

室温高应变率下钛合金 TA31 流动应力响应行为及本构模型研究

贾海深¹, 郭文静¹, 赵礼栋², 张继林^{1*}, 马田骄³, 张 维³

(1. 兰州工业学院, 甘肃省精密加工技术及装备工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州工业学院计算机与人工智能学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 兰州工业学院机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 室温下, 通过 UTM5305 万能试验机、ALT1000 剖分式 Hopkinson 压杆装置, 对钛合金 TA31 进行了准静态压缩、动态冲击试验。基于试验获得的应力-应变曲线, 探讨了其应变硬化效应、应变率强化效应和绝热温升软化效应。依据钛合金 TA31 所呈现的流动应力响应行为特征, 建立了一种新型 J-C 本构模型, 该模型考虑了应变、应变率间的耦合作用和绝热温升对其流动应力的影响。将本构模型计算值与试验值进行对比分析, 并借助相关系数 (R)、平均相对误差 (AARE) 两个统计参数, 评估了所建立的本构模型预测精度。 R 和 AARE 分别为 0.988 7、0.63%, 结果表明, 所建立的新型 J-C 本构模型能够较准确地描述钛合金 TA31 的流动应力响应行为。

关键词: 钛合金; TA31; 流动应力; 耦合作用; 绝热温升; 本构模型

中图分类号: TF823, TG115.5

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)02-0063-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.02.010

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Rheological behaviours and constitutive models for titanium alloy TA31 at room temperature and high strain rate

Jia Haishen¹, Guo Wenjing¹, Zhao Lidong², Zhang Jilin^{1*}, Ma Tianjiao³, Zhang Wei³

(1. Lanzhou Institute of Technology, Gansu Province Precision Machining Technology and Equipment Engineering Research Center, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. School of Computer Science & Artificial Intelligence, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. School of Mechatronics Engineering, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: At room temperature, quasi-static compression and dynamic impact tests were conducted on titanium alloy TA31 by using UTM5305 universal testing machine and ALT1000 split Hopkinson pressure bar device. Based on the stress-strain curves attained from experiments, the strain hardening effect, strain rate strengthening effect, and adiabatic temperature rise softening effect were discussed. Based on the flow stress response characteristics of titanium alloy TA31, a new J-C constitutive model was established, which considers the coupling effect between strain and strain rate, as well as the influence of adiabatic temperature rise on its flow stress. The calculated values of the constitutive model were compared with the experimental values, and the prediction accuracy of the established constitutive model was evaluated by using two statistical parameters: correlation coefficient (R) and average relative error

收稿日期: 2023-08-22

基金项目: 甘肃省高等学校产业支撑(2021-CYZC-52); 甘肃省重点研发计划项目(22YF7GA132); 国家级大学生创新创业训练项目(202311807020); 甘肃省大学生创新创业训练项目(S202311807014)。

作者简介: 贾海深, 1985 年出生, 男, 河南周口人, 硕士, 副教授, 主要从事材料力学性能研究与切削加工, E-mail: jhsk9365@126.com; * 通讯作者: 张继林, 1987 年出生, 甘肃民乐人, 硕士, 副教授, 主要从事金属材料动态力学性能研究, E-mail: 453531390@qq.com。

(AARE). The R and AARE of the model are 0.988 7 and 0.63%, respectively. The results show that the new established J-C constitutive model can accurately describe the flow stress response behavior of titanium alloy TA31.

Key words: titanium alloy, TA31, flow stress, coupling effect, adiabatic temperature rise, constitutive model

0 引言

钛合金 TA31 因具有比强度高、抗腐蚀性强、可焊性好以及优异的塑性韧性等优点,广泛应用于航空航天、汽车、海洋等工程之中^[1-4]。应用于上述工程领域中的钛合金 TA31 结构件不可避免地受到高速冲击载荷的作用,呈现出不同于静态下的复杂机械响应行为^[5-8]。此外,高应变率下的钛合金结构件很容易因应变局部化现象而失效,因此,有必要研究其冲击载荷下的机械响应,以确保冲击载荷作用下复杂工程问题的数值模拟精度,以及预防钛合金结构件的工程事故发生。

关于冲击载荷作用下钛合金的动态响应行为及本构模型研究已有了一些报道。冉春等^[9]在中高应变率条件下,利用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 技术,研究了 TC18 钛合金动态力学行为,发现该材料具有显著的应变率强化效应,其失效形式为与应变和应变率相关的剪切破坏。苏楠等^[10]研究了 TC2 钛合金在高应变率下的动态流动应力特征,发现该材料具有明显的应变率强化和增塑效应,随着应变率的增加,二者均减弱,并建立了基于绝热温升修正的 J-C 本构模型,模型的预测结果与试验数据一致性较好。朱新杰等^[11]对轧制和热处理两种状态下的近 β 型新型钛合金的动态力学性能和失效行为进行了研究,发现轧制态钛合金的失效形式为脆性断裂+韧性断裂,而热处理态钛合金失效形式为韧性断裂。Xu Xuefeng 等^[12]研究了高应变率载荷下的 Ti6321 钛合金的动态压缩特性和变形机理,在塑性变形过程中,孪晶主导了动态变形机制,随着应变的进一步增加,孪晶的数量也随着增加,当应变达到 0.2 后,动态变形机制开始从孪生变形转变为位错滑移。彭德平等^[13]基于分离式 Hopkinson Bar 技术,在应变率为 $3\,069 \sim 11\,337\text{ s}^{-1}$ 范围,对 Ti6242 钛合金进行了冲击试验研究,并获得了该材料在不同冲击载荷下的绝热剪切行为和裂纹扩展机制。Tian Ze 等^[14]研究了室温下大应变率范围内的 TC11 钛合金的压缩机械性能和失效模式,结合该材

料的流动应力响应行为,提出了考虑应变率灵敏度和应变速率对应变硬化影响的修正 J-C 型模型,并基于多重种群遗传算法确定了模型参数,所获得的本构模型与试验数据吻合度较好。Shi Xiaohui 等^[15]研究了具有等轴结构的近 α Ti811 钛合金动态压缩性能,并基于位错增殖理论解释了动态应变曲线中出现的应力波动现象,因加工硬化与热软化的共同作用,致使应力波动后的动态应变曲线的硬化趋势变慢。由于过度考虑热软化效应,致使高应变率下 J-C 模型预测曲线与试验曲线之间存在一定的偏差。宁子轩等^[16]借助万能试验机、分离式霍普金森压杆,研究了经固溶处理后不同组织结构的 Ti-6321 钛合金动态响应行为,发现其失效形式均为绝热剪切破坏,就 Ti-6321 钛合金而言,等轴组织绝热剪切敏感性较低,魏氏组织绝热剪切敏感性较高。牛秋林等^[17]研究了高温、高应变率下 TC17 钛合金的动态力学行为,结果表明,该材料具有应变率强化效应和显著的温度敏感性,随着温度的升高,其应变率敏感性先减小后增加,随着温度的升高,温度敏感性大幅度增加。Zhang L H 等^[18]研究了高应变率载荷下 Ti-55511 和 Ti3Al2.5V 合金的机械响应和失效行为,发现与 Ti3Al2.5V 相比, Ti-55511 具有较高的流变应力,几乎没有应变硬化现象,微观结构表明两种合金均通过动态剪切定位而失效。

现有文献表明,针对钛合金高速冲击作用下的动态应力响应行为以及本构模型的研究主要集中在微观组织演变机理、失效行为,或仅从单一因素(如绝热温升、应变率强化效应、应变硬化效应)建立修正的本构模型等方面。而实际上高应变率下材料的流动应力受应变、应变率、温度间耦合作用的支配。为此,笔者基于 Hopkinson 压杆试验技术,以钛合金 TA31 为研究对象,探讨了高应变率下的流动应力响应行为,结合其流动应力响应行为特征,建立了一种考虑应变、应变率耦合作用以及绝热温升对其流动应力影响的新型 J-C 本构模型,为钛合金在冲击载荷作用下的复杂工程问题的数值模拟、结构设计、强度分析提供重要的参考依据和技术支持。

1 试验部分

准静态、动态试验试样均由 $\varnothing 25$ mm 的钛合金 TA31 棒料经线切割制备而成, 其化学成见表 1, 准静态压缩试样规格为 $\varnothing 9$ mm $\times$ 9 mm 的圆柱体、动态

冲击试样规格为 $\varnothing 3$ mm $\times$ 3 mm 的圆柱体。试样采用的热处理方式为 970 $^{\circ}\text{C}$ 加热+保温 90 min+空冷的固溶处理, 为确保试验数据的有效性, 经线切割制备后的试样两端面保证一定的平行度要求, 抛光处理后的表面粗糙度应满足 $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$ 。

表 1 钛合金 TA31 化学成分
Table 1 Chemical composition of titanium alloy TA31

Al	Zr	Mo	Nb	C	N	H	O	Ti
6.12	2.07	0.98	2.95	0.009	0.003	0.001	0.085	Bal.

准静态试验在型号为 UTM5305 的万能试验机上完成, 室温 (25 $^{\circ}\text{C}$), 应变率分别设定为 0.001、0.01 s^{-1} 和 0.1 s^{-1} ; 动态冲击试验在型号为 ALT1000 剖分式 Hopkinson 压杆试验装置上完成, 参数设定为: 温度 (25 $^{\circ}\text{C}$), 应变率为 1 000、2 000、3 000、4 000、5 000 s^{-1} 。冲击试验采用的压杆直径为 8 mm, 子弹长度为 80 mm, 通过调节气缸压力的大小以确保在所设定的应变率左右进行冲击加载。试验中通过超动态应变仪、瞬态波形存储器记录不同条件下的时间-电压曲线, 基于应力波理论计算出试样的工程应力-工程应变间的变化关系, 进而转换出相应的真应力-真应变变化曲线。为了确保试验数据的可靠性和有效性, 每一种试验条件下试验应至少重复 3 次, 取多次重复试验的平均数据作为本文中最终的有效数据进行分析。

2 试验结果分析

2.1 应变硬化效应

图 1 为室温下, 应变率为 0.001 ~ 0.1 s^{-1} 的真应力-应变曲线。图 2 为室温下, 应变率为 1 000 ~ 5 000 s^{-1} 的真应力-应变曲线。结果表明, 钛合金 TA31 表现出一定的应变硬化效应, 准静态下随着应变的增加, 应力逐渐增加, 达到最大值后开始缓慢减小, 动态下随着应变的增加, 真应力逐渐增加, 但增加的幅度逐渐减小, 直到试样发生剪切破坏。为了进一步定量研究其应变硬化效应, 引入应变硬化指数 N , 其表达式^[19-20] 如式 (1) 所示。

$$N = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \varepsilon} \quad (1)$$

式中, N 为应变硬化指数, σ_1 、 σ_2 、 ε_1 、 ε_2 为应力-应变曲线上相应两处选定点的应力、应变值。

依据式 (1) 计算出不同条件下的应变硬化指数 N , 列于表 2, 由表 2 可知, 钛合金 TA31 的应变硬化

指数与应变、应变率均相关, 随着应变、应变率的增加, 其数值均逐渐减小。准静态下的应变硬化指数变化幅度相对较小, 表明该材料在此条件下的应变硬化程度大致相同。而高应变率下的应变硬化指数的变化范围相对较大, 表明该试样在不同应变率下表现出一定差异的应变硬化程度。试样所呈现的这种应变硬化特征主要归结于高应变率下塑变过程中绝热温升软化作用。

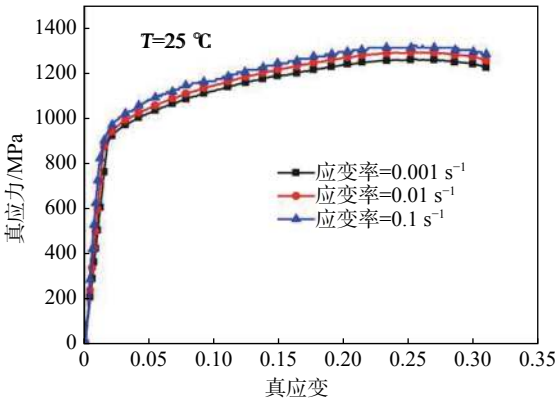


图 1 准静态下的真应力-应变曲线
Fig. 1 Stress-strain curves in quasi-static state

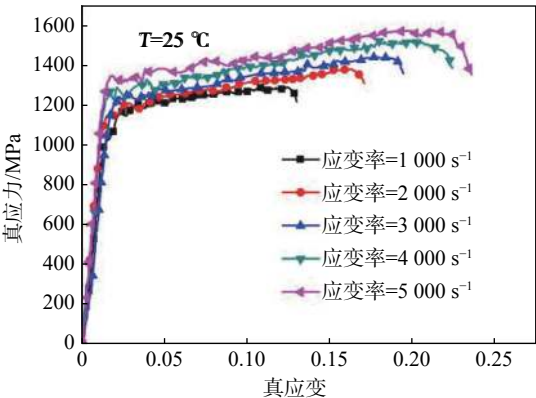


图 2 25 $^{\circ}\text{C}$ 不同应变率下的应力-应变曲线
Fig. 2 True stress-strain curves at different strain rates ($T=25 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

表2 不同应变、应变率下的应变硬化指数

Table 2 The strain hardening index at different strain and strain rate

$\dot{\varepsilon}/s^{-1}$	N					
	$\varepsilon=0.05$	$\varepsilon=0.10$	$\varepsilon=0.15$	$\varepsilon=0.20$	$\varepsilon=0.25$	$\varepsilon=0.30$
0.001	0.722 8	0.692 1	0.652 5	0.618 6	0.598 6	0.575 1
0.01	0.721 6	0.688 5	0.654 5	0.599 6	0.586 4	0.574 4
0.1	0.718 5	0.686 7	0.661 2	0.595 2	0.581 3	0.562 4
1 000	0.621 4	0.616 2				
2 000	0.601 8	0.587 6	0.561 9			
3 000	0.594 1	0.576 0	0.556 9	0.532 8		
4 000	0.576 5	0.582 4	0.561 5	0.530 1	0.528 7	
5 000	0.535 3	0.527 9	0.512 2	0.518 4	0.487 6	

2.2 应变率强化效应

图1、2表明,钛合金TA31呈现出一定的应变率强化效应。应变率从准静态的 $0.001 s^{-1}$ 分别增加至1 000、2000、3 000、4 000、5 000 s^{-1} 时,屈服应力的增幅分别为32.73%、33.65%、34.35%、34.98%、35.14%。为了定量研究该试样的应变率强化效应,进一步引入应变率敏感性指数 M 来评估其应变率强化效应,其表达式^[21]如式(2)所示。

$$M = \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} \right|_{\varepsilon, T} \quad (2)$$

式中, M 为应变率敏感性指数, σ 、 $\dot{\varepsilon}$ 、 ε 、 T 分别为应力(MPa)、应变率(s^{-1})、应变和温度($^{\circ}C$)。

依据式(2)计算出该试样的应变率敏感性参数 M 随应变、应变率变化的关系,如图3、4所示。由图3、4可知,钛合金TA31的应变率敏感性指数与应变、应变率均相关,受二者耦合作用的支配。随着应变率的增加而增加,增加幅度逐渐降低,且随着应变的增加而减小,减小幅度逐渐降低,其数值表现为应变、应变率的多项式函数关系。试样所表现出来的这种应变率强化特征为其本构模型的修正提供了一定的参考依据。

2.3 高应变率下的绝热温升软化效应

研究表明,金属材料在高应变率下,因加载作用时间极短,其塑性变形过程中变形热来不及向周围扩散,引起局部温度升高,造成温度软化现象,进而致使其流动应力减小。高应变率下塑性变形过程可认为是一个绝热过程,过程中产生的绝热温升可定义为^[22]式(3)。

$$\Delta T(\varepsilon) = \frac{\beta}{\rho C_v} \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon \quad (3)$$

式中, σ 为应力,MPa; ε 为应变; ρ 为材料的密度, kg/m^3 ; C_v 为材料定压下的比热容, $J/(kg \cdot K)$; β 为功热转化系数,其值取0.9。就本文中冲击试样而言, $\rho = 4.518 \times 10^3 kg/m^3$, $C_v = 535 J/(kg \cdot K)$ 。

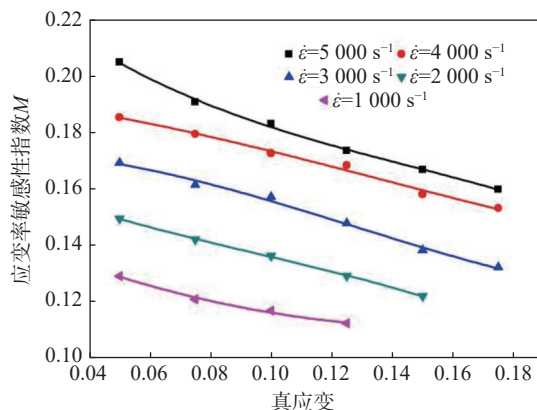
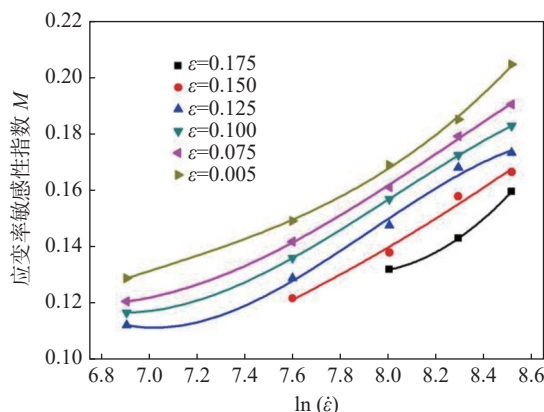
图3 应变率敏感性指数 M 随应变变化的关系Fig. 3 Relationship between strain rate sensitivity index m and strain图4 应变率敏感性指数 M 随对数应变率的变化关系Fig. 4 Relationship between strain rate sensitivity index m and logarithmic strain rate

图5为不同应变率下的绝热温升随应变变化的关系。结果表明,绝热温升的大小与应变、应变率均相关。同种应变率下,绝热温升与应变呈现出近似的线性关系,而随着应变率的增加,绝热温升逐渐增加。绝热温升的产生会进一步抑制塑性变形过程中的应变硬化效应和应变率强化效应,致使材料的流动应力减小。通过计算,该试样在4 000、5 000 s^{-1} 下的绝热温升高达110、120 $^{\circ}C$,对该材料的流动应力响应行为将产生较大的影响。也就是说,钛合金TA31室温下的流动应力受应变、应变率和绝热温升共同作用的影响。因此,在建立其室温下的本构模型时,需考虑绝热温升对流动应力的影响。

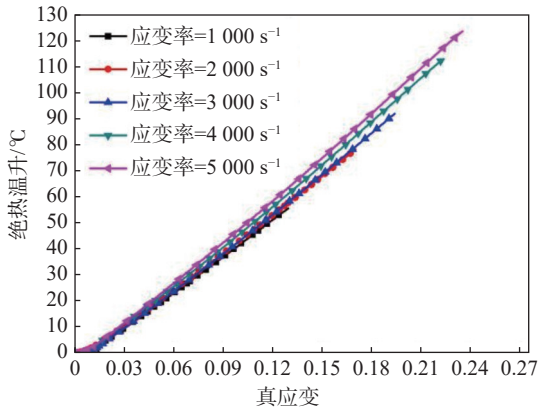


图5 不同应变率下绝热温升随应变变化的关系

Fig. 5 Relationship between adiabatic temperature rise and strain under different strain rates

3 本构模型

3.1 原 J-C 本构模型

J-C 模型由描述材料塑性变形中的应变硬化、应变率强化和温度软化三项构成,其结构简单,模型参数少,故被广泛用于快速加载条件下材料的冲击动力学计算和工程问题的数值模拟之中,该本构模型的定义式^[23-24]如式(5)、(6)所示。

$$\sigma = g(\bar{\varepsilon})\Gamma(\dot{\varepsilon}^*)\Theta(T^*) = (A + B(\bar{\varepsilon})^n) \cdot$$

$$(1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*)) \cdot (1 - (T^*)^m) \quad (4)$$

$$T^* = (T - T_m) / (T_m - T_r) \quad (5)$$

式中, σ 为流动应力(MPa); ε 为应变, $\bar{\varepsilon} = \varepsilon / \varepsilon_0$ 为等效应变; ε_0 为参考应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率(s^{-1}), $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率(s^{-1}); $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲的等效应变率; T 为试验温度($^{\circ}C$); T_r 为参考温度($^{\circ}C$); T_m 为材料的熔点($^{\circ}C$); T^* 为相对温度($^{\circ}C$); A 为参考应变率下的屈服强度(MPa); B 为应变硬化系数; n 为应变硬化指数; C 为应变率强化系数; m 为温度软化指数。

原 J-C 本构模型的结构式表明该模型中应变硬化项、应变率强化项和温度软化项三项相互独立,且每项中的参数并没有考虑应变、应变率和温度间的耦合效应对流动应力产生的影响。室温条件下,本构模型中的温度软化项忽略不计。然而,基于上述钛合金 TA31 的流动应力特性分析,该试样的流动应力受应变、应变率和绝热温升共同支配,且应变率敏感性参数受应变率和应变的耦合作用影响。至此,为了建立准确描述钛合金 TA31 流动应力随应变、应变率和温度变化关系的本构模型,需对原 J-C 本构模型进行修正。

3.2 修正的 J-C 本构模型

1) 应变硬化项的修正

J-C 本构模型在确定应变硬化指数时,应满足 $\ln(\sigma - A)$ 与 $\ln(\bar{\varepsilon})$ 遵循严格的线性关系。然而,由钛合金 TA31 的应变硬化指数的分析可知,随着应变的增加,其应变硬化指数逐渐变小。为此,为了准确反映该试样的应变硬化效应,将应变硬化项修正为应变的多项式模型,表达式如式(6)所示。

$$g(\bar{\varepsilon}) = B_0 + B_1(\bar{\varepsilon}) + B_2(\bar{\varepsilon})^2 + B_3(\bar{\varepsilon})^3 + B_4(\bar{\varepsilon})^4 \quad (6)$$

2) 应变率强化项的修正

基于 TA31 钛合金的应变率敏感性指数的分析,该材料的应变率强化效应受应变、应变率这两个参数共同作用的影响,应变率敏感性指数随着应变率的增加而增加,随着应变的增加而降低,且呈现出类似多项式的变化关系。为此,故将原 J-C 本构模型中的应变率强化系数 C 修正为应变、应变率的多项式函数,并考虑二者耦合效应的影响,则表达式如式(7)所示。

$$C = f(\dot{\varepsilon}^*, \bar{\varepsilon}) = C_0 + C_1 \ln(\dot{\varepsilon}^*) + C_2 \ln^2(\dot{\varepsilon}^*) + C_3 \ln^3(\dot{\varepsilon}^*) + C_4 \bar{\varepsilon} + C_5(\bar{\varepsilon})^2 + C_6(\bar{\varepsilon})^3 + C_7 \bar{\varepsilon} \ln(\dot{\varepsilon}^*) + C_8 \bar{\varepsilon} \ln^2(\dot{\varepsilon}^*) + C_9(\bar{\varepsilon})^2 \ln(\dot{\varepsilon}^*) \quad (7)$$

3) 绝热温升的修正

由图5可知,绝热温升与应变、应变率直接相关,且与应变呈现出近似的线性关系,而应变率不同,则绝热温升对应变的斜率 $\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial \varepsilon}\right)$ 不同。将 $\frac{\partial \Delta T}{\partial \varepsilon}$ 与 $\ln(\dot{\varepsilon}^*)$ 绘制在同一坐标系中,如图6所示,结果表明, $\frac{\partial \Delta T}{\partial \varepsilon}$ 与 $\ln(\dot{\varepsilon}^*)$ 表现出二次多项式函数关系。为此,绝热温升的计算式可表达为式(8)。

$$\Delta T = (D_0 + D_1 \ln(\dot{\varepsilon}^*) + D_2 \ln^2(\dot{\varepsilon}^*)) \cdot \varepsilon \quad (8)$$

至此,修正的 J-C 本构模型为式(9)。

$$\sigma = (B_0 + B_1(\bar{\varepsilon}) + B_2(\bar{\varepsilon})^2 + B_3(\bar{\varepsilon})^3) \cdot$$

$$(1 + f(\dot{\varepsilon}^*, \bar{\varepsilon}) \ln(\dot{\varepsilon}^*)) \cdot \left(1 - \left(\frac{\Delta T}{1630}\right)^m\right) \quad (9)$$

其中:

$$C = f(\dot{\varepsilon}^*, \bar{\varepsilon}) = C_0 + C_1 \ln(\dot{\varepsilon}^*) + C_2 \ln^2(\dot{\varepsilon}^*) + C_3 \ln^3(\dot{\varepsilon}^*) + C_4 \bar{\varepsilon} + C_5(\bar{\varepsilon})^2 + C_6(\bar{\varepsilon})^3 + C_7 \bar{\varepsilon} \ln(\dot{\varepsilon}^*) + C_8 \bar{\varepsilon} \ln^2(\dot{\varepsilon}^*) + C_9(\bar{\varepsilon})^2 \ln(\dot{\varepsilon}^*)$$

$$\Delta T = (D_0 + D_1 \ln(\dot{\varepsilon}^*) + D_2 \ln^2(\dot{\varepsilon}^*)) \cdot \varepsilon$$

3.3 本构模型参数的标定

1) 参数 $B_0 \sim B_4$ 的标定

在参考应变率、参考温度下式(9)可转化为式(10)。

$$\sigma = B_0 + B_1(\bar{\varepsilon}) + B_2(\bar{\varepsilon})^2 + B_3(\bar{\varepsilon})^3 + B_4(\bar{\varepsilon})^4 \quad (10)$$

将应变率为 $0.001 s^{-1}$ 下试验数据进行四次多项

式拟合,拟合结果如图7所示,可得参数 $B_0 \sim B_4$ 的数值,见表3。

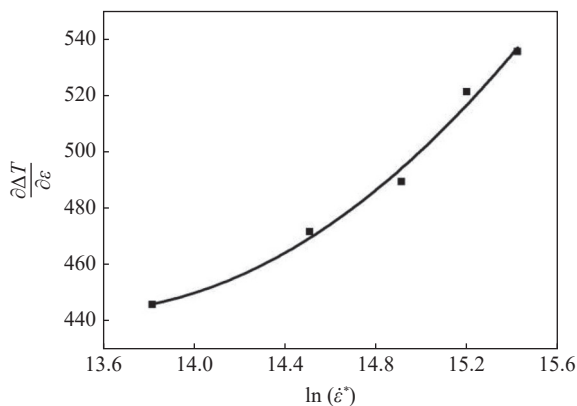


图6 $\frac{\partial \Delta T}{\partial \dot{\epsilon}}$ 随 $\ln(\dot{\epsilon}^*)$ 的变化关系

Fig. 6 Relationship between $\frac{\partial \Delta T}{\partial \dot{\epsilon}}$ and $\ln(\dot{\epsilon}^*)$

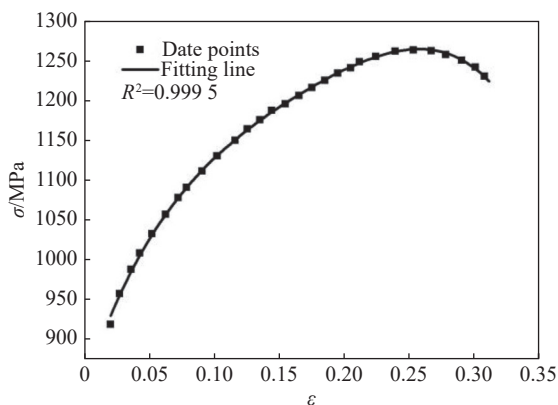


图7 参数 $B_0 \sim B_4$ 的拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of parameters $B_0 \sim B_4$

2) 参数 $D_0 \sim D_2$ 的标定

将图6中的数据点进行二次多项式拟合,拟合结果见图8,则参数 $D_0 \sim D_2$ 的值,见表4。

表3 参数 $B_0 \sim B_4$ 的数值
Table 3 Values for parameters $B_0 \sim B_4$

B_0	B_1	B_2	B_3	B_4
840.409 6	4 912.725 4	-29 496.922 8	106 051.056 6	-158 209.413 8

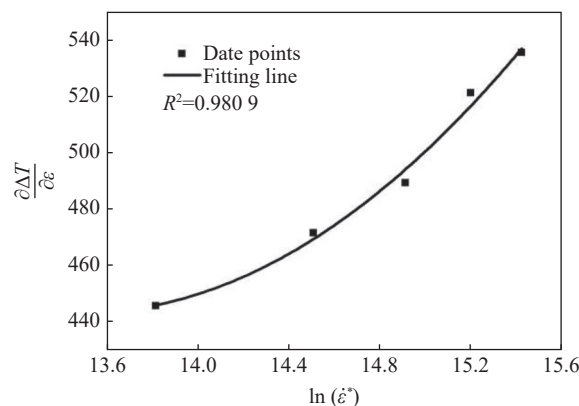


图8 参数 $D_0 \sim D_2$ 的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of parameters $D_0 \sim D_2$

表4 参数 $D_0 \sim D_2$ 的数值
Table 4 Values for parameters $D_0 \sim D_2$

D_0	D_1	D_2
4 968.211 3	-671.232 7	24.891 8

3) 参数 $C_0 \sim C_9$ 、 m 的标定

将(9)式转化为:

$$(1 + f(\dot{\epsilon}^*, \bar{\epsilon}) \ln(\dot{\epsilon}^*)) \cdot \left(1 - \left(\frac{\Delta T}{1\ 630} \right) m \right) = \frac{\sigma}{B_0 + B_1(\bar{\epsilon}) + B_2(\bar{\epsilon})^2 + B_3(\bar{\epsilon})^3} \quad (11)$$

将应变率为 $1\ 000 \sim 5\ 000\ \text{s}^{-1}$, 在应变范围为 $0.025 \sim 0.225$ 内, 每隔 0.025 处取相应的应力、应变值, 通过回归分析, 可确定 $C_0 \sim C_9$ 、 m 的数值见表5。

表5 参数 $C_0 \sim C_9$ 、 m 的数值
Table 5 Values for parameters $C_0 \sim C_9$ and m

C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_8	C_9	m
-5.973 2	-6.080 5	-3.890 7	-5.813 7	1.325 4	-0.097 5	0.002 4	0.405 5	-0.030 6	0.625 1

4 修正模型的有效性分析

图9为不同应变率下由本构模型计算的流动应力数值与试验所获得的流动应力间的对比关系,表6为本构模型计算的流动应力数值的平均绝对误差。图9、表6表明,本构模型计算的流动应力数值与试验获得的流动应力数值间呈现出较高的吻合度和一致性,能够较好地预测钛合金TA31的流动应力响

应行为。随着应变率的增加,该本构模型的预测误差相对升高,最小平均绝对误差为5.303 3,出现在应变率为 $1\ 000\ \text{s}^{-1}$ 的预测数据下,最大平均绝对误差为11.329 0,出现在 $5\ 000\ \text{s}^{-1}$ 的预测数据下。本构模型呈现的这种预测误差特点,主要归结于该试样在高应变率下的流动应力与应变、应变率、温度间的高度非线性关系和各因素间高度复杂性。

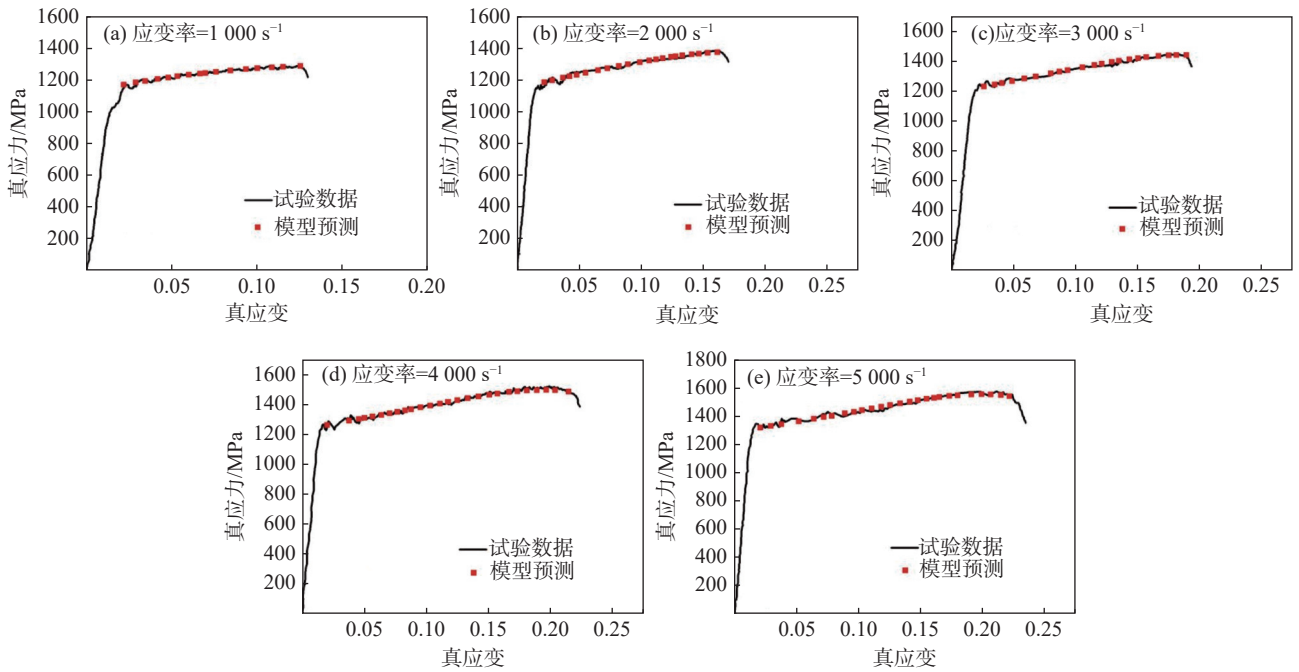


图9 不同应变率下应力-应变曲线的试验值与模型预测值的对比

Fig. 9 Comparison of experimental values of stress-strain curves with model predictions under different strain rates

表6 不同应变率下的平均绝对误差

Table 6 Average absolute error under different strain rates

T/℃	平均绝对误差				
	$\dot{\varepsilon}=1\,000\,\text{s}^{-1}$	$\dot{\varepsilon}=2\,000\,\text{s}^{-1}$	$\dot{\varepsilon}=3\,000\,\text{s}^{-1}$	$\dot{\varepsilon}=4\,000\,\text{s}^{-1}$	$\dot{\varepsilon}=5\,000\,\text{s}^{-1}$
25	5.303 3	8.900 1	7.778 4	9.243 4	11.329 0

为了进一步评估所修正本构模型的预测精度,借助平均值相对误差(AARE)和相关系数(R)两种统计参数来进行定量分析,两种统计参数的定义式^[25-26]分别为式(12)和(13)。

$$\text{AARE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\% \quad (12)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (13)$$

式中, E_i 、 P_i 分别为试验获取的流动应力、模型计算的流动应力(MPa); $\bar{E}$ 、 $\bar{P}$ 分别为 E_i 和 P_i 的平均值; N 为数据总数。

基于试验数据和本构模型计算数据,借助上述两式分别计算出所修正的本构模型的 R 值和 AARE 值,如图 10 所示。所修正的本构模型的 R 为 0.988 7, AARE 为 0.63%。两种统计参数数值间

呈现出高度的一致性,表明本文所修正的本构模型具有较高的预测精度,能够较准确地描述钛合金 TA31 的流动应力响应行为。

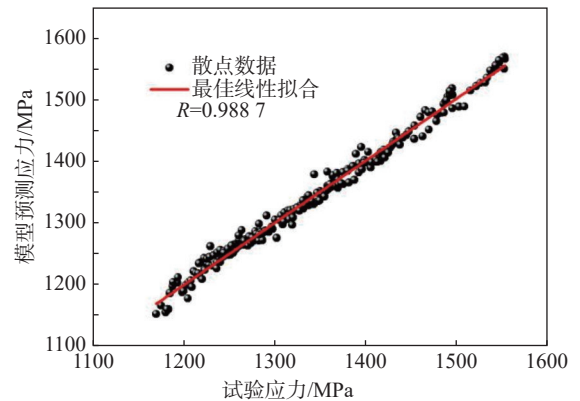


图10 试验值与本构模型计算值间的相关性

Fig. 10 The correlation between experimental and predicted values of two constitutive models

5 结论

基于室温下所获得的钛合金 TA31 的应力-应变曲线,探讨了流动应力响应行为呈现的特征,并结合其呈现的流变特征,构建了相应的修正本构模型,获得如下的主要结论:

1) 钛合金 TA31 呈现出一定应变率硬化、应变率强化效应,应变硬化指数随应变的变化而变化,随应变率的增加而减小,应变率敏感性指数与应变、

应变率相关,随着应变的增加而减小,随着应变率的增加而增加。

2) 本文所修正的本构模型的相关性系数为 0.988 7, 平均相对误差为 0.63%。表明该模型能够较准确地预测钛合金 TA31 在高应变率下的流动应

力响应行为。

3) 所修正的本构模型为钛合金 TA31 在高速加载条件下工程问题的数值模拟提供了一定的理论依据和技术支持。

参考文献

- [1] Batool S A, Ahmad A, Wadood A, *et al.* Development of lightweight aluminum-titanium alloys for aerospace applications[J]. Key Engineering Materials, 2018, 778: 22–27.
- [2] Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloy[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
- [3] Dipankar Banerjee J, Williams C. Perspectives on titanium science and technology[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 844–879.
- [4] Zhang Jian, Zhang Meng, Cui Weicheng, *et al.* Elastic-plastic buckling of deep sea spherical pressure hulls[J]. Marine Structures, 2018, 57: 38–51.
- [5] Morrow B M, Lebensohn R A, Trujillo C P, *et al.* Characterization and modeling of mechanical behavior of single crystal titanium deformed by split-Hopkinson pressure bar[J]. International Journal of Plasticity, 2016, 82: 225–240.
- [6] Bar Nurel, Moshe Nahmany, Nachum Frage, *et al.* Split hopkinson pressure bar tests for investigating dynamic properties of additively manufactured AlSi10Mg alloy by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 823–833.
- [7] Pavlo E Markovsky, Jacek Janiszewski, Dmytro G Savvak, *et al.* Mechanical behavior of bilayer structures of Ti64 alloy and its composites with TiC or TiB under quasi-static and dynamic compression[J]. Materials & Design, 2022, 223: 111205.
- [8] Pavlo E Markovsky, Jacek Janiszewski, Olexander Dekhtyar, *et al.* Deformation mechanism and structural changes in the globular Ti-6Al-4V alloy under quasi-static and dynamic compression: To the question of the controlling phase in the deformation of $\alpha+\beta$ titanium alloys[J]. Crystals, 2022, 12(5): 645–645.
- [9] Ran Chun, Chen Pengwan, Li Ling, *et al.* Experimental research on dynamic mechanical behavior of TC18 titanium alloy under medium and high strain rates[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(9): 1723–1728.
(冉春, 陈鹏万, 李玲, 等. 中高应变率条件下 TC18 钛合金动态力学行为的试验研究 [J]. 兵工学报, 2017, 38(9): 1723–1728.)
- [10] Su Nan, Chen Minghe, Xie Lansheng, *et al.* Dynamic mechanical characteristics and constitutive model of TC2 Ti-alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2021, 35(3): 201–208.
(苏楠, 陈明和, 谢兰生, 等. TC2 钛合金的动态力学特征及其本构模型 [J]. 材料研究学报, 2021, 35(3): 201–208.)
- [11] Zhu Xinjie, Fan Qunbo, Yu Hong, *et al.* Dynamic mechanical properties and failure of Ti-4.5Mo-5.1Al-1.8Zr-1.1Sn-2.5Cr-2.9Zn alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(4): 1235–1241.
(朱新杰, 范群波, 余洪, 等. Ti-4.5Mo-5.1Al-1.8Zr-1.1Sn-2.5Cr-2.9Zn 钛合金的动态力学性能及失效研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(4): 1235–1241.)
- [12] Xu Xuefeng, Tayyeb Ali, Wang Lin, *et al.* Research on dynamic compression properties and deformation mechanism of Ti6321 titanium alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 11509–11516.
- [13] Peng Deping, Liu Xiao, He Dandan, *et al.* Adiabatic shear behavior and crack propagation mechanism on Ti6242 titanium alloy under high-speed impact loading[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(9): 224–229.
(彭德平, 刘筱, 贺丹丹, 等. 高速冲击载荷下 Ti6242 钛合金的绝热剪切行为及裂纹扩展机理 [J]. 锻压技术, 2022, 47(9): 224–229.)
- [14] Tian Ze, Wu Haijun, Tan Chengwen, *et al.* Dynamic mechanical properties of TC11 titanium alloys fabricated by wire arc additive manufacturing[J]. Materials, 2022, 15(11): 3917.
- [15] Shi Xiaohui, Zhao Cong, Cao Zuhan, *et al.* Mechanical behavior of α near titanium alloy under dynamic compression: Characterization and modeling[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2019, 29(4): 432–439.
- [16] Ning Zixuan, Wang Lin, Cheng Xingwang, *et al.* Dynamic response behavior of Ti-6321 titanium alloy with different microstructures under split hopkinson pressure bar loading[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(4): 862–870.
(宁子轩, 王琳, 程兴旺, 等. 分离式霍普金森压杆加载下不同组织 Ti-6321 钛合金的动态响应行为 [J]. 兵工学报, 2021, 42(4): 862–870.)

- [17] Niu Qiulin, Chen Ming, Ming Weiwei. Study on the dynamic compressive mechanical behavior of TC17 Titanium alloy at high temperature and high strain rates[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2017, 28(23): 2888–2892, 2897.
(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.)
- [18] Zhang L H, Rittel D, Osovski S. Thermo-mechanical characterization and dynamic failure of near α and near β titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 729: 94–101.
- [19] Sun Xuewei, Ling Yongzhuo, Sun Jisong, *et al.* Method for determining material hardening index n [J]. Mechanical Strength, 1995, 17(4): 27–28.
(孙学伟, 令永卓, 孙吉松, 等. 材料硬化指数 n 的确定方法 [J]. 机械强度, 1995, 17(4): 27–28.)
- [20] Fang Jian, Wei Yijing, Wang Chengzhong. Analytical determination and mechanical analysis of tensile strain hardening index[J]. Chinese Journal of Plasticity Engineering, 2003, 10(3): 12–17.
(方健, 魏毅静, 王承忠. 拉伸应变硬化指数的解析测定及力学分析 [J]. 塑性工程学报, 2003, 10(3): 12–17.)
- [21] Yang X M, Guo H Z, Yao Z K. Strain rate sensitivity, temperature sensitivity, and strain hardening during the isothermal compression of BT25y alloy[J]. Journal of Materials Research, 2016, 31(18): 2863–2875.
- [22] Wang Lili. Progress in impact dynamics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1992.
(王礼立. 冲击动力学进展 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1992.)
- [23] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 21: 541–548.
- [24] Shu C, Cheng L, Xu Y. Research on Johnson-Cook constitutive model parameter estimation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(5): 1073–1083.
- [25] Liu Y, Li M, Ren X W, *et al.* Flow stress prediction of Hastelloy C-276 alloy using modified Zerilli Armstrong, Johnson Cook and Arrhenius-type constitutive models[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(11): 3031–3042.
- [26] Sheikhal A H, Morakkabati M. Constitutive modeling for hot working behavior of SP-700 titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(10): 6525–6537.

编辑 杨冬梅

(上接第 50 页)

- [51] Li Dong, Wan Xiaojing. Study on thermal stability of titanium alloy III: Thermal stability criterion and its application[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1984(6): 391–397.
(李东, 万晓景. 钛合金热稳定性研究 III: 热稳定性判据及其应用 [J]. 金属学报, 1984(6): 391–397.)
- [52] Madsen A, Ghonem H. Separating the effects of Ti_3Al and silicide precipitates on the tensile and crack growth behavior at room temperature and 593 °C in a near- α titanium alloy[J]. On Academic, 1995, 4(3): 301–307.
- [53] Gysler A, Weissmann S. Effect of order in Ti_3Al particles and of temperature on the deformation behavior of age-hardened Ti-Al alloys[J]. Material Science & Engineering, 1997, 27(2): 181–194.
- [54] Peng Na. Study on critical size effect of α_2 phase in high temperature titanium alloy[D]. Shenyang: Shenyang University, 2007.
(彭娜. 高温钛合金中 α_2 相的临界尺寸效应研究 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2007.)
- [55] Zhang Jun, Li Dong. α_2 Phase in high temperature titanium alloy[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2002.
(张钧, 李东. 高温钛合金中的 α_2 相 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.)
- [56] Zhao Liang, Liu Jianrong, Wang Qingjiang, *et al.* Effect of precipitation on creep and durability of Ti60 titanium alloy[J]. Journal of Materials Research, 2009, 23(1): 1–5.
(赵亮, 刘建荣, 王清江, 等. 析出相对 Ti60 钛合金蠕变和持久性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2009, 23(1): 1–5.)
- [57] Zhu Xuhui. Study on long-term microstructure stability of near- α high temperature titanium alloy Ti600[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.
(朱旭晖. 近 α 型高温钛合金 Ti600 长期时效组织稳定性研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2020.)
- [58] Li J, Cai J, Xu Y, *et al.* Influences of thermal exposure on the microstructural evolution and subsequent mechanical properties of a near- α high temperature titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 774: 138934–138947.
- [59] Williams J C, Baggerly R G, Paton N E. Deformation behavior of HCP Ti-Al alloy single crystals[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(3): 837–850.

编辑 唐肖