

材料与成形性能

## GH4698 合金流动应力及本构方程研究

李中豪<sup>1</sup>, 黄 亮<sup>1</sup>, 班宜杰<sup>1</sup>, 温东旭<sup>1</sup>, 李建军<sup>1,2</sup>, 蒋 乔<sup>3,4</sup>, 杨晓利<sup>3,4</sup>,  
张 健<sup>3,4</sup>, 张志成<sup>4</sup>

- (1. 华中科技大学 材料科学与工程学院 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;  
2. 湖北黄石模具产业技术研究院, 湖北 黄石 435001; 3. 大冶特殊钢有限公司, 湖北 黄石 435001;  
4. 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 湖北 黄石 435001)

**摘要:** 采用 Gleeble-3500 热模拟实验机对 GH4698 合金进行了热压缩实验, 研究了其在变形温度为 960~1160 ℃、应变速率为 0.001~10 s<sup>-1</sup> 和变形程度为 50% 条件下的热变形行为, 并基于真应力-真应变数据建立了唯象型和物理基本构模型以预测合金的高温流动行为。结果表明: GH4698 合金热压缩过程中流动应力呈先急剧上升后逐渐平缓的特征, 流动应力与变形温度呈负相关, 与应变速率呈正相关。4 种本构模型中, 应变补偿型 Arrhenius 模型的预测精度最高, 而改良的 Zerilli-Armstrong 模型相较于修正的 Zerilli-Armstrong 模型预测精度更高。

**关键词:** GH4698 合金; 热变形行为; 本构模型; 流动应力; 预测精度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.027

**中图分类号:** TG132.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 03-0207-12

## Research on flow stress and constitutive equation for GH4698 alloy

Li Zhonghao<sup>1</sup>, Huang Liang<sup>1</sup>, Ban Yijie<sup>1</sup>, Wen Dongxu<sup>1</sup>, Li Jianjun<sup>1,2</sup>, Jiang Qiao<sup>3,4</sup>, Yang Xiaoli<sup>3,4</sup>,  
Zhang Jian<sup>3,4</sup>, Zhang Zhicheng<sup>4</sup>

- (1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;  
2. Hubei Huangshi Mold Industrial Technology Research Institute, Huangshi 435001, China;  
3. Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China;  
4. Hubei Key Laboratory of High Quality Special Steel, Huangshi 435001, China)

**Abstract:** The hot compression experiment of GH4698 alloy was carried out by thermal simulation machine Gleeble-3500, and the hot deformation behavior of GH4698 alloy was studied under the deformation temperature of 960~1160 ℃, the strain rate of 0.001~10 s<sup>-1</sup> and the deformation degree of 50%. Then, based on the true stress-true strain data, phenomenological model and physical constitutive model were established to predict the flow behavior of alloy at high temperature. The results show that the flow stress of GH4698 alloy increases sharply at first and then becomes gentle gradually during the process of hot compression. The flow stress is negatively correlated with the deformation temperature and positively correlated with the strain rate. In the four constitutive models, the strain-compensated Arrhenius model has the highest prediction accuracy, and the improved Zerilli-Armstrong model has higher prediction accuracy than the modified Zerilli-Armstrong model.

**Key words:** GH4698 alloy; hot deformation behavior; constitutive models; flow stress; prediction accuracy

GH4698 合金为镍基时效硬化型高温合金, 因其优异的高温强度和良好的抗疲劳、抗蠕变、抗氧

化和抗腐蚀性能, 成为航空发动机热端部最佳的候选材料之一<sup>[1-2]</sup>。众所周知, 合金的力学性能与其热成形过程密不可分<sup>[3-4]</sup>, 在成形过程中材料受到复杂的应力、应变速率和温度的影响<sup>[5]</sup>。因此, 为优化材料的加工工艺, 了解和预测材料的热变形行为显得尤为重要。在此方面, 利用有限元模拟方法分析和优化材料成形过程, 已被广泛应用于锻造、轧制和挤压等众多成形方法中<sup>[6-7]</sup>。

对于数值模拟而言, 人们普遍认为材料本构模

收稿日期: 2023-07-30; 修订日期: 2023-11-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3706903, 2022YFB3706901);  
湖北省重点研发计划 (2022BAA024)

作者简介: 李中豪 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: M202171017@hust.edu.cn

通信作者: 黄 亮 (1981-), 男, 博士, 教授

E-mail: huangliang@hust.edu.cn

型的准确性决定着模拟结果的可靠性<sup>[8]</sup>。近年来,学者们提出了较多描述金属变形行为的本构模型,主要包括唯象型本构模型、物理基本本构模型和人工神经网络模型 3 类<sup>[9-10]</sup>。其中,Johnson-Cook (J-C)、Zerilli-Armstrong (ZA) 和 Arrhenius 模型因其形式较为简单,在数值模拟软件中得到了广泛的应用。

由 Sellars C M 和 McTegart W J<sup>[11]</sup>提出的 Arrhenius 模型经过多次修正后可以准确地预测材料的高温流动应力。白洁等<sup>[12]</sup>建立了基于 Arrhenius 模型的选区激光熔化 GH3536 高温合金的本构方程,结果表明,拟合值和实际值具有相同趋势,具有较好的拟合度。Slooff F A 等<sup>[13]</sup>通过将应变相关参数  $A_0$  引入方程,更好地预测了镁合金变形过程中的流动应力。章晓婷等<sup>[14]</sup>建立了应变补偿本构模型,并利用该模型成功地预测了 300M 高强钢的流动应力。

J-C 模型是为了描述大变形、高应变速率下的塑性流动行为提出的<sup>[15]</sup>,因其形式简单得到了广泛应用,但是,原始 J-C 模型未考虑温度、应变和应变速率之间的耦合效应对材料流动行为的影响,导致预测精度降低<sup>[16]</sup>。因此,考虑到材料变形过程中的绝热温升和应变速率敏感性的影响,很多学者对原始 J-C 模型进行了修正,已成功应用于不同温度和应变速率范围的材料中。王亮等<sup>[17]</sup>将应变率强化项和温度软化项与应变、应变速率和温度进行耦合,结果表明,修正的 J-C 模型较好地描述了 440C 不锈钢在高速冲击载荷下的流动应力。

Zerilli F J 和 Armstrong R W<sup>[18]</sup>发现不同结构的金属位错机制不同,提出了适用于 FCC 和 BCC 型材料的 ZA 本构模型,但因未考虑到变形过程中材料晶格转变,导致此模型局限性很大。众多学者对原 ZA 模型进行了修正,考虑了应变速率和温度的耦合,不用再去讨论金属的晶体结构,提高了模型的适应性<sup>[19]</sup>。Samantaray D 等<sup>[20]</sup>建立了考虑热软化、应变硬化以及温度、应变和应变速率对流动应力耦合影响的 m-ZA 模型,并准确地预测了 9Cr-1Mo 钢在高温下的流动应力。

本文分别建立了应变补偿的 Arrhenius 模型、修正的 Johnson-Cook 模型、修正的 Zerilli-Armstrong 模型和改良的 Zerilli-Armstrong 模型,用于预测 GH4698 合金的高温流动应力,并对模型的准确性进行了对比分析,为 GH4698 合金的热加工研究提供了可靠的数据支持和理论依据。

## 1 实验

实验用材料为锻态 GH4698 合金,主要化学成分如表 1 所示。通过机加工的方式将试样加工为  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  的圆柱试样,随后在 Gleeble-3500 热模拟实验机上实施等温恒应变速率热压缩实验。在试样的两端贴上石墨片以减小摩擦对实验的影响,热变形实验的变形温度选取 960、1010、1060、1110 和 1160  $^{\circ}\text{C}$ ,应变速率选取 0.001、0.01、0.1、1 和 10  $\text{s}^{-1}$ ,压缩程度设置为 50%。变形温度由焊接于试样轴线中心位置的热电偶测量得到。图 1 展示了详细的实验步骤,将试样以 10  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  的加热速率加热至变形温度,然后保温 3 min,获得尺寸均匀的晶粒。然后,按照预设的应变速率压缩试样,压缩完毕后立即喷水淬火,以保留变形组织。

表 1 GH4698 合金的化学成分 (%, 质量分数)  
Table 1 Chemical compositions of GH4698 alloy  
(%, mass fraction)

Cr	Mo	Al	Ti	Nb	Fe	C	Zr	Ni
14.4	2.98	1.68	2.61	2.07	0.1	0.05	0.04	余量

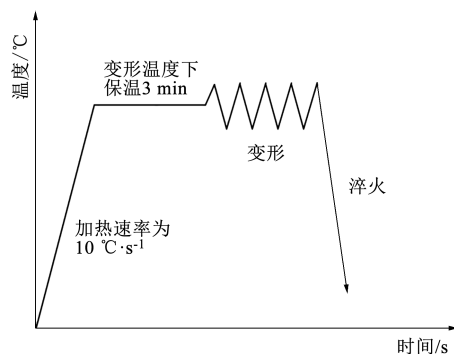


图 1 热压缩实验工艺方案

Fig. 1 Process scheme of hot compression experiment

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 流动应力行为分析

图 2 为 GH4698 合金在不同变形条件下的真应力-真应变曲线,其中  $\dot{\epsilon}$  为应变速率。从图 2 中可以看出,在变形的初始阶段,流动应力迅速增加至最大值,达到峰值应力后,流动应力随着应变的增加缓慢减小,最后保持稳定的趋势。这主要是因为:在变形初期,材料的加工硬化起主要作用,期间位

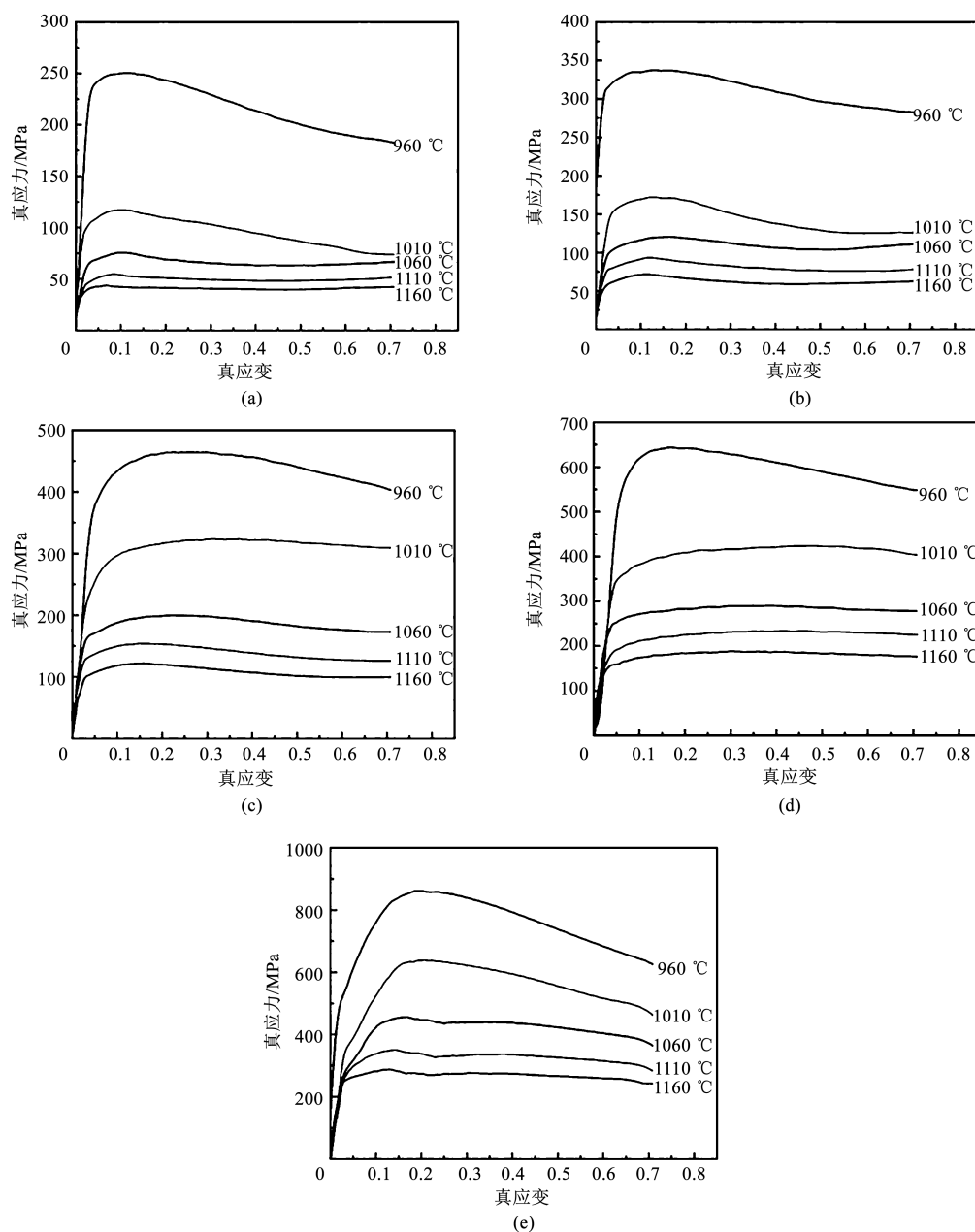


图2 不同变形条件下 GH4698 合金的真应力-真应变曲线

(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)  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$  (e)  $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$ 

Fig. 2 True stress-true strain curves for GH4698 alloy under different deformation conditions

错密度增加、位错胞状结构的大量出现导致变形抗力增加,流动应力增大。随着应变增加至材料的临界应变时,金属内部的畸变能达到阈值,在金属内部动态回复和动态再结晶等软化机制的作用下,材料的变形抗力减小,使得真应力-真应变曲线的斜率减小。最后,随着变形的继续,加工硬化和动态软化达到平衡,因此,流动应力曲线最终逐渐趋向于稳定<sup>[21]</sup>。

从图 2c 和图 2d 中可以看出,当应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为  $960 \sim 1010 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和应变速率为

$1 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为  $1010 \sim 1160 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, GH4698 合金的真应力-真应变曲线表现为动态回复型,不存在明显的应力峰值。在其他的变形条件下,材料的真应力-真应变曲线表现为不连续单峰动态再结晶型,存在应力峰值。

由图 2 可知,在不同的变形条件下, GH4698 合金的流动应力曲线形状是相似的。当应变速率一定时,变形温度和流动应力呈负相关,这主要是因为:随着变形温度的升高,原子扩散、晶界迁移速率加快,使得再结晶过程加剧,因此,流动应力随

着温度的升高而减小。当变形温度一定时, 应变速率和流动应力呈正相关, 高应变速率下变形时间短, 再结晶过程不完全, 加工硬化效果被放大, 因此, 高应变速率下流动应力较大。

## 2.2 本构方程建立

### 2.2.1 应变补偿的 Arrhenius 模型

由 2.1 节的分析结果可知, GH4698 合金的流动应力受变形温度和应变速率的影响较大, Arrhenius 方程作为应用最为广泛的本构方程, 描述了材料在变形时应力与应变速率和变形温度之间的关系, 其有 3 种具体的表达式<sup>[10,22]</sup>:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1}, \quad \alpha\sigma < 0.8 \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma), \quad \alpha\sigma > 1.2 \quad (2)$$

$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)]$ , 所有  $\sigma$  (3)  
式中:  $\sigma$  为流动应力, MPa;  $T$  为绝对温度, K;  $Q$  为热变形激活能, ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ );  $R$  为气体常数,  $R = 8.31 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A$ 、 $n_1$ 、 $n$ 、 $\alpha$  和

$\beta$  均为材料常数,  $\alpha = \beta/n_1$ 。

本文引入 Zener-Hollomon 参数 ( $Z$  参数) 描述热变形行为, 该参数描述了变形温度和应变速率对 GH4698 合金流动应力的综合影响, 可表示为<sup>[23]</sup>:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp[Q/(RT)] \quad (4)$$

对式 (1) 和式 (2) 取自然对数, 对于低应力和高应力水平, 可得:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma \quad (5)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma \quad (6)$$

将不同变形条件下真应力-真应变曲线的峰值应力  $\sigma_p$  及应变速率  $\dot{\varepsilon}$  带入式 (5) 和式 (6), 得到不同变形条件下的  $\ln \sigma_p - \ln \dot{\varepsilon}$  以及  $\sigma_p - \ln \dot{\varepsilon}$  的线性拟合关系图, 如图 3 所示。从而可以求得 GH4698 合金的  $n_1 = 5.548$ ,  $\beta = 0.254 \text{ MPa}^{-1}$ , 进而求出  $\alpha = 0.00458 \text{ MPa}^{-1}$ 。

对式 (3) 取自然对数, 可得:

$$\ln [\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{\ln \dot{\varepsilon}}{n} + \frac{Q}{nRT} - \frac{\ln A}{n} \quad (7)$$

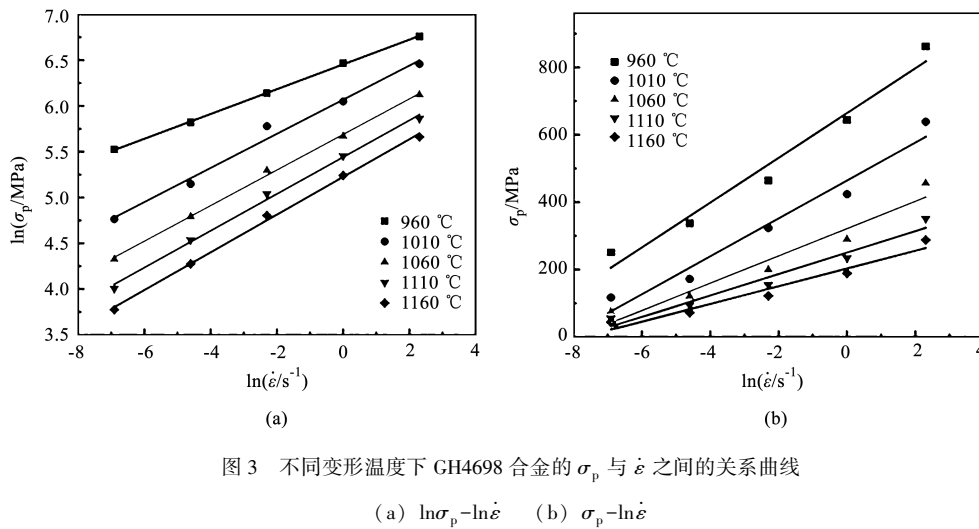


图 3 不同变形温度下 GH4698 合金的  $\sigma_p$  与  $\dot{\varepsilon}$  之间的关系曲线

(a)  $\ln \sigma_p - \ln \dot{\varepsilon}$  (b)  $\sigma_p - \ln \dot{\varepsilon}$

Fig. 3 Relationship curves between  $\sigma_p$  and  $\dot{\varepsilon}$  of GH4698 alloy at different deformation temperatures

如式 (7) 所示, 代入不同温度下真应力-真应变曲线的峰值应力  $\sigma_p$  与应变速率  $\dot{\varepsilon}$ , 得到不同温度下的  $\ln [\sinh(\alpha\sigma_p)] - \ln \dot{\varepsilon}$  关系图, 进而可以求得  $n$  的平均值为 3.7539, 如图 4a 所示。如图 4b 所示, 通过计算不同应变速率下  $\ln [\sinh(\alpha\sigma_p)] - 1000/T$  关系图的平均斜率, 可由式 (8) 计算得到热变形激活能  $Q$ , 其中式 (8) 由式 (7) 求偏导得到:

$$Q = Rn \left[ \frac{\partial \ln \sinh(\alpha\sigma)}{\partial \ln(1/T)} \right] \quad (8)$$

根据计算得到的  $n$  和  $Q$  值可以计算出  $A$  值。在上述研究中并未考虑应变对模型的影响, 但是

在实际过程中, 流动应力受应变的影响较大, 因此, 采用应变补偿的方法进一步提高模型的精度。

这里将材料常数对应变进行四次多项式拟合, 拟合结果如图 5 所示。

$$\alpha = 0.00555 - 0.01134\varepsilon + 0.04999\varepsilon^2 - 0.08001\varepsilon^3 + 0.04475\varepsilon^4 \quad (9)$$

$$n = 5.3914 - 18.5933\varepsilon + 67.1717\varepsilon^2 - 105.3176\varepsilon^3 + 61.1426\varepsilon^4 \quad (10)$$

$$Q = 657.957 - 602.892\varepsilon + 1634.099\varepsilon^2 - 2671.950\varepsilon^3 + 1778.559\varepsilon^4 \quad (11)$$

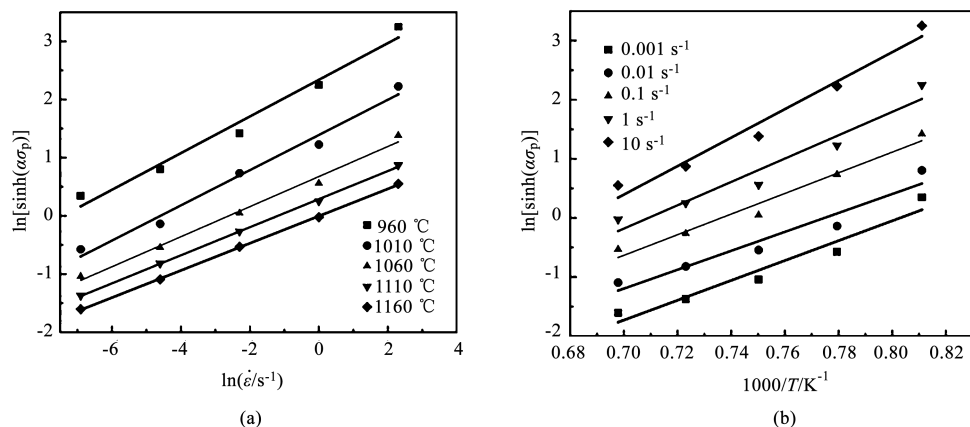


图4 GH4698 合金峰值应力与变形参数之间的关系曲线

(a)  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] - \ln\dot{\varepsilon}$  (b)  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] - 1000/T$ 

Fig. 4 Relationship curves between peak stress and deformation parameters of GH4698 alloy

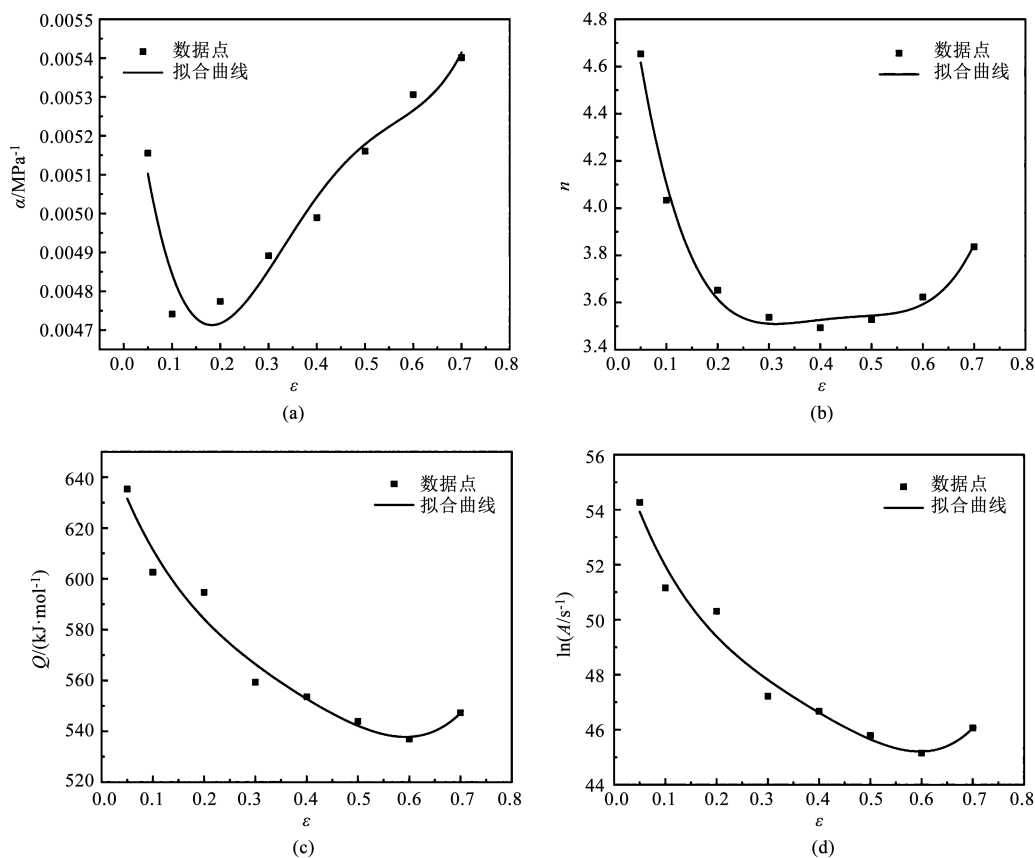


图5 材料常数的四阶拟合曲线

(a)  $\alpha - \varepsilon$  (b)  $n - \varepsilon$  (c)  $Q - \varepsilon$  (d)  $\ln A - \varepsilon$ 

Fig. 5 Fourth order fitting curves of material constants

$$\ln A = 56.572 - 61.102\varepsilon + 176.660\varepsilon^2 - 291.174\varepsilon^3 + 189.797\varepsilon^4 \quad (12)$$

式中:  $\varepsilon$  为真实应变。

基于以上得到的材料参数,可以得到 GH4698 合金应变补偿型的 Arrhenius 本构模型,如式 (13)

和式 (14) 所示:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha(\varepsilon)} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A(\varepsilon)} \right)^{\frac{1}{n(\varepsilon)}} + \left[ 1 + \left( \frac{Z}{A(\varepsilon)} \right)^{\frac{2}{n(\varepsilon)}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (13)$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp \left[ \frac{Q(\varepsilon)}{RT} \right] \quad (14)$$



### 2.2.2 修正的 Johnson-Cook 模型

原始的 Johnson-Cook (J-C) 模型可以表示为<sup>[23]</sup>:

$$\sigma = (D + B\varepsilon^e)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (15)$$

式中:  $D$  为参考状态下的屈服应力;  $B$  为应变硬化系数;  $e$  为应变硬化指数;  $\dot{\varepsilon}^*$  为无量纲的应变速率参数,  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ ;  $\dot{\varepsilon}$  和  $\dot{\varepsilon}_0$  分别为应变速率和参考应变速率;  $T^* = T - T_{\text{ref}}$ ,  $T$  和  $T_{\text{ref}}$  分别为绝对温度和参考温度;  $C$  为应变速率硬化系数;  $m$  为热软化指数<sup>[24]</sup>。

本研究中选择 1233 K 和  $0.001 \text{ s}^{-1}$  作为参考温度和参考应变速率用来确定材料常数。

原始的 J-C 模型中硬化参数和软化参数相互独立, 然而 GH4698 合金的软化行为与应变和应变速率有关, 应变速率硬化系数与应变相关<sup>[24]</sup>, 因此, 为了提高 J-C 模型对 GH4698 合金的预测精度, 引

入了修正的 J-C 模型, 该模型对应变硬化、应变速率硬化和热软化进行了修正:

$$\sigma = (D_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 + B_4\varepsilon^4 + B_5\varepsilon^5) \cdot (1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*) \exp[(\lambda_1 + \lambda_2\ln\dot{\varepsilon}^* + \lambda_3\ln\dot{\varepsilon}^{*2} + \lambda_4\ln\dot{\varepsilon}^{*3})T^*] \quad (16)$$

式中:  $D_1$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$ 、 $B_5$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  和  $\lambda_4$  为材料常数。

参考温度为 1233 K、参考应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  条件下, 式 (16) 可以表示为:

$$\sigma = D_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 + B_4\varepsilon^4 + B_5\varepsilon^5 \quad (17)$$

将参考状态下的应力、应变数据带入式 (17), 得到  $\sigma$  和  $\varepsilon$  之间的关系图, 并通过五阶多项式拟合, 拟合结果如图 6a 所示, 得到  $D_1$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  和  $B_5$  的值。

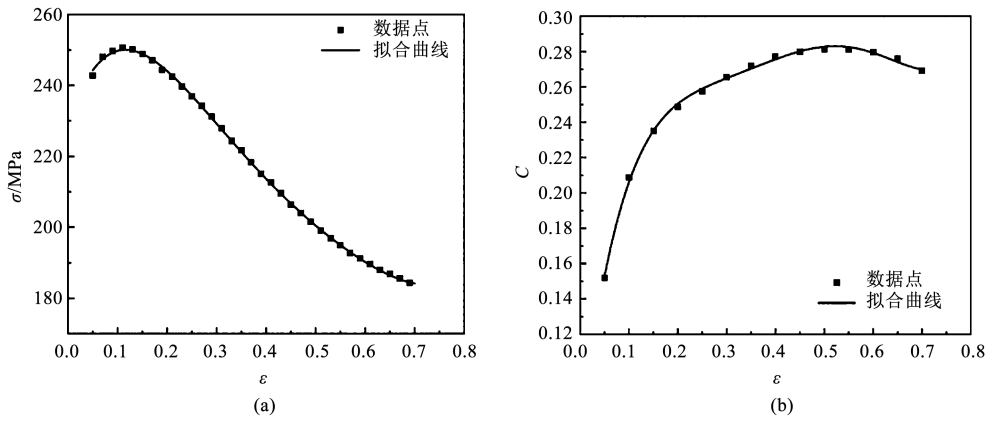


图 6 参考状态下不同参数之间的拟合曲线

(a)  $\sigma$ - $\varepsilon$  (b)  $C$ - $\varepsilon$

Fig. 6 Fitting curves between different parameters at reference state

当绝对温度为 1233 K 时, 式 (16) 可以写为:

$$\frac{\sigma}{D_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 + B_4\varepsilon^4 + B_5\varepsilon^5} = 1 + C\ln\dot{\varepsilon}^* \quad (18)$$

其中, 应变速率硬化指数  $C$  是与应变有关的参数, 在参考温度下, 当应变在 0.05~0.70 之间时, 可拟合出  $\sigma/(D_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 + B_4\varepsilon^4 + B_5\varepsilon^5)$  与  $\ln\dot{\varepsilon}^*$  之间的关系曲线, 从而求出不同应变下的  $C$  值。通过图 6b 可知, 五次多项式 ( $C = C_0 + C_1\varepsilon + C_2\varepsilon^2 + C_3\varepsilon^3 + C_4\varepsilon^4 + C_5\varepsilon^5$ , 其中  $C_0 \sim C_5$  为材料常数) 可以较好地拟合  $C$  和应变之间的关系。

当绝对温度为 1283 K 时, 式 (16) 可以写为:

$$\frac{\sigma}{(D_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 + B_4\varepsilon^4 + B_5\varepsilon^5)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)} = \exp(\lambda T^*) \quad (19)$$

式中:  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2\ln\dot{\varepsilon}^* + \lambda_3\ln\dot{\varepsilon}^{*2} + \lambda_4\ln\dot{\varepsilon}^{*3}$ 。

对式 (19) 取对数, 可得:

$$\ln\left[\frac{\sigma}{(D_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 + B_4\varepsilon^4 + B_5\varepsilon^5)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)}\right] = \lambda T^* \quad (20)$$

在不同应变速率下, 可得到不同应变时的  $\ln\{\sigma/[(D_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 + B_4\varepsilon^4 + B_5\varepsilon^5)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)]\}$  和  $T^*$  之间的关系图, 如图 7a 所示。基于线性拟合直线的斜率, 可以得到不同应变速率下的  $\lambda$  值。最后, 如图 7b 所示, 通过拟合  $\lambda$  与  $\ln\dot{\varepsilon}^*$  之间的关系图, 可以求得  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  和  $\lambda_4$  的值。

因此, 基于修正后的 J-C 模型的参数全部确定, 如表 2 所示。

### 2.2.3 修正的 Zerilli-Armstrong (m-ZA) 模型

m-ZA 模型<sup>[25]</sup>被广泛地应用于预测材料的热变形行为<sup>[26-27]</sup>, 其表示为:

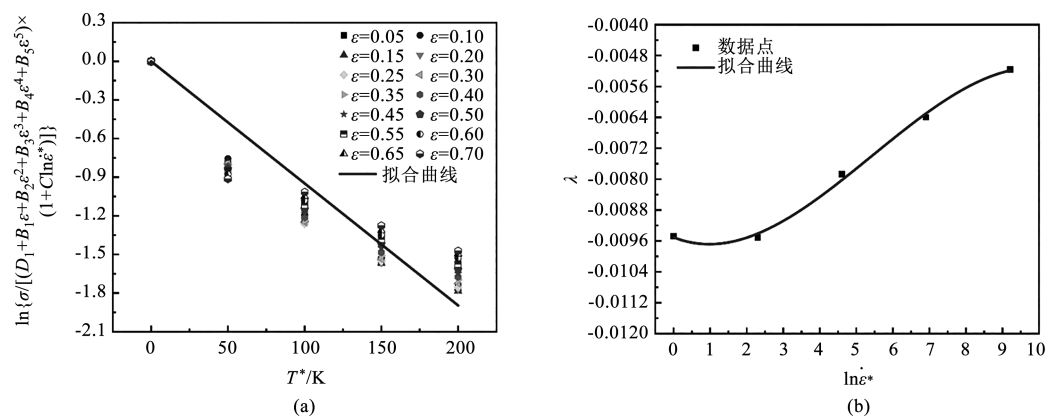


图 7 变形温度为 1273 K 时不同参数之间的拟合曲线  
(a)  $\ln\{\sigma/[(D_1+B_1\varepsilon+B_2\varepsilon^2+B_3\varepsilon^3+B_4\varepsilon^4+B_5\varepsilon^5)(1+C\ln\dot{\varepsilon}^*)]\}-T^*$  (b)  $\lambda-\ln\dot{\varepsilon}^*$   
Fig. 7 Fitting curves between different parameters at deformation temperature of 1273 K

表 2 GH4698 合金修正后的 J-C 模型参数  
Table 2 Parameters of modified J-C model for GH4698 alloy

参数	$D_1$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$C_0$	$C_1$
数值	229.35	419.04	-2673.8	5849.66	-6089	2541.05	0.062	2.33
参数	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$
数值	-11.37	28.38	-34.19	15.61	-0.0095	-0.0004	-0.0002	0.000013

$$\sigma = (X_1 + X_2\varepsilon^h)\exp[-(X_3 + X_4\varepsilon)T^* + (X_5 + X_6T^*)\ln\dot{\varepsilon}^*] \quad (21)$$

式中:  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$  和  $h$  为材料常数。  
选择 1283 K 和  $0.001\text{ s}^{-1}$  作为参考温度和参考应变速率, 当  $\dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_0=0.001\text{ s}^{-1}$  时, 式 (21) 可以写为:

$$\sigma = (X_1 + X_2\varepsilon^h)\exp[-(X_3 + X_4\varepsilon)T^*] \quad (22)$$

对式 (22) 两边取自然对数, 可得:

$$\ln\sigma = \ln(X_1 + X_2\varepsilon^h) - (X_3 + X_4\varepsilon)T^* \quad (23)$$

在参考应变速率下, 将实验温度和不同应变带入至式 (23), 得到  $\ln\sigma$  和  $T^*$  的关系曲线, 见图 8。

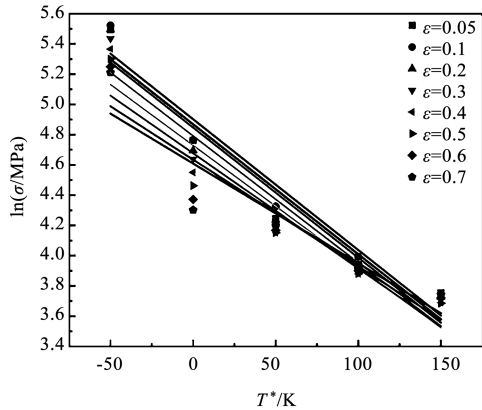


图 8 参考应变速率为  $0.001\text{ s}^{-1}$  下的  $\ln\sigma-T^*$  关系曲线  
Fig. 8 Relationship curves between  $\ln\sigma$  and  $T^*$  at reference strain rate of  $0.001\text{ s}^{-1}$

对图 8 中的数据进行线性拟合, 得到截距  $l_1$  和斜率  $S_1$  为:

$$l_1 = \ln(X_1 + X_2\varepsilon^h) \quad (24)$$

$$S_1 = -(X_3 + X_4\varepsilon) \quad (25)$$

对式 (24) 两边取自然对数, 可得:

$$\ln(\exp l_1 - X_1) = \ln X_2 + h \ln \varepsilon \quad (26)$$

根据参考温度和参考应变速率下的真应力-真应变曲线, 可得到此状态下的屈服应力即  $X_1$  值 ( $X_1 = 90\text{ MPa}$ )。将  $X_1$  代入到式 (26) 绘制  $\ln(\exp l_1 - X_1)$  和  $\ln\varepsilon$  的关系图, 如图 9a 所示, 通过拟合直线的斜率和截距可以求得  $h$  和  $X_2$  值。如图 9b 所示, 通过  $S_1$  和  $\varepsilon$  的线性拟合直线的斜率和截距可以求得  $X_3$  和  $X_4$  值, 其中  $R^2$  为决定系数。

最后, 对式 (21) 取自然对数, 可得:

$$\ln\sigma = \ln(X_1 + X_2\varepsilon^h) - (X_3 + X_4\varepsilon)T^* + (X_5 + X_6T^*)\ln\dot{\varepsilon}^* \quad (27)$$

将得到的  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  和  $h$  值代入式 (27), 对  $\ln\sigma$  和  $\ln\dot{\varepsilon}^*$  进行线性拟合, 拟合直线的斜率  $S_2$  可以表达为:

$$S_2 = X_5 + X_6T^* \quad (28)$$

这里有 8 个不同的真应变值, 因此, 可以得到 8 组不同的  $X_5$  和  $X_6$  值, 引入平均相对误差绝对值 AARE:

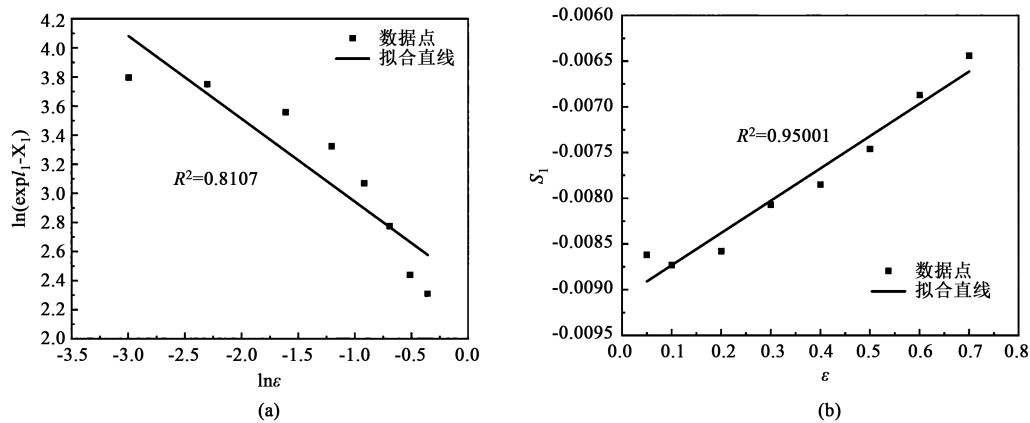


图 9 线性拟合关系图

(a)  $\ln(\exp I_1 - X_1) - \ln \varepsilon$  (b)  $S_1 - \varepsilon$ 

Fig. 9 Linear fitting relationship diagrams

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{P_i} \right| \times 100\% \quad (29)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  个数据的实验应力值;  $E_i$  为第  $i$  个数据的预测应力值,  $i=1, \dots, N$ ;  $N$  为统计的数据总量。

通过式 (29) 计算不同  $X_5$  和  $X_6$  值下实验数据和预测值之间的平均相对误差绝对值, 计算数据如表 3 所示, 从表 3 中可以看出, 当应变取 0.6 时, 平均相对误差绝对值最小, 故描述 GH4698 合金热变形行为的修正的 Zerilli-Armstrong (m-ZA) 模型, 如式 (30) 所示:

$$\sigma = (90 + 10.74\varepsilon^{-0.5698}) \exp[-(0.0091 - 0.0035)T^* + (0.18098 + 2.48 \times 10^{-4}T^*) \ln \dot{\varepsilon}^*] \quad (30)$$

表 3 不同应变 m-ZA 模型的平均相对误差绝对值 (%)

Table 3 Average absolute relative error of m-ZA model under different strains (%)

应变	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70
误差	10.9	11.3	13.8	13.9	14.4	9.2	7.64	9.01

利用构建的 m-ZA 模型, 预测了 GH4698 合金在不同变形条件下的流动应力。虽然构建的模型整体相关性较好, 但是在某些数据点偏离参考线较多, 相对误差较大, 因此, 有必要对构建的模型进行进一步的改良。

#### 2.2.4 改良的 Zerilli-Armstrong (I-ZA) 模型

如前所述, m-ZA 模型在预测 GH4698 合金热变形行为时尚存在一些缺陷。在 m-ZA 模型中, 应变硬化效应通过幂函数的形式 (式 (21) 中的第 1 项) 表达, 但是通过图 9a 可以看出,  $\ln(\exp I_1 - X_1)$  和  $\ln \varepsilon$  之间的决定系数仅为 0.8107, 表明幂函数的形式不适

用于描述 GH4698 合金的应变硬化效应。同样, 式 (21) 中的第 2 项为线性函数, 从图 9b 中可以看出, 线性拟合不适用于描述  $S_1$  和  $\varepsilon$  之间的关系, 在求解  $X_5$  和  $X_6$  值时可知, 这两个参数是随着应变变化的参数, 但是, 在上述建立过程中并未考虑应变对参数  $X_5$  和  $X_6$  的影响。为了克服上述的不足, 提出一种改良的 Zerilli-Armstrong (I-ZA) 模型, 其表达式如下:

$$\sigma = (Y_0 + Y_1\varepsilon + Y_2\varepsilon^2 + Y_3\varepsilon^3) \exp[-(W_0 + W_1\varepsilon + W_2\varepsilon^2 + W_3\varepsilon^3)T^* + ((W_5 + W_6T^*) \ln \dot{\varepsilon}^*)] \quad (31)$$

式中:  $W_5 = a_0 + a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2 + a_3\varepsilon^3 + a_4\varepsilon^4 + a_5\varepsilon^5$ ;  $W_6 = b_0 + b_1\varepsilon + b_2\varepsilon^2 + b_3\varepsilon^3 + b_4\varepsilon^4 + b_5\varepsilon^5$ ;  $Y_0$ 、 $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ 、 $W_0$ 、 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$ 、 $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$ 、 $b_5$  为材料常数。

从式 (31) 中可以看出, 式 (31) 中的第 1 项和第 2 项均表示为三阶多项式, 且  $W_5$  和  $W_6$  也均和应变进行了耦合。根据式 (24) 和式 (25) 计算结果可知, 在参考应变速率下,  $\ln \sigma$  和  $T^*$  拟合直线的截距  $I_1$  和斜率  $G_1$  可以进一步表示为:

$$I_1 = \ln(Y_0 + Y_1\varepsilon + Y_2\varepsilon^2 + Y_3\varepsilon^3) \quad (32)$$

$$G_1 = -(W_0 + W_1\varepsilon + W_2\varepsilon^2 + W_3\varepsilon^3) \quad (33)$$

式 (32) 可以被改写为:

$$\exp I_1 = Y_0 + Y_1\varepsilon + Y_2\varepsilon^2 + Y_3\varepsilon^3 \quad (34)$$

对  $\exp I_1$  与  $\varepsilon$  进行三阶多项式拟合得到  $Y_0$ 、 $Y_1$ 、 $Y_2$  和  $Y_3$  值; 对  $G_1$  和  $\varepsilon$  进行三阶多项式拟合得到  $W_0$ 、 $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_3$  值; 再将  $W_5$  和  $W_6$  分别通过五阶多项式和应变进行拟合, 拟合结果分别如图 10a、图 10b 和图 10c 所示。

基于改良的 Zerilli-Armstrong (I-ZA) 模型的参数如表 4 所示。



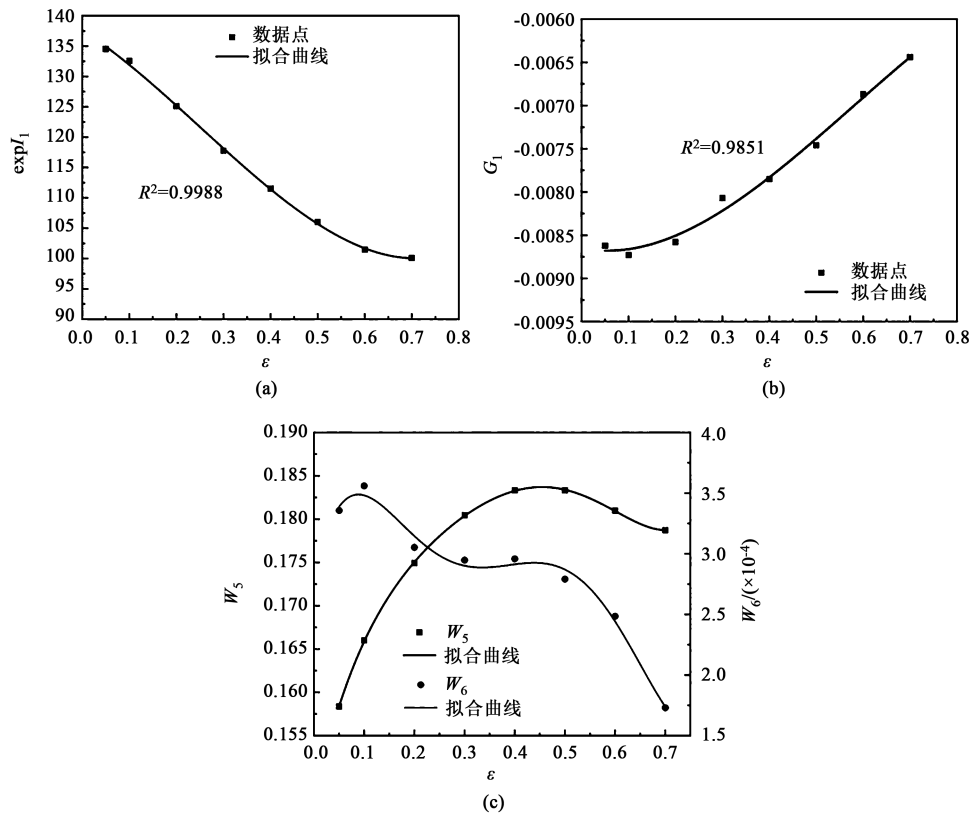


图 10 I-ZA 模型不同参数的拟合曲线  
(a)  $\exp I_1-\epsilon$  (b)  $G_1-\epsilon$  (c)  $W_5/W_6-\epsilon$

Fig. 10 Fitting curves between different parameters in I-ZA model

表 4 GH4698 合金的改良 Zerilli-Armstrong 模型参数  
Table 4 Parameters of improved Zerilli-Armstrong model for GH4698 alloy

参数	$Y_0$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$a_0$	$a_1$
数值	137.61	-49.49	-85.22	113.25	-0.0087	-0.0011	0.0101	-0.0058	0.148	0.261
参数	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
数值	-0.997	2.517	-3.482	1.843	0.00028	0.00187	-0.0168	0.0552	-0.0773	0.0383

3 4 种本构模型的比较

本文采用相关系数来评估所建立的 GH4698 合金本构模型的准确性, 相关系数  $R$  值可以用来描述实验数据与预测数据之间的线性关系, 可采用式 (35) 计算<sup>[28]</sup>:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{exp}}^i - \bar{\sigma}_{\text{exp}})(\sigma_{\text{p}}^i - \bar{\sigma}_{\text{p}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{exp}}^i - \bar{\sigma}_{\text{exp}})^2 \sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{p}}^i - \bar{\sigma}_{\text{p}})^2}} \quad (35)$$

式中:  $\sigma_{\text{exp}}^i$  为第  $i$  个实验应力;  $\sigma_{\text{p}}^i$  为第  $i$  个预测应力;  $\bar{\sigma}_{\text{exp}}$  和  $\bar{\sigma}_{\text{p}}$  分别为  $\sigma_{\text{exp}}^i$  和  $\sigma_{\text{p}}^i$  的平均值;  $N$  为统

计的数据总量, 本文中  $N=1000$ 。

将实验数据和预测数据代入至式 (35), 结果如图 11 所示, 应变补偿的 Arrhenius 模型、修正的 Johnson-Cook 模型、修正的 Zerilli-Armstrong 模型以及改良的 Zerilli-Armstrong 模型的决定系数分别为 0.99297、0.99030、0.98846 和 0.99074, 经过对比可知所建立的模型相关性均很高<sup>[12,29-31]</sup>。

如图 11 所示, 应变补偿的 Arrhenius 模型、修正的 Johnson-Cook 模型、修正的 Zerilli-Armstrong 模型以及改良的 Zerilli-Armstrong 模型的平均相对误差绝对值分别为 4.69%、6.02%、7.64% 和 5.49%, 经过对比分析可知模型的平均相对误差绝对值均较小<sup>[12,29-31]</sup>。

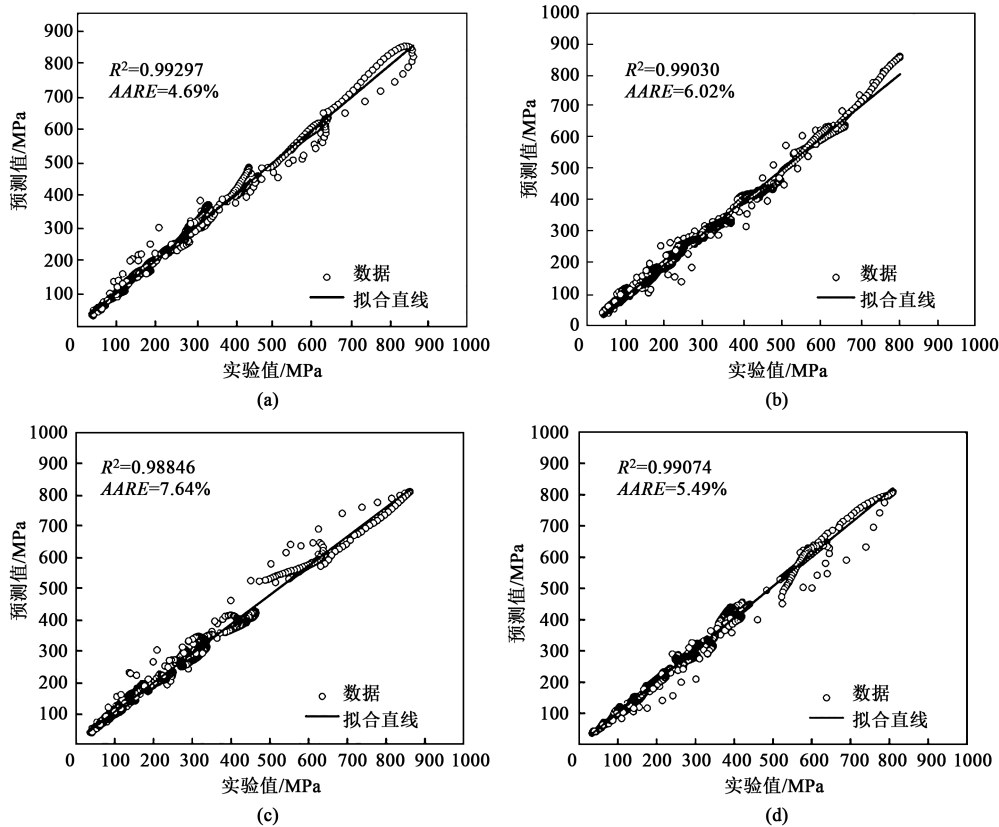


图 11 实验与预测流动应力的相关性

(a) 应变补偿的 Arrhenius 模型 (b) 修正的 Johnson-Cook 模型 (c) 修正的 Zerilli-Armstrong 模型 (d) 改良的 Zerilli-Armstrong 模型

Fig. 11 Correlation of flow stress between experiment and prediction

(a) Strain compensated Arrhenius model (b) Modified Johnson-Cook model (c) Modified Zerilli-Armstrong model (d) Improved Zerilli-Armstrong model

通过对比可知,应变补偿的 Arrhenius 模型的决定系数是最大的但平均相对误差绝对值是最小的,这表明耦合了应变的 Arrhenius 模型对 GH4698 合金的流动应力的预测精度最高。在构建的 4 个本构模型中, m-ZA 模型包含 7 个材料常数,修正的 J-C 模型包含 16 个材料常数,应变补偿的 Arrhenius 模型和 I-ZA 模型均包含 20 个材料常数。一般本构模型的材料常数数量和计算时间与模型的预测精度呈正相关<sup>[32]</sup>。m-ZA 模型最容易建立故预测精度较低, I-ZA 模型和应变补偿的 Arrhenius 模型有相同数量的材料常数,故所需计算时间相当,模型的精度也更高。

修正的 J-C 模型考虑了不同加工参数之间的耦合效应,因此,极大地改善了原始 J-C 模型的不足,获得了较高的准确度,修正的 J-C 模型包含 16 个材料常数,计算时间要少于 I-ZA 模型和应变补偿的 Arrhenius 模型。在本文中, m-ZA 模型(式(21))的应变硬化效应表示为幂函数,应变-温度耦合效应为线性函数,应变速率-温度耦合效应未考虑应变的影响,因此,导致此模型不能较好地描

述 GH4698 合金的热变形行为, I-ZA 模型克服了上述缺点,使模型的预测精度更高。

## 4 结论

(1) GH4698 合金在变形开始后应力急剧增大至峰值应力,随着加工硬化和动态软化效应达到平衡,流动应力逐渐达到稳态,其流动应力值与温度呈负相关,与应变速率呈正相关。

(2) 通过不同变形条件下的真应力-真应变曲线,建立了应变补偿的 Arrhenius 模型、修正的 Johnson-Cook 模型、修正的 Zerilli-Armstrong 模型以及改良的 Zerilli-Armstrong 模型, I-ZA 模型和应变补偿的 Arrhenius 模型所需计算时间相当,均能较为准确地预测 GH4698 合金的流动行为,修正的 J-C 模型材料常数和计算时间要少于 I-ZA 模型和应变补偿的 Arrhenius 模型,模型精度也略低于两者。

(3) 应变补偿的 Arrhenius 模型、修正的 Johnson-Cook 模型、修正的 Zerilli-Armstrong 模型和改良

的 Zerilli-Armstrong 模型的决定系数分别为 0.99297、0.99030、0.98846 和 0.99074, 平均相对误差绝对值分别为 4.69%、6.02%、7.64% 和 5.49%, 进一步证明了应变补偿型 Arrhenius 模型预测精度最高。

(4) I-ZA 模型相比较于 m-ZA 模型相关系数从 0.98846 提高至 0.99074, 平均相对误差绝对值从 7.64% 减小至 5.49%, 表明 I-ZA 模型预测精度更高。

#### 参考文献:

- [1] Chen X M, Ning M T, Hu H W, et al. Characterization of hot deformation behavior and optimization of hot workability for GH4698 superalloy [J]. *Materials Characterization*, 2023, 201: 112916.
- [2] Yan P Z, Wen D X, Yang L, et al. Evolution of microstructure and  $\delta$  phase in an aging-treated nickel-based superalloy during hot compression [J]. *Materials Characterization*, 2023, 200: 112876.
- [3] Zhao M J, Huang L, Li C M, et al. Evaluation of the deformation behaviors and hot workability of a high-strength low-alloy steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 810: 141031.
- [4] Huang L, Li C M, Li C L, et al. Research progress on microstructure evolution and hot processing maps of high strength  $\beta$  titanium alloys during hot deformation [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32 (12): 3835–3859.
- [5] 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.
- [6] 刘剑箫, 翟月雯, 姜超, 等. 真空固溶态 FGH4096 高温合金的热变形行为及本构模型 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (5): 306–313.  
Liu J X, Zhai Y W, Jiang C, et al. Thermal deformation behavior and constitutive equation on superalloy FGH4096 in vacuum solid solution state [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (5): 306–313.
- [7] 杨波, 吴诗豪, 包振男, 等. GH3128 合金热变形行为与唯象本构模型 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (5): 226–234.  
Yang B, Wu S H, Bao Z N, et al. Thermal deformation behavior and phenomenological constitutive model for GH3128 alloy [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (5): 226–234.
- [8] He D G, Yan X T, Lin Y C, et al. Microstructure evolution and constitutive model for a Ni-Mo-Cr base alloy in double-stages hot compression with step-strain rates [J]. *Materials Characterization*, 2022, 194: 112385.
- [9] Li C M, Huang L, Zhao M J, et al. Influence of hot deformation on dynamic recrystallization behavior of 300M steel: Rules and modeling [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 797: 139925.
- [10] Zeng R, Huang L, Li J J, et al. Quantification of multiple softening processes occurring during multi-stage thermoforming of high-strength steel [J]. *International Journal of Plasticity*, 2019, 120: 64–87.
- [11] Sellar C M, McTegart W J. On the mechanism of hot deformation [J]. *Acta Metallurgica*, 1966, 14 (9): 1136–1138.
- [12] 白洁, 马瑞, 王亚军, 等. 选区激光熔化 GH3536 高温合金高温本构模型 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (7): 234–241.  
Bai J, Ma R, Wang Y J, et al. High temperature constitutive model for superalloy GH3536 by selective laser melting [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (7): 234–241.
- [13] Slooff F A, Zhou J, Duszczek J. Constitutive analysis of wrought magnesium alloy Mg-Al4-Zn1 [J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57 (8): 759–762.
- [14] 章晓婷, 黄亮, 李建军, 等. 300M 高强度钢高温流变行为及本构方程 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2017, 48 (6): 1439–1447.  
Zhang X T, Huang L, Li J J, et al. Flow behaviors and constitutive model of 300M high strength steel at elevated temperature [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2017, 48 (6): 1439–1447.
- [15] Chen X R, Liao Q Y, Niu Y X, et al. A constitutive relation of AZ80 magnesium alloy during hot deformation based on Arrhenius and Johnson-Cook model [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8 (2): 1859–1869.
- [16] Lin Y C, Chen X M, Liu G. A modified Johnson-Cook model for tensile behaviors of typical high-strength alloy steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527 (26): 6980–6986.
- [17] 王亮, 贾海深, 张继林, 等. 基于 J-C 模型 440C 不锈钢动态本构关系的修正 [J]. *机械强度*, 2023, 45 (4): 805–813.  
Wang L, Jia H S, Zhang J L, et al. Modification of dynamic constitutive relation of 440C stainless steel based on J-C model [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2023, 45 (4): 805–813.
- [18] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61 (5): 1816–1825.
- [19] Nitin K, Hansoge N K, Pavan P, et al. Microstructure study and constitutive modeling of Ti-6Al-4V alloy at elevated temperatures [J]. *Materials & Design*, 2014, 54: 96–103.
- [20] Samantaray D, Mandal S, Bhaduri A K. Analysis and mathematical modelling of elevated temperature flow behaviour of austenitic stainless steels [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528: 1937–1943.
- [21] Li C M, Huang L, Zhao M J, et al. Study on microstructure evolution and deformation mechanism of Ti-6554 based on power dissipation efficiency at supertransus temperatures [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 924: 166481.
- [22] Li C M, Huang L, Zhao M J, et al. Hot deformation behavior and mechanism of a new metastable  $\beta$  titanium alloy Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al in single phase region [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 814: 141231.
- [23] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 15 (1): 22–32.

- [24] Chao Z L, Jiang L T, Chen G Q, et al. A modified Johnson-Cook model with damage degradation for  $B_4C_p/Al$  composites [J]. Composite Structures, 2022, 282 (15): 115029.
- [25] Samantary D, Mandal S, Borah U. 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: 1-6.
- [26] He A, Xie G L, Zhang H L, et al. A comparative study on Johnson-Cook, modified Johnson-Cook and Arrhenius-type constitutive models to predict the high temperature flow stress in 20CrMo alloy steel [J]. Materials & Design, 2013, 52: 677-685.
- [27] Zhan H Y, Wang G, Kent D, et al. Constitutive modelling of the flow behaviour of a  $\beta$  titanium alloy at high strain rates and elevated temperatures using the Johnson-Cook and modified Zerilli-Armstrong models [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 612: 71-79.
- [28] Li H Y, Li Y H, Wang X F, et al. A comparative study on modified Johnson Cook, modified Zerilli-Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict the hot deformation behavior in 28CrMnMoV steel [J]. Materials & Design, 2013, 49: 493-501.
- [29] 郭淑玲. 热加工历程对 GH4698 显微组织的影响 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- Guo S L. Effect of Hot Working Process on Microstructure of GH4698 [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [30] 胡超. GH4698 镍基高温合金热塑性变形行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Hu C. Research on Hot Plastic Deformation Behavior of GH4698 Nickel-based Superalloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [31] 景阳端. GH4698 涡轮盘等温锻造过程中晶粒演化行为及其数值模拟 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- Jing Y D. The Behavior of Grain Evolution and Its Numerical Simulation During Isothermal Forging of GH4698 Turbine Disk [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [32] Li F, Zhu C C, Li S J, et al. A comparative study on modified and optimized Zerilli-Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict the hot deformation behavior in 30Si2MnCrMoVE steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 3918-3929.

## 《锻压技术》杂志征稿简则

### 1 征稿范围

《锻压技术》(月刊)于 1958 年创刊,由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会共同主办,是学会会刊。《锻压技术》是全国中文核心期刊,被以下检索系统收录:中文核心期刊要目总览(北京大学)、中国科学引文数据库(CSCD)、中国科技期刊引证报告(核心版, CJKR)、中国学术期刊文摘数据库(核心版, CSAD-C)、中国学术期刊文摘数据库(英文版)、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊(光盘版)、中国知网、万方数字化期刊群、RCCSE 中国核心学术期刊、美国剑桥科学文摘(CSA)、美国化学文摘(CA)、日本科学技术振兴机构数据库(JST)、俄罗斯文摘杂志(AJ)等。

《锻压技术》主要报道金属塑性成形理论、工艺与装备,模具设计与制造技术、材料与成形性能、工业加热技术及设备、摩擦与润滑、测试技术、计算机应用、标准等方面的科研成果、实验研究、现场经验、技术革新等,同时,还辟有综合评述、专题讲座及行业信息等栏目。

### 2 来稿格式及要求

(1) 摘要选用小 5 号字,正文选用 5 号字,单倍行距;页面设置选用 A4 纸,上下左右页边距均选用 2 cm。

(2) 格式(按下列顺序排列,要求内容齐全)

● 论文的中文题目(不超过 30 字)、作者姓名、单位的全称(应包括院、系、科室等二级单位)、省名、城市名、邮政编码。

● 中文摘要:约 300 字,主要表达文章中有创新意义的内容,应含有研究目的、过程和方法、结果、结论 4 个层次;摘要中不要重复题目中已经表述过的信息,也不使用评论性语言。

● 中文关键词(5 个以上),中图分类号 1~2 个(参见《中国图书馆分类法(第四版)》一书)。

● 论文的英文题目、作者姓名(如 Zhang Yahong)、单位的全称(不得用缩写,应包括院、系、科室等二级单位)、城市名、邮政编码、国家名。

● 英文摘要:务必与中文摘要完全对应;摘要中涉及文章研究、阐述、设计、试验等内容时宜选用过去时、被动语态撰写(例如: A die was designed……),结果、结论宜选用一般现在时撰写(例如: The results show that……),不要使用“ The paper studies……”或“ The author studies……”这类语句。

● 英文关键词(5 个以上),要求与中文关键词完全对应。

● 首页页脚需注明以下内容:

收稿日期:年-月-日(例如: 2007-01-01);修订日期:此项可空缺,由编辑部填写

基金项目:省部以上基金资助项目及批准号(此项非常重要,请勿遗漏)

作者简介:第一作者姓名(出生年—),性别,学位,职称

E-mail: xx@xx

通讯作者:姓名(出生年—),性别,学位,职称(第一作者不是通讯作者时,请增加此项。)

E-mail: xx@xx

● 正文的“引言”部分不编号,亦不列出“引言”二字,直接陈述即可;一级标题用“1, 2, ……”排序;二级标题用“1.1, 1.2, ……”, 2.1, 2.2, ……排序;三级标题用“1.1.1, 1.1.2, ……”排序。

● 图片、表格、公式、定理等的序号均要按其 在正文中引用、的顺序,分别用阿拉伯数字顺序编码,例如:图 1、图 2……,表 1、表 2……。

● 图片、表格应随文给出,先见文后见图、表。

● 图题(包括(a)、(b)等分图题)、表题要求同时用中、英文标注。

● 照片或灰度图应反差适当,鲜明可见;金相照片放大倍数均用比例尺表示,如  $5\mu\text{m}$ 。

(下转第 229 页)