

# 铸造高铌 TiAl 合金的热变形能力研究

王 凤, 徐向俊, 林均品, 叶 丰, 王艳丽, 王 兴, 陈国良

(北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 在 Gleeble-1500 热模拟试验机上对高铌 TiAl 合金进行等温热压缩试验, 研究其热压缩变形的流变应力行为。压缩试验的形变温度为 900~1250 °C, 形变速率为  $5 \times 10^{-4} \sim 1 \text{ s}^{-1}$ , 工程压缩应变为 50% 和 80%。用 Zener-Hollomon 参数的指数函数能较好地描述该合金高温变形时的流变应力行为; 所获得的峰值应力热变形方程为  $\sigma_p = 197.6 \ln \{ (Z/9.59 \times 10^{15})^{0.285} + [(Z/9.59 \times 10^{15})^{0.570} + 1]^{1/2} \}$ , 其变形激活能为 (497±49) kJ/mol。本研究还给出了铸造高铌 TiAl 合金热变形抗力图。

**关键词:** 高铌 TiAl 合金; 高温变形; 流变应力; 热变形激活能

**中图分类号:** TG 146.4<sup>+</sup>16

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2009)06-1025-04

双相 TiAl 合金具有较高的高温强度、较低的密度、优良的抗氧化性能等特点, 在航空、汽车、能源工业等方面有很大的应用前景<sup>[1,2]</sup>, 被认为是最有应用潜力的新一代高温轻质结构材料。其中, 高铌 TiAl 合金是新一代高温高性能 TiAl 合金, 它比普通 TiAl 合金具有更优良的性能, 从而受到人们广泛关注<sup>[3~5]</sup>。

高 Nb 合金化大大提高 TiAl 合金的室温和高温强度的同时, 也进一步降低了其室温和高温塑性, 尤其是室温塑性比普通 TiAl 更低。研究表明<sup>[6~8]</sup>: 获得细小均匀的显微组织是改善 TiAl 合金室温塑性的关键, 而热加工能有效地破碎粗大的铸态组织, 改善其室温性能。采用热机械加工方法可以使 TiAl 合金铸态粗大层片团破碎获得细小、均匀的显微组织<sup>[9]</sup>。目前常用的热加工手段有等温锻造、热挤压、轧制、包套锻造等<sup>[10,11]</sup>。对于高铌 TiAl 合金而言, 大尺寸零件锻后双态组织应用是目前国际上的发展方向。本工作就是以铸造 Ti-45Al-8.5Nb-(W,B,Y) 为研究对象, 通过小试样的物理模拟试验, 建立高铌 TiAl 合金在塑性变形时的变形抗力数学模型, 制定大尺寸铸锭的锻造工艺。

## 1 实 验

所用材料为采用 SM 熔炼工艺得到的高铌 TiAl 合金。采用 gleeble-1500 试验机通过热模拟试验进行锻造加工窗口探索。试样为用线切割从 SM 铸锭上切取的尺寸为  $\Phi 6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的圆柱试样。形变温度为 900~1250 °C, 形变速率为  $5 \times 10^{-4} \sim 1 \text{ s}^{-1}$ , 工程压缩应变为 50% 和 80%。对于 50% 变形, 绘制不同试验条件下的压缩

真应力-真应变曲线评价材料的变形行为。变形是在空气中进行的。压缩前试样经过 600# 金相砂纸打磨, 然后用丙酮清洗。压缩试样以 5 °C/s 的加热速度升温至试验温度, 保温 3 min 后开始压缩, 达到 50% 或 80% 的工程应变后迅速水冷, 使变形组织保留到室温。

## 2 结果与讨论

### 2.1 真应力-真应变曲线

图 1 为不同温度和应变速率下铸态 Ti-45Al-8.5Nb-(W,B,Y) 合金的压缩真应力-真应变曲线。在形变初期, 流变应力随着应变的增加迅速上升, 到峰值应力 ( $\sigma_p$ ) (低应变区), 此时为加工硬化阶段, 然后随应变增加, 流变应力逐渐降低 (中等应变区), 直到趋于稳定 (高应变区)。在中等和高应变量下材料发生明显的软化, 变形抗力下降, 表明材料有较好的锻造性能。高铌 TiAl 合金的压缩流变行为明显地包括动态回复和再结晶 3 个阶段, 尤其是温度高于 1000 °C。 $\gamma$ -TiAl 的变形主要是柏氏矢量为  $1/2[110]$  的普通位错和柏氏矢量为  $[101]$  和  $1/2[11\bar{2}]$  的超位错在 (111) 面的滑移。另外还有  $1/6\langle 11\bar{2} \rangle$  方向的机械孪晶。各种变形的影响取决于合金的 Al 含量和其他元素以及变形温度。对于双相中的  $\gamma$ , 超位错很难开动, 因此变形主要由普通位错和形变孪晶进行, 材料的流变应力主要取决于全位错和孪晶分位错与片层界面的相互作用。而孪晶的开动随变形温度的增加而增加。形变的硬化是由于增加了位错和孪晶密度以及平行于片层界面和倾斜于界面的 (111) 面上的全位错和孪晶分位错的交互作用增加。在有足

收稿日期: 2008-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50771013) 和 “863” 项目 (2006AA03Z511) 联合资助

作者简介: 王 凤, 女, 1981 年生, 硕士, 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083, E-mail: linjunpin@skl.ustb.edu.cn

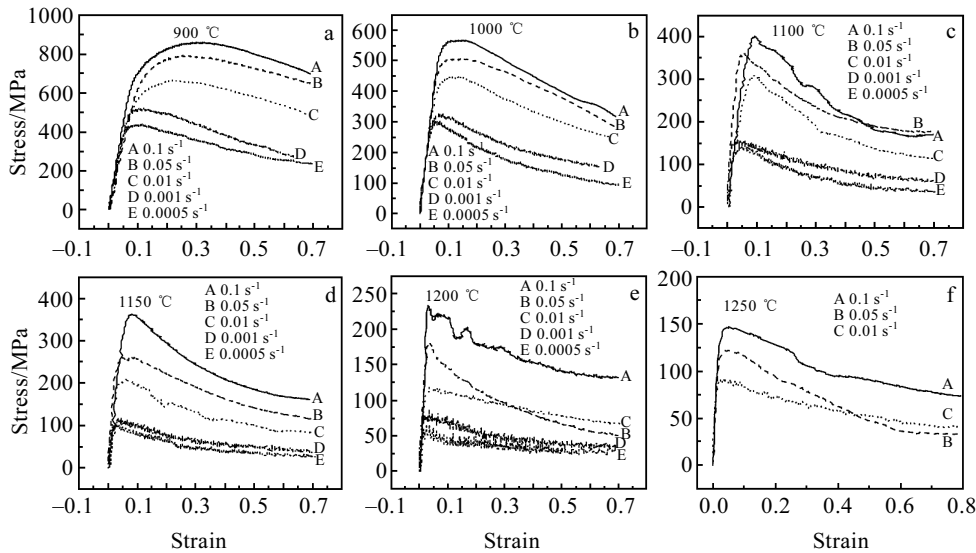


图 1 不同试验条件下铸态 Ti-45Al-8.5Nb-(W,B,Y)合金的压缩真应力-真应变曲线

Fig.1 True stress-true strain curve of high Nb containing TiAl alloy in different conditions:

(a) 900 °C, (b) 1000 °C, (c) 1100 °C, (d) 1150 °C, (e) 1200 °C, and (f) 1250 °C

够热激活能使原子进行长程扩散时,位错就可以攀移,这时伴随硬化晶粒的软化。在流变小于 10%时没有动态再结晶产生,流变大于 10%后产生的流变软化表明了动态再结晶的开始<sup>[12]</sup>。

## 2.2 热变形方程的建立

### 2.2.1 应变速率对峰值流变应力的影响

高铌 TiAl 合金的高温变形是一个热激活过程<sup>[13]</sup>。由于蠕变和热加工均属于热激活过程,又由于热加工可视作蠕变在大应变速率和较高应力水平条件下的一种外延,两者的变形机制和软化机制非常相似,此时的变形温度、应变速率对流变应力的影响可借用 Arrhenius 方程表示<sup>[14]</sup>。

$$\text{低应力水平下 } \dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \quad (1)$$

$$\text{高应力水平下 } \dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta \sigma) \quad (2)$$

$$\text{任何应力水平下 } \dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

其中,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A$ 、 $n_1$ 、 $n$ 、 $A$ 、 $B$  均为与温度无关的材料常数,  $R$  为气体常数,  $T$  为绝对温度,  $Q$  为变形激活能,  $\dot{\epsilon}$  为应变速率; 常数  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $n$  之间满足  $\alpha = \beta/n$ <sup>[15]</sup>,  $\sigma$  为流变应力。

比较以上 3 式可以发现,在低应力水平下,式(3)接近于式(1)的指数关系;在高应力水平下,式(3)接近于式(2)的幂指数关系。式(3)能较好地描述常规热加工变形。

金属热加工变形时,应变速率受到热激活的控制。变形温度和变形速率对变形的影响由 Zener 和 Hollomon 通过引入参数  $Z$  来表示<sup>[16]</sup>:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \quad (4)$$

在一定的变形温度下,假定材料的峰值应力  $\sigma_p$  (和应变速率  $\dot{\epsilon}$  之间分别满足指数关系、幂指数关系和双曲正弦关系,并假定式(4)中变形激活能与温度无关,对这 3 式两边分别取自然对数,可以得到:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma_p \quad (5)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma_p \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \ln \dot{\epsilon} &= \ln A + (-Q/RT) + n \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)] \\ &= \ln A_3 + n \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)] \end{aligned} \quad (7)$$

将不同变形温度条件下合金的峰值流变应力随应变速率变化情况分别带入式(5)、(6)和(7)中,绘制  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma_p$ 、 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma_p$  和  $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$  关系图,如图 2 所示。对所绘制的 3 个图进行一元线性回归处理,经分析可知,双曲函数关系回归效果最好。

### 2.2.2 变形温度对流变应力的影响

当应变速率为常数时,假定一定温度范围内  $Q$  值保持不变,对参数  $Z$  的定义式(4)两边取自然对数,可以得到:

$$\ln \dot{\epsilon} + Q/RT = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)] \quad (8)$$

由此得到:

$$\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)] = A' + B'(1000/T) \quad (9)$$

表 1 为不同试验条件下高铌 TiAl 合金的压缩峰值应力。将表 1 中的有关数据代入上式,进行一元线性回归,并绘出相应的  $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)] - 1000/T$  图,结果见图 3a。结果表明,峰值应力的双曲正弦对数项与绝对温度的倒数间满足线性关系。说明高铌 TiAl 合金高温变形时峰值应力与变形温度之间满足(4)式,即可用包含 Arrhenius 项的  $Z$  参数描述高铌 TiAl 合金高温压缩

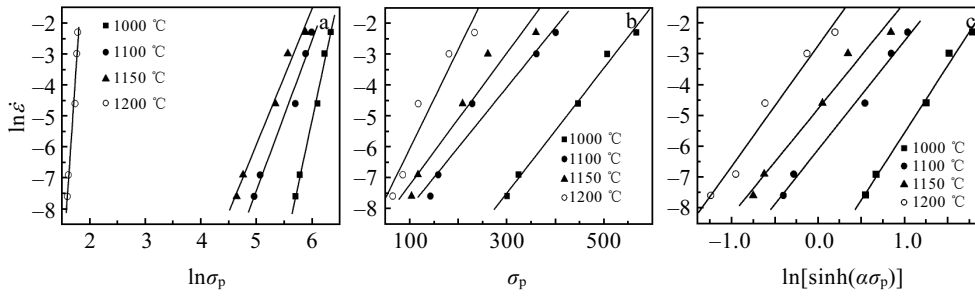


图 2 高铌 TiAl 合金压缩时应变速率与峰值流变应力的相关性

Fig.2 The correlation between strain rate and peak flow stress of high Nb containing TiAl alloy at hot compression: (a) exponential relationship, (b) power exponential relationship, and (c) hyperbolic functions relationship

表 1 各试验条件下高铌 TiAl 合金的压缩峰值应力  
Table 1 Peak flow stress of high Nb containing TiAl alloy at hot compression in different conditions (MPa)

$\dot{\epsilon} / s^{-1}$	1000 °C	1100 °C	1150 °C	1200 °C
$1 \times 10^{-1}$	567(580)	401(391)	360(310)	234(239)
$5 \times 10^{-1}$	507(541)	361(353)	261(274)	181(207)
$1 \times 10^{-1}$	447(451)	299(270)	209(199)	118(143)
$1 \times 10^{-1}$	325(327)	159(168)	117(115)	86(79)
$5 \times 10^{-1}$	301(292)	143(142)	104(96)	65(65)

Note: values in parentheses are calculational result using equation (13)

变形时的流变应力行为。这种关系意味着合金热压缩变形是受热激活控制的。由此可以推断，峰值应力和 Z 存在对应关系，即可以表达成：

$$\sigma_p = f(\dot{\epsilon} \exp(Q/RT)) = f(Z) \quad (10)$$

根据式(3)，可得激活能的表达式为

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]} \right\}_T \times \left\{ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]}{\partial (1/T)} \right\}_{\dot{\epsilon}} \quad (11)$$

计算图 2a 的 3 条直线的斜率平均值求 n，和图 2b 3 条直线的斜率平均值求 β，采用  $\alpha = \beta/n$  就可以计算得到  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  中的 α 值。利用一元线性回归分析方法分别求出一定温度下  $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  关系的斜率和一定应变速率条件下  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] - 1/T$  直线关系的斜率，再代入式(11)求解 Q 值，代入式(4)求出 Z 值，再由 Z 和峰值应力之间的双对数关系，求出更为精确的 n 值，然后带入  $\alpha = \beta/n$  中求出一个新的 α 值，再带

入式 (11) 中求解第二次 Q 值。如此进行迭代计算，求得更为真实可靠的材料常数 A, n, α 和  $Q^{[17]}$ ：

$$\alpha = 0.00506, n = 3.509, A = 9.59 \times 10^{15}, Q = 497$$

根据上述计算思路和本试验所得峰值应力，最终计算取  $\alpha = \beta/n = 0.00506$ ，以  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  与  $1000/T$  以及  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  为坐标做图(3a, 3b)。然后根据 2 组直线的斜率求得各条件下材料的激活能，统计得到变形激活能  $Q = (497 \pm 49)$  kJ/mol。根据 α、Q 值和变形条件，以  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  与  $\ln Z$  为坐标做图 3c。然后得到其关系为

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] = 36.80 + 3.509 \ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] \quad (12)$$

将所得材料常数 α、A、n、Q 带入公式(3)，并根据双曲正弦函数的定义，得到合金压缩变形时的峰值流变应力（即变形抗力）方程为

$$\sigma_p = 197.6 \ln \left\{ \left( \frac{Z}{9.59 \times 10^{15}} \right)^{0.285} + \left[ \left( \frac{Z}{9.59 \times 10^{15}} \right)^{0.570} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (13)$$

由图 3c 可知，高铌 TiAl 合金高温压缩变形时的应力-变形条件关系满足双曲正弦函数，说明该合金塑性变形过程是一个热激活过程。这为通过控制应变条件来控制热加工的应力水平和力学性能参数提供了理论依据。

为了检查热变形方程的准确性，表 1 列出了实际测量值和利用式(13)求得的理论计算值，二者有较好的一致性。可见回归出的公式(13)具有较高的可信度。

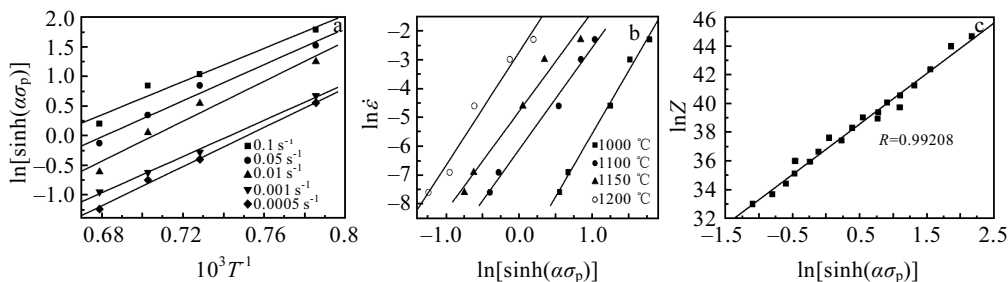


图 3 峰值应力与温度(a)，应变速率与峰值应力(b)以及参数 Z 与峰值应力(c)之间的关系

Fig.3 Relation of  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  vs  $1000/T$  (a),  $\ln \dot{\epsilon}$  vs  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  (b), and  $\ln Z$  vs  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$  (c)

图 4 给出了三者的关系曲面图, 利用该图可以直观地观察应力-应变速率-温度间的关系, 以便更清楚地说明温度和应变速率对峰值应力 (即变形抗力) 的综合影响。

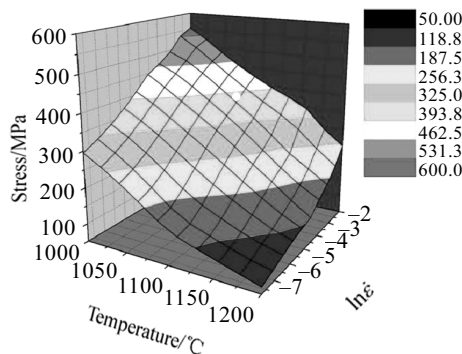


图 4 铸造 Ti-45Al-8.5Nb-(W, B, Y)合金的变形抗力图

Fig.4 Map of the resistance to deformation of cast high Nb containing TiAl alloy

### 3 结 论

1) 在 1000 °C, 1 s<sup>-1</sup>~1200 °C, 5×10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup> 范围内高温压缩变形时, 铸造高铌 TiAl 合金的变形抗力  $\sigma_p$  由 567 MPa 下降到 65 MPa。

2)  $\sigma_p$  和应变速率  $\dot{\epsilon}$  之间满足双曲正弦关系, 和变形温度  $T$  之间满足 Arrhenius 关系。

3)  $\sigma_p$  和  $Z$  因子之间的关系可以表示成:  
 $\sigma_p=197.6\ln\{(Z/9.59 \times 10^{15})^{0.285}+[(Z/9.59 \times 10^{15})^{0.570}+1]^{1/2}\}$ ,  
 变形激活能为(497±49) kJ/mol。

4) 得到 Ti-45Al-8.5Nb-(W,B,Y)合金 50%和 80% 工程压缩应变的热加工变形图和变形抗力图。

5) 在 900 °C 以下高铌 TiAl 合金不可锻造。50% 变形选择的加工窗口是应变速率小于 0.1。

### 参考文献 References

[1] Appel F *et al. Mater Sci Eng*[J], 1998, R22: 187  
 [2] Su Yanqing(苏彦庆) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(5): 768  
 [3] Zhang W J *et al. Scripta Metall Mater*[J], 1993, 28: 1113  
 [4] Wang Jingguo *et al. J Mater Sci Technol*[J], 1994(10): 359  
 [5] Liu Zicheng(刘自成) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2000, 10(4): 470  
 [6] Kong Fantao(孔凡涛) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(2): 81  
 [7] Liu C T, Maziasz P J. *Intermetallics*[J], 1998(6): 653  
 [8] Kim Y W. *Acta Metall Mater*[J], 1992, 40(6): 1121  
 [9] Peng Chaoqun(彭超群) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2001, 11(4) : 527  
 [10] Semia Tin S L *et al. Metall Mater Trans A*[J], 1994, 25A(12): 2753  
 [11] Kimywlo. *JOM*[J], 1994, 46(7): 30  
 [12] Kaybyshev O A *et al. Phy Metal Metal*[J], 1987, 64(5): 163  
 [13] Chen Guoliang(陈国良), Lin Junpin(林均品). *Physics Metallurgy for Ordered Intermetallics*(有序金属间化合物结构材料物理金属学基础)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999: 285  
 [14] Zhao Yongqing(赵永庆). *Deformation and Burn Resistant Mechanism of Ti40 Burn Resistant Titanium Alloy* (Ti40 阻燃钛合金的变形机理和阻燃机理研究)[D]. Shenyang: Northeastern University, 1998  
 [15] Nrawford R H *et al. Int J Numer Meth Eng*[J], 1988, 26(14): 1  
 [16] Li Shengzhi(李胜祗) *et al. Journal of University of Science and Technology Beijing*(北京科技大学学报)[J], 2000, 22(1): 52  
 [17] Lin Qiquan(林启权) *et al. Natural Science Journal of Xiangtan University*(湘潭大学学报)[J], 2002, 24(3): 84

## Hot Deformability of Cast High Nb Containing TiAl Alloy

Wang Feng, Xu Xiangjun, Lin Junpin, Ye Feng, Wang Yanli, Wang Xing, Chen Guoliang

(State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The hot compressive deformation behaviour of high Nb containing TiAl alloy was investigated in the temperature range of 900~1250 °C, at the strain rate range of 5×10<sup>-4</sup>~1 s<sup>-1</sup> and the engineering strain range of 50%~80% on Gleeble-1500 hot simulator. The flow stress behaviour of high Nb containing TiAl alloy can be represented by a Zener-Hollomon parameter in the exponent style equation. The regressed expression is  $\sigma_p=197.6\ln\{(Z/9.59 \times 10^{15})^{0.285}+(Z/9.59 \times 10^{15})^{0.570}+1\}^{1/2}$ . The hot deformation activation energy of high Nb containing TiAl alloy during hot deformation is (497±49) kJ/mol. The hot deformability map of cast high Nb containing TiAl alloy was given in this paper.

**Key words:** high Nb containing TiAl alloy; hot deformation; flow stress; activation energy

Biography: Wang Feng, Master, State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, E-mail: linjunpin@skl.ustb.edu.cn