文章编号:1004-0609(2010)S1-s0377-04

# 铸态 TB6 钛合金热变形行为及本构关系

雷力明,黄旭,黄利军,曹春晓

(北京航空材料研究院,北京 100095)

摘 要:通过等温恒应变速率压缩实验研究铸态 TB6 钛合金在温度为 800~1 100 ,应变速率为 10<sup>-3</sup>~1 s<sup>-1</sup> 条件 下的热变形行为。结果表明:应变速率对铸态 TB6 合金流变应力的影响最显著,其次是变形温度,而应变的影响 作用最小。在低温高应变速率下,流变应力曲线呈连续软化特征,而在高温低应变速率下,流变应力曲线呈稳态 流变特征。铸态 TB6 合金的热变形激活能为 200 kJ/mol,接近纯钛β相的自扩散激活能,表明在实验条件范围内 主要发生动态回复过程。在 Arrhenius 方程基础上考虑了应变对流变应力曲线的影响,建立了能准确描述铸态 TB6 钛合金流变应力曲线的双曲正弦本构关系。

关键词:铸态 TB6 钛合金;热变形;本构关系 中图分类号:TG146.2;TG139 文献标志码:A

# Hot deformation behavior and constitutive relationship of as-cast TB6 alloy

LEI Li-ming, HUANG Xu, HUANG Li-jun, CAO Chun-xiao

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

**Abstract:** The hot deformation behavior of as-cast TB6 alloy was investigated by isothermal constant strain rate compression test at temperatures of 800–1 100 and strain rates of  $10^{-3}$ –1 s<sup>-1</sup>. The results show that the flow stress of as-cast TB6 alloy is greatly affected by strain rate, followed by temperature and the effect of strain is the weakest. The flow stress curves display continuous softening characteristics at low temperatures and high strain rates, while display steady flow characteristics at high temperatures and low strain rates. The activation energy is determined to be 200 kJ/mol which is close to that of self-diffusion of  $\beta$  phase in pure titanium, and it shows that the dynamic recovery takes place dominantly during hot deformation. Considering the effect of strain, an improved hyperbolic sine constitutive relationship is established based on the Arrhenius equation that can accurately describe the flow stress of as-cast TB6 alloy; hot deformation; constitutive relationship

TB6 合金是一种亚稳态β钛合金,它具有断裂韧性 高、淬透性好、加工窗口宽等一系列优点,已被广泛 用于制造桨毂、起落架等大型飞机结构件<sup>[1-2]</sup>。研究 TB6 合金的热变形行为对于确立合适的锻造工艺参数 具有指导意义,虽然国内外已经有一些文献对此进行 了相关研究<sup>[3-7]</sup>,但都是针对锻态 TB6 合金的变形, 所建立的本构关系无法应用于合金铸锭的开坯工艺研究。本文作者通过等温恒应变速率压缩实验研究铸态 TB6 合金的热变形行为,在 Arrhenius 方程基础上考虑 应变对流变应力的影响作用,建立能准确描述铸态 TB6 合金流变应力曲线的本构关系,为进行 TB6 合金 开坯锻造过程的数值模拟提供了材料模型。

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目资助(2007CB613803)

通信作者: 雷力明, 博士, 高级工程师; 电话: 010-62496627; E-mail: liming.lei@biam.ac.cn

### 1 实验

实验材料取自于 TB6 钛合金工业级铸锭,其相变 点为 798 。压缩试样尺寸为 d8 mm×12 mm,在 Gleeble3500 热模拟试验机上进行等温恒应变速率压 缩实验,实验温度分别为 800、900、1 000 和 1 100 , 应变速率分别为 10<sup>-3</sup>、10<sup>-2</sup>、10<sup>-1</sup>和 1 s<sup>-1</sup>,压缩变形 量为 50%(真应变约 0.69)。将试样加热至实验温度后 保温 120 s,压缩过程中在试样两端面垫有石墨润滑片 以减少摩擦阻力的影响,压缩结束后立即水淬试样以 保留热变形组织。

## 2 结果与讨论

2.1 热变形参数对铸态 TB6 合金流变应力曲线的影响 压缩实验获得的铸态 TB6 合金的流变应力曲线如

图1所示(图中连续线)。从图1可以看到,在初始微 应变阶段,由于加工硬化作用占主导地位,流变应力 随应变增加而迅速上升;随着应变继续增加,动态回 复和再结晶软化作用增强,流变应力增加速度趋缓, 当加工硬化与动态软化二者平衡时应力达到峰值;流 变应力在峰值后随应变增加而连续降低,最终趋向稳 态流变,表明动态软化作用在这一阶段占主导地位。 比较可以看出,合金的流变应力随应变速率增加而显 著增加,随变形温度增加而降低。低温高应变速率的 流变应力曲线呈连续软化特征,直到压缩真应变最大 时仍未进入稳态阶段,而高温低应变速率的流变应力 曲线在峰值后经过较短的软化过程就基本进入了稳态 流变阶段。为了更直观地反映温度、应变速率和应变 对流变应力的影响显著性,对实验数据进行了极差分 析,得到应变速率的极差 R;=106.1 MPa,温度的极差 R<sub>T</sub>=83.8 MPa,应变的极差 R<sub>s</sub>=27.1 MPa。这表明应变 速率对流变应力的影响最显著,其次是变形温度,而 应变的影响作用最小。



图 1 铸态 TB6 合金热压缩变形的流变应力曲线

Fig.1 Flow stress curves of as-cast TB6 alloy during hot compression deformation: (a) 800 ; (b) 900 ; (c) 1 000 ; (d) 1 100

2.2 本构关系确立

金属材料的高温塑性变形过程主要受热激活过程 控制,SELLARS和TEGART在Arrhenius方程基础上 提出了流变应力、应变速率和温度之间的双曲正弦通 用本构关系式<sup>[8]</sup>:

$$\dot{\varepsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \tag{1}$$

当流变应力较低时( $\alpha\sigma < 0.8$ ),式(1)简化为幂函 数关系式<sup>[9-10]</sup>:

$$\dot{\varepsilon} = A'\sigma^n \exp[-Q/(RT)] \tag{2}$$

当流变应力较高时( $\alpha\sigma > 1.2$ ),式(1)简化为指数 函数关系式<sup>[9–10]</sup>:

$$\dot{\varepsilon} = A'' \exp(\beta \sigma) \exp[-Q/(RT)]$$
(3)

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, $\sigma$ 为流变应力,Q为变形激活能,T为绝对温度,R为气体常数,n、n'为应力指数, $\alpha$ 和 $\beta$ 为应力调整因子,A、A'、A''为常数。

由式(1)~(3)可推导出下列关系式:

$$\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} = \frac{1}{n'} \tag{4}$$

 $\frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} = \frac{1}{n}$ (5)

$$\frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial(1/T)} = \frac{Q}{nR}$$
(6)

根据上述几种线性关系式可以分别计算出  $n, \alpha$ , O等本构参数。需要注意的是,上述公式中的 $\sigma$ 为一 定应变下的流变应力,由于铸态 TB6 合金的流变应力 曲线随应变连续变化,因而建立本构关系时需要考虑 应变的影响。这里以 $\varepsilon = 0.5$ 的流变应力为例说明确定 各参数的过程。图 2 所示为流变应力  $\sigma$  与应变速率  $\dot{\epsilon}$ 的关系。从图 2(a)可看到 ,  $\ln \sigma 与 \ln \dot{c}$  呈近似线性关 系,各拟合直线的斜率为1/n',也即为应变速率敏感 因子 m<sup>[11]</sup>, 流变应力随应变速率增加而显著增加, 温 度越高时 m 值越大,应力增幅也越快。如图 2(b)所示, 应力调整因子  $\alpha$  的作用是调整 ln[sinh( $\alpha\sigma$ )] — ln  $\dot{\varepsilon}$  呈 平行线性关系<sup>[9]</sup>, 采用方差分析方法求得 α =0.020 8 MPa<sup>-1</sup>,图中各拟合直线斜率平均值的倒数为应力指 数 n=3.01。图 3 所示为 ln[sinh( $\alpha\sigma$ )]与 1/T 的关系,根 据式(6)可知各拟合直线的斜率为 Q/(nR), 求得 Q=199 kJ/mol。用类似方法可以求得其他应变的流变应力本 构参数,如表1所列。

从表 1 可看到,不同应变求得的变形激活能波动 较小,均值为 200 kJ/mol,这与多数文献中公布的钛





**Fig.2** Relationship between flow stress  $\sigma$  and strain rate  $\dot{\varepsilon}$ (a)  $\ln \sigma - \ln \dot{\varepsilon}$ ; (b)  $\ln[\sinh(\alpha \sigma)] - \ln \dot{\varepsilon}$ 



图 3  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  与 1/T 的关系

**Fig.3** Relationship between  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  and 1/T

合金β相区的激活能数据相近<sup>[3, 12]</sup>,这个数值也接近纯 钛的β相自扩散激活能(153 kJ/mol)<sup>[12]</sup>,表明在实验条 件范围内主要发生动态回复过程。

由于应变对铸态 TB6 合金的流变应力有较大影响,而式(1)~(3)均没有包含应变项,为了准确描述流

#### 表 1 铸态 TB6 合金的本构参数

 Table 1
 Constitutive parameters of as-cast TB6 alloy

	-		
Strain	$\alpha/kPa^{-1}$	n	$Q/(kJ \cdot mol^{-1})$
0.1	0.016	3.39	203
0.2	0.019	3.11	199
0.3	0.022	2.95	200
0.4	0.021	2.93	195
0.5	0.021	3.01	199
0.6	0.022	3.00	201
0.7	0.020	3.11	203

变应力特征,需要构建出新的本构方程,本文基于 Arrhenius 方程提出了以下本构关系:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = B_0 \ln \dot{\varepsilon} + B_1 (\ln \varepsilon)^2 + B_2 \ln \varepsilon + B_3 (1/T)^2 + B_4$$
(7)

式中: ɛ 为应变。

式(7)中的应力调整因子 α 取表 1 中的平均值进行 计算,利用多元回归分析方法,确定出 B<sub>0</sub>、B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、 B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub>的值分别为:B<sub>0</sub>=0.324,B<sub>1</sub>=-0.0692,B<sub>2</sub>=0.4, B<sub>3</sub>=4 704 428,B<sub>4</sub>=-2.25,即本构关系为

 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = 0.324 \ln \dot{\varepsilon} - 0.069 \, 2(\ln \varepsilon)^2 + 0.4 \ln \varepsilon +$  $4 \, 704 \, 428 (1/T)^2 - 2.25$ (8)

图 1 中的数据点是利用式(8)计算的应力值,可以 看到,流变应力的实验值与计算值吻合程度较好。误 差分析结果为:计算应力误差小于 5%的数据点占总 数据点的 61%,误差小于 10%的数据点占总数据点的 84%,只有 9%的数据点误差超过了 15%,这表明式(8) 建立的本构关系能准确反映铸态TB6合金在实验条件 范围内的流变应力特性。

### 3 结论

1) 应变速率对铸态 TB6 合金流变应力的影响最显著,其次是变形温度,而应变的影响作用最小。在低温高应变速率下,铸态 TB6 钛合金的流变应力曲线呈连续软化特征,而在高温低应变速率下,流变应力曲线呈稳态流变特征。

 2) 铸态 TB6 合金的热变形激活能为 200 kJ/mol, 接近纯钛β相的自扩散激活能,表明在实验条件范围内 主要发生动态回复过程。

3) 在 Arrhenius 方程基础上考虑了应变对流变应

力曲线的影响,建立了能准确描述铸态 TB6 合金流变 应力特征的双曲正弦本构关系。

#### REFERENCES

- BOYER R R, KUHLMAN G W. Processing properties relationships of Ti-10V-2Fe-3AI[J]. Metallurgical Transactions A, 1987(18): 2095–2103.
- [2] BOYER R R, BRIGGS R D. The use of  $\beta$  titanium alloys in the aerospace industry[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 681–685.
- [3] BALASUBRAHMANYAM V V, PRASAD Y V R K. Hot deformation mechanisms in metastable beta titanium alloy Ti-10V-2Fe-3Al[J]. Materials Science and Technology, 2001(17): 1222–1228.
- [4] ROBERTSON D G, MCSHANE H B. Isothermal hot deformation behaviour of metastable β titanium alloy Ti-10V-2Fe-3Al[J]. Materials Science and Technology, 1997(13): 575–583.
- [5] 鲍如强,黄 旭,黄利军,曹春晓. Ti-10V-2Fe-3Al 合金热变 形的研究[J]. 材料工程, 2003(12): 3-10.
  BAO Ru-qiang, HUANG Xu, HUANG Li-jun, CAO Chun-xiao.
  Investigation on hot deformation behavior of Ti-10V-2Fe-3Al[J].
  Journal of Materials Engineering, 2003(12): 3-10.
- [6] 郭鸿镇,姚泽坤,冯 超,苏祖武. 温度和应变速率对 Ti-1023 合金等温压缩行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(7): 566-568.
  GUO Hong-zhen, YAO Ze-kun, FENG Chao, SU Zu-wu. Effect of temperature and strain rate on the isothermal compression behaviour of Ti-10V-2Fe-3Al[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(7): 566-568。
- [7] 闫世成,刘 东,杨艳惠,郭鸿镇,罗子健.等温锻造过程中 Ti-1023 合金的本构关系[J]. 热加工工艺,2005(6):1-3.
   YAN Shi-cheng, LIU Dong, YANG Yan-hui, GUO Hong-zhen, LUO Zi-jian. Constitutive relationship of Ti-1023 during isothermal forging processes[J]. Hot Working Technology, 2005(6):1-3.
- [8] SELLARS C M, TEGART W J M. On the mechanism of hot deformation[J]. Acta Metallurgica, 1966(14):1136–1139.
- [9] MCQUEEN H J, RYAN N D. Constitutive analysis in hot working[J]. Materials Science and Engineering A, 2002(322): 43-63.
- [10] WANJARA P, JAHAZI M, MONAJATI H, YUE S, IMMARIGEON J P. Hot working behavior of near-[alpha] alloy IMI834[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 396(1/2): 50–60.
- [11] OH S I, SEMIATIN S L, JONAS J J. An analysis of the isothermal hot compression test[J]. Metallurgical Transactions A, 1992(23A): 963–975.
- [12] VO P, JAHAZI M, YUE S, BOCHER P. Flow stress prediction during hot working of near-[alpha] titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 447(1/2): 99–110.

(编辑 李向群)