

TC4 钛合金电塑性压缩流变应力分析

叶苏苏, 赵 旦, 杨 屹, 杨 刚, 尹德强, 周 宇

(四川大学, 四川 成都 610065)

摘 要: 采用 Gleeble-1500D 热-力学模拟机, 将不同晶粒尺寸的 TC4 试样分别以 0、10、30、50 和 70 °C/s 的升温速度加热至 700 °C 进行单向压缩并得到流变应力曲线图, 结合 SEM、TEM 等研究了电流作用下 TC4 钛合金高温压缩过程中流变应力的变化及影响因素。结果表明, 无电流时流变应力超过 1000 MPa, 在电流作用下可降至 600 MPa 以下。小电流下 TC4 试样发生动态再结晶, 应力随应变快速增大到应力峰值, 后又快速下降至稳定状态; 大电流下发生动态回复, 局部有动态再结晶, 无应力峰值, 应力最大值低于 400 MPa, 且电流越大, β 相转变为 α 相的相变越完全。分析认为, TC4 钛合金的流变应力受电流大小、动态再结晶和相变的共同影响, 电流促进动态再结晶和相变并降低流变应力。

关键词: 流变应力; 动态再结晶; 相变; TC4 钛合金; 电塑性效应

中图分类号: TG146.2*3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)06-1572-06

Ti-6Al-4V (TC4) 钛合金是 $\alpha+\beta$ 双相等轴马氏体合金, 比强度高, 生物相容性好, 综合性能优异, 广泛用于航空航天、化工能源和生物医学等各领域, 但其塑性成型困难, 成本高^[1-3]。若在塑性成型过程中施加电场或电流, 可加速位错运动^[4]、增加位错密度^[5]、降低层错能^[6]等, 从而降低变形抗力、提高塑性^[7,8]。

为改善 TC4 钛合金的加工性能, 开发其塑性成型新工艺, 近年来相关学者结合电塑性效应对此开展了理论、实验及应用研究。解焕阳^[9]讨论了电塑性机理及应用, 认为电塑性效应需满足一定的电流密度阈值; 李超^[10]对 TC4 板材进行脉冲电流辅助成型, 指出电流可强化变形机制、实现快速升温并抑制微裂纹; 宋辉^[11]、周宇^[12]发现电流处理后 TC4 合金晶粒被细化并发生再结晶, 再结晶程度与电流大小有关; 于卫新^[13]指出, 中等变形程度和较大的应变速率可细化 TC4 合金的组织、提升综合性能, 同时工艺参数间的交互作用对强度和塑性影响显著; 唐国翌^[14]研究了电塑性拉拔装置及处理技术, 指出电塑性拉拔可减少摩擦力、拔制力, 提高表面质量及综合力学性能。

如上所述, 电致塑性可显著降低变形抗力、改善材料组织性能。然而, 目前关于电流大小对电致塑性程度的影响研究较为缺乏。因此, 本实验以电流作为加热源, 研究不同大小的电流作用下 TC4 钛合金高温压缩过程中流变应力的变化, 同时结合显微组织和相的演变结果, 分析流变应力变化的影响因素。

1 实 验

实验选用的 TC4 试样晶粒尺寸分别为 8、16、20 μm ($\Phi 5 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$)。其中, 16、20 μm 的试样, 由退火状态的晶粒尺寸 8 μm 的 TC4 棒材加热至 800、900 °C 后冷却得到。

实验时, 采用 Gleeble-1500D 热-力学模拟机将不同晶粒尺寸的 TC4 钛合金试样分别以 10、30、50 和 70 °C/s 的升温速度升温至 700 °C 进行单向压缩, 并设置室温 (0 °C/s) 压缩实验作对照, 应变速率 10^{-3} s^{-1} , 应变率 35%。

实验结束后, 采集数据得到真应力-真应变曲线和温度-应力曲线。利用 Olympus-GX51 型金相显微镜、HITACHIS-4800 扫描电镜及 JEM-2100 高分辨透射电镜分析显微组织和相变。

2 实验结果

图 1 是不同晶粒尺寸的 TC4 钛合金在不同升温速度下加热至 700 °C 进行单向压缩的真应力-真应变曲线。由图可见, 无电流时 (0 °C/s, 室温压缩), 流变应力超过 1000 MPa; 电流作用下 (10、30、50、70 °C/s), 降低到 600 MPa 以下。电流可降低流变应力。小电流下 (10 °C/s), 应力随应变快速增大至应力峰值, 峰值后, 应力又快速下降直至稳定状态, 是典型的动态再结晶曲线; 大电流下 (30、50、70 °C/s), 应力随应变

收稿日期: 2016-05-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51275322)

作者简介: 叶苏苏, 女, 1992 年生, 硕士生, 四川大学制造科学与工程学院, 四川 成都 610065, 电话: 028-85402279, E-mail: suben1992@gmail.com

快速增大, 应力最大值低于 400 MPa, 其后应力稍有下降, 但下降程度不明显, 属于动态回复曲线。

图 2 是不同晶粒尺寸的 TC4 钛合金不同升温速度下加热至 700 °C 的升温阶段进行单向压缩的温度-应力曲线。为排除焦耳热差异带来的应力变化, 利用温度-应力曲线讨论电流对流变应力的影响。加热至 700 °C 时, 同晶粒尺寸的 TC4 试样在不同升温速度下流变应力差别很大, 大电流 (30、50、70 °C/s) 下, 电流越大, 流变应力越小。小电流下 (10 °C/s), 出现了应力峰值。

3 分析与讨论

3.1 动态回复与动态再结晶

Gleeble-1500D 热模拟机利用低频电流加热试样, 通过预设升温速度控制电流大小, 两者满足:

$$\frac{I}{A} = \sqrt{\frac{\rho C}{\sigma} \cdot \frac{dT}{dt}} \tag{1}$$

式中, I 为电流; A 为横截面积; ρ 为密度; C 为比热容; σ 为电阻系数; dT/dt 为预设升温速度。

式 (1) 中, $I^2 \propto dT/dt$, 当 ρ 、 C 和 σ 确定后, 电流大小只与升温速度有关, 升温速度越大, 电流越大。

根据加工硬化的强化效果表达式, 流变应力是位错密度平方根的线性函数:

$$\tau = \tau_0 + \alpha G b \sqrt{\rho} \tag{2}$$

式中, τ 为加工硬化后的切应力; τ_0 为无加工硬化时的切应力; α 为与材料有关的常数; G 为切变模量; b 为位错柏氏矢量; ρ 为位错密度。

由于 $\tau \propto \sqrt{\rho}$, 当 τ_0 、 α 、 G 和 b 确定后, 流变应力只与位错密度有关, 位错密度越大, 流变应力越大。

图 1 中, 小电流下 (10 °C/s), 发生动态再结晶。升温速度小, 变形时间长, 随应变量增加, 位错塞积严重, 位错密度增大, 因此流变应力迅速上升。在 10 °C/s 的应力峰值点处, 动态再结晶大规模进行, 位错密度减小, 故峰值后应力迅速下降。大电流下 (30、50、70 °C/s), 主要发生动态回复, 局部有动态再结晶。

升

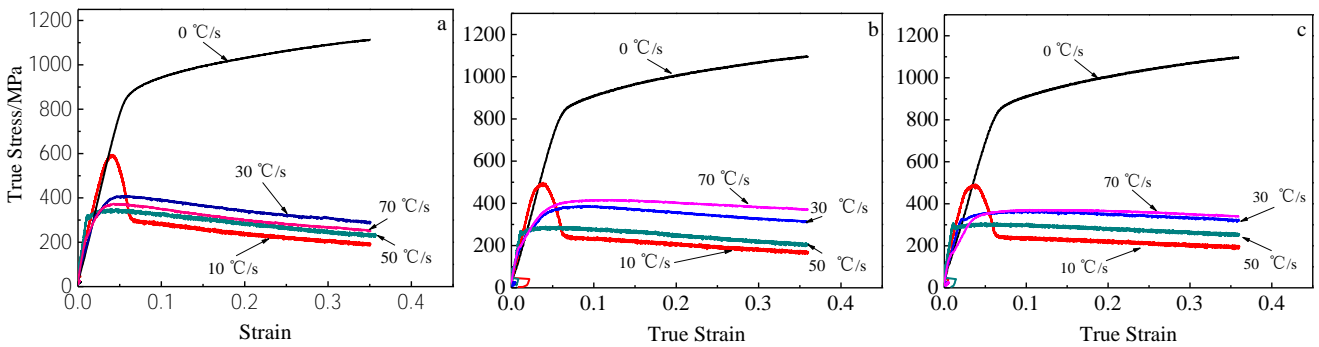


图 1 不同晶粒尺寸的 TC4 钛合金在不同升温速度下加热至 700 °C 进行单向压缩的真应力-真应变曲线

Fig.1 Uniaxial compressive true stress-strain curves of TC4 titanium alloy with various grain sizes during heating from RT to 700 °C with different heating rates: (a) 8 μm, (b) 16 μm, and (c) 20 μm

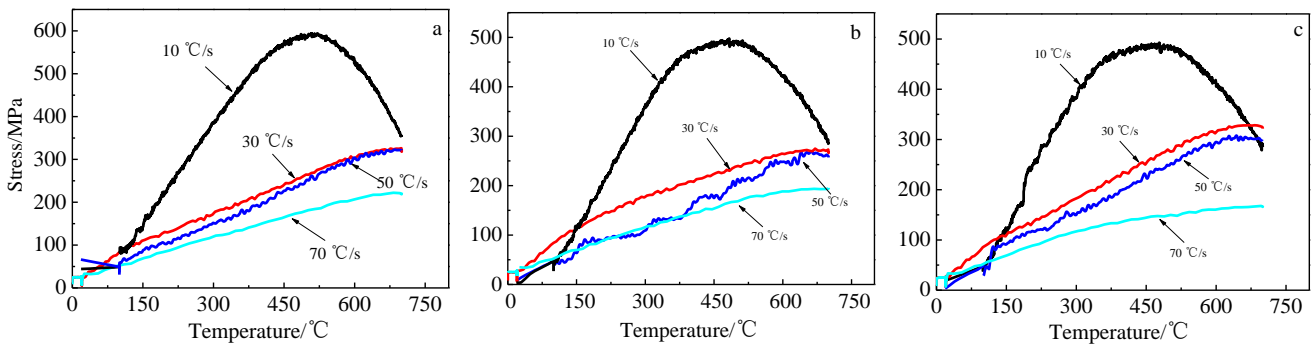


图 2 不同晶粒尺寸的 TC4 钛合金在不同升温速度下加热至 700 °C 的升温阶段进行单向压缩的温度-应力曲线

Fig.2 Uniaxial compressive temperature-stress curves of TC4 titanium alloy with various grain sizes during heating from RT to 700 °C

with different heating rates: (a) 8 μm , (b) 16 μm , and (c) 20 μm

温速度大, 单位时间内提供的能量多, 一旦位错密度达到某一临界值, 便可发生动态回复, 同时 TC4 钛合金扩展位错宽度小, 易产生交滑移和攀移, 因此变形储存能减少, 位错密度增长减慢, 不足以发生动态再结晶。但局部区域可能变形不均、温度偏高, 导致能量很高、位错密度很大, 促使动态再结晶发生。故图 1 中, 30、50、70 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时应力快速增长至稳定状态, 应力下降程度不明显。

图 3a 是晶粒尺寸 20 μm 的 TC4 钛合金的原始组织。由等轴 α 相、晶间 β 相和少量的次生片状 α 相构成。图 3b、3c、3d 分别是 10、30 和 70 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 升温至 700 $^{\circ}\text{C}$ 进行单向压缩的金相组织。10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 升温下, 晶粒最细小, 变形基体上有无畸变的等轴 α 晶粒生成, 且等轴 α 相含量最多, 晶间 β 相和次生片状 α 相减少, 并且 β 相均匀分布在等轴 α 相晶界上, 是动态再结晶下的组织形貌。30 和 70 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 升温下, TC4 钛合金的晶粒沿垂直于压缩方向被压扁, 等轴 α 相呈粗大蜗杆状, 次生片状 α 相和晶间 β 相沿垂直于压缩方向被压扁呈长条状分布, 因此, 30 和 70 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 升温下 (大电流), 主要为动态回复, 局部有动态再结晶。

TC4 钛合金的实际再结晶温度是 750 $^{\circ}\text{C}$, 而本实验的预设变形温度为 700 $^{\circ}\text{C}$ 。因此, 电流降低了动态再结晶所需温度, 即电流促进动态再结晶。

动态再结晶后, 变形基体上有新的无畸变的细等轴晶粒生成。细等轴晶粒含量越多, TC4 钛合金塑性越好, 流变应力越小。

3.2 相变程度与流变应力

TC4 钛合金中, β 相呈粗大的长条状分布, 强度、硬度大, 易阻碍位错运动; α 相呈细小的等轴状分布, 对塑性有益。因此, 晶间 β 相转变为 α 相的相变, 使得长条状的 β 相分离, 等轴状的 α 相析出, α 相体积分数增大, 变形塑性增加, 故相变能够降低流变应力, 即相变程度越大、相变越完全, 流变应力越小。

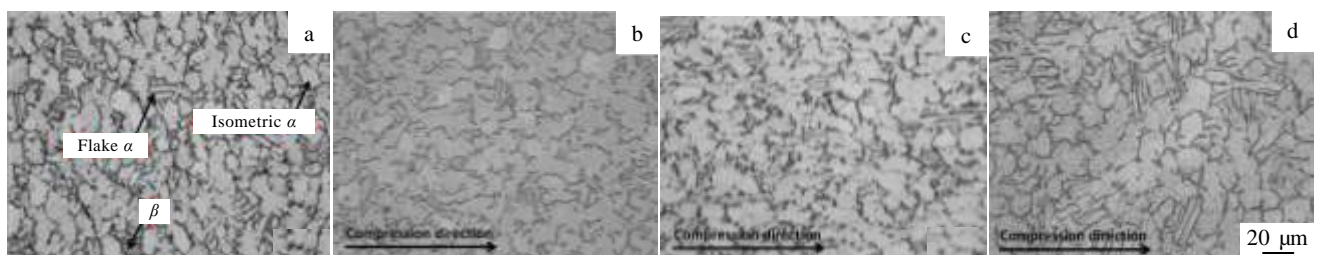


图 3 晶粒尺寸 20 μm 的 TC4 钛合金在不同升温速度下加热至 700 $^{\circ}\text{C}$ 进行单向压缩的金相组织

Fig.3 Uniaxial compressed microstructures of TC4 titanium alloy with 20 μm grain size during heating from RT to 700 $^{\circ}\text{C}$ with different

图 4 是晶粒尺寸 20 μm 的 TC4 钛合金 0 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ (室温压缩)、10、30 和 70 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 升温至 700 $^{\circ}\text{C}$ 进行单向压缩的 SEM 照片。暗色的基体是 α 相, 亮色的凸起部分是 β 相, β 相均匀分布在 α 相的晶界上。图 4f、4g、4h 中, 有蜂窝状结构和白亮颗粒物。蜂窝状结构是局部的晶间 β 相转变成了 α 相。 β 相内部析出细小的 α 晶粒后, 仍残留未转变完全的 β 晶粒, 即图中的白亮颗粒物。

无电流时 (0 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$), α 相晶粒粗大, 晶间 β 相凸起明显并呈粗板条状分布于 α 相晶界, 无蜂窝状结构和白亮颗粒物, 没有相变发生。在电流作用下, 发生晶间 β 相转变为 α 相的相变, 电流促进相变。与 30 和 70 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 升温下相比, 小电流下 (10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$) 的相变更完全。10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 升温下, β 相含量最少并且凸起程度最小, β 相明显细化, 基体 α 相和晶间 β 相上出现大量的蜂窝状结构和白亮颗粒物, 并且蜂窝状结构和白亮颗粒物最为细小。大电流下, 70 与 30 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 升温下相比, 短杆状的 β 相更为细小, 蜂窝状结构和白亮颗粒物更多、更细, 次生 α 相含量增多, β 相呈弥散分布趋势。大电流下, 晶间 β 相转变成 α 相的相变程度随电流增大而增加。

小电流下 (10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$), 大的位错密度和增多的畸变能, 在促使发生动态再结晶后, 也使得晶间 β 相转变为 α 相容易, 因此, 小电流下 (10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$) 的相变更完全。根据电子风力和电塑性效应的机理, 施加电流后, 金属材料内部原子活动性增大、动能增加。电流增大, 单位面积上的电子数量增多, 电子风力变大, 因而可动位错数量增加, 位错密度增大。同时, 电流越大 (升温速度越大), 金属内部原子活动能力越强, 位错滑移所需的激活能降低, 储存的畸变能增多, 此时相变容易发生。因此, 大电流下 (30、50 和 70 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$), 电流越大, 相变程度越大, 流变应力越小 (图 2)。

heating rates: (a) 0 °C/s, (b) 10 °C/s, (c) 30 °C/s, and (d) 70 °C/s

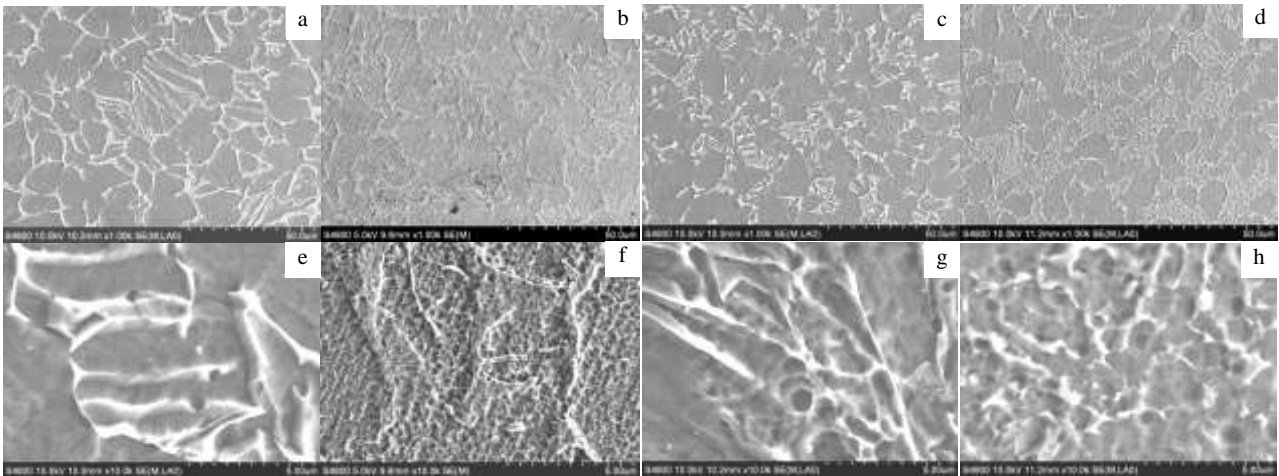


图 4 晶粒尺寸 20 μm 的 TC4 钛合金在不同升温速度下加热至 700 °C 进行单向压缩的 SEM 像

Fig.4 SEM images of uniaxial compressed TC4 titanium alloy with 20 μm grain size during heating from RT to 700 °C with different heating rates: (a, e) 0 °C/s, (b, f) 10 °C/s, (c, g) 30 °C/s, and (d, h) 70 °C/s

图 5 是晶粒尺寸 20 μm 的 TC4 钛合金室温压缩 (0 °C/s) 和大电流下 (30 和 70 °C/s) 恒温压缩的 TEM 形貌。据此, 判断晶间 β 相是否转变为 α 相。图 5a 中, 0 °C/s 升温下, α 相和 β 相的界面清晰。从 α 相和 β 相中均可得到单晶体电子衍射花样, 即 α-Ti 和 β-Ti, 且相界处的电子衍射花样是 α-Ti 和 β-Ti 的单晶电子衍射花样的叠加。显然, 无电流作用, 无相变发生。图 5b 是 30 °C/s 升温下, α 相、β 相界面处的 TEM 像 (电子衍射环), 相界处晶粒十分细小, α 相、β 相和一些中间相杂乱分布, 推测有晶间 β 相转变成 α 相。图 5d 是图 5c 中 α 相和 β 相界面的放大形貌。70 °C/s 升温下, α 相和 β 相的界面清晰, 但 β 相内部的晶粒取向差别很大。

图 5c 中, 扭曲的长条状晶粒是 β' 相。β 相的相变

中, 处于亚稳态的 β 相并不是直接转变成 α 相, 而是先形成一些过渡相, 如 β' 相: β 相→β' 相→α 相。图 5c 中出现过渡相 β' 相, 说明 70 °C/s 升温下的 TC4 钛合金有晶间 β 相转变成 α 相。

因此, 同晶粒尺寸时, 大电流下 (30、50 和 70 °C/s) 的 TC4 钛合金, 流变应力随电流增大而减小 (图 2)。

3.3 电流大小与流变应力

根据不同晶粒尺寸的 TC4 试样以不同升温速度加热至 700 °C 进行恒温压缩时的流变应力值, 得到图 6。

小电流下, 试样发生了动态再结晶并且相变更完全, 因此, 同晶粒尺寸时, 10 °C/s 升温下的流变应力应该最小。然而图 6 中, 10 °C/s 升温下的流变应力远大于 50 和 70 °C/s (大电流) 升温下的流变应力。

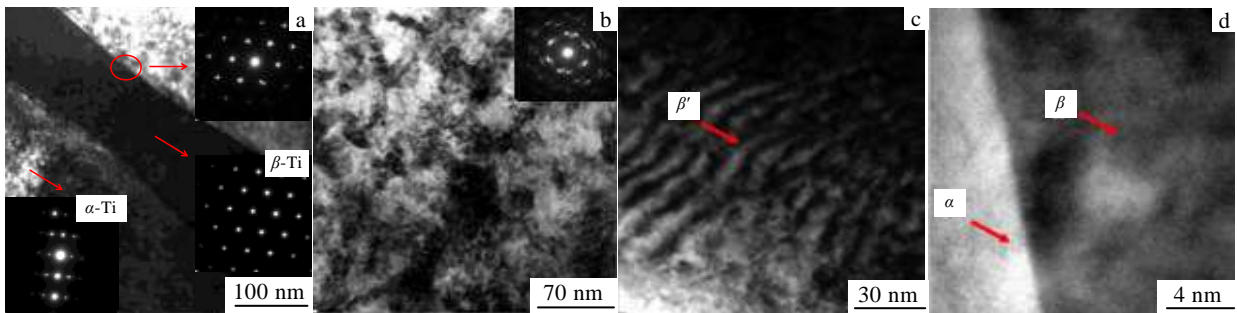


图 5 晶粒尺寸 20 μm 的 TC4 钛合金在不同升温速度下加热至 700 °C 恒温压缩的 TEM 像

Fig.5 TEM images of isothermal compressed TC4 titanium alloy with 20 μm grain size during heating from RT to 700 °C with different

heating rates: (a) 0 °C/s, (b) 30 °C/s, (c) 70 °C/s, and (d) magnification of Fig.5c

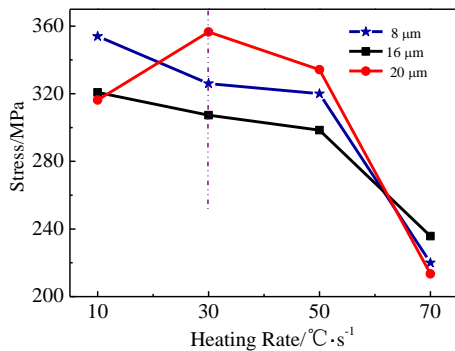


图 6 不同晶粒尺寸的 TC4 钛合金在不同升温速度下加热至 700 °C 恒温压缩时的流变应力

Fig.6 Flow stress of isothermal compressed TC4 titanium alloy with different grain sizes during heating from RT to 700 °C with different heating rates

所以,除动态再结晶和相变外,电流本身对流变应力影响显著。根据电子风力和纯电塑性效应,电流越大,原子活动能力越强,位错滑移所需的激活能降低;同时,单位面积上的漂流电子数量增多、电子风力增大,位错增殖且运动加快,位错更易越过滑移面上的障碍,宏观表现为变形抗力降低、塑性变形容易。因而电流越大,流变应力越小。

不同升温速度下的 TC4 钛合金,流变应力受电流大小、动态再结晶和相变共同影响。小电流下,动态再结晶和相变大规模进行,流变应力主要受电流大小影响;大电流下,由于电流很大,且只有少数区域有动态再结晶,流变应力决定于相变程度,电流越大,相变程度越大,流变应力越小。

4 结 论

1) 电流降低流变应力,提高材料塑性。无电流下压缩,流变应力超过 1000 MPa;在电流作用下,流变应力可降低到 600 MPa 以下。

2) 小电流下,试样发生动态再结晶,故达到应力峰值后应力又快速下降;大电流下,主要为动态回复,局部有动态再结晶,无应力峰值,应力下降不明显。

3) 电流促进动态再结晶和相变。电流作用下,发生动态再结晶且再结晶温度下降;电流越大,相变程度越大。

4) 不同电流作用下,流变应力受电流大小、动态再结晶和相变共同影响。小电流下,流变应力主要受电流大小影响;大电流下,流变应力决定于相变程度,增大电流可增加相变程度,其后流变应力减小。

参考文献 References

- [1] Christoph Leyens, Manfred Perters. Translated by Chen Zhenhua(陈振华). *Titanium and Titanium Alloy*(钛与钛合金)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 1
- [2] Zhao Yongqing(赵永庆), Chen Yongnan(陈永楠). *Titanium Alloy Phase Change and Heat Treatment*(钛合金相变及热处理)[M]. Changsha: Central South University Press, 2012: 5
- [3] Zhu Tangkui(朱堂葵), Li Miaoquan(李淼泉). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(11): 1970
- [4] Conrad H, Yang D. *Acta Materialia*[J], 2002, 50(11): 2851
- [5] Troitskii O A. *Materials Science and Engineering*[J], 1985, 75(1-2): 37
- [6] Silveira V L A, Porto M F S, Mannheimer W A. *Scripta Metallurgica*[J], 1981, 15(8): 945
- [7] Conrad H, Yang D, Becher P. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 477(1-2): 358
- [8] Li D L, Yu E L, Liu Z T. *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 580: 410
- [9] Xie Huanyang(解焕阳), Dong Xianghuai(董湘怀), Fang Lin-qiang(方林强). *Journal of Shanghai Jiaotong University* (上海交通大学学报) [J], 2012, 46: 1059
- [10] Li Chao(李超), Zhang Kaifeng(张凯锋), Jiang Shaosong(蒋少松). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2012, 41(8): 1400
- [11] Song Hui(宋辉). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009
- [12] Zhou Yu(周宇), Hu Jing(胡静), Yang Gang(杨刚). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(3): 712
- [13] Yu Weixin(于卫新), Li Miaoquan(李淼泉), Luo Jiao(罗皎). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2009, 38(1): 19
- [14] Tang Guoyi(唐国翌), Jiang Yanbin(姜雁斌), Cui Jinquan(崔敬泉). *Metallurgical Equipment* (冶金设备)[J], 2008, 169(3): 63

Flow Stress Analysis of TC4 Titanium Alloy during Electroplastic Effect

Ye Susu, Zhao Dan, Yang Yi, Yang Gang, Yin Deqiang, Zhou Yu

(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: TC4 titanium alloys with different grain sizes were heated from RT to 700 °C and compressed uniaxially using a Gleeble-1500D thermal mechanical simulator. Heating rates of 0, 10, 30, 50, 70 °C/s were used for the heating process. The flow stress of the TC4 titanium alloys during the high temperature compression was investigated under the effects of the current by flow stress curves, SEM and TEM. It is found that the stress can be reduced from around 1000 MPa to below 600 MPa under the application of the current. Dynamic recrystallization occurs at a low current and the stress increases rapidly with the strain at first and reaches a peak value, it then decreases quickly and eventually becomes steady with the further increase of the strain. Dynamic recovery takes place at a high current and dynamic recrystallization is only found at local areas. No stress peak is noticed with a high current and the maximum stress is below 400 MPa. In addition, a higher current can promote a more complete phase transition from β to α . In conclusion, the flow stress of the TC4 titanium alloys can be affected simultaneously by the current, dynamic recrystallization and phase transition and the current can facilitate dynamic recrystallization and phase transition, resulting in the decrease in flow stress.

Key words: flow stress; dynamic recrystallization; phase transition; TC4 titanium alloy; electroplastic effect

Corresponding author: Yang Yi, Ph.D., Professor, School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China, Tel: 0086-28-85402279, E-mail: yangyi@scu.edu.cn