

# TC27 钛合金高温热压缩变形行为

李雪飞, 黄旭, 黄利军, 沙爱学

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 在 Thermecmator-Z 试验机上进行热压缩实验, 在应变速率  $0.01\sim 10\text{ s}^{-1}$ 、变形温度  $900\sim 1150\text{ }^\circ\text{C}$  条件下对 TC27 钛合金的变形行为进行研究并建立其本构方程。结果表明, 该材料为温度和应变速率敏感材料。在变形初始阶段, 流变应力随真应变的增加迅速增大, 达到应力峰值后随真应变的增加缓慢降低, 最后趋于相对稳定的状态。流变应力随温度的升高而降低, 随应变速率的增加而增加。热压缩实验过程流变应力随应变速率和变形温度的变化规律可以用材料的本构方程来表征, 变形激活能为  $Q=300\text{ kJ/mol}$ 。

**关键词:** 钛合金; 等温压缩; 流变应力; 本构方程

中图分类号: TG376.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)03-0793-05

随着科技的不断发展, 对钛合金在航空航天领域的应用提出了更高的要求。为了满足我国新型飞机的高减重、长寿命和耐腐蚀的设计目标, 钛合金材料逐渐取代了飞机上的部分传统材料<sup>[1]</sup>。TC27 钛合金是 TC18 钛合金的改进型, 与美、俄联合研制的 Ti-5553/Ti-55531 合金性能相当。该合金作为高强高韧变形钛合金, 目标用途为飞行器主承力结构, 其变形特性与产品性能密切相关。

钛合金的组织 and 性能对变形条件十分敏感。在高温条件下, 钛合金的流变应力不仅与内部组织有关, 还与变形参数有关。如变形量、应变速率和变形温度等变形参数, 对材料的流变应力具有很大影响。本研究对铸态的 TC27 钛合金进行热压缩实验, 研究高温压缩条件下的应力-应变曲线特征, 建立本构方程表征流变应力随变形温度和应变速率的变化关系。以期对以后 TC27 钛合金的工程应用具有指导意义。

## 1 实验

本实验所用 TC27 合金的名义成分 Ti-5Al-5Mo-5V-2Nb-1Fe。合金铸锭采用真空自耗炉熔炼, 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, 试样表面进行打磨, 达到所需的表面精度。热压缩实验采用的仪器为日本生产的感应加热式 Thermecmator-Z 型热/力模拟试验机。变形温度为  $900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150\text{ }^\circ\text{C}$ ; 变形速率为  $0.01, 0.1, 1, 10\text{ s}^{-1}$ ; 压缩变形量为 50%。

## 2 实验结果

### 2.1 真应力-真应变曲线

温度在  $900\sim 1150\text{ }^\circ\text{C}$  范围内, 应变速率在  $0.01, 0.1, 1, 10\text{ s}^{-1}$  条件下真应力-真应变曲线如图 1 所示。当材料的塑性变形达到一定程度时, 应力达到峰值, 在应力峰值后的一段应变范围内应力随应变的增加会出现缓慢下降的趋势, 最后应力趋于稳定。

真应力-真应变曲线是在一定的变形量和变形温度下应力对应变速率的变化规律。根据应力-应变曲线的变化特征, 可以宏观的表征出材料内部显微组织的变化过程。从图 1 可以看出, 在一定温度不同应变速率条件下, 材料热变形初期, 随应变的增加应力迅速增大到峰值, 此阶段的真应力-真应变曲线斜率很大, 峰值应力所对应的应变很小。外加应力的作用下, 材料内部产生了大量的位错, 位错运动时会产生位错塞积、位错割阶和缠结等障碍, 阻碍位错的运动, 使材料产生加工硬化现象, 增强了材料的变形抗力。要使材料继续变形就必须增大外力, 使受阻的位错继续移动。钛合金的导热系数比较低, 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。应变增加, 温度升高, 降低材料的临界切应力, 使加工硬化减弱<sup>[2]</sup>。由于原子的热运动加剧, 能量起伏比较大, 位错运动加剧, 动态回复和动态再结晶出现, 抵消一部分加工硬化作用, 使流变应力降低。随着应变继续增加, 流变应力趋向于一种相对稳定的状态,

收稿日期: 2015-03-20

作者简介: 李雪飞, 男, 1989 年生, 硕士, 北京航空材料研究院, 北京 100095, 电话: 010-62496768, E-mail: lixuefeiavic@163.com

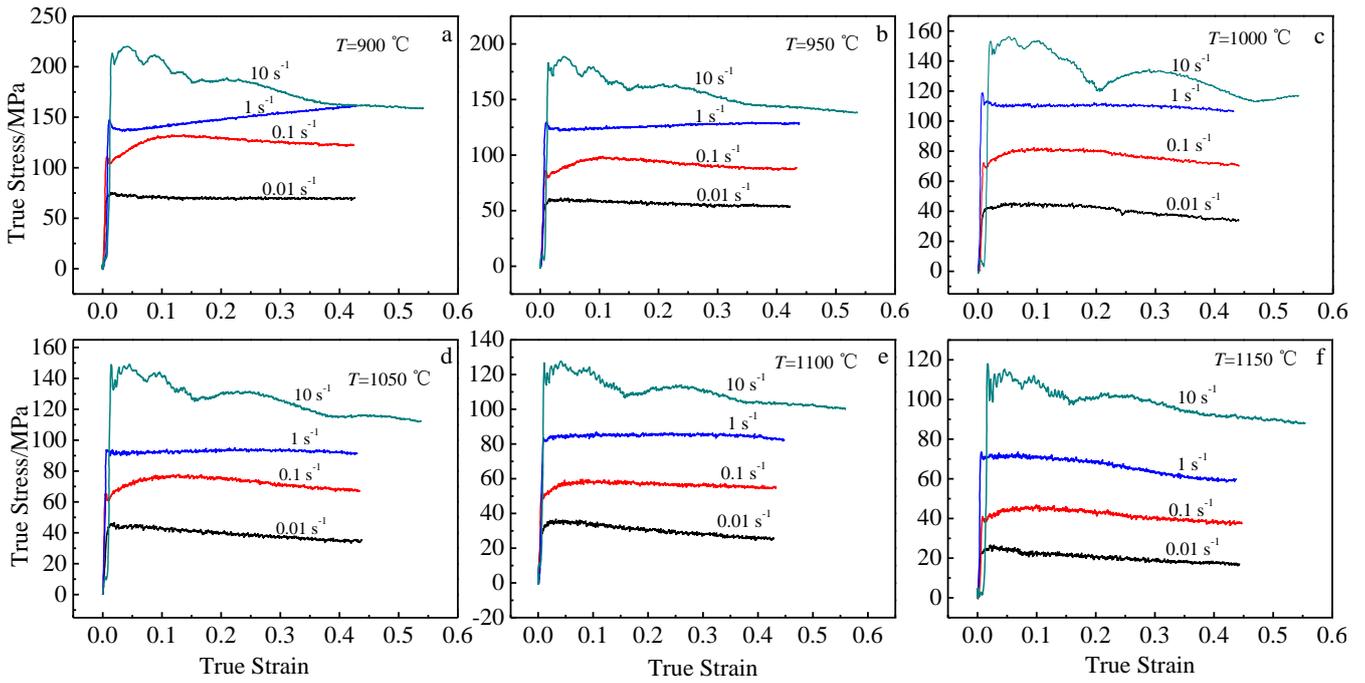


图 1 TC27 钛合金不同温度下的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of TC27 titanium alloy at different temperatures

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<sup>[3]</sup>。此时，合金变形的实质为位错增殖和位错消失达到动态平衡。当应变速率为  $10\text{ s}^{-1}$  时，应力-应变曲线出现上下屈服的现象，具有明显的屈服点，应力曲线的上下波动与位错的钉扎和脱钉有关。

图 2 为温度和应变速率对应力的影响。在应变速率一定的条件下，应力随温度的增加而降低。如图 2 所示，温度升高，原子的热运动增强，原子间的结合力减弱，使材料发生塑性变形所需的临界切应力降低。

### 2.2 材料本构方程的建立

通过对 TC27 钛合金等温压缩试验的应力-应变曲线分析，可知应变速率、变形温度和流变应力之间有

一定的内在联系，Zener 和 Hollomon 建立了钢在拉伸实验中的应力-应变关系<sup>[4]</sup>。

由 Sellars 和 Tegart<sup>[5,6]</sup>提出的一种包含  $Q$  和  $T$  的双曲正弦形式修正的 Arrhenius 关系，众多的研究结果<sup>[7,8]</sup>表明它能较好的描述合金常规的热变形行为。

$$\dot{\epsilon} = A_1 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中： $\dot{\epsilon}$  为应变速率； $\sigma$  为高温流变应力； $T$  为变形温度； $R$  为摩尔气体常数； $Q$  为热变形激活能。 $A_1$  为结构因子； $\alpha$  为应力水平参数； $n$  为应力指数，均为与温度无关的常数。

在低应力水平 ( $\alpha\sigma < 0.8$ ) 条件下<sup>[9-11]</sup>，由于  $\alpha\sigma$  较小，近似可以得到低应力水平时的关系式<sup>[12]</sup>：

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

在高应力水平 ( $\alpha\sigma > 1.2$ ) 条件下，则为

$$\dot{\epsilon} = A \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

式中， $B=A_1\alpha^n$ ， $A=A_1/2^n$ ， $\beta=n\alpha$ ，且  $A_1$ ， $B$ ， $A$ ， $n$ ， $\alpha$ ， $\beta$  为与温度无关的常数； $\sigma$  是稳态应力，由于稳态应力受测量精度的影响较大，故在本工作中采用应力-应变曲线的第 1 个峰的峰值应力  $\sigma_p$ 。

对式(2)和式(3)两边取对数可得：

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln B + n \ln \sigma - Q/RT \quad (4)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + \beta\sigma - Q/RT \quad (5)$$

式中， $n$  和  $\beta$  分别是  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma_p$ ， $\ln \dot{\epsilon} - \sigma_p$  曲线的斜率。根据等温压缩试验真应力-真应变曲线的峰值应力，采

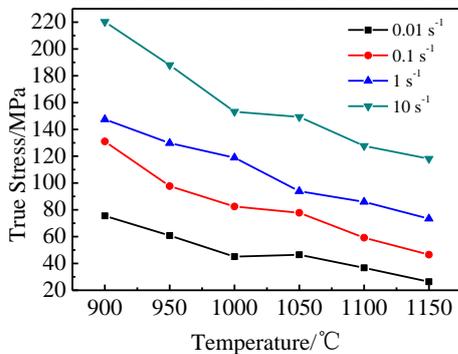


图 2 温度和应变速率对应力的影响

Fig.2 Effect of temperature and strain rate on stress

用最小二乘法线性回归, 得到  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma_p$  和  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma_p$  的关系。

由图 3 得到  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma_p$  的斜率,  $n$  值选取斜率的平均值,  $n=5.758$ 。取  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma_p$  斜率的平均值,  $\beta=0.063853$ , 因此,  $\alpha=\beta/n=0.011$ 。所选取的峰值应力中最大值  $\sigma_p=220.26$  MPa, 则  $\alpha\sigma=0.011 \times 220.26=2.42$ ,  $\alpha\sigma=2.42>1.2$ , 等温压缩试验过程中的流变应力模型与高应力水平流变应力模型相符, 即流变应力方程为  $\dot{\epsilon} = A \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT)$ 。

当应变速率一定时, 假定热变形激活能  $Q$  与温度无关, 对式(5)两边取  $1/T$  的偏微分得:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} = \frac{Q}{R\beta} \quad (6)$$

采用一元线性回归法绘制  $\sigma-1/T$  关系图。

如图 4 所示, 取直线斜率的平均值, 得到  $\frac{Q}{R\beta} = 565.1167 \times 103$  (除去偏离斜率平均数最大的斜率), 由于  $\beta=0.063853$ ,  $R=8.314$  J/(mol k), 则应变激活能  $Q=300$  kJ/mol。把  $Q$  值带入式  $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$  得到不同条件下的  $Z$  值,  $\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + Q/RT$ , 绘制  $\ln Z - \sigma$  关系图, 如图 5 所示。

$$\ln Z = \ln A + \beta\sigma \quad (7)$$

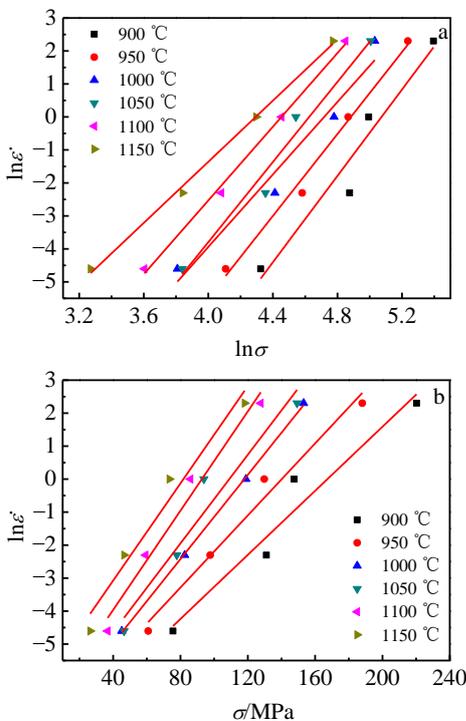


图3 不同温度下应变速率与流变应力的关系  
Fig.3 Relationships between flow stress and strain rate at different temperatures: (a)  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  and (b)  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$

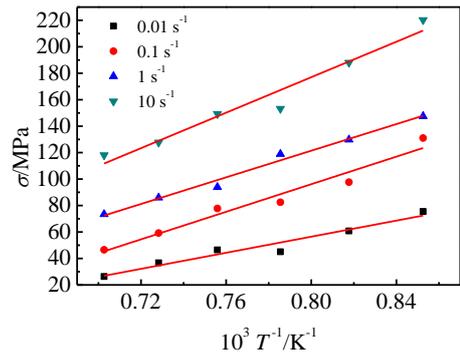


图4 TC27 钛合金热压缩变形的  $\sigma-1/T$  关系图  
Fig.4 Relationship between peak stress  $\sigma$  and  $1/T$  of TC27 titanium alloy

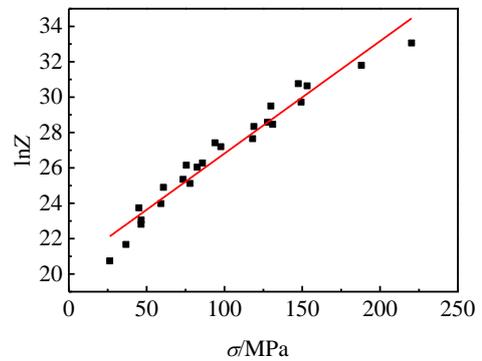


图5 TC27 钛合金热压缩变形中的  $\ln Z - \sigma$  的线性关系  
Fig.5 Liner relationship between  $\ln Z$  and peak stress  $\sigma$  of TC27 titanium alloy

由图 5 可以看出, 流变应力  $\sigma$  与  $\ln Z$  满足线性关系, 且与实验数据吻合较好, 由此得到  $\ln Z - \sigma$  的斜率, 及  $\beta=0.06$ , 与线性回归得到的  $\beta=0.063853$  非常接近, 表明热压缩的流变应力与应变速率、变形温度之间的关系较好地满足式(5)。取图中对所有数据的拟合曲线在纵坐标上的数值, 得  $\ln A=20.4$ , 代入式(7)得到  $\ln Z=20.4+0.063853\sigma$ 。

将  $A, \beta, Q$  材料参数代入式(5), 这里取  $\beta=0.063853$ , 得到热压缩的流变应力方程:

$$\ln \dot{\epsilon} = 20.4 + 0.063853\sigma - \left(\frac{3 \times 10^5}{8.314T}\right) \quad (8)$$

也可以表示为

$$\dot{\epsilon} = 7.24 \times 10^8 \exp\left(0.063853\sigma - \left(\frac{3 \times 10^5}{8.314T}\right)\right) \quad (9)$$

从上述方程可知, TC27 钛合金高温变形时流变应力主要受变形温度和应变速率的影响。

### 3 分析与讨论

由应力-应变曲线可知,热压缩过程中应变速率越高,流变应力越大,温度越高,流变应力反而越低。当应变速率为  $10\text{ s}^{-1}$  时,应力-应变曲线呈先上升后下降的趋势,表现为动态再结晶的曲线特征。但是由于变形速率快,位错运动的间隔时间短,位错没有足够的时间进行移动,不利于动态再结晶的发生,此时,动态回复占据主要作用<sup>[13]</sup>。当应变速率为  $0.01\sim 1\text{ s}^{-1}$  时,产生的位错有足够的时间进行移动,位错增殖和消失达到平衡,应力-应变曲线近乎保持恒定值,由于位错间的交互作用,形成亚晶界,进而成为动态再结晶晶粒。

图 6 为 TC27 钛合金铸态下的原始组织,可见铸态下的原始组织呈层片状。

图 7 为热压缩后的显微组织照片,应变速率为  $0.01\text{ s}^{-1}$  时的显微组织如图 7a 所示。原始的片层组织被动态再结晶后的晶粒所取代,晶粒尺寸在  $1\sim 20\text{ }\mu\text{m}$  之

间,晶粒为多边形状的等轴组织。应变速率为  $10\text{ s}^{-1}$  时的显微组织如图 7b 所示,变形组织没有出现动态再结晶,由应力-应变曲线先上升后下降可知,动态回复占据了主要作用。

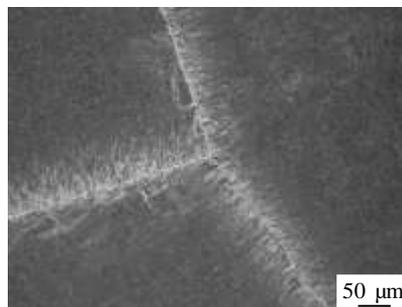


图 6 TC27 钛合金热压缩变形前的原始组织

Fig.6 Original microstructure of TC27 titanium alloy before hot compression deformation

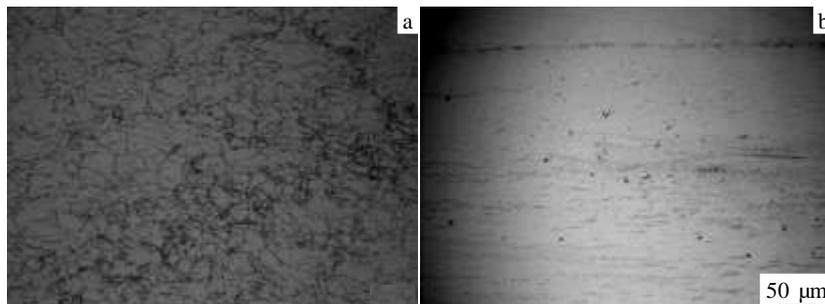


图 7  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  下 TC27 钛合金在应变速率为  $0.01$  和  $10\text{ s}^{-1}$  时热压缩后的显微组织

Fig.7 Microstructure of TC27 titanium alloy after  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  hot compression deformation at the strain rate  $0.01\text{ s}^{-1}$  (a) and  $10\text{ s}^{-1}$  (b)

## 4 结 论

1) 材料变形初期,由于材料加工硬化的作用,应力-应变曲线先呈现上升趋势,达到应力峰值后应力-应变曲线缓慢下降,最后趋于一种相对稳定的状态。在高应变速率的条件下应力-应变曲线呈现不连续屈服的现象。

2) 热变形参数(变形量、变形温度和应变速率)对材料的流变应力影响很大。流变应力随着变形温度的升高而降低,随着应变速率的升高而升高。

3) 材料热变形时流变应力随应变速率和变形温度的变化规律可以用材料的本构方程来表征,TC27 钛合金在高温条件下的本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 7.24 \times 10^8 \exp\left(0.063853\sigma - \left(\frac{3 \times 10^5}{8.314T}\right)\right)$$

4) 低应变速率下,位错有足够的时间进行移动,形成大量的位错网络,利于动态再结晶的形成;高应

变速率下,动态回复机制起到主要的软化作用。

## 参考文献 References

[1] Huang Xu(黄旭), Zhu Zhishou(朱知寿), Wang Honghong(王红红). *Advanced Aeronautical Titanium Alloys and Applications*(先进航空钛合金材料与应用)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 5

[2] Qu Yinhu(曲银化), Sun Jianke(孙建科), Meng Xiangjun(孟祥军). *Development and Application of Materials*(材料开发与应用)[J], 2006, 21(2): 24

[3] Wang Kelu(王克鲁), Lu Shiqiang(鲁世强), Li Xin(李鑫) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2009, 38(8): 13

[4] Zener C, Hollom J H. *Journal of Applied Physics*[J], 1944, 15(1): 22

[5] Shen Jian(沈健). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报)[J], 2001, 11(4): 593

[6] Sellars C M, Tegart W J M. *Acta Metallurgica*[J], 1996, 14(9):

- 1136
- [7] McQueen H J, Yue S, Ryan N D *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1995, 53(1-2): 293
- [8] McQueen H J, Fry E, Belling J. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1995, 53(1-2): 293
- [9] Jonas J J, Sellars C M, Mcg W J. *Tegart Int Metall Reviews*[J], 1969, 130(14): 1
- [10] Sheppard T, Parson N C, Zaidi M A. *Met Sci*[J], 1983, 17(10): 481
- [11] Lin Qiquan(林启权), Zhang Hui(张辉), Peng Dashu(彭大署). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2002, 31(3): 3
- [12] Jiang Shunong(蒋树农), Liu Chuming(刘楚明), Li Huizhong(李慧中). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2004, 33(9): 17
- [13] Mao Baiping(毛柏平), Guo Shengli(郭胜利), Shen Jian(沈健). *Chinese Journal of Rare Materials*(稀有金属)[J], 2008, 32(5): 674

## Deformation Behavior of Hot Compression for TC27 Titanium Alloy

Li Xuefei, Huang Xu, Huang Lijun, Sha Aixue

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** The deformation behavior of TC27 titanium alloy at the strain rate of  $0.01\sim 10\text{ s}^{-1}$  and the temperature of  $900\sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$  was investigated and the constitutive equation during the hot compression was established in the machine of Thermecmastor-Z. The results indicate that the material is sensitive to temperature and strain rate. At the beginning of deformation, the flow stress increases quickly with the augment of true strain and decreases slowly when stress reaches to the maximum value; finally, it becomes stable. Besides, the flow stress decreases with the increase of temperature and increases with the increase of strain rate. The change of flow stress with strain rate and temperature can be described by the constitutive equation during hot compression processing. The active energy of deformation is  $300\text{ kJ/mol}$

**Key words:** titanium alloy; isothermal compression; flow stress; constitutive equation

---

Corresponding author: Li Xuefei, Master, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, P. R. China, Tel: 0086-10-62496768, E-mail: lixuefeiavic@163.com