



高应变率下 TC4-DT 钛合金的动态力学性能及塑性本构关系

张长清¹, 谢兰生¹, 陈明和¹, 商国强²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016;

2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 为研究 TC4-DT 钛合金的动态力学性能及其本构关系, 在 $1000\sim 8000\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内, 利用分离式 Hopkinson 压杆试验装置对该材料进行动态压缩试验, 得到高应变率下的真实应力-应变曲线。结果表明: 高应变率时 TC4-DT 钛合金材料存在应变率增强、增塑以及应变强化效应, 其流变应力表现出较强的应变率敏感性。通过微观组织观察, 发现高应变率变形时出现绝热剪切带是材料流变应力急剧减小的主要原因。改进 Johnson-Cook 本构模型中的温度项, 利用试验数据对 TC4-DT 钛合金在高应变率下的动态塑性本构关系进行拟合, 得到室温下该材料的动态塑性本构方程, 模型计算结果和试验结果证明该模型可以更好地预测 TC4-DT 钛合金高应变率下的塑性流变应力。

关键词: TC4-DT 钛合金; 动态力学性能; Hopkinson 压杆试验; Johnson-Cook 本构模型

中图分类号: O346

文献标志码: A

Dynamic mechanical property and plastic constitutive relation of TC4-DT Ti alloy under high strain rate

ZHANG Chang-qing¹, XIE Lan-sheng¹, CHEN Ming-he¹, SHANG Guo-qiang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

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

Abstract: The dynamic compression experiments of TC4-DT Ti alloy were performed at a range of strain rate from 1000 s^{-1} to 8000 s^{-1} by high split Hopkinson pressure bar for investigating its dynamic mechanical property and constitutive relation, and the true stress-strain curves under high strain rates were obtained. The results show that the true flow stress of TC4-DT is sensitive to the strain rates and TC4-DT has strain rate strengthening, plasticity-increasing and strain work-hardening. The observation of cross-section microstructure of deformed sample reveals that the adiabatic shear band is responsible for the rapid reduction of flow stress when TC4-DT was deformed at high strain rate. Based on the Johnson-Cook constitutive model, with new temperature item, the dynamic constitutive model of TC4-DT was obtained by fitting the experimental results. The comparison between the calculated curves and experimental results shows that the present dynamic constitutive model can make a better prediction of the plastic flow stress.

Key words: TC4-DT Ti alloy; dynamic mechanical property; split Hopkinson pressure bar test; Johnson-Cook constitutive model

钛合金以其密度小、比强度高、耐腐蚀与耐热性能优异及低温变形性能好等优点, 广泛应用于航空航

天、船舶、化工及兵器工业等领域^[1]。随着这些领域产品设计理念逐渐由过去的单纯强度转变到安全-

寿命、破损-安全,直到现代的损伤容限设计理念,先进钛合金也逐步向具有高断裂韧性和低裂纹扩展速率的损伤容限型钛合金方向发展。TC4-DT 钛合金作为我国针对新一代飞机长寿命和高损伤容限的设计发展要求、在“十五”期间立项研发的新型中强高损伤容限型钛合金,在航空航天领域已经得到广泛应用^[2]。现阶段已有相关的文献对 TC4-DT 钛合金展开了研究,大部分研究集中在 TC4-DT 钛合金损伤容限性能^[3-5]、加工工艺^[6-9]等方面,材料性能方面只有对其准静态下热变形行为的研究^[10]。然而在服役过程中,钛合金结构件会受动态载荷作用,而承受动态载荷的材料可能会以高应变率发生变形。有不少学者通过对不锈钢、镁合金和铝合金等材料的研究发现,这些材料在高应变率下的力学性能和准静态载荷下的大相径庭。郭伟国^[11]通过对一种新型奥氏体不锈钢在起始温度从 77 K 到 1000 K、应变率从 0.001 s^{-1} 到 8300 s^{-1} 下进行单轴压缩试验,结果表明 AL6-XN 的塑性流变应力依赖于温度、应变率和应变,其中对温度的依赖性最大;赵峰等^[12]利用 INSTRON 准静态试验机和 Hopkinson 压杆系统对铸造镁合金 AZ91 在 600 s^{-1} 到 10000 s^{-1} 应变率下进行压缩试验,在准静态压缩过程中材料对应变率敏感,当应变率达到 7000 s^{-1} 时,材料表现出较为明显的敏感性;李国和等^[13]利用电子万能试验机 and 高温分离式 Hopkinson 压杆对 Fe-36Ni 因瓦合金的动态力学性能进行研究,研究发现材料的流变应力表现出较强的应变率和温度敏感性,随应变率的增大而增大,随温度的升高而降低,并采用改进的应变率项和温度项的 Johnson-Cook 本构模型(J-C 本构模型)拟合了该材料在高温、高应变率下的动态塑性本构关系;武永甫等^[14]利用高温分离式 Hopkinson 压杆装置对铝合金 7075-T651 在温度范围为 $25\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及应变率范围为 $600\sim 12000\text{ s}^{-1}$ 下进行动态压缩试验,得到了该材料的流变应力对应变率不敏感而对温度具有较强敏感性的结论,并建立了一个基于物理概念的铝合金 7075-T651 本构模型,可以很好地预测材料的流变应力。当前国内外对高应变率下 TC4-DT 钛合金的动态性能研究尚少,随着航空航天、船舶等领域的快速发展,对 TC4-DT 钛合金的需求量将会越来越大,因此,研究 TC4-DT 钛合金在高应变率下的动态力学性能对其在这些领域的应用非常重要。

本文作者利用分离式 Hopkinson 压杆试验装置对 TC4-DT 钛合金进行动态压缩试验,对 TC4-DT 钛合金在 $1000\sim 8000\text{ s}^{-1}$ 应变率下的动态力学性能进行了研究,基于 J-C 本构模型,引入绝热温升软化项,得

到该材料的 J-C 模型参数,构建其动态本构方程。

1 实验

1.1 试样制备

本试验中所用的 TC4-DT 钛合金由北京航空材料研究院提供,材料原始组织为网篮组织(见图 1),具体化学成分见表 1,根据试验设备的相关参数及应变率范围,动态试验试样尺寸为 $d\ 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 和 $d\ 2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 两种规格。

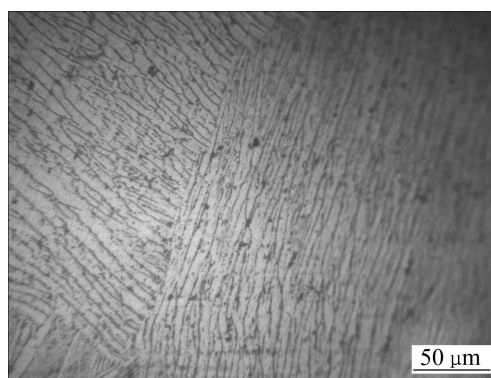


图 1 TC4-DT 钛合金的原始显微组织

Fig. 1 Original microstructure of TC4-DT Ti alloy

表 1 TC4-DT 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4-DT titanium alloy (mass fraction, %)

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6.16	3.95	0.03	0.04	0.014	0.005	0.06	Bal.

1.2 SHPB 试验原理

动态压缩试验是在分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)上进行的,SHPB 技术的发展已有近 60 年的历史^[15],广泛运用于测量材料在一维应力条件下、应变率为 $1\times 10^2\sim 1\times 10^4\text{ s}^{-1}$ 范围内的动态力学性能。该系统是目前研究材料的动态力学性能最基本的试验装置,图 2 所示为本试验的装置原理图。

该试验装置包括入射杆、透射杆和撞击杆,试验试样放在入射杆和透射杆之间,通过控制气压缸的压力推动撞击杆,使撞击杆以一定的速度撞击 SHPB 实验装置的入射杆,在入射杆内产生沿杆传递的入射弹性应力脉冲,同时入射杆产生向前的运动。当入射杆撞击到试样表面时,由于入射杆和试样阻抗匹配问题,一部分被反射,形成反射波,反射回入射杆;另一部分将透射入试样,形成透射波。

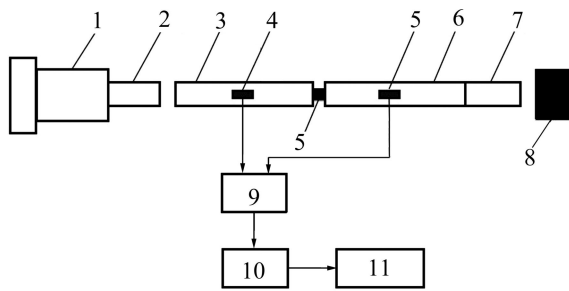


图2 SHPB装置原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of principle of SHPB: 1—Pneumatic cylinder; 2—Striker bar; 3—Incident bar; 4—Strain gage; 5—Specimen; 6—Transmission bar; 7—Absorbing bar; 8—Energy absorber; 9—Strain amplifier; 10—Digital data recorder; 11—Computer

随着透射波传播通过试样, 试样将发生高速塑性变形, 其中部分透射波传入透射杆中并沿着透射杆传播, 透射波则由透射杆捕获最后由能量吸收装置吸收。整个过程中的入射波、反射波和透射波信号可用贴在入射杆和透射杆上的应变片进行记录, 然后应变速率、应变和应力通过一维应力波理论求出, 公式如下:

$$\sigma = E \left(\frac{A_h}{A_s} \right) \varepsilon_T \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{-2c_0}{L_s} \int \varepsilon_R dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{-2c_0}{L_s} \varepsilon_R(t) \quad (3)$$

式中: σ 为屈服应力; ε_T 为试验记录的透射脉冲; ε 为应变; ε_R 为试验记录的反射脉冲; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; $c_0 = \sqrt{E/\rho}$ 是杆的弹性纵波波速; ρ 是杆的密度; A_h 和 E 分别是杆的横截面积和弹性模量; L_s 和 A_s 分别是试样的初始长度和初始横截面积。

1.3 Hopkinson 压杆试验方案

动态压缩试验设备采用分离式 Hopkinson 压杆装置, 应变率为 1000 和 3000 s^{-1} 时的动态压缩试验选用直径为 12.7 mm 的压杆, 试样尺寸为 $d 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$; 应变率为 5000 和 8000 s^{-1} 的动态压缩试验则选用直径为 $d 5 \text{ mm}$ 的压杆, 试样尺寸为 $d 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。每组取得 3 组有效数据, 以保证试验数据的可靠性和可重复性。

为了保证试验精度, 必须减少压缩过程中压杆与试样端面的摩擦, 因此要求试样两端面平行及其粗糙

度在 $R_a=1.6$ 以上。

2 结果与分析

2.1 TC4-DT 钛合金的动态力学性能

图 3 所示为由试验测试结果、根据式(1)和式(2)分别计算得到 4 种不同应变率下 TC4-DT 损伤容限型钛合金的真实应力-应变关系, 从图中可以看出 TC4-DT 损伤容限型钛合金在应变率下的力学性能具有如下特点。

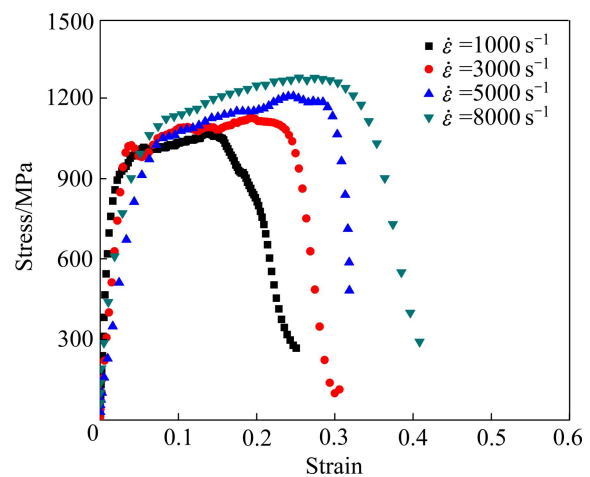


图3 不同应变率下 TC4-DT 钛合金的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of TC4-DT Ti alloy at different strain rates

1) TC4-DT 钛合金具有一定的应变率敏感性, 表现出一定的应变率增强效应, 随着应变率的增加, 该材料的流变应力和动态屈服强度增加。

2) 在高应变率下的塑性变形过程中, 应变强化和热软化作用同时进行。一方面 TC4-DT 钛合金具有应变强化作用, 即 TC4-DT 的流变应力随应变的增加而增加(见图 3); 但另一方面, 由于在高应变率变形时载荷作用的时间极短, 导致试样内由塑性变形功所转化的热能无法在极短的时间内消散, 因此, 高应变率下的变形过程可看成是一个绝热过程, 塑性变形功所转化的热能使试样升温从而导致热软化, 这也是室温下随着应变率的增加, 材料的应变硬化率 ($\partial\sigma/\partial\varepsilon$) 减小的原因, 如图 3 中同为大试样的 1000 s^{-1} 时的应变硬化率的增长趋势相对 3000 s^{-1} 更为显著。

3) 随着应变率的增加, TC4-DT 钛合金的塑性流动趋势显著增强, 应力-应变曲线图中的曲线塑性阶段明显增长, 表现出一定的应变率增塑效应, 其中可

能的原因是 TC4-DT 钛合金在高应变率下的绝热升温 and 孪生变形机制^[16]的出现, 使得材料软化, 同时滑移也更易于进行。

图 4 所示为应变分别为 0.1 和 0.15 时的流变应力和应变速率的关系曲线, 可以看出, 流变应力均随着应变速率的增加而增加。当应变率在相对较低的情况下, 该材料的应变率强化效应相对较弱, 表现为随着应变速率的增加, 流变应力的增加相对较少。

TC4-DT 钛合金在高应变率下变形时没有明显的屈服过程, 其屈服强度对应变速率表现出明显的敏感性。图 5 所示为材料在不同应变速率下屈服强度的变化趋势, 从图 5 可以看出, 屈服强度随应变速率增加成单调递增关系。在低应变率时, 屈服强度的增加更明显, 高应变率下增加的程度减缓, 即随着应变率的增加, 材料的热软化效应增强。

高应变率下材料的塑性变形的绝热温升(ΔT)可以表示为

$$\Delta T = \frac{\beta}{\rho c_p} \int_0^{\bar{\epsilon}_{pl}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^{pl} \quad (4)$$

式中: ρ 是材料密度; c_p 是材料的定压比热容; β 是功热速率转换分数; β 一般为 0.9。 $\int_0^{\bar{\epsilon}_{pl}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^{pl}$ 是在塑性变形过程中流变应力所做的功, 可以通过真实应力-应变曲线图中塑性阶段曲线与坐标轴所围成的面积计算出。图 6 所示为由试验结果所计算得到的不同应变率下的绝热温升 ΔT , 绝热温升与应变率的关系可以表示为

$$\Delta T = 75 + 0.573 \exp\left(\frac{\dot{\epsilon}}{1806}\right) \quad (5)$$

即绝热温升随着应变率的增加成指数增长。

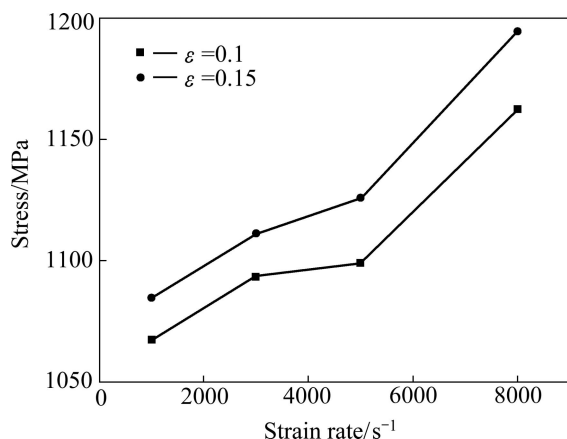


图 4 不同应变下流变应力随应变率的变化

Fig. 4 Variation of flow stress with strain rate at different strains

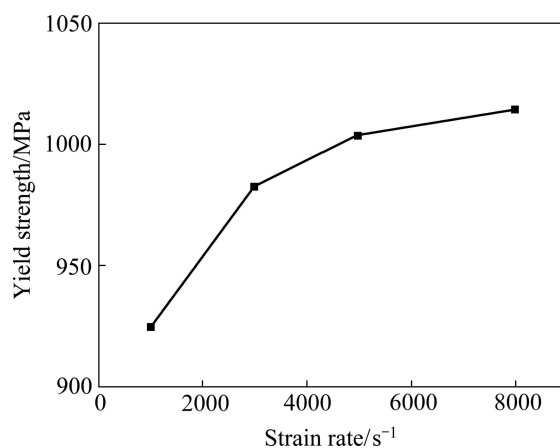


图 5 TC4-DT 屈服强度随应变率的变化曲线

Fig. 5 Changing curves of yield strength of TC4-DT with strain rate

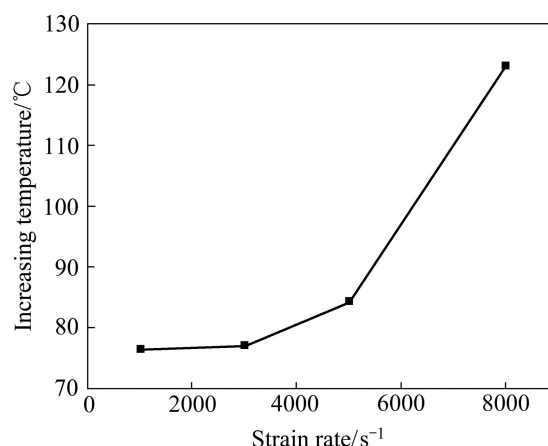


图 6 试样不同应变率条件下的温升

Fig. 6 Increasing temperature of sample at various strain rates

2.2 微观组织

为研究 TC4-DT 钛合金在不同应变率下的流变应力变化的原因, 将变形试样用线切割沿轴向切开并进行研磨、抛光和腐蚀, 最后进行显微组织观察。

图 7 所示为 TC4-DT 钛合金变形后的微观组织。4 组试样中都观察到了与加载方向成约 45° 的白色亮带, 如图 7 中箭头所示, 称之为绝热剪切带(Adiabatic shear band, 简称 ASB)。且两侧的基体材料都有不同程度的塑性流动, 该区域是过渡区域。由图 7 还可以发现, 绝热剪切带的宽度随着应变速率的增大而变大, 且当绝热剪切带宽度增加到一定程度时, 就出现微小孔洞。随着变形的增加, 孔洞增多, 最终沿着绝热剪切带的方向产生剪切断裂。

产生绝热剪切带的试样在宏观上表现为动态塑性失稳, 随着变形的增加, 流变应力达到峰值, 其后就急剧下降, 直至材料失效。

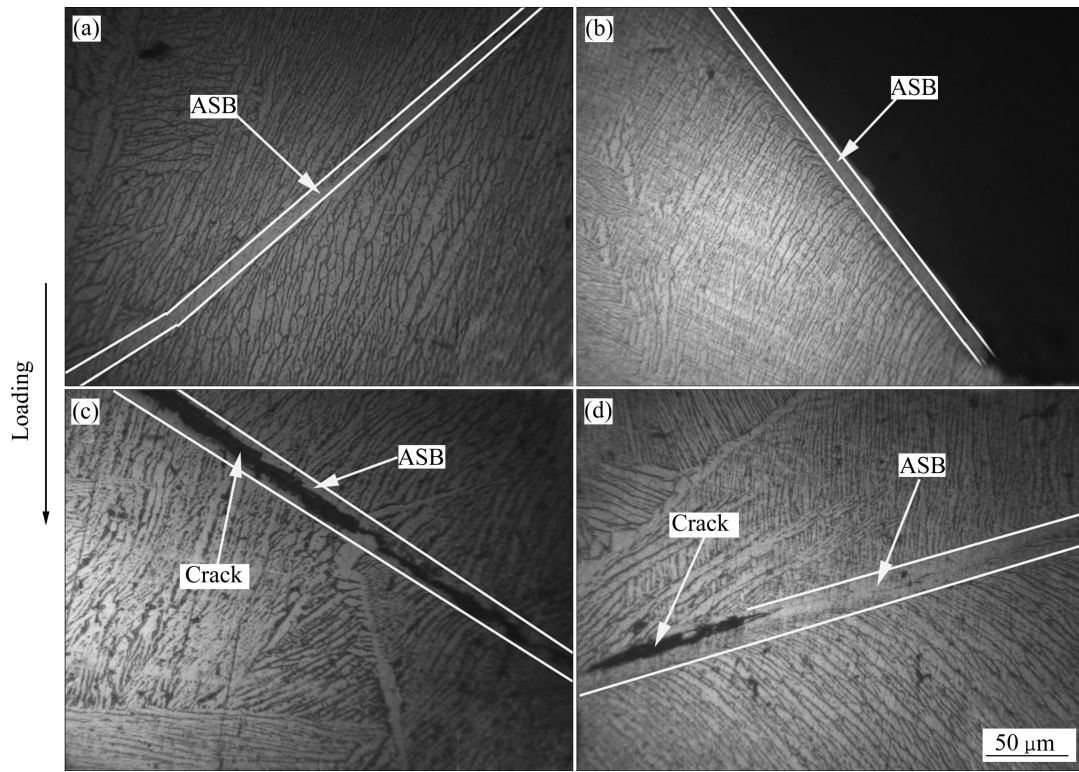


图7 高应变率下 TC4-DT 钛合金的显微组织

Fig. 7 Microstructures of TC4-DT Ti alloy under high strain rates: (a) 1000 s⁻¹; (b) 3000 s⁻¹; (c) 5000 s⁻¹; (d) 8000 s⁻¹

2.3 动态塑性本构关系

在工程上,常选用热-黏塑性本构模型来描述材料的力学性能,目前常用的热-黏塑性本构模型有 J-C 模型^[17]、Zerilli-Armstrong 模型^[18]、Bammann 模型^[19]和 Bodner-Paton 模型^[20]等。相比之下其中 J-C 模型和 Zerilli-Armstrong 模型的形式都比较简单,而且都引入了材料的应变强化、应变率强化及热软化参数,但是 Zerilli-Armstrong 模型常用于体心立方和面心立方的金属,而 TC4-DT 损伤容限型钛合金的组织类型是密排六方结构(HCP)的 α 相和体心立方结构(BCC)的 β 相的混合体, J-C 模型是一个经验型的黏塑性本构模型,可应用于各种晶体结构的材料,故本试验选择 J-C 模型作为 TC4-DT 钛合金的本构模型,模型的一般形式为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (6)$$

式中: A 、 B 、 C 、 n 、 m 是待定系数,由试验确定; σ 是 Von Mises 流变应力; ε 是等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_0$ 和 $\dot{\varepsilon}$ 分别是参考应变率和等效塑性应变率; T 、 T_0 和 T_m 分别是变形温度、参考温度和材料的熔点温度。本试验中

取 $\dot{\varepsilon}_0$ 、 T_0 和 T_m 分别为 0.01 s⁻¹、20 °C 和 1660 °C。

$$(A + B\varepsilon^n) \cdot \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right]$$

分别描述材料的加工硬化效应、应变率效应和温度软化效应。则本试验中的本构模型为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (7)$$

首先取参考应变率为 0.01 s⁻¹,通过室温下应变率为 0.01 s⁻¹ 的数据拟合出 A 、 B 和 n 的值分别为 809.7 MPa、366.3 MPa 和 0.42,然后平均各应变率下的数据拟合求得的 C 值,得 $C=0.013$,则相应的本构模型为

$$\sigma = (809.7 + 366.3\varepsilon^{0.42}) \left[1 + 0.013 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (8)$$

将试验结果和式(8)预测的结果对照,其结果如图8所示。

由图8可以看出,在应变率较低条件下,该本构模型不能很好地预测 TC4-DT 钛合金的流变应力,TC4-DT 钛合金在高应变率下的塑性变形过程中伴随

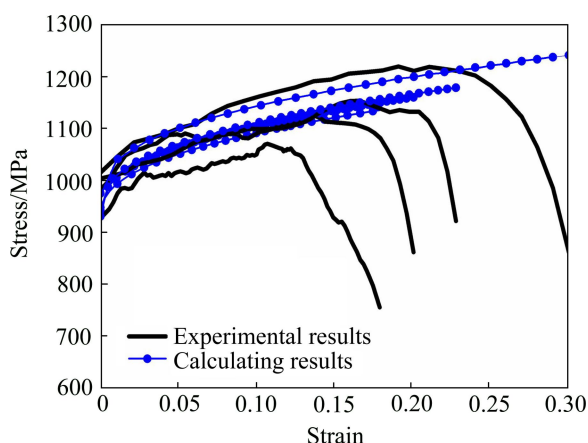


图 8 高应变率下 TC4-DT 试验结果与 J-C 模型计算结果的比较

Fig. 8 Comparison of J-C model calculating results with experimental results for TC4-DT at indicated high strain rates

着温度的升高, 温度是应变的函数, 所以需考虑变形过程中由于温升而导致材料的软化作用, 因此式(6)中变形温度 T 并非初始温度, 而应该用如图 6 中计算所得绝热温升加上其对应的初始温度作为变形温度。因此, 初始温度为室温的本构模型变为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{\Delta T}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (9)$$

合并式(5)和(9)可得 TC4-DT 钛合金的本构模型为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{75 + 0.573 \exp\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{1806}\right)}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (10)$$

根据试验数据拟合得到各应变率下 J-C 模型中的参数 C 值和 m 值, 求平均后分别为 0.028 与 0.61, 则改进后的本构模型为

$$\sigma = (809.7 + 366.3\varepsilon^{0.42}) \left[1 + 0.028 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{75 + 0.573 \exp\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{1806}\right)}{1640} \right)^{0.61} \right] \quad (11)$$

图 9 所示为改进后的 J-C 本构模型计算结果与试验数据对比。与未考虑绝热温升的本构模型相比, 改

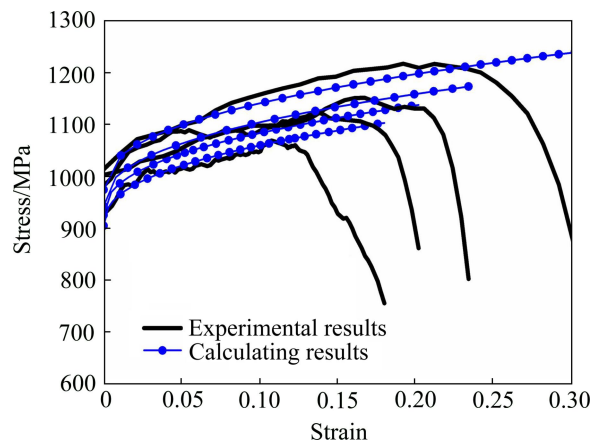


图 9 高应变率下 TC4-DT 试验结果与改进的 J-C 模型计算结果的比较

Fig. 9 Comparison of experimental results with modified J-C model calculating results for TC4-DT at indicated high strain rates

进后的本构模型计算值与试验数据基本相符, 即改进后的 J-C 本构模型能更好地预测 TC4-DT 钛合金的流变应力。

3 结论

1) 高应变率变形时, TC4-DT 钛合金具有一定的应变率敏感性、较强的应变率增强效应和明显的应变率增塑效应。该材料的动态屈服强度和流变应力均随应变率的提高而增加, 当应变率相对较低时, 其应变率的强化效应则相对较弱。

2) TC4-DT 钛合金在高应变率塑性变形过程可以发生明显的绝热升温, 材料的温升软化作用随着应变和应变率的增加均增强, 且 TC4-DT 钛合金的应变硬化率随着应变率和应变的增加而呈下降趋势。

3) 采用改进温度项的 J-C 本构模型可以更好地预测室温下 TC4-DT 钛合金在不同应变率时的塑性流变应力。

REFERENCES

- [1] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展[J]. 金属学报, 2002, 38(增刊): 4-11.
CAO Chun-xiao. Change of material selection criterion and development of high damage-tolerant titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(Supple): 4-11.
- [2] 朱知寿, 王新南, 童路, 商国强. 航空用损伤容限型钛合金研究与应用[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 14-17.

- ZHU Zhi-shou, WANG Xin-nan, TONG Lu, SHANG Guo-qiang. Research and application of damage tolerance titanium alloys for aeronautical use[J]. *Materials China*, 2010, 29(5): 14-17.
- [3] 李 辉, 赵永庆, 曲恒磊, 曾卫东. 损伤容限型 TC4-DT 合金疲劳裂纹扩展行为研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(6): 963-967.
- LI Hui, ZHAO Yong-qing, QU Heng-lei, ZENG Wei-dong. Fatigue crack growth behavior of TC4-DT alloy in damage tolerance type[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(6): 963-967.
- [4] 于兰兰, 毛小南, 李 辉. 温度对 TC4-DT 损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展行为的影响[J]. *稀有金属快报*, 2007, 26(12): 20-23.
- YU Lan-lan, MAO Xiao-nan, LI Hui. Effects of temperature on fatigue crack growth behavior of TC4-DT damage tolerance titanium alloy[J]. *Rare Metals Letters*, 2007, 26(12): 20-23.
- [5] 王新南, 朱知寿, 童 路, 周 宇, 周晓虎, 俞汉清. 锻造工艺对 TC4-DT 和 TC21 损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. *稀有金属快报*, 2008, 27(7): 12-16.
- WANG Xin-nan, ZHU Zhi-shou, TONG Lu, ZHOU Yu, ZHOU Xiao-hu, YU Han-qing. The influence of forging processing on fatigue crack propagation rate of damage-tolerant titanium alloy[J]. *Rare Metals Letters*, 2008, 27(7): 12-16.
- [6] 童 路, 朱知寿, 俞汉清, 王之录. TC4-DT 钛合金自由锻件组织与性能的影响因素[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(1): 87-90.
- TONG Lu, ZHU Zhi-shou, YU Han-qing, WANG Zhi-lu. Influence factors of microstructure and property of TC4-DT titanium alloy free forgings[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(1): 87-90.
- [7] 蔺 海, 杨冠军, 毛小南, 于兰兰, 雷文光. 轧制方式和热处理工艺对 TC4-DT 钛合金板材各向力学性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2012, 36(2): 52-54.
- LIN Hai, YANG Guan-jun, MAO Xiao-nan, YU Lan-lan, LEI Wen-guang. Effects of rolling process and heat treatment on mechanical properties in every direction of TC4-DT Ti alloy sheet[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2012, 36(2): 52-54.
- [8] 胥 军, 卢文壮, 王 晗, 朱延松, 黄群超, 左敦稳. TC4-DT 钛合金表面磨削特性及其摩擦磨损性能[J]. *航空学报*, 2014, 35(2): 567-573.
- XU Jun, LU Wen-zhuang, WANG Han, ZHU Yan-song, HUANG Qun-chao, ZUO Dun-wen. Characteristics and wear properties of grinding surface of titanium alloy TC4-DT[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(2): 567-573.
- [9] 喻淼真, 王高潮, 郑漫庆, 徐雪峰, 王志录. TC4-DT 合金改锻工艺及超塑性变形行为[J]. *塑性工程学报*, 2013, 20(5): 1-6.
- YU Miao-zhen, WANG Gao-chao, ZHENG Man-qing, XU Xue-feng, WANG Zhi-lu. Forging pretreatment process and superplastic deformation behavior of TC4-DT alloy[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2013, 20(5): 1-6.
- [10] 刘 青, 薛祥义, 付宝全, 王一川. TC4-DT 钛合金的热变形行为的研究[J]. *材料热处理技术*, 2009, 38(12): 43-47.
- LIU Qing, XUE Xiang-yi, FU Bao-quan, WANG Yi-chuan. Study on hot deformation behavior of TC4-DT titanium alloy[J]. *Material & Heat Treatment*, 2009, 38(12): 43-47.
- [11] 郭伟国. 一种新型奥氏体不锈钢的塑性流变行为研究[J]. *西北工业大学学报*, 2001, 19(3): 476-479.
- GUO Wei-guo. Plastic flow behavior of a new austenitic stainless steel AL6-XN under different strain rates and temperatures[J]. *Journal of Northwestern Poly technical University*, 2001, 19(3): 476-479.
- [12] 赵 峰, 李玉龙, 索 涛, 黄卫东, 刘建睿. 高应变率下铸造镁合金 AZ91 的动态压缩性能及破坏机理[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(7): 1163-1168.
- ZHAO Feng, LI Yu-long, SUO Tao, HUANG Wei-dong, LIU Jian-rui. Dynamic compressive behavior and damage mechanism of cast magnesium alloy AZ91[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(7): 1163-1168.
- [13] 李国和, 王敏杰, 康仁科. Fe-36Ni 高温高应变率动态力学性能及其本构关系[J]. *材料科学与工艺*, 2010, 18(6): 824-828.
- LI Guo-he, WANG Min-jie, KANG Ren-ke. Dynamic mechanical properties and constitutive model of Fe-36Ni invar alloy at high temperature and high strain rate[J]. *Materials Science & Technology*, 2010, 18(6): 824-828.
- [14] 武永甫, 李淑慧, 侯 波, 于忠奇. 铝合金 7075-T651 动态流变应力特征及本构模型[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(3): 658-665.
- WU Yong-fu, LI Shu-hui, HOU Bo, YU Zhong-qi. Dynamic flow stress characteristics and constitutive model of aluminum 7075-T651[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(3): 658-665.
- [15] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1949, B62: 676-700.
- [16] 殷 雯, 郑鸿飞. 金属材料动态强化机制的探讨[J]. *理化检验-物理分册*, 2002, 38(3): 99-100, 103.
- YIN Wen, ZHENG Hong-fei. On dynamic strengthening mechanism of metallic material[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis A*, 2002, 38(3): 99-100, 103.
- [17] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strains rates, temperature and pressure[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [18] MOUSAVI ANIJAN S H, MADAAH-HOSSEINI H R, BAHRAMI A. Flow stress optimization for 304 stainless steel under cold and warm compression by artificial neural network and genetic algorithm[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(2): 609-615.
- [19] BAMMANN D J. Modeling temperature and strain rate dependent large deformation of metals[J]. *Applied Mechanics Review*, 1990, 43(5): S312-S319.
- [20] BODNER S R, PARTON Y. Constitutive equations for elastic-visco-plastic strain-hardening materials[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1975, 42(2): 385-389.

(编辑 龙怀中)