

基于 Z-A 本构模型 TC4 钛合金 高温流变行为的预测

沈建成^{1,2}, 贾海深^{2*}, 张继林², 罗文翠², 易湘斌^{1,2}

(1. 兰州工业学院, 绿色切削加工技术及应用甘肃省高校重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省精密加工技术及装备工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘 要:在描述材料承受不同变形条件下的响应行为及其热成形工艺过程优化方面, 本构模型具有重要意义。因此, 为了获得准确描述 TC4 钛合金高温流变行为的物理本构模型, 利用 Gleeble-3 800 热模拟试验机, 在不同温度 (550 ~ 950 °C) 下、不同应变速率 (0.01、0.1、1 s⁻¹) 下完成了等温压缩试验。依据试验数据, 对改进的 Z-A 本构模型参数进行了标定, 并对其有效性进行了分析。基于分析结果, 建立了一种优化的 Z-A 本构模型, 借助相关性系数 R , 平均相对误差值 AARE 和均方根误差 RSME 三种统计参数, 探讨了该模型的可预测性。结果表明优化的 Z-A 本构模型能够准确地预测该材料的高温流变行为, 其模型的 R 、AARE 和 RSME 分别为 0.999 4、1.62% 和 1.324 8。

关键词:TC4 钛合金; 高温流变行为; Z-A 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)04-0076-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.04.012

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Prediction of high temperature rheological behavior of TC4 titanium alloy based on Z-A constitutive model

Shen Jiancheng^{1,2}, Jia Haishen^{2*}, Zhang Jilin², Luo Wencui², Yi Xiangbin^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Technology, Key Laboratory of Green Cutting Technology and Application in Gansu Province, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Gansu Province Precision Machining Technology and Equipment Engineering Research Center, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: The constitutive model plays an important role in describing the response behavior of materials under different deformation conditions and in optimizing the hot forming process. Therefore, in order to obtain the physical constitutive model for accurately describing the high temperature rheological behavior of TC4 titanium alloy, the isothermal compression experiments were performed under different temperatures (500~900 °C) and different strain rates (0.01, 0.1, 1 s⁻¹) by using the Gleeble-3800 thermal simulator. According to the experimental data, the parameters of modified Z-A constitutive model are calibrated, and its effectivity is analyzed. Based on the analysis results, an optimized Z-A constitutive model was established, and the predictability of the model was discussed with the help of

收稿日期: 2023-11-14

基金项目:甘肃省重点人才项目 (甘组通字 [2022]77 号); 甘肃省科技计划项目-重点研发 (22YF7FA132); 甘肃省产业支撑项目 (2021CYZC-52); 甘肃省高校教师创新基金项目 (2024B-187); 兰州工业学院“启智”人才培养计划 (2018QZ-03)。

作者简介:沈建成, 1981 年出生, 男, 河南南阳人, 硕士, 副教授, 主要从事金属材料力学性能研究与高速切削加工, E-mail: 155230180@qq.com; * 通讯作者: 贾海深, 男, 河南周口人, 硕士, 副教授, 主要从事金属材料动态力学行为方面的研究, E-mail: jhsk9365@126.com。

correlation coefficient R , mean absolute relative error value AARE and root mean square error RSME. The results indicate that the optimized Z-A constitutive model can accurately predict the high-temperature rheological behavior of the material. The R , AARE and RSME of the model are 0.999 2, 1.63% and 1.325 2, respectively.

Key words: TC4 titanium alloy, high temperature rheological behavior, Z-A constitutive model

0 引言

作为一种中等强度的 $\alpha+\beta$ 型钛合金, TC4 因其优异的比强度、耐腐蚀性和高温力学性能, 被广泛应用在航空航天、能源、汽车等工程领域中^[1-4]。然而, 由于其独特的晶格结构, 室温下的成形能力受到了极大的限制, 进而阻碍了该材料在工程实际中的进一步开发和使用^[5]。此外, 材料在高温下的流变行为呈现与应变率、温度等参数的高度非线性关系, 其流动应力行为的表现形式十分复杂^[6-7]。而在工程实际中, 通常借助材料理想的本构模型来揭示其在高温条件下的流动应力行为。为此, 构建准确描述 TC4 钛合金高温流变行为的本构模型就显得格外重要。

众所周知, 理想的本构模型通常具备合理数量的模型参数、足够的预测精度和可靠性以及有限的试验数据评估性等特征。为此, 研究人员开发了诸多本构模型用于揭示材料在特定变形条件下的流动应力响应行为, 如经验本构模型、现象本构模型和物理本构模型等^[8-12]。冯秋元等人^[13]研究了 Ti60 钛合金在不同温度(800 ~ 1 150 °C)、不同应变速率(0.001 ~ 1 s⁻¹)下的流动应力行为, 发现该材料呈现出较显著的应变速率敏感性和温度敏感性, 并构建了不同变形温度区间的双曲正弦本构模型。Chen Xuewen 等^[14]采用遗传优化算法对 Ti6Al4V 钛合金高温的 Hansel-Spittel 本构模型参数进行了准确识别, 基于本构模型建立了热加工图, 并优化了热成形工艺参数, 给出了 Ti6Al4V 钛合金的最佳成形条件。温飞娟等人^[15]研究了 TC17 钛合金在高温下的热变形行为, 并基于 Arrhenius 本构模型对模型参数进行了多元线性回归分析, 结果表明 TC17 钛合金的流动应力在不同的温度区间呈现出不同的变化特征, 建立的 Arrhenius 本构模型预测值与试验值吻合度较高。Song Gao 等人^[16]建立了 Ti-6Al-4V 钛合金在温度为 650 ~ 750 °C、应变速率为 0.001 ~ 0.1 s⁻¹ 下的五种现象本构模型, 并对构建的本构模型预测精度进行了对比研究, 结果表明 Hensel-Spittel 本构

模型的预测精度最高, 而原始的 J-C 本构模型预测精度最差。陈灿等人^[17]对 TA32 钛合金进行了高温拉伸试验, 发现该材料在 650 ~ 750 °C 产生明显的加工硬化现象, 当温度高于 800 °C 或较低应变率下呈现出热软化现象, 并建立了修正的 Arrhenius-type 本构模型, 该模型具有较高的预测精度。Zhan H Y 等人^[18]采用 J-C 本构模型和修正的 Z-A 本构模型对 Ti6554 合金在高温、高应变率下的流动应力行为进行了表征, 发现两种本构模型均表现出较好的预测精度, 但修正的 Z-A 本构模型因考虑了应变和温度的耦合效应, 能够更好描述该材料应变硬化行为。以上文献研究表明: 尽管有大量本构模型被开发用于材料高温流变行为的预测, 但仍有必要基于物理的 Z-A 本构模型, 并考虑应变补偿对各模型参数的影响, 进一步建立能准确描述钛合金 TC4 的高温流动应力行为的本构方程, 用于评估该材料的热成型性能, 优化热成型工艺参数, 这对于保证材料本构模型的有效性和广泛的适用性也是十分重要的。

为此, 笔者在温度 550 ~ 950 °C, 应变速率为 0.01 ~ 1 s⁻¹ 下, 对 TC4 钛合金进行了高温压缩试验。依据试验结果, 基于对改进的 Z-A 本构模型的有效性分析, 建立了一种新型优化的 Z-A 本构模型, 并通过模型相关系数 R 、平均相对误差 AARE 等统计参数对该模型的有效性进行了评估。

1 试验部分

试验所用的试样取自某厂锻造的 TC4 钛棒, 其化学成分如表 1 所示, 为确保其微观组织均匀, 试样采用在 750 °C 加热+保温 2 h+空冷的退火处理, 处理后的钛棒经线切割制备成尺寸为 $\varnothing 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 圆柱形试样。为确保试验数据的有效性, 试样两端面进行了抛光处理, 且应保证一定的平行度要求。

等温压缩试验在 Gleeble 3 800 热模拟机上完成, 试验中采用误差为 $\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热电偶测温系统对加热温度进行测定, 试样以 5 °C/s 的加热速率加热到目标温度(分别为 550、650、750、850、950 °C)后,

并持续 2 min 保温状态,以保证试样温度的均匀性。随后分别以 0.01、0.1、1 s⁻¹ 的应变速率进行等温压

缩,当试样被压缩至应变约 0.85 后,立即对其水冷淬火,以保持高温变形状态下的微观结构。

表 1 TC4 钛合金化学成分
Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti	%
6.5	4.2	0.28	0.08	0.04	0.012	0.18	Bal.	

2 试验结果与分析

图 1 为 TC4 钛合金在不同变形温度和应变速率下的应力-应变曲线。结果表明:在不同的变形条件下,该材料的应力-应变曲线呈现出不同变化特征,在 550~650 °C 温度区间表现出一定的应变硬化效应;当温度从 750 °C 增加至 950 °C 时,表现出显著

的温度软化现象,流动应力到达峰值后,逐渐降低并趋向于稳定状态。此外,发现该材料在所研究的变形条件内表现出显著的应变速率敏感性,且应变速率敏感性受温度的影响较大,高温下应变速率敏感性较为显著,而低温下的应变速率敏感性相对较弱。

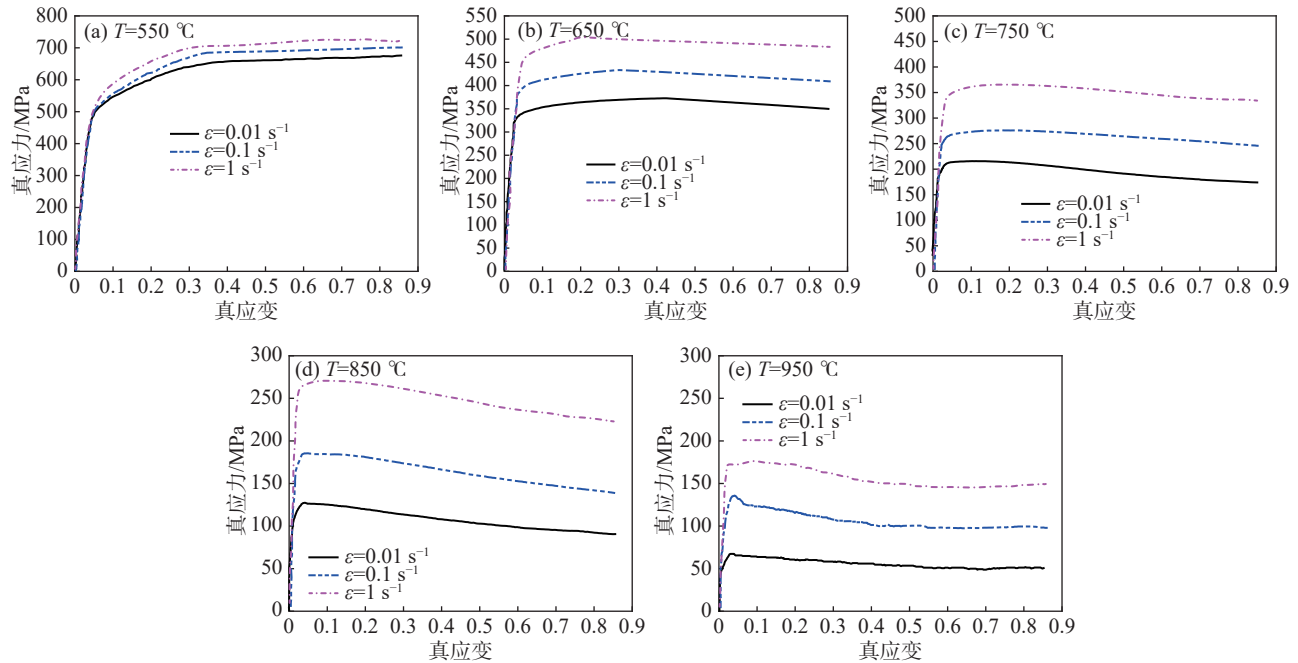


图 1 不同条件下 TC4 钛合金的应力-应变曲线
Fig. 1 Stress-strain curves of TC4 titanium alloy under different conditions

3 本构模型

3.1 改进的 Z-A 本构模型

作为一种典型的物理本构模型,Z-A 本构模型不仅反映了材料的应变硬化、应变速率强化和温度软化现象,同时还考虑了应变、温度间的耦合效应和应变速率、温度间的耦合效应对流动应力的影响,被广泛用于描述材料在不同变形条件下的应力流动行为。为了使原始的 Z-A 本构模型更具普遍性,国内外学者们提出了改进的 Z-A 本构模型^[19-20],其表达式如下:

$$\sigma = (C_1 + C_2 \varepsilon^n) \exp(-(C_3 + C_4 \varepsilon) T^*) + (C_5 + C_6 T^*) \ln(\dot{\varepsilon}^*) \quad (1)$$

$$T^* = T - T_r \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (3)$$

式中, σ 为应力(MPa); ε 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲的应变速率,其中 $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率(s⁻¹), $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率(s⁻¹,取值 0.01 s⁻¹); T^* 为相对温度(°C); T 为测试温度(°C); T_r 为参考温度(°C,取值 550 °C); C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 n 分别为材料

常数。

1) 参数 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 的确定

在参考应变速率下,式(1)可变换为:

$$\sigma = (C_1 + C_2 \varepsilon^n) \exp(-(C_3 + C_4 \varepsilon) T^*) \quad (4)$$

对式(4)两边取自然对数,可得:

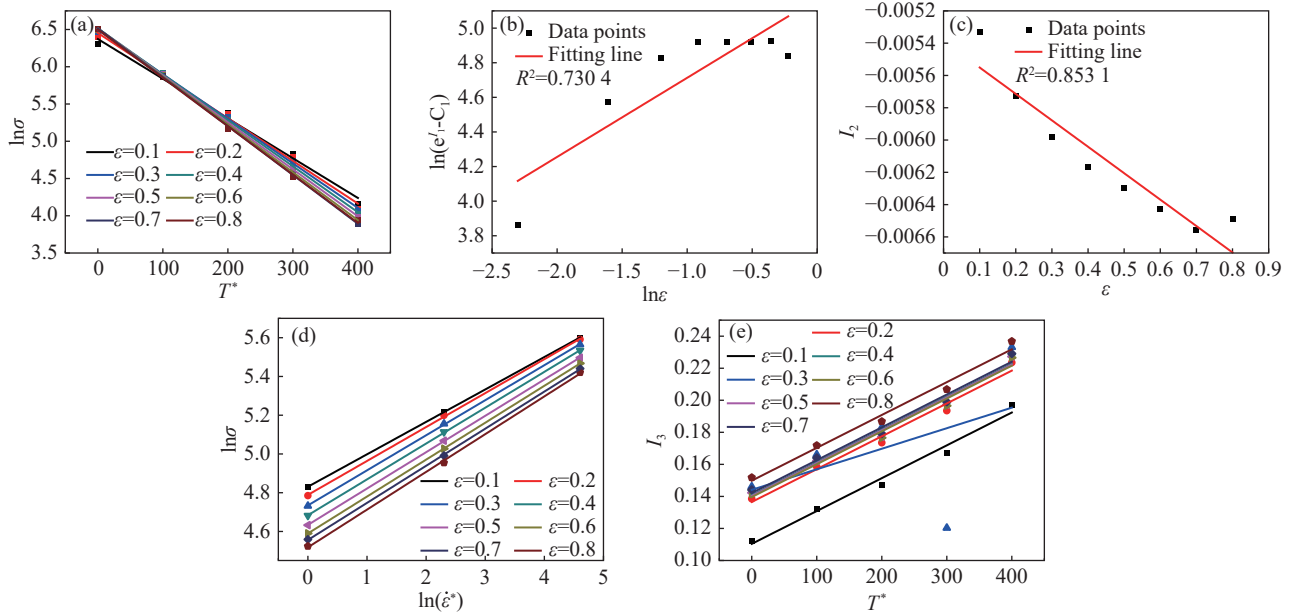
$$\ln \sigma = \ln(C_1 + C_2 \varepsilon^n) - (C_3 + C_4 \varepsilon) T^* \quad (5)$$

令:

$$I_1 = \ln(C_1 + C_2 \varepsilon^n) \quad (6)$$

$$I_2 = -(C_3 + C_4 \varepsilon) \quad (7)$$

利用式(5),作出 $\ln \sigma$ 与 T^* 的变化关系,并进行线性拟合,结果见图 2(a),则截距为 $I_1 = \ln(C_1 + C_2 \varepsilon^n)$,斜率为 $I_2 = -(C_3 + C_4 \varepsilon)$ 。



(a) $\ln \sigma$ 与 T^* 的相关性; (b) $\ln(e^{I_1} - C_1)$ 与 $\ln \varepsilon$ 的相关性; (c) I_2 与 ε 的相关性; (d) $\ln \sigma$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}^*$ 的相关性; (e) I_3 与 T^* 的相关性

图 2 参数相关性拟合结果

Fig. 2 Fitting results of parameters correlation

对式(6)两边进行变换可得:

$$\ln(e^{I_1} - C_1) = \ln C_2 + n \ln \varepsilon \quad (8)$$

C_1 为参考条件下的屈服强度,文中取 $C_1 = 538.68$ MPa,利用式(8),作出 $\ln(e^{I_1} - C_1)$ 与 $\ln \varepsilon$ 的关系并进行线性拟合,结果见图 2(b),则 C_2 、 n 的值分别为 175.981 68、0.457 42。

根据式(7),作出 I_2 与 ε 的变化关系,并进行线性拟合,结果见图 2(c),则 C_3 、 C_4 的值分别为 -0.005 39、-0.001 64。

2) 参数 C_5 、 C_6 的确定

对式(1)取自然对数,可得:

$$\ln \sigma = \ln(C_1 + C_2 \varepsilon^n) - (C_3 + C_4 \varepsilon) T^* + (C_5 + C_6 T^*) \ln(\dot{\varepsilon}^*) \quad (9)$$

令

$$I_3 = (C_5 + C_6 T^*) \quad (10)$$

在不同的变形温度下,固定应变分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8,作出 $\ln \sigma$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}^*$ 的变化关

系,并进行线性拟合,结果见图 2(d)(此处仅给出 850 °C 下的拟合结果),则斜率为 $I_3 = (C_5 + C_6 T^*)$,借助式(10)作出 I_3 与 T^* 的变化关系并进行线性拟合,结果见图 2(e),则 C_5 、 C_6 的值列于表 2。依据误差最小理论,确定 C_5 、 C_6 的值取应变为 0.7 所对应的数值。至此,改进的 Z-A 本构模型所有参数,如表 3 所示。

表 2 不同应变处 C_5 、 C_6 的值
Table 2 Values of C_5 and C_6 at different strains

ε	C_5	C_6
0.1	0.015 07	0.000 497
0.2	0.017 01	0.000 524
0.3	0.017 65	0.000 530
0.4	0.016 42	0.000 556
0.5	0.017 63	0.000 583
0.6	0.018 43	0.000 545
0.7	0.017 81	0.000 564
0.8	0.018 96	0.000 596

表3 改进的Z-A本构模型参数

Table 3 Parameters of the modified Z-A constitutive model

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	n
538	175.981 69	-0.005 39	-0.001 64	0.017 81	0.000 564	0.457 42

3) 改进的Z-A本构模型的有效性分析

图3为改进的Z-A本构模型预测值与试验值的对比,结果表明:改进的Z-A本构模型的预测值与试验值在不同的变形条件下均存在较大误差,尤其是描述该材料塑性应变约为0.05~0.4范围内的应力流动行为时。此外,同种温度下,随着应变速率的增加,预测的误差也逐渐增加,温度为950℃,应

变速率为 1 s^{-1} 时的误差最大。改进的Z-A本构模型之所以产生较大的误差,主要是因为忽略了应变对模型参数的影响。此外,由图2(b)、(c)拟合的相关性系数 R 分别为0.730 4和0.853 1,表明 $\ln(e^{I_1} - C_1)$ 与 $\ln \varepsilon$, I_2 与 ε 并不满足严格的线性关系。图2(d)、(e)所呈现的拟合关系表明 I_3 不仅表现出 T^* 的函数关系,而且还依赖于 ε 的变化,即 I_3 表现出 ε 、 T^* 的多项式函数关系,见图4(a)。因此,为了提高改进的Z-A本构模型的预测精度,需要对其进行优化,并考虑应变对模型参数的影响,同时还要考虑应变和温度的耦合对 I_3 的影响。

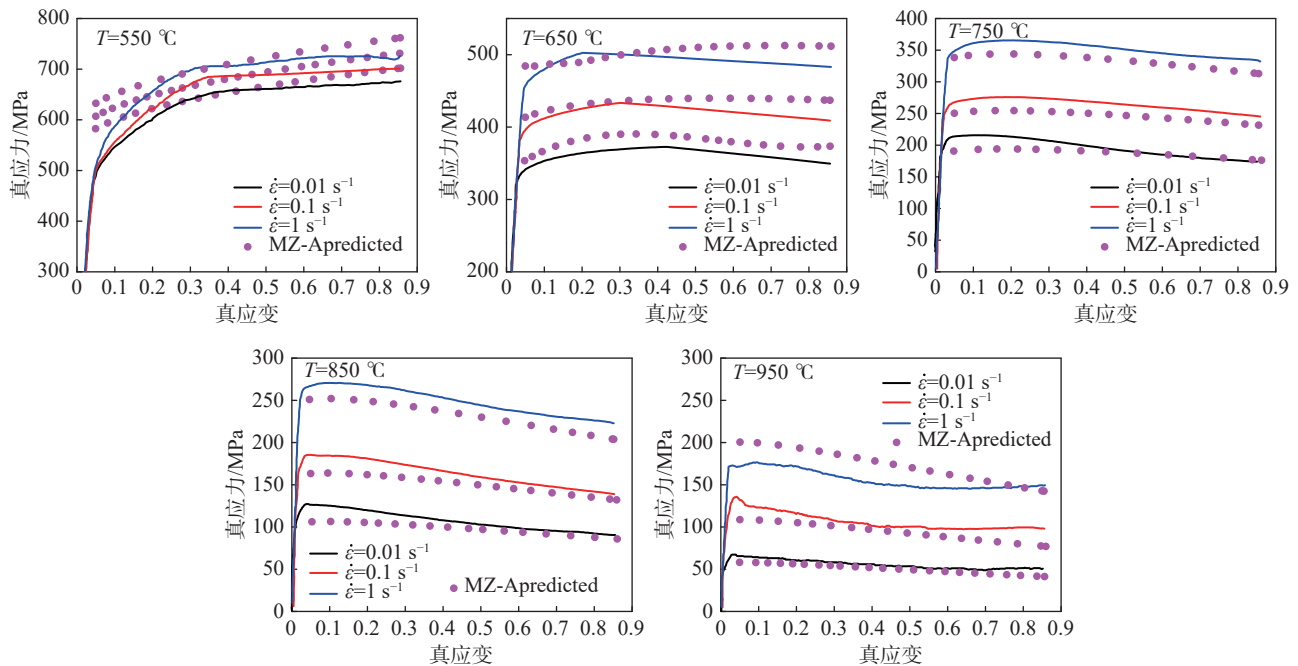


图3 不同温度下改进的Z-A模型预测值与试验值的对比

Fig. 3 Comparison between the experimental and predicted values of the modified Z-A model under different temperatures

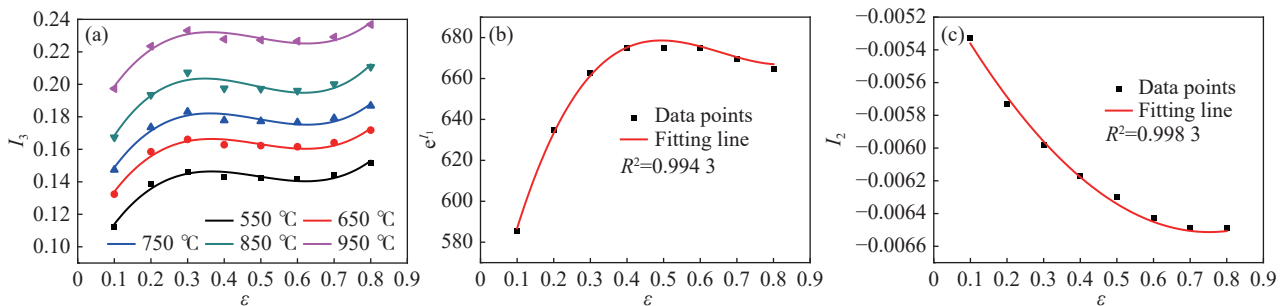
(a) I_3 随 ε 的变化关系; (b) e^{I_1} 与 ε 的拟合关系; (c) I_2 与 ε 的拟合关系

图4 优化后的拟合关系

Fig. 4 Optimized fitting results

3.2 优化的Z-A本构模型

基于对改进的Z-A本构模型预测误差的分析,

将 I_1 、 I_2 分别表达为 ε 多项式关系,而 I_3 则表达为 ε 、 T^* 的二元函数关系。则优化的Z-A本构模型的表

达式为:

$$\sigma = \exp(I_1 + I_2 T^* + I_3 \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (11)$$

$$I_1 = \ln(a_0 + a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2 + a_3 \varepsilon^3) \quad (12)$$

$$I_2 = b_0 + b_1 \varepsilon + b_2 \varepsilon^2 + b_3 \varepsilon^3 + b_4 \varepsilon^4 \quad (13)$$

$$I_3 = d_0 + d_1 \varepsilon + d_2 \varepsilon^2 + d_3 \varepsilon^3 + d_4 T^* + d_5 \varepsilon T^* \quad (14)$$

1) 参数 $a_0 \sim a_3$ 的确定

将图 2(b) 中拟合得到 I_1 值取自然数 e 的指数, 并与相应 ε 进行三次多项式拟合, 拟合结果见图 4(b), 则 $a_0 \sim a_3$ 的数值为 4 517.909 01、814.372 59、

-1 321.122 69、670.088 79。

2) 参数 $b_0 \sim b_2$ 的确定

对图 2(c) 中的数据进行二次多项式拟合, 拟合结果见图 4(c), 则 $b_0 \sim b_2$ 的值分别为 -0.004 98、-0.004 07、0.002 71。

3) 参数 $d_0 \sim d_5$ 的确定

将温度分别在 550、650、750、850、950 $^{\circ}\text{C}$, 应变为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 下, 获得 I_3 数值, 利用式 (14) 进行回归分析可得 $d_0 \sim d_5$ 的数值, 见表 4。

表 4 参数 $d_0 \sim d_5$ 的数值
Table 4 Values of $d_0 \sim d_5$ parameters

d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
0.015 377	0.006 469	-0.008 046	0.007 020	0.000 501	0.000 075

4) 优化的 Z-A 本构模型的有效性分析

图 5 为不同变形条件下所开发的优化 Z-A 本构模型预测值与试验值之间的对比关系。结果表明: 优化的 Z-A 本构模型(OZ-A)的预测值与试验数据的一致性较好, 能够较好反映出 TC4 钛合金在变形条件下所呈现的应力-应变曲线特征。优化的 Z-A

本构模型之所以具备较高的预测精度及可靠性, 主要是因为该模型考虑了应变对材料常数的影响, 耦合了应变补偿对流动应力的影响。优化的 Z-A 本构模型的预测值在某些条件下仍存在一定偏离, 主要归结于材料在高温下的流动应力是高度非线性的, 以及影响流动应力的材料常数也是非线性的。

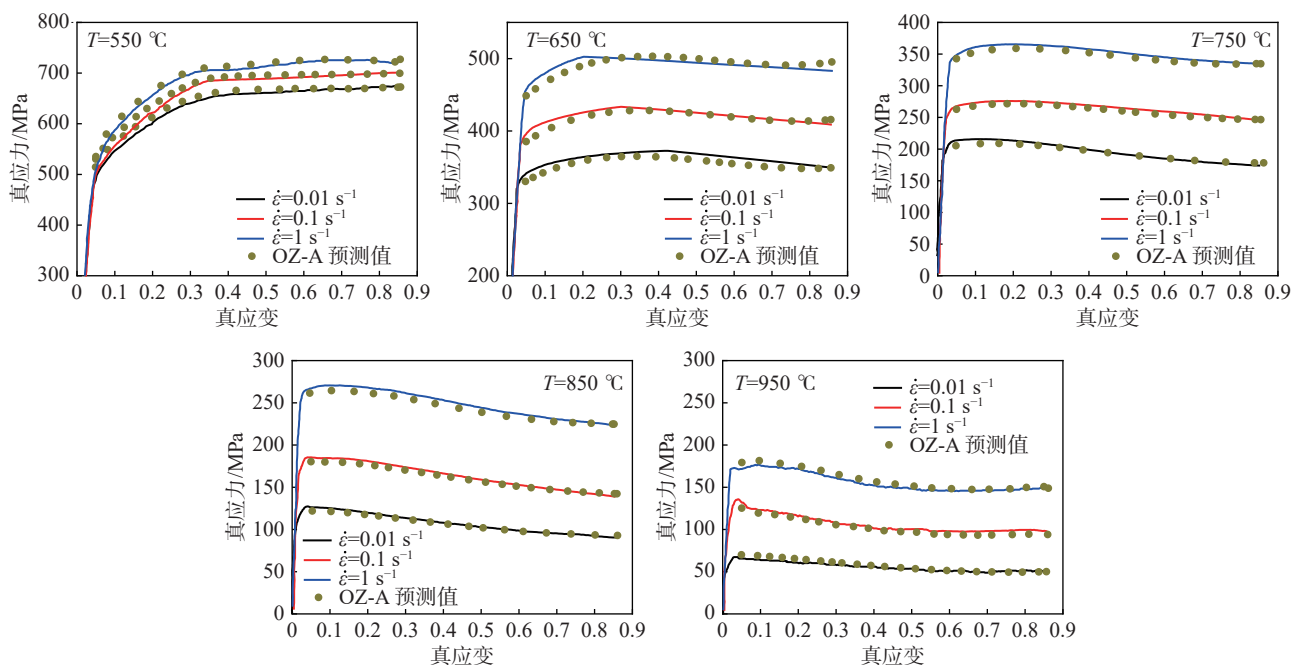


图 5 不同温度下的试验值与优化的 Z-A 本构模型预测值间的对比

Fig. 5 Comparison between the experimental and predicted values of the optimized Z-A model under different temperatures

为了进一步研究优化的 Z-A 本构模型预测精度, 引入相关系数 R 、平均相对误差 (AARE)、均方

根误差 (RMSE) 三个参数进行定量评估, 其表达式^[21-22]为:

$$\text{AARE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\% \quad (15)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (16)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - E_i)^2} \quad (17)$$

式中, E_i 、 P_i 分别为试验值和预测值(MPa); $\bar{E}$ 、 $\bar{P}$ 分

别为试验值(E_i)和预测值(P_i)的平均值; N 为数据总数。

基于式(15)~(17), 采用不同变形条件下获得的试验值和优化模型的预测值分别计算出 R 、AARE 和 RMSE, 列于表 5。图 6 为优化 Z-A 本构模型预测值与试验值的相关性关系。优化的 Z-A 本构模型的 R 、AARE 和 RMSE 分别为 0.999 4、1.62%、1.324 8。计算结果表明: 优化的 Z-A 本构模型具有更高的预测精度, 能够较好地跟踪 TC4 钛合金在变形条件下的流动应力。

表 5 优化的 Z-A 模型相关性系数(R) 平均相对误差(AARE)及均方根误差(RMSE)
Table 5 Correlation coefficient and average relative error of the optimized Z-A model

本构模型	相关性系数(R)	平均相对误差(AARE)/%	均方根误差(RMSE)
OZ-A	0.999 4	1.62	1.324 8

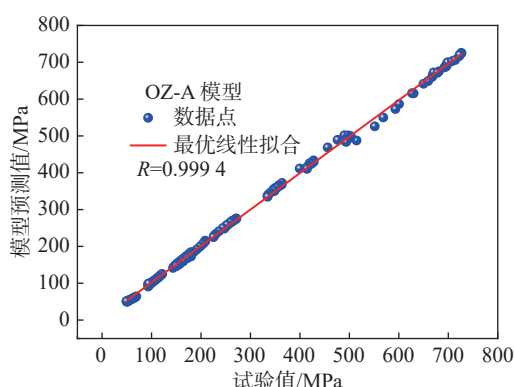


图 6 优化的 Z-A 模型的预测值与试验值间的相关性

Fig. 6 Correlation between the experimental and predicted values of the optimized Z-A model

4 结论

对 TC4 钛合金在温度 550 ~ 950 °C, 应变速率

0.01 ~ 1 s⁻¹ 下进行了等温压缩试验, 借助试验数据, 基于对改进的 Z-A 本构模型的有效性分析, 建立了一种优化的 Z-A 本构模型, 研究结果如下:

1) TC4 钛合金在 550 ~ 650 °C 区间内表现出一定的应变硬化现象, 而在 750 ~ 950 °C 范围内则呈现出显著的软化现象。此外, 该材料在高温下对应变速率十分敏感, 而低温下的应变速率敏感性相对较弱。

2) 优化的 Z-A 本构模型的相关性系数 R 、平均相对误差 AARE 和均方根误差 RMSE 分别为 0.999 4、1.62%、1.324 8。

3) 优化的 Z-A 本构模型不仅能够较准确地预测该材料的流动应力, 而且能够较好地跟踪其应力-应变的变化特征。其主要原因归结于考虑了应变对模型参数的影响, 增加了模型参数的数目。

参考文献

- [1] Williams J C, Boyer R R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components[J]. Metals, 2020, 10(6): 705.
- [2] Ji Ce, Huang Huagui, Wang Tao, *et al.* Recent advances and future trends in processing methods and characterization technologies of aluminum foam composite structures: A review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 93: 116-152.
- [3] Jin Hexi, Wei Kexiang, Li Jianming, *et al.* Research progress of titanium alloys for aviation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 280-292.
(金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 280-292.)
- [4] Zhu Zhishou. Research status and development of titanium alloy technology for aviation in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 44-50.
(朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展 [J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.)
- [5] Zhang Bi, Yang Fulun, Wang Jiexin. Fundamental aspects in vibration-assisted tapping[J]. Journal of Materials Processing

- Technology, 2003, 132(1-3): 345-352.
- [6] Hor A, Morel F, Lebrun J, *et al.* An experimental investigation of the behaviour of steels over large temperature and strain rate ranges[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 67: 108-122.
- [7] Muszka K, Dziedzic D, Madej L, *et al.* The development of ultrafine-grained hot rolling products using advanced thermomechanical processing[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 610: 290-296.
- [8] Ma Xiong, Zeng Weidong, Sun Yu, *et al.* Modeling constitutive relationship of Ti17 titanium alloy with lamellar starting microstructure[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 538: 182-189.
- [9] Wu Shuaihuai, Zhu Baohong, Jiang Wei, *et al.* Hot deformation behavior and microstructure evolution of a novel Al-Zn-Mg-Li-Cu alloy[J]. Materials, 2022, 15(19): 6769.
- [10] Zhang Ming, Liu Xianli, Yue Caixu. Study on constitutive model for titanium alloy by coupling strain-temperature and dynamic crystallization mechanical[J]. Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(11): 1641-1648.
(张铭, 刘献礼, 岳彩旭, 等. 考虑应变-温度耦合与高温动态结晶的钛合金本构模型研究 [J]. 机械科学与技术, 2021, 40(11): 1641-1648.)
- [11] Shin H, Ju Y, Choi M K, *et al.* Flow stress description characteristics of some constitutive models at wide strain rates and temperatures[J]. Technologies, 2022, 10(2): 52.
- [12] Jiang Ziwei, Yang Dong, Chen Jianbin. Dynamic constitutive model of titanium alloy Ti-6Al-4V for high speed cutting: A review[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(4): 55-67.
(姜紫薇, 杨东, 陈建彬. 面向高速切削的钛合金 Ti-6Al-4V 动态本构模型: 综述 [J]. 航空材料学报, 2023, 43(4): 55-67.)
- [13] Feng Qiuyuan, Guo Jialin, Yang Jun, *et al.* Hot deformation behavior of Ti60 high temperature titanium alloy I: Constitutive equations[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(11): 158-166.
(冯秋元, 郭佳林, 杨军, 等. Ti60 高温钛合金的热变形行为 I: 本构方程 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28(11): 158-166.)
- [14] Chen Xuewen, Zhang Bo, Du Yuqing, *et al.* Constitutive model parameter identification based on optimization method and formability analysis for Ti6Al4V alloy[J]. Materials, 2022, 15(5): 1748.
- [15] Wen Feijuan, Wen Qifei, Long Zhang, *et al.* Hot deformation behavior and constitutive model of TC17 titanium[J]. Alloy Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47(8): 86-92, 99.
(温飞娟, 温奇飞, 龙樟, 等. TC17 钛合金热变形行为及本构模型 [J]. 机械工程材料, 2023, 47(8): 86-92, 99.)
- [16] Song Gao, Sang Ye, Li Qihan, *et al.* Constitutive modeling and microstructure research on the deformation mechanism of Ti-6Al-4V alloy under hot forming condition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 892: 162128.
- [17] Chen Can, Chen Minghe, Xie Lansheng, *et al.* Flow behavior of TA32 titanium alloy at high temperature and its constitutive model[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(3): 827-834.
(陈灿, 陈明和, 谢兰生, 等. TA32 新型钛合金高温流变行为及本构模型研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(3): 827-834.)
- [18] Zhan H Y, Wang G, Kent D, *et al.* Constitutive modelling of the flow behaviour of a β titanium alloy at high strain rates and elevated temperatures using the Johnson-Cook and modified Zerilli-Armstrong models[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 612: 71-79.
- [19] Samantaray D, Mandal S, Borah U, *et al.* A thermo-viscoplastic constitutive model to predict elevated-temperature flow behaviour in a titanium-modified austenitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 526(1-2): 1-6.
- [20] Mirzaie T, Mirzadeh H, Cabrera J M. A simple Zerilli-Armstrong constitutive equation for modeling and prediction of hot deformation flow stress of steels[J]. Mechanics of Materials, 2016, 94: 38-45.
- [21] Jia Haishen, Xia Shiyu, Zhang Jilin, *et al.* Study on rheological behavior and constitutive model of TA 17 titanium alloy at high strain rate[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 837-844.
(贾海深, 夏世玉, 张继林, 等. 高应变率下 TA17 钛合金的流变行为及其本构模型研究 [J]. 机械强度, 2022, 44(4): 837-844.)
- [22] Shayanpoor A A, Rezaei Ashtiani H R. The phenomenological and physical constitutive analysis of hot flow behavior of Al/Cu bimetal composite[J]. Applied Physics A, 2022, 128: 636.