

基于物理及元建模法的 TB15 钛合金本构模型研究

吴轩轩¹, 董显娟¹, 徐 勇², 鲁世强¹, 涂泽立¹, 王宇航¹

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

(2. 南昌航空大学 通航学院, 江西 南昌 330063)

摘 要: 采用 Gleeble-3800 热模拟机对 TB15 钛合金进行等温恒变速率热压缩试验, 研究其在变形温度为 810~930 °C、应变速率为 0.001~10 s⁻¹ 和高度压下量为 60% 条件下的热变形行为; 建立了物理、支持向量回归 (SVR) 和响应面 3 种本构关系模型来预测 TB15 钛合金的流动应力, 同时对比了 3 种本构模型的预测精度。结果表明: TB15 钛合金的流动应力随应变速率的降低和变形温度的升高而减小, 峰值应力的变化对应变速率的敏感性更高; 物理本构模型、SVR 本构模型和响应面本构模型相关系数 R 均大于 0.98, 但是响应面本构模型的 R 值达到了 0.993, 而且响应面本构模型的相对误差在 ±5% 范围内的预测值频率达到了 67.9%, 大于物理本构模型的 58.6%。同时经过方差分析得到所构建的响应面本构模型的显著性检验值 $P < 0.0001$, 表明响应面本构模型预测的流动应力与变形温度、应变速率和应变之间的回归关系显著, 比物理本构模型和 SVR 本构模型有更高的精度, 能够更好的预测 TB15 钛合金的流动应力。

关键词: TB15 钛合金; 本构模型; 响应面; 显著性检验值

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)05-1409-08

TB15 钛合金是国内自主研发的一种新型的高强高塑钛合金, 它是属于亚稳 β 钛合金中的一种。经过合理的热加工工艺, 可以使其具有优异的强塑性匹配, 因此该合金在航空航天等领域有很大的应用前景^[1-2]。事实上, TB15 钛合金的性能和微观组织对其热加工工艺比较敏感。因此通过热变形控制 TB15 钛合金的组织与性能, 进而改善零部件力学性能具有重要意义。

揭示 TB15 钛合金在热压缩过程中的本构关系是研究该合金热加工工艺的基础, 因此建立 TB15 钛合金热变形过程中的本构模型很有意义。在本构模型中, Arrhenius 模型因其良好的预测能力而被最广泛地用于描述本构关系^[3]。然而, 一些研究者在采用 Arrhenius 型本构方程预测流动应力时并没有达到他们所预期的效果。一些研究者发现 Arrhenius 本构模型在预测不同材料的流动应力时没有考虑到他们的物理性质^[4]。所以有研究者建立了考虑了变形温度对杨氏模量和自扩散系数的影响的物理本构模型。如 Jiang 等^[5]和 Li 等^[6]开发了精确的物理模型来描述近 β 钛合金的流动行为。Mirzadeh^[7]建立了不锈钢和 7075 铝合金 2 种不同材料的物理本构模

型, 发现所建立的物理本构模型有较高的预测精度。然而, 一些研究者认为 Arrhenius 模型和其他唯象本构模型需要考虑加工参数对流动行为的耦合效应^[9]。由于热变形相互作用 (如位错产生和运动) 的非线性和复杂性, 即使使用基于物理的本构模型, 也无法准确描述实际流动应力^[10]。因此, 有研究者提出了元建模的方法, 元建模方法旨在构建输入和输出数据的近似值。这些方法用于许多工程领域, 擅长处理非线性和复杂的拟合问题^[11]。在这些元建模方法中, 支持向量回归法和响应面法建立本构关系模型有较高的预测精度。如 Qiao 等^[12]发现, 对于 AlCrFeNi 中熵合金, 支持向量机回归 (SVR) 模型比 Arrhenius 型本构模型和人工神经网络 (ANN) 模型更精确。Shen 等^[13]使用 3 种元建模方法 (响应面法、克里格法和 BP 神经网络) 对 TC6 钛合金的本构关系进行建模。通过对比发现响应面法能够更好的预测 TC6 钛合金的流动应力。

基于上述研究, 本实验依据 TB15 钛合金热压缩实验数据, 建立了物理, 支持向量机回归 (SVR) 和响应面本构关系模型来预测 TB15 钛合金的流动应力, 同时对比了 3 种本构模型的预测精度。研究

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 航空科学基金 (2020Z047056003); 江西省重点研发计划 (20202BBEL53012); 江西省研究生创新专项基金 (GA202100312)

作者简介: 吴轩轩, 男, 1998 年生, 硕士生, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, E-mail: wuxuanxuan1998@163.com

结果可为 TB15 钛合金的实际热加工工艺参数设计提供理论依据。

1 实 验

实验所用材料为热锻棒材, 其名义成分为 Ti-5.4Cr-5Mo-5V-4Al。用金相法测定的相变点为 $(790 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。图 1 为经过 $830^\circ\text{C}/0.5\text{ h}$ 空冷固溶处理的光学显微镜下的初始微观组织以及 XRD 图谱。可以看出, 合金主要以单一的 β 相组成, 其初始金相组织为等轴 β 组织。

为了研究 TB15 钛合金的热变形行为和组织演变, 将试样制成尺寸为 $\Phi 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的小圆柱体, 然后使用 Gleeble-3800 热模拟机对试样进行等温恒应变速率热压缩试验。热压缩试验前, 在试样和模具之间放置云母片, 以减少摩擦的影响。热压缩变形温度分别为 810 、 840 、 870 、 900 和 930°C , 应变速率分别为 0.001 、 0.01 、 0.1 、 1 和 10 s^{-1} 。试验前先将试样以 10°C/s 的升温速度加热至试验温度, 然后保温 300 s , 以确保温度平衡。保温结束后以试验设定的参数对试样进行热压缩试验, 压缩至变形量为 60% (真实应变约为 0.9) 结束。压缩试验结束后, 立即进行水淬, 以保留热变形的组织。整个压缩试验过程是在氩气气氛下进行的。在实验过程中, 该装置能够自动采集不同压缩实验参数下的流

动真应力和真应变数据。将该试样沿着与压缩轴平行的方向将试样切割成 2 等分, 制备金相试样, 然后将试样表面抛光成镜面, 随后采用 $10\text{ vol}\% \text{HF} + 20\text{ vol}\% \text{HNO}_3 + 70\text{ vol}\% \text{H}_2\text{O}$ 腐蚀剂对试样进行腐蚀, 并利用金相显微镜观察变形微观组织。

2 实验结果

2.1 TB15 钛合金流动应力-应变曲线

图 2 为 TB15 钛合金在不同变形条件下的应力-应变曲线。从图 2 可以看出, TB15 钛合金变形初期发生了弹性变形, 流动应力迅速增大, 随着变形的继续, 进入塑性变形阶段, 随后应力达到峰值。随后迅速下降, 表现出明显的初始屈服阶段。屈服下降后, 出现较为缓和的加工硬化阶段, 随着应变的增加, 加工硬化和流动软化相互竞争达到动态平衡, 流动应力逐渐趋向于稳态。同时, 从图 2 中还可以看出, 在低温、高应变速率下, 流动软化明显, 且随着温度升高至 930°C , 流动软化减小。流动软化主要与变形热效应、动态回复 (DRV)、动态再结晶 (DRX) 等有关。低温高应变速率下的流动软化更为明显, 这主要是由于变形热效应引起的。由于钛合金的导热系数相对较低, 塑性变形产生的热量无法及时消散, 导致局部温升。随着温度的升高, 软化程度明显减小, 进一步说明变形热效应对高温下流动软化的影响减小。应变速率为 0.001 s^{-1} 时, 流动软化相对较低, 这可以归因于低应变速率下 DRX 的发生。

图 3 为不同变形条件下的峰值应力。从图 3 可以看出, 随着变形温度的降低和应变速率的增加, 峰值应力逐渐增大。同时, 从图中还可以看出随着应变速率的增加, 峰值应力的变化更加明显, 因此说明峰值应力对应变速率的变化更加敏感。

2.2 微观组织分析

图 4 为 TB15 钛合金在不同变形参数下的显微组织, 图 4a~4c 是应变速率为 0.001 s^{-1} , 温度为 810 、 870 、 900°C 下的显微组织。从图中可以看出, 随着温度的升高, 动态再结晶晶粒尺寸增大。当温度为 810°C 时, 初始晶粒被拉长且晶界呈现锯齿状, 在锯齿状晶界附近能看到细小的 DRX 晶粒。随着温度升高, DRX 生长的驱动力增强, 从而加速了 DRX 晶粒长大。温度为 900°C 时, DRX 晶粒长大明显, 动态再结晶程度较高。同时可以看出在温度为 870 和 900°C 时, 在初始晶粒内部出现了形状规则的多边形晶粒 (如图 4b 和 4c 虚框圈出)。一般来说, 不连续动态再结晶 (DDRX) 晶粒一般在晶界附近

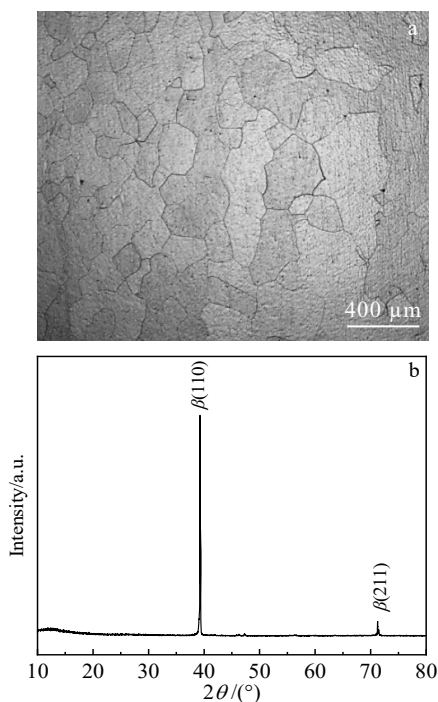


图 1 TB15 合金原始组织与 XRD 图谱

Fig.1 Original microstructure (a) and XRD pattern (b) of TB15 alloy

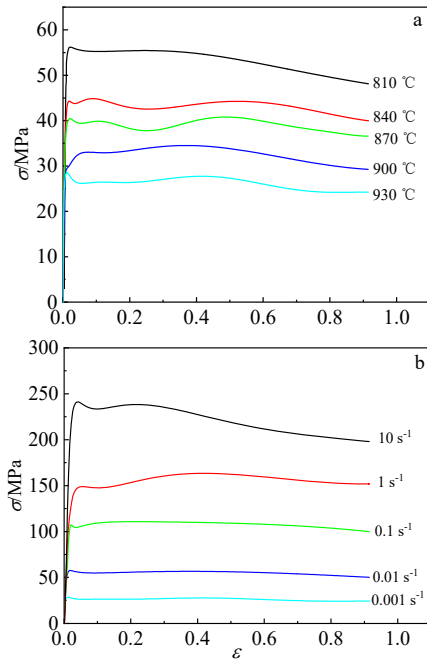


图2 TB15 钛合金不同变形条件下的流动应力-应变曲线
Fig.2 Flow stress and strain curves of TB15 alloy under different deformation conditions: (a) 0.001 s^{-1} and (b) $930 \text{ }^{\circ}\text{C}$

形核, 而连续动态再结晶 (CDRX) 晶粒常见于在晶粒内部产生^[14]。因此, 这可能是由于 CDRX 的发生导致的。

图 4d~4e 是温度为 $930 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 $0.001, 0.1, 10 \text{ s}^{-1}$ 时的微观组织。从图中可以看出, 在应变速率

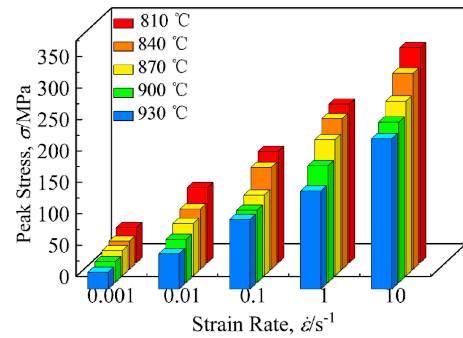


图3 TB15 钛合金在不同变形条件下的峰值应力
Fig.3 Peak stress of TB15 titanium alloy under different deformation conditions

为 0.001 s^{-1} 时, 动态再结晶程度较高, 合金的变形时间较长从而导致再结晶晶粒长大明显; 应变速率为 0.1 s^{-1} 时, 组织变形的不均匀程度增加, 且由于变形时间较短, 再结晶发展不充分, 细小的再结晶晶粒主要发生在晶界附近; 当应变速率增加到 10 s^{-1} 时, 初始晶粒被压扁, 组织很不均匀, 在初始晶界附近仅有少量的细小再结晶晶粒, 动态再结晶程度很低。通过微观组织分析表明, 在 $0.001 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 较低应变速率下的流动软化主要是由于 DRX 导致的, 而在 $1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 较高应变速率下 DRX 程度很低, 此时显著的流动软化可能主要归因于变形热效应的影响。

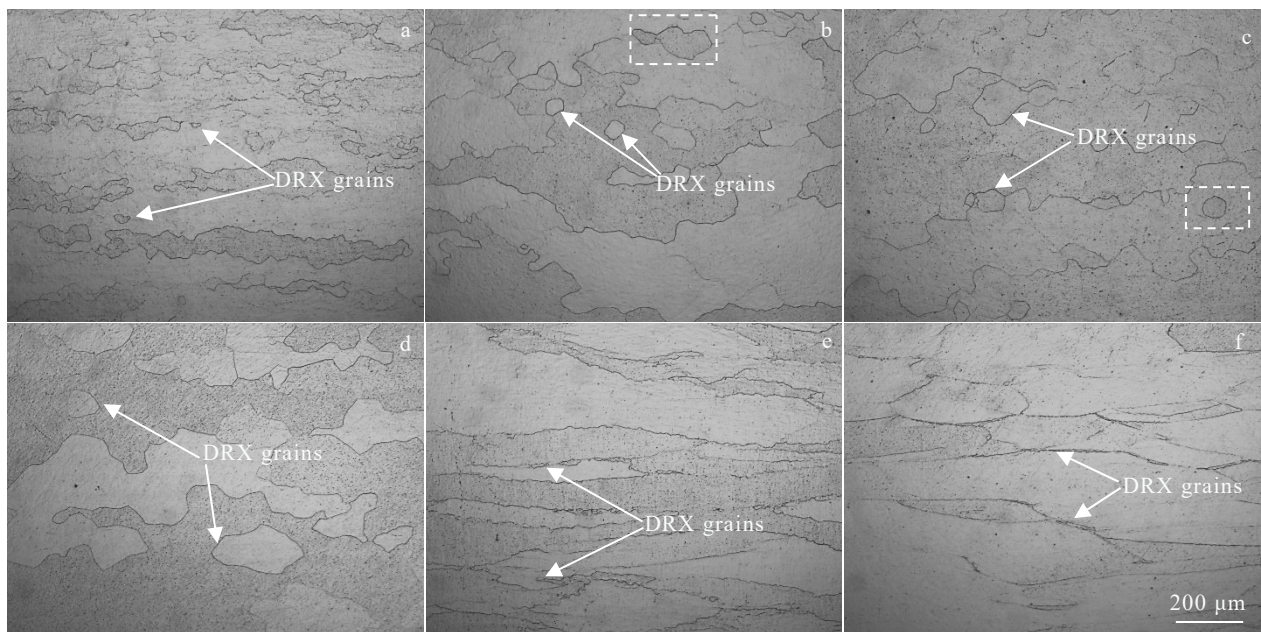


图4 TB15 钛合金在不同变形参数下的金相组织

Fig.4 OM microstructures of TB15 titanium alloy under different deformation conditions: (a) $810 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.001 s^{-1} ; (b) $870 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.001 s^{-1} ; (c) $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.001 s^{-1} ; (d) $930 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.001 s^{-1} ; (e) $930 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.1 s^{-1} ; (f) $930 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 s^{-1}

2.3 TB15 钛合金本构模型的建立

2.3.1 物理本构模型

物理本构模型是考虑了材料的杨氏模量 E 和自扩散系数 D 和变形温度之间的关系, 其表达式为^[15]:

$$\frac{\dot{\varepsilon}}{D(T)} = B \left[\sinh(\alpha \sigma / E(T)) \right]^n \quad (1)$$

$$D(T) = D_0 \exp\left(\frac{-Q_{sd}}{RT}\right) \quad (2)$$

$$E(T) = E_0 \left[1 + \frac{T_m}{G_0} \frac{dG}{dT} \frac{(T-300)}{T_m} \right] \quad (3)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率 (s^{-1}); $D(T)$ 和 $E(T)$ 分别表示自扩散系数和杨氏模量与变形温度 $T(K)$ 之间的函数关系; D_0 为扩散常数; Q_{sd} 为自扩散激活能 ($J \cdot mol^{-1}$); E_0 和 G_0 分别表示材料在 300 K 时的杨氏模量 (MPa) 和剪切模量 (MPa); n 为蠕变指数; a 和 B 为与材料有关的常数; T_m 为材料的熔点; R 为气体常数, 值为 $8.314 J/(mol \cdot K)$ 。

TB15 钛合金的相关参数如表 1 所示。由式 (1) 可知 α 、 B 和蠕变指数 n 为未知的材料参数, Mirzadeh 等人^[15]根据式 (4)、(5) 提出了求解 α 的过程, 即 $\alpha = \beta/n_1$ 。

$$\frac{\dot{\varepsilon}}{D(T)} = B_1 \exp[\beta \sigma / E(T)] \quad (4)$$

$$\frac{\dot{\varepsilon}}{D(T)} = B_2 [\sigma / E(T)]^{n_1} \quad (5)$$

表 1 TB15 钛合金相关材料参数

Table 1 Material parameters of TB15 titanium alloy^[17-19]

$D_0/m^2 \cdot s^{-1}$	$Q_{sd}/J \cdot mol^{-1}$	E_0/GPa	T_m/K	$\frac{T_m}{G_0} \cdot \frac{dG}{dT}$
1.9×10^{-7}	153000	110	1933	-0.5

式中 β 、 n_1 、 B_1 和 B_2 为材料相关的常数。对式 (4) 和式 (5) 两边同时取对数可得到 $\ln(\dot{\varepsilon}/D(T)) - \sigma/E(T)$ 和 $\ln(\dot{\varepsilon}/D(T)) - \ln(\sigma/E(T))$ 之间的线性拟合关系。求取一元线性拟合斜率平均值可得到 β 、 n_1 , 进而可得到材料常数 $\alpha = \beta/n_1$; 在真应变 0.2 情况下, 可得 $\beta = 3227.66$, $n_1 = 4.55$, $\alpha = 708.67$ 。

对式(1)取对数得:

$$\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D(T)}\right) = n \ln[\sinh(\alpha \sigma / E(T))] + \ln B \quad (6)$$

根据 α 值与式 (6) 可得到 $\ln(\dot{\varepsilon}/D(T)) - \ln[\sinh(\alpha \sigma / E(T))]$ 之间的关系, 对其进行线性拟合, 得到拟合直线的截距和斜率平均值分别为 $\ln B$ 和 n , 在真应变 0.2 情况下可得到 $\ln B = 28.31$, $n = 3.37$ 。

采用上述方法, 求出 0.1~0.9 应变下的 α 、 n 和 $\ln B$ 的值, 将所得的各参数值分别与真应变进行 2~9 次多项式拟合, 发现 7 次拟合的精度最高, 拟合曲线如图 5 所示。

根据拟合曲线求取出不同应变下的 $\alpha(\varepsilon)$ 、 $n(\varepsilon)$ 和 $\ln B(\varepsilon)$ 带入式 (1), 可得 TB15 钛合金的物理本构模型为:

$$\sigma_\varepsilon = \frac{E(T)}{\alpha(\varepsilon)} \operatorname{arcsinh}\left\{\exp\left[\frac{\ln(\dot{\varepsilon}/D(T)) - \ln B(\varepsilon)}{n(\varepsilon)}\right]\right\} \quad (7)$$

2.3.2 支持向量回归模型

SVR 使用的是与支持向量机 (SVM) 相同的原理, 但是用于回归的问题。SVR 的原理如图 6 所示, 其核心的问题是在训练样本的基础上找到一个近似映射从输入域到实数的函数^[20]。因此, 如图 6 所示, 在 xy 平面的上下两端有两条虚线, 称之为决策边界, 中间的实线称为超平面。在使用 SVR 时, 目标基本上都是考虑决策边界线内的点。最佳的拟合线是具有最大点数的超平面。假设将决策边界线与超平面的距离设为 m , 则在超平面两侧的决策边界的距

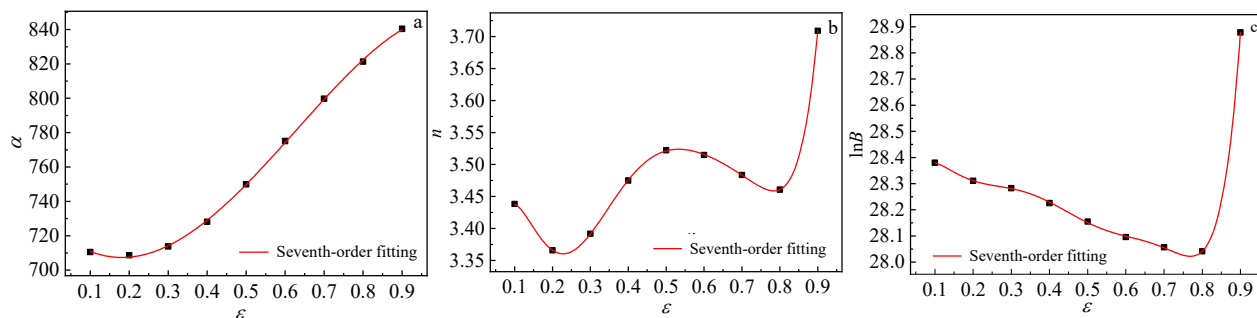


图 5 不同真应变下的参数 α 、 n 和 $\ln B$ 7 次拟合曲线

Fig.5 Seventh-order fitting curves of parameters α (a), n (b), and $\ln B$ (c) under different true strains

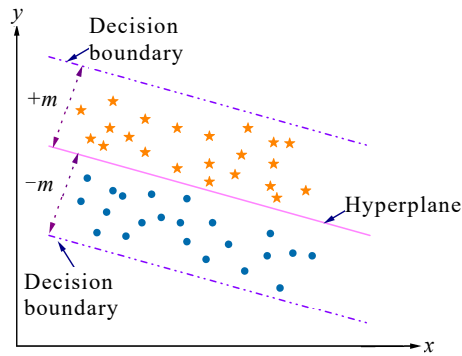


图6 SVR模型的工作原理

Fig.6 Working principle of the SVR model

离就可以表示为“+m”和“-m”。主要目标是在距原始超平面“m”距离处确定决策边界，以便最接近超平面的数据点或支持向量位于该边界线内。因此，将只选取那些在决策边界内且错误率最低的点，或者在公差范围内的点。这样就能得到一个更好的拟合模型。

2.3.3 响应面本构模型

响应面模型最初由 Box 和 Wilson 提出^[21]。响应面法（RSM）的主要思想是通过合理的实验设计和待定系数的方法来找到 $y=y(x)$ 的近似函数 $\bar{y}=f(x)$ ，在实际应用中， $f(x)$ 大多使用二次多项式的形式进行回归，RSM 的基本步骤如下^[22]：

如果输入变量的数量为 n ，则拟合模型函数如下：

$$\bar{y} = \alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j x_j + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} x_i x_j \quad (8)$$

其中， α_0 ， α_j ， α_{ij} 是多项式的系数。

将 $x_i x_j$ 作为上式中的变量，公式可以表示为：

$$\bar{y} = \sum_{i=0}^{k-1} \beta_i x_i, k = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \quad (9)$$

其中， β_i 是 x_i 的系数， k 是式（9）中的变量数。

m 个实验获得数据如下：

$$\begin{matrix} x_0^{(1)} & x_1^{(1)} & \dots & x_{k-1}^{(1)} & y^{(1)} \\ x_0^{(m)} & x_1^{(m)} & \dots & x_{k-1}^{(m)} & y^{(m)} \end{matrix} \quad (10)$$

其中 $x_0^{(m)}$ ， $x_1^{(m)} \dots x_{k-1}^{(m)}$ 是实验输入的变量， $y^{(m)}$ 是实验的输出值。

然后，拟合值与实际值之间的误差为：

$$\varepsilon^{(1)} = \sum_{i=0}^{k-1} \beta_i x_i^{(1)} - y^{(1)}, \dots, \varepsilon^{(m)} = \sum_{i=0}^{k-1} \beta_i x_i^{(m)} - y^{(m)} \quad (11)$$

响应面法的目的是使上述误差最小化，因此有必要引入一个函数：

$$S_{(\beta)} = \sum_{j=1}^m (\varepsilon^{(j)})^2 = \sum_{j=1}^m (\sum_{i=0}^{k-1} \beta_i x_i^{(j)} - y^{(j)})^2 \quad (12)$$

设 $S_{(\beta)}$ 相对于 β_i 的偏导数为 0 则可以得到 β_i 的值。

基于上述原理，本研究选取变形温度(T)、应变速率($\dot{\varepsilon}$)和应变(ε)作为变量因素，流动应力(σ)作为响应目标^[23]。可得到 TB15 钛合金的响应面本构模型为：

$$\begin{aligned} \sigma = & 2144.19 - 3.92T + 151.44 \lg(\dot{\varepsilon}) + 43.59\varepsilon - 0.099T \lg(\dot{\varepsilon}) \\ & - 0.11T\varepsilon - 10.98 \lg(\dot{\varepsilon})\varepsilon + 0.0019T^2 + 3.37[\lg(\dot{\varepsilon})]^2 \\ & + 30.06\varepsilon^2 \end{aligned} \quad (13)$$

式中， σ 为应力， T 为温度， $\lg(\dot{\varepsilon})$ 为应变速率， ε 为应变。响应面本构方程的方差分析结果如表 2 所示。根据相关的文献^[24-26]对响应面模型精度分析可知，模型的显著性检验值 $P < 0.05$ 时，说明模型关系是显著的， $P < 0.01$ 时，则说明模型关系高度显著。因此，从表 2 的方差分析结果可以看出 $P < 0.0001$ ，说明流动应力与变形温度、应变速率和应变之间的回归关系非常显著。同时也表明了响应面模型能够用于预测 TB15 钛合金的流动应力。

图 7 为 0.9 应变下通过响应面模型拟合的流动应力曲面。从图中可以看出使用响应面法拟合的曲面能够较好的通过实验数据点。而且拟合的曲面具有良好的平滑度，表明通过响应面法计算的流动应力模型不会在训练样本点之外显示出明显的波动，并且能够很好地反映流动应力随温度和应变速率的变化^[13]。

3 讨论与分析

上文采用了物理、响应面和支持向量回归 3 种方法建立了 TB15 钛合金流动应力的本构关系模型。

表 2 响应面本构方程的方差分析

Table 2 Variance analysis of response surface constitutive equation

Source	Sum of squares	Df	Mean square	F-value	P-value
	1.016×10 ⁵	9	11287.38	133.99	0.0001
A-temperature	7106.05	1	7106.05	84.36	0.0008
B-strain rate	92646.44	1	92646.44	1099.82	<0.0001
C-strain	290.34	1	290.34	3.45	0.1369
AB	555.04	1	555.04	6.59	0.0622
AC	30.25	1	30.25	0.3591	0.5813
BC	308.38	1	308.38	3.66	0.1283
A ²	156.67	1	156.67	1.86	0.2443
B ²	581.55	1	581.55	6.90	0.0583
C ²	74.00	1	74.00	0.8785	0.4017
Residual	336.95	4	84.24	-	-
Cor total	1.019×10 ⁵	13	-	-	-

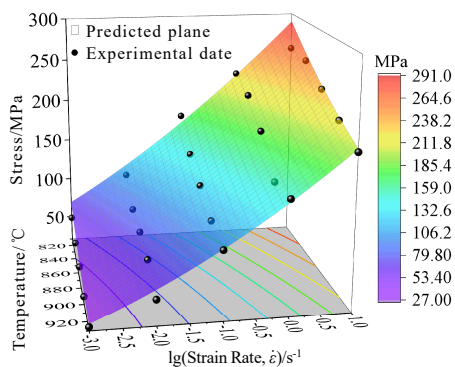


图 7 0.9 真应变下通过响应面模型预测的流动应力曲面

Fig.7 Flow stress surface predicted by response surface model under the true strain of 0.9

接下来用所建立的本构模型预测出不同变形参数下的流动应力。然后从流动应力曲线、相关系数 (R)、平均相对误差 (AARE)、相对误差这 4 个方面去对比 3 种本构模型对 TB15 钛合金流动应力预测的适用性。

3.1 流动应力曲线对比

图 8 为 930 °C、应变速率 0.001~10 s⁻¹ 时 3 种本构模型预测的流动应力与实验的流动应力对比。应变速率为 10 s⁻¹ 时, 物理本构模型预测值 (图 8a 虚框标出) 在一定程度上偏离了实际值。在应变速率为 1 s⁻¹ 时物理本构模型和响应面本构模型在低应变下预测曲线都有一定的上翘 (如图 8a、8b 虚圆标出)。对于 SVR 本构模型来说, 在应变速率为 0.1~10 s⁻¹ 时, 预测值与实验值吻合度较高。然而在应变速率为 0.001~0.01 s⁻¹ 时 (如图 8c 虚框标出) 预测值基本上偏离了实验值。因此在 0.1~10 s⁻¹ 应变速率下, SVR 模型能够提供更为精确的预测值。但从整体来看, 响应面本构模型的预测曲线与实验曲线更为贴合。

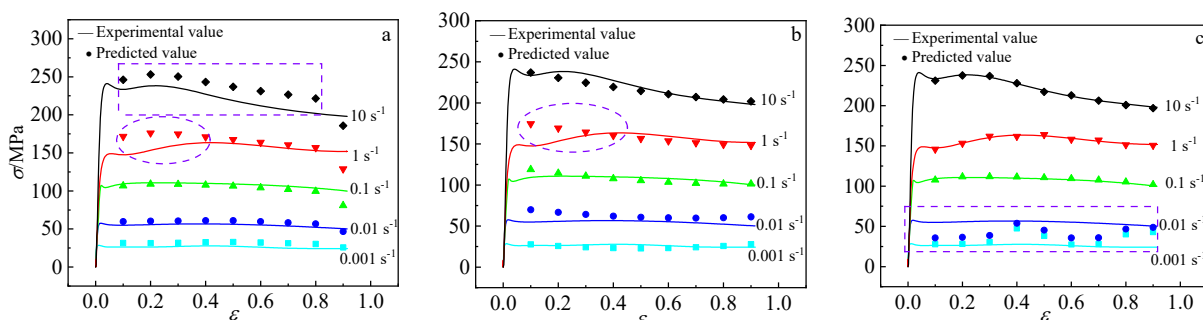


图 8 930 °C 时不同本构模型实验流动应力与预测流动应力比较

Fig.8 Comparisons of experimental flow stress and predicted flow stress with different constitutive models at 930 °C: (a) physics constitutive model, (b) response surface constitutive model, and (c) support vector regression constitutive model

为了更好的对比 3 种不同方法的拟合精度, 下一小节采用了 R 和 AARE 来评估 3 种模型的适用性。

3.2 相关系数和平均相对误差的对比

计算得到物理本构模型、响应面本构模型和 SVR 本构模型相关系数 R 分别为 0.9882、0.9933 和 0.9857, AARE 分别为 7.59%、6.78% 和 11.99%。图 9 为 3 种本构模型计算得到的流动应力预测值与实验值的比较, 从图 9 中能看出依据物理本构模型和响应面本构模型所得的预测值与实验值基本能够成线性关系, 而依据 SVR 本构模型所得预测值与实验值对比来看, 前面低应力区域的误差较大, 线性关系并不明显。从所计算的相关系数和平均误差也能够看出, 物理本构模型和响应面本构模型的相关系数要高于 SVR 本构模型的相关系数, 且物理本构模型和响应面本构模型的平均相对误差要远低于支持向量回归模型。因此, SVR 本构模型对于 TB15 钛合金流动应力的预测适用性并不高。

3.3 相对误差对比

从上一小节的对比分析中可以得知, 支持向量回归模型并不能很好的适用于 TB15 钛合金的流动应力预测。而物理本构模型和响应面本构模型的预测精度都比较高, 对 TB15 钛合金的流动应力预测适用性都比较好。接下来进一步对比这两种本构模型的相对误差 (RE)。图 10 描绘了两种本构模型的相对频率与相对误差。从图中可以看出物理本构模型在 $\pm 5\%$ 误差范围内的预测值频率达到了 58.6%, 而响应面本构模型在 $\pm 5\%$ 误差范围内的预测值频率达到了 67.9%。所以整体来说响应面本构模型在预测 TB15 钛合金流动应力这方面适用性比物理本构更好。

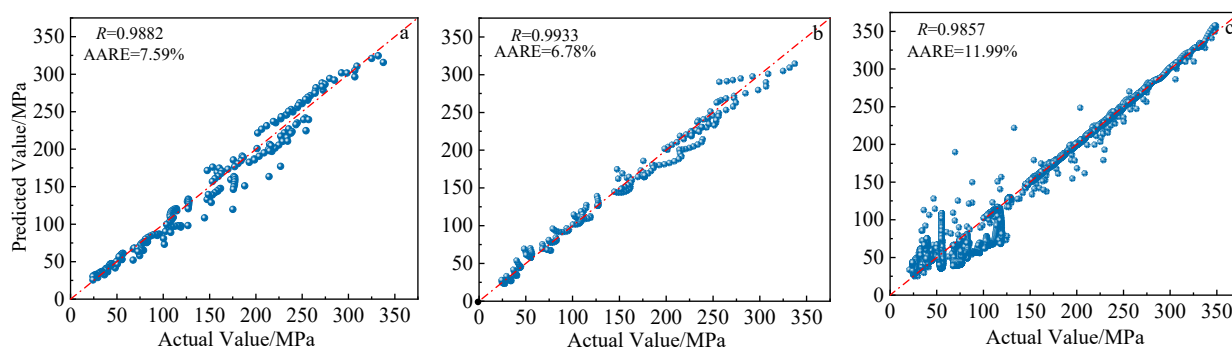


图9 不同本构模型的实验流动应力和预测流动应力之间关系

Fig.9 Relationship between experimental flow stress and predicted flow stress of different constitutive models: (a) physics constitutive model, (b) response surface constitutive model, and (c) support vector regression constitutive model

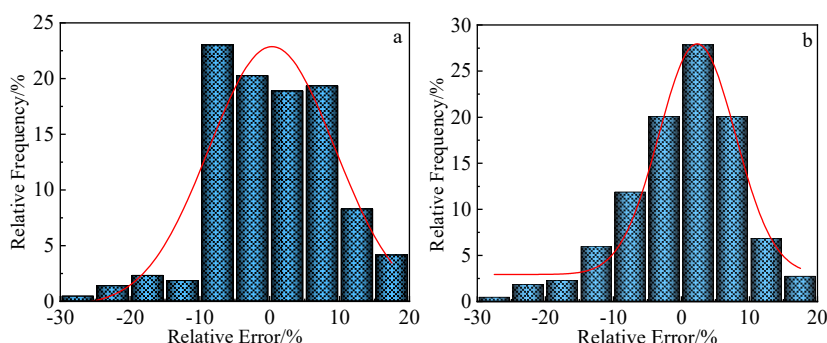


图10 不同本构模型的相对误差分布

Fig.10 Relative error distribution of different constitutive models: (a) physics constitutive model and (b) response surface constitutive model

4 结 论

1) TB15 钛合金在变形初期流变应力迅速增大达到峰值, 随后加工硬化和流动软化相互竞争达到动态平衡, 流动应力逐渐趋向于稳态。峰值应力随着变形温度的降低和应变速率的增加逐渐增大, 峰值应力对应变速率的变化更加敏感。

2) 建立了 TB15 钛合金的物理、响应面和 SVR 3 种本构模型, 响应面本构模型的相关系数 R 为 0.9933, 相对误差在 $\pm 5\%$ 范围内的预测值频率达到了 67.9%, 相较于其他 2 种本构模型来说, 响应面本构模型的预测精度更高。

3) 经过方差分析发现, TB15 钛合金的响应面本构模型显著性检验值 $P < 0.0001$, 表明流动应力与变形温度、应变速率和应变之间的回归关系显著。响应面本构模型对于预测 TB15 钛合金流动行为有较好的适用性。

参考文献 Reference

[1] Li C L, Mi X J, Ye W J et al. *Journal of Alloys and*

Compounds[J], 2013, 550: 23

[2] Wang W Q, Yang Y L, Zhang Y Q et al. *Materials Science Forum*[J], 2009, 618: 173

[3] Chen L, Zhao G Q, Yu J Q. *Materials & Design*[J], 2015, 74: 25

[4] Wang S, Luo J R, Hou L G et al. *Materials & Design*[J], 2016, 107: 277

[5] Jiang Y Q, Lin Y C, Wang G Q et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 870: 159534

[6] Li G Y, Ding H, Wang J. *Mechanics Research Communications*[J], 2022, 123: 103904

[7] Mirzadeh H. *Mechanics of Materials*[J], 2015, 85: 66

[8] Mirzadeh H. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2015, 24: 1095

[9] Lin Y C, Chen X M. *Materials & Design*[J], 2011, 32(4): 1733

[10] Zhong J W, Sun C B, Wu J T et al. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2020, 9(3): 6745

[11] Barton R R. *Proceedings of the 24th Conference on Winter Simulation*[C]. New York: Association for

- Computing Machinery, 1992: 289
- [12] Qiao L, Zhu J C. *Vacuum*[J], 2022, 201: 111059
- [13] Shen Z, Wu R D, Yuan C L *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2021, 10: 188
- [14] Shi Puying(史蒲英), Liu Xianghang(刘向宏), Li Jianwei(李建伟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(5): 1925
- [15] Mirzadeh H. *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2014, 2(3): 225
- [16] Lu C Y, Shi J, Wang J. *Materials Characterization*[J], 2021, 181: 111455
- [17] Frost H J, Ashby M F. *Journal of Mechanical Working Technology*[J], 1982, 9(2): 224
- [18] De Rea N E W, Libanati C M. *Acta Metallurgica*[J], 1968, 16(10): 1297
- [19] Yan Minggao(颜鸣皋), Liu Bocao(刘伯操), Wu Shiping(吴世平) *et al. China Aviation Materials Manual*(中国航空材料手册第四卷)[M]. Beijing: China Standards Press, 2001: 213
- [20] Niu Y, Hong Z Q, Wang Y Q *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 23: 515
- [21] Box G E P, Wilson K B. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*[J], 1951, 13(1): 1
- [22] Baş D, Boyacı H. *Journal of Food Engineering*[J], 2007, 78(3): 836
- [23] Wang Jun(王俊), Wang Kelu(王克鲁), Lu Shiqiang(鲁世强) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(6): 2130
- [24] Wang J M, Lan S, Li W K. *Energy*[J], 2014, 72: 521
- [25] Sivaprakasam P, Hariharan P, Gowri S. *Engineering Science and Technology, an International Journal*[J], 2014, 17(4): 227
- [26] Hamad A R, Abboud J H, Shuaib F M *et al. Advances in Engineering Software*[J], 2010, 41(4): 674

Constitutive Model of TB15 Titanium Alloy Based on Physics and Meta-modeling

Wu Xuanxuan¹, Dong Xianjuan¹, Xu Yong², Lu Shiqiang¹, Tu Zeli¹, Wang Yuhang¹

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. School of General Aviation, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The Gleeble-3800 thermal simulator was used to conduct isothermal constant strain rate thermal compression tests on TB15 titanium alloy to study its thermal deformation behavior under deformation temperatures of 810-930 °C, strain rate of 0.001-10-s⁻¹ and height depression of 60%; three constitutive relationship models, including physics, support vector regression (SVR) and response surface, were developed to predict the flow stresses of TB15 titanium alloy and the prediction accuracy of the three constitutive models was compared. The results show that the flow stress of TB15 titanium alloy decreases with the decrease in the strain rate and the increase in deformation temperature, and the change of peak stress is more sensitive to the strain rate; the correlation coefficient R of physics, SVR and response surface constitutive models is all greater than 0.98, but the R value of response surface constitutive model reaches 0.993, and the frequency of the relative error of the response surface constitutive models $\pm 5\%$ of the predicted value reaches 67.9%, which is greater than that of the physics constitutive model (58.6%). The significance test value $P < 0.0001$ of the constructed response surface constitutive model is also obtained by ANOVA, indicating that the regression relationship of the flow stress predicted by the response surface constitutive model with the deformation temperature, strain rate and strain is significant and has higher accuracy than the physics and SVR constitutive models, which can better predict the flow stress of TB15 titanium alloy.

Key words: TB15 titanium alloy; constitutive model; response surface; significance test value

Corresponding author: Dong Xianjuan, Ph. D., Associate Professor, School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, E-mail: dongxianjuan@nchu.edu.cn