

引用格式: 张浩强, 蔡柳, 姜炳春, 等. 考虑应变的 GH4065 高温合金变参数本构模型构建[J]. 航空材料学报, 2025, 45(6): 118-126.

ZHANG Haoqiang, CAI Liu, JIANG Bingchun, et al. Variable-parameter constitutive model construction of GH4065 superalloy by considering strain[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(6): 118-126.

考虑应变的 GH4065 高温合金变参数 本构模型构建

张浩强*, 蔡柳, 姜炳春, 彭培铭, 唐联耀

(广东科技学院 机电工程学院, 广东 东莞 523668)

摘要: 为了研究 GH4065 高温合金高温变形行为及本构关系, 对 GH4065 高温合金进行高温压缩实验。结果表明, GH4065 高温合金应力水平分别与应变速率和变形温度呈正相关和反相关关系, 在高温变形过程中主要表现为动态再结晶软化, 应力水平受应变影响显著。本工作提出变参数 Arrhenius 本构模型: 一方面, 该模型考虑应变的影响, 弥补 Arrhenius 本构方程的固有缺陷, 适用于表征 GH4065 高温合金高温变形行为; 另一方面, 根据真应力预测结果, 针对应变速率对本构模型进行修正, 显著提高模型预测精度。修正后的 Arrhenius 本构方程真应力预测值平均绝对相对误差为 3.69%, 真应力预测结果与实验结果具有一致性, 证明 GH4065 高温合金本构模型的可靠性。

关键词: GH4065 高温合金; 变形行为; 变参数; Arrhenius 本构模型

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000171

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2024.000171

中图分类号: TG146.1; V252.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)06-0118-09

Variable-parameter constitutive model construction of GH4065 superalloy by considering strain

ZHANG Haoqiang*, CAI Liu, JIANG Bingchun, PENG Peiming, TANG Lianyao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Science and Technology, Dongguan 523668, Guangdong, China)

Abstract: In order to study the high-temperature deformation behavior and constitutive relationship of GH4065 superalloy, high-temperature compression experiments are implemented on GH4065 superalloy. The results show that the stress level of GH4065 superalloy has positive and negative correlative relationship with the strain rate and the deformation temperature, respectively. During the high-temperature deformation process, it mainly presents dynamic recrystallization softening, and the stress level is significantly affected by the strain. In this work, a variable-parameter Arrhenius constitutive model is proposed. On the one hand, this model takes the effect of strain into account, overcoming the intrinsic shortages of Arrhenius constitutive equation, and is suitable for characterizing the high-temperature deformation behavior of GH4065 superalloy. On the other hand, based on the true stress prediction results, the constitutive model is modified according to the strain rate, which significantly improves its prediction accuracy of the model. The average absolute relative error of the true stress predicted by the modified Arrhenius constitutive equation is 3.69%, and the true stress prediction results are consistent with the experimental results, which proves the reliability of the constitutive model for GH4065 superalloy.

Key words: GH4065 superalloy; deformation behavior; variable-parameter; Arrhenius constitutive model

在金属高温成型工艺过程中,材料表现出高度复杂的变形与流动。高温变形参数(包括温度、应变、应变速率等)对材料高温成型过程中硬化和软化行为有着重要影响,并进一步决定材料在成型过程中变形特性及应力响应^[1]。因此,对金属材料高温变形行为的深入理解,对于金属加工工艺(如热轧、锻造、挤压等)参数的选择和优化,具有至关重要的作用^[2-3]。本构模型作为描述金属材料塑性变形特性的重要工具,能够结合仿真软件实现金属材料高温变形行为的模拟仿真^[4],为工艺设计和产品质量提升提供重要参考。因此,越来越多研究人员致力于金属材料本构模型的开发工作,其中新型金属材料的本构模型开发对于其产业化应用尤为必要和迫切。

GH4065 高温合金,作为新型镍基高温合金,在 700 ~ 850 °C 高温区间仍能展现出优异的蠕变抗性、抗氧化性、断裂韧性和耐腐蚀性,因此逐渐应用于制造航空发动机高温关键零部件^[5]。GH4065 高温合金产品通常经过高温锻造成型^[6],高温成型过程中位错、晶粒、相、孪晶等引起的多种复杂机制及机制间的相互作用,使其高温变形行为变得尤为复杂。同时, GH4065 高温合金产品往往用于关键部位,自身质量及性能要求极高。因此,对 GH4065 高温合金高温变形行为进行深入研究,可以为高温成型工艺设计和质量控制做好铺垫和保障。

常见的金属塑性变形本构方程主要有 Arrhenius Johnson-Cook 方程。Arrhenius 方程最早用于描述化学反应速率,后来逐渐应用于材料科学中描述高温下塑性变形行为及机制, Zener 等^[7]提出 Zener-Hollomon 参数,将应变速率和温度结合到本构模型中。Sellars 等^[8]将 Zener-Hollomon 参数与双曲正弦函数结合,提出更加普适的本构方程,覆盖更宽泛的温度和应力范围。近年来, Arrhenius 方程作为描述金属材料塑性行为典型的本构模型^[9-10],已广泛应用于金属材料高温变形行为表征领域。如 He 等^[11]、李萍等^[12]、袁志钟^[13]等分别建立 2219 铝合金、Ti65 钛合金和 57Ni-22Cr-14W-2Mo 高温合金的 Arrhenius 本构模型。传统的 Arrhenius 本构模型适用于表征应力对应变速率和温度的响应规律,而往往忽略应变的影响^[14]。对于大多数材料,尤其是动态再结晶型软化的材料,应变对于应力水平具有较显著的影响,使用传统的 Arrhenius 本构方程所得应力有较大误差。最近,一些材料的改进或修正 Arrhenius 本构

模型被开发和应用。例如, Hu 等^[15]开发 Mg-8.5Gd-4.5Y-0.8Zn-0.4Zr 合金应变补偿 Arrhenius 本构模型,并通过 ABAQUS 数值模拟软件实现该合金高温变形行为的精确预测;龚海等^[16]开发 Mg-10Gd-3Y-0.4Zr 合金应变补偿 Arrhenius 本构模型,但其精度无法满足要求,考虑高温压缩过程中材料参数与成形参数之间的关系后,建立在变参数模型中引入温度和应变速率的修正 Arrhenius 本构模型,获得较为精确的高温变形行为预测结果。由此可见,应变补偿 Arrhenius 本构模型能够在一定程度上改善材料高温变形行为预测精度,但针对材料独特的高温变形特性,需要进行一定修正获得较高预测精度。

本工作通过高温压缩实验获得 GH4065 高温合金真应力-应变(σ - ϵ)曲线,在分析其规律的基础上,建立 GH4065 高温合金的 Arrhenius 变参数本构方程。该本构模型在传统的 Arrhenius 本构方程基础上考虑应变对应力的影响,能够弥补传统 Arrhenius 本构方程的缺陷。根据 Arrhenius 变参数本构方程的真应力预测结果针对性地对本构方程进一步修正,显著提高本构模型整体精度。这些工作为 GH4065 高温合金高温成型工艺设计及优化提供理论支持,并为 GH4065 合金高温成型过程有限元仿真奠定基础。

1 实验与结果

1.1 高温压缩实验

本工作根据 ASTM E209 标准进行高温压缩实验,获得 GH4065 合金真应力-应变曲线。实验采用锻态 GH4065 高温合金,其化学成分详见表 1。GH4065 高温合金原始微观组织如图 1 所示,主要由等轴晶组成,伴随少量孪晶。在高温压缩实验中,首先将锻态 GH4065 高温合金棒料加工成 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱形试样,清洗并干燥后,将 K 型 I 级热电偶焊接于试样圆柱面上用于测量试样温度。然后在试样端面均匀涂抹石墨粉以对试样端面进行润滑,并将试样固定在 Gleeble 3500 型热机模拟试验系统的砧座上,以 2 K/s 的恒定加热速

表 1 锻态 GH4065 高温合金化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of as-forged GH4065 superalloy (mass fraction/%)

Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Fe	Nb	Ni
16.12	13.09	4.14	3.97	3.65	2.24	1.25	0.74	Bal.

率将试样加热至压缩温度 T 为 1150、1200、1250、1300 K 和 1350 K, 到达温度后保温 120 s 使试样各处温度均匀。最后以 0.001 、 0.01 、 0.1 s^{-1} 和 1 s^{-1} 的应变速率 $\dot{\epsilon}$ 沿试样高度方向压缩至 5.4 mm。压缩完成后, 所有试样立即进行水淬处理, 随后干燥并封装。

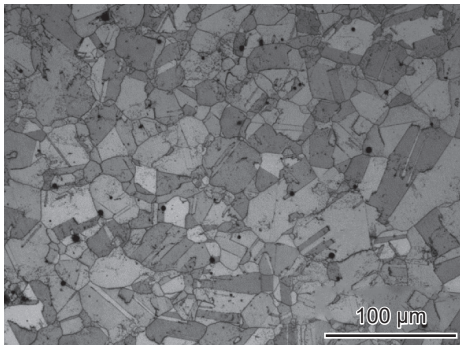


图1 GH4065 高温合金原始微观组织

Fig. 1 Original microstructure of GH4065 superalloy

1.2 实验结果

图2中实线为通过高温压缩实验获得的GH4065高温合金真应力-应变关系。总体来看, GH4065合金真应力水平随着变形温度的降低和应变速率的升高而升高。在高温压缩实验中, GH4065

高温合金应力水平随应变增加呈现三阶段变化: 应变初期迅速升高, 随后增速减缓至峰值, 最终逐渐下降并趋于稳定。真应力-应变曲线表现的复杂特征映射出变形机制: 变形初期, 材料内部的位错迅速增殖并形成缠结, 导致位错运动受阻, 形成胞状结构, 这一过程引起热压缩初期的加工硬化现象, 应力值迅速上升。随着持续的塑性变形, 发生位错交滑移和位错攀移等微观组织演变行为, 促使晶粒形状发生改变, 材料的塑性流动得以继续, 应力增长速率逐渐降低。进一步变形导致材料位错密度持续增加, 位错相互作用的频率和强度提高, 材料软化作用随之出现。这种软化机制与加工硬化相互作用和影响, 当两种机制强度达到平衡时, 应力达到峰值。当变形程度较大时, 存储的能量为晶粒再结晶提供必要驱动力, 促使晶粒重新形核长大, 进入动态再结晶阶段^[17]。动态再结晶有效消除此前变形过程中形成的变形织构, 显著增强材料的软化效应。随着动态再结晶, 软化效应强度明显超越加工硬化效应, 引起应力水平下降。当动态再结晶程度较高时, 动态再结晶速率降低, 软化作用减弱, 当软化和硬化作用强度大致相等时, 应力水平保持在小范围内变化^[18]。总体而言, GH4065高温合金的真应力-应变关系体现材料在高温变形过程中加

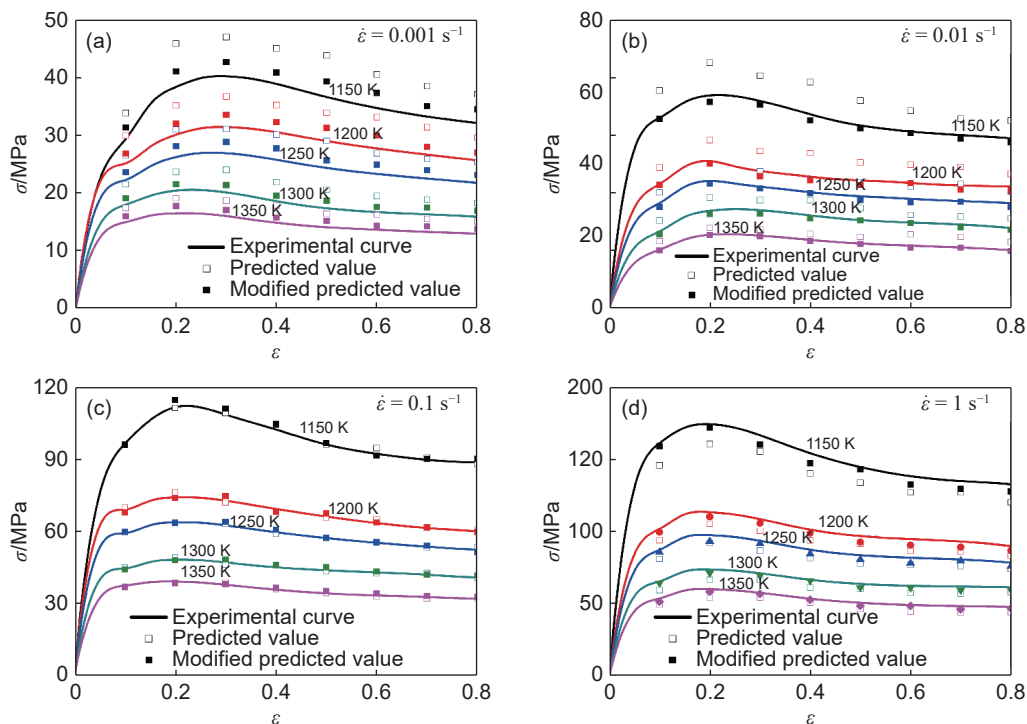


图2 不同温度和应变速率下未修正和修正 Arrhenius 变参数本构模型预测的真应力值与实验值比较
(a) $\dot{\epsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$; (d) $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$

Fig. 2 Comparison of predicted true stress values by the unmodified and modified variable-parameter Arrhenius constitutive model with experimental values under different temperature and strain rates (a) $\dot{\epsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$; (d) $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$

工硬化与动态再结晶软化机制之间的竞争与平衡,也体现应变对于动态再结晶型软化机制的合金应力-应变关系的显著影响。

图3为GH4065高温合金高温压缩后典型金相组织,由图可知,GH4065高温合金高温压缩后的晶粒主要表现为两种类型:一种为大尺寸晶粒,这些晶粒为未发生动态再结晶的原始晶粒,高温压缩过程中这类晶粒轴向被压缩,径向被拉长,表现为具有一定方向的扁条状;另一种为细小晶粒,这些晶粒为由原始晶粒发生动态再结晶产生的等轴晶,

分布于原始晶粒周围,尺寸远小于原始晶粒。结合真应力-应变演变趋势和金相组织分析,GH4065高温合金在高温变形过程中表现出显著的动态再结晶软化特征。在低温高应变速率条件下(图3(a)),动态再结晶程度较低,微观组织表现为压缩变形大尺寸晶粒和细小等轴晶粒的混晶特征。随着温度升高和应变速率降低,动态再结晶程度逐渐提高,大尺寸晶粒减少(图3(b))。当动态再结晶程度达到或接近100%时,微观组织表现为统一的细小均匀等轴晶粒(图3(c))。

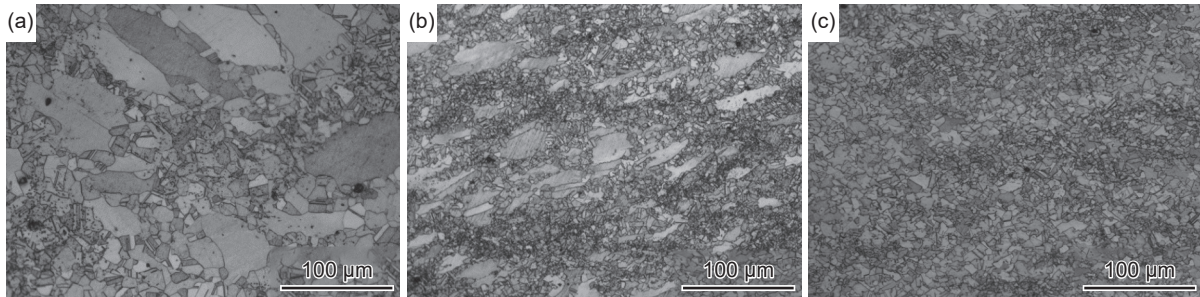


图3 GH4065合金不同温度和应变速率下高温压缩后金相组织
(a) $T=1150\text{ K}$, $\dot{\epsilon}=1\text{ s}^{-1}$; (b) $T=1250\text{ K}$, $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$; (c) $T=1350\text{ K}$, $\dot{\epsilon}=1\text{ s}^{-1}$

Fig. 3 Metallographic structures of GH4065 superalloy after high-temperature compression under different temperatures and strain rates (a) $T=1150\text{ K}$, $\dot{\epsilon}=1\text{ s}^{-1}$; (b) $T=1250\text{ K}$, $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$; (c) $T=1350\text{ K}$, $\dot{\epsilon}=1\text{ s}^{-1}$

综上所述,GH4065高温合金真应力受加工硬化与动态再结晶软化机制的交互影响,对高温变形参数敏感,变形温度、应变和应变速率对真应力水平均有显著影响。

2 变参数本构模型构建

2.1 Arrhenius 变参数本构模型构建

本工作采用 Arrhenius 本构模型表征 GH4065 高温合金高温变形行为,其表达形式如式(1)所示^[19]:

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma)\exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

式中: A 为材料的结构因子,与材料的初始微观状态相关; Q 高温变形激活能,表征材料变形过程中需要克服的能垒,其值与主导的变形机制直接相关; R 为普适气体常数,为 $8.31\text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$;函数 $F(\sigma)$ 有3种主要形式,分别为指数形式(式(2))、幂函数形式(式(3))和双曲线形式(式(4))^[20]。

$$F(\sigma) = \sigma^{n_a} \quad (2)$$

$$F(\sigma) = \exp(\beta\sigma) \quad (3)$$

$$F(\sigma) = [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (4)$$

式中: n 为应力指数,反映材料对应变速率的敏感性,与变形机制类型密切相关; α 、 β 以及 n_a 均为材料常数,且 $\alpha = \beta/n_a$ ^[14]。根据式(1),定义 Zener-Hollomon 参数 Z ^[21],如式(5)所示:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (5)$$

在温度不变的情况下, $\exp[-Q/(RT)]$ 为定值,根据式(1)~(3),本构方程可以表示为式(6)和式(7):

$$\dot{\epsilon} = b_1\sigma^{n_a} \quad (6)$$

$$\dot{\epsilon} = b_2\exp(\beta\sigma) \quad (7)$$

式中: b_1 和 b_2 在恒定温度下均为常数。经进一步推导,得到式(8)和式(9):

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln b_1 + n_a \ln \sigma \quad (8)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln b_2 + \beta \sigma \quad (9)$$

当温度不变时, n_a 和 β 分别表示为式(10)和式(11):

$$n_a = \left. \frac{\ln \dot{\epsilon}}{\ln \sigma} \right|_T \quad (10)$$

$$\beta = \left. \frac{\ln \dot{\epsilon}}{\sigma} \right|_T \quad (11)$$

同时,结合式(1)和式(4)可以得到 Sellars 提出的双曲正弦本构模型^[22-23],表示为:

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (12)$$

经进一步推导,得到:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - Q/(RT) \quad (13)$$

当温度不变时,得到:

$$n = \frac{\ln \dot{\varepsilon}}{\ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \Big|_T \quad (14)$$

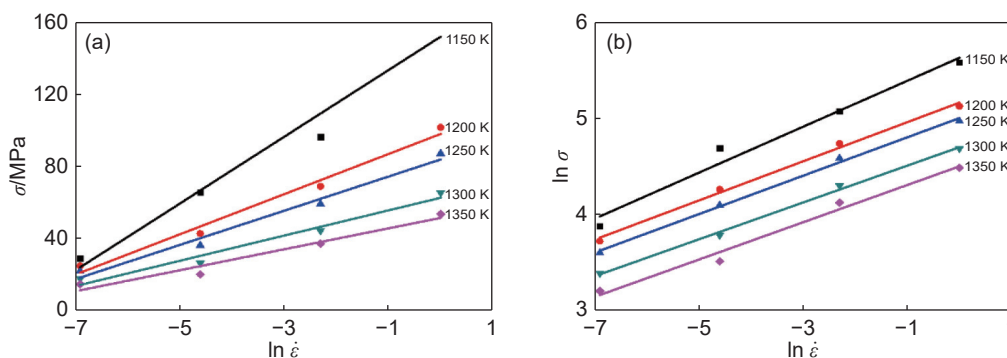


图4 不同温度下 σ - $\ln \dot{\varepsilon}$ (a)和 $\ln \sigma$ - $\ln \dot{\varepsilon}$ (b)线性关系

Fig. 4 Linear relationships of σ - $\ln \dot{\varepsilon}$ (a) and $\ln \sigma$ - $\ln \dot{\varepsilon}$ (b) under different temperatures

根据式(14),通过线性拟合可得到不同温度下 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}$ 的线性关系,如图5(a)所示,每条拟合直线的斜率值可作为该温度下的 $1/n$ 值,由此计算得到 $n = 1.530$ 。不同应变速率下 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $1/(nRT)$ 的线性关系,如图5(b)所示,各拟合直线的斜率为变形激活能 Q ,通过取平均值可得 $Q = 1.277 \times 10^4$ kJ/mol。根据式(12),计算出不同温度和应变速率下合金结构因子 A ,取平均值作为 A 的最终结果。经计算得到, $A = 4.035 \times 10^{12}$ 。以上计算得到的模型参数为真应变0.1时 Arrhenius 本构模型参数。

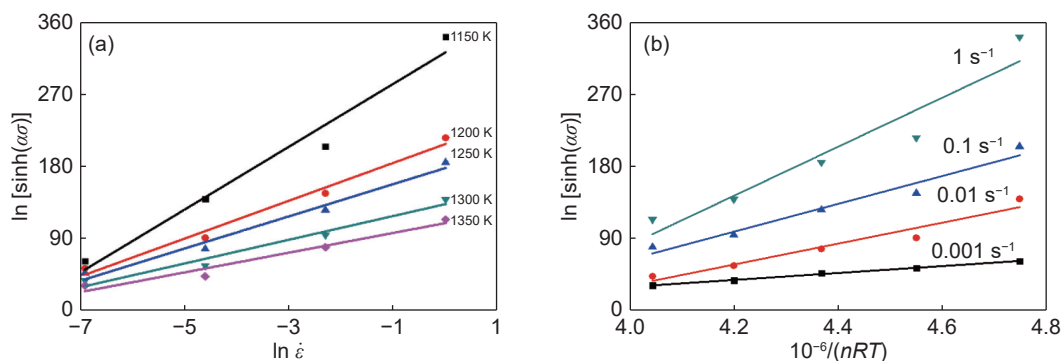


图5 不同温度下 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $\ln \dot{\varepsilon}$ (a)和不同应变速率下 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $10^{-6}/(nRT)$ (b)的线性关系

Fig. 5 Linear relationships of $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $\ln \dot{\varepsilon}$ under different temperatures (a) and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $10^{-6}/(nRT)$ under different strain rates (b)

当应变速率不变时,得到:

$$Q = \frac{\ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{[1/(nRT)]} \Big|_{\dot{\varepsilon}} \quad (15)$$

以真应变0.1为例,计算 Arrhenius 本构关系模型。不同温度下, σ - $\ln \dot{\varepsilon}$ 和 $\ln \sigma$ - $\ln \dot{\varepsilon}$ 线性关系如图4所示。图4(a)和(b)中,各拟合直线斜率的均值分别为 $\frac{1}{\beta}$ 和 $\frac{1}{n_a}$ 。分别拟合图4中直线,计算各拟合直线斜率的均值,得到 β 、 n_a 和 α 的值。经计算, $\beta = 0.1128$, $n_a = 4.926$, $\alpha = \beta/n_a = 0.0229$ 。

按照以上方法可以计算出真应变0.1~0.8(间隔为0.05)时 Arrhenius 本构模型参数,如表2所示。

传统的 Arrhenius 本构模型通常仅以峰值应力进行计算,忽略了应变对应力水平的影响,导致在确定温度和应变速率下的真应力值为固定值。然而,如前所述,GH4065 高温合金在高温变形过程中表现出动态再结晶软化特征,应变对应力水平有显著影响。考虑到应变对应力水平的影响,结合表2,建立 Q 、 n 、 A 、 α 与应变的多项式函数关系。由于 A 数量级差距较大,采用对数形式 $\ln A$ 进行多项式

表 2 不同真应变下 Arrhenius 本构模型参数
Table 2 Parameters of Arrhenius constitutive model under different true strains

ε	α	n	Q	$\ln A$
0.1	0.0229	1.530	1.277×10^4	29.206
0.15	0.0211	2.914	6.638×10^3	26.181
0.2	0.0204	3.723	5.244×10^3	25.337
0.25	0.0198	4.080	7.103×10^3	26.120
0.3	0.0205	4.213	1.030×10^4	27.873
0.35	0.0207	4.102	1.357×10^4	29.045
0.4	0.0220	3.841	1.561×10^4	30.750
0.45	0.0227	3.772	1.541×10^4	32.584
0.5	0.0234	3.758	1.257×10^4	31.717
0.55	0.0232	3.774	8.949×10^3	31.486
0.6	0.0234	3.770	5.025×10^3	30.003
0.65	0.0243	3.847	3.797×10^3	29.221
0.7	0.0246	3.844	3.120×10^3	28.672
0.75	0.0240	3.922	3.908×10^3	27.808
0.8	0.0249	3.689	5.052×10^3	27.327

函数关系构建。将多项式拟合过程中使用的最高

阶次设置为 5, 多项式函数具体形式如式 (16), 由此通过 ε 表示 GH4065 高温合金本构模型各参数。

$$\begin{cases} Q(\varepsilon) = B_0 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 + B_4\varepsilon^4 + B_5\varepsilon^5 \\ n(\varepsilon) = C_0 + C_1\varepsilon + C_2\varepsilon^2 + C_3\varepsilon^3 + C_4\varepsilon^4 + C_5\varepsilon^5 \\ \ln A(\varepsilon) = D_0 + D_1\varepsilon + D_2\varepsilon^2 + D_3\varepsilon^3 + D_4\varepsilon^4 + D_5\varepsilon^5 \\ \alpha(\varepsilon) = E_0 + E_1\varepsilon + E_2\varepsilon^2 + E_3\varepsilon^3 + E_4\varepsilon^4 + E_5\varepsilon^5 \end{cases} \quad (16)$$

各模型参数随真应变变化关系如图 6 所示。由图可见, 各参数拟合曲线拟合效果良好。得到各多项式系数列于表 3。

综上所述, 本工作构建的 GH4065 高温合金 Arrhenius 变参数本构方程为:

$$\dot{\varepsilon} = A(\varepsilon) \{ \sinh[\alpha(\varepsilon)\sigma] \}^{n(\varepsilon)} \exp[-Q(\varepsilon)/(RT)] \quad (17)$$

式中: $A(\varepsilon)$ 、 $\alpha(\varepsilon)$ 、 $n(\varepsilon)$ 和 $Q(\varepsilon)$ 分别为 A 、 α 、 n 、 Q 在不同的温度和应变速率下对应的应变多项式关系函数。

2.2 Arrhenius 变参数本构模型修正

由式 (17), 真应力 σ 可表达为:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha(\varepsilon)} \ln \left\{ \left(\frac{\dot{\varepsilon} \exp[Q(\varepsilon)/RT]}{A(\varepsilon)} \right)^{1/n(\varepsilon)} + \left[\left(\frac{\dot{\varepsilon} \exp[Q(\varepsilon)/RT]}{A(\varepsilon)} \right)^{2/n(\varepsilon)} + 1 \right]^{0.5} \right\} \quad (18)$$

采用构建的 Arrhenius 变参数本构模型对 GH4065 高温合金真应力进行预测, 结果如图 2 所示。利用式 (19) 定义的平均绝对相对误差 (average

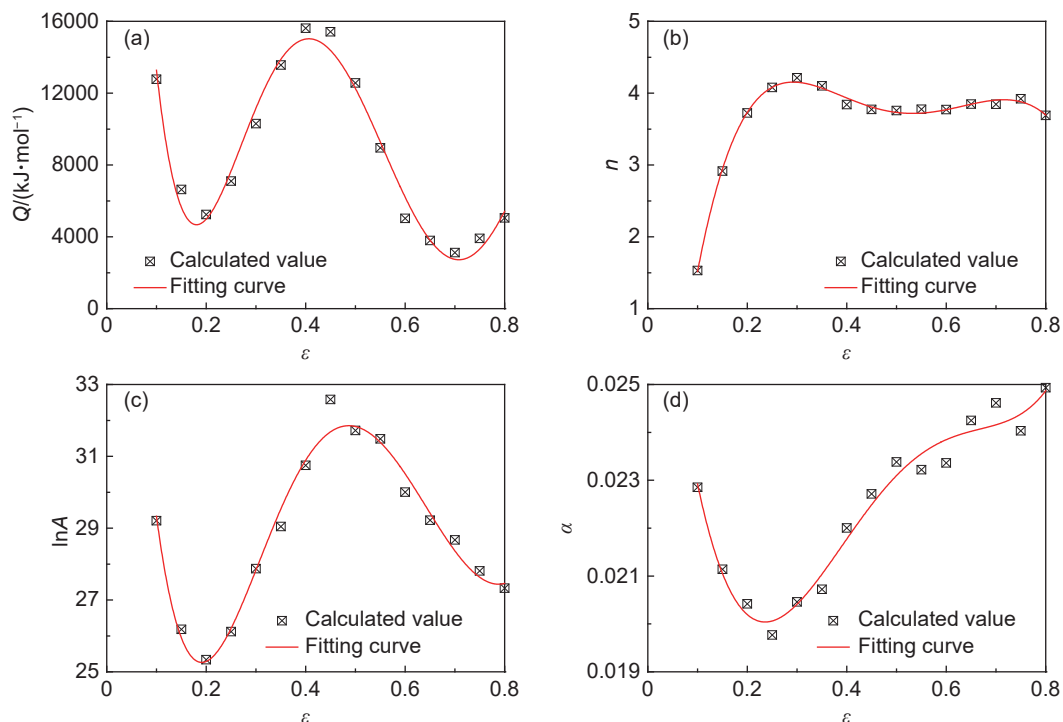


图 6 本构模型参数 $Q(a)$ 、 $n(b)$ 、 $\ln A(c)$ 和 $\alpha(d)$ 随真应变变化关系

Fig. 6 Relationship between constitutive model parameters $Q(a)$, $n(b)$, $\ln A(c)$, $\alpha(d)$ and true strain

表3 多项式系数拟合结果
Table 3 Polynomial coefficient fitting result

Coefficient	Fitting result
B_0	7.03×10^4
B_1	-9.82×10^5
B_2	5.16×10^6
B_3	-1.15×10^7
B_4	1.14×10^7
B_5	-4.13×10^6
C_0	-4.23
C_1	82.47
C_2	-292.37
C_3	452.63
C_4	-297.25
C_5	58.20
D_0	50.4
D_1	-343.4
D_2	1612.3
D_3	-3104.0
D_4	2597.8
D_5	-777.9
E_0	0.031
E_1	-0.117
E_2	0.412
E_3	-0.536
E_4	0.220
E_5	0.024

absolute relative error, AARE)^[24-25] 评估本构模型精度, AARE 值的大小体现模型预测与实验测量的真应力值的差异程度, AARE 值越低, 表示模型具有更高精度。

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_i - Y_i}{Y_i} \right| \times 100\% \quad (19)$$

式中: X_i 和 Y_i 分别表示预测值和实验值; N 表示数据总数。

计算得到, 构建的本构模型 AARE 值为 9.54%。最大相对误差达到 19.97%, 误差较大。由图 2 可以看出, 除应变速率为 0.1 s^{-1} 条件下预测数据具有较高精度外, 其他应变速率条件下预测数据误差较为明显。由式(5)可以看出, Z 参数通过耦

合变形温度与应变速率描述材料的高温变形行为, 但 Z 参数与应变速率呈线性关系的假设存在局限性: 较大的计算误差表明, 这种线性关系无法真实表征 GH4065 高温合金在实际变形过程中, 由应变速率变化引起的热软化效应、局部组织演变差异及材料微观特性的动态变化, 难以准确反映合金高温变形的真实规律。

由图 2 可知, 在应变速率分别为 0.001 s^{-1} 和 0.01 s^{-1} 条件下真应力预测值相较于实验值偏差为正, 在应变速率为 1 s^{-1} 条件下预测值相较于实验值偏差为负。预测值误差整体趋势随应变速率增加正值逐渐减小, 直至接近于 0 (应变速率为 0.1 s^{-1} 条件下), 此时精度较高, 后又逐渐转为负值。为了进一步减少模型误差, 根据现有误差规律对模型应变速率进一步修正。由于应变速率为 0.1 s^{-1} 条件下精度较高, 研究选择应变速率 0.1 s^{-1} 条件下预测值不变的情况下, 对 Z 参数进行修正, 修正结果如下:

$$Z' = 0.1 \times (10\dot{\epsilon})^m \exp(Q/RT) \quad (20)$$

式中: m 为大于等于 1 的常数。根据式(20), 取 m 值在 1~1.6 范围内 (间隔 0.05), 经过计算, AARE 值随 m 变化关系, 如图 7 所示。通过拟合, 可以看到 AARE 值随 m 值增加先降低, 随着 m 值的进一步增加, AARE 值又随 m 值增加而减小。通过计算曲线最低点数据得到, 当 $m=1.231$ 时, 本构模型精度达到最高, 此时 AARE 值为 3.64%。

由式(18)和式(20), 重新预测真应力, 修正后预测结果与实验值的对比, 如图 2 所示, 采用 $m=1.231$ 的修正模型预测的应变速率 0.001 、 0.01 s^{-1} 和 1 s^{-1} 条件下真应力数据更加接近实验值。图 8 为两种本构模型真应力预测结果与实验值对比, 明显看出, 修正模型的预测值更接近实验值。

综上所述, 构建考虑应变的变参数本构模型表

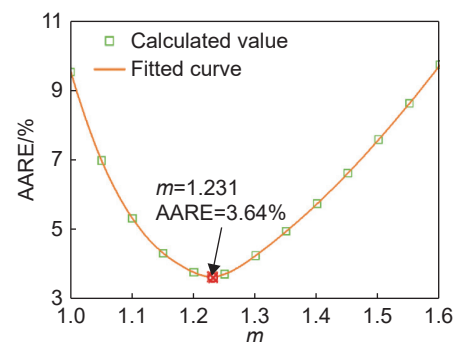


图7 AARE 值随 m 变化关系

Fig. 7 Variation relationships between AARE value and m

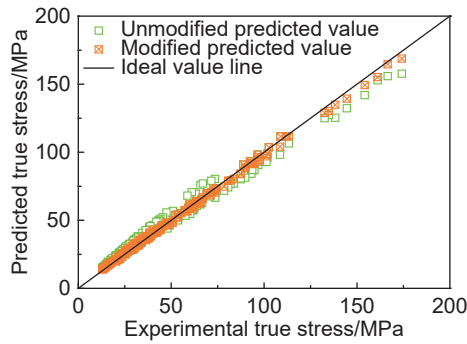


图8 两种变参数本构模型真应力预测结果比较

Fig. 8 Comparisons of predicted results of true stress from two kinds of variable-parameter Arrhenius constitutive model

示为式(21):

$$\sigma = \frac{1}{\alpha(\varepsilon)} \ln \left\{ \left[\left(\frac{Z'}{A(\varepsilon)} \right)^{1/n(\varepsilon)} + \left[\left(\frac{Z'}{A(\varepsilon)} \right)^{2/n(\varepsilon)} + 1 \right]^{0.5} \right] \right\} \quad (21)$$

式中: $Z' = 0.1 \times (10\dot{\varepsilon})^{1.231} \exp(Q/RT)$ 。采用该模型能够准确描述及预测温度在 1150~1350 K、应变速率在 $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 及应变在 0.1~0.8 范围内锻态 GH4065 高温合金高温变形规律,并精确预测真应力。

3 结论

(1)在高温变形条件下, GH4065 高温合金发生动态再结晶, 应力水平受应变影响显著, 且分别与应变速率和变形温度呈正相关和反相关关系。

(2)通过建立结构形式为 $\dot{\varepsilon} = A(\varepsilon)\{\sinh[\alpha(\varepsilon)\sigma]\}^{n(\varepsilon)} \exp[-Q(\varepsilon)/(RT)]$ 的 GH4065 高温合金 Arrhenius 变参数本构模型, 解决传统模型忽略应变影响的问题。

(3)根据 Arrhenius 变参数本构模型的真应力预测结果, 对模型 Zener-Hollomon 参数对应变速率进一步修正, 构建考虑应变的变参数本构模型表示为 $\sigma = \frac{1}{\alpha(\varepsilon)} \ln \left\{ \left[\left(\frac{Z'}{A(\varepsilon)} \right)^{1/n(\varepsilon)} + \left[\left(\frac{Z'}{A(\varepsilon)} \right)^{2/n(\varepsilon)} + 1 \right]^{0.5} \right] \right\}$, 该模型能够准确描述 GH4065 高温合金高温变形规律, 并精确预测真应力。

参考文献:

[1] ZHENG D Y, XIA Y F, TENG H H, et al. Application of genetic algorithm to enhance the predictive stability of BP-ANN constitutive model for GH4169 superalloy[J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31(3): 693-708.

[2] CHEN X M, NIE L Y, HU H W, et al. High-temperature deformation characteristics and constitutive models of Inconel 625 superalloy[J]. *Materials Today Communica-*

tions, 2022, 32: 103855.

- [3] 唐辉, 涂露寒, 黎颖, 等. 耐热钢 2Cr12Ni4Mo3VNbN 的热变形行为[J]. *金属热处理*, 2023, 48(11): 22-28.
- TANG H, TU L H, LI Y, et al. Hot deformation behavior of heat-resistant steel 2Cr12Ni4Mo3VNbN[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2023, 48(11): 22-28.
- [4] REN P R, HUANG W Q, YANG X G, et al. A modified constitutive model considering microstructure degradation of Ni-based superalloys and its application to microstructural damage calculation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 882: 160605.
- [5] ZHANG H Q, JUANATAS R, NIGUIDULA J, et al. Grain growth behavior and improved mathematical model of a new-type superalloy[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2022, 23(1): 99-109.
- [6] ZHANG H Q, CAI L, PENG D L, et al. Thermo-mechanical effects and microstructural evolution-coupled numerical simulation on the hot forming processes of superalloy turbine disk[J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2024, 43: 20240013.
- [7] ZENER C, HOLLOMON J H. Effect of strain rate upon the plastic flow of steel[J]. *Journal of Applied Physics*, 1944, 15(1): 22-32.
- [8] SELLARS C M, TEGART W J M. Hot workability[J]. *International Metallurgical Reviews*, 1972, 17(1): 1-24.
- [9] LI Y G, SONG Y H, XU H, et al. Hot deformation and constitutive model of as-cast Ni-Cr-Co nickel-base alloy[J]. *International Journal of Materials Research*, 2022, 113(11): 992-1011.
- [10] LIN Y C, NONG F Q, CHEN X M, et al. Microstructural evolution and constitutive models to predict hot deformation behaviors of a nickel-based superalloy[J]. *Vacuum*, 2017, 137: 104-114.
- [11] HE H L, YI Y P, CUI J D, et al. Hot deformation characteristics and processing parameter optimization of 2219 Al alloy using constitutive equation and processing map[J]. *Vacuum*, 2019, 160: 293-302.
- [12] 李萍, 许海峰, 孟森, 等. Ti65 钛合金热变形行为及本构方程[J]. *塑性工程学报*, 2024, 31(2): 120-128.
- LI P, XU H F, MENG M, et al. Hot deformation behavior and constitutive equation of Ti65 titanium alloy[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2024, 31(2): 120-128.
- [13] 袁志钟, 崔树刚, 罗锐, 等. 57Ni-22Cr-14W-2Mo 高温合金的高温本构模型及微观组织演化[J]. *塑性工程学报*, 2020, 27(11): 151-158.
- YUAN Z Z, CUI S G, LUO R, et al. High temperature constitutive model and microstructure evolution of 57Ni-22Cr-14W-2Mo superalloy[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27(11): 151-158.

- [14] LIN H T, LONG S, WU D X, et al. Flow behavior and microstructure evolution of Al-3.65Cu-0.98Li(wt%) alloy during hot deformation[J]. *Materials Research Express*, 2022, 9(4): 046505.
- [15] HU L, LANG M W, SHI L X, et al. Study on hot deformation behavior of homogenized Mg-8.5Gd-4.5Y-0.8Zn-0.4Zr alloy using a combination of strain-compensated Arrhenius constitutive model and finite element simulation method[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11(3): 1016-1028.
- [16] 龚海, 何永飏, 张涛, 等. Mg-10Gd-3Y-0.4Zr 合金高温变形过程的修正本构模型研究[J]. *中南大学学报*, 2023(8): 2458-2471.
GONG H, HE Y B, ZHANG T, et al. Modified constitutive behavior model of Mg-10Gd-3Y-0.4Zr alloy during high-temperature deformation process[J]. *Journal of Central South University*, 2023(8): 2458-2471.
- [17] WANG X C, WANG Y, LIAN X J, et al. Dynamic recrystallization mechanism of as-cast nickel base superalloy N10276 during primary hot working[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2023, 30(4): 825-837.
- [18] 叶青, 陈博, 倪恒, 等. 基于神经网络的 Haynes 282 合金高温流动行为表征及其有限元应用[J]. *宇航材料工艺*, 2022, 52(2): 116-122.
YE Q, CHEN B, NI H, et al. Characterization of hot flow behavior of Haynes 282 alloy based on artificial neural network and its finite element application[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2022, 52(2): 116-122.
- [19] LIN Y C, CHEN M S, ZHONG J. Constitutive modeling for elevated temperature flow behavior of 42CrMo steel[J]. *Computational Materials Science*, 2008, 42(3): 470-477.
- [20] 赵为纲, 李鑫, 鲁世强, 等. TC11 钛合金高温变形本构关系研究[J]. *塑性工程学报*, 2008, 15(3): 123-127.
ZHAO W G, LI X, LU S Q, et al. Study on constitutive relationship of TC11 titanium alloy during high temperature deformation[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2008, 15(3): 123-127.
- [21] WANG J Y, LONG Y Z, YANG C X, et al. Hot deformation behavior and extrusion temperature-dependent microstructure, texture and mechanical properties of Mg-1Mn alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 1662-1676.
- [22] KOHOUT J. Modified Arrhenius equation in materials science, chemistry and biology[J]. *Molecules*, 2021, 26(23): 7162.
- [23] CAO R, WANG W, MA S, et al. Arrhenius constitutive model and dynamic recrystallization behavior of 18CrNi-Mo7-6 steel[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 6334-6347.
- [24] CHAI R X, GUO C, YU L. Two flowing stress models for hot deformation of XC45 steel at high temperature[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 534: 101-110.
- [25] 王攀智, 卢熠, 龚忠兴, 等. 基于响应面法的 GH738 高温合金热变形工艺参数优化[J]. *航空材料学报*, 2025, 45(4): 85-96.
WANG P Z, LU Y, GONG Z X, et al. Optimization of hot deformation processing parameters of GH738 superalloy based on response surface methodology[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2025, 45(4): 85-96.

收稿日期: 2024-11-18; 录用日期: 2025-04-14

基金项目: 广东科技学院博士科研启动经费项目(GKY-2024BSQDK-1); 广东科技学院横向科研项目(GKY-2025HX-035)

通讯作者: 张浩强(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为先进材料成型工艺及仿真, 联系地址: 广东省东莞市松山湖高新技术开发区东园大道松山湖段2号(523668), E-mail: zhanghaoqzhq@163.com

(本文责编: 陈 卉)