

TiNiCu 合金的热压缩变形行为

尹向前, 张振兴, 高宝东, 李艳锋, 米绪军

(北京有色金属研究总院 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 100088)

摘要: 采用 Gleeble-1500 热模拟试验机对 TiNiCu 合金进行热压缩变形实验, 分析该合金在变形温度为 600~850 °C、应变速率为 0.5~50 条件下的变形行为。采用双曲正弦模型确定该合金的变形激活能 Q 和应力指数 n , 建立该合金的热变形本构关系。结果表明: TiNiCu 合金热压缩流变应力受变形温度和应变速率显著影响, 流变应力随变形温度的升高和应变速率的下降而降低, 材料在低应变速率条件下的软化机制以动态回复为主, 在较高应变速率下容易发生动态再结晶。

关键词: TiNiCu 合金; 热变形; 本构模型

中图分类号: TG146.2 **文献标志码:** A

Hot deformation behavior of TiNiCu alloy

YIN Xiang-qian, ZHANG Zheng-xin, GAO Bao-dong, LI Yan-feng, MI Xu-jun

(State Key Lab of Nonferrous Metals and Processes, General Research Institute for Non-Ferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: Hot compression deformation of TiNiCu alloy was performed on Gleeble-1500 at strains of 0.5–50.0 and deformation temperatures of 600–850 °C. The constitutive relationship of TiNiCu alloy is obtained based on Arrhenius equations, from which the activation energy Q and stress factor n are derived. The results show that dynamic recovery is the main softening mechanism at lower strain rates, but dynamic recrystallization softening dominates at the higher strain rates. The flow stress decreases with the increase of deformation temperature and the decrease of strain.

Key words: TiNi alloys; hot deformation; constitutive relationship

TiNi 合金是应用最为广泛的形状记忆合金, 关于合金的相变温度、记忆性能和组织演变等已经有很多研究^[1-3], 其中添加 Cu 元素形成 TiNi 基合金呈现的窄相变滞后的特性, 以其广泛的工程应用背景引起了广泛关注^[3-4]。随着 Cu 元素的加入, 合金中形成 Ti(NiCu)₂ 相, 该相不仅对 TiNiCu 合金的室温力学性能和记忆特性产生影响, 而且在高温变形过程中, 会成为再结晶核心促进动态再结晶, 使之与 TiNi 二元合金表现出不同的高温热变形行为^[4-5]。同时, 随着 TiNiCu 合金在各领域内的应用越来越广泛, 采用各种热加工变形制备 TiNiCu 合金板、棒、管、丝材的需求也越来越大, 急需研究 TiNiCu 合金的热变形行为, 以

解决该材料热变形过程中工艺参数制定和组织性能控制的问题。

在金属材料高温塑性成型过程中, 材料的流变行为是其微观组织演变机制的宏观反映, 通常采用本构方程来描述。流变应力受到变形温度、应变速率以及应变变量等热加工工艺参数的影响, 建立起包含各个影响因素的热变形本构方程被看作是进行有限元数值模拟的前提条件, 并且能够为金属塑性加工工艺参数的设计和优化提供理论基础。

本文作者利用 Gleeble-1500 热模拟试验机对 TiNiCu 合金进行高温压缩变形试验, 分析该合金在高温压缩过程中的流变应力特征, 探究在高温变形过程

中流变应力与变形温度、应变速率以及微观组织之间的关系,并以 Arrhenius 方程为模型,确定应力指数 n 、应变激活能 Q 等参数,建立 TiNiCu 合金热变形条件下的本构方程,为采用数值模拟方法研究 TiNiCu 合金热成形过程提供材料模型并为实验研究提供基础数据。

1 实验

实验材料为真空自耗熔炼 Ti₅₀Ni₄₅Cu₅(摩尔分数,%)合金铸锭,经过开坯、热锻、热旋锻加工成 16 mm 棒材,沿轴向机加工成直径 10 mm、长度 15 mm 的热模拟试样。利用 Gleeble-1500 热模拟试验机对 TiNiCu 合金进行恒温压缩实验,实验方案如下:变形温度分别为 600、650、700、750、800 和 850 °C;应变速率分别为 0.5、5 和 50 s⁻¹;试样加热速率为 1 °C/s,保温时间为 5 min;总变形量不少于 50%。实验过程中,Gleeble-1500 热模拟试验机自动采集应力、应变、位移、温度及时间等数据。

2 结果与讨论

2.1 真应力—真应变曲线特征

由高温压缩实验获得不同温度和不同应变速率下 TiNiCu 合金的真应力—真应变曲线如图 1 所示。从图 1 可见:总体上,流变应力随变形温度的降低和应变速率的增高而增加。如图 1(a)所示,在应变速率为 0.5 s⁻¹时,600 °C 的最大变形抗力达到 570 MPa,是 850 °C 时变形抗力的 3 倍多。同样,随着应变速率的增加至 5 s⁻¹ 和 50 s⁻¹ 变形抗力对应增加 700 MPa 和 850 MPa。

从不同变形速率的应力—应变曲线也可见:3 组图表现出 3 种典型的动态软化机理,在应变速度为 0.5 s⁻¹ 时,材料流变应力随着真应变迅速增加到应力峰值后,流变应力基本保持不变,此时材料中位错对消等产生的动态软化与应变增加导致的加工硬化速率相当,材料发生动态回复^[5-6];当应变速率增加至 5 s⁻¹ 时,其流变应力达到峰值后,随着真应变的增加应力值有明显下降,呈单峰形曲线形式,是典型不连续动态再结晶(DDR)表现形式^[6-7],此时材料中再结晶晶粒形核长大,消除基体中的位错和亚结构;而当应变速率为 50 s⁻¹ 时,随着应变增加,应力成波浪形下降,表征着材料中亚结构持续吸收位错转化成大角晶界的

软化现象与新形成的再结晶晶粒又承受变形导致位错增加形成的加工硬化现象交替进行,形成连续再结晶现象(CDRX)^[7-8]。

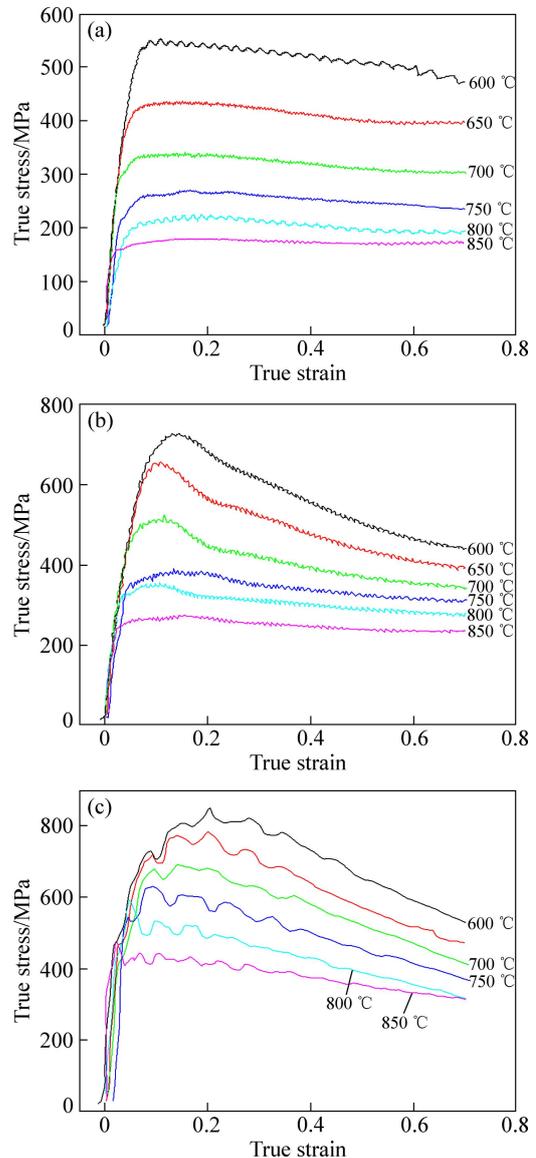


图 1 TiNiCu 合金热压缩变形真应力—真应变曲线

Fig. 1 True stress-strain curves for TiNiCu alloy hot-compressed at different temperatures and and strain rates: (a) 0.5 s⁻¹; (b) 5 s⁻¹; (c) 50 s⁻¹

2.2 流变应力模型建立

从前面分析可知,TiNiCu 合金在热变形的时,其流变应力的大小与应变量、应变速率、变形温度存在明显相互影响的关系,在金属热变形过程中,金属和合金的热变形和高温蠕变过程非常相似,都存在一个热激活过程。前期研究表明:对应 TiNi 合金,采用 Arrhenius 双曲正弦形式能够很好地描述这种热变形行为^[9],该本构方程表达式为

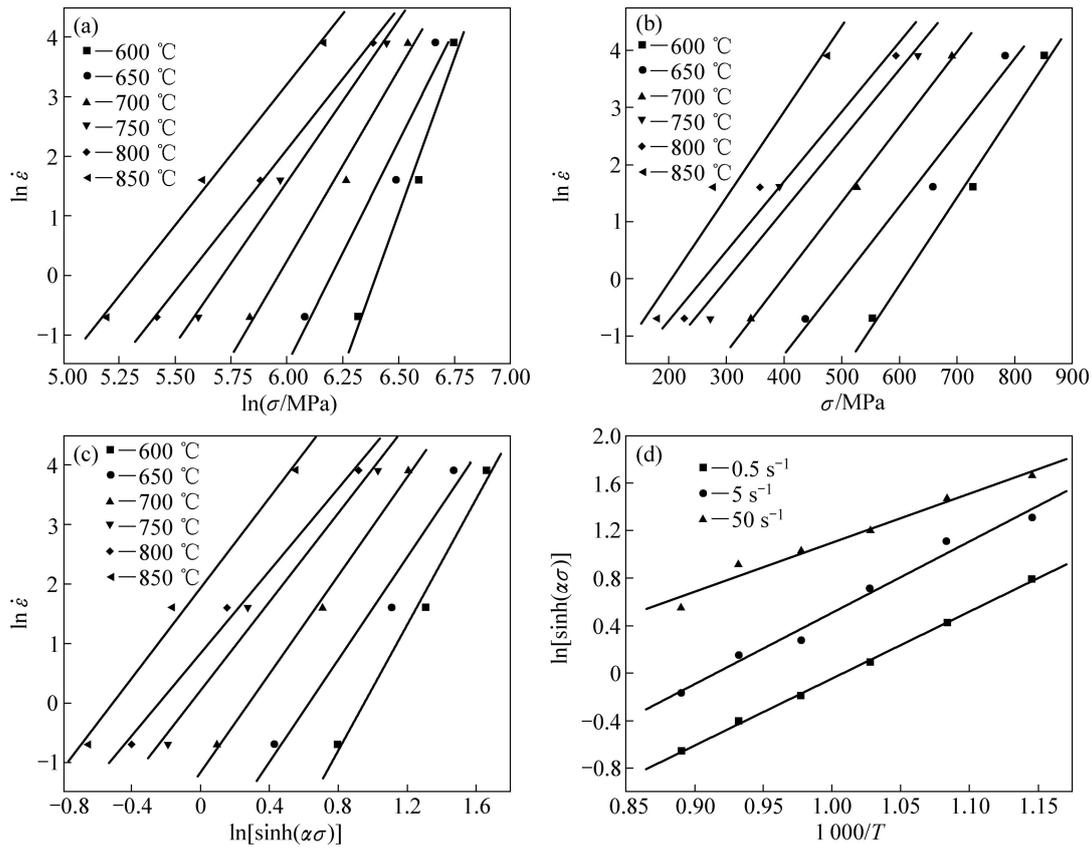


图 2 TiNiCu 合金流变应力与应变速率和变形温度关系

Fig. 2 Relations among strain rate, flow stress and deformation temperature of TiNiCu alloy: (a) $\ln \dot{\epsilon}$ with $\ln \sigma$; (b) $\ln \dot{\epsilon}$ with $\ln \sigma$; (c) $\ln \dot{\epsilon}$ with $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$; (d) $1000/T$ with $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

或

$$Z = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中: σ 为流变应力; R 为摩尔气体常数; A , α 和 n 均为与材料状态相关的常数; Q 为热变形激活能, 它反映材料热变形的难易程度, 其大小取决与材料的组织状态, 其值通常与激活焓 ΔH 相等; Z 为 Zener-Hollomon 参数, 其物理意义是温度补偿的应变速率因子。

根据真应力—真应变曲线分别作 $\sigma-\ln \dot{\epsilon}$, $\ln \sigma-\ln \dot{\epsilon}$ 的关系曲线, 同时绘制出 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-(1/T)$ 的关系图。采用最小二乘法进行线性回归分析, 可得: $n=4.925$, $Q=1.79 \times 10^5$ J, $A=1.04 \times 10^8$; 求解过程及思路可参见文献[6-9]。

将前面所求的对应参数代入式(1), 得到合金热变形本构方程为

$$\dot{\epsilon} = 1.04 \times 10^8 [\sinh(0.002972\sigma)]^{4.925} \exp\left(-\frac{179000}{RT}\right) \quad (3)$$

不同变形温度下合金热变形的变形速率代入式(2)计算, 可得对应的 Z 与对应的峰值应力, 从而得到 $\ln Z-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线。采用一元线性回归分析得出两者线性关系如图 3 所示。

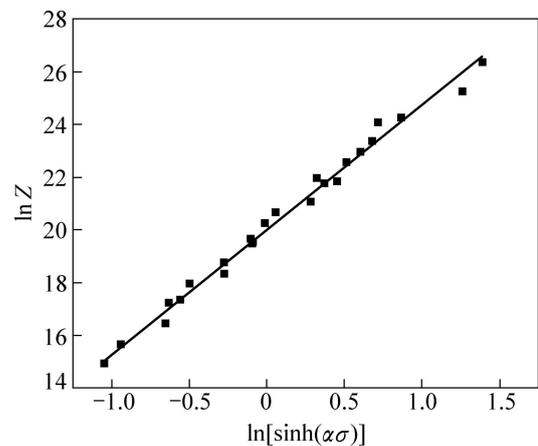


图 3 TiNiCu 合金流变应力与 Z 参数的关系

Fig. 3 Relations between Zener-Hollomon parameter and flow stress of TiNiCu alloy

$\ln Z=20.76+4.925\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$, 相关系数高达 0.97 以上, 表明该模型能够很好地描述合金的热变形行为。

3 结论

1) TiNiCu 合金属于正应变速率敏感材料, 应变速率和变形温度对合金流变应力有显著影响, 热变形流变应力随温度升高而降低, 随变形速率增加而增大。

2) TiNiCu 合金在应变速率为 0.5 s^{-1} 时, 材料发生动态回复, 在应变速率为 5 s^{-1} 时发生不连续动态再结晶, 当应变速率为 50 s^{-1} 时, 材料发生连续动态再结晶行为。

3) 依 Arrhenius 双曲正弦形式建立 TiNiCu 合金在 $600\sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率为 $0.5\sim 50 \text{ s}^{-1}$ 条件下的变形本构方程为

$$\dot{\varepsilon} = 1.04 \times 10^8 [\sinh(0.002972\sigma)]^{4.925} \exp\left(-\frac{179000}{RT}\right)。$$

REFERENCES

- [1] STRNADEL B, OHASHI S, OHTSUKA H, ISHIHARA T. Cycled stress-strain characteristics of Ti-Ni and Ti-Ni-Cu shape memory alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1995: 148-156.
- [2] SHIMIZU K. Pseudoelasticity and shape memory effects in alloys[J]. *International Metals Reviews*, 1986, 31(3): 93-114.
- [3] NAM T H, SABURI T, KAWAMURAL Y, SHIMIZU K. Shape memory characteristics associated with B2-B19 transformations in a Ti-40Ni-10Cu (at%) materials transcation[J]. *JIM*, 1990, 31(4): 262-269.
- [4] de ARAUJO C J, MORIN M, GUENIN G. Electro-thermomechanical behavior of Ti-45Ni-5Cu alloy during shape memory cycling under constant stress[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 273/275: 305-309.
- [5] MORAKABATI M, KHERIRANDISH S, ABOUTALEBI M, TAHERI A K, ABBASI S M. The effect of Cu addition on the hot deformation behavior of NiTi shape memory alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 499: 57-62.
- [6] WAHABI M E, GAVARD L, CABRERA J M, PRADO J M, MONTHEILLET F. EBSD study of purity effects during hot working in austenitic stainless steels[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 393: 83-90.
- [7] PENG W P, LI P L, ZENG P, LEI L P. Hot deformation behavior and microstructure evolution of twin-roll-cast Mg-2.9Al-0.9Zn alloy: A study with processing map[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 494: 173-178.
- [8] WANG Y, SHAO W Z, ZHEN L, ZHANG X M. Microstructure evolution during dynamic recrystallization of hot deformed superalloy 718[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 486: 321-332.
- [9] WANG Shu-juan, MI Xu-jun, YIN Xiang-qian, LI Y F. Deformation behavior of TiNiFe alloy in isothermal compression[J]. *Rare Metals*, 2012, V31: 323-327.

(编辑 邓履翔)