

TC17 钛合金高温变形行为研究

杨晓康, 王快社, 史佳敏, 蔡 军, 王 萌, 王庆娟, 刘莹莹, 王 文

(西安建筑科技大学 陕西省冶金工程技术研究中心, 陕西 西安 710055)

摘 要: 采用 Gleeble 3500D 热模拟试验机对 TC17 钛合金进行了高温压缩试验。其变形温度为 973~1223 K, 应变速率为 0.001~10 s⁻¹, 应变 0.9。结果表明: TC17 钛合金高温流变应力对应变速率和变形温度非常敏感。在温度为 1123, 1183 和 1223 K, 应变速率为 10 s⁻¹ 时, TC17 钛合金的流动应力出现了明显的应力不连续屈服现象。利用 Zener-Holloman 参数建立了 TC17 钛合金的高温本构方程, 与试验结果对比表明: 该方程可以准确地描述 TC17 钛合金的高温流动行为。基于动态模型, 建立了 TC17 钛合金的热加工图, 并结合微观组织分析验证了加工图的准确性。

关键词: TC17 钛合金; 热压缩试验; 本构方程; 加工图

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)09-2895-06

TC17 钛合金是一种富 β 相的 $\alpha+\beta$ 双相钛合金, 具有强度高、韧性好、淬透性高以及热稳定性好等优点, 因而广泛地应用于航空发动机风扇叶片、压气机转子以及大截面锻件等部件^[1-3]。TC17 钛合金锻造方法主要包括在高温两相区常规锻造、近 β 锻造以及 β 单相区锻造^[4]。相应的, TC17 钛合金应用在航空发动机整体叶盘上的状态也分别经历了均质、近 β 、双性能盘以及等温 β 锻造模锻盘等^[5]。因此, 研究 TC17 钛合金的高温变形行为也就十分的必要。

材料的高温本构方程和加工图是研究材料高温变形行为的重要方法。本构方程可以反映材料的流动应力与变形工艺参数之间的变化规律。近年来, 有限元数值模拟技术在材料加工领域的应用越来越广泛。本构方程的准确与否直接影响数值模拟的精度^[6,7]。热加工图可以预测材料在热加工条件下的“安全区”和“不安全区”, 也可以分析材料在不同加工条件下的变形行为, 如动态回复、动态再结晶、绝热剪切以及开裂等, 从而可以优化热加工工艺参数^[8]。因此, 加工图已经广泛地应用于金属材料的热变形行为研究, 如镁合金^[9], 铝合金^[10], 钛合金^[11], 高温合金^[12]等。

本研究根据 TC17 钛合金热压缩试验, 对其高温流动变形行为进行分析, 以获得变形工艺参数对 TC17 钛合金高温流动应力的影响规律, 采用多元回归获得 TC17 钛合金的高温本构方程。同时建立

TC17 钛合金的热加工图, 并对加工图的准确性进行了验证。

1 实 验

试验材料采用了西部钛业有限责任公司所制备的直径 45 mm 的 TC17 钛合金棒材, 其原始组织如图 1 所示。TC17 钛合金为典型的 $\alpha+\beta$ 两相钛合金, 初生 α 相均呈等轴状弥散分布在 β 相基体中, 其相交点约为 905 °C。初生 α 相尺寸大多处于 0.8~4 μm 的范围内, 其平均尺寸约为 2.07 μm 。

TC17 钛合金等温恒应变速率压缩试验在 Gleeble 3500D 热模拟试验机上完成。将初始棒材加工为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的圆柱形压缩试样。以 10 °C/s 的速度将试样升温至试验温度, 保温 5 min, 然后开始试验。当试验完成后, 喷气冷却至室温。

根据 TC17 钛合金的热变形工艺规范, 设定的热压缩试验方案如下: 变形温度: 973, 1023, 1073, 1123, 1183, 1223 K; 应变速率: 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 s⁻¹; 真应变: 0.9。

2 结果与分析

2.1 流变应力

图 2 为 TC17 钛合金热压缩变形时的应力-应变曲线。由图可以看出, TC17 钛合金的流动应力曲线表现出以下几个特征:

收稿日期: 2017-09-05

基金项目: 国家自然科学基金钢铁基金重点项目 (U1760201); 国家自然科学基金 (51574192); 陕西省国际合作与交流计划项目 (2016KW-054); 陕西省工业科技攻关项目 (2016GY-207); 陕西省科技厅产学研协同创新计划 (2017XT-013)

作者简介: 杨晓康, 男, 1982 年生, 博士生, 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055, E-mail: yangxiaokang2000@163.com

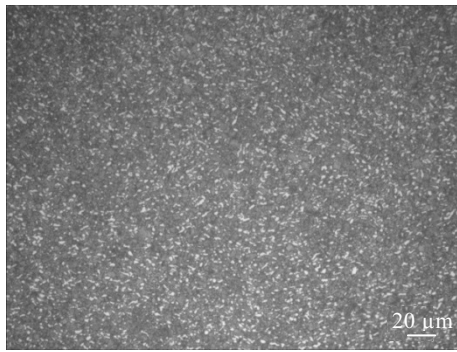


图 1 TC17 钛合金棒材原始微观组织

Fig.1 Microstructure of as received original TC17 titanium alloy

(1) 在变形的开始阶段 (达到峰值应力前), 流动应力随变形的增加而迅速增加, 几乎呈直线形状, 斜率非常大。此时, 材料在这期间处于加工硬化状态。

(2) 随着变形量的增大, 当应变超过一定值后, 流动应力开始逐渐下降, 即出现了流动软化现象, 并逐渐趋于稳定, 表现出了稳态流动的特征。在 $\alpha+\beta$ 双相区(图 2a~2d), 变形温度越低, 应变速率越高, 流动应力软化现象也就越明显。而在 β 相区, 应变速率对流动应力软化现象的影响则不十分明显。在 $\alpha+\beta$ 两相区时, 密排六方的 α 相具有硬质颗粒的作用, 阻碍了

位错的运动, 导致了储存能的增加, 从而有利于各种软化机制的开动, 包括动态回复 (DRV) 和动态再结晶 (DRX) 等。而在 β 单相区变形时, α 相都转变为体心立方的 β 相。 β 相具有更多的滑移系和更高的扩散系数, 可能会抑制 DRX 的发生, 使得 DRV 成为其主要的变形机制。

(3) TC17 钛合金高温流变应力对应变速率和变形温度非常敏感。在相同温度条件下, 随着应变速率的增加, 流动应力显著增大; 在相同应变速率条件下, 流动应力随变形温度的升高而下降。TC17 钛合金进入稳态流动阶段所对应的变形程度对应变速率也较为敏感。当应变速率低于 0.01 s^{-1} 时, TC17 钛合金在应变较小的情况下就进入稳态流动阶段。

(4) 当温度为 1123, 1183 和 1223 K, 应变速率为 10 s^{-1} 时, TC17 钛合金的流动应力曲线达到应力峰值后急剧下降, 或出现了明显的应力不连续屈服现象。同时, 温度越高, 该现象也越发明显。类似的现象也在 Ti-10V-2Fe-3Al 合金^[13]、Ti-22Al-25Nb 合金^[14]、Ti-6Al-4V 合金^[15]以及 TC21 合金^[16]等的高温流变应力曲线上出现。其主要是因为材料的变形过程中, 大量可动位错受晶界阻碍而发生塞积。塞积的位错通过攀移等方式进入了晶界内部, 使得大量异号位错相互抵消, 减缓了位错塞积, 使得流动应力大幅下降,

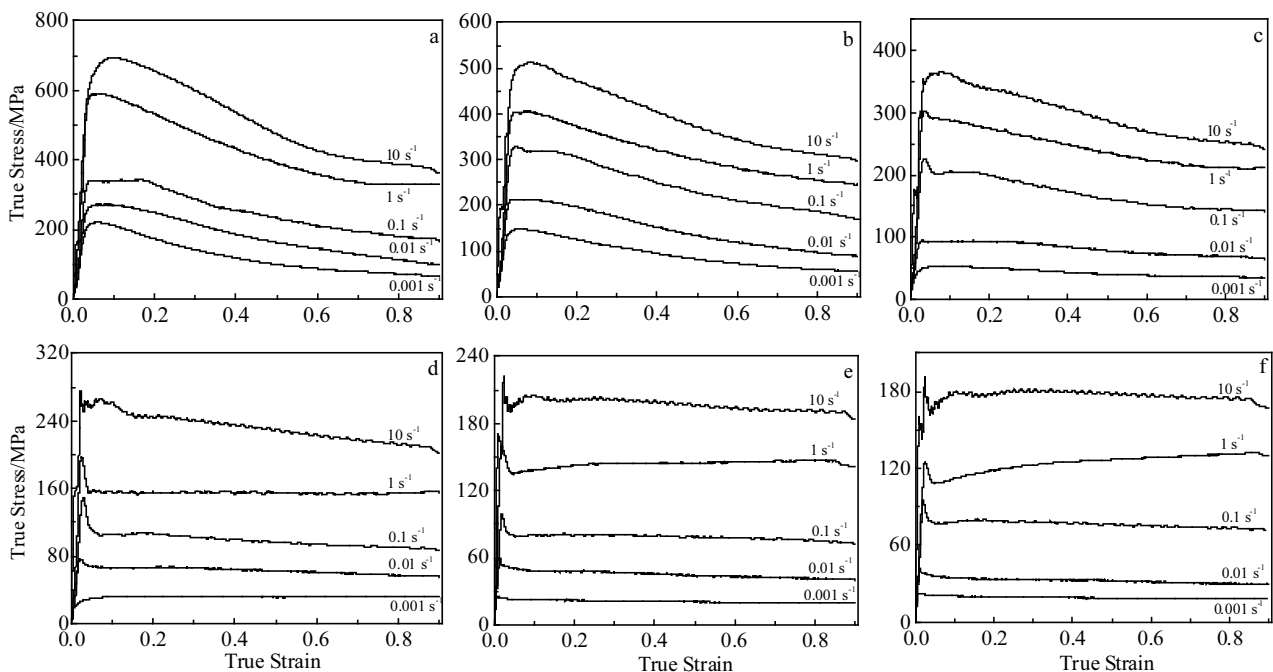


图 2 TC17 钛合金高温流变曲线

Fig.2 Flow stress curves of TC17 titanium alloy at the temperatures of 973 K (a), 1023 K (b), 1073 K (c), 1123 K (d), 1183 K (e), and 1223 K (f)

出现了不连续屈服现象^[15]。由于位错密度必须达到相应的临界值才能发生不连续屈服现象, 故高应变速率条件下易发生该现象。此外, 位错攀移需要扩散才能实现, 因而变形温度越高, 扩散也就越容易进行, 流动应力软化的程度也就越明显。

2.2 本构方程的建立

金属材料的热变形过程是一个热激活过程, 变形温度和应变速率对流动应力的影响可用 Arrhenius 方程表示:

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma)\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中, Q 为变形激活能, 其表达式为:

$$Q = \frac{R}{m} \frac{d(\ln \sigma)}{d(1/T)} \quad (2)$$

式中, R 为普适气体常数 ($8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), m 为应变速率敏感指数。

$$m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\epsilon}} \quad (3)$$

图 3 为根据方程(3)获得的线性拟合曲线。然后对不同应变速率条件下对 $\ln \sigma - 1/T$ 进行线性拟合, 获取其斜率, 然后按照方程(2)即可获得 TC17 钛合金的变形激活能。

图 4 为应变对 TC17 钛合金变形激活能的影响。可以看出, 应变对 Q 值有明显的影响。在 $\alpha+\beta$ 两相区和 β 单相区变形时, 激活能 Q 值均随着应变的增加而减小, 表明动态软化机制起主导作用, 与流动应力曲线相吻合。在变形的初期, 由于位错密度的增加, 导致了明显的加工硬化, 流动应力迅速增大, 因而需要较大的变形激活能。随着应变的增加, 变形储能能随之增加, 为各种软化机制的产生提供了条件, 因而抵消了部分加工硬化的作用, 导致流动应力逐步降低, 变形激活能逐步减小。当应变增加到一定程度后, 动

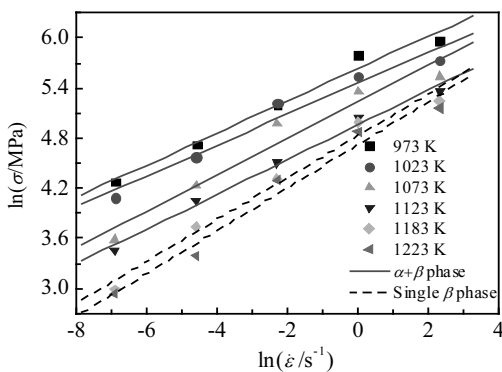


图 3 应变 0.8 条件下线性拟合 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$

Fig.3 Relationship between $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ at the stain of 0.8

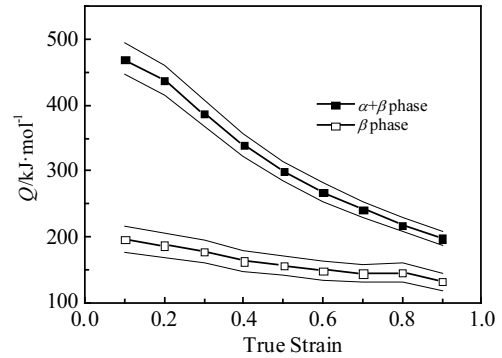


图 4 应变对 TC17 钛合金变形激活能的影响

Fig.4 Effect of strain on the values of Q for TC17 titanium alloy

态软化和加工硬化基本达到平衡, 变形激活能随应变的增加不再有显著的变化^[16]。同时, TC17 合金在 $\alpha+\beta$ 相区的平均变形激活能为 $317.94 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 而在 β 相区的平均变形激活能为 $161.39 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

将方程(1)两边取对数并整理得:

$$F(\sigma) = A + B \ln \dot{\epsilon} + \frac{C}{T} \quad (4)$$

式中, A 、 B 、 C 分别为相应材料参数。

由于累积塑性应变是决定金属材料微观组织演变的主要参数, 因此该流动应力模型考虑应变 ϵ 对流动应力的影响, 采用方程(8)进行表示:

$$\epsilon^m \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_1 \sigma^n \quad (5)$$

将上式取对数并进行整理可得:

$$\ln \sigma = \frac{1}{n} (\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT}) + \frac{m'}{n} \ln \epsilon - \frac{\ln A_1}{n} \quad (6)$$

引入 Zener-Hollomon 参数 (温度补偿应变速率参数) 来表征应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和变形温度 T 之间的关系, 其表达式为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

则方程(6)可以整理为

$$\ln \sigma = B_0 + B_1 \ln Z + B_2 \ln \epsilon \quad (7)$$

为了更为精确地描述 TC17 钛合金高温变形行为, 将方程(7)进行修正^[17]:

$$\ln \sigma = B_0 + B_1 \ln Z + B_2 (\ln Z)^2 + B_3 (\ln Z)^3 + B_4 \ln \epsilon \quad (8)$$

将热压缩试验结果带入式(8), 采用 SPSS 软件进行多元回归, 获得相应的材料参数, 如表 1 所示。

图 5 为所建立的流动应力模型的预测值与实验数据的对比结果。可以看出, 上述方法确定的流动应力曲线可以达到满意的拟合精度。

表 1 式(8)中 TC17 钛合金材料参数

Table 1 Constants of TC17 titanium alloy in Eq. (8)

Phase	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4
$\alpha+\beta$	-7.073	0.428	0	-6.667×10^{-5}	-0.242
β	-8.537	0.529	0	-1.075×10^{-4}	-0.031

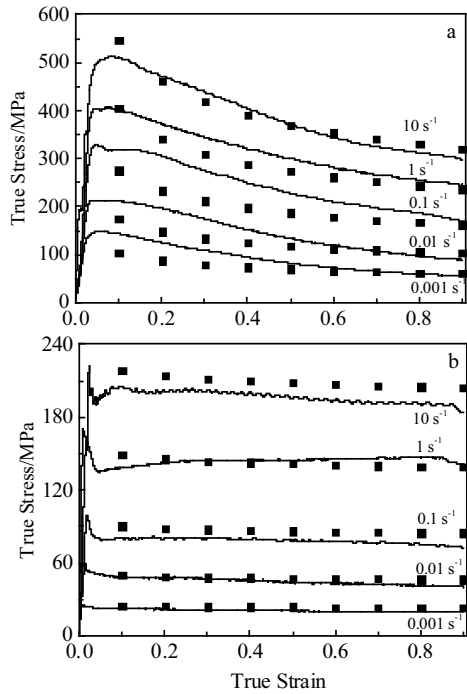


图 5 TC17 钛合金流动应力计算结果与试验数据对比

Fig.5 Comparison between the experimental and predicted data at the temperature of 1023 K (a) and 1183 K (b)

2.3 热加工图

依据耗散结构理论,金属材料变形时输入系统的能量 P 分为耗散量(G)以及耗散协量(J)两个部分:

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma + \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} = J + G \quad (9)$$

式中,耗散量 G 是金属产生塑性变形所消耗的能量,耗散协量 J 为塑性变形时材料组织演变所耗散的能量。则能量耗散率 η 值由式(10)来表示:

$$\eta = \frac{J}{J_{max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (10)$$

η 是一个无量纲的参数,反映了微观组织的变化机制。

Prasad^[18]等根据最大熵产生率原理,提出了材料发生不稳定流动时的流变失稳准则:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \log \frac{m}{m+1}}{\partial \log \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (11)$$

式中, ζ 为稳定性函数。它是变形温度和应变速率的函数, ζ 值为负的区域便是流变失稳的区域。采用三

次多项式拟合 $\ln \sigma$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$, 可以获得不同温度下和应变速率条件下的 η 和 ζ 。然后将能量耗散率 η 等值线图与稳定性函数 ζ 的等值线进行叠加,即可得到 TC17 钛合金的热加工图。图 6 为应变 0.9 时 TC17 钛合金的热加工图,其中虚线为相变点温度,阴影区域为根据式(11)确定的非稳定区域。从图中可以看出,在 1173 K 附近,等值线图出现了一定的转折现象,表明材料出现了相变。在低温时,TC17 钛合金热变形时非稳态区首先出现应变速率为 $0.341 \sim 1.092 \text{ s}^{-1}$ 的区域内。随着变形温度的升高,非稳态区的应变速率范围逐渐增大。当温度升至 1190 K 时,非稳态区发生在应变速率为 $0.227 \sim 2.171 \text{ s}^{-1}$ 的区域。然后非稳态区域应变速率逐步增大,处于高于 0.477 s^{-1} 的范围内(变形温度为 1105~1197 K)。随着变形温度的继续升高,非稳态区域应变速率范围降为 $0.347 \sim 1.599 \text{ s}^{-1}$ 。此外,从图中还可以看出,TC17 钛合金热压缩变形时低能量耗散率区域主要位于高应变速率区域和低温低应变速率区域,而较高能量耗散率的区域有两个:第 1 区是变形温度为 $1036 \sim 1102 \text{ K}$,应变速率为 $0.005 \sim 0.12 \text{ s}^{-1}$ ($\alpha+\beta$ 两相区);第 2 区变形温度范围为 $1187 \sim 1223 \text{ K}$,应变速率范围为 $0.01 \sim 0.22 \text{ s}^{-1}$ (β 单相区)。该两处为 TC17 钛合金合适的变形工艺参数范围。为了验证该加工图的准确,在非稳定区内取 3 个不同位置进行分析,即加工图中的位置 I (变形温度 1073 K,应变速率 1 s^{-1}),位置 II (变形温度 1123 K,应变速率 10 s^{-1}),位置 III (变形温度 1223 K,应变速率 1 s^{-1})。同时,在稳定性区域内选取位置 IV 进行对比分析,此时变形温度为 1123 K,应变速率为 0.001 s^{-1} 。

图 7 为对应图 6 中不同位置的微观组织照片。其中,图 7a 为位置 I 条件下的金相组织。从图中可以看出,在变形温度 1073 K,应变速率 1 s^{-1} 的条件下,TC17 钛合金热压缩变形后出现了一定的组织不均匀现象, α 相球化程度不高,有较多长条状的初生 α 相。图 7b

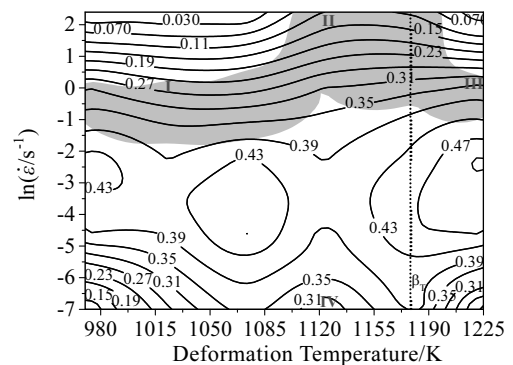


图 6 TC17 钛合金热加工图

Fig.6 Processing map of TC17 titanium alloy

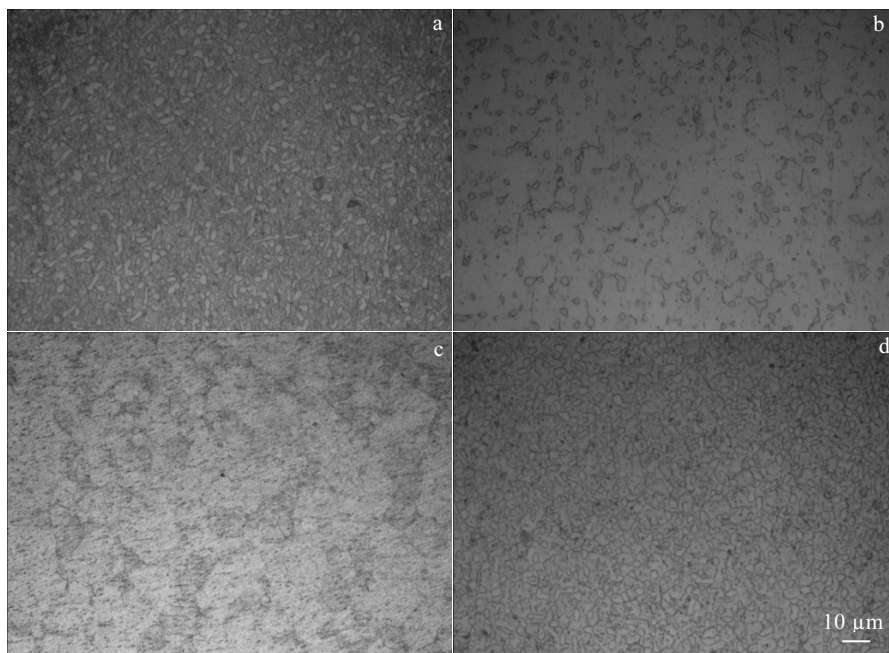


图7 不同变形参数下 TC17 钛合金对应图6中不同位置金相组织

Fig.7 Microstructures of TC17 titanium alloy deformed at Position I (a), Position II (b), Position III (c), and Position IV (d) in Fig.6

为位置 II 条件下的金相组织。可以看出, 绝大部分 α 相均已转变为 β 相。等轴状 α 相越多则有利于材料的流动, 而 α 相过少则不利于金属的流动^[19]。图 7c 为位置 III 条件下的微观组织。可以看到, 在该条件下变形后, TC17 钛合金完全转变成为 β 相组织, 且为粗大的晶粒。图 7d 为位置 IV 条件下的微观组织照片。晶粒呈现较为均匀的等轴 α 相, 可以看作稳定变形区域。

3 结 论

1) TC17 钛合金高温流变应力对变速率和变形温度非常敏感。在高温高应变速率条件下, TC17 钛合金高温流变应力曲线出现了不连续屈服现象。

2) 基于 TC17 钛合金热模拟压缩试验结果, 采用多元回归建立了 TC17 钛合金高温流动应力模型。通过计算值与试验结果对比表明: 该模型可以较为准确地描述 TC17 钛合金的高温流动行为。同时, 获得了 TC17 合金在 $\alpha+\beta$ 相区的平均变形激活能为 $317.94 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 在 β 相区的平均变形激活能为 $161.39 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

3) 建立了 TC17 钛合金的热加工图。微观组织分析表明, 建立的加工图能够准确的描述 TC17 钛合金高温变形时的稳定区域及非稳态区域。

- [1] Liu Q, Wang Y, Zheng H *et al.* *Materials Technology*[J], 2016, 31(2): 108
- [2] Tan L, Zhang D H, Yao C F *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2017, 26: 155
- [3] Yang Y, Zhang H, Qiao H C. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 722: 509
- [4] Tian Wei(田伟), Fu Yu(伏宇), Zhong Yan(钟燕) *et al.* *Transaction of Materials and Heat Treatment (材料热处理学报)*[J], 2016, 37(9): 57
- [5] Wang Bowei(王波伟), Tang Jun(唐军), Zeng Weidong(曾卫东) *et al.* *Forging & Stamping Technology(锻压技术)*[J], 2017, 42(6): 7
- [6] Li H Y, Wang X F, Wei D D *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 536: 216
- [7] Cai J, Lei Y, Wang K S *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2016, 25(5): 1952
- [8] Sajjadi S A, Chaichi A, Ezatpour H R *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2016, 25(4): 1269
- [9] LI J Q, Liu J, Cui Z S. *Rare Metals*[J], 2017, 36(1): 10
- [10] Guo L L, Yang S, Yang H *et al.* *Chinese Journal of Aeronautics* [J], 2015, 28(6): 1774
- [11] Balasundar I, Raghu T, Kashyap B P. *International Journal of Material Forming*[J], 2015, 8(1): 85

- [12] Zhang M J, Li F G, Wang S Y *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2010, 527(24-25): 6771
- [13] Robertson D G, McShane H B. *Materials Science and Technology*[J], 1997, 13(7): 575
- [14] Xu Bin(徐斌). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007: 21
- [15] Cai Jun(蔡军). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2011: 38
- [16] Gao J, Li M Q, Liu G J *et al.* *Rare Metals*[J], 2017, 36(2): 86
- [17] Li M Q, Pan H S, Lin Y Y *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 183(1): 71
- [18] Srinivasana N, Prasad Y V R K, Rao P R. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 476(1-2): 146
- [19] Cai J, Zhang X L, Wang K S *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2016, 25(11): 4750

High Temperature Deformation Behaviour of TC17 Titanium Alloy

Yang Xiaokang, Wang Kuaishe, Shi Jiamin, Cai Jun, Wang Meng, Wang Qingjuan, Liu Yingying, Wang Wen
(Xi'an University of Architecture and Technology, Shaanxi Engineering Research Center of Metallurgical,
Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to investigate the hot deformation behavior of TC17 titanium alloy, isothermal compression tests by a Gleeble 3500D simulator were carried out with a temperature range of 973~1223 K, a strain rate range of 0.001~10 s⁻¹ and strain of 0.9. The results indicate that the flow stress of the TC17 alloy at high temperature is sensitive to deformation temperature and strain rate. Meanwhile, a discontinuous yielding phenomenon is found at the strain rate of 10 s⁻¹ with temperature of 1123, 1183 and 1223 K. Based on multiple regression, a constitutive model was put forward to describe the role of the flow stress as the Zener-Holloman parameter. Thereafter, the processing map on the basis of dynamic materials model was established, and the validity of the developed processing map was verified by the microstructure analyses of compressed TC17 titanium alloy.

Key words: TC17 titanium alloy; high temperature deformation behavior; constitutive equation; processing map

Corresponding author: Cai Jun, Ph. D., Associate Professor, Shaanxi Engineering Research Center of Metallurgical, School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China, E-mail: caijun@xauat.edu.cn