

高温变形参量对 TC21 钛合金组织与性能的影响

赵彦蕾¹, 李伯龙¹, 朱知寿², 聂祚仁¹

(1. 北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124; 2. 航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 在 880~950 ℃ 和不同应变速率 0.01~10 s⁻¹ 条件下, 将 TC21 钛合金高温压缩变形至 50%。研究高温变形参量对流动应力及微观组织的影响规律, 建立了 TC21 合金的本构方程。结果表明: 流变应力随变形温度的降低及应变速率的增大而升高, 变形温度与应变速率对 TC21 钛合金显微组织的影响显著, 应变速率越低, 组织球化现象越明显。高温变形过程中, TC21 钛合金的流变应力与 Zener-Hollomon 参数的指数形式呈线性关系。

关键词: TC21 钛合金; 热变形; 微观组织; Zener-Hollomon 参数

中图分类号: TG 14 文献标志码: A

Influence of high temperature deformation parameters on microstructure and properties of TC21 titanium alloy

ZHAO Yan-lei¹, LI Bo-long¹, ZHU Zhi-shou², NIE Zuo-ren¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The hot deformation behavior of TC21 titanium alloy was investigated at 880–950 ℃, in a strain rate range of 0.01–10 s⁻¹ and with the total deformation of 50%. The influence of hot deformation parameters on the flow stress and microstructure was investigated, and the constitutive equation was presented. The results indicate that the flow stress rises with increasing strain rate and decreasing temperature. The microstructure evolution is largely affected by deformation temperature and strain rate. The globalizing process is more obvious with decreasing strain rate. The flow stress of TC21 titanium alloy at high temperature can be represented by a Zener-Hollomon parameter with the exponent-type equation.

Key words: TC21 titanium alloy; hot deformation; microstructure; Zener-Hollomon parameter

钛合金具有强度高、质量轻和抗腐蚀等优良特性, 在航空、航天领域有着重要的应用^[1-2]。TC21 钛合金作为新型的高损伤容限合金具有高强度、高断裂韧性和低裂纹扩展速率等特点^[3]。双相钛合金的力学性能与微观组织密切相关, 热变形过程中的流变曲线是热变形行为的综合体现^[4-5]。TC21 钛合金在 900~1 100 ℃ 和应变速率为 0.01~50 s⁻¹ 范围内的高温变形行为表明: TC21 合金在相变点以上的变形机制为动态回复, 在相变点以下的变形机制为晶界滑移^[6]; 而原始组织为双态组织的 TC21 钛合金, 其试样的不同部位存在变形组织不均匀的现象, 在两相区高应变速率变形条件下, 普遍发生动态再结晶, 使组织细化^[7]。

目前, 国内外对 TC21 钛合金的高温变形研究相对较少。本文作者通过热模拟压缩试验, 研究高温变形参量对形变组织及力学行为的影响规律, 并建立本构模型, 为优化热加工工艺参数提供实验数据。

1 实验

TC21 钛合金的名义成分为 Ti-6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr-2Nb-0.1Si(质量分数, %), 其 β 相转变温度为 955 ℃ 左右。热压缩试样为 $d 7 \text{ mm} \times 10.5 \text{ mm}$ 的圆柱体。选取变形温度为 880、900、930 和 950 ℃, 应变速率

为 0.01、0.1、1 和 10 s^{-1} , 变形量为 50%。为减少试样两端的摩擦, 在压头和试样接触处夹一层石墨片, 压缩方向与试样轴方向平行。热变形后水淬, 对在不同温度、应变速率和应变下得到的流变应力数据进行摩擦修正^[8]和温度修正^[9]。变形后的试样沿平行于压缩轴方向对半剖开, 截取组织进行分析。

2 结果与讨论

2.1 TC21 钛合金的真应力—真应变曲线

图 1 所示为 TC21 钛合金的真应力—真应变曲线。从图 1 中可以看出: 在试验参数范围内, 同一应变速率下, 随着变形温度的升高, 流变应力逐渐变小, 说明越接近 β 单相区, 流变应力变得越小。然而, 同一变形温度下, 应变速率越大, 合金的应力就越高。随着应变速率的增加, 流变应力明显上升, 这说明材料

为正应变速率敏感材料。当应变速率小于 1 s^{-1} 时, 材料基本为稳态流动; 大于 1 s^{-1} 时, 流变应力在经历了加工硬化达到峰值后, 逐渐出现软化现象, 尤其是应变速率为 10 s^{-1} 时, 在 880 和 900 °C 应变量达到 0.1 时, 流变应力的峰值分别为 285 和 219 MPa。随着应变的增加, 流变应力软化明显, 而随着温度的升高, 流变应力的软化效果减弱。这种应力软化现象与变形过程中的温升效应和组织变化有关, 在热变形过程中, 热量如果来不及向周围环境释放, 就会导致局部温度升高而产生软化现象。

2.2 高温变形组织的演变

图 2~3 所示为 TC21 钛合金在不同热压缩变形条件下的显微组织。可以看出: 不同热变形条件下得到的组织形貌差别较大, 说明变形速率和变形温度对合金显微组织有显著影响。图 2 所示为 TC21 钛合金在应变速率为 10 s^{-1} 、不同形变温度下的微观组织。可

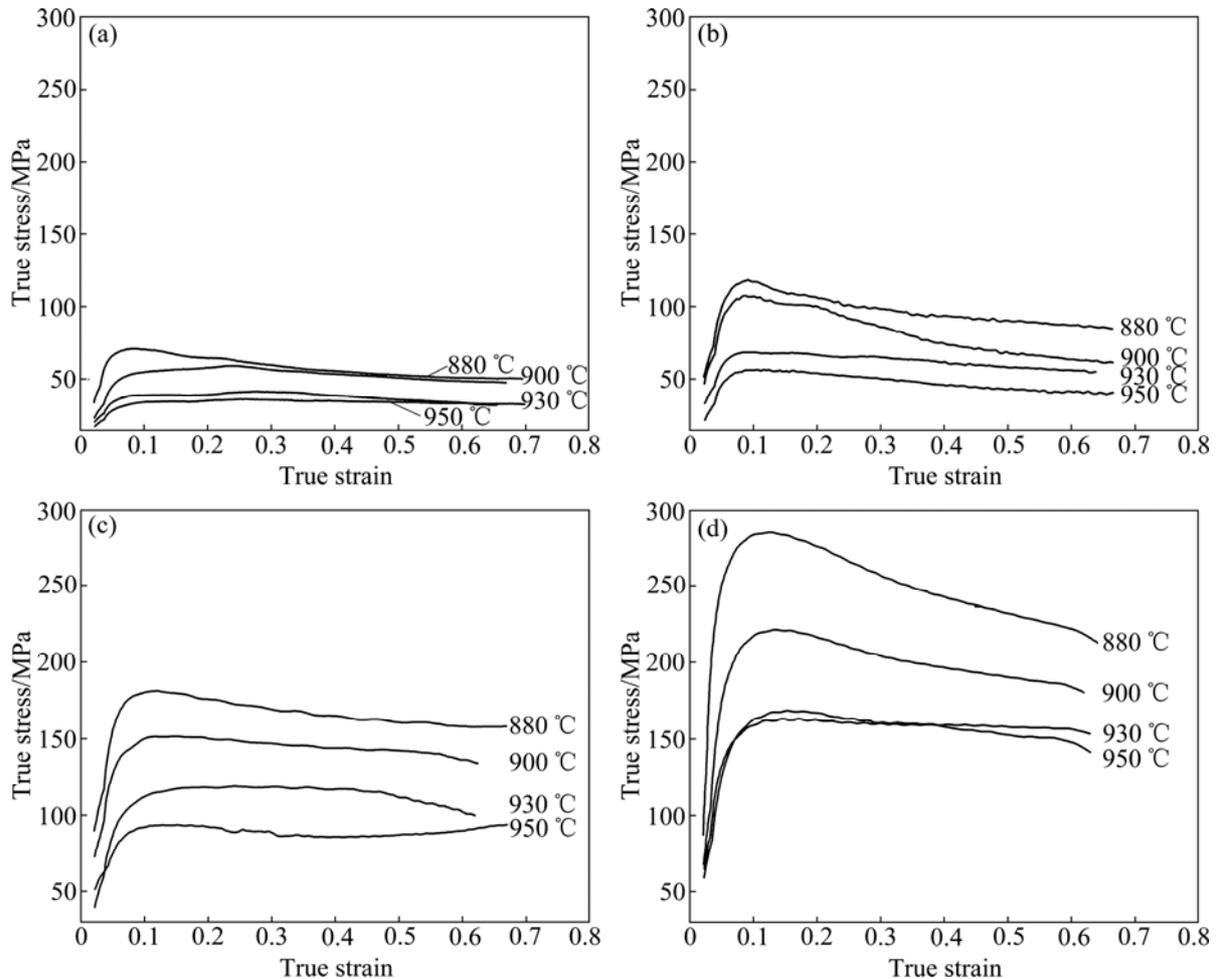


图 1 TC21 钛合金在不同应变速率下高温压缩变形的真应力—真应变曲线

Fig.1 True stress—true strain curves of TC21 alloy at various strain rates and temperatures: (a) 0.01 s^{-1} ; (b) 0.1 s^{-1} ; (c) 1 s^{-1} ; (d) 10 s^{-1}

可以看出：随着变形温度的升高，合金由最初的网篮状组织逐渐变为粗大的形变状带组织， α 相含量减少，并由条状转变为针状， β 相含量增加，组织形变特征明显，沿压缩方向趋于一致。图3所示为不同变形速率下 TC2 钛合金的 TEM 组织。可以看出：低应变速率下(图 3(a))形变组织存在等轴化现象，而在高应变速率下微观亚结构为典型的形变位错微带(图 3(b))，这

表明应变速率对 TC21 钛合金的影响显著。

2.3 热变形参数对合金峰值流变应力的影响

材料的流变应力是材料在热加工过程中一个很重要的参数，而变形温度和应变速率对流变应力有很大的影响。应力与应变速率和温度的关系通常采用下式表达：

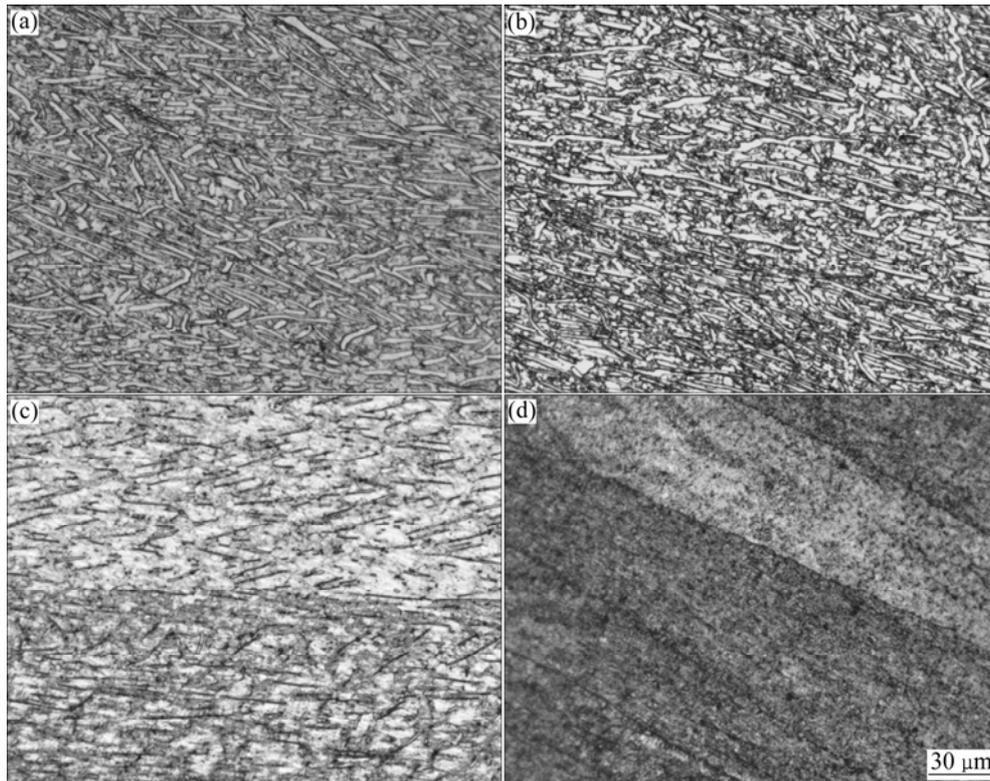


图2 TC21 钛合金在 10 s^{-1} 应变速率、不同温度下的热压缩组织

Fig.2 Optical micrographs of TC21 alloy after deformation at strain rate of 10 s^{-1} and different temperatures: (a) 880 °C ; (b) 900 °C ; (c) 930 °C ; (d) 950 °C



图3 在 930 °C 不同应变速率下 TC21 钛合金的 TEM 组织

Fig.3 TEM images of TC21 alloy after deformation at 930 °C : (a) 0.01 s^{-1} ; (b) 10 s^{-1}

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

式中: A_1 和 n 为与变形温度无关的常数; Q 为热变形激活能; R 为摩尔气体常数; T 为绝对温度; σ 为曲线的稳态流变应力, 或峰值应力, 或相应于某指定应变量的流变应力。

2.3.1 应变速率对峰值应力的影响

TC21 钛合金热变形应变速率对峰值应力的影响如图 4 所示。峰值应力随着应变速率的增加而增加, 表明随着应变速率的增加, 加工硬化也增加。同时, 变形时间的缩短阻碍动态再结晶的发生, 从而使流变应力增加。不同变形温度下, 峰值应力与应变速率的双对数呈线性关系。图 4 中各线的斜率在整个实验温度范围内基本不变, 平均值为 0.22, 说明实验温度在相变点以下的($\alpha+\beta$)相区时, 其变形特性差别不大。

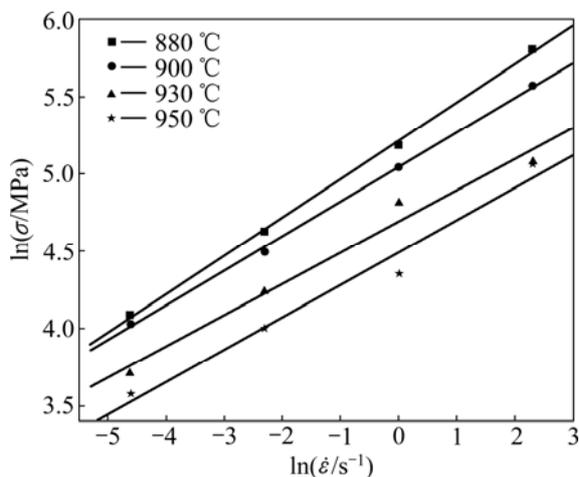


图 4 峰值应力与应变速率的双对数关系

Fig.4 Relationship between $\ln \sigma$ and $\ln \dot{\epsilon}$ of TC21 alloy at different temperatures

2.3.2 变形温度对峰值应力的影响

TC21 钛合金热变形温度对峰值应力的影响如图 5 所示。可见: 峰值应力随着变形温度的升高而下降, 这是由于随着变形温度的升高, 材料的热激活作用增强, 原子平均动能增大, 滑移的临界分切应力减小, 动态回复和动态再结晶等软化过程更容易进行, 从而降低了材料的流变应力。

由图 5 可知: 峰值应力的对数与温度的倒数之间基本呈线性关系, 即 $\ln \sigma$ 与 $1/T$ 呈线性关系, 由式(1)可以求得平均激活能 Q 为 525 kJ/mol。

2.4 TC21 钛合金热变形流变应力方程的建立

Zener-Hollomon 参数(简称 Z 参数)被广泛用来表

示变形温度及应变速率对变形过程的综合作用, 其物理意义是温度补偿的变形速率因子, 依赖于 σ , 而与 T 无关^[10]。

$$Z = \dot{\epsilon} \exp[Q/(RT)] \quad (2)$$

式(2)在较宽的应变速率和温度范围内与实验结果相符^[11]。将不同变形温度下 TC21 钛合金热变形的应变速率代入式(2), 得到不同的 Z 值, 绘制相应的 $\ln Z - \ln \sigma$ 关系, 如图 6 所示。

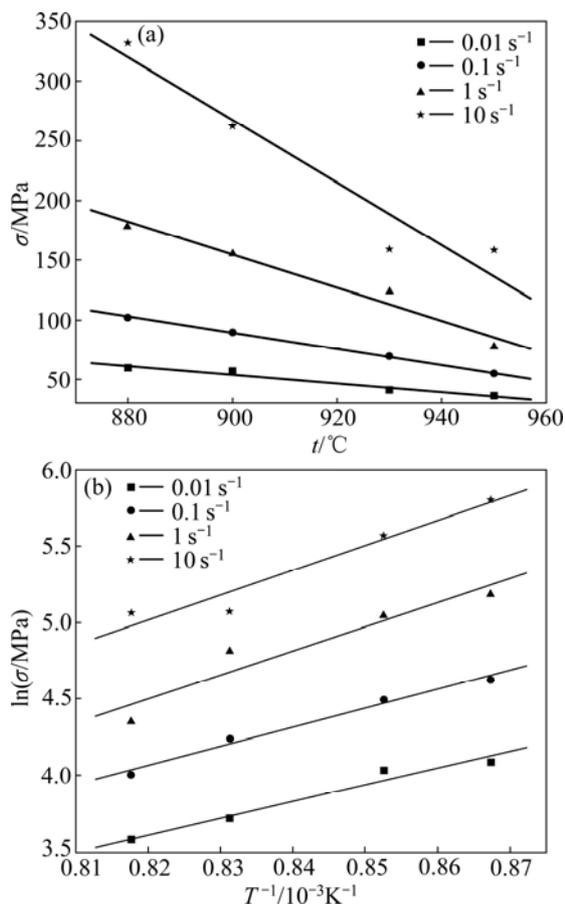


图 5 TC21 合金的应力—温度(a)和 $\ln \sigma - 1/T$ (b)关系图

Fig.5 Relationship between flow stress and temperature of TC21 alloy at different strain rates: (a) $\sigma - t$; (b) $\ln \sigma - 1/T$

随着 Z 值的增加, 实验用合金的热变形峰值应力相应增加, 其斜率 $n=4.535 \text{ MPa}^{-1}$, 截距 $\ln A=36.203 \text{ 24}$ 。 $\ln Z - \ln \sigma$ 的线性相关系数达到 0.99 以上, 表明 Z 参数的对数和峰值应力的对数关系较好地满足线性关系。

由图 6 可知: TC21 合金高温变形时的流变应力方程遵从 Zener-Hollomon 参数的指数函数形式, 因此 TC21 合金在高温变形时的应变速率、流变应力和温度之间的关系可用式(1)加以描述, 与前述应变速率和变形温度对峰值应力的影响一致。将求得的 A 、 n 和 Q

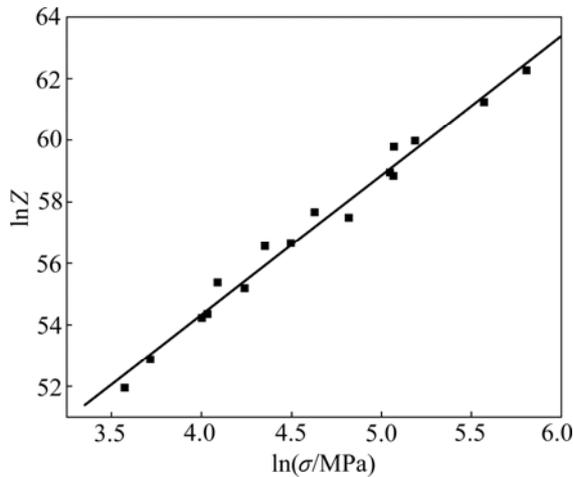


图6 TC21合金的 $\ln Z$ 与 $\ln \sigma$ 的关系

Fig.6 Relationship between $\ln Z$ and $\ln \sigma$ of TC21 alloy

等材料参数代入式(1), 得到 TC21 合金热压缩变形时的流变应力方程:

$$\dot{\varepsilon} = 5.28 \times 10^{15} \sigma^{4.535} \exp[-525 \times 10^3 / (RT)] \quad (3)$$

联立式(2)和式(3)可得到由 Zener-Hollomon 参数表示的 TC21 钛合金的本构关系:

$$Z = 5.28 \times 10^{15} \sigma^{4.535} \quad (4)$$

由上述公式计算得出的应力值与热压缩形变实测值比较接近, 相对误差值小于 15%, 如图 7 所示。图 7 中曲线为理论计算值, 曲线附近的数据点为实测值。可以看出: 在 880 时误差最大, 因为本构方程是基于低应力指数方程建立的, 在 80 时温度相对较低, 实际变形应力较大, 所以误差较大。

3 结论

1) 随着温度的降低和应变速率的增加, 合金的流变应力增加。当应变速率大于 1 s^{-1} 时, 流变应力在加工硬化达到峰值后, 逐渐出现软化现象, 而应变速率不大于 1 s^{-1} 时, 呈现稳态流动。

2) 变形温度和应变速率对合金的组织形态影响较大, 应变速率越低, 组织球化越明显。

3) 用 Zener-Hollomon 参数的指数函数形式能较好地描述 TC21 钛合金高温变形时的流变应力。

4) 采用所建立的本构方程计算 TC21 合金在温度为 880~950, 应变速率为 10^{-2} ~ 10 s^{-1} 范围内的流变应力时, 理论计算值与实测值比较接近, 相对误差不超过 15%。

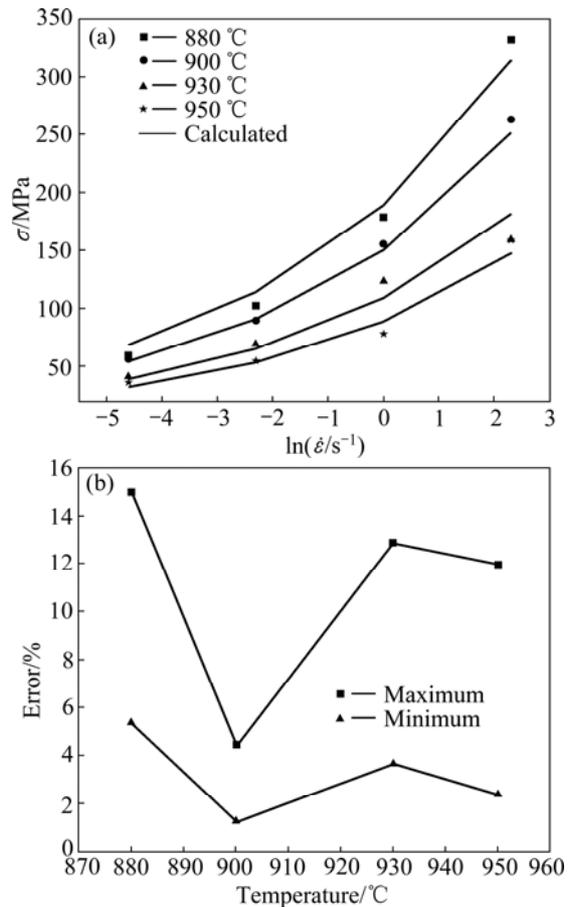


图7 流变应力理论计算值与实测值的比较

Fig.7 Predicted and measured flow stress: (a) σ — $\ln \dot{\varepsilon}$ curves; (b) Errors varied with deformation temperature

REFERENCES

- [1] BOYER R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213: 103-114.
- [2] YAMADA M. An overview on the development of titanium alloys for non-aerospace application in Japan[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213: 8-15.
- [3] 赵永庆, 曲恒磊, 冯亮. 高强高韧损伤容限型钛合金 TC21 研制[J]. 钛工业进展, 2004(2): 22-24.
ZHAO Yong-qing, QU Heng-lei, FENG Liang. Research on high strength, high toughness and high damage-tolerant titanium alloy-TC21[J]. Titanium Industry Progress, 2004(2): 22-24.
- [4] LUETJERING G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of $(\alpha+\beta)$ titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 243: 32-45.
- [5] PETERS P O, LÜETJERING G, KOREN M, PUSCHNIK H, BOYER R R. Processing microstructure and properties of β -CEZ[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213: 71-80.

- [6] FENG Liang, QU Heng-lei, ZHAO Yong-qing, LI Hui, ZHANG Ying-nan, ZENG Wei-dong. High temperature deformation behavior of TC21 alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2004, 8: 11-13.
- [7] 曲恒磊, 赵永庆, 冯亮, 奚正平, 李辉, 夏源明. TC21钛合金不同变形条件下的显微组织研究[J]. 材料工程, 2006(增刊1): 274-277.
QU Heng-lei, ZHAO Yong-qing, FENG Liang, XI Zheng-ping, LI Hui, XIA Yuan-ming. Study on microstructures of TC21 alloy under different deformation conditions [J]. Journal of Materials Engineering, 2006(s1): 274-277.
- [8] 张伟红. NiTi合金热压缩实验数据的修正及其本构方程[J]. 金属学报, 2006, 42: 1036-1040.
ZHANG Wei-hong. Correction of hot compression test data and constitutive equation of NiTi alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42: 1036-1040.
- [9] PRASAD Y V R K, RAO K P. Processing maps and rate controlling mechanisms of hot deformation of electrolytic tough pitch copper in the temperature range 300-950 [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 391: 141-150.
- [10] 张红钢, 张辉, 刘婉容, 林启权, 林高用, 彭大署. C194铜合金热压缩变形流变应力[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2003, 25: 82-86.
ZHANG Hong-gang, ZHANG Hui, LIU Wan-rong, LIN Qi-quan, LIN Gao-yong, PENG Da-shu. Rheologic stress of C194 copper alloy under hot compression deformation[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2003, 25: 82-86.
- [11] WONG W A, JONAS J J. Aluminium extrusion as a thermally activated process[J]. Trans AIME, 1968, 242: 2271-2280.

(编辑 方京华)