

一种新型铌合金的高温变形行为研究

蔡小梅, 郑欣, 白润, 王峰, 刘辉, 夏明星, 王晖

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 利用 Gleeble-3500 试验机对一种新型铌合金在 1000~1200 °C 下的热变形行为进行了热压缩模拟。结果表明: 合金的流变应力大小对变形温度和应变速率非常敏感, 流变应力随变形温度升高而降低, 随应变速率提高而增大; 合金的高温变形遵循幂函数方程, 应力指数 n 为 12.03, 相应的激活能 Q 为 577.63 kJ/mol, 并回归出了反映锻造热力学参数对材料成型性能影响的本构方程。

关键词: 铌基合金; 热压缩试验; 本构方程

中图分类号: TG146.4⁺16; TG306

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)04-1051-04

难熔金属铌合金的密度不仅与镍合金相当, 而且具有较高的熔点, 较高的高温强度, 较好的加工性能, 能制成薄板和外形复杂的零件, 因此得到了材料研究工作者的极大关注^[1-7]。Nb-Ti-Al 系铌基合金是西北有色金属研究院研制的一种新型低密度 ($\rho \leq 7 \text{ g/cm}^3$)、高强度 (1000 °C, $R_m \geq 100 \text{ MPa}$) 铌合金, 是我国目前研发的比强度最佳的铌基合金, 可用于航空航天高温结构件领域。但该合金的合金化程度较高, 材料的加工性较差, 成品率较低。工业生产中, 往往希望采用大的变形量和高的变形速率来对金属材料进行热加工, 以便提高生产效率从而降低生产成本。材料的可加工性决定了材料的加工效率, 而材料的可加工性与材料的本质性能息息相关。本研究以挤压态 Nb-Ti-Al 系合金为对象, 进行热压缩模拟试验, 通过对其应力-应变曲线及其微观组织的分析, 研究合金的高温变形机理, 为合金的热加工工艺提供理论参考。

1 实验

本实验所用合金的名义成分如表 1 所示, 其中 X 代表其他微量元素。其原始组织为挤压态组织, 见图 1 所示。将原始材料加工成 $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱体试样, 在 Gleeble-3500 试验机上进行热压缩, 通过热压缩测定了合金的应力-应变曲线。热压缩模拟工艺参数为: (1) 应变量 40%; (2) 应变速率 0.1、1 和 10 s^{-1} ; (3) 应变温度分别为 1000、1100 和 1200 °C。将试样沿与压缩轴平行的方向对半剖开, 分别制取金相试样, 用奥林巴斯 PMG3 卧式金相显微镜观察合金的显微组织。

表 1 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of the alloy ($\omega/\%$)					
Nb	Ti	Al	W	Mo	X
58	30	5.0	4.5	0.5	Bal.

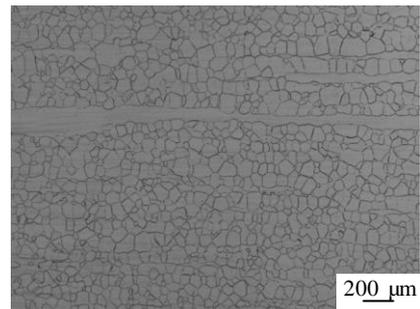


图 1 合金原始组织

Fig.1 Original structure of the specimen before compression

2 结果和讨论

2.1 变形温度和应变速率对合金变形抗力的影响

图 2 是合金在不同变形温度和不同应变速率下压缩后的真应力-应变曲线。从图中可看出: ①合金变形抗力对应变速率较为敏感, 随应变速率的增大, 流变应力迅速增大; ②合金变形抗力对变形温度也较为敏感, 随温度的升高, 流变应力降低很明显; ③合金在不同的变形温度和应变速率下发生变形的真应力-应变曲线的形状不同, 在 1000 °C 下大应变速率变形时, 应力达到峰值后曲线接近为一水平线, 随应变速率的降低和变形温度的升高, 应力达到峰值后曲线开始下降, 后逐渐接近水平。说明合金在不同的变形条件下

收稿日期: 2015-04-09

作者简介: 蔡小梅, 女, 1978 年生, 硕士, 高级工程师, 西北有色金属研究院难熔金属材料研究所, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86231082, E-mail: xaxmcai@163.com

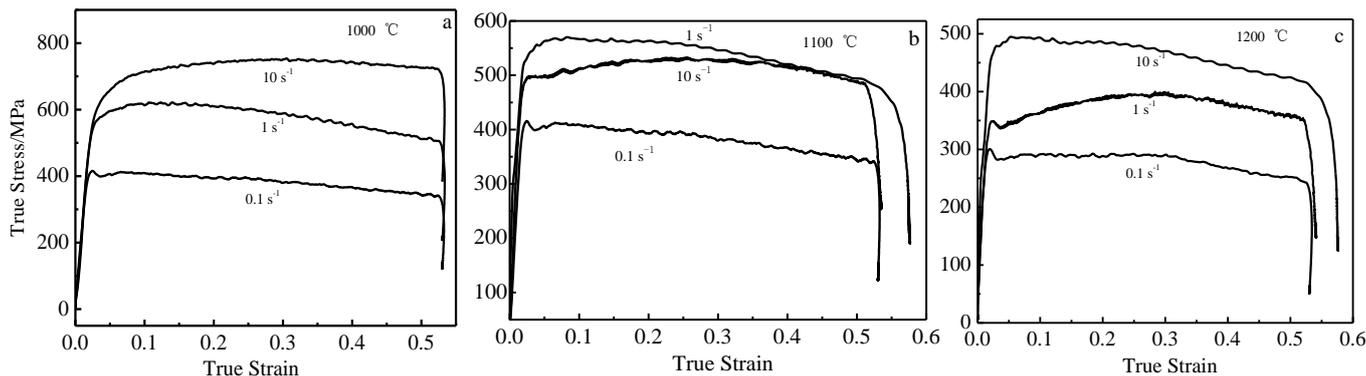


图 2 合金在不同变形温度和应变速率下的真应力-应变曲线

Fig.2 True stress-strain curves of specimens tested at various strain rates with different temperatures: (a) 1000 °C, (b) 1100 °C and (c) 1200 °C

的加工硬化软化方式不同。

图 3 和图 4 分别为合金在不同变形温度及不同应变速率下的金相组织。从图 3 可看出，在 1000 °C 高应变速率下压缩后，合金组织中除晶粒被压扁以外，晶界出现锯齿状，为典型的动态回复组织；随应变速率降低，晶粒边界锯齿状越明显，并有个别再结晶晶粒出现。从图 4 可看出，在 1200 °C 高温下变形时，即使在高应变速率下，合金组织中已经有再结晶晶粒出现，随应变速率的降低，再结晶更为明显，并出现大量等轴晶粒。以上分析结果表明，在 1000 °C，较高的应变速率下，合金加工硬化软化行为表现为动态回复，在较低的应变速率下，合金加工硬化软化主

要以动态回复为主，并伴随有动态再结晶出现；在 1200 °C 高温变形时，合金加工硬化的软化主要以动态再结晶为主。

2.2 动力学研究

金属的高温变形行为属于热激活变形，其流变应力主要取决于变形温度和应变速率。通过对不同材料高温塑性变形的试验数据研究表明，在不同的应力水平下，稳态流变应力 σ 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 之间分别满足以下关系式^[8-10]：

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \quad (\alpha\sigma < 0.8) \tag{1}$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \quad (\alpha\sigma > 1.2) \tag{2}$$

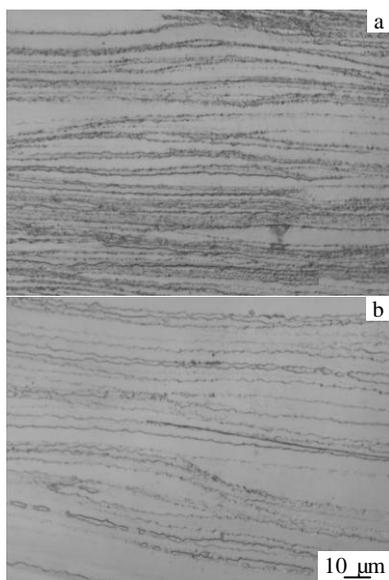


图 3 合金在 1000 °C 不同应变速率下变形后的金相组织

Fig.3 Microstructures of the specimens compressed at 1000 °C with different strain rates: (a) 10 s⁻¹ and (b) 0.1 s⁻¹

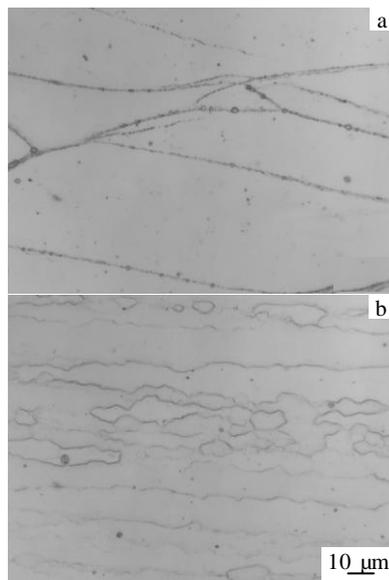


图 4 合金在 1200 °C 不同应变速率下变形后的金相组织

Fig.4 Microstructures of the specimens compressed at 1200 °C with different strain rates: (a) 10 s⁻¹ and (b) 0.1 s⁻¹

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (\text{所有应力范围}) \quad (3)$$

式中, A, A_1, A_2, β 均为与变形温度无关的常数, $\alpha=\beta/n_1$, n 为应力指数, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率 (s^{-1}), σ 为流变应力 (MPa), Q 为激活能 (kJ/mol), R 为气体常数, 等于 8.314 J/mol, T 为绝对温度 (K)。

对式(1)和(2)两边分别取自然对数后线性回归可得 n_1 和 β 值。 n_1 的平均值为 17.618, β 的平均值为 0.034, 因此 $\alpha=\beta/n_1=0.002$, 见图 5 所示。

图6为不同变形温度下应变速率与峰值应力之间的双曲正弦关系, 其中 α 值为本研究所优化获得的0.002。由拟合结果可以看出, 在整个实验条件下, 两者之间很好地符合线性关系。拟合后得到了不同温度下的应力指数 n , 可见, 应力指数对变形温度很敏感, 温度越高, 应力指数越小, 应力指数的平均值为12.03。

图 7 给出了不同应变速率下温度和峰值应力之间的双曲正弦关系。结果表明, 在整个实验范围内, 峰值应力的双曲正弦对数与变形温度的倒数之间也非常好地符合线性关系。根据图 6 和图 7 可求得该合金的平均变形激活能为 577.63 kJ/mol。

有文献指出, 在高温下, C-103 合金的应力指数为 2.87, Nb-1Zr 合金和 Nb-9W-1Zr 合金的应力指数分别为

6.0和5.5^[11], 因此, 应力指数与合金中的固溶元素有很大的关系。本实验合金的应力指数高达12.03, 是由于该合金中固溶元素较多所致。另外, Nb的自扩散激活能为350~450 kJ/mol^[12], C-103、Nb-1Zr和Nb-9W-1Zr合金的变形激活能分别为374、371和354 kJ/mol^[9], 与Nb的自扩散激活能较接近, 其高温塑性变形主要来源于铌在合金中的自扩散。而本研究合金的变形激活能远高于Nb的自扩散激活能, 主要原因为合金中W、Mo等金属元素的固溶强化作用, 这些元素的键级(相邻原子间的结合能力)大于Nb元素的键级^[13], 加入后会使得合金的键级增大, 使得合金元素原子之间的结合力增强, 这样高温下热变形扩散时金属原子间难以移动, 从而使合金的激活能增大。

2.3 合金本构方程

依据 Zener-Hollomon 参数法^[14], 可得:

$$Z = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (4)$$

对式(4)两边分别取自然对数:

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (5)$$

利用上述所求的 α 和 n 值, 通过计算 Z 值和 $\ln Z$ 值, 得到 $\ln A$ 值为34.67。通过绘制 $\ln Z$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 间的函数关系图(图8), 对其进行线性拟合后, 可得 Z 参数与峰值应力之间关系为:

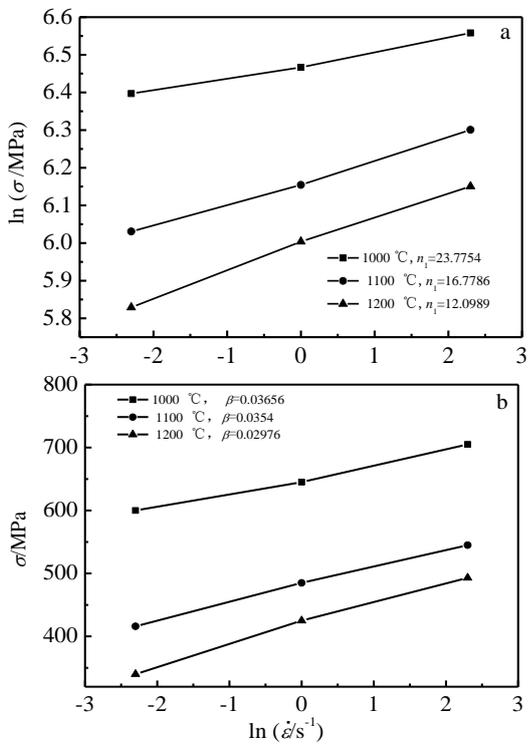


图 5 本构方程中 α 的优化 ($\alpha=\beta/n_1$)
Fig.5 Plots of $\ln\sigma$ vs $\ln\dot{\epsilon}$ (a) and σ vs $\ln\dot{\epsilon}$ (b)

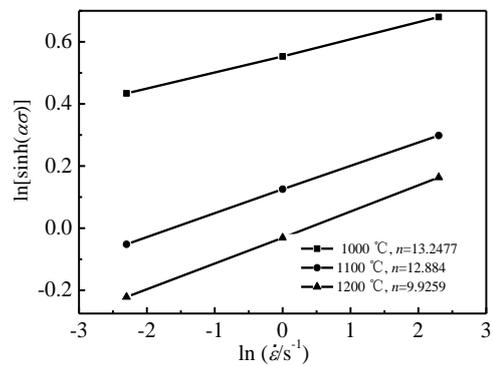


图 6 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $\ln\dot{\epsilon}$ 的关系图
Fig.6 Plot of $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\dot{\epsilon}$

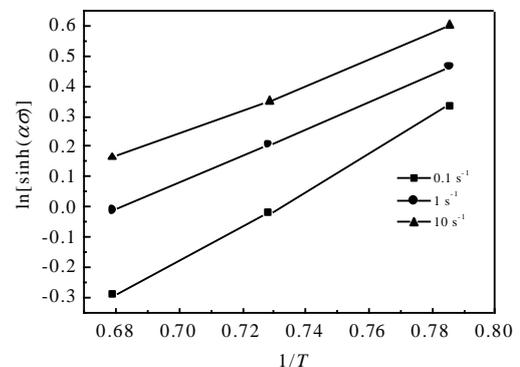


图 7 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $1/T$ 的关系图
Fig.7 Plot of $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $1/T$

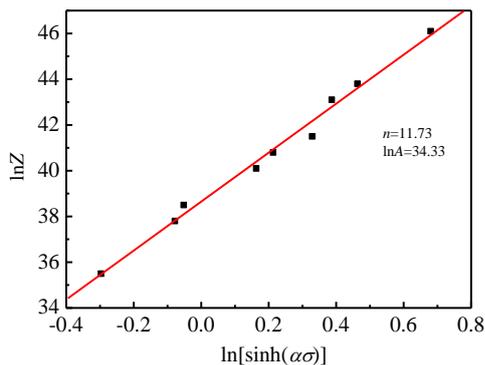


图 8 lnZ 与 ln[sinh(ασ)]的关系图

Fig.8 Plot of lnZ vs ln[sinh(ασ)]

$$\ln Z = 34.33 + 11.73 \ln[\sinh(0.002\sigma)] \quad (6)$$

从图8可看出，Z 值随峰值应力的增大而增大。在整个变形参数范围内，lnZ 与ln[sinh(ασ)]符合良好的线性关系，拟合的n值和lnA值分别为11.73和34.33，与实际计算值较为接近。该结果说明，双曲正弦函数本构方程能很好地描述该合金高温压缩变形的本构行为，其表达式为：

$$\dot{\epsilon} = e^{34.67} [\sinh(0.002\sigma)]^{12.03} \exp\left(-\frac{577.63}{RT}\right) \quad (7)$$

3 结 论

1) 本实验的 Nb-Ti-Al 合金在高温变形时流变应力对温度和应变速率均较为敏感，随温度的升高，流变应力降低很明显；随应变速率的增大，流变应力迅速增大。

2) 不同的变形温度下合金的软化机理不同，在 1000 °C 变形时，主要以动态回复为主；在 1200 °C 变形时，开始出现动态再结晶。

3) 依据 Zener-Hollomon 参数法，建立的合金的本构方程为：

$$\dot{\epsilon} = e^{34.67} [\sinh(0.002\sigma)]^{12.03} \exp\left(-\frac{577.63}{RT}\right)$$

参考文献 References

[1] Leonard K J, Mishurda J C, Vasudevan V K. *Mater Tran*[J], 2000, 31: 1305

[2] Yonosuke Murayama, Shuji Hanada. *Science and Technology of Advanced Materials*[J], 2002, 3: 145

[3] Zhang Mingjun(张明军), Guo Xiping(郭喜平). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(6): 984

[4] Zheng Xin(郑欣), Bai Run(白润), Wang Donghui(王东辉) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(10): 1871

[5] Wang Feng(王峰), Zheng Xin(郑欣), Bai Run(白润) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(11): 1972

[6] Xiao Lairong(肖来荣), Li Wei(李威), Xu Liangliang(许谅亮) et al. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2011, 16(6): 843

[7] Cai Xiaomei(蔡小梅), Zheng Xin(郑欣), Li Zhongkui(李中奎) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(6): 1094

[8] Mcqueen H J, Yue S, Ryan N D et al. *J Mater Process Technol*[J], 1995, 53: 293

[9] Kreuss G. *Deformation Processing and Structure*[M]. Ohio: American Society for Metal, 1984: 109

[10] Rao K P, Hawbolt E B. *ASME J Eng Mater Technol*[J], 1992, 114(3): 116

[11] Frost H J, Ashby M F. *Deformation Mechanism Maps*[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982: 44

[12] Titran R H, Klopp W D. *NASA Technical Paper, 1727*[R]. 1980

[13] Satoshi Inoue, Jun-ichi Saito, Masahiko Morinaga et al. *J Phys: Condens Matter* [J], 1994, 6: 5081

[14] Zener C, Hollomon J H. *J Appl Phys*[J], 1994, 15(1): 22

Hot Deformation Behavior for a New Type of Nb-based Alloy

Cai Xiaomei, Zheng Xin, Bai Run, Wang Feng, Liu Hui, Xia Mingxing, Wang Hui
(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The deformation behavior of a new-type Nb-based alloy was researched in the temperature range of 1000~1200 °C and the strain rate range of 10⁻¹~10 s⁻¹ using a Gleeble-3500 machine by hot compression. The results show that the flow stress is controlled by both strain rate and deformation temperature. The flow stress decreases with the increase of temperature, while it increases with the increase of strain rate. The high-temperature deformation obeys a power-law type equation. The stress exponent n is evaluated to be 12.03 and the apparent activation energy is 577.63 kJ/mol, and the constitutive equation that reflects how the thermal mechanical parameters influence the forming of material is regressed.

Key words: Nb based alloy; hot compression test; constitutive equation

Corresponding author: Cai Xiaomei, Master, Senior Engineer, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231082, E-mail: xaxmcai@163.com