

# TC27 钛合金的热变形行为及加工图

李雪飞, 沙爱学, 黄旭, 黄利军

(北京航空材料研究院 先进钛合金航空科技重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** 通过 Thermecmaster-Z 热模拟试验机, 对 TC27 钛合金在变形温度 900 ~ 1 150 °C 和应变速率 0.01 ~ 10 s<sup>-1</sup> 范围内进行等温恒应变速率热压缩实验, 压缩变形量为 50%。结果表明, 流变应力随应变的增加迅速增大, 达到峰值后随应变的增加而减小, 最后趋于相对稳定。流变应力随着温度的增加而减小, 随着应变速率的增加而增大。TC27 钛合金加工图有 2 个耗散效率峰值区, 一个是 900 °C/0.01 s<sup>-1</sup>, 此区域变形时出现动态回复; 另一个峰值区为 1 050 °C/0.01 s<sup>-1</sup>, 此区域变形时出现再结晶。

**关键词:** TC27 钛合金; 热压缩; 加工图; 再结晶

中图分类号: TG376.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2018)05-029-04

## Thermal Deformation Behavior and Processing Map of TC27 Titanium Alloy

Li Xuefei, Sha Aixue, Huang Xu, Huang Lijun

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advance Titanium Alloys,  
Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** The isothermal hot compression test of TC27 titanium alloy was carried out on a Thermecmaster-Z testing system in the temperature range of 900 °C to 1 150 °C and the strain rate range of 0.01 s<sup>-1</sup> to 10 s<sup>-1</sup>, the compress variation is 50%. The results show that the flow stress increases quickly with the augment of true strain and decreases after the flow stress reaching the maximum value. Finally, the flow stress tends to be relatively stable. The flow stress decreases with the increase of temperature and increases with the increase of strain rate. Processing map of TC27 titanium alloy exhibits two peak efficiencies of power dissipation, one is 900 °C/0.01 s<sup>-1</sup>, which dynamic recovery occurs, and the other is 1 050 °C/0.01 s<sup>-1</sup>, which dynamic recrystallization occurs.

**Key words:** TC27 titanium alloy; hot compression; processing map; recrystallization

## 0 引言

TC27 钛合金是一种性能优良的高强、高韧和高淬透性钛合金, 非常适合制造大型承力构件, 其综合性能与国外已获得批量应用的高性能 Ti55531 合金相当<sup>[1]</sup>。TC27 钛合金是 TC18 钛合金的改进型, 其合金成分中用 Nb 元素代替 Cr 元素, 使其具有更高的强度, 能够满足飞机结构设计中需要更高强度的结构部件的要求。与使用高强钢相比, 使用钛合金能够起到很好的减重效果<sup>[2]</sup>。优异的性能使 TC27

钛合金在航空航天、兵器、石油、化工和医疗等领域具有广阔的应用前景<sup>[3]</sup>。但 TC27 钛合金铸态组织晶粒粗大, 需通过一系列的热加工处理, 使其晶粒细化, 以提高综合使用性能。

热加工图是表征处理固有加工性好与坏的图形。借助热加工图可以缩短加工工艺的探索周期, 减小工作量, 节约成本。目前热加工图已在多种金属及其合金的热变形行研究中得到应用<sup>[4-8]</sup>。本研究以热压缩实验为基础, 研究变形温度和应变速率对 TC27 钛合金变形过程中流变应力的影响。基于动态材料模型理论建立加工图, 通过加工图与微观组织演变分析相结合的方法优化变形参数, 为该合金的热加工工艺优化提供理论依据。

收稿日期: 2018-04-11

通信作者: 李雪飞(1989—), 男, 工程师。

## 1 实验

实验材料为经 3 次真空自耗熔炼的 650 kg 级 TC27 钛合金铸锭, 名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-2Nb-1Fe, 低倍组织和高倍组织如图 1 所示。

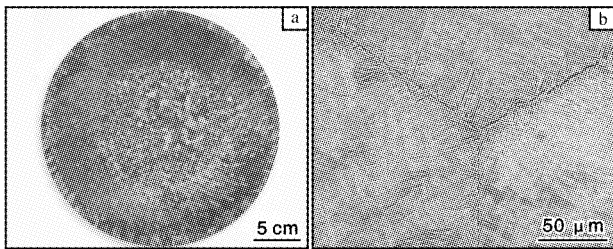


图 1 TC27 钛合金铸锭的低倍组织和显微组织

Fig. 1 Macrostructure(a) and microstructure(b) of TC27 titanium alloy ingot

用线切割方法在铸锭上切取  $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  的

热压缩试样。采用感应加热式 Thermecmaster-Z 型热/力模拟试验机进行热压缩实验。变形温度为 900、950、1 000、1 050、1 100、1 150  $^{\circ}\text{C}$ , 变形速率为 0.01、0.1、1、10  $\text{s}^{-1}$ , 热压缩变形量为 50%。热压缩试样以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的速度升温至变形温度, 保温 300 s。试样热压缩后进行水淬, 以保留高温变形组织。沿纵向中心线将试样剖开制备成金相试样, 腐蚀后采用金相显微镜观察其显微组织。金相腐蚀液成分为 10% HF + 20% HNO<sub>3</sub> + 70% H<sub>2</sub>O。

## 2 结果与讨论

### 2.1 应力-应变曲线

应力-应变曲线是在一定的变形速率和变形温度下应力对应变的变化规律, 它可以宏观的表征出材料内部显微组织的变化过程。TC27 钛合金的热压缩应力-应变曲线如图 2 所示。

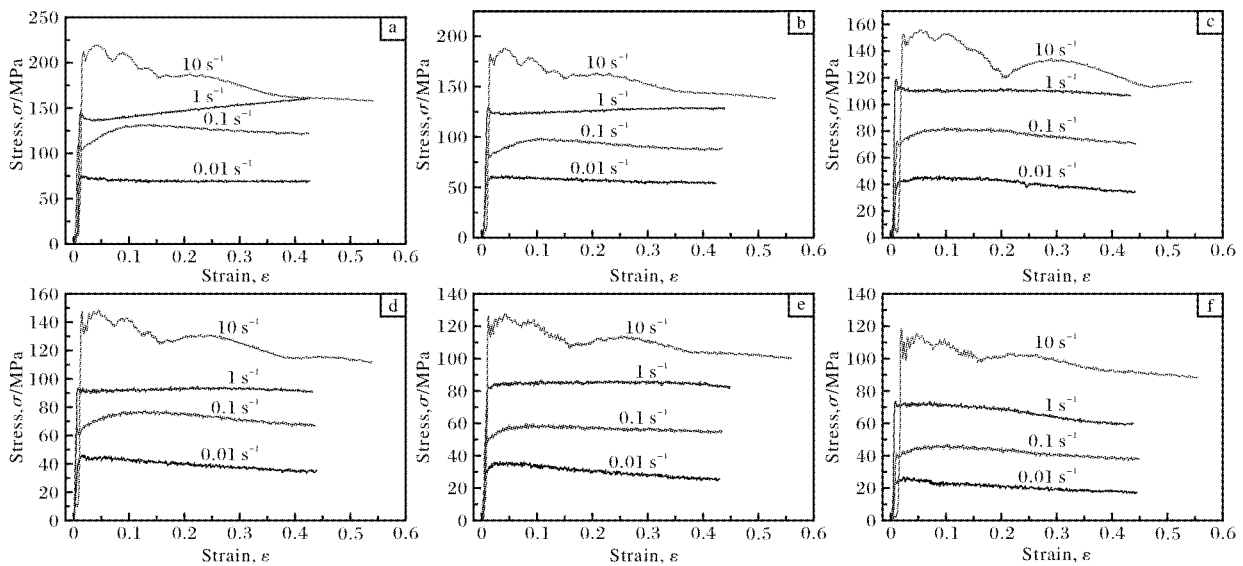


图 2 TC27 钛合金不同温度下的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of TC27 titanium alloy at different temperatures: (a) 900  $^{\circ}\text{C}$ ; (b) 950  $^{\circ}\text{C}$ ; (c) 1 000  $^{\circ}\text{C}$ ; (d) 1 050  $^{\circ}\text{C}$ ; (e) 1 100  $^{\circ}\text{C}$ ; (f) 1 150  $^{\circ}\text{C}$

从图 2 可以看出, 无论在何种温度、何种应变速率下, 热压缩变形初始阶段, 达到应力峰值前曲线的斜率很大, 几乎呈直线上升, 此阶段的应力随应变的增加迅速增大, 峰值应力所对应的应变很小。出现此特征的原因是在外加应力的作用下, 材料发生塑性变形, 内部产生了大量的可动位错, 可动位错受到塞积和缠结等障碍, 阻碍位错的继续运动, 材料产生加工硬化等现象。当变形达到一定程度时, 流变应力达到峰值。在峰值应力后的一段应变范围内, 流变应力随应变的增加会总体呈现下降趋势。

这是由于钛合金的热传导系数较低, 塑性变形产生的热量不能很快的传导到外界, 导致材料内部温度升高, 使钛合金材料的热激活作用增强, 原子动能增大, 原子间的结合力减弱, 从而降低材料的临近剪切力, 降低材料变形所需要的外力。另外, 钛合金塑性变形过程中动态再结晶也是导致动态软化的原因之一。而在变形速率 0.1  $\text{s}^{-1}$  条件下, 由于加工硬化效果强于动态软化效果, 变形抗力随应变的增加而增强。随着应变的继续增加, 流变应力趋于相

对稳定，这主要是由于加工硬化和动态软化共同作用达到平衡的结果。在变形过程中，TC27 钛合金的流变应力随着温度的增加而减小，随着应变速率的增加而增大。

### 2.2 加工图及其分析

加工图是以动态材料学模型为理论依据建立的，而动态材料学模型是基于大塑性变形的连续介质力学、物理系统模拟和不可逆热动力学等方面的基本原理建立的<sup>[9]</sup>。系统单位时间内输入到工件的总能量  $p$  主要消耗在 2 个方面，分别是耗散协量  $J$  和耗散量  $G$ 。耗散协量  $J$  是工件在热变形时发生诸如片状组织动态球化、动态再结晶、相变及动态回复等组织演化过程所耗散的能量；耗散量  $G$  代表工件发生塑性变形时所耗散的能量，其中只有小部分的能量以晶体缺陷的状态存储，绝大部分能量转化为热能<sup>[10]</sup>。数学表达式如下：

$$p = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (1)$$

式中， $p$  为系统耗散总能量； $\sigma$  为流变应力； $\dot{\epsilon}$  为应变速率。

耗散协量  $J$  和耗散量  $G$  的比例由加工件在一定温度和一定应力下的应变速率敏感指数  $m$  决定：

$$m = \frac{\partial J}{\partial G} = \frac{\epsilon \partial \sigma}{\sigma \partial \dot{\epsilon}} = \frac{\dot{\epsilon} \partial \sigma (\ln \sigma)}{\dot{\epsilon} \partial \sigma (\ln \dot{\epsilon})} \approx \frac{\partial (\log \sigma)}{\partial (\log \dot{\epsilon})} \quad (2)$$

$m$  值对理解能量分配和材料显微组织的演化有指导意义，现对其进行分析情况讨论：当  $m \leq 0$  时，系统没有发生能量耗散；当  $0 < m < 1$  时，对应于稳态流变；当  $m = 1$  时，原子扩散及位错运动消耗的能量都比较高，材料趋于粘流性状态；当  $m > 1$  时，材料可能会出现组织缺陷。

在一定的温度和应变下，应力  $\sigma$  与应变速率  $\dot{\epsilon}$  存在如下的关系式：

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (3)$$

耗散协量  $J$  的微分可表示为：

$$dJ = \dot{\epsilon} d\sigma \quad (4)$$

则  $J$  表示为：

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \frac{m}{m+1} \sigma \dot{\epsilon} \quad (5)$$

当  $m = 1$  时，材料处于理想线性耗散状态。耗散协量  $J$  达到最大值，即：

$$J_{\max} = \frac{\sigma \dot{\epsilon}}{2} \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)定义一个无量纲参数  $\eta$ ，即

功率耗散效率，数学表达式为：

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (7)$$

$\eta$  值随应变速率和变形温度构成功率耗散图，不同的功率耗散等值线围成不同的区域，不同区域与微观组织变形有直接的联系，在高耗散效率值区域内进行塑性加工，通常能获得较好的组织性能。

失稳图是根据不可逆热力学原理，用无量纲参数  $\xi(\dot{\epsilon})$  表示塑性大变形时连续失稳判据<sup>[11]</sup>

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln[m/(m+1)]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (8)$$

$\xi(\dot{\epsilon})$  随应变速率和变形温度构成失稳图，图中负数围成的区域为流变失稳区。

$\eta$  和  $\xi(\dot{\epsilon})$  的求解过程最关键的为  $m$  值，求解  $m$  值的方法如下。

在一定温度下，采用三次样条函数拟合  $\log \dot{\epsilon}$  和  $\log \sigma_p$ ，得到关系式(9)：

$$\log \sigma = a + b \log \dot{\epsilon} + c (\log \dot{\epsilon})^2 + d (\log \dot{\epsilon})^3 \quad (9)$$

式中，系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为一定温度下的常数，采用多项式拟合求得  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  的值。将式(9)代入式(2)可计算出应变速率敏感因子  $m$  的值：

$$m = \frac{\partial (\log \sigma)}{\partial (\log \dot{\epsilon})} = b + 2c \log \dot{\epsilon} + 3d (\log \dot{\epsilon})^2 \quad (10)$$

$\eta$  值随应变速率和变形温度构成的功率耗散图和  $\xi(\dot{\epsilon})$  随应变速率和变形温度构成的失稳图进行叠加，可得到 TC27 钛合金热加工图，如图 3 所示。从热加工图中可以直观的看出适合热变形的加工参数范围。图 3 中有 2 个耗散峰值区和 2 个失稳区。耗散峰值为 0.49，分别出现在  $900 \text{ }^\circ\text{C}/0.01 \text{ s}^{-1}$  和  $1050 \text{ }^\circ\text{C}/0.01 \text{ s}^{-1}$  区域。耗散效率值越大，表示变形过程中材料组织演变消耗的能量越多，再结晶越充分。失稳区分别出现在  $900 \text{ }^\circ\text{C}/0.1 \text{ s}^{-1}$  和  $1050 \text{ }^\circ\text{C}/0.1 \text{ s}^{-1}$  区域，材料变形时应尽量避免在此区域内进行。

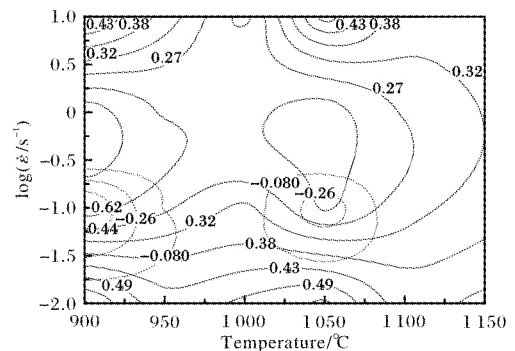


图 3 TC27 钛合金的加工图

### 2.3 微观组织分析

TC27 钛合金经  $900\text{ }^{\circ}\text{C}/0.01\text{ s}^{-1}$  和  $1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}/0.01\text{ s}^{-1}$  热压缩变形后的显微组织如图 4 所示。从图 4 可以看出, 经过  $900\text{ }^{\circ}\text{C}/0.01\text{ s}^{-1}$  变形后, 组织变为细小的片状组织, 分布杂乱无序, 只发生动态回复, 无再结晶组织出现。经过  $1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}/0.01\text{ s}^{-1}$  变形后, 片状组织完全消失, 发生了再结晶转变, 再结晶晶粒尺寸在  $5\sim 100\ \mu\text{m}$  之间。因此, 在变形温度  $1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率  $0.01\text{ s}^{-1}$  条件下, TC27 钛合金可得到性能优良的变形组织。

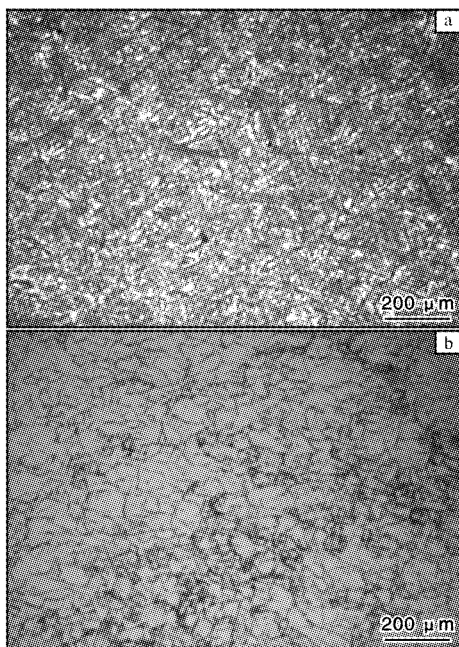


图 4 TC27 钛合金热压缩后的金相照片

Fig. 4 Metallographs of TC27 titanium alloy after hot compression; (a)  $900\text{ }^{\circ}\text{C}/0.01\text{ s}^{-1}$ ; (b)  $1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}/0.01\text{ s}^{-1}$

### 3 结 论

(1) 热变形过程中, TC27 钛合金的流变应力先随应变增加而迅速增大, 达到峰值后随应变的增加而减小, 最后趋于相对稳定。

(2) TC27 钛合金热加工图中存在 2 个耗散峰值区, 分别是  $900\text{ }^{\circ}\text{C}/0.01\text{ s}^{-1}$  和  $1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}/0.01\text{ s}^{-1}$  区域; 2 个失稳区分别出现在  $900\text{ }^{\circ}\text{C}/0.1\text{ s}^{-1}$  和  $1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}/0.1\text{ s}^{-1}$  区域, 热变形时应避免在失稳区进行, 以免热变

形时材料开裂。

(3) TC27 钛合金在  $1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}/0.01\text{ s}^{-1}$  区域变形时, 组织发生再结晶, 晶粒细化, 能获得性能优良的变形组织。

### 参考文献

- [1] 黄旭, 朱知寿, 王红红. 先进航空钛合金材料与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [2] 钟元. 一代材料 一代飞机——曹春晓院士从材料进化史看中国大飞机项目 [J]. 航空制造技术, 2008(1): 36-39.
- [3] Sengal V M, Reznikov V I, Drobyshvskii A E, et al. Plastic working of metals by simple shear [J]. Russian Metallurgy, 1981(1): 99-105.
- [4] Prasad Y V R K, Rao K P. Processing maps for hot deformation of rolled AZ31 magnesium alloy plate: anisotropy of hot workability [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 487(1/2): 316-327.
- [5] 马蕊侠, 王艺超, 罗伟. 工业纯钛热加工图的建立和板材热轧工艺路线的优化 [J]. 钛工业进展, 2016, 33(2): 29-32.
- [6] 张永强, 郭鸿镇, 雷文光, 等. TC18 钛合金热加工图构建、分析及有效性验证 [J]. 钛工业进展, 2015, 32(2): 17-22.
- [7] 孙花梅, 戚运莲, 刘伟, 等. 应变对  $\beta$ -CEZ 钛合金热加工图的影响研究 [J]. 钛工业进展, 2016, 33(3): 24-29.
- [8] Prasad Y V R K, Sechacharyulu T. Modelling of hot deformation for microstructural control [J]. International Materials Reviews, 1998, 43(6): 243-258.
- [9] Prasad Y V R K, Gegel H L, Doraivelu S M, et al. Modeling of dynamic materials behavior in hot deformation: forging of Ti-6242 [J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15(10): 1883-1892.
- [10] Prasad Y V R K, Rao K P, Sasidhara S. Hot Working Guide: A Compendium of Processing Map [M]. Ohio: ASM International, 1997.
- [11] Balasubrahmanyam V V, Prasad Y V R K. Deformation behaviour of beta titanium alloy Ti-10V-4.5Fe-1.5Al in hot upset forging [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 336(1/2): 150-158.