

高温合金成形

GH5188 合金板材高温拉伸变形流动
行为与本构方程研究汪淼¹, 滕俊飞^{1,2}, 陈怡琪², 李宏^{2*}

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024; 2. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072)

摘要: **目的** 研究 GH5188 合金板材高温拉伸变形流动行为, 为高温合金板材高温成形工艺的制定和优化提供指导。**方法** 基于 GH5188 合金板材高温拉伸试验, 分析了变形工艺参数对 GH5188 合金板材高温拉伸变形时真应力、应变速率敏感性指数和应变硬化指数的影响规律, 建立了本构模型对其流动行为进行描述和预测。**结果** GH5188 合金板材高温拉伸变形流动行为受应变硬化、流动软化和应变速率硬化的共同影响, 其变形过程分为弹性变形、加工硬化、稳态流动和断裂 4 个阶段。随变形温度的升高和应变速率的降低, 真应力减小。变形温度、应变速率和真应变对 GH5188 合金板材的应变速率敏感性指数和应变硬化指数具有显著影响。基于 Johnson-Cook 和 Hensel-Spittel 模型, 建立了考虑应变硬化效应、流动软化效应和应变速率硬化效应耦合影响的 GH5188 合金板材高温拉伸变形本构模型 (JC-HS 模型), 采用该模型预测的真应力与试验值的平均相对误差为 6.02%。**结论** 建立的 JC-HS 模型能够较好地描述和预测 GH5188 合金板材的高温拉伸流动行为。

关键词: GH5188 合金; 板材; 高温拉伸; 流动行为; 本构方程

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.06.017

中图分类号: TG301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2024)06-0138-07

Flow Behavior and Constitutive Model of GH5188 Superalloy Sheet
during Hot Tensile DeformationWANG Miao¹, TENG Junfei^{1,2}, CHEN Yiqi², LI Hong^{2*}

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: The work aims to understand the flow behavior of GH5188 superalloy sheet during hot tensile deformation to provide guidance for formulation and optimization of its hot forming process. Based on the hot tensile experiments of GH5188 superalloy sheet, the influence of process parameters on the true stress, strain rate sensitivity index and strain hardening index of GH5188 superalloy sheet was studied. A constitutive model was established to describe and predict its flow behavior. The results showed that the flow behavior of GH5188 superalloy sheet was determined by strain hardening, thermal softening and strain rate

收稿日期: 2024-05-12

Received: 2024-05-12

基金项目: 国防科技重大专项 (J2019-VII-0012)

Fund: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (J2019-VII-0012)

引文格式: 汪淼, 滕俊飞, 陈怡琪, 等. GH5188 合金板材高温拉伸变形流动行为与本构方程研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(6): 138-144.

WANG Miao, TENG Junfei, CHEN Yiqi, et al. Flow Behavior and Constitutive Model of GH5188 Superalloy Sheet during Hot Tensile Deformation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(6): 138-144.

*通信作者 (Corresponding author)

hardening. The hot tensile deformation process could be divided into four stages: elastic deformation, work hardening, steady flow and fracture. With the increase of deformation temperature and the decrease of strain rate, the true stress decreased. The deformation temperature, strain rate and true strain had significant effects on the strain rate sensitivity index and strain hardening index of GH5188 superalloy sheet. Based on Johnson-Cook and Hensel-Spittel models, a hot tensile deformation constitutive model (JC-HS model) of GH5188 superalloy sheet was established considering the coupling effect of strain hardening, thermal softening and strain rate hardening. The average relative error between the true stress predicted by this model and the experimental value was 6.02%. In conclusion, the JC-HS model can well describe and predict the hot tensile flow behavior of GH5188 superalloy sheet.

KEY WORDS: GH5188 superalloy; sheet; hot tensile; flow behavior; constitutive model

随着新一代装备动力性能不断提升,其热端部件服役环境更加严苛,对选用的高温合金提出了更高的性能要求^[1]。GH5188 合金是我国自主研制的一种固溶强化型变形钴基高温合金^[2-3],具有良好的耐磨性、高温弹性、延展性且在 1 095 °C 服役温度下也具有优良的抗氧化性^[4],已成为制造装备动力热端部件的关键材料。

高温合金热端部件多为薄壁结构,主要通过板材热拉或热冲压方式成形,其成形质量和可靠性主要依赖于板材高温拉伸成形能力。高温合金板材高温拉伸流动行为是评价其成形能力的关键指标,受变形温度、变形程度、应变速率等工艺参数的影响,具有高度的非线性。Lin 等^[5]研究了镍基合金的高温拉伸变形行为,结果表明,随变形温度的降低和应变速率的增大,合金的真应力显著增大;当变形温度较低时,真应力随真应变的增大先逐渐增大后保持不变,当变形温度较高时,真应力随真应变的增大先增大后减小。王梦真等^[6]研究了 GH4169 合金板材高温拉伸变形行为,研究发现,当应变速率为 0.001 s⁻¹、变形温度为 850 °C 时, GH4169 合金应变硬化指数降低至 0.06,几乎没有应变硬化能力。Kong 等^[7]发现 Inconel 625 合金板材的高温拉伸变形过程包括应变硬化、软化、稳态 3 个阶段。张冬旭等^[8]研究发现, GH3230 合金的变形激活能随应变速率的增大和变形温度的升高而增大,且应变速率对变形激活能的影响更加显著。

国内外学者相继发展和建立了多种本构模型来预测高温合金高温拉伸流动行为。张冬旭等^[8]建立了双曲正弦函数形式的 Arrhenius 模型来描述 GH3230 合金板材的高温拉伸流动行为。然而,该模型难以描述变形时的加工硬化和流动软化行为^[9]。Johnson-Cook (JC) 模型是一种与变形温度、应变和应变速率相关的本构模型,因其简单、高效而被广泛应用^[10]。但该模型假设流动软化、应变速率硬化和应变硬化相互独立,彼此分离,未考虑三者之间的耦合影响^[11]。国内外学者对 JC 模型进行了相应的修正。Zhang 等^[12]引入了温度效应函数,采用修正的 JC 模型描述了 IC10 合金的高温拉伸变形行为,模型预测

精度较高。Shokry 等^[13-14]分别采用 JC 模型、考虑屈服和应变硬化效应以及温度和应变速率耦合效应的 M1-JC 模型^[15]、考虑应变软化机制的 M2-JC 模型^[16]、考虑温度和应变耦合影响的 M3-JC 模型分别预测了 Haynes 214 合金的高温拉伸流动行为,其中 M3-JC 模型预测精度较高。相关学者还提出了考虑应变硬化、应变速率硬化和流动软化综合影响的 Hensel-Spittel (HS) 模型。He 等^[17]采用双曲正弦函数优化的 HS 模型预测了 GH4169 合金的流动行为,其真应力预测值与试验值之间的平均相对误差为 8.09%。但是,HS 模型不能完全准确地描述应变速率敏感性指数随变形工艺参数的变化情况^[18]。

综上所述可以看出,目前针对 GH5188 合金板材的高温拉伸流动行为还缺乏系统研究,而且现有的本构模型大多未能充分考虑应变硬化、流动软化和应变速率硬化之间的耦合影响。本文基于 GH5188 合金板材高温拉伸物理模拟试验,研究变形工艺参数对 GH5188 合金板材高温拉伸流动行为的影响,建立描述 GH5188 合金板材高温拉伸流动行为的本构模型,以期对 GH5188 合金板材高温拉伸成形工艺的制定和优化提供理论指导。

1 试验

试验材料为厚度 1 mm 的 GH5188 合金板材,其主要化学成分如表 1 所示。采用机械加工将板材加工成高温拉伸试样,试样尺寸如图 1 所示,试样标距为 30 mm。随后在 RDL100 电子试验机上进行高温拉伸试验,试验执行标准为 GB/T 228.2—2015。选取的高温拉伸试验工艺参数如表 2 所示。加热方式为随炉加热,升温速度为 15 °C/min,到达预定试验温度后保温 10 min,确保试样温度均匀。拉伸时采用高温引伸计将试样标距段的变形传导到光栅尺,通过计算机对

表 1 供应态 GH5188 合金板材主要化学成分

Tab.1 Chemical compositions of as-received GH5188 superalloy sheet

GH5188 superalloy sheet							wt.%
Cr	Ni	W	Fe	La	Si	C	Co
23.00	23.00	14.50	3.00	0.07	0.35	0.10	Bal.

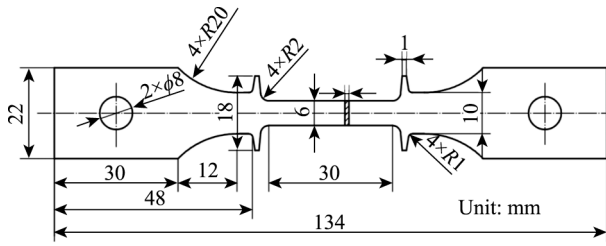


图1 GH5188合金板材高温拉伸试样
Fig.1 Tensile specimen of GH5188 superalloy sheet

表2 GH5188合金板材高温拉伸试验工艺参数

Tab.2 Processing parameters of hot tensile experiments of GH5188 superalloy sheet

Deformation temperature/°C	Strain rate/s ⁻¹	Deformation extent
850, 900, 950, 1 000	0.001, 0.003, 0.01, 0.044	Fracture

光栅尺传递出的数据进行采集,并实时记录试验过程中的力、位移、变形温度等数据。

2 结果与分析

2.1 真应力-真应变曲线

GH5188合金板材高温拉伸变形真应力-真应变曲线如图2所示。可以看出, GH5188合金板材高温拉伸变形时的真应力随变形温度的升高和应变速率的减小而增大,这是由于变形温度升高,合金的流动

软化效应增强;应变速率减小,合金的应变率硬化效应减弱。在同一变形温度和应变速率下, GH5188合金板材高温拉伸变形过程可以分为4个阶段: 1) 弹性变形阶段,随真应变的增大,真应力迅速上升,且真应力与真应变呈线性关系; 2) 加工硬化阶段,真应力随真应变的增大继续上升,直至达到峰值,但上升速度较弹性阶段的有所下降,在此阶段,合金变形时的加工硬化效应大于流动软化效应; 3) 稳态阶段,真应力不随真应变的增大而继续增大,而是保持基本不变,此时变形过程中的加工硬化效应和流动软化效应基本平衡; 4) 断裂阶段,在此阶段真应力随真应变的增大迅速下降,试样发生断裂。

由图2还可以看出,弹性阶段结束后, GH5188合金板材真应力随真应变的变化呈现2种趋势。趋势1为在较低变形温度和较高应变速率下,真应力随真应变的增大而继续增大,所涉及的变形温度和应变速率如下: 850 °C/0.001~0.044 s⁻¹、900 °C/0.003~0.044 s⁻¹、950 °C/0.01~0.044 s⁻¹、1 000 °C/0.044 s⁻¹。趋势2为在较高变形温度和较低应变速率下,真应力随真应变的增大先减小后增大,所涉及变形温度和应变速率如下: 900 °C/0.001 s⁻¹、950 °C/0.001~0.003 s⁻¹、1 000 °C/0.001~0.01 s⁻¹。出现趋势2的主要原因是较高变形温度和较低应变速率条件下, GH5188合金中具有面心立方结构的γ相发生较多的晶格旋转和孪生变形^[19-22]。

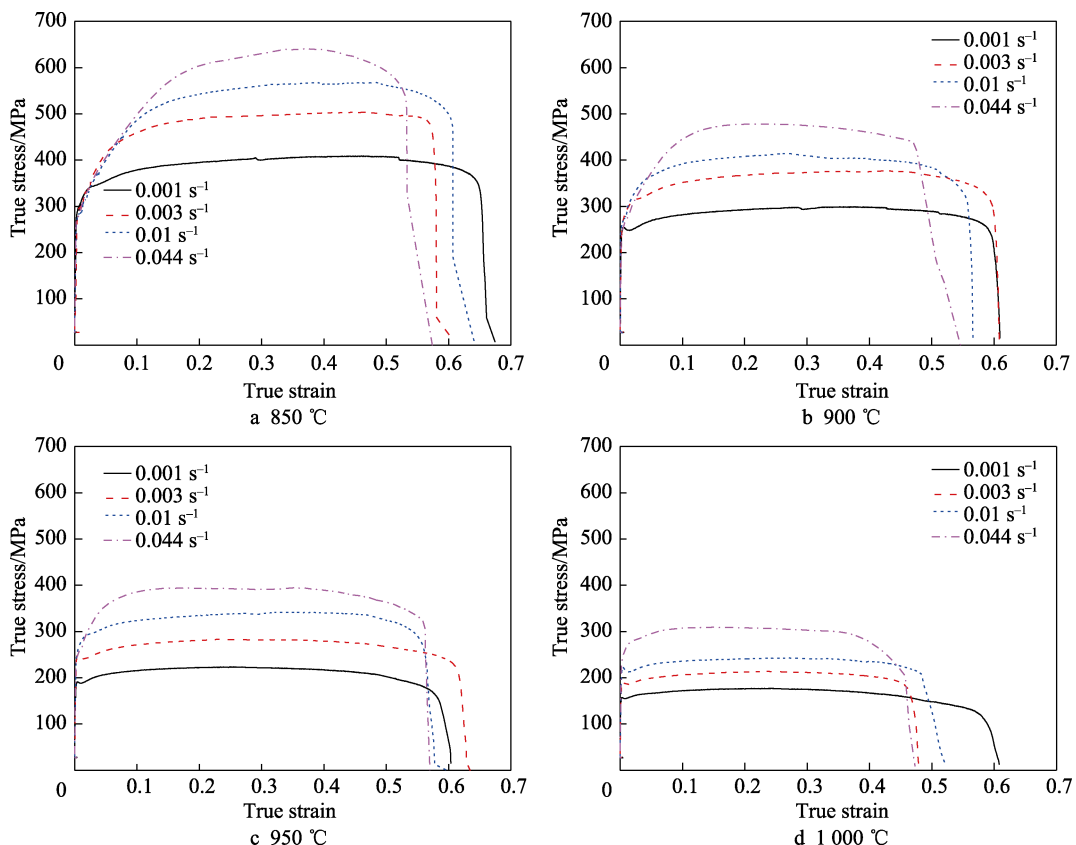


图2 不同变形温度下 GH5188合金板材高温拉伸变形时的真应力-真应变关系曲线

Fig.2 True stress-true strain curves of GH5188 superalloy sheet during hot tensile deformation under different deformation temperatures

2.2 应变速率敏感性指数

应变速率敏感性指数反映了材料抵抗颈缩的能力, 是表征塑性变形过程中金属及合金塑性性能的重要参数, 与合金的化学成分、微观组织、应变速率和变形温度有关。通常, 较高的应变速率敏感性指数是获得良好塑性性能的重要条件^[23], 其定义如式 (1) 所示。

$$m = (d \ln \sigma / d \ln \dot{\epsilon}) \Big|_{\epsilon, T} \quad (1)$$

式中: m 为应变速率敏感性指数; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; T 为变形温度, $^{\circ}C$; σ 为真应力, MPa ; ϵ 为真应变。

GH5188 合金板材应变速率敏感性指数随真应变的变化曲线如图 3 所示。由图 3a 可以看出, 当变形温度为 $850^{\circ}C$ 时, GH5188 合金板材的应变速率敏感性指数随真应变的增大而增大。当真应变较小时, 应变速率敏感性指数增大较快; 当真应变较大时, 应变速率敏感性指数基本不随真应变的变化而变化。在同一真应变下, 应变速率敏感性指数随应变速率的增大而减小, 说明其塑性性能随应变速率的增大而下降。由图 3b 和图 3c 可以看出, 当变形温度为 $900^{\circ}C$ 和 $950^{\circ}C$ 时, 真应变对应变速率敏感性指数的影响与应变速率有关。当应变速率较小 ($0.001 s^{-1}$ 和 $0.003 s^{-1}$) 时, 应变速率敏感性指数基本不随真应变的变化而变

化, 而当应变速率较大 ($0.01 s^{-1}$ 和 $0.044 s^{-1}$) 时, 应变速率敏感性指数随真应变的增大先增大后缓慢减小。由图 3d 可以看出, 当变形温度为 $1000^{\circ}C$ 时, 应变速率敏感性指数基本不随真应变和应变速率的变化而变化, 这是由于在高变形温度下, 合金的流动软化效应极为显著, 削弱了应变速率硬化效应和应变硬化效应的影响。综上分析可知, 当变形温度为 $850\sim 950^{\circ}C$ 、应变速率为 $0.001 s^{-1}$ 和 $0.003 s^{-1}$ 时, GH5188 合金板材的高温拉伸塑性较好。

2.3 应变硬化指数

应变硬化指数反映了金属材料的应变硬化程度和材料的均匀变形能力、塑性变形稳定性和可加工性, 与变形温度和应变速率密切相关^[24], 其定义如式 (2) 所示。

$$n = (d \ln \sigma / d \ln \epsilon) \Big|_{\dot{\epsilon}, T} \quad (2)$$

式中: n 为应变硬化指数。

GH5188 合金板材应变硬化指数随真应变的变化曲线如图 4 所示。可以看出, GH5188 合金板材的应变硬化指数随真应变的增大而减小, 说明合金的应变硬化程度随变形的增加而降低。这种变化主要归因于 2 个方面: 随着真应变的增大, 位错密度不断增大, 合金的加工硬化效应增强; 在变形过程中, 位错通过交错滑移和攀移运动使部分位错消失, 部分位错重新

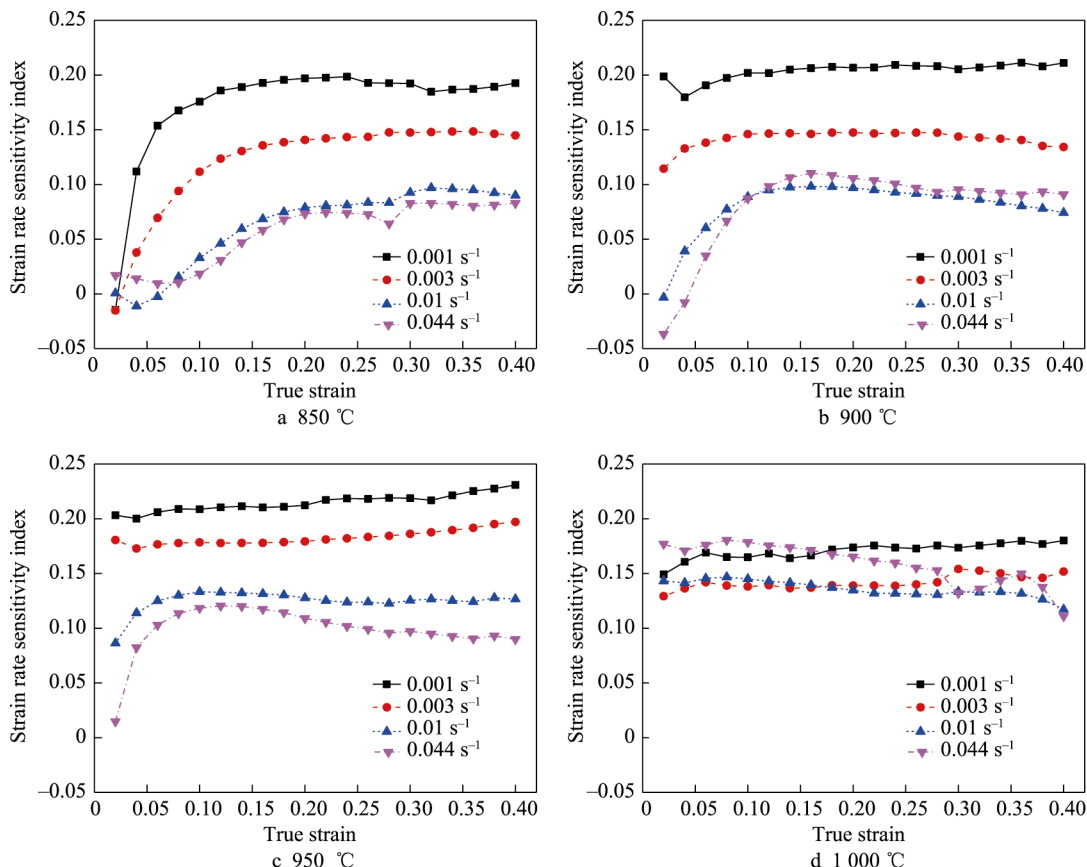


图 3 不同变形温度下 GH5188 合金板材应变速率敏感性指数随真应变的变化关系

Fig.3 Strain rate sensitivity index of GH5188 superalloy sheet deformed under different deformation temperatures

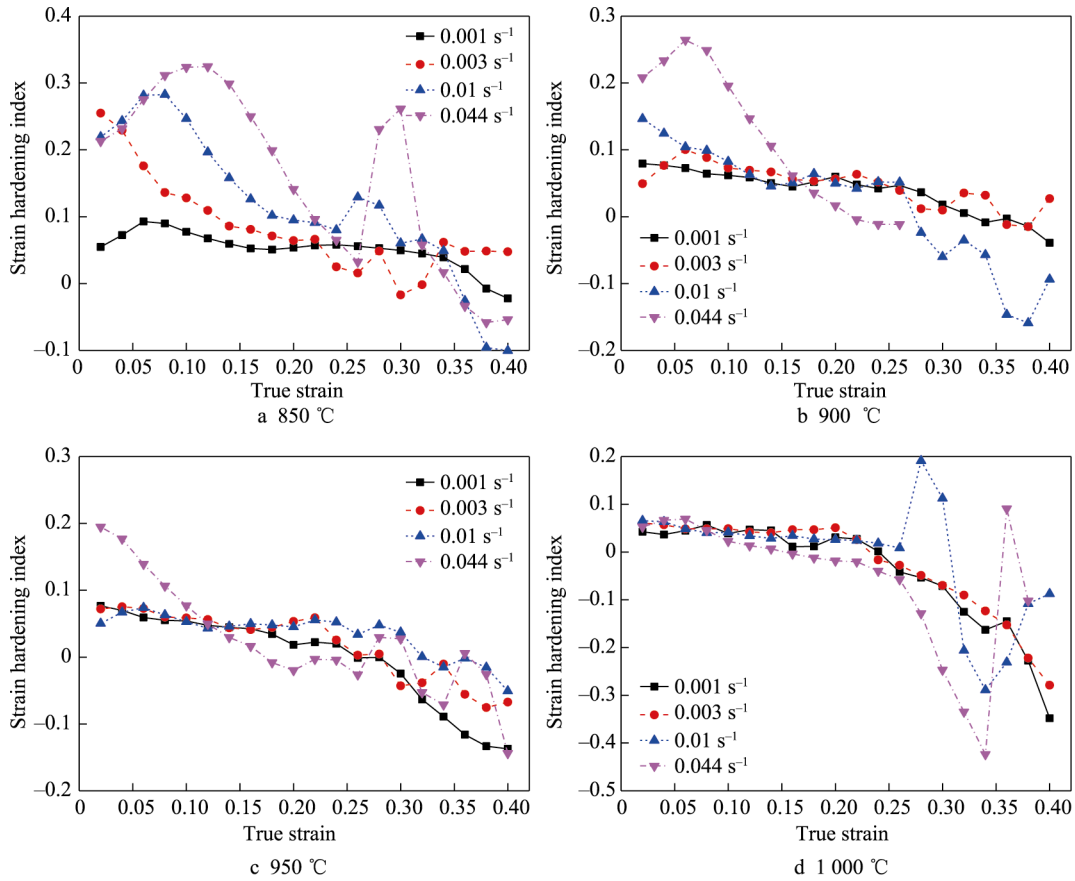


图4 不同变形温度下GH5188合金板材的应变硬化指数

Fig.4 Strain hardening index of GH5188 superalloy sheet deformed under different deformation temperatures

排列, 流动软化效应增强, 随着真应变的增大, 位错的增加速度减小, 湮灭速度增大, 使合金的加工硬化减弱。当变形温度为 850 °C 和 1000 °C 时, 与应变速率为 0.001 s⁻¹ 和 0.003 s⁻¹ 时相比, GH5188 合金板材的应变硬化指数在应变速率为 0.01 s⁻¹ 和 0.044 s⁻¹ 时的波动更为剧烈, 说明在该变形工艺参数下合金的变形稳定性比应变速率为 0.001 s⁻¹ 和 0.003 s⁻¹ 时的更差。当变形温度为 900 °C 和 950 °C 时, GH5188 合金板材的应变硬化指数在各应变速率下的波动程度基本相同, 说明合金的塑性加工稳定性在变形温度为 900 °C 和 950 °C 时受应变速率的影响较弱。由图 4 还可以看出, 在各变形温度和应变速率下, GH5188 合金板材的应变硬化指数在真应变较小时大于 0, 在真应变较大时小于 0。当应变硬化指数大于 0 时, 说明合金内应变硬化效应大于流动软化效应; 当应变硬化指数值小于 0 时, 说明合金内流动软化效应大于应变硬化效应。因此, 在 GH5188 合金板材高温拉伸变形初期, 应变硬化效应占据主导地位, 在变形后期, 流动软化效应占据主导地位。

2.4 高温拉伸变形本构模型

由前述 GH5188 合金板材的真应力-真应变关系、应变速率敏感性指数和应变硬化指数的分析结果可以看出, GH5188 合金板材的高温拉伸变形过程同时

存在应变硬化效应、应变速率硬化效应和流动软化效应, 且三者同时受工艺参数的影响。

JC 模型^[25-27]和 HS 模型^[18]是 2 种常用的高温变形本构模型, 其表达式分别如式 (3) 和式 (4) 所示。

$$\sigma = (A_{JC} + B\varepsilon_p^{n'}) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m'}) \quad (3)$$

$$A_{HS} T^{p_1} \exp(p_2 T) \varepsilon^{p_3} \exp(p_4 / \varepsilon) (1 + \varepsilon)^{p_5} \exp(p_6 \varepsilon) \dot{\varepsilon}^{(p_7 + p_8 T)} \quad (4)$$

式中: A_{JC} 为参考变形温度和参考应变速率下材料的屈服应力, MPa; B 为与应变硬化效应相关的常数; C 、 n' 、 m' 为材料常数; ε_p 为塑性应变; $\dot{\varepsilon}^*$ 为无量纲应变速率, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率; T^* 为无量纲的温度, $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, T_m 为材料熔点, T_r 为参考变形温度 ($T \geq T_r$); A_{HS} 、 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 、 p_5 、 p_6 、 p_7 、 p_8 为材料参数。

JC 模型充分考虑了流动软化、应变硬化和应变速率硬化效应对真应力的共同影响, 但忽略了三者间的耦合影响。HS 模型描述了流动软化效应和应变速率硬化效应之间的耦合影响, 但不能准确描述材料变形过程中应变速率敏感性指数随变形工艺参数的变化情况。结合 JC 模型和 HS 模型的优势, 充分考虑应变硬化效应、应变速率硬化效应和流动软化效应对材料流动行为的相互影响, 本文建立了 JC-HS 模型,

其表达式如式 (5) 所示。

$$\sigma = (A + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)[1 + C(\varepsilon)\ln \dot{\varepsilon}^*] \cdot \exp\{T^*[m_1 + m_2 \ln(1 + \varepsilon) + m_3 \ln \dot{\varepsilon}^*]\} \quad (5)$$

式中: A 、 B_1 、 B_2 、 m_1 、 m_2 、 m_3 为材料参数; $C(\varepsilon)$ 为与真应变相关的材料参数, $C(\varepsilon) = a + b\varepsilon + c\varepsilon^2 + d\varepsilon^3 + e\varepsilon^4 + f\varepsilon^5$, 其中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 为材料参数。

选取 850 °C 为参考变形温度, 0.001 s⁻¹ 为参考应变速率, 在参考变形温度和参考应变速率下, 式 (5) 可以被简化为式 (6)。在参考变形温度下, 式 (5) 可以被简化为式 (7)。

$$\sigma = A + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sigma = (A + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2)[1 + C(\varepsilon)\ln \dot{\varepsilon}^*] \\ C(\varepsilon) = a + b\varepsilon + c\varepsilon^2 + d\varepsilon^3 + e\varepsilon^4 + f\varepsilon^5 \end{cases} \quad (7)$$

采用多项式拟合求解材料参数 A 、 B_1 、 B_2 、 C 。通过计算可得 $A=361.04$ 、 $B_1=216.93$ 、 $B_2=-250.03$ 、 $a=-0.17$ 、 $b=5.08$ 、 $c=-32.31$ 、 $d=103.24$ 、 $e=-161.62$ 、 $f=97.58$ 、 $m_1=-1.872$ 、 $m_2=-3.744$ 、 $m_3=0.048$ 。因此, 描述 GH5188 合金板材高温拉伸变形的 JC-HS 模型表达式如式 (8) 所示。

$$\sigma = (361.04 + 216.93\varepsilon - 250.03\varepsilon^2) \times \left[1 + \ln \dot{\varepsilon}^* \left(\frac{-0.17 + 5.08\varepsilon - 32.31\varepsilon^2 + 103.24\varepsilon^3 - 161.62\varepsilon^4 + 97.58\varepsilon^5}{161.62\varepsilon^4 + 97.58\varepsilon^5} \right) \right] \times \exp\left\{T^* \left[-3.9 \times 10^{-3} - 7.8 \times 10^{-3} \ln(1 + \varepsilon) + 1 \times 10^{-4} \ln \dot{\varepsilon}^* \right]\right\} \quad (8)$$

以变形温度为 850~1 000 °C、应变速率为 0.003 s⁻¹ 时的一组真应力-真应变曲线作为验证组, 分别采用 JC 模型、HS 模型和 JC-HS 模型预测该变形温度和应变速率下 GH5188 合金板材的真应力值, 并将预测值与验证组数据的试验值进行对比, 对比结果如图 5 所示。

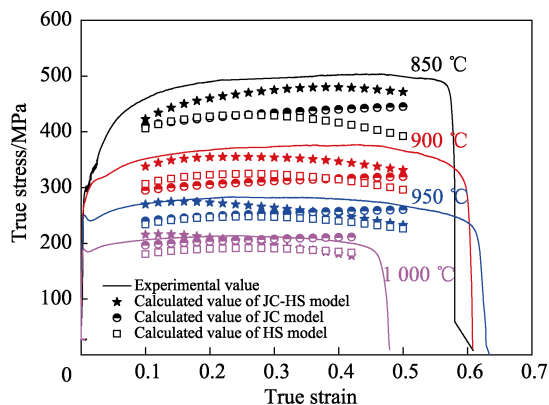


图 5 应变速率为 0.003 s⁻¹ 时不同模型计算的 GH5188 合金板材真应力与试验值对比

Fig.5 Comparison between experimental and calculated true stress by JC model, HS model and JC-HS model of GH5188 superalloy sheet deformed under a strain rate of 0.003 s⁻¹ and different deformation temperatures

采用 JC 模型、HS 模型和 JC-HS 模型计算的真正应力与试验值的相对误差如表 3 所示。可以看出, 与 JC 模型和 HS 模型相比, 本文所建立的 JC-HS 模型的平均相对误差和最大相对误差均最小, 分别为 6.02% 和 13.01%, 这表明本文建立的 JC-HS 模型能够较好地预测 GH5188 合金板材高温拉伸变形时的流动行为。

表 3 采用 JC 模型、HS 模型和 JC-HS 模型计算的真正应力与试验值的相对误差

Model	Average relative error/%	Maximum relative error
JC	10.63	17.08
HS	13.56	20.93
JC-HS	6.02	13.01

3 结论

1) GH5188 合金板材高温拉伸变形过程分为弹性变形、加工硬化、稳态和断裂 4 个阶段, 其真应力随变形温度的升高和应变速率的减小而增大。

2) 在弹性阶段结束后, 在较低的变形温度和较高的应变速率下, 真应力随着真应变的增大而继续增大; 在较高的变形温度和较低的应变速率下, 真应力随真应变的增大先减小后增大。

3) 当变形温度为 850~950 °C 时, 应变速率敏感性指数随真应变的增大而增大, 当变形温度为 1 000 °C 时, 应变速率敏感性指数基本保持不变; 应变硬化指数随真应变的增大而减小。

4) 建立了考虑应变硬化效应、流动软化效应和应变速率硬化效应之间耦合影响的 JC-HS 本构模型, 其平均相对误差为 6.02%, 能够较好地描述和预测 GH5188 合金板材的高温拉伸流动行为。

参考文献:

[1] GAO Q Z, JIANG Y J, LIU Z Y, et al. Effects of Alloying Elements on Microstructure and Mechanical Properties of Co-Ni-Al-Ti Superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 779: 139139.

[2] LEE W S, KAO H C. High Temperature Deformation Behaviour of Haynes 188 Alloy Subjected to High Strain Rate Loading[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 594: 292-301.

[3] YAN Z W, TROFIMOV V, SONG C H, et al. Microstructure and Mechanical Properties of GH5188 Superalloy Sheet Additively Manufactured via Ultrasonic-assisted Laser Powder Bed Fusion[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 939: 168771.

[4] WEI W, XIAO J C, WANG C F, et al. Hierarchical Mi-

- crostructure and Enhanced Mechanical Properties of SLM-Fabricated GH5188 Co-Superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 831: 142276.
- [5] LIN Y C, HE M, CHEN M S, et al. Effects of Initial δ Phase (Ni_3Nb) on Hot Tensile Deformation Behaviors and Material Constants of Ni-Based Superalloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(1): 107-117.
- [6] 王梦真, 林健, 呼啸, 等. GH4169 镍基合金板材高温拉伸性能研究[J]. *铸造技术*, 2023, 44(12): 1109-1115. WANG M Z, LIN J, HU X, et al. Study on the Tensile Properties of GH4169 Alloy Sheet at High Temperature[J]. *Foundry Technology*, 2023, 44(12): 1109-1115.
- [7] KONG R, MENG B, MA X, et al. Hot Deformation Behavior and Microstructure Evolution of Inconel 625 Superalloy Sheet[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 915: 165367.
- [8] 张冬旭, 温志勋, 岳珠峰. GH3230 高温合金热变形行为及本构模型研究[J]. *稀有金属*, 2014, 38(6): 986-992. ZHANG D X, WEN Z X, YUE Z F. Hot Deformation Behavior and Constitutive Model of GH3230 Alloy[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2014, 38(6): 986-992.
- [9] EL MEHTEDI M, MUSHARAVATI F, SPIGARELLI S. Modelling of the Flow Behaviour of Wrought Aluminium Alloys at Elevated Temperatures by a New Constitutive Equation[J]. *Materials & Design*, 2014, 54: 869-873.
- [10] LIN Y C, CHEN X M. A Critical Review of Experimental Results and Constitutive Descriptions for Metals and Alloys in Hot Working[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(4): 1733-1759.
- [11] LIN Y C, CHEN X M. A Combined Johnson-Cook and Zerilli-Armstrong Model for Hot Compressed Typical High-Strength Alloy Steel[J]. *Computational Materials Science*, 2010, 49(3): 628-633.
- [12] ZHANG H J, WEN W D, CUI H T. Behaviors of IC10 Alloy over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures: Experiments and Modeling[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 504(1/2): 99-103.
- [13] SHOKRY A, GOWID S, KHARMANDA G. An Improved Generic Johnson-Cook Model for the Flow Prediction of Different Categories of Alloys at Elevated Temperatures and Dynamic Loading Conditions[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 27: 102296.
- [14] SHOKRY A, GOWID S, YOUSSEF S S. Modeling the Flow Behavior of Haynes 214 Superalloy during Hot Deformation Using Mathematical and Artificial Intelligence-Based Models[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 33: 104326.
- [15] 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.
- [16] NIU L Q, CAO M, LIANG Z L, et al. A Modified Johnson-Cook Model Considering Strain Softening of A356 Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 789: 139612.
- [17] HE D G, LIN Y C, WANG L H, et al. Influences of Pre-Precipitated δ Phase on Microstructures and Hot Compressive Deformation Features of a Nickel-Based Superalloy[J]. *Vacuum*, 2019, 161: 242-250.
- [18] SPIGARELLI S, EL MEHTEDI M. A New Constitutive Model for the Plastic Flow of Metals at Elevated Temperatures[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(2): 658-665.
- [19] DENG W W, LU H F, XING Y H, et al. Effect of Laser Shock Peening on Tensile Properties and Microstructure of Selective Laser Melted 316L Stainless Steel with Different Build Directions[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 850: 143567.
- [20] WANG X, MUÑIZ-LERMA J A, SANCHEZ-MATA O, et al. Characterization of Single Crystalline Austenitic Stainless Steel Thin Struts Processed by Laser Powder Bed Fusion[J]. *Scripta Materialia*, 2019, 163: 51-56.
- [21] SU J, RAABE D, LI Z M. Hierarchical Microstructure Design to Tune the Mechanical Behavior of an Interstitial TRIP-TWIP High-Entropy Alloy[J]. *Acta Materialia*, 2019, 163: 40-54.
- [22] GUTIERREZ-URRUTIA I, RAABE D. Dislocation and Twin Substructure Evolution during Strain Hardening of an Fe-22wt.% Mn-0.6wt.% C TWIP Steel Observed by Electron Channeling Contrast Imaging[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(16): 6449-6462.
- [23] NAZZAL M A, KHRAISHEH M K, ABU-FARHA F K. The Effect of Strain Rate Sensitivity Evolution on Deformation Stability during Superplastic Forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 191(1/2/3): 189-192.
- [24] XU R R, LI M Q, LI H. Kinetic Analysis and Strain-Compensated Constitutive Models of Ti-42.9Al-4.6Nb-2Cr during Isothermal Compression[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2020, 30(2): 260-269.
- [25] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [26] SAVAEDI Z, MOTALLEBI R, MIRZADEH H. A Review of Hot Deformation Behavior and Constitutive Models to Predict Flow Stress of High-Entropy Alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 903: 163964.
- [27] 杨京, 王伟, 张双杰, 等. 15CrMoG 耐高温合金钢 Johnson-Cook 本构模型建立与精度分析[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(9): 159-167. YANG J, WANG W, ZHANG S J, et al. Establishment and Accuracy Analysis of Johnson-Cook Constitutive Model for 15CrMoG High-Temperature Resistant Alloy Steel[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15(9): 159-167.