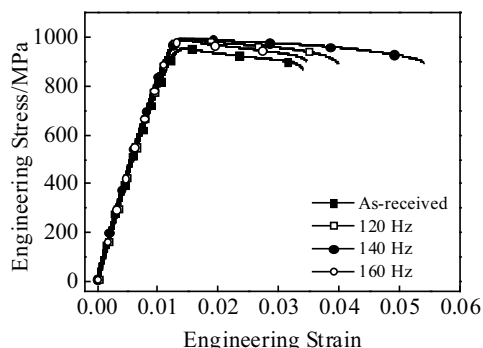


图 6 不同脉冲电流频率条件下预变形 TC4 试样的工程应力-应变曲线

Fig.6 Engineering stress-strain curves of pre-stretch TC4 alloy specimens with different pulse current frequencies

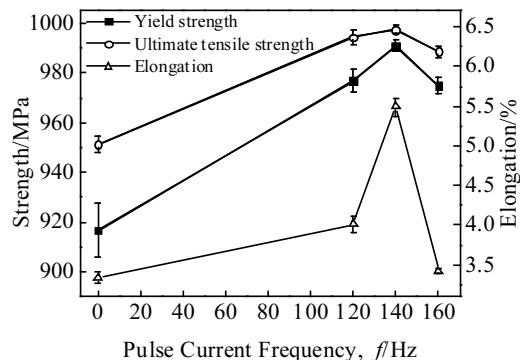


图 7 强度和延伸率随脉冲电流频率变化的关系曲线

Fig.7 Curves of strength and elongation with different pulse current frequencies

上表现出了一致性。随着脉冲电流频率的增加，预制缺陷的 TC4 的强度和延伸率都升高，当频率达到 140 Hz 时，材料的强度和延伸率最高，其中屈服强度达到 990.9 MPa，比未脉冲处理的提高 74.2 MPa，抗拉强度达到 997.5 MPa，延伸率达到 5.49%。当频率继续增大到 160 Hz 时，TC4 的强度出现一定程度减小，而延伸率下降明显，只有 3.42%，仅比未处理的 TC4 合金高 0.09%，这说明脉冲电流处理时，脉冲电流频率并非越高越好，过高的电流频率会造成试样强度和塑性的改善作用不明显。

结合图 5 和图 7 可以看出，随着孔洞的减少，试样的强度和延伸率都提高，当频率增加到 160 Hz 时，孔洞变大变多，试样的强度和延伸率也随之下降。孔洞的存在使材料抵抗拉力的有效面积显著降低，从而降低试样的强度与延伸率，因此试样内部的孔洞大小和数量是决定 TC4 力学性能的最主要因素。

图 8 为脉冲电流处理前后预拉伸试样的 TEM 图像。如图 8a 所示，未经脉冲电流处理的预拉伸试样内部存在大量位错，这是因为将试样预拉伸至临近缩颈，发生严重塑性变形，导致位错大量的塞积，形成高的位错密度。由图 8b~8d 可以看出，脉冲电流处理后，试样内部的位错密度明显减少。当脉冲电流频率从 0 Hz 升至 120 Hz 时，试样内部的位错数量明显下降；当频率为 140 Hz 时，试样内部的位错密度进一步减小，而频率从 140 Hz 升到 160 Hz 时，试样内部的位错数量不再有明显变化。脉冲电流产生的电子风力可以有效地推动位错运动，打开位错缠结，从而降低位错密度，改善试样内部的累积变形损伤^[15,16]，这也是 TC4 脉冲电流处理后，试样延伸率全部提高的一个原因。当脉冲电流频率为 140 Hz 时，尽管试样内部依然

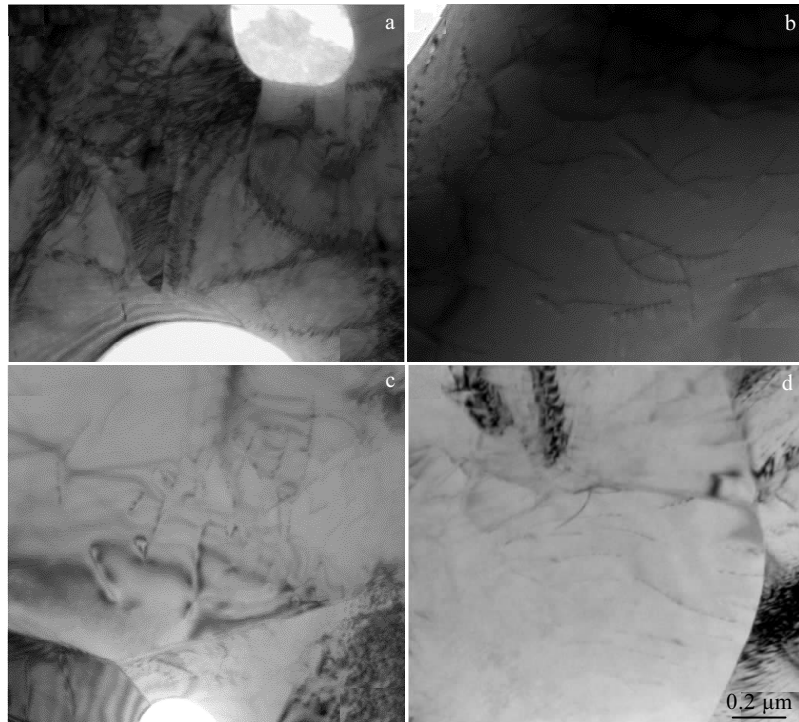


图 8 不同脉冲电流频率条件下预拉伸 TC4 试样的 TEM 形貌

Fig.8 TEM images of pre-stretch TC4 specimens with different pulse current frequencies: (a) as-received, (b) 120 Hz, (c) 140 Hz, and (d) 160 Hz

存在孔洞, 但位错密度显著降低, 基体内部损伤得到改善, 加之孔洞趋于球形, 延缓了尖端裂纹的扩展, 所以试样延伸率大幅提高。

未经电流处理的 TC4 钛合金屈服比较高, 进入塑性变形阶段, 随着变形量的增大, 位错密度会增加, 但在脉冲电流作用下, 位错密度反而减小, 强度升高也不显著, 这说明 TC4 钛合金的强度对于位错密度的变化并不十分敏感。实际上脉冲频率的增加使基体内部位错密度减少, 但没有造成基体强度的降低。在拉伸变形过程中, 钛合金位错强化效应增长相对缓慢, 晶界会吸收增殖的位错^[17]; 另外, 钛合金室温拉伸中, 孪晶变形为其主要变形方式之一, 因此试样的位错密度对 TC4 钛合金强度的影响不明显。

由于脉冲频率的增加使试样孔洞数量减少, 增加了材料抵抗拉力的有效面积, 从而提高了材料的屈服强度和抗拉强度, 因此孔洞数量和大小是决定 TC4 力学性能的最关键因素, 位错密度对材料塑性和强度的影响占次要作用, 而且孔洞体积分数对 TC4 延伸率的影响明显高于对强度的影响。脉冲频率为 160 Hz 的试样位错密度明显低于未处理试样, 但由于两者的孔洞体积分数相接近, 所以强度和延伸率也最接近。

3 结 论

1) 脉冲电流处理能有效弥合预制缺陷 TC4 钛合金内部的显微孔洞, 在一定范围内, 随着脉冲电流频率的增加, 孔洞体积分数下降; 继续增加脉冲电流频率, 孔洞体积分数反而上升。

2) 脉冲电流处理能显著改变预制缺陷 TC4 钛合金基体组织, 随着电流频率的增加, 基体内部位错密度降低。

3) 随着脉冲电流频率的增加, 预制缺陷 TC4 钛合金的强度及延伸率先增加后降低。在频率为 140 Hz 时表现出最优的力学性能, 屈服强度比未脉冲电流处理试样高约 74.2 MPa, 延伸率是未处理试样的 1.65 倍。

4) 预制缺陷 TC4 钛合金的力学性能主要是由孔洞体积分数决定, TC4 钛合金的强度和延伸率随孔洞体积分数的降低而提高, 且孔洞体积分数对 TC4 延伸率的影响明显高于对强度的影响。

参考文献 References

- [1] Brewer W D, Bird R K, Wallace T A. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, 243(1-2): 299

- [2] Liu Guohuai(刘国怀), Li Tianrui(李天瑞), Xu Mang(徐 莽) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2017, 53(9): 1038
- [3] Ezugwu E O, Wang Z M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1997, 68(3): 262
- [4] Ye X X, Li X P, Song G L *et al. Journal of Alloys & Compounds*[J], 2014, 616: 173
- [5] Golovin Y I, Finkel' V M, Sletkov A A. *Strength of Materials* [J], 1977, 9(2): 204
- [6] Satapathy S, Stefani F, Saenz A. *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 2005, 41: 226
- [7] Hosoi A, Kishi T, Ju Y. *Materials*[J], 2013, 6(9): 4213
- [8] Qiu Shengbao(邱胜宝), Yao Kefu(姚可夫), Ding Hongyu(丁红瑜). *Transactions of Materials & Heat Treatment(材料热处理学报)*[J], 2010, 31(7): 114
- [9] Li X F, Zhou Q, Zhao S J *et al. Procedia Engineering*[J], 2014, 81: 1799
- [10] Li X F, Ji B Y, Zhou Q *et al. Journal of Materials Engineering & Performance*[J], 2016, 25(10): 4514
- [11] Zhou Yizhou(周亦胄), Xiao Suhong(肖素红), Gan Yang(甘阳) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2000, 36(1): 43
- [12] Zhang Hongcha(张洪潮), Yu Jing(于 静), Hao Shengzhi(郝胜智) *et al. Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)*[J], 2013, 49(7): 21
- [13] Tang D W, Zhou B L, Cao H *et al. Journal of Applied Physics* [J], 1993, 73: 3749
- [14] Sun Yuling(孙玉玲), Liu Xingjiang(刘兴江), Wang Jianzhong(王建中) *et al. Heat Treatment of Metals(金属热处理)*[J], 2015, 40(1): 131
- [15] Song H, Wang Z J. *Materials Science & Engineering A*[J], 2008, 490(1-2): 1
- [16] Song P C, Li X F, Ding W *et al. Acta Metallurgica Sinica*[J], 2014, 27(4): 642
- [17] Sun Shuyu(孙曙宇), Lv Weijie(吕维洁). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2016, 45(5): 1138

Effect of Pulse Current Frequency on Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy with Prefabricated Defects

Li Xifeng, Jia Guopeng, Jiang Jun, Chen Jun
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In order to study the effect of pulse current frequency on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloys with prefabricated defects, TC4 specimens with void defects were firstly prepared by pre-stretching at room temperature and then treated by pulse current with different frequencies. The microstructural variations of void and matrix before and after pulse current treatment were compared. The mechanical properties were obtained by second room-temperature tension. The results indicate that the void volume fraction decreases from 2.21% to 0.86% when the pulse frequency increases from 0 to 140 Hz. Meanwhile, the yield strength and ultimate tensile strength increase from 916.7 MPa to 990.9 MPa and from 951.2 MPa to 997.5 MPa, respectively. Moreover, the elongation increases by 1.65 times. However, the void volume fraction increases to 1.99% when pulse frequency increases from 140 Hz to 160 Hz. At the same time, the yield strength and ultimate tensile strength decrease to 975.1 and 988.5 MPa, respectively. The elongation decreases by 37.70%. Void volume fraction almost determines the mechanical properties of TC4 alloys with prefabricated defects.

Key words: TC4 titanium alloy; prefabricated defect; pulse current frequency; void; mechanical property

Corresponding author: Li Xifeng, Ph. D., Associate Research Fellow, National Engineering Research Center of Die and Mold CAD, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, P. R. China, Tel: 0086-21-62830509, E-mail: lixifeng@sjtu.edu.cn