

SP700 钛合金热变形行为及物理本构关系研究

张开铭 王克鲁 鲁世强 李 鑫 高 鑫 邱 仟
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 采用 Gleeble-3800 型热模拟试验机在变形温度为 700~850 ℃、应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 条件下对 SP700 钛合金进行等温恒应变速率压缩试验,分析 SP700 钛合金的热变形行为。首次探讨了该合金考虑变形温度对杨氏模量和自扩散系数影响的传统物理本构关系以及考虑晶界扩散和晶格扩散耦合的修正物理本构关系。结果表明,SP700 钛合金的流动应力曲线为典型的动态再结晶型曲线,其流动应力随应变速率的降低和变形温度的升高而减小;传统物理本构关系和修正的物理本构关系相关系数 *R* 分别为 0.986 和 0.965,平均相对误差 *AARE* 分别为 14.4% 和 13.1%,说明建立的两个物理本构关系都能较好地表征该合金的流动应力行为。另外,确定了该合金在 700~800 ℃ 热变形时主要扩散机制是晶界扩散,在 850 ℃ 热变形时主要是晶格扩散。

关键词 SP700 钛合金;物理本构关系;热变形;扩散机制

中图分类号 TG146.23 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hot Deformation Behavior and Physical Constitutive Relationship of SP700 Titanium Alloy

Zhang Kaiming, Wang Kelu, Lu Shiqiang, Li Xin, Gao Xin, Qiu Qian
(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: SP700 titanium alloy was subjected to isothermal and constant strain rate compression experiment at deformation temperature of 700~850 ℃ and strain rate of 0.001~1 s⁻¹ by Gleeble-3800 thermal simulation testing machine. The hot deformation behavior of SP700 titanium alloy was analyzed, and the traditional physical constitutive relationship considering the effect of deformation temperature on Young's modulus and self-diffusion coefficient and the modified physical constitutive relationship considering the coupling of grain boundary diffusion and lattice diffusion were discussed for the first time. The results indicate that the flow stress curves of SP700 titanium alloy are typical dynamic recrystallization, and flow stress is decreased with the decrease of strain rate and the increase of deformation temperature. The correlation coefficients *R* of the traditional and modified physical constitutive relations are 0.986 and 0.965, and the average relative errors *AARE* are 14.4% and 13.1%, respectively, indicating that both established physical constitutive relations can better characterize the flow stress behavior of the alloy. Meanwhile, it is also determined that the main diffusion mechanism of the alloy is grain boundary diffusion at 700~800 ℃ hot deformation, and lattice diffusion at 850 ℃ hot deformation.

Key Words: SP700 Titanium Alloy, Physical Constitutive Relation, Hot Deformation, Diffusion Mechanism

收稿日期:2022-08-11;修改稿收到日期:2022-09-07

基金项目:江西省自然科学基金资助项目(20202ACBL204001);江西省研究生创新专项基金资助项目(YC2021S675)

第一作者简介:张开铭,男,1998 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1732066723@qq.com

通信作者:王克鲁,男,1968 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:wangkelu@126.com

引用格式:张开铭,王克鲁,鲁世强,等. SP700 钛合金热变形行为及物理本构关系研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(5): 634-640.

ZHANG K M, WANG K L, LU S Q, et al. Hot deformation behavior and physical constitutive relationship of SP700 titanium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5): 634-640.

[13] 曹海建,王怡洁,刘菲,等. 三维全五向编织复合材料的弯曲性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(S3): 39-42.

[14] 徐鹏. 3D-C_f/Al 复合材料真空气压浸渗工艺研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2015.

[15] 顾姝,蔡长春,余欢,等. 国产 M55J 级碳纤维三维编织 C_f/Al 复合材料组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(5): 621-627.

[16] 贺辛亥,宁志新,梁军浩,等. 编织角对 3D-C_f/6061Al 复合材料弯曲性能的影响[J]. 西安工程大学学报, 2022, 36(3): 100-105.

[17] 李苏红,刘丽芳,阎建华,等. 三维编织结构参数对复合材料拉伸性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(7): 69-73.

[18] 马忠辉,孙秦. 三维四向编织复合材料纤维体积分量的预测与参数分析[J]. 西北工业大学学报, 2003(6): 662-666.

[19] 周清,焦亚男,李嘉禄. 三维编织预制件的工艺参数设计[J]. 天津工业大学学报, 2004(1): 15-17.

(编辑:刘卫)

钛合金由于具有高比强度、良好的生物相容性以及超塑性等特点,在航空航天、海洋工程、化工以及生物学等领域得到了广泛应用^[1-3]。其中 SP700 合金作为一种富 β 相的($\alpha + \beta$)两相钛合金,以其优异的超塑性有望成为航空航天结构件材料之一^[4-5]。锻造是 SP700 钛合金常用的热加工成形方法,且该合金的力学性能对热加工工艺参数敏感。因此,研究该合金的热变形行为并构建流动应力本构关系,对于合理制定该合金的加工工艺,充分挖掘其塑性加工能力具有积极意义。

合金材料在热变形过程中一般会发生加工硬化、动态回复和动态再结晶等硬化和软化机制,直接影响着材料的流动应力(塑性加工能力),而这些机制在很大程度上取决于变形条件(变形温度、应变速率和应变)^[6-7]。为了表征流动应力与变形条件之间存在的非线性关系,通常需要建立合适的本构关系模型。流动应力本构模型主要有唯象本构模型、人工神经网络本构模型和物理本构模型^[8-9]。目前,在唯象本构模型中,应用最为广泛的是传统的 Arrhenius 本构模型^[10-11]。尽管 Arrhenius 本构模型能够较为准确地预测材料的流动应力,但未考虑到在热变形过程中变形条件对材料物理参数的影响,缺少物理冶金学上的意义;人工神经网络本构模型虽然可以获得较高的预测精度,但其本构模型的流动应力与变形条件之间的关系是隐式关系,使用起来不方便^[10,12];物理本构模型具有一定的物理意义,其考虑了蠕变扩散^[13-14]、位错^[15]、动态回复和动态再结晶^[16]等物理冶金行为。CABRERA J M 等^[17]在研究中碳微合金钢的热变形行为时,提出了蠕变指数为 5 的物理本构模型,模型中考虑了自扩散系数和杨氏模量与变形温度之间的关系。结果表明,建立的本构关系能够很好地预测该钢的流动应力。WEI H L 等^[18]采用结合应变效应的物理方法研究了 C-Mn 钢和 C-Mn-V 钢在热变形过程中的本构关系,并解释了奥氏体自扩散系数和杨氏模量对变形温度的依赖性。结果表明,建立的本构关系对于热变形过程中的低应力具有较好的预测能力。关于考虑蠕变扩散的物理本构关系研究中大多数仅考虑了晶格扩散,但通常在热变形过程中还会存在晶界扩散等其他的扩散机制。WANG S 等^[13]在研究 AA7050 铝合金的热变形时,提出了考虑晶格扩散和晶界扩散耦合的修正本构模型。结果表明,建立的本构关系不仅能够表征该合金的流动应力行为,还能反映不同变形条件下扩散机制的转变。目前,有关钛合金物理本构关系的研究中,综合考虑晶界扩散和晶格扩散耦合的物理本构关系的研究报道很少。

本研究基于等温恒应变速率压缩试验数据,分析 SP700 钛合金的热变形行为;分别建立考虑变形温度对

材料杨氏模量和自扩散系数影响的传统物理本构关系以及考虑晶界扩散和晶格扩散耦合的修正物理本构关系;对建立的两个物理本构关系进行误差分析以确定 SP700 钛合金在不同变形温度下的扩散机制,旨在为 SP700 钛合金的实际工艺参数设计和加工过程有限元数值模拟提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为 SP700 钛合金,相变点为 900 ℃,其名义成分为 Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe,实测化学成分见表 1。将试样加工成 $\phi 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的试样,在 Gleeble-3800 型热模拟试验机上进行等温恒应变速率压缩试验。热压缩工艺流程见图 1。变形温度分别为 700、750、800 和 850 ℃;应变速率分别为 0.001、0.01、0.1 和 1 s^{-1} ;高度压下率为 60%,对应的真应变为 0.9。将热压缩试样以 $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的升温速率加热至预定变形温度后,保温 3 min,依次按预定的应变速率进行压缩,压缩结束后立即将试样水冷至室温。通过热模拟试验机配置的专用数据采集软件,获得不同热压缩工艺参数下的流动应力数据。

表 1 SP700 钛合金的实测化学成分
Tab.1 Measured chemical composition of SP700 titanium

alloy								%
ω_B								
Al	V	Mo	Fe	C	H	N	O	Ti
4.6	3.0	2.1	1.9	≤ 0.01	≤ 0.001	≤ 0.005	≤ 0.12	余量

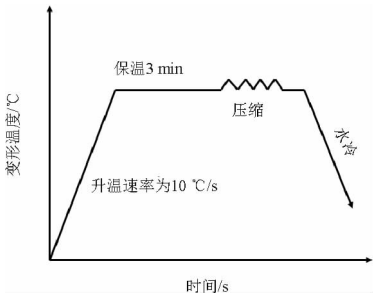


图 1 热压缩工艺流程
Fig.1 Thermal compression process

2 试验结果与分析

2.1 流动应力曲线分析

图 2 为 SP700 钛合金在不同变形条件下的流动应力曲线^[19]。可以看出,SP700 钛合金在($\alpha + \beta$)两相区热变形得到的流动应力曲线为典型的动态再结晶型曲线,即存在明显的峰值应力和稳态流动现象^[20-21]。在变形初期,位错增殖、攀移以及位错间的相互作用,使得位错密度迅速增大,形成明显的加工硬化,导致流动应力

迅速增加。当应变增加至发生动态再结晶所需临界应变时,动态再结晶软化效应开始起作用,流动应力增加有所减缓;峰值应力之后,软化效应开始占主导,流动应力开始下降;最后,软化与硬化效应达到平衡,流动应力逐渐趋于稳定^[22-23]。从图 2a 可以看出,当变形温度一定时,流动应力随应变速率的增加而增大。这主要是由于应变速率增加,合金变形时间缩短,动态再结晶不能充分进行,导致流动应力增大^[24-25]。从图 2b 可以看出,当应变速率一定时,流动应力随变形温度的升高而减小。这主要是由于温度升高,原子扩散速率增加,动态再结晶形核速率增加,晶界迁移能力增强,动态再结晶更容易发生,使得流动应力减小^[26-27]。

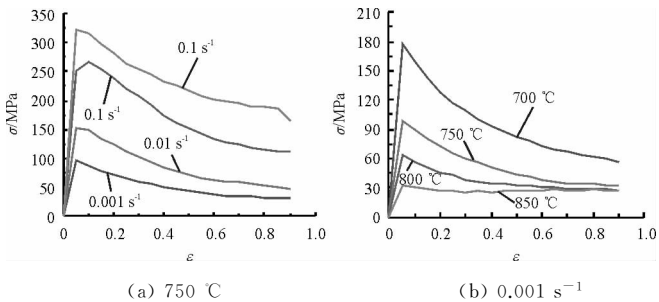


图 2 不同变形条件下的流动应力曲线
Fig.2 Flow stress curves under different deformation conditions

2.2 SP700 钛合金物理本构关系

2.2.1 传统物理本构关系

传统的物理本构模型综合考虑了材料杨氏模量 E 和自扩散系数 D 与变形温度 T 之间的关系,既表征了材料热变形过程中的流动应力,又反映了材料的物理冶金特性,其表达式为^[28-29]:

$$\frac{\dot{\epsilon}}{D(T)} = B \{ \sinh[\alpha \sigma / E(T)] \}^n \tag{1}$$

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

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

式中, $D(T)$ 和 $E(T)$ 分别为自扩散系数和杨氏模量与变形温度之间的函数关系; D_0 为扩散常数; Q_{sd} 为自扩散激活能,J/mol; E_0 和 G_0 分别为材料在 300 K 时的杨氏模量和剪切模量,MPa; n 为蠕变指数; α 和 B 为与材料有关的常数; T_m 为材料的熔点,K; R 为气体常数,8.314 J/(mol·K)。

SP700 钛合金的相关材料参数见表 2,将相关参数带入式(2)和式(3),可得到 SP700 钛合金的自扩散系数 D 和杨氏模量 E 与温度之间的关系:

$$D(T) = 1.9 \times 10^{-7} \exp\left(\frac{-342\,000}{RT}\right) \tag{4}$$

$$E(T) = 1.17 \times 10^5 \left[1 - 0.5 \frac{(T - 300)}{1\,993} \right] \tag{5}$$

表 2 SP700 钛合金相关材料参数^[30-31]
Tab.2 Related material parameters of SP700 titanium alloy^[30,31]

$D_0 /$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	$Q_{sd} /$ ($J \cdot mol^{-1}$)	$E_0 /$ MPa	$T_m /$ K	$\frac{T_m}{G_0} \frac{dG}{dT}$
1.9×10^{-7}	342 000	117 000	1 993	-0.5

由式(1)可知,需求解材料参数 α 、 B 和蠕变指数 n 。本研究以真应变 0.3 为例,采用 MIRZADEH H 等^[14]提出的幂函数方程和指数方程来计算 α 值。

$$\frac{\dot{\epsilon}}{D} = B_1 \exp[\beta \sigma / E] \tag{6}$$

$$\frac{\dot{\epsilon}}{D} = B_2 [\sigma / E]^{n_1} \tag{7}$$

式中, β 、 n_1 、 B_1 和 B_2 为材料相关的常数,而 $\alpha = \beta / n_1$ 。对式(6)和式(7)两边同时取对数,可分别得到不同变形条件下 $\ln(\dot{\epsilon}/D) - \sigma/E$ 和 $\ln(\dot{\epsilon}/D) - \ln(\sigma/E)$ 之间的线性拟合关系,见图 3。拟合直线斜率的平均值分别为参数 β 和 n_1 ,即得出 $\beta = 3\,530.357$, $n_1 = 4.428$ 。再由 $\alpha = \beta / n_1$,得到 $\alpha = 797.218$ 。

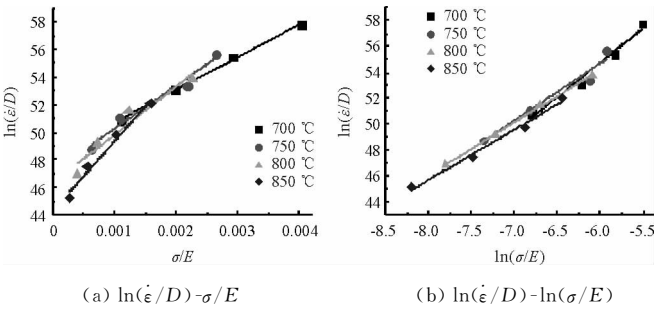


图 3 不同变量之间的线性拟合关系
Fig.3 Linear fitting relationship between different variables

对式(1)两边同时取对数可得:

$$\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right) = n \ln[\sinh(\alpha \sigma / E)] + \ln B \tag{8}$$

根据上述求出的参数 α 以及式(8),对 $\ln(\dot{\epsilon}/D) - \ln[\sinh(\alpha \sigma / E)]$ 之间的关系进行线性拟合,拟合直线斜率和截距的平均值分别为参数 n 和 $\ln B$,见图 4,可确

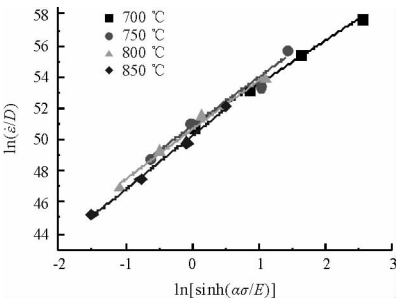


图 4 $\ln(\dot{\epsilon}/D)$ 和 $\ln[\sinh(\alpha \sigma / E)]$ 之间的线性拟合关系
Fig.4 Linear fitting relationship between $\ln(\dot{\epsilon}/D)$ and $\ln[\sinh(\alpha \sigma / E)]$

定 $n=3.121, \ln B=50.652$ 。

将参数 α, n 和 $\ln B$ 的值代入式(1), 计算出真应变为 0.3 时, SP700 钛合金的物理本构关系为:

$$\sigma_{0.3} = \frac{E}{797.218} \operatorname{arcsinh} \left\{ \exp \left[\frac{\ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right) - 50.652}{3.121} \right] \right\} \quad (9)$$

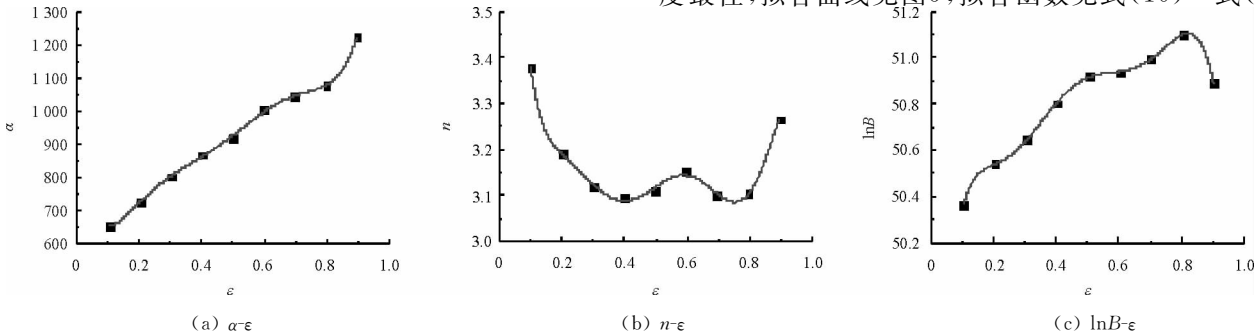


图 5 材料参数 α, n 和 $\ln B$ 与真应变之间关系的 7 次多项式拟合曲线

Fig.5 7th order polynomial fitting curves of relationship between material parameters α, n and $\ln B$ and true strain

$$\alpha(\epsilon) = a_0 + a_1\epsilon + a_2\epsilon^2 + a_3\epsilon^3 + a_4\epsilon^4 + a_5\epsilon^5 + a_6\epsilon^6 + a_7\epsilon^7 \quad (10)$$

$$n(\epsilon) = b_0 + b_1\epsilon + b_2\epsilon^2 + b_3\epsilon^3 + b_4\epsilon^4 + b_5\epsilon^5 + b_6\epsilon^6 + b_7\epsilon^7 \quad (11)$$

$$\ln B(\epsilon) = c_0 + c_1\epsilon + c_2\epsilon^2 + c_3\epsilon^3 + c_4\epsilon^4 + c_5\epsilon^5 + c_6\epsilon^6 + c_7\epsilon^7 \quad (12)$$

表 3 不同真应变下的参数 α, n 和 $\ln B$

Tab.3 Parameters α, n and $\ln B$ under different true strains			
ϵ	α	n	$\ln B$
0.1	647.953	3.378	50.373
0.2	721.625	3.189	50.547
0.3	797.218	3.121	50.652
0.4	863.531	3.096	50.811
0.5	915.665	3.108	50.929
0.6	999.006	3.151	50.943
0.7	1 039.613	3.101	51.005
0.8	1 073.762	3.103	51.106
0.9	1 220.789	3.265	50.899

式中各系数对应的值见表 4。

表 4 式(10)~式(12)中的系数

Tab.4 Coefficients in equations (10), (11) and (12)					
系数	式(10)	系数	式(11)	系数	式(12)
a_0	851.028	b_0	4.870	c_0	48.846
a_1	-5 489.189	b_1	-31.577	c_1	31.867
a_2	50 843.230	b_2	250.727	c_2	-242.924
a_3	-199 316.680	b_3	-1 063.919	c_3	945.648
a_4	410 683.790	b_4	2534.167	c_4	-1 967.746
a_5	-447 142.630	b_5	-3 373.681	c_5	2 202.765
a_6	234 207.151	b_6	2 335.027	c_6	-1 230.459
a_7	-42 765.682	b_7	-652.626	c_7	261.362

将不同应变下的 $\alpha(\epsilon), n(\epsilon)$ 和 $\ln B(\epsilon)$ 代入式(1), 可得到 SP700 钛合金基于应变补偿的物理本构关系为:

式(9)仅用于预测真应变为 0.3 时的流动应力。为了进一步预测不同变形温度、应变速率和应变下的流动应力, 采用上述方法求解出不同真应变下的参数 α, n 和 $\ln B$ 值, 见表 3。对表 3 中各参数分别与真应变进行 2~10 次多项式拟合, 结果发现 7 次多项式拟合回归精度最佳, 拟合曲线见图 5, 拟合函数见式(10)~式(12),

2.2.2 考虑晶界扩散和晶格扩散耦合的修正物理本构关系

传统物理本构关系仅考虑了晶格扩散, 而在热变形过程中, 原子的扩散机制除了晶格扩散, 还存在晶界扩散。一般来说晶界扩散倾向于在低的变形温度下发生, 而晶格扩散倾向于在高的变形温度下发生^[32]。为了考虑热变形过程中晶界扩散和晶格扩散的耦合效应, 修正的物理本构模型可表示为^[13, 29]:

$$\frac{\dot{\epsilon}}{D'(T)} = B' [\sinh(\alpha\sigma/E)]^{n'} \quad (14)$$

$$D'(T) = k_1 D_L + k_2 D_{GB} \quad (15)$$

$$D_L(T) = D_{0,L} \exp(-\frac{Q_L}{RT}) \quad (16)$$

$$D_{GB}(T) = D_{0,GB} \exp(-\frac{Q_{GB}}{RT}) \quad (17)$$

式中, $D'(T)$ 为有效扩散系数; α, B', k_1 和 k_2 为与材料有关的常数; n' 为蠕变指数; D_L 和 D_{GB} 分别为晶格扩散系数和晶界扩散系数; $D_{0,L}$ 和 $D_{0,GB}$ 分别为晶格扩散和晶界扩散系数的系数; Q_L 和 Q_{GB} 分别为晶格自扩散激活能和晶界自扩散激活能。SP700 钛合金的 $D_{0,L}, D_{0,GB}, Q_L$ 和 Q_{GB} 的值见表 5。

表 5 SP700 钛合金的 $D_{0,L}, D_{0,GB}, Q_L$ and Q_{GB} ^[30-31, 33]

Tab.5 $D_{0,L}, D_{0,GB}, Q_L$ and Q_{GB} of SP700 titanium alloy ^[30-31, 33]			
$D_{0,L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$D_{0,GB}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_L/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	$Q_{GB}/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$
1.9×10^{-7}	5.4×10^{-17}	342 000	137 000

将表 5 中的各参数代入式(16)、式(17)可得:

$$D_L(T) = 1.9 \times 10^{-7} \exp(-\frac{342\,000}{RT}) \quad (18)$$

$$D_{GB}(T) = 5.4 \times 10^{-17} \exp(-\frac{137\,000}{RT}) \quad (19)$$

再将式(15)带入式(14)中,同时令 $B'k_1=k'_1$, $B'k_2=k'_2$,并对两边同时取对数,可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = n' \ln [\sinh (\alpha \sigma / E)] + \ln \left[k'_1 D_L + k'_2 D_{GB}(T) \right] \quad (20)$$

以真应变 0.3 为例,将表 3 中的 α 值和对应的流动应力带入式(20),绘制 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln [\sinh (\alpha \sigma / E)]$ 之间的散点图并进行线性拟合,见图 6。根据图 6 中拟合直线斜率和截距的平均值可确定出 $n'=3.311$, $\ln \left[k'_1 D_L + k'_2 D_{GB} \right] = -3.638$ 。根据 $\ln \left[k'_1 D_L + k'_2 D_{GB} \right]$ 的值,采用截距为 0 的多元线性回归可分别确定出 $k'_1=9.501 \times 10^{21}$ 和 $k'_2=2.579 \times 10^{21}$ 。

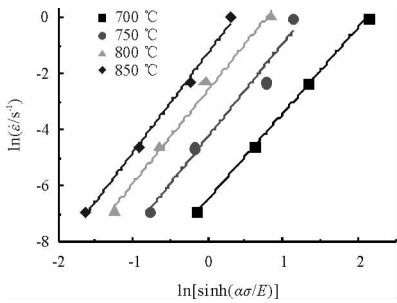


图 6 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln [\sinh (\alpha \sigma / E)]$ 之间的线性拟合关系

Fig.6 Linear fitting relationship between $\ln \dot{\epsilon}$ and $\ln [\sinh (\alpha \sigma / E)]$

将上述各参数的值代入式(20),可得出真应变为 0.3时,SP700 钛合金考虑晶界扩散和晶格扩散耦合的修正物理本构关系为:

$$\sigma_{0.3} = \frac{E}{797.218} \operatorname{arcsinh} \left[\exp \left(\frac{\ln \dot{\epsilon} + 3.638}{3.311} \right) \right] \quad (21)$$

同理,为了进一步考虑真应变对热变形过程中流动应力的影响,采用上述方法求解出不同真应变下对应的参数 n' 、 k'_1 和 k'_2 ,见表 6。对表 6 中各参数分别与真应变进行 7 次多项式拟合,拟合曲线见图 7,相应的拟合函数见下式,式中各系数对应的值见表 7。

$$n'(\epsilon) = d_0 + d_1 \epsilon + d_2 \epsilon^2 + d_3 \epsilon^3 + d_4 \epsilon^4 + d_5 \epsilon^5 + d_6 \epsilon^6 + d_7 \epsilon^7 \quad (22)$$

表 6 不同真应变下的参数 n' 、 k'_1 和 k'_2

Tab.6 Parameters n' , k'_1 and k'_2 at different true strains			
ϵ	n'	$k'_1 / (\times 10^{22})$	$k'_2 / (\times 10^{21})$
0.1	3.638	2.068	-0.596
0.2	3.412	1.438	1.271
0.3	3.311	0.950	2.579
0.4	3.254	0.759	3.043
0.5	3.252	0.465	4.277
0.6	3.361	0.641	4.70
0.7	3.324	0.473	6.057
0.8	3.352	0.818	6.009
0.9	3.571	0.856	5.810

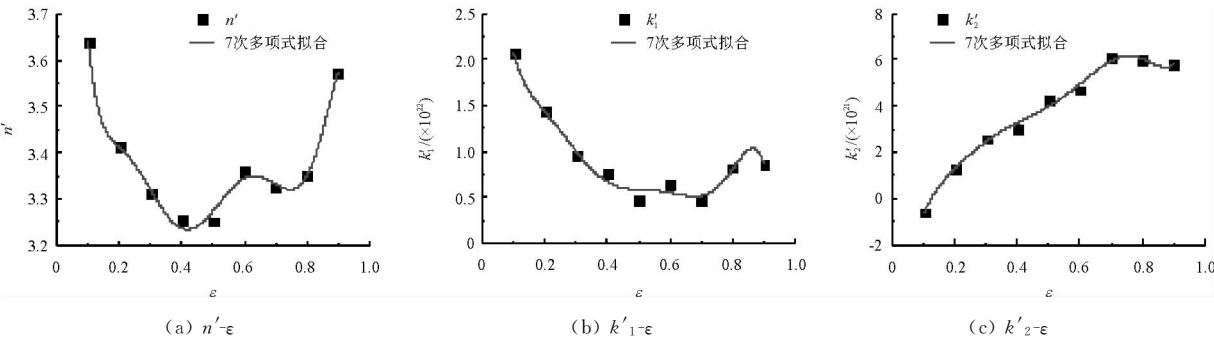


图 7 参数 n' 、 k'_1 和 k'_2 与真应变之间关系的 7 次多项式拟合曲线

Fig.7 7th order polynomial fitting curve of the relationship between parameters n' , k'_1 and k'_2 and true strain

表 7 式(22)~式(24)中的系数

Tab.7 Coefficients in equations(22), (23) and (24)

系数	式(22)	系数	式(23)/($\times 10^{22}$)	系数	式(24)/($\times 10^{21}$)
d_0	5.943	e_0	6.163	f_0	-7.035
d_1	-50.130	e_1	-88.06	f_1	121.5
d_2	409.305	e_2	727.5	f_2	-870.2
d_3	-1 747.109	e_3	-3 275	f_3	3 837
d_4	4 131.571	e_4	8 222	f_4	-9 899
d_5	-5 429.471	e_5	-11 510	f_5	14 510
d_6	3 704.822	e_6	8 405	f_6	-11 100
d_7	-1 021.791	e_7	-2 488	f_7	3 419

$$k'_1(\epsilon) = e_0 + e_1 \epsilon + e_2 \epsilon^2 + e_3 \epsilon^3 +$$

$$e_4 \epsilon^4 + e_5 \epsilon^5 + e_6 \epsilon^6 + e_7 \epsilon^7 \quad (23)$$

$$k'_2(\epsilon) = f_0 + f_1 \epsilon + f_2 \epsilon^2 + f_3 \epsilon^3 + f_4 \epsilon^4 + f_5 \epsilon^5 + f_6 \epsilon^6 + f_7 \epsilon^7 \quad (24)$$

综上所述,将 $n'(\epsilon)$ 、 $k'_1(\epsilon)$ 和 $k'_2(\epsilon)$ 代入式(20),可确定出 SP700 钛合金应变补偿的考虑晶界扩散和晶格扩散耦合的修正物理本构关系为:

$$\sigma_{\epsilon} = \frac{E(T)}{\alpha(\epsilon)} \times \operatorname{arcsinh} \left[\exp \left\{ \frac{\ln \dot{\epsilon} - \ln \left[k'_1(\epsilon) D_L + k'_2(\epsilon) D_{GB} \right]}{n'(\epsilon)} \right\} \right] \quad (25)$$

2.3 物理本构关系的验证

图 8 为传统物理本构关系和修正物理本构关系对流动应力的预测值与试验值的图形化比较结果。可以看出,建立的传统物理本构关系和修正的物理本构关系对流动应力的预测值都与试验值符合较好,说明建立的两个物理本构关系都具有较好的预测能力。引入统计学概念的相关系数 R 和平均相对误差 $AARE$,进一步衡量建立模型的精确程度^[34-35]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2) \sqrt{(\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2)}} \quad (26)$$

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{C_i - P_i}{C_i} \right| \times 100\% \quad (27)$$

式中, N 为数据总数; C_i 和 P_i 分别为第 i 个试验值和第 i 个模型预测值; $\bar{C}$ 和 $\bar{P}$ 分别为试验值的平均值和模型预测值的平均值。相关系数越大说明试验值与预测值之间的线性相关性越好;平均相对误差越小表示模型的预测精度越高。

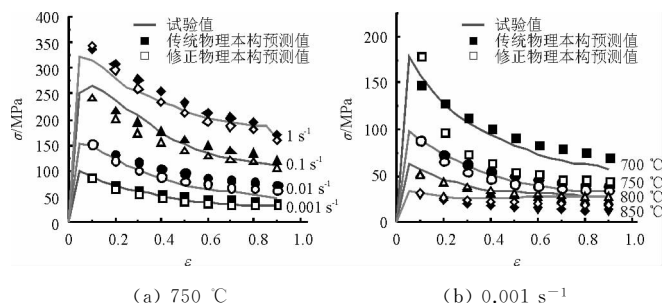


图 8 流动应力的试验值与物理本构关系预测值的比较
Fig.8 Comparison of experimental values of flow stress with predicted values of physical constitutive relations

将建立的传统物理本构关系和修正的物理本构关系对流动应力的预测值分别代入式(26)和式(27),可确定出传统物理本构关系和修正的物理本构关系相关系数 R 分别为 0.986 和 0.965,传统本构关系的相关系数略高于修正的物理本构关系,但相差不大。传统物理本构关系和修正的物理本构关系平均相对误差 $AARE$ 分别为 14.4% 和 13.1%,修正的物理本构关系平均相对误差更小一些,二者的平均相对误差都小于 15%,预测精度都在工程应用可接受的误差范围内。这说明传统物理本构关系和修正的物理本构关系都能够用于表征 SP700 钛合金的流动应力行为。

传统的物理本构关系和修正物理本构关系对于 SP700 钛合金的流动应力都具有较强的预测能力,然而,修正的物理本构关系可以提供更多关于 SP700 钛合金在热变形过程中热扩散机制的转变信息,更能反映合金的物理特性,在工程应用中可以优先选用。当

$k'_1 D_L > k'_2 D_{GB}$ 时,热变形过程中的主要扩散机制是晶格扩散;当 $k'_1 D_L < k'_2 D_{GB}$ 时,热变形过程中的主要扩散机制是晶界扩散^[13,29]。利用表 5 中的数据以及式(20)和式(21)分别计算不同变形温度下的 $k'_1 D_L$ 和 $k'_2 D_{GB}$,并通过上述不等式关系对比发现,SP700 钛合金在变形温度为 700~800 °C 时,主要的扩散机制是晶界扩散;在变形温度为 850 °C 时,主要的扩散机制转变为晶格扩散。

3 结 论

(1)SP700 钛合金的流动应力曲线为典型的动态再结晶型曲线,其流动应力随应变速率的降低和变形温度的升高而减小。

(2)传统物理本构关系的相关系数和平均相对误差分别为 0.986 和 14.4%;考虑晶界扩散和晶格扩散耦合的修正物理本构关系的相关系数和平均相对误差分别为 0.965 和 13.1%。这说明两个物理本构模型都能够较好地表征 SP700 钛合金的流动应力行为。

(3)SP700 钛合金在 700~800 °C 的主要扩散机制是晶界扩散,在 850 °C 时转变为晶格扩散。

(4)修正的物理本构模型考虑了热变形过程中更多的物理冶金行为,具有一定的物理意义,实际应用时应优先选用修正的物理本构关系。

参 考 文 献

- [1] IMAM M A, FROES F H, HOUSLEY K L. Titanium and Titanium Alloys[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2010.
- [2] 刘剑桥,刘佳,唐毓金,等.钛合金在骨科植入领域的研究进展[J].材料工程,2021,49(8):11-25.
- [3] 梁顺星,刘凯洋,尹丽霞,等.高强度异质钛合金的研究进展[J].特种铸造及有色合金,2022,42(2):138-143.
- [4] PARVIZIAN P, MORAKABATI M, SADEGHPOUR S. Effect of hot rolling and annealing temperatures on the microstructure and mechanical properties of SP-700 alloy[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27: 374-383.
- [5] CHIU Y C, CHEN J H, LEE S L. Effects of solution heat treatment temperatures on microstructures and mechanical properties of SP-700 Ti alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(3): 2 509-2 516.
- [6] GAO P F, FU M W, ZHAN M, et al. Deformation behavior and microstructure evolution of titanium alloys with lamellar microstructure in hot working process: A review[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2020, 39(4): 56-73.
- [7] CHEN X F, TANG B, LIU Y, et al. Dynamic recrystallization behavior of the Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy during isothermal hot deformation[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2019, 29(5): 587-594.
- [8] LIN Y C, CHEN X M. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working

- [J]. *Materials and Design*, 2011, 32(4): 1 733-1 759.
- [9] 周爱美,余新平,潘巧玉,等.TC21 钛合金热变形组织演变及本构关系研究[J].*特种铸造及有色合金*, 2022, 42(2): 230-234.
- [10] SANTOSH S, SAMPATH V, MOULISWAR R R. Hot deformation characteristics of NiTiV shape memory alloy and modeling using constitutive equations and artificial neural networks[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 901: 163 451.
- [11] 朱丽,孔融,吴伟平,等.TC1 钛合金板材热加工性能研究[J].*精密成形工程*, 2022, 14(4): 154-161.
- [12] 何龙,张冉阳,赵刚要,等.基于 BP 神经网络的 GH5188 高温合金本构模型[J].*特种铸造及有色合金*, 2021, 41(2): 223-226.
- [13] WANG S, LUO J R, HOU L G, et al. Physically based constitutive analysis and microstructural evolution of AA7050 aluminum alloy during hot compression[J]. *Materials & Design*, 2016, 107: 277-289.
- [14] MIRZADEH H, CABRERA J M, NAJAFIZADEH A. Constitutive relationships for hot deformation of austenite[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(16): 6 441-6 448.
- [15] DINI H, SVOBODA A, ANDERSSON N E, et al. Optimization and validation of a dislocation density based constitutive model for as-cast Mg-9Al-1Zn[J]. *Materials Science and Engineering*, 2018, A710: 17-26.
- [16] LIN Y C, CHEN X M, WEN D X, et al. A physically-based constitutive model for a typical nickel-based superalloy[J]. *Computational Materials Science*, 2014, 83: 282-289.
- [17] CABRERA J M, OMAR A A, PRADO J M, et al. Modeling the flow behavior of a medium carbon microalloyed steel under hot working conditions[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1997, A28(11): 2 233-2 244.
- [18] WEI H L, LIU G Q, ZHANG M H. Physically based constitutive analysis to predict flow stress of medium carbon and vanadium microalloyed steels[J]. *Materials Science and Engineering*, 2014, A602: 127-133.
- [19] 邱仟,王克鲁,李鑫,等.基于 BP 神经网络的 SP700 钛合金本构关系[J].*塑性工程学报*, 2021, 28(11): 167-172.
- [20] 李全,金朝阳.采用改进和优化的 Zerilli-Armstrong 本构模型预测 AZ80 镁合金的高温流动应力[J].*中国有色金属学报*, 2021, 31(8): 2 091-2 100.
- [21] 周亚利,杨秋月,张文玮,等.具有层片状 α 相组织的 TB8 钛合金热变形行为及本构方程[J].*材料工程*, 2021, 49(1): 75-81.
- [22] LIU M T, TIAN Y, WANG Y, et al. Critical conditions for dynamic recrystallization of S280 ultra-high-strength stainless steel based on work hardening rate[J]. *Metals*, 2022, 12(7): 1 123.
- [23] 刘乐,石大鹏,孙晓军,等.航天用 7055 高强铝合金热变形行为及热加工图[J].*特种铸造及有色合金*, 2022, 42(5): 564-568.
- [24] POLETTI C, GERMAIN L, WARCHOMICKA F, et al. Unified description of the softening behavior of beta-metastable and alpha+beta titanium alloys during hot deformation[J]. *Materials Science and Engineering*, 2016, A651: 280-290.
- [25] LU C Y, WANG J, ZHANG P. Flow behavior analysis and flow stress modeling of Ti17 alloy in β forging process[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30: 7 668-7 681.
- [26] BABUK A, PRITHIV T S, GUPTA A, et al. Modeling and simulation of dynamic recrystallization in super austenitic stainless steel employing combined cellular automaton, artificial neural network and finite element method[J]. *Computational Materials Science*, 2021, 195: 110 482.
- [27] LONG J C, XIA Q X, XIAO G F, et al. Flow characterization of magnesium alloy ZK61 during hot deformation with improved constitutive equations and using activation energy maps[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 191: 106 069.
- [28] MIRZADEH H. A comparative study on the hot flow stress of Mg-Al-Zn magnesium alloys using a simple physically-based approach [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2014, 2(3): 225-229.
- [29] LU C Y, SHI J, WANG J. Physically based constitutive modeling for Ti17 alloy with original basketweave microstructure in β forging: A comparison of three approaches[J]. *Materials Characterization*, 2021, 181: 111 455.
- [30] FROST H J, ASHBY M F. *Deformation-mechanism Maps: The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics*[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982.
- [31] DERECA N E W, LIBANATI Y C M. Autodifusion de titanio beta y hafnio beta self-diffusion in β -titanium and β -hafnium autodiffusion du titane beta et de l'hafnium beta selbst diffusion in β -titanium und β -hafnium[J]. *Acta Metallurgica*, 1968, 16(10): 1 297-1 305.
- [32] HUMPHREYS F J, KALU P N. Dislocation-particle interactions during high temperature deformation of two-phase aluminium alloys[J]. *Acta Metallurgica*, 1987, 35(12): 2 815-2 829.
- [33] SEMENYCHEVA A V, CHUVILDEEV V N, NOKHRIN A V, et al. A theoretical model of grain boundary self-diffusion in metals with phase transitions (case study into titanium and zirconium)[J]. *Physica*, 2018, B537: 105-110.
- [34] NAYAN N, SINGH G, MURTY S V S N, et al. Effect of ternary additions of Cu and Fe on the hot deformation behavior of NiTi shape memory alloy-A study using processing maps[J]. *Intermetallics*, 2021, 131: 107 084.
- [35] KUMAR S, KARMAKAR A, NATH S K. Construction of hot deformation processing maps for 9Cr-1Mo steel through conventional and ANN approach[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 26: 101 903.

(编辑:刘晨辉)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |