

铸态 GH4169 合金热变形行为及三种本构模型对比

张兵^{1,3}, 岳磊^{1,3}, 陈韩锋², 张志娟^{1,3}, 刘鹏茹^{1,3}, 赵芬芬^{1,3}

(1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

(2. 金川集团股份有限公司 镍钴资源综合利用国家重点实验室, 甘肃 金昌 737100)

(3. 功能材料加工国家地方联合工程研究中心, 陕西 西安 710055)

摘要: 在 Gleeble-1500 热力模拟机上对铸态 GH4169 合金进行热压缩试验, 变形参数为: 温度(1193~1373 K)、应变速率(0.01~10 s⁻¹)、变形量 50%。通过分析真应力真应变曲线, 研究铸态 GH4169 合金的热变形行为; 对比分析了 Johnson-Cook (JC)、修正的 Johnson-Cook (MJC)和应变补偿 Arrhenius 3 种本构模型的相关系数(*R*)和平均相对误差(AARE)。结果表明: 铸态 GH4169 合金的流变应力随变形温度的升高和应变速率的降低而减小。JC 模型、MJC 模型和应变补偿的 Arrhenius 本构模型的相关系数(*R*)分别为 0.891、0.956 和 0.961, AARE 依次为 29.02%、11.16%和 9.31%。因此, 应变补偿的 Arrhenius 模型能够更为精确地描述铸态 GH4169 的热变形行为。

关键词: 铸态 GH4169; 热变形行为; 本构模型

中图分类号: TG146.1⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)01-0212-11

GH4169 合金是一种以体心四方 Ni₃Nb(γ'')和面心立方 Ni₃(Al, Ti, Nb)(γ')析出强化的镍-铬-铁基变形高温合金, 在-253~650 °C 条件下具有良好的综合力学性能以及优异的抗疲劳、耐腐蚀性能, 是大量应用于航空、航天、石油化工及核能等领域的关键材料^[1-3]。但由于该合金在热加工过程中变形抗力较大, 对加工工艺极其敏感, 因此, 研究 GH4169 的热变形行为以指导实际生产加工很有必要。

本构方程用于描述流变应力与应变、应变速率和温度之间的关系, 可用于热变形行为的研究。目前, 本构模型主要分为唯象型^[4-6]、人工神经网络型^[7,8]及物理基型^[9,10]。其中, 唯象模型因需要参数较少, 更容易建立, 被众多学者接受并应用。具有代表性的唯象模型有 Arrhenius^[11,12]和 Johnson-Cook^[13,14](JC)等。陈前^[15]等人采用 Arrhenius 本构模型研究了 δ 相时效态 GH4169 合金锻件热压缩变形行为, 结果表明其预测数据与摩擦修正数据基本相符, 相关系数为 0.995 67, 平均相对误差绝对值为 4.0106%。Wang^[16]等人利用含 *Z* 参数的 Arrhenius 本构模型研究了锻态 Inconel 718 合金在 950~1100 °C 范围内的热压缩流变行为, 发现动态再结晶晶粒尺寸与 *Z* 参数成反比。韦家虎^[17]等人利用 Gleeble-1500 热模拟试验机研究了 GH4169 合金热轧棒材的高温变形行为并建立了流变应力模型, 结

果发现随着变形温度的降低和应变速率的增加, 合金变形抗力显著增加。Wang^[18]等人利用 SHPB 压杆试验, 获得了锻态 Inconel 718 合金在高应变速率(5000~11 000 s⁻¹)和高温(500~800 °C)下的动态变形行为并建立了修正的 Johnson-Cook 模型, 结果表明修正的 Johnson-Cook 模型具有较高的精度。目前, 关于 GH4169 合金热变形行为及本构模型的研究大多集中在锻态、轧态、固溶和时效态组织上, 而铸态组织中存在成分不均匀和严重偏析等缺陷, 因此借助于热模拟试验研究其热变形行为和本构模型, 进而确定合适的锻造工艺参数对合金成型很关键。

本工作采用 Gleeble-1500 热力模拟机进行热压缩试验, 分析铸态 GH4169 合金热变形行为, 并利用 Johnson-Cook、修正的 Johnson-Cook 和应变补偿的 Arrhenius 3 种本构模型对合金高温流变应力进行预测, 通过相关系数(*R*)和平均相对误差(AARE)对比了 3 种模型的精度, 为该合金实际锻造加工过程提供一定的理论参考, 同时也为有限元法模拟提供相关数据。

1 实验

材料选用真空感应+电渣重熔冶炼工艺制备的 GH4169 合金铸锭。其化学成分及原始组织分别见表 1 与图 1。

收稿日期: 2020-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(51874226); 镍钴资源综合利用国家重点实验室开放课题(301170504)

作者简介: 张兵, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055, E-mail: r.zhang1112@163.com

图 1 为 GH4169 合金铸态的显微组织。由图可见，该合金存在大量的枝晶，由于成分偏析，枝晶间（黑色区域）存在大量亮白色块状 Laves 相。为保证组织的均匀性，采用线切割将铸锭沿 1/2 半径处切下 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的标准圆柱体试样，如图 2 所示。

对试样进行均匀化处理，在 Gleeble-1500 热模拟机上进行高温压缩试验。为减小变形过程中的摩擦，将试样两端打磨光滑，用金属钼片进行润滑，并加入

石墨润滑剂。同时，通入氩气以防止试样氧化。根据合金的锻压成形温度和变形速率，确定压缩试验工艺如下：变形温度：1193，1223，1253，1283，1313，1343，1373 K；应变速率：0.01，0.1，1.0，10.0 s^{-1} ；变形量：50%；加热速度：283 K/s。到达试验温度后保温 3 min 使试样的温度分布均匀，待压缩过程结束后，立即进行水淬以保持高温组织。具体实验工艺如图 3 所示。

表 1 GH4169 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of GH4169 alloy ($\omega/\%$)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Al	Ti	B	Mo	Nb	Fe
0.027	0.04	0.08	0.004	0.002	18.71	52.85	0.46	0.96	0.0092	3.04	5.07	Bal.

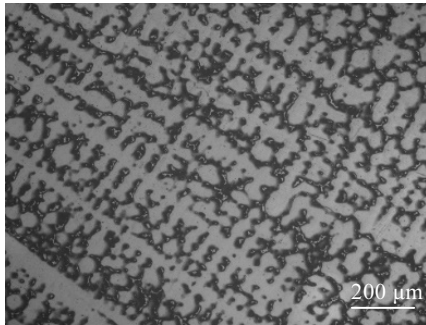


图 1 GH4169 合金铸态的显微组织

Fig.1 Microstructure of as-cast GH4169 alloy

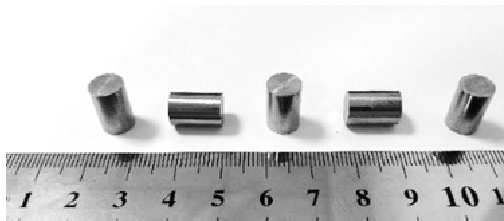


图 2 GH4169 标准热压缩试样

Fig.2 Standard thermal compression specimens of GH4169

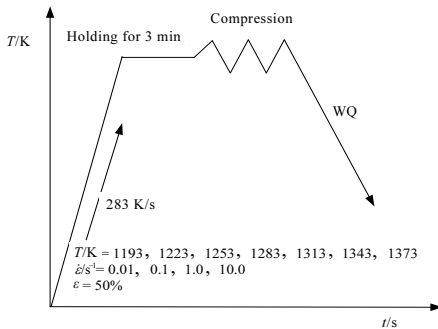


图 3 单道次压缩实验工艺图

Fig.3 Schematic diagram of single-pass compression experiment

2 结果和讨论

2.1 应力-应变曲线分析

图 4 为铸态 GH4169 合金在应变速率分别为 0.01、0.1、1、10 s^{-1} 时的真应力-真应变曲线。由图 4 可知，温度、应变速率和应变都对铸态 GH4169 流变应力产生较大影响。温度提高，应变速率降低，铸态 GH4169 的流变应力减小，表明 GH4169 合金是一种应变速率敏感型和热敏感型材料^[19]。

合金的变形过程主要分为 3 个阶段，第 1 阶段是加工硬化阶段，因位错密度增加所产生的应变硬化占据主导地位^[20]，应变增加伴随着流变应力急剧上升。第 2 阶段是过渡阶段，动态再结晶引起的软化与加工硬化相互竞争直到二者达到平衡。随着应变的增加，流变应力上升速度放缓，直至达到峰值。第 3 阶段是软化阶段，因动态再结晶引起的软化占主导。从图 4a~4c 可看出，当应变速率为 0.01、0.1、1 s^{-1} 时，同一温度下，随应变增加，流变应力均逐渐减小并趋于稳定。而在高应变速率(10 s^{-1})下，流变应力只存在峰值而没有稳态应力出现。这 2 种不同变化趋势的曲线反映了该材料在不同应变速率的热变形过程中发生了不同程度的动态再结晶^[21]。

图 5 为变形条件为 1373 K，10 s^{-1} 的显微组织。从图中可以看出，合金内部发生了一定程度的动态再结晶。圆柱形试样在压缩过程中，侧面产生了 45°切向的裂纹，这是由于大应变速率下，局部塑性变形导致温度升高，且来不及传导给低温区域，使得该区域的强度降低发生塑性变形，沿晶界产生微裂纹，说明合金发生了失稳，该区间不利于加工。

2.2 Johnson-Cook 模型

Johnson-Cook 模型如下：

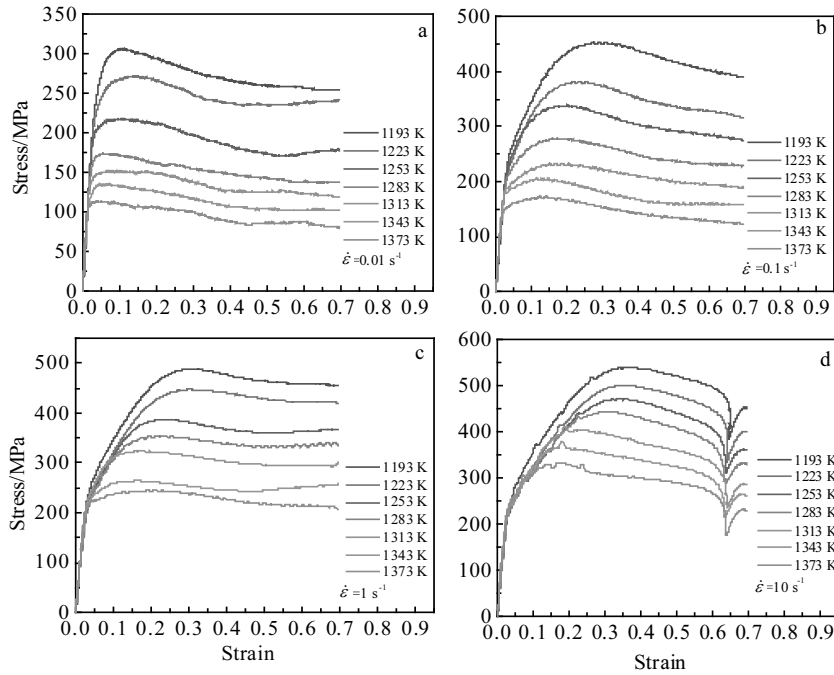


图 4 铸态 GH4169 合金真应力-真应变曲线

Fig.4 True stress-true strain curves of as-cast GH4169 alloy at different strain rates: (a) 0.01 s⁻¹, (b) 0.1 s⁻¹, (c) 1 s⁻¹, and (d) 10 s⁻¹

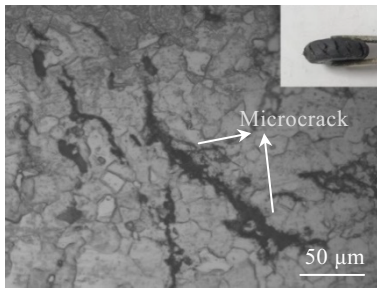


图 5 1373 K, 10 s⁻¹ 变形后的显微组织

Fig.5 Microstructure after deformation at the forming temperature of 1373 K and strain rate of 10 s⁻¹

根据相关文献, 由于该合金无明显的屈服, A 值取参考温度(1193 K)和参考应变速率(1 s⁻¹)下的 $\sigma_{0.2}$ (215 MPa)。 A 值代入式(2), 可得到 $\ln \varepsilon$ 和 $\ln(\sigma - A)$ 之间的关系, 如图 6 所示。然后从拟合曲线获得 B 和 n 的值分别为 336.713 MPa 和 0.325。

当变形温度为 1193 K 时, 式(1)可转化为式(3):

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (3)$$

通过 $\sigma / (A + B\varepsilon^n) - \ln \dot{\varepsilon}^*$ 拟合曲线图中的斜率来获得 C 值, 如图 7 所示。由图可得 C 为 0.0626。

同理, 在参考应变率 1.0 s⁻¹ 时, $\ln \dot{\varepsilon}^* = 0$, 流变应力和热软化项彼此独立, 因此, 式(1)可转化为式(4):

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

式中: σ 为流变应力(MPa), ε 是真应变, $\varepsilon^* = \varepsilon / \dot{\varepsilon}_0$ 是无量纲的应变率, $\dot{\varepsilon}$ 是应变速率(s⁻¹), $\dot{\varepsilon}_0$ 是参考应变速率(s⁻¹), A 为参考温度和应变速率下的屈服应力, B 为应变硬化系数, n 为应变硬化指数, 而

$$T^* = (T - T_{ref}) / (T_m - T_{ref})$$

其中 T 是当前温度(K), T_m 是熔化温度(1593 K), T_{ref} 是参考温度($T \geq T_{ref}$)。 C 和 m 是分别代表应变率硬化系数和热软化指数。结合现有研究, 选取参考温度为 1193 K (920 °C), 参考应变速率 1 s⁻¹ 来确定式中的各参数, 式(1)可表示为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \quad (2)$$

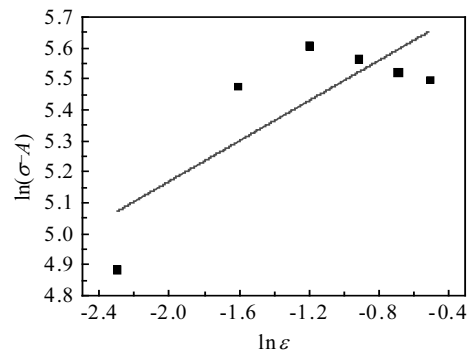


图 6 $\ln(\sigma - A)$ 与 $\ln \varepsilon$ 的关系

Fig.6 Relationship between $\ln(\sigma - A)$ and $\ln \varepsilon$ at 1193 K and 1 s⁻¹

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 - T^{*m}) \quad (4)$$

由式(4)可以得到特定应变下，不同温度的 $\ln[1 - \sigma / (A + B\varepsilon^n)]$ 和 $\ln T^*$ 之间的关系。然后，通过线性拟合曲线的斜率生成这 6 个不同应变的 m 值，如图 8 所示。取均值可得 m 为 1.154。

表 2 为铸态 GH4169 合金 Johnson-Cook 模型参数。故铸态 GH4169 合金 Johnson-Cook 本构方程如下：

$$\sigma = (215 + 336.713\varepsilon^{0.325})(1 + 0.0626\ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*1.154}) \quad (5)$$

由上述本构方程得到该模型不同变形条件下流变应力的预测值与该条件下的实验值，二者对比如图 9 所示。Johnson-Cook 模型绝对误差平均值见表 3。

结合图 9 和表 3 可以看出，在相同变形条件下，JC 模型预测值与实测值存在明显偏差。其最大绝对误差均值出现在 1283 K， 0.01 s^{-1} ，该值为 108.35 MPa。随着温度的上升，绝对误差均值大体呈现出先上升后下降的趋势。而随着应变速率的增加，流变应力预测值与实验值相关性更好，绝对误差均值下降趋势明显。

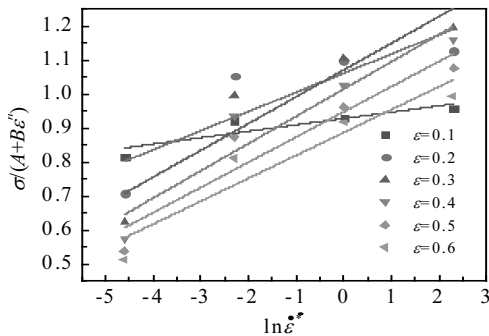


图 7 $\sigma / (A + B\varepsilon^n)$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}^*$ 的关系

Fig.7 Relationship between $\sigma / (A + B\varepsilon^n)$ and $\ln \dot{\varepsilon}^*$ at 1193 K

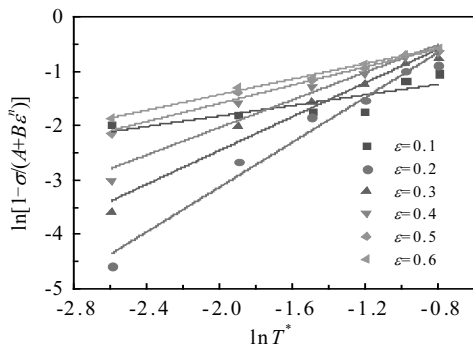


图 8 $\ln[1 - \sigma / (A + B\varepsilon^n)]$ 和 $\ln T^*$ 的关系

Fig.8 Relationship between $\ln[1 - \sigma / (A + B\varepsilon^n)]$ and $\ln T^*$

2.3 修正的 Johnson-Cook 模型

修正后的 Johnson-Cook 模型表示如下：

$$\sigma = (A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*) \cdot \exp[(\lambda_1 + \lambda_2 \ln \dot{\varepsilon}^*)T^*] \quad (6)$$

式中： A_1 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 C_1 、 λ_1 和 λ_2 是材料常数， $T^* = (T - T_{ref})$ ，其余参数意义与式(1)相同。

当变形温度为参考温度 1193 K，应变速率为参考应变速率 1.0 s^{-1} 时，式(6)可转换为式(7)：

$$\sigma = A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 \quad (7)$$

将该变形条件下流变应力代入式(7)，得到 ε 和 σ 的散点图，进行 3 次多项式拟合，如图 10 所示，通过拟合系数得到 A_1 、 B_1 、 B_2 和 B_3 分别为 142.3，2658.59，-6504.4，4930 MPa。

当变形温度为参考温度 1193 K 时，式(6)可以转换成式(8)：

$$\sigma = (A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (8)$$

C_1 值可由 $\sigma / (A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3) - \ln \dot{\varepsilon}^*$ 关系图获得，如图 11 所示，则 C_1 值为 0.062。

为简化方程，引入一个新参数 λ ，表示为：

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 \ln \dot{\varepsilon}^* \quad (9)$$

式(6)可变为：

$$\frac{\sigma}{(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*)} = e^{\lambda T^*} \quad (10)$$

式(10)两端同时取对数：

$$\ln \left[\frac{\sigma}{(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*)} \right] = \lambda T^* \quad (11)$$

λ 值取在不同真应变(0.1~0.6)的均值。选一特定应变，得到不同变形温度和应变速率的

$$\ln \left[\frac{\sigma}{(A_1 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*)} \right]$$

与 T^* 关系图。然后，可以由线性拟合曲线的斜率获得 4 个不同应变速率的 λ 值。

由式(9)可知， λ_1 、 λ_2 的值可由 $\lambda - \ln \dot{\varepsilon}^*$ 关系图获得。 λ 与 $\ln \dot{\varepsilon}^*$ 的关系如图 12 所示。

采用修正的 Johnson-Cook 模型得到 GH4169 材料参数如表 4 所示。

表 2 Johnson-Cook 模型参数

Table 2 Parameters for the Johnson-Cook model				
A/MPa	B/MPa	n	C	m
215	336.713	0.325	0.0626	1.154

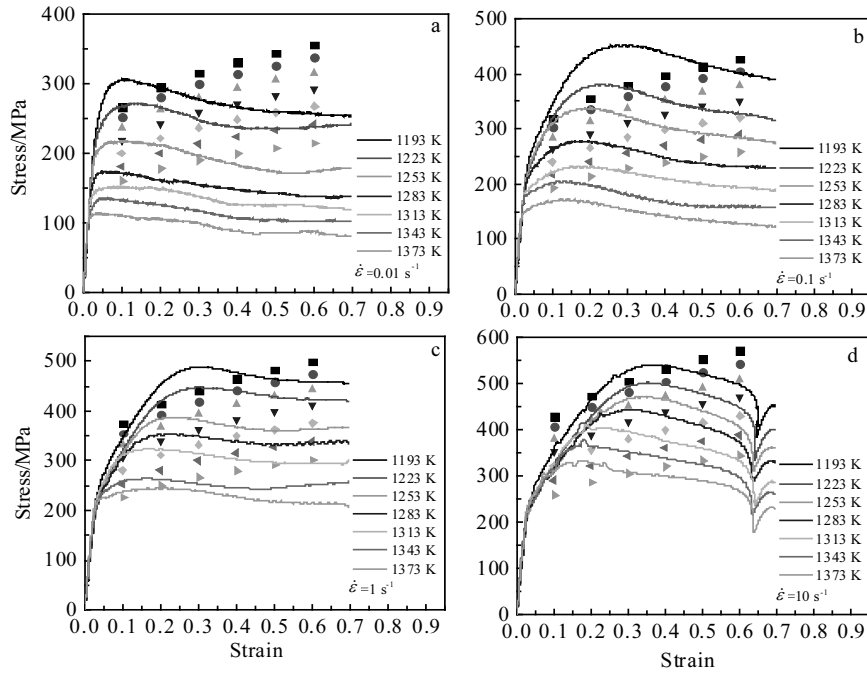


图 9 Johnson-Cook 模型流变应力预测值与实验值比较

Fig.9 Comparison between predicted and experimental flow stress using Johnson-Cook model at different strain rates: (a) 0.01 s^{-1} , (b) 0.1 s^{-1} , (c) 1 s^{-1} , and (d) 10 s^{-1}

表 3 不同变形条件下 3 种本构模型绝对误差平均值

Table3 Absolute error mean value of three kinds of constitutive models under different deformation conditions

T/K	$\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	$\Delta\sigma_{\text{JC}}/\text{MPa}$	$\Delta\sigma_{\text{MJC}}/\text{MPa}$	$\Delta\sigma_{\text{Arrhenius}}/\text{MPa}$
1193	0.01	54.67	63.22	23.72
	0.1	39.49	29.67	32.88
	1	30.52	1.83	39.74
	10	35.6	27.63	106.4
1223	0.01	58.12	36.79	9.39
	0.1	39.94	25.09	23.59
	1	28.32	14.05	20.49
	10	45.12	29.93	86.95
1253	0.01	89.53	41.94	19.94
	0.1	49.03	29.82	25.9
	1	39.73	13.92	20.68
	10	42.36	20.9	57.29
1283	0.01	108.35	38.06	26.11
	0.1	63.12	29.57	20.19
	1	34.1	19.98	12.19
	10	39.27	10.1	27.37
1313	0.01	103.05	25.23	14.95
	0.1	73.49	23.63	12.76
	1	43.19	24.15	21.68
	10	40.91	29.24	31.03
1343	0.01	100.77	21.32	12.55
	0.1	81.96	26.99	12.17
	1	51.58	22.1	11.75
	10	39.32	34.04	28.59
1373	0.01	94.86	16.74	11.34
	0.1	82.17	22.98	9.71
	1	42.88	20.87	17.05
	10	39.9	42.1	28.73

Note: $\Delta\sigma_{\text{JC}}$ -Johnson-Cook (JC) model, $\Delta\sigma_{\text{MJC}}$ -modified Johnson-Cook (MJC) model, $\Delta\sigma_{\text{Arrhenius}}$ -Arrhenius model

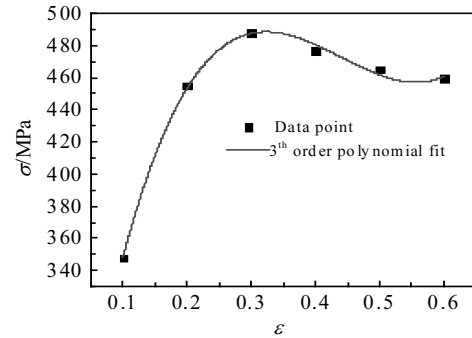


图 10 σ 与 ϵ 的关系

Fig.10 Relationship between σ and ϵ at 1193 K and 1 s^{-1}

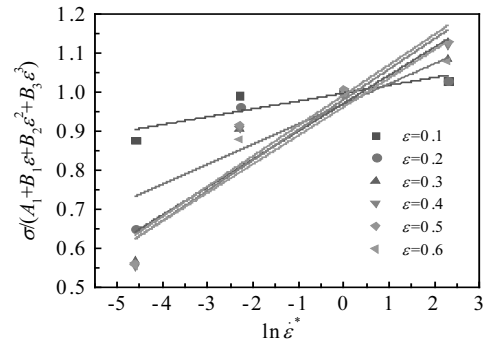


图 11 $\sigma/(A_1+B_1\epsilon+B_2\epsilon^2+B_3\epsilon^3)$ 和 $\ln\dot{\epsilon}^*$ 的关系

Fig.11 Relationship between $\sigma/(A_1+B_1\epsilon+B_2\epsilon^2+B_3\epsilon^3)$ and $\ln\dot{\epsilon}^*$ at the temperature of 1193 K

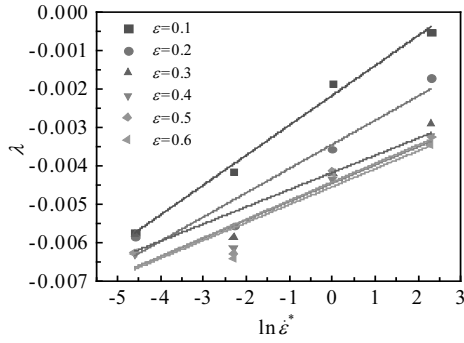


图 12 λ 与 ln ε̇* 的关系

Fig.12 Relationship between λ and ln ε̇*

表 4 修正的 Johnson-Cook 模型参数

Table 4 Parameters for the modified Johnson-Cook model

A_1	B_1	B_2	B_3	C_1	λ_1	λ_2
142.3	2658.59	-6504.4	4930	0.062	-0.003863	0.00055

修正的 Johnson-Cook 本构方程如下：

$$\sigma = (142.3 + 2658.59\varepsilon - 6504.4\varepsilon^2 + 4930\varepsilon^3) (1 + 0.062 \ln \dot{\varepsilon}^*) \cdot \exp \left[(-0.003863 + 0.00055 \ln \dot{\varepsilon}^*) T^* \right] \quad (12)$$

使用上述本构方程，可以得到在不同变形条件下该模型流变应力的预测值，其与该条件下流变应力实验值进行比较，结果如图 13 所示。修正的 Johnson-Cook 模型绝对误差平均值见表 3。

由图 13 可知，在较低变形温度(1193, 1223, 1253, 1283 K)，高应变速率(1, 10 s⁻¹)下，修正的 Johnson-Cook 模型流变应力预测值与实际值表现出较好的一致性。由表 3 可以看出，在相同变形条件下，预测值与实测值偏差相对较小。其最大绝对误差均值出现在 1193 K, 0.01 s⁻¹，该值为 63.22 MPa。在绝大多数温度(1193, 1223, 1253, 1283, 1313 K)下，随着应变速率上升，绝对误差均值总体呈现先下降后上升的趋势。当应变速率为 0.01, 10 s⁻¹ 时，随温度升高绝对误差均值波动较大。但是，总体而言，修正 Johnson-Cook 模型其精确性比 Johnson-Cook 模型更好。

2.4 应变补偿的 Arrhenius 模型

Arrhenius 本构模型是常用的描述材料高温变形过程中变形速率、变形温度、应力应变关系的模型。考虑到高温和应变速率对热变形行为的共同影响，引入了 Zener-Hollomon 参数(Z)^[22]。方程表示如下^[23]：

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \quad (13)$$

$$\dot{\varepsilon} = A F(\sigma) \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right) \quad (14)$$

$$F(\sigma) = \begin{cases} \sigma^n & \alpha\sigma < 0.8 \\ \exp(\beta\sigma) & \alpha\sigma > 1.2 \\ [\sinh(\alpha\sigma)]^n & \text{for all } \sigma \end{cases} \quad (15)$$

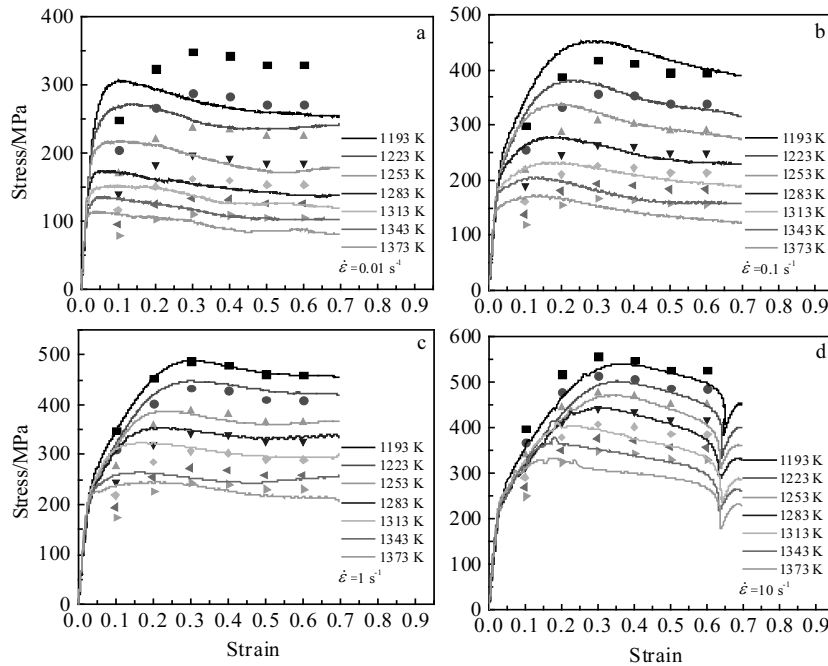


图 13 修正的 Johnson-Cook 模型流变应力预测值与实验值比较

Fig.13 Comparison between predicted and experimental flow stress using modified Johnson-cook model at different strain rates: (a) 0.01 s⁻¹, (b) 0.1 s⁻¹, (c) 1 s⁻¹, and (d) 10 s⁻¹

其中, R 是气体常数, 其值为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$, Q 是热变形激活能, A 、 n' 、 n 、 β 和 α 为材料常数, $\alpha = \beta/n'$ 。

由于应变显著影响了材料常数, 而式(13)和(14)没有考虑到应变, 从而影响了模型的精确性。因此, 下列对 Arrhenius 模型的研究是基于应变效应的补偿。以 0.3 的应变为例, 材料常数求解过程如下。

当热变形温度一定时, 将式(15)中的高应力水平 ($\alpha\sigma > 1.2$) 和低应力水平 ($\alpha\sigma < 0.8$) 下的应力表达式代入式(14), 分别得到以下关系:

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^{n'} \quad (16)$$

$$\dot{\epsilon} = C \exp(\beta\sigma) \quad (17)$$

其中 B 和 C 是定值, 对式(16), (17)两边取自然对数得:

$$\ln \sigma = \frac{1}{n'} \ln \dot{\epsilon} - \frac{1}{n'} \ln B \quad (18)$$

$$\sigma = (1/\beta) \ln \dot{\epsilon} - (1/\beta) \ln C \quad (19)$$

将应变为 0.3 时的流变应力和相应的应变率分别代入式(18)和式(19)。 n' 和 β 的值可分别从 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 和 $\sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 关系曲线获得, 如图 14a 和 14b 所示。经计算 n' 取均值为 7.94, β 取均值为 0.028, 则 α 为 0.003 54。任意应力条件下的本构方程可写作式(20):

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (20)$$

对上式两边取对数, 可得:

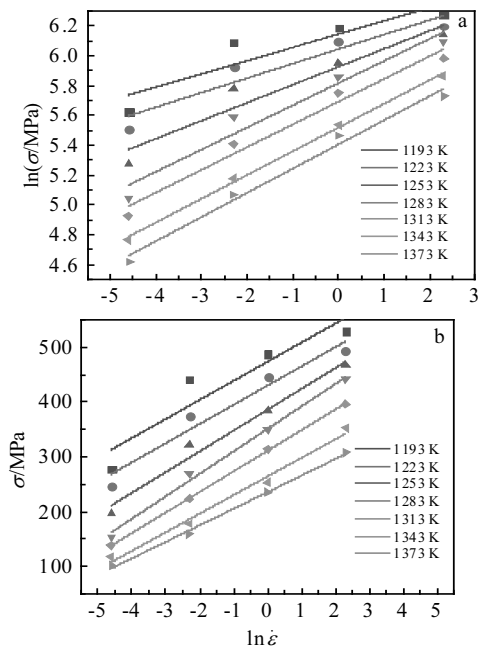


图 14 $\ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 的关系及 σ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 的关系
Fig.14 Relationship of $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ (a) and $\sigma - \ln \dot{\epsilon}$ (b)

$$\ln [\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{\ln \dot{\epsilon}}{n} + \frac{Q}{nRT} - \frac{\ln A}{n} \quad (21)$$

当温度一定时, 则有:

$$\frac{d \{ \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \}}{d(\ln \dot{\epsilon})} = \frac{1}{n} \quad (22)$$

n 值可由不同温度下 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln \dot{\epsilon}$ 关系曲线的斜率均值确定, 如图 15 所示。则 n 为 5.83。

当应变一定时, 式(21)可变为:

$$Q = Rn \frac{d \{ \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \}}{d(1/T)} = Rnm \quad (23)$$

其中, $m = d \{ \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \} / d(1/T)$, 做 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $1000/T$ 的关系曲线, 如图 16 所示, 通过曲线斜率均值可得真应变为 0.3 时的变形激活能 Q 为 $497.8 \text{ kJ}/\text{mol}$ 。

由式(13)与式(20)可得:

$$Z = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (24)$$

对上式两端同时取对数, 可得:

$$\ln Z = n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] + \ln A \quad (25)$$

做 $\ln Z$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系图, 如图 17 所示, 该拟

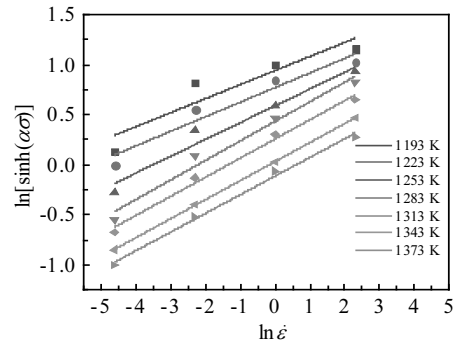


图 15 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 的关系
Fig.15 Relationship between $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and $\ln \dot{\epsilon}$

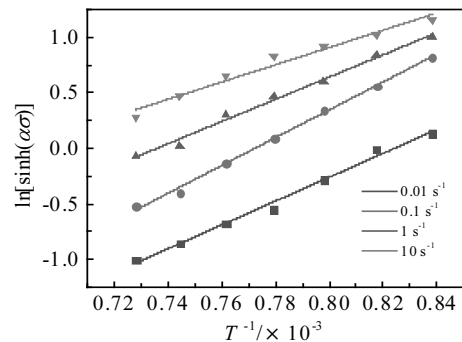


图 16 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $1000/T$ 的关系
Fig.16 Relationship between $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and $1000/T$

合直线的截距即为 $\ln A$ ，其值为 44.41。斜率为材料常数 n 值，为 5.61。

高温条件下应变不仅对流变应力有显著影响，而且在整个应变范围内对材料常数(α 、 n 、 Q 和 $\ln A$)的影响也是十分明显的。因此，为确保模型更精确，通过假设材料常数(α 、 n 、 Q 和 $\ln A$)是应变的多项式函数，如式(26)，从而引入应变对本构方程的影响。

对 α 、 n 、 Q 和 $\ln A$ 进行多阶多项式拟合，结果如图 18。拟合多项式的系数如表 5 所示。

$$\begin{aligned}
 \alpha &= C_0 + C_1\varepsilon + C_2\varepsilon^2 + C_3\varepsilon^3 + C_4\varepsilon^4 + C_5\varepsilon^5 \\
 n &= D_0 + D_1\varepsilon + D_2\varepsilon^2 + D_3\varepsilon^3 + D_4\varepsilon^4 + D_5\varepsilon^5 \\
 Q &= E_0 + E_1\varepsilon + E_2\varepsilon^2 + E_3\varepsilon^3 + E_4\varepsilon^4 + E_5\varepsilon^5 \\
 \ln A &= F_0 + F_1\varepsilon + F_2\varepsilon^2 + F_3\varepsilon^3 + F_4\varepsilon^4 + F_5\varepsilon^5
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

采用包含 Zener-Holloman 参数的双曲正弦函数本构方程如式(27)所示，可以估计特定应变下的流变应力：

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\}
 \tag{27}$$

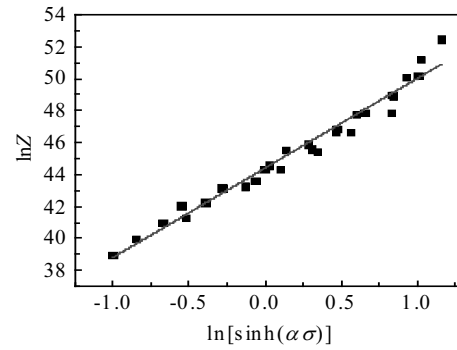


图 17 $\ln Z$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系

Fig.17 Relationship between $\ln Z$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

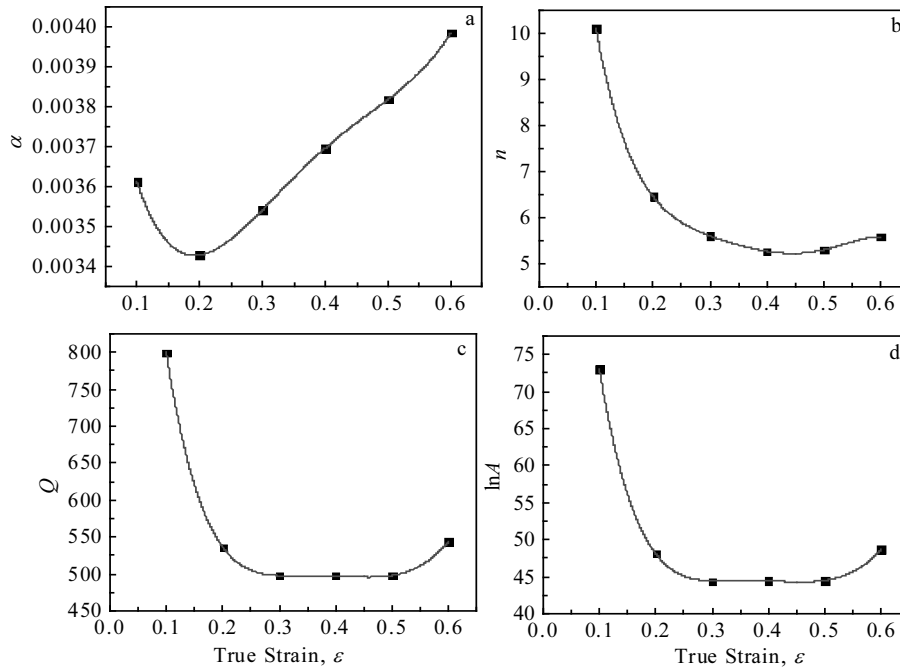


图 18 材料参数 α 、 n 、 Q 、 $\ln A$ 与真应变 ε 的关系

Fig.18 Relationships between material parameters and ε : (a) α , (b) n , (c) Q , and (d) $\ln A$

表 5 α 、 n 、 Q 和 $\ln A$ 多项式系数

Table 5 Coefficients of the polynomial for α , n , Q and $\ln A$

α	n	Q	$\ln A$
$C_0=0.00456$	$D_0=22.99418$	$E_0=1693.53655$	$F_0=156.60485$
$C_1=-0.01536$	$D_1=-211.27315$	$E_1=-14114.07798$	$F_1=-1314.42705$
$C_2=0.07196$	$D_2=1063.39654$	$E_2=64575.79235$	$F_2=5959.07996$
$C_3=-0.13787$	$D_3=-2727.22833$	$E_3=-141954.8467$	$F_3=-12956.90875$
$C_4=0.11085$	$D_4=3471.59583$	$E_4=147904.6222$	$F_4=13322.75417$
$C_5=-0.02374$	$D_5=-1727.15$	$E_5=-57027.19813$	$F_5=-5047.14167$

不同变形条件下该本构模型流变应力预测值和实验值之间的比较如图 19 所示。应变补偿的 Arrhenius 模型绝对误差平均值见表 3。

由图 19 可看出, 在高温(1313, 1343, 1373 K), 低应变速率(0.01, 0.1, 1 s⁻¹)下, 应变补偿的 Arrhenius 模型预测的流变应力值与实验应力值相差较小。由表 3 可以看出, 在大多数变形条件下, 预测值与实测值偏差较小。其最大绝对误差均值出现在 1193 K, 10 s⁻¹, 该值为 106.4 MPa。随着温度上升, 绝对误差均值大体上呈下降趋势。整体而言, 误差主要集中在高应变速率(10 s⁻¹)。

2.5 讨论

通过上述计算结果, 可以看出 Johnson-Cook 模型仅在参考温度(1193 K)下显示出相对较好的预测精度, 这可能是由于该模型仅将加工硬化效应、应变率效应、温度效应以乘积的方式组合起来, 而未考虑在

实际变形过程中三者的相互耦合作用。对比流变应力预测值与实际值, 可以看出, 在大多数变形条件下, 修正的 Johnson-Cook 本构模型与应变补偿的 Arrhenius 模型都可以较好地预测铸态 GH4169 的高温变形行为。

3 种模型都存在误差且随着温度与应变速率的提高呈现出一定的变化, 如图 8、12 和 18 所示。这可能是由于材料在较高温度和应变速率下的变形是高度非线性的。同时, 材料常数的拟合可能会引入一些误差, 导致流变应力预测值发生变化, 从而影响本构模型的精度。并且, 铸态试样尺寸小也可能引起误差。此外, 变形热产生软化效应, 从而导致流变应力实验值较低。最后, 铸态 GH4169 均匀化后仍存在很大程度的各向异性和晶粒不均匀, 且 GH4169 合金成分复杂, 存在晶格畸变和成分偏析, 对热变形过程中流变应力的预测也会造成一定影响。

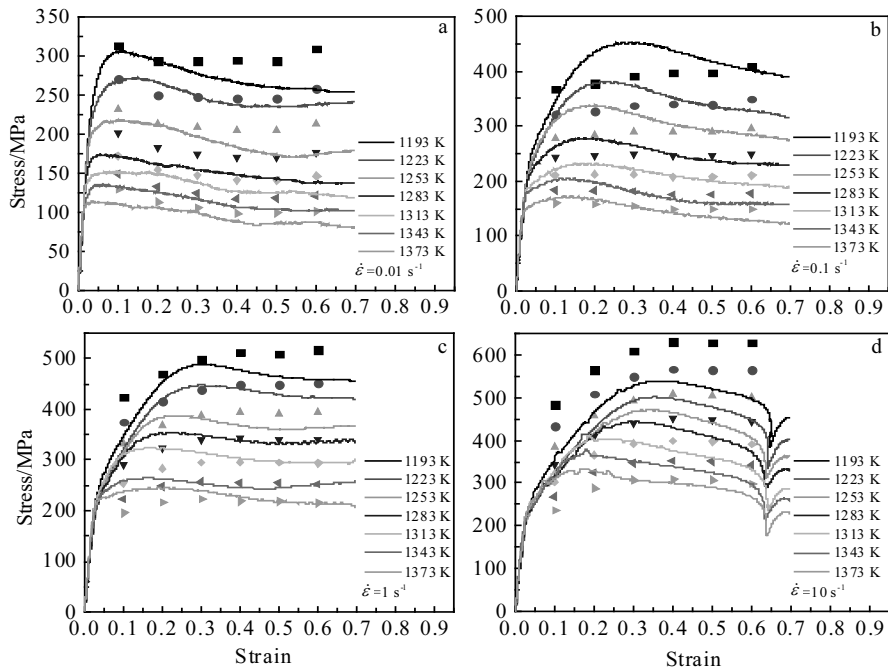


图 19 应变补偿的 Arrhenius 模型流变应力预测值与实验值比较

Fig.19 Comparison between predicted and experimental flow stress using strain-compensated Arrhenius equation at different strain rates: (a) 0.01 s⁻¹, (b) 0.1 s⁻¹, (c) 1 s⁻¹, and (d) 10 s⁻¹

为了进一步比较以上 3 种模型的精度, 使用相关系数(R)和平均相对误差(AARE)来进行误差分析, 表示为以下形式:

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\% \quad (28)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (29)$$

其中 E_i 和 P_i 分别是实验和预测的流变应力(MPa)。Ē 和 P̄ 分别是 E_i 和 P_i 的平均值。N 是本研究中使用的数据总数。

图 20 比较了 3 种模型的流变应力预测值和实验值

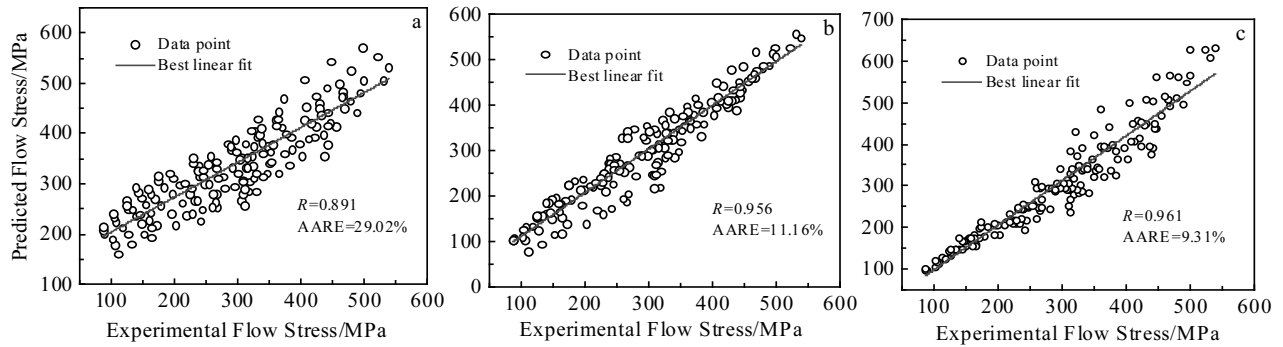


图 20 流变应力预测值与实验值之间的相关性

Fig.20 Correlation between the predicted and experimental flow stress values from Johnson-Cook model (a), modified Johnson-Cook model (b), and strain-compensated Arrhenius model (c)

之间的相关性。由图 20 知, Johnson-Cook 模型、修正 Johnson-Cook 模型、应变补偿的 Arrhenius 型本构模型和的相关系数(R)分别为 0.891、0.956 和 0.961。其平均 AARE 值依次为 29.02%、11.16% 和 9.31%。综合这两者进行分析, 应变补偿 Arrhenius 模型与其它模型相比, 具有较高的预测精度, 可以较好地预测铸态 GH4169 的流变应力。

3 结论

1) 随着温度升高、应变速率降低, 铸态 GH4169 的流变应力减小。

2) Johnson-Cook、修正 Johnson-Cook 和应变补偿的 Arrhenius 本构模型相关系数(R)分别为 0.891、0.956 和 0.961, 平均相对误差(AARE)依次为 29.02%、11.16% 和 9.31%。相比而言, 应变补偿的 Arrhenius 模型精度更高。

3) 3 种本构模型都存在误差且随温度与应变速率的提高呈现出一定的变化, 其主要原因可能是材料在较高温度和应变速率下的变形是高度非线性的。

参考文献 References

- [1] Du Jinhui(杜金辉), Lu Xudong(吕旭东), Deng Qun(邓 群) et al. *Materials China*(中国材料进展)[J], 2012, 31(12): 15
- [2] Lu X D, Du J H, Deng Q. *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 559: 623
- [3] Xie Xishan(谢锡善), Dong Jianxin(董建新), Fu Shuhong(付书红) et al. *Acta Metall Sin*(金属学报)[J], 2010, 46(11): 1289
- [4] Duc-Toan N, Tien-Long B, Dong-Won J et al. *High Temperature Materials and Processes*[J], 2012, 31(1): 37
- [5] Dehghan H, Abbasi S M, Momeni A et al. *Journal of Alloys*

and Compounds[J], 2013, 564: 13

- [6] Zhang D N, Shanguan Q Q, Xie C J et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 619: 186
- [7] Lin Y C, Zhang J, Zhong J. *Computational Materials Science*[J], 2008, 43(4): 752
- [8] Haghdad N, Zarei-Hanzaki A, Khalesian A R et al. *Materials & Design*[J], 2013, 49: 386
- [9] Lin Y C, Chen X M, Wen D X et al. *Computational Materials Science*[J], 2014, 83: 282
- [10] Yan T, Yu E, Zhao Y. *Materials & Design*[J], 2013, 50: 574
- [11] Sellars C M, McTegart W J. *Acta Metallurgica*[J], 1966, 14(9): 1136
- [12] Lin Y C, Chen M S, Zhong J. *Computational Materials Science*[J], 2008, 42(3): 470
- [13] Johnson G R, Cook W H. *Eng Fract Mech*[J], 1985, 21: 31
- [14] Lin Y C, Chen X M, Liu G. *Materials Science and Engineering A*[J], 2010, 527(26): 6980
- [15] Chen Qian(陈 前), Wang Yan(王 岩). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(10): 2727
- [16] Wang Y, Shao W Z, Zhen L et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 497(1-2): 479
- [17] Wei Jiahu(韦家虎), Dong Jianxin(董建新), Yu Jian(喻 健) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2012, 32(6): 72
- [18] Wang X, Huang C, Zou B et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 580: 385
- [19] Wang Zhongtang(王忠堂), Zhang Shihong(张士宏), Qi Guangxia(齐广霞) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2008, 18(11): 1977

- [20] Shi Wei(时伟), Wang Yan(王岩), Shao Wenzhu(邵文柱) *et al. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy* (粉末冶金材料科学与工程)[J], 2012, 17(3): 281
- [21] Medeiros S C, Prasad Y, Frazier W G *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2000, 293(1-2): 198
- [22] Zener C, Hollomon J H. *Journal of Applied Physics*[J], 1944, 15(1): 22
- [23] Zhang Y, Sun H, Volinsky A A *et al. Vacuum*[J], 2017, 146: 35

Hot Deformation Behavior of As-cast GH4169 Alloy and Comparison of Three Constitutive Models

Zhang Bing^{1,3}, Yue Lei^{1,3}, Chen Hanfeng², Zhang Zhijuan^{1,3}, Liu Pengru^{1,3}, Zhao Fenfen^{1,3}

(1. College of Metallurgy Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(2. State Key Laboratory of Nickel and Cobalt Resource Integrated Utilization, Jinchuan Group Co. Ltd, Jinchang 737100, China)

(3. National & Local Engineering Researching Center for Functional Materials Processing, Xi'an 710055, China)

Abstract: Thermal compression test of as-cast GH4169 alloy was performed on a Gleeble-1500 thermo-mechanical simulator at temperature of 1193~1373 K, strain rate of 0.01~10 s⁻¹, and deformation of 50%. By analyzing the true stress and true strain curve, the hot deformation behavior of as-cast GH4169 alloy was studied; the correlation coefficients (*R*) and average relative errors (AARE) of the three constitutive models of Johnson-Cook (JC), modified Johnson-Cook (MJC) and strain-compensated Arrhenius model were compared and analyzed. The results show that the flow stress of as-cast GH4169 alloy decreases with the increase of deformation temperature and the decrease of strain rate. The correlation coefficients (*R*) of the JC model, MJC model and strain-compensated Arrhenius constitutive model are 0.891, 0.956, and 0.961, and AARE are 29.02%, 11.16%, and 9.31%, respectively. Therefore, the strain-compensated Arrhenius model can describe the thermal deformation behavior of as-cast GH4169 more accurately.

Key words: as-cast GH4169; hot deformation behavior; constitutive model

Corresponding author: Zhang Bing, Ph. D., Professor, College of Metallurgy Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China, E-mail: r.zhang1112@163.com