

高温、高应变率下 Ti6321 合金的力学行为及本构模型

周哲¹, 王琳^{1,2}, 安瑞¹, 赵平洛¹, 徐雪峰¹, 宁子轩¹, 程焕武¹, 程兴旺¹

(1. 北京理工大学, 北京 100081)

(2. 冲击环境材料技术国家级重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了研究 Ti6321 合金在高温、高应变率下的力学行为, 采用分离式霍普金森压杆装置对 Ti6321 合金进行室温(25 ℃)和高温(200、400、600 ℃)动态压缩试验, 对其在高温和高应变率下的力学性能、应变率敏感性和温度敏感性进行了研究。采用聚类全局优化算法构建了双态组织 Ti6321 合金在 10^3 s^{-1} 下的 Johnson-Cook 本构模型。结果表明, 双态组织 Ti6321 合金在室温和高温下均存在应变率硬化效应, 但试验温度对应变率的影响比应变率的影响更大。随着压缩试验温度升高, 应变率显著降低, 温度敏感因子升高。Johnson-Cook 模型拟合的曲线与实验曲线吻合良好, 可以用于 Ti6321 合金高应变率下的力学仿真计算。

关键词: Ti6321 合金; 应变率敏感性; 温度敏感性; Johnson-Cook 本构模型

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2020)05-001-06

Mechanical Behavior and Constitutive Model of Ti6321 Alloy under High Temperature and High Strain Rate

Zhou Zhe¹, Wang Lin^{1,2}, An Rui¹, Zhao Pingluo¹, Xu Xuefeng¹, Ning Zixuan¹, Cheng Huanwu¹, Cheng Xingwang¹

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. National Key Laboratory of Science and Technology on Materials under Shock and Impact, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the mechanical behavior of Ti6321 alloy under high temperature and high strain rate, the dynamic compression behavior of Ti6321 alloy at room temperature(25 ℃) and high temperature(200, 400, 600 ℃) was investigated using a Split Hopkinson Pressure Bar. The mechanical properties, strain rate sensitivity and temperature sensitivity under high temperature and high strain rate were studied. A clustering global optimization algorithm was used to construct the Johnson-Cook constitutive model of Ti6321 alloy with bimodal microstructure under the strain rate of 10^3 s^{-1} . The results demonstrate that Ti6321 alloy has a strain rate hardening effect both at room temperature and high temperature, but the effect of strain rate on flow stress is not as obvious as that of test temperature. As the test temperature increases, the flow stress decreases significantly, and the temperature sensitivity factor increases. The curve fitted by the Johnson-Cook constitutive model is in good agreement with the experimental curve, and the model can be used for mechanical simulation of Ti6321 alloy at high strain rates.

Key words: Ti6321 alloy; strain rate sensitivity; temperature sensitivity; Johnson-Cook constitutive model

钛合金具有比强度高、密度小、耐腐蚀性好、耐高低温性能好等优点, 在海洋领域有着广泛的应用, 常用于高压容器、深潜器的耐压壳体等^[1]。作

为结构件材料, 钛合金在服役过程中会受到高速载荷的冲击^[2], 由于其力学性能复杂, 对温度和应变率具有强烈的敏感性, 因此, 对钛合金在高温和高应变率下的力学响应进行研究是非常有意义的。

关于钛合金在高温和高应变率下的力学行为, 国内外已经进行了大量的研究, 但主要集中在 $\alpha + \beta$ 型钛合金上, 如常见的 TC4 钛合金^[3-5]。Lee 等^[6]

收稿日期: 2020-07-05

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室基金资助项目 (YBK17-06)

通信作者: 王琳(1971—), 女, 博士, 副教授。

对 TC4 钛合金在不同应变率和不同温度下变形和断裂行为进行了研究,讨论了应变、应变率、温度对力学行为的影响,并将 3 种因素耦合建立了 TC4 钛合金的 Johnson-Cook(以下简称 J-C)本构方程。此外也有其他 $\alpha + \beta$ 型钛合金,如 TC11、TC16、TC17、TC18 等钛合金在高温或高应变率下的力学响应也都得到了深入的研究,并给出了相应的本构参数^[7-10]。关于 α 型和 β 型钛合金的应变率增塑、增强、热软化等效应研究相对来说较少。易湘斌等^[11]利用分离式霍普金森压杆装置对 TB6 钛合金在应变率 $3\ 000\ \text{s}^{-1}$ 、温度 $550 \sim 850\ \text{°C}$ 下的力学性能进行了测试,发现 TB6 钛合金在高应变率下具有应变率强化效应,并且随着试验温度的升高,热软化效应逐渐增强。Ran 等^[12]研究了 Ti55511 合金在高应变率下的变形和断裂行为,发现该合金具有明显的应变率硬化和应变率敏感性。张潇等^[13,14]同样利用分离式霍普金森压杆试验得到了 TA15 钛合金在高应变率加载下的变形规律。

Ti6321 合金是 20 世纪 80 年代我国自主研发的一种新型 Ti-Al-Nb-Zr-Mo 系近 α 型钛合金,除了具有传统钛合金的优点外,还具有高强、可焊的特点,已经得到了越来越多的关注^[15,16]。但关于 Ti6321 合金的研究大多集中在热处理工艺、准静态下力学性能、焊接性能或织构等方面^[17-20],很少提及 Ti6321 合金的动态力学行为。作为常在极端环境下服役的结构件材料,研究 Ti6321 合金在高温、高应变率下的力学性能及本构模型,对其进一步的应用具有重要意义。本研究对双态组织 Ti6321 合金进行室温和高温动态压缩试验,研究其动态力学性能及应变率效应、温度效应。采用聚类全局优化算法建立了双态组织 Ti6321 合金的 J-C 本构方程。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为 Ti6321 合金,其化学成分如表 1 所示。利用差示扫描量热仪(DSC)测得合金的相变点为 $970\ \text{°C}$ 。对 Ti6321 合金进行 $960\ \text{°C} \times 1\ \text{h/AC}$ 热处理,以获得力学性能较优异的双态组织试样。

表 1 Ti6321 合金的化学成分(w%)

Table 1 Chemical composition of Ti6321 alloy

Al	Nb	Zr	Mo	O	N	H	Ti
6.0	3.0	2.0	1.0	0.113	0.060	0.001 6	Bal.

1.2 实验方法

对双态组织 Ti6321 合金试样分别进行准静态压缩和动态压缩试验。准静态压缩试验在 INSTRON 电子万能试验机上进行,试样尺寸为 $\phi 5\ \text{mm} \times 8\ \text{mm}$,应变率为 $0.001\ \text{s}^{-1}$ 。动态压缩试验在分离式霍普金森压杆装置上进行,试验温度分别为 25 、 200 、 400 、 $600\ \text{°C}$,试样尺寸为 $\phi 5\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ 。高温下动态压缩试验利用热电偶丝通过直流电源对试样进行加热,并设置同步装置,以消除温度梯度带来的影响。试验过程中通过调节气压大小,让子弹以不同的速度撞击入射杆对试样进行加载,获得 $900 \sim 3\ 000\ \text{s}^{-1}$ 应变率范围内的动态力学性能。通过粘贴在入射杆、透射杆上的应变片记录入射波、反射波、透射波的电压信号,进而换算成应变信号,根据一维应力波理论计算得到真应力-应变曲线。

2 结果与讨论

2.1 Ti6321 合金在高应变率下的力学响应

图 1 为室温下 Ti6321 合金在准静态载荷($0.001\ \text{s}^{-1}$)和动态载荷($900 \sim 3\ 000\ \text{s}^{-1}$)下的典型真应力-应变曲线。在准静态和动态载荷下,真应力-应变曲线都是由弹性段和塑性段组成,2 种曲线中都呈现出一定的应变硬化效果。在准静态条件下屈服应力和流变应力分别约为 $850\ \text{MPa}$ 和 $1\ 100\ \text{MPa}$,而在动态加载下,所有应变率下材料的屈服应力和流变应力均在 $1\ 300\ \text{MPa}$ 以上。因此,与准静态加载条件相比,在动态加载条件下屈服应力和流变应力有所增加,说明 Ti6321 合金具有明显的应变速率硬化效应。

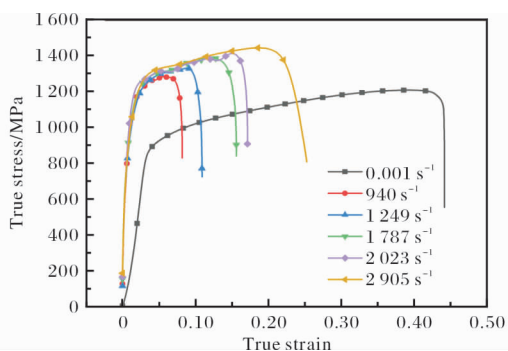


图 1 室温下 Ti6321 合金真应力-应变曲线

Fig. 1 True stress-strain curves of Ti6321 alloy at room temperature

图 2 为 Ti6321 合金在 $1\ 000$ 、 $2\ 000$ 、 $3\ 000\ \text{s}^{-1}$ 应变速率下的高温动态压缩真应力-应变曲线。从图

2 可以看到，高温下的真应力-应变曲线与室温下类似，也是随着应变率的增加，屈服点上升，流变应力增加，即在高温下也表现出了应变率硬化效应。但高温下的应变强化作用不如室温下显著，主要是因为材料在高温、高应变率下的变形过程中与界面摩擦会产生热量，且产生的热量大于变形过程中的热损失，因此会导致材料温度不断升高。随着应变的增加，温度的升高导致流变应力和应变硬化速率的急剧降低，这种现象被称为热软化效应。在高温条件下，热软化更容易发生，因此高温下应变强化效果比室温下更弱。与此同时，从相同应变率、不同温度的真应力-应变曲线可以看出，试验温度的升高导致流变应力显著降低。虽然应变率和温度对流变应力都有影响，但是试验温度对流变应力的影响更大。

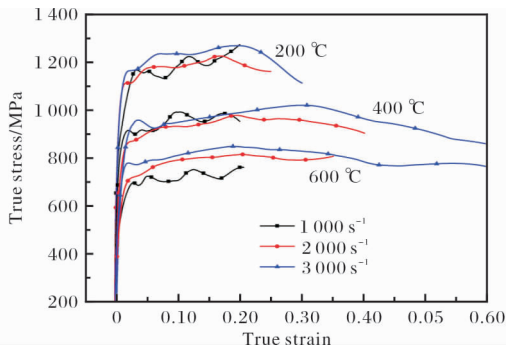


图 2 高温下 Ti6321 合金真应力-应变曲线
Fig. 2 True stress-strain curves of Ti6321 alloy at high temperature

2.2 应变率敏感性

应变率敏感性反应了应变率对应变率效应的影响程度，可以近似地估计为流变应力相对于应变率对数的斜率^[21]：

$$\beta = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\lg \dot{\epsilon}_2 - \lg \dot{\epsilon}_1} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\lg(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)} \quad (1)$$

式中： β 为应变率敏感因子， σ_2 、 σ_1 分别是不同动态应变率下的平均流变应力， $\dot{\epsilon}_2$ 、 $\dot{\epsilon}_1$ 对应不同加载条件下的应变率(其中高温动态压缩试验由于应变率 1 000 s⁻¹ 下曲线波动较大，仅选取 2 000、3 000 s⁻¹ 2 个应变率，因此应变率敏感因子仅有 1 个数值)。图 3 显示了室温下 Ti6321 合金应变率敏感因子随应变率的变化。从图 3 可以看出，在室温条件下，应变率敏感因子随应变率的增加先减小后增大。不同温度下应变率为 3 000 s⁻¹ 时，应变率敏感因子差别

很大，应变率敏感因子随温度变化非常复杂，这反映出 Ti6321 合金的应变率对温度的敏感性较低，同时又可以证明流变应力对温度十分敏感。

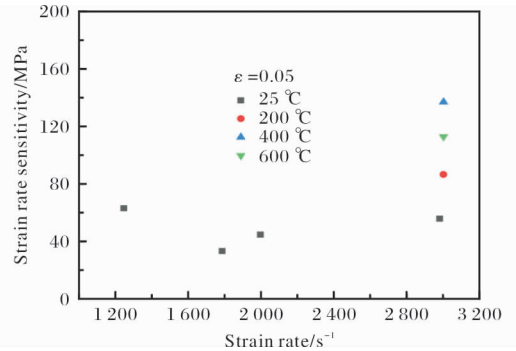


图 3 应变率敏感因子随应变率的变化
Fig. 3 Variation of strain rate sensitivity factor with strain rate

图 4 为 Ti6321 合金流变应力随应变率的变化。对于每个测试温度，平均流变应力随着应变率的增加而增加，即存在明显的应变率硬化效应。但流变应力相对于应变率的斜率几乎是恒定的。对比不同温度下的流变应力可以看出，温度对流变应力的影响比应变率大。通常情况下，流变应力随着应变率而线性增加(在应变一定的情况下)。微观尺度的应变率效应机理通常可以用位错运动过程中的运动学关系和动力学关系来解释。Orowan 关系是一种几何关系^[22]，与金属塑性无关，它将塑性应变率 $\dot{\epsilon}_p$ 与位错运动联系起来，可以表示为：

$$\dot{\epsilon}_p = \alpha b \rho_m \bar{v} \quad (2)$$

式中： α 为取向因子， b 为晶格常数， ρ_m 为移动位错的密度， \bar{v} 为位错运动的平均速度。由于 Orowan 关系只是几何关系，为了研究基于这种关系的应变率效应，还需要获得位错密度和位错运动速度的演化，因此还需要与位错的密度和运动速度的演化规律结合起来。位错的运动学关系与材料有关，Johnston 和 Gilman^[23] 给出了经验公式：

$$\bar{v} = A \tau^m \quad (3)$$

式中： A 和 m 为与材料相关的常数， \bar{v} 为位错运动的平均速度， τ 为应力。式(3)表明位错运动速度随着应力的增加而增加。式(2)和式(3)结合起来表明，塑性应变率随位错运动速度的增加而增大，随应力的增加而增大。对于 Ti6321 合金来说，高塑性应变率需要较高的位错运动速度，从而产生较大的应力。因此随着应变率的增加，流变应力增加。

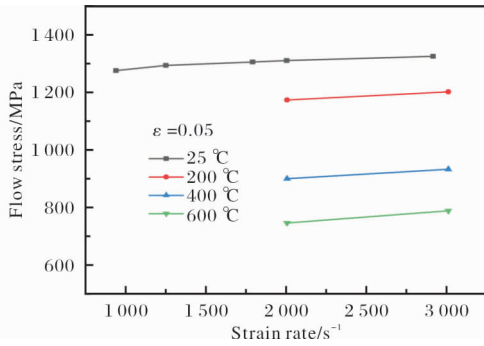


图4 流变应力随应变率的变化

Fig. 4 Variation of flow stress with strain rate

2.3 温度敏感性

从图2所示 Ti6321 合金高温下的真应力-应变曲线可以看出, 温度对流变应力具有很大的影响。温度对流变应力的影响可以用温度敏感因子衡量, 用参数 n_a 表示和计算^[6], 定义为:

$$n_a = -\frac{\ln(\sigma_2/\sigma_1)}{\ln(T_2/T_1)} \quad (4)$$

式中: T_2 为高温动态压缩试验的温度, T_1 为 25 °C, σ_2 为高温动态压缩下的流变应力, σ_1 为室温动态压缩下的流变应力。根据式(4) 计算应变率为 2 000 s^{-1} 时, 不同真应变下 Ti6321 合金的温度敏感因子, 如图5所示。从图5可以看出, 在温度一定时, 随着应变的增加, 温度敏感因子仅有较小的波动。但是在应变一定的情况下, 随着温度的升高, 温度敏感因子增加的幅度较大, 即与应变相比, 温度对温度敏感因子的影响更明显。这意味着在高温下动态压缩试验中, 热软化效应在流变应力的变化中起主导地位, 而应变硬化速率对温度敏感因子的影响不大。

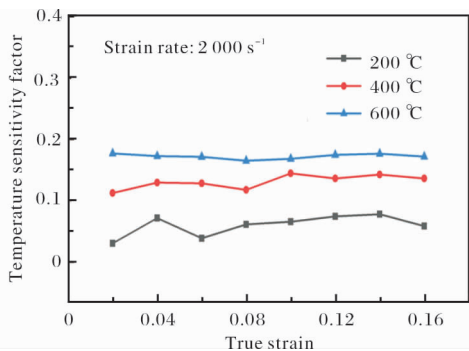
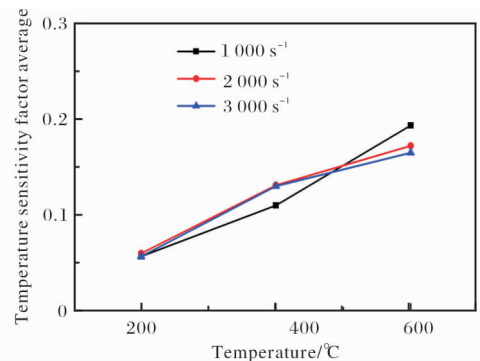


图5 不同温度下温度敏感因子随真应变的变化

Fig. 5 Variation of temperature sensitivity factor with true strain at different temperatures

如上所述, 温度敏感因子对塑性真应变没有明显的依赖性。为了便于比较, 忽略塑性真应变的影响, 分别计算 1 000、2 000、3 000 s^{-1} 应变速率下的温度敏感因子平均值。图6显示了3种不同应变率条件下 Ti6321 合金的平均温度敏感因子与温度的关系。从图6可以看出, 在给定的温度下, 不同应变率条件下的平均温度敏感因子基本相同, 这表明平均温度敏感因子对应变速率不敏感。此外, 温度越高, 温度敏感因子也越高。这意味着流变应力存在相当大的温度敏感性, 特别是当材料承受高温载荷时。

图6 不同应变速率下平均温度敏感因子随温度的变化
Fig. 6 Variation of average temperature sensitivity factor with temperature at different strain rates

2.4 J-C 本构方程拟合

在工程应用中, 常用的热-黏塑性本构模型主要有 J-C 模型、Zerilli-Armstrong 模型、Cowper-Symonds 模型等, 其中 J-C 模型由于形式简单, 参数少, 使用方便, 且能更好的描述材料的应变硬化、应变率效应和热软化效应, 因此本研究选择 J-C 模型来描述 Ti6321 合金在高温、高应变率下本构关系。J-C 本构模型表示为:

$$\sigma_{eq} = (A + B \varepsilon_{eq}^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}_{eq}^*) [1 - (T^*)^m] \quad (5)$$

式中: A 为参考应变率和参考温度下材料的屈服强度系数; B 为参考应变率和参考温度下材料的应变强化系数; n 为参考应变率和参考温度下材料的应变硬化指数; C 为应变率敏感系数; m 为温度软化系数; ε_{eq} 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_{eq}^* = \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0}$, 其中 $\dot{\varepsilon}^p$ 是等效塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$, 其中 T 为试验温度, T_r 为参考温度, T_m 为材料熔点温度。

本研究拟合的 J-C 本构方程主要用于高应变率下的数值仿真, 因此参考应变率选择 $1\ 500\ \text{s}^{-1}$, 参考温度为 $25\ ^\circ\text{C}$ 。

全局优化研究的是多变量非线性函数在某个约束区域上的全局最优解的特性和构造寻求全局最优解的计算方法, 而 J-C 本构方程参数的测定问题实际上也都是非线性函数的最优求解问题, 通过将实验与理论计算的应力-应变曲线进行拟合, 当二者之间的均方差达到最小时可认为所测参数达到最优匹配。全局优化算法不仅适用于 J-C 本构模型参数的传统测定方法, 而且还可以进行多参数同时求解, 即对方程的 5 个参数同时进行联合优化测定, 可进一步提高模型参数测定的效率, 同时也是进一步研究方程参数之间耦合关系的一种方法。因此本研究采用聚类全局优化方法测定 J-C 本构模型的参数, 主要流程为: 设计试验→曲线的预处理→聚类全局优化测参数。

曲线预处理过程包括: ① 筛选数据点, 即采用筛选数据的手段简化数据点个数 ($200 \sim 500$ 个), 同时保证经筛选数据处理的曲线不失真; ② 从原始实

验曲线上取其弹性段之后、失效点之前的区域(塑性段), 将其平移到 $\varepsilon = 0$ 点后, 作为参与优化的曲线; ③ 将处理后的曲线数据转换成 txt 格式, 输入聚类全局优化测定软件进行计算。

拟合的 J-C 模型参数如表 2 所示。

表 2 J-C 模型参数

Table 2 J-C model parameters

A/MPa	B/MPa	n	C	m
1 271. 81	133. 91	0. 352 4	0. 075 5	0. 798 7

将参数代入式(5), 得到双态组织 Ti6321 合金 J-C 本构方程如下:

$$\sigma_{\text{eq}} = (1\ 271. 81 + 133. 91 \varepsilon_{\text{eq}}^{0.3524}) \cdot \left(1 + 0.0755 \ln \frac{\dot{\varepsilon}^p}{1\ 500}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - 298}{1\ 621}\right)^{0.7987}\right] \quad (6)$$

J-C 本构方程拟合的不同应变速率下真应力-应变曲线与实验结果对比如图 7 所示。经计算, 拟合结果的整体误差在 5% 以内, 与实验数据基本吻合。该本构模型可用于双态组织 Ti6321 合金的力学性能仿真研究。

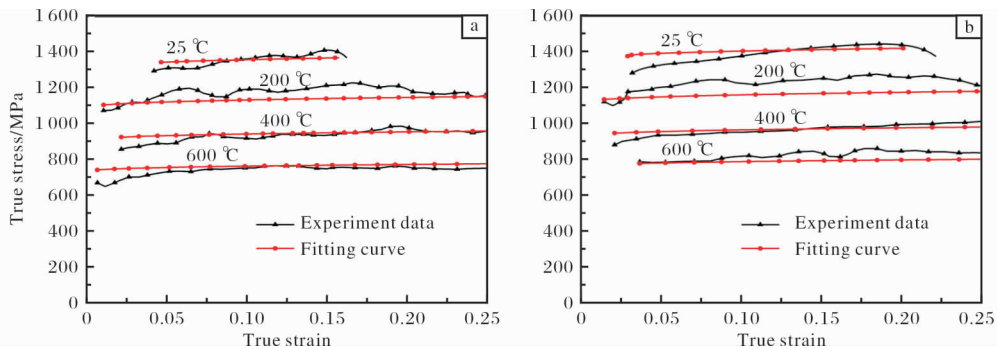


图 7 J-C 本构方程拟合的不同应变速率下真应力-应变曲线与实验曲线对比

Fig. 7 Comparison of true stress-strain curves fitted by J-C constitutive equation and experimental curves at different strain rates: (a) $2\ 000\ \text{s}^{-1}$; (b) $3\ 000\ \text{s}^{-1}$

3 结 论

(1) 在室温动态压缩下 Ti6321 合金具有应变硬化效应, 但在高温下应变硬化不明显, 主要是由于热软化导致的。

(2) 在室温和高温下 Ti6321 合金均存在应变率强化效应, 但应变率对流变应力的影响没有温度的影响大。随着动态压缩试验温度的升高, 流变应力下降明显, 温度敏感因子升高。

(3) 采用聚类全局优化算法构建了 Ti6321 合金

在高应变率下的 J-C 本构方程。该本构方程拟合出的数据与实验结果吻合度较高, 可用于双态组织 Ti6321 合金相关的动力学数值仿真研究。

参考文献

- [1] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 1-8.
- [2] Teng X, Wierzbicki T, Couque H. On the transition from adiabatic shear banding to fracture[J]. Mechanics of Materials, 2007, 39(2): 107-125.
- [3] 张长清, 谢兰生, 陈明和, 等. 高应变率下 TC4-DT 钛合

- 金的动态力学性能及塑性本构关系[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 323-329.
- [4] 艾建光, 姜峰, 言兰. TC4-DT 钛合金材料动态力学性能及其本构模型[J]. 中国机械工程, 2017, 28(5): 607-616.
- [5] 惠旭龙, 牟让科, 白春玉, 等. TC4 钛合金动态力学性能及本构模型研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(22): 161-168.
- [6] Lee W S, Lin C F. Plastic deformation and fracture behavior of Ti-6Al-4V alloy loaded with high strain rate under various temperatures[J]. Materials Science & Engineering A, 1998, 241(1/2): 48-59.
- [7] 张军, 汪洋, 王宇. TC11 钛合金应变率相关力学行为的实验和本构模型[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(7): 1369-1375.
- [8] 牛秋林, 陈明, 明伟伟. TC17 钛合金在高温与高应变率下的动态压缩力学行为研究[J]. 中国机械工程, 2017, 28(23): 2888-2892, 2897.
- [9] 杨扬, 曾毅, 汪冰峰. 基于 Johnson-Cook 模型的 TC16 钛合金动态本构关系[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(3): 505-510.
- [10] 贾宝华, 刘思勇, 李革, 等. 基于 J-C 模型的 TC18 钛合金动态本构方程构建[J]. 钛工业进展, 2018, 35(5): 24-28.
- [11] 易湘斌, 张俊喜, 李宝栋, 等. 高温、高应变率下 TB6 钛合金的动态压缩性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(4): 1220-1224.
- [12] Ran C, Chen P, Li L, et al. High-strain-rate plastic deformation and fracture behavior of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe titanium alloy at room temperature[J]. Mechanics of Materials, 2018, 116: 3-10.
- [13] 张潇, 陈鹏万, 郭保桥, 等. TA15 钛合金动态力学性能及塑性本构关系研究[C]//中国力学大会—2017暨庆祝中国力学学会成立 60 周年大会论文集. 北京: 中国力学学会, 2017: 883-888.
- [14] Arab A, Chen P, Guo Y. Effects of microstructure on the dynamic properties of TA15 titanium alloy[J]. Mechanics of Materials, 2019, 137: 103121.
- [15] 赵永庆. 我国钛合金的研制与发展[J]. 新材料产业, 2007(10): 28-32.
- [16] 杨英丽, 苏航标, 郭荻子, 等. 我国舰船钛合金的研究进展[C]//第十四届全国钛及钛合金学术交流会论文集. 上海: 中国有色金属学会, 2010: 1002-1007.
- [17] Gao F Y, Gao Q, Jiang P, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti6321 alloy welded joint by EBW[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacturing, 2018, 1(4): 265-269.
- [18] Fan J K, Huang H, Xue X Y, et al. Hot rolled Ti6321 alloy sheets with different initial microstructures: microstructure, mechanical properties, and anisotropy characteristics[J]. Frontiers in Materials, 2020, 7: 110.
- [19] 沈立华, 刘彦昌, 李修勇, 等. 退火温度对 Ti80 合金棒材组织与性能的影响[J]. 钛工业进展, 2018, 35(1): 29-31.
- [20] 孙建刚, 胡伟民, 廖志谦, 等. Ti6321 合金板材结构及力学性能研究[J]. 材料开发与应用, 2012, 27(2): 13-17.
- [21] Wu Y, Lin J, Carlson B E, et al. Effect of laser ablation surface treatment on performance of adhesive-bonded aluminum alloys[J]. Surface & Coatings Technology, 2016: 340-347.
- [22] Qin K, Yang L, Hu S. Mechanism of strain rate effect based on dislocation theory[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(3): 181-184.
- [23] Johnston W G, Gilman J J. Dislocation velocities, dislocation densities, and plastic flow in lithium fluoride crystals[J]. Journal of Applied Physics, 1959, 30(2): 129-144.

行业动态

天成航材公司航空级钛合金棒线材生产线热试车成功

2020年8月15日, 陕西天成航空材料有限公司(以下简称“天成航材”)完成钛合金棒线材生产线首次热负荷试车, 标志着该公司航空级钛合金棒线材生产线正式建成, 大大推动了钛产业的高质量发展。

2015年起, 天成航材对用户需求、市场趋势做了充分的调研和分析, 并于2018年开始部署公司钛合金棒线材生产线。2020年, 生产线全道次一次性热负荷试车成功。该生产线的成功运行可实现航空级高品质钛合金棒线材连续控温控轧, 全线自动化水平高, 工艺可扩展, 灵活性强。作为航空级钛合金棒线材全连轧工艺生产线, 打破了国内钛合金棒线材生产工艺落后、品质不稳定的短板, 突破了国际相关技术封锁, 将国内钛合金棒线材生产水平提升至可与国际同行比肩。

摘编自陕西天成航空材料有限公司官网