

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.010

TB8 钛合金热变形行为及微观组织演变研究

刘方圆^{1,2}, 张健³, 柳涵虚⁴, 张晓斌^{1,2}, 唐伟^{1,2}, 孟祥庆^{1,2}, 陈明和⁴

(1. 天津市紧固连接技术企业重点实验室, 天津 300300;

2. 航天精工股份有限公司 天津 300300;

3. 中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333001;

4. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:对 TB8 钛合金的高温拉伸流变行为展开研究。根据 TB8 钛合金在不同温度和应变速率范围内的真实应力-应变曲线, 构建优化的 Johnson-Cook 本构模型, 同时对不同变形条件下的微观组织演变规律进行分析。研究结果表明: 升高温度、降低应变速率及增加应变量能提高材料塑性, 降低流变应力。优化的 Johnson-Cook 本构模型可以精准预测 TB8 钛合金的高温流变行为。

关键词: TB8 钛合金; 高温流变行为; Johnson-Cook 本构模型; 微观组织

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0056-06

Research on Hot Deformation Behaviour and Microstructure Evolution of TB8 Titanium Alloy

LIU Fangyuan^{1,2}, ZHANG Jian³, LIU Hanxu⁴, ZHANG Xiaobin^{1,2}, TANG Wei^{1,2}, MENG Xiangqing^{1,2}, CHEN Minghe⁴

(1. Tianjin Key Laboratory of Fastening Joint Technology Enterprise, Tianjin 300300, China;

2. Aerospace Seiko Co., Ltd., Tianjin 300300, China;

3. China Helicopter Design and Research Institute, Jingdezhen 333001, China;

4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper investigates the high-temperature tensile rheological behavior of TB8 titanium alloy. Based on the true stress-strain curves of TB8 titanium alloy at different temperatures and strain rates, an optimized Johnson-Cook constitutive model was developed, and the evolution patterns of microstructures under different deformation conditions were analyzed. The results indicate that temperature increasing, strain rate reducing and strain amount increasing can enhance the material's plasticity and reduce the rheological stress. The optimized Johnson-Cook constitutive model can accurately predict the high-temperature rheological behavior of the TB8 titanium alloy.

Keywords: TB8 titanium alloy; high temperature rheological behaviour; Johnson-Cook constitutive model; microstructure

0 引言

TB8 钛合金是一种 β 型钛合金, 其名义成分为 Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.2Si, 具有质量轻、强度高、耐磨损及与复合材料粘接效果好等优点, 常用于制造各种高使用寿命飞机发动机结构件、飞机结构件等^[1]。但其常温下加工精度低, 成形零件难以达到所需外形, 使其在复杂形状零件上的应用严重受限^[2]。因此需要针对 TB8 钛合金高温变形行为及变形机制进行研究^[3-5]。

建立钛合金高温本构模型是研究钛合金高温

变形行为的基础, 其主要用于描述在不同温度和应变速率下的钛合金应力应变关系^[6]。史文祥等^[7]针对 TB8 钛合金前缘蒙皮热成形时面临的高回弹与易破裂问题提出了一种基于高温塑性与应力松弛效应的多步热成形工艺。通过高温拉伸试验建立材料本构模型, 并结合有限元仿真优化成形参数, 成功实现 TB8 钛合金蒙皮的高精度成形。孙晓军等^[8]针对 TB8 钛合金十二角螺栓热镦成形工艺, 通过不同温度和应变速率下的等温压缩试验获取其真实应力-应变曲线, 分析热变形行为, 最终确定最优工艺组合并进行工艺试验, 成

基金项目: 天津市紧固连接技术企业重点实验室开发课题项目(TKLF2021-01-B-02)

第一作者简介: 刘方圆(1989—), 女, 山东菏泽人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为航空用紧固件设计与工艺研究, 601868410@qq.com。

功验证了模拟结果的准确性。杨韵琴等^[9]针对 TB8 钛合金热压缩过程中动态再结晶组织的演变机制,通过 Gleeble 3500 热模拟试验机结合有限元软件模拟了 TB8 钛合金的热等温锻造过程热压缩过程,成功预测了动态再结晶晶粒的体积分数和尺寸变化规律,最终验证模拟结果,揭示出等效应力分布不均匀性及热加工参数对组织演变的显著影响。吴韬文等^[10]建立了 TC4 钛合金在高温下的统一黏塑性本构模型,准确预测了材料在高温下的变形行为。杨满足等^[11]通过等温恒速率热压试验获得了 TB8 钛合金高温塑性变形规律,并在应变量的基础上建立了 Arrhenius 本构模型,该模型可良好地预测不同变形条件下材料流变应力。周亚利等^[12]建立了含应变补偿的 Arrhenius 本构模型,并准确预测了 TB8 钛合金的流变行为。张海鑫等^[13]针对 TC4 钛合金高温拉伸分别使用 Grosman 方程和改进的 Hooke Law 方程描述塑性变形阶段和弹性变形阶段,建立本构方程并良好地预测了 TC4 钛合金整个拉伸过程的流变行为。杨晓康等^[14]建立了修正 Johnson-Cook(J-C)本构模型描述 TC17 钛合金热变形过程中的流变行为,其计算值与实验数据相关系数 R 为 0.986。

本文通过高温拉伸试验,讨论了温度、应变速率、应变对 TB8 钛合金高温流变行为和微观组织的影响,获得了 TB8 钛合金高温下的真实应力-应变曲线,建立了 TB8 钛合金的优化 J-C 本构模型。

1 实验材料和方法

实验采用 TB8 钛合金轧制成型板材,为 β 型钛合金,其化学成分如表 1 所示。厚度为 0.5 mm,采用激光平行轧制方向切割成工字形拉伸试验件,尺寸如图 1 所示。

表 1 TB8 钛合金质量分数 单位: %

Ti	Mo	Al	Nb	Si	Fe
余量	15.31	3.22	2.85	0.16	0.03

拉伸实验选用 UTM5504X 型电子万能试验拉伸机。实验采用三段式垂直对开高温炉加热,使用 PID 自动控温仪进行温度控制,最高温度可达 950 $^{\circ}\text{C}$,控制精度为 ± 1 $^{\circ}\text{C}$ 。

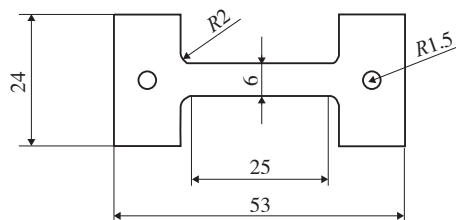


图 1 实验用 TB8 钛合金拉伸样品尺寸

在 550 $^{\circ}\text{C}$ 、575 $^{\circ}\text{C}$ 、600 $^{\circ}\text{C}$ 、625 $^{\circ}\text{C}$ 下分别以 0.001 s^{-1} 、0.010 s^{-1} 、0.100 s^{-1} 的固定应变速率进行高温拉伸试验。每组实验至少重复 3 次,实验前将试样保温 10 min,实验过程中试样拉断为止,记录拉伸过程中力-位移数据。固定真实应变 0.1、0.2、0.3 重复实验,实验后迅速取出试样进行水冷,以便观察其微观组织。

2 高温流变行为分析

通过 UTM5504X 型电子万能试验拉伸机采集到的力-位移数据,根据式(1)和式(2)转换为真实应力-应变曲线。

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right) \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{l}{l_0} = \frac{F}{A_0} \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right) \quad (2)$$

式中: ε 为真实应变; l_0 为试件标距; Δl 为试件拉伸量; σ 为真实应力; F 为试件所受拉力; A_0 为试件的初始横截面积; A 为试件的瞬时横截面积。

实验温度 550 $^{\circ}\text{C}$ ~ 625 $^{\circ}\text{C}$, 应变速率 0.001 ~ 0.100 s^{-1} 的 TB8 钛合金高温拉伸真实应力-应变曲线如图 2 所示。

在弹性阶段,由于加工硬化现象,流变应力随着应变增加而迅速增加。当应变超过一定值后材料进入屈服阶段,此时材料内部发生动态再结晶,软化作用开始变得显著,流变应力增加速度变慢,达到峰值后开始降低。随着应变值超过临界应变,材料内部出现微小孔洞并逐渐长大,材料出现颈缩断裂现象。根据真实应力-应变曲线可以得出:在相同应变速率下,材料的峰值应力和屈服应力随着温度升高而下降。这是因为提高温度会使材料软化作用更加显著,消除部分应变硬化,材料中原子的动能提升,原子间结合力减弱,原子更容易在外力作用下离开原平衡位置。

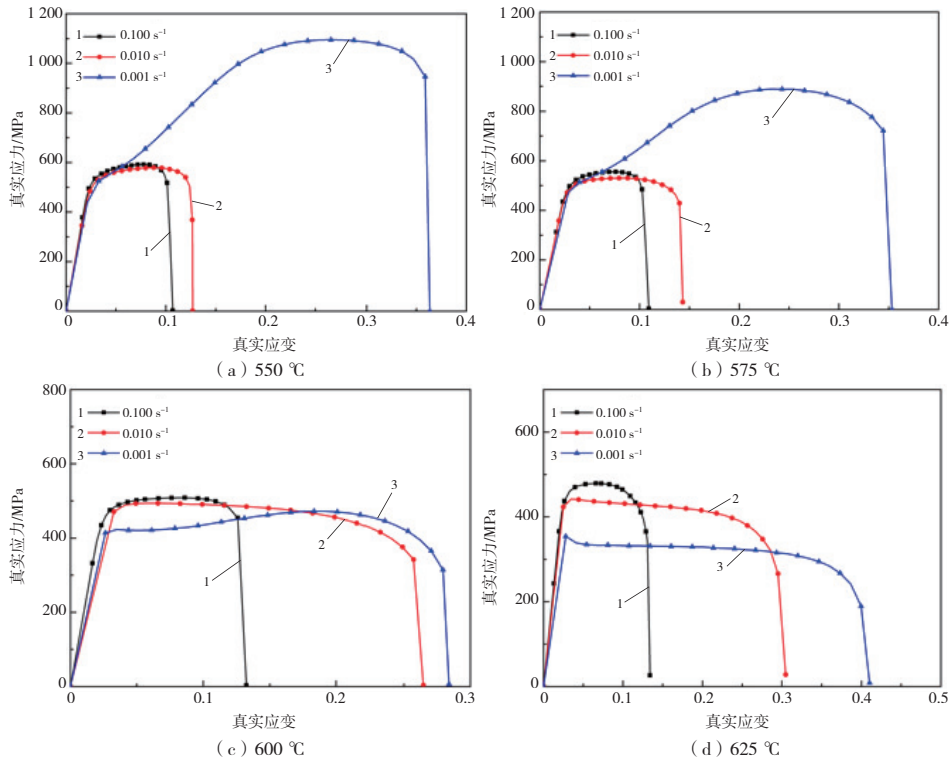


图2 不同温度下TB8钛合金拉伸真实应力-应变曲线

在 550 °C ~ 575 °C 下,随着应变速率升高,材料的峰值应力呈现先大幅下降后略微上升趋势。这是因为温度相对较低,此时材料内部软化效应不明显。在应变速率为 0.001 s⁻¹ 时,材料在屈服阶段初始时软化作用仍显著低于硬化作用,随着应变值进一步增大,软化作用开始占据主导作用,流变应力增幅开始放缓,最终达到峰值。而当应变速率提升至 0.100 s⁻¹ 时,材料形变速度太快,结合温度因素,材料内部再结晶时间不充分,使得材料中位错难以消除,流变应力相比应变速率 0.010 s⁻¹ 时略微提升。

在 600 °C ~ 625 °C 下,随着应变速率升高,材料峰值应力有升高趋势,因为更高的应变速率会导致材料内部动态再结晶时间更短,流变应力随之提升。在此温度下材料的软化作用已经较为明显,因此当应变速率为 0.001 s⁻¹ 时,相比于 550 °C ~ 575 °C,材料流变应力更早达到峰值且显著降低。

3 TB8 在不同温度下的本构方程

本构方程用于描述材料在外力作用下的应力-应变关系,可以预测在不同加载条件下材料的行为,对于结构件的设计和有限元仿真至关重要。J-C模型在预测材料本构关系中应用十分广泛,

LIN 等^[15]提出了一个改进的 J-C 模型,并成功将其应用于预测高温下典型高强度合金钢流变行为,该模型考虑了温度、应变速率、应变对金属热变形过程的影响,并将应变速率和温度的影响耦合,其模型如式(3)所示。

$$\sigma = (A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2) (1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*) \exp[(\lambda_1 + \lambda_2 \ln \dot{\varepsilon}^*) T^*] \quad (3)$$

式中: A_1 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 λ_1 及 λ_2 均为方程系数; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}}$, 其中 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}$ 为参考应变速率;

$T^* = T - T_{\text{ref}}$, 其中 T 为试验温度, T_{ref} 为参考温度。

选取 550 °C 和 0.100 s⁻¹ 为参考温度和参考应变速率,在此条件下,式(3)可以简化为 $\sigma = A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2$

选取该条件下塑性段真实应力-应变曲线,通过拟合可以得到 A_1 、 B_1 和 B_2 的值。引入不同应变速率,则式(3)改写为

$$\sigma = (A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2) (1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (4)$$

分别选取应变速率为 0.010 s⁻¹ 和 0.001 s⁻¹ 的塑性段真实应力-应变曲线,通过拟合得到 A_1 、 B_1 、 B_2 和 C_1 的值。

改变温度,仍选取 0.100 s⁻¹ 为应变速率,

式(3)则改写为

$$\sigma = (A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2) \exp(\lambda_1 T^*) \quad (5)$$

通过拟合得到 A_1 、 B_1 、 B_2 和 λ_1 的值,再改变

应变速率, λ_1 不变,拟合出 A_1 、 B_1 、 B_2 和 λ_2 的值。

结果如表 2 所示。

表 2 TB8 钛合金高温流变本构方程参数

温度/℃	应变速率/ s^{-1}	A_1	B_1	B_2	C_1	λ_1	λ_2
550	0.100	4.9	4 376.0	-30 250.0	—	—	—
550	0.010	368.5	2 502.0	-15 350.0	-0.100 0	—	—
550	0.001	240.2	4 002.0	-6 619.0	-0.071 1	—	—
575	0.100	311.9	4 736.0	-35 140.0	—	0.006 64	—
575	0.010	10.4	1 021.1	-725.1	-0.353 9	0.006 64	-0.009 90
575	0.001	31.3	3 426.0	-5 659.0	-0.561 3	0.006 64	0.011 55
600	0.100	227.8	979.0	-6 416.2	—	0.012 75	—
600	0.010	37.7	234.9	-1 659.6	-0.440 0	0.012 75	0.009 32
600	0.001	4.1	21.0	91.6	-0.500 6	0.012 75	-0.001 80
625	0.100	270.2	1 976.5	-1 590.3	—	0.004 81	—
625	0.010	445.9	-91.2	-279.5	0.333 2	0.004 81	-0.006 12
625	0.001	88.1	1.7	-47.7	0.153 7	0.004 81	-0.006 21

截取各个条件下的高温拉伸塑性段真实应力-应变曲线,与本构方程结果进行比较,结果如

图 3 所示。

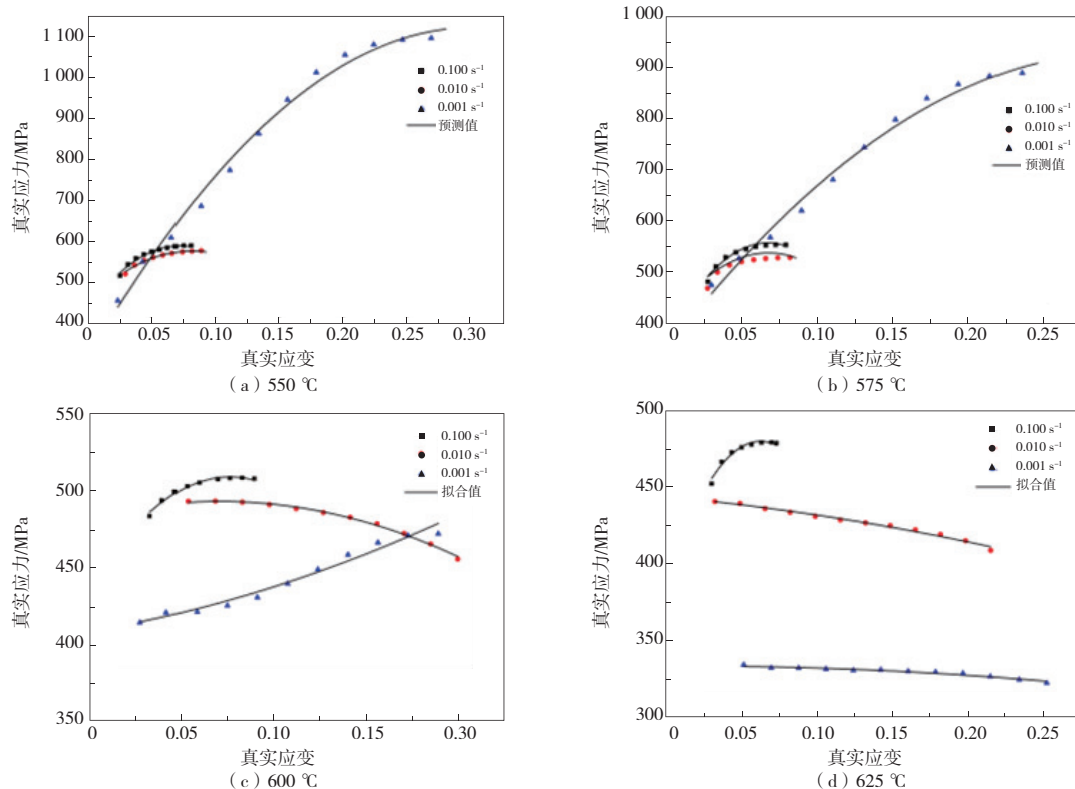


图 3 J-C 本构模型拟合值(曲线)与实验值(点)对比

对优化 J-C 模型的预测值和实验值进行相关性分析,如图 4 所示。采用相关系数 R 和平均相对误差 A_{ARE} 来计算预测精度,公式如式(6)和式(7)所示。 R 为 0.998,平均相对误差 $A_{ARE} = 0.70\%$,优化 J-C 模型较好地预测了不同温度和应变速率下的真实应力-应变关系。

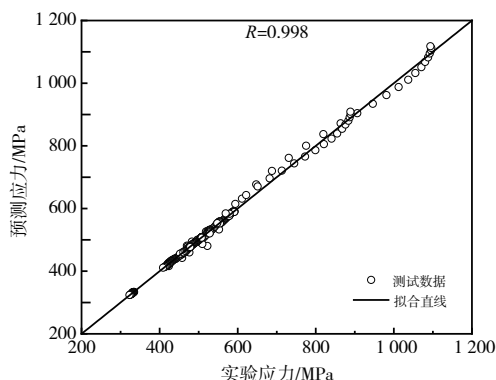


图 4 TB8 钛合金本构模型预测值相关性分析

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 (P_i - \bar{P})^2}} \quad (6)$$

$$A_{ARE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(E_i - P_i)}{E_i} \right| \quad (7)$$

式中: E_i 为实验应力,MPa; $\bar{E}$ 为实验应力平均值,MPa; P_i 为预测应力值,MPa; $\bar{P}$ 为预测应力平均值,MPa; N 为样本数。

4 TB8 钛合金高温变形微观组织演变

为了分析高温变形对 TB8 微观组织演变的影响,对变形温度在 550 °C ~ 625 °C、应变速率在 0.001 ~ 0.100 s⁻¹ 条件下的材料进行了定应变拉伸试验。图 5 为 TB8 钛合金初始微观组织,图中 RD(rolling direction) 为金属板材轧制基准方向,TD(transverse directon) 为轧制横向,可以看到初始组织主要由六边形 β 相等轴晶粒组成。

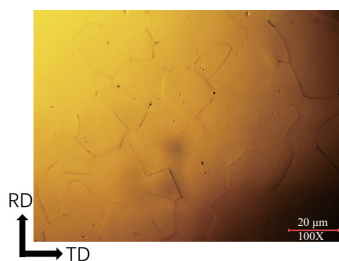


图 5 TB8 钛合金初始微观组织

图 6 为变形温度 550 °C ~ 625 °C、真实应变为 0.2、应变速率为 0.001 s⁻¹ 下的 TB8 钛合金微观组织。可以看到随着温度升高材料平均晶粒尺寸逐渐增大,此时材料晶界迁移能力增强,材料的流变应力随之下降^[16-17]。

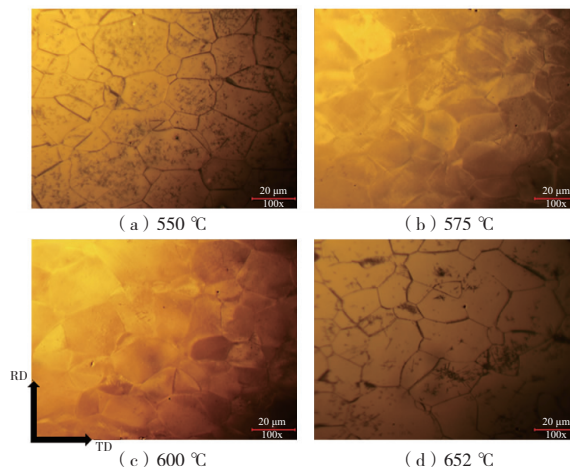


图 6 不同温度对 TB8 钛合金微观组织的影响

图 7 为变形温度 625 °C、真实应变为 0.2、应变速率 0.001 ~ 0.100 s⁻¹ 下的 TB8 钛合金微观组织。随着应变速率降低,尺寸晶粒数量上升,外形更接近正六边形,这是因为应变速率降低,变形时间增长,材料再结晶更加充分^[18],材料软化效应更明显,材料流变应力减小,塑性增强^[19]。

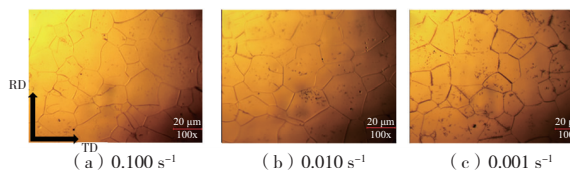


图 7 不同应变速率对 TB8 钛合金微观组织的影响

图 8 为变形温度 625 °C、应变速率 0.001 s⁻¹ 下真实应变分别为 0.1、0.2、0.3 时的 TB8 钛合金微观组织。随着应变提升,晶粒沿拉伸方向逐渐伸长,表明晶界滑移是 TB8 钛合金的主要塑性变形机制。金属内部动态再结晶行为导致晶界处存在小尺寸晶粒^[20],使得金属塑性增强,流变应力减小。

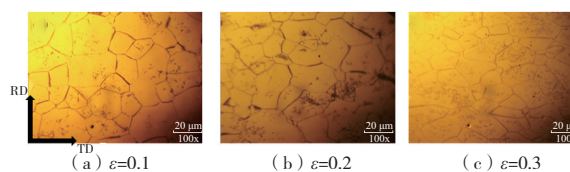


图 8 不同应变变量对 TB8 钛合金微观组织的影响

5 结语

本文通过高温拉伸实验,获得了TB8钛合金在550℃~625℃及0.001~0.100 s⁻¹应变速率下的真实应力-应变曲线及微观组织。基于高温拉伸数据构建了优化J-C本构方程,较好地预测了不同实验条件下真实应力-应变关系。分析了不同实验条件下微观组织的演变以及对材料高温流变性能的影响,得到以下结论。

1) 相同应变速率下,随着实验温度的升高,材料峰值流变应力逐渐降低。在550℃~575℃之间、应变速率大于0.001 s⁻¹时,材料峰值流变应力对应变速率不敏感,应变速率为0.001 s⁻¹时材料获得最大峰值流变应力。在600℃~625℃之间,材料峰值流变应力随着应变速率降低而逐渐降低。

2) 升高温度、降低应变速率和增加应变量会促进TB8钛合金动态再结晶,提升软化作用,使流变应力降低。

3) 优化J-C本构模型能较好地预测了TB8钛合金在550℃~625℃及0.001~0.100 s⁻¹应变速率下的流变行为,对流变应力的预测值与实验值的相关性 R 为0.998,平均相对误差 $A_{\text{ARE}}=0.70\%$ 。

参考文献:

- [1] SUN J F, ZHANG Z W, ZHANG M L, et al. Microstructure evolution and their effects on the mechanical properties of TB8 titanium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 663: 769-774.
- [2] 徐远刚,董洪波,姜智勇,等. TB8钛合金形变诱导超塑性研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(6): 94-101.
- [3] ZHOU D Y, GAO H, GUO Y H, et al. High-temperature deformation behavior and microstructural characterization of Ti-35421 titanium alloy[J]. Materials, 2020, 13(16): 3623.
- [4] WU F Y, XU W C, JIN X Z, et al. Study on hot deformation behavior and microstructure evolution of Ti55 high-temperature titanium alloy[J]. Metals, 2017, 7(8): 319.
- [5] 田宇兴,李述军,郝玉琳,等. Ti2448合金高温变形行为及组织演变机制的转变[J]. 金属学报, 2012, 48(7): 837-844.
- [6] MA L X, WAN M, LI W D, et al. Superplastic deformation mechanical behavior and constitutive modelling of a near- α titanium alloy TNW700 sheet[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 817: 141419.
- [7] 史文祥,章文亮,陈明和,等. TB8钛合金复杂外形浆叶前缘蒙皮多步热成形工艺研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 84-91.
- [8] 孙晓军,石大鹏,柯书忠,等. TB8钛合金热变形行为及热敏性能研究[J]. 制造技术与机床, 2024(11): 115-121.
- [9] 杨韵琴,张文玮,谭元标,等. TB8钛合金热压缩过程中动态再结晶组织的模拟[J]. 热处理, 2021, 36(4): 6-11.
- [10] 吴韬文,王宁,陈明和,等. TC4钛合金高温流变行为及微观组织演变研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(6): 36-39.
- [11] 杨满足,张建国,贾安涛,等. 超高强TB8钛合金高温塑性变形流变应力分析与本构方程[J]. 金属热处理, 2015, 40(1): 170-174.
- [12] 周亚利,杨秋月,张文玮,等. 具有层片状 α 相组织的TB8钛合金热变形行为及本构方程[J]. 材料工程, 2021, 49(1): 75-81.
- [13] 张海鑫,杨沫,于娟,等. TC4钛合金高温热拉伸行为及本构方程研究[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(2): 34-36, 74.
- [14] 杨晓康,王快社,王萌,等. TC17钛合金热变形行为及其修正J-C本构模型[J]. 金属热处理, 2018, 43(10): 20-24.
- [15] LIN Y C, CHEN X M, LIU G. A modified Johnson-Cook model for tensile behaviors of typical high-strength alloy steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(26): 6980-6986.
- [16] 李萍,张悦,黄晓雨,等. 变形温度对TB8钛合金梯度挤压组织与性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2023, 51(3): 70-76.
- [17] ZHOU C K, CAO F, YANG Z R, et al. Dynamic recrystallization constitutive model and texture evolution of metastable β titanium alloy TB8 during thermal deformation[J]. Materials, 2024, 17(7): 1572.
- [18] ZHANG W W, YANG Q Y, TAN Y B, et al. Simulation and experimental study of dynamical recrystallization kinetics of TB8 titanium alloys[J]. Materials, 2020, 13(19): 4429.
- [19] CHEN W, GUO B, GUO Y, et al. Effect of aging temperature on dynamic mechanical properties of TB8 titanium alloy[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(5): 05410.
- [20] YANG Q Y, MA M, TAN Y B, et al. Microstructure and texture evolution of TB8 titanium alloys during hot compression[J]. Rare Metals, 2021, 40(10): 2917-2926.

收稿日期: 2023-12-26