

304 奥氏体不锈钢高温流动行为及应变硬化型本构方程

侯 东^{1,2}, 聂京凯^{1,2}, 陈国宏³, 刘晓圣^{1,2}, 田 一^{1,2}, 姬 军^{1,2}, 韩 钰^{1,2}

(1. 国网智能电网研究院有限公司 先进输电技术全国重点实验室, 北京 102209;

2. 国网智能电网研究院有限公司 电工新材料研究所, 北京 102209; 3. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230009)

摘要: 通过等温热拉伸实验, 研究了 304 奥氏体不锈钢在加热温度为 650~1100 °C 及应变速率为 0.001~0.1 s⁻¹ 条件下的热变形行为及微观组织演变规律, 并建立了应变硬化型本构方程。结果表明: 材料微观组织主要由奥氏体组成, 800 °C 以下时在变形晶界处析出大量的 M₂₃C₆ 型碳化物相; 950 °C 以上时变形材料主要发生动态再结晶, 且再结晶晶粒尺寸随温度升高而增大。304 奥氏体不锈钢的流动行为对变形温度和应变速率敏感, 随变形温度升高或应变速率降低, 真实应力呈下降趋势; 此外, 材料表现出较长周期的应变硬化行为。基于材料的应变速率硬化效应及应变硬化效应, 考虑温度补偿建立了预测精度较高的应变硬化型本构方程, 各变形条件下模型的相关系数均在 95.12% 以上, 平均绝对误差不超过 10.48%。

关键词: 304 奥氏体不锈钢; 热拉伸变形; 应变硬化; 应变速率硬化; 本构方程

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.12.029

中图分类号: TG142.71

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 12-0233-10

High temperature flow behavior and strain hardening constitutive equation of 304 austenitic stainless steel

Hou Dong^{1,2}, Nie Jingkai^{1,2}, Chen Guohong³, Liu Xiaosheng^{1,2}, Tian Yi^{1,2}, Ji Jun^{1,2}, Han Yu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. Department of Electrical Engineering New Materials, State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 3. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230009, China)

Abstract: Through isothermal hot tensile experiments, the hot deformation behavior and microstructure evolution laws of 304 austenitic stainless steel under the conditions of the high temperature of 650–1100 °C and the strain rate of 0.001–0.1 s⁻¹, and the strain hardening constitutive equation was established. The results indicate that the microstructure of 304 austenitic stainless steel is mainly composed of austenite, and a large amount of M₂₃C₆ carbide phases are precipitated at the deformation grain boundaries below 800 °C. The dynamic recrystallization mainly occurs in deformed materials above 950 °C, and the size of the recrystallized grains increases with the increasing of deformation temperature. The rheological behavior of 304 austenitic stainless steel is sensitive to deformation temperature and strain rate, and the rheological stress decreases with the increasing of deformation temperature and the decreasing of strain rate. In addition, long-period strain hardening behavior is exhibited in 304 austenitic stainless steel. Based on the strain rate hardening effect and strain hardening effect of materials, a strain hardening constitutive equation with high prediction accuracy was established considering the temperature compensation. The correlation coefficients of models under various deformation conditions are all more than 95.12%, and the average absolute errors are less than 10.48%.

Key words: 304 austenitic stainless steel; hot tensile deformation; strain hardening; strain rate hardening; constitutive equation

不锈钢因其良好的韧塑性、优异的耐腐蚀性和无磁性等特点被广泛应用于变电站和换流站的建设。其中, 应用最为广泛的奥氏体不锈钢即使在高温下也具有较好的力学性能和优异的耐晶间腐蚀能力, 镍铬元素在高温下形成的致密氧化膜保证了其耐蚀

性及防火性^[1]。目前, 不少研究学者以拉伸和压缩等方式研究了奥氏体不锈钢的高温力学行为, 发现在热变形过程中会同时发生依赖于温度、应变速率及应变量的应变硬化和动态软化行为, 且由于奥氏体不锈钢的层错能较低, 动态再结晶为其主要软化机理^[2-5]。Xu S 等^[2]研究了 7Mo 超级奥氏体不锈钢的高温变形行为与动态软化机制, 发现其最佳变形工艺窗口为变形温度为 1030~1200 °C 及应变速率为 0.001~0.07 s⁻¹; 此外, 随温度升高或应变速率降低, 材料的软化机制逐渐由动态回复演变为不连续

收稿日期: 2024-01-21; 修订日期: 2024-04-18

基金项目: 国家电网公司科技项目 (5500-202158330A-0-0-00)

作者简介: 侯 东 (1990-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: hd61140161@163.com

动态再结晶与连续动态再结晶。Shaban G M 等^[3]研究了 AISI 321 奥氏体不锈钢在变形温度为 800~1200 ℃ 及应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 时的热压缩行为,发现在低温 800~950 ℃ 时动态回复为其主要软化机制,而在高温 1000~1200 ℃ 时主要软化机制为动态再结晶。柳木桐等^[6]通过热压缩模拟实验探索了 S280 超高强度不锈钢在变形温度为 800~1150 ℃ 及应变速率为 0.001~10 s⁻¹ 下的热变形行为,发现最佳工艺窗口为变形温度为 1095~1150 ℃ 和应变速率为 0.001~0.04 s⁻¹,此窗口内材料变形机制以动态再结晶为主。王刚等^[7]研究了 304 奥氏体不锈钢的高温拉伸锯齿流变行为,发现该行为与镍锰等置换型溶质原子和位错交互作用诱导的动态应变时效有关。高建斌等^[8]基于热机模拟实验探索了铸态及锻态 304L 不锈钢在高温 950~1150 ℃ 及应变速率为 0.1 s⁻¹ 下的热变形行为,发现铸态试样的应力-应变曲线以加工硬化为主,而锻态试样的应力-应变曲线则呈现稳态流变特性。宋仁伯等^[9]探究了温度与应变速率对 316L 不锈钢高温压缩流动行为的影响,发现 316L 不锈钢由于只发生部分动态再结晶和孪晶,导致材料加工硬化的效果优于其流动软化,因此,材料流动应力随应变的增加而逐渐增大。此外,考虑变形参数对流动应力的影响,建立了耦合温度、应变速率和应变量的流动应力模型,实现了对 316L 不锈钢热变形行为的预测。

目前,依据建模方法,本构模型可分为基于物理内变量本构模型和唯象型本构模型两大类。其中,前者耦合了材料宏微观变形机理,可实现对变形时材料宏观力学行为和微观组织演变的预测。赵慧俊等^[10]基于 TA15 合金中片状 α 相的球化软化机制,综合考虑温度、应变速率和应变变量对材料内部位错密度、相变及球化率的影响,建立了统一黏塑性本构模型,并采用遗传算法实现了材料常数的求解,实现了对 TA15 钛合金高温流变行为的有效预测。但基于物理内变量本构模型中材料常数通常较多,且模型各非线性微分方程之间的耦合程度较高,很难通过常规的拟合或解析方法获得材料常数。相反,唯象型本构模型具有拟合参数少、简单易用以及适用范围广等优势,已广泛应用于钛合金、不锈钢及无取向电工钢等材料高温变形本构模型的建立。孙越等^[11]基于热压缩实验研究了 TC21 钛合金的热变形行为,并建立了其 Arrhenius 本构模型及热加工图。Zhu F H 等^[12]综合考虑峰值流动应力和应变补偿建立了一种修正的 Arrhenius 方程,通过单一表达

式实现了对 TC4 钛合金硬化和软化行为的高效、高精度预测。曹建国等^[13]基于优化的 Arrhenius 型框架,建立了高效预测无取向电工钢在奥氏体区、奥氏体-铁素体两相区及铁素体区热连轧过程加工硬化与软化机制的统一本构模型。裴文娇等^[14]基于热模拟实验探索了 316L 不锈钢的压缩流变行为,并建立了准确预测其流动行为的 Arrhenius 本构方程。

综上,材料的高温流动行为与变形工艺、温度、应变速率及应变变量等外部参数及材料成分、组织结构等息息相关。然而,目前针对 304 奥氏体不锈钢的高温变形行为、微观组织演变及本构模型的研究相对较少,尚不明确其流动行为及变形机理。鉴于此,本文研究了电站用 304 奥氏体不锈钢在火灾时的高温力学行为,汲取了上述学者研究不锈钢材料高温流变特性的方法,采用 Gleeble-1500 热模拟试验机开展 304 奥氏体不锈钢的高温流变特性研究,分析了温度和应变速率对流动应力、应变硬化和应变速率硬化行为的影响,并基于其流动特性构建了应变硬化型本构模型,为变电站、换流站在火灾时使用 304 不锈钢的可靠性及后续使用性能提供参考依据。

1 实验材料及方法

本实验所用的材料为热轧态 304 奥氏体不锈钢板,化学成分如表 1 所示,其中, Cr、Ni、Mn 和 Si 为其主要元素。利用线切割沿不锈钢板轧制方向加工出高温单向拉伸试样,试样标距段尺寸为 40 mm×6 mm×4 mm,具体形状及尺寸见图 1。采用 Gleeble-1500 热模拟试验机以 10 ℃·s⁻¹ 的升温速度将试样分别加热至 650、800、950 和 1100 ℃,随后分别以 0.001、0.01 和 0.1 s⁻¹ 的初始应变速率进行等温拉伸以获得其高温强度,实验结束后立即进行水冷处理以保留高温组织。在距离拉伸试样断口 10 mm 处切取金相试样,以拉伸方向-横向为观察面进行微观组织观察。经研磨抛光后,采用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀金相试样,腐蚀时间约为 10~15 s,再使用日本 OLYMPUS GX51 型光学显微镜观察其组织演变特征。

表 1 轧制态 304 奥氏体不锈钢化学成分 (%, 质量分数)
Table 1 Chemical compositions of 304 austenitic stainless steel in rolled state (%, mass fraction)

Cr	Ni	Mn	Si	C	N	P	S	Fe
18.9	8.3	1.3	0.33	0.05	0.05	0.03	0.01	余量

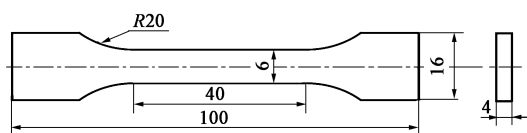


图 1 高温单向拉伸试样示意图

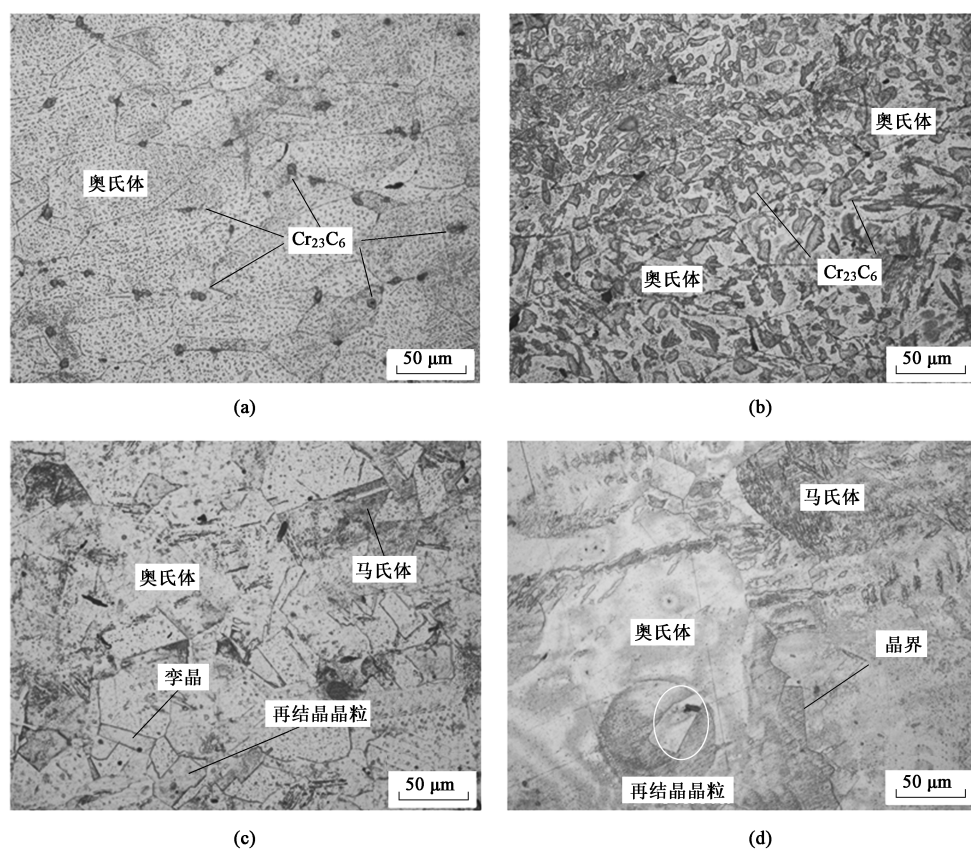
Fig. 1 Schematic diagram of uniaxial tensile specimen at high temperature

2 实验结果及分析

2.1 不同变形参数下 304 奥氏体不锈钢微观组织演变

图 2 为 304 奥氏体不锈钢在应变速率为 0.001 s^{-1} 、变形温度为 650、800、950 和 1100 $^{\circ}\text{C}$ 下变形后的微观组织。由于 450~850 $^{\circ}\text{C}$ 为奥氏体不锈钢的敏化温度, 因此, 在 650 和 800 $^{\circ}\text{C}$ 变形后的最终组织由伸长的奥氏体晶粒及沿晶界处析出的富 Cr 的 M_{23}C_6 型

碳化物相组成^[15-16], 如图 2 所示。此外, 在敏化温度区间内, M_{23}C_6 型碳化物相的含量随变形温度升高逐渐增多, 且逐渐由不连续颗粒状转变为粗条状, 这与高敏化温度下较高的 Cr 原子的扩散驱动力、较多的碳化物析出量及较快的长大速度有关。然而, 沿晶界析出的 M_{23}C_6 型碳化物可钉扎晶界、阻碍晶界滑移与位错运动, 导致位错堆积与缠结, 进而起到强化作用。在高温 950 和 1100 $^{\circ}\text{C}$ 下变形后, 晶界处的 M_{23}C_6 型碳化物相基本消失, 材料组织主要为奥氏体相及少量的马氏体相, 即在高温变形时 304 奥氏体不锈钢发生了动态相变。此外, 950 $^{\circ}\text{C}$ 变形后的奥氏体晶粒尺寸明显减小且其内部存在少量的孪晶界, 这表明材料发生了动态再结晶与孪晶转变。然而, 在高温 1100 $^{\circ}\text{C}$ 变形后 304 奥氏体不锈钢中奥氏体局部存在细小的再结晶晶粒, 但晶粒尺寸整体较大, 即高温变形时存在动态再结晶以及明显的晶粒长大行为。

图 2 应变速率为 0.001 s^{-1} 时 304 奥氏体不锈钢在不同变形温度下的微观组织(a) 650 $^{\circ}\text{C}$ (b) 800 $^{\circ}\text{C}$ (c) 950 $^{\circ}\text{C}$ (d) 1100 $^{\circ}\text{C}$ Fig. 2 Microstructures of 304 austenitic stainless steel at different deformation temperatures under strain rate of 0.001 s^{-1}

2.2 304 奥氏体不锈钢高温变形流动应力-应变曲线

图 3 为不同变形温度及应变速率下 304 奥氏体不锈钢高温拉伸变形的真实应力-真实应变曲线。

显然, 304 奥氏体不锈钢在高温变形时的真实应力-真实应变曲线均存在弹性变形阶段、较长周期的加工硬化阶段和流动软化阶段。其中, 在弹性变形阶

段,材料流动应力随应变的增加而迅速增大,这与位错的快速增殖积累有关。材料的高温流动行为是应变硬化和流动软化之间博弈的综合结果^[17]。304 奥氏体不锈钢较长周期的加工硬化行为可能与其晶体结构有关,面心立方结构相在变形时可同时开动多个滑移系统,相交的滑移系统相互干扰,导致其呈现出较强的应变硬化效应。304 奥氏体不锈钢因层错能较低,在高温变形时通常具有相对较弱的动态回复,因此,变形后期的流动软化现象与其动态再结晶及局部颈缩的形成有关^[4]。此外,真实应力-真实应变曲线表明,304 奥氏体不锈钢的流动应力

对变形温度和应变速率十分敏感,特别是峰值应力,如图 4a 所示。流动应力/峰值应力随变形温度增加或应变速率降低而显著下降,这可能与高温下金属热激活效应增加、原子平均动能增加、金属临界分切应力削弱、位错和空位运动及晶面间滑移阻力的减弱以及滑移系增多有关。此外,高温下由位错运动(交滑移和攀移)导致的动态再结晶也可降低材料流动应力。而恒定温度下,流动应力随应变速率的增加而增大,与大应变速率时位错增殖和位错运动速度的增加、合金内部畸变的增加以及位错塞积有关。

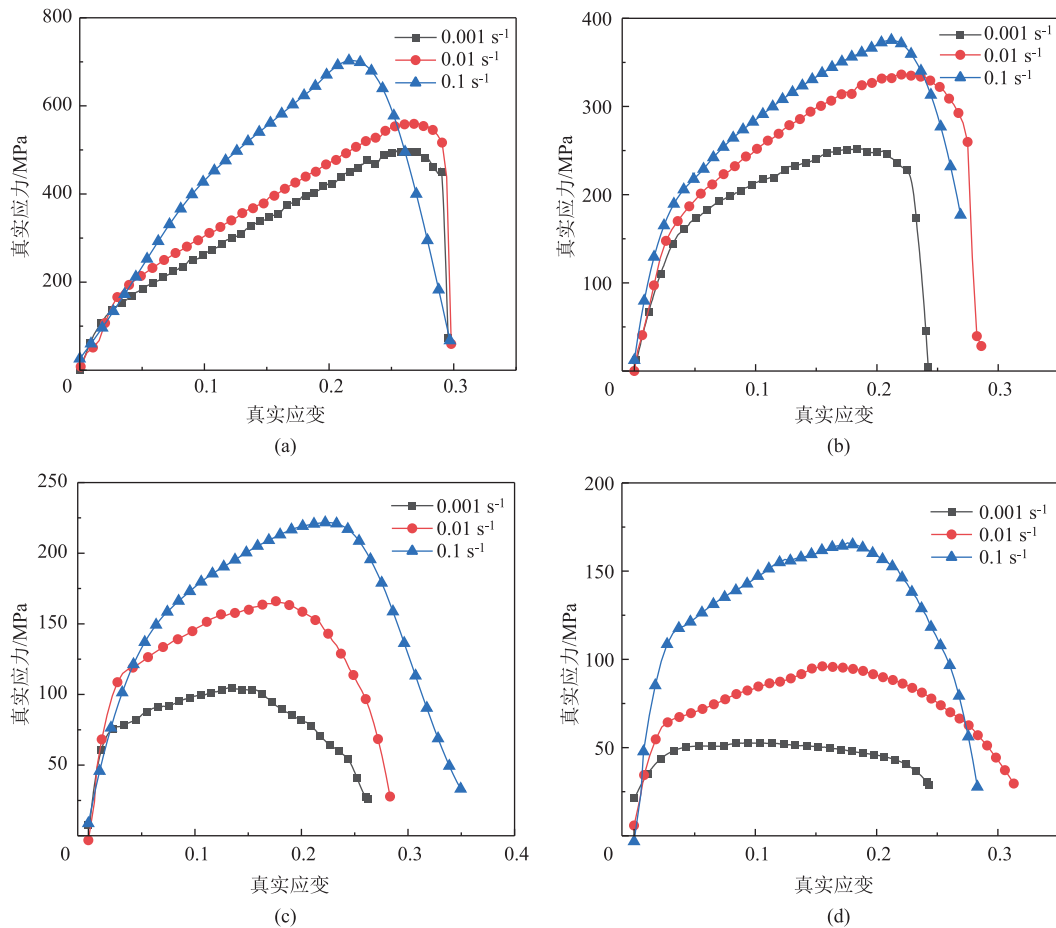


图 3 不同变形温度与应变速率下 304 奥氏体不锈钢的真实应力-真实应变曲线

(a) 650 °C (b) 800 °C (c) 950 °C (d) 1100 °C

Fig. 3 True stress-true strain curves of 304 austenitic stainless steel at different deformation temperatures and strain rates

变形温度和应变速率对 304 奥氏体不锈钢伸长率的影响如图 4b 所示。在高应变速率 (0.1 s^{-1}) 和低应变速率 (0.001 s^{-1}) 时,伸长率随温度升高呈现出先降低后增加再降低的趋势;而在应变速率为 0.01 s^{-1} 时,伸长率呈现出先降低后增加的趋势。在 $950 \text{ °C}-0.1 \text{ s}^{-1}$ 和 $1100 \text{ °C}-0.01 \text{ s}^{-1}$ 条件下时材料的塑性变形能力较强,伸长率均在 35% 以上。特

别地,在低应变速率 (0.001 s^{-1}) 时,材料的伸长率普遍较低,这可能与低应变速率下材料有充裕的时间发生晶粒粗化进而诱导塑性恶化有关。

2.3 304 奥氏体不锈钢高温变形应变硬化行为

金属材料在屈服后发生不可逆的塑性变形,通常需要不断增大外力以驱动塑性变形持续进行,这表明金属材料具有阻止塑性变形持续进行的能力,

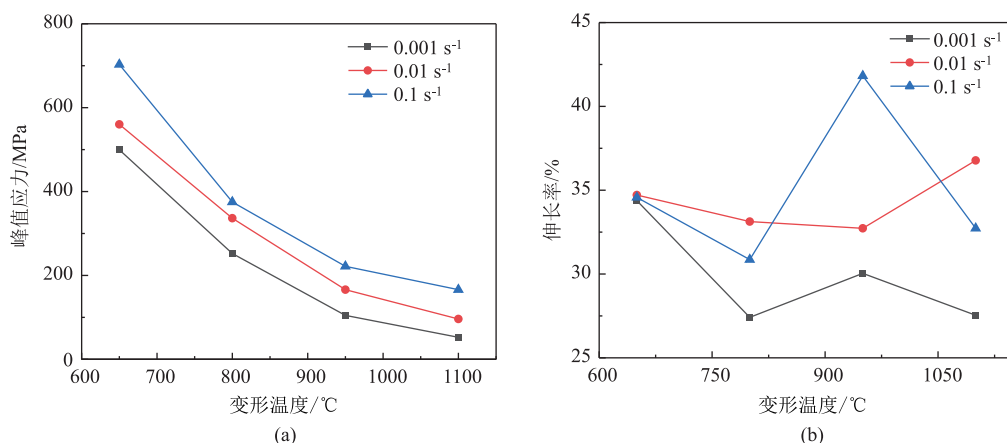


图 4 不同变形温度与应变速率下 304 奥氏体不锈钢的峰值应力 (a) 和伸长率 (b)

Fig. 4 Peak stress (a) and elongation rate (b) of 304 austenitic stainless steel at different deformation temperatures and strain rates

即应变硬化。304 奥氏体不锈钢的应变硬化现象可用应变硬化率 θ 表示, 其正负值分别表示应变硬化和流动软化行为, 计算公式为:

$$\theta = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (1)$$

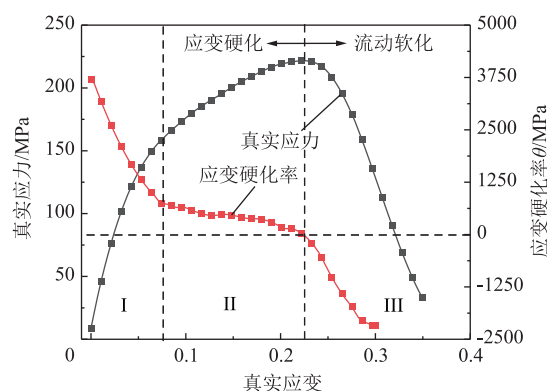
式中: σ 和 ε 分别为真实应力和真实应变。

在 950 °C-0.1 s⁻¹ 条件下的应变硬化率曲线及对应的真实应力-真实应变曲线如图 5 所示。应变硬化率曲线表现出 3 个明显不同的阶段, 各阶段的 θ 值均随应变增加呈下降趋势。其中, 阶段 I 和阶段 II 的 θ 值为正值, 即应变硬化速率高于流动软化速率, 材料表现出应变硬化特征。此外, 阶段 I 中较高的初始 θ 值与位错大量快速增殖有关, 而位错抵消或重排会导致 θ 值随应变增加而急剧降低。阶段 II 时, 304 奥氏体不锈钢的应变硬化效果依然强于其流动软化效果, 因此 θ 值为正值; 但随流动软化速率逐渐增加, θ 值逐渐减小至零。阶段 III 时的 θ 值小于零, 材料表现为流动软化现象, 这与位错密度降低、晶粒尺寸增加及内部损伤导致承载力减小有关。

峰值应力对应的应变为应变硬化和流动软化的临界应变 ε_c , 通常 ε_c 越大表明材料均匀塑性变形能力越强。变形温度和应变速率对 304 奥氏体不锈钢的应变硬化率及临界应变的影响如图 6 所示, 显然, θ 值和 ε_c 值随温度降低或应变速率增大而增大, 这与晶界处 M₂₃C₆ 型碳化物对晶界滑移与位错运动的钉扎作用有关。

2.4 304 奥氏体不锈钢高温变形应变速率硬化行为

由真实应力-真实应变曲线可知, 在 650 ~ 1100 °C 范围内, 304 奥氏体不锈钢的高温流动应力对应变速率异常敏感。在相同变形温度下, 流动应

图 5 304 奥氏体不锈钢在 900 °C-0.1 s⁻¹ 条件下的真实应力-真实应变曲线及应变硬化率曲线Fig. 5 True stress-true strain curve and strain hardening rate curve of 304 stainless steel in condition of 900 °C-0.1 s⁻¹

力随应变速率的增大而增加, 这表明 304 奥氏体不锈钢在高温变形时具有强烈的应变速率硬化行为。应变速率敏感性指数 m 可用于表征材料的应变速率硬化行为及抑制或抵抗塑性变形时颈缩扩展的能力, 其值可通过 Fields-Backofen 模型 $\sigma = K\dot{\varepsilon}^m \varepsilon^n$ (K 为与温度有关的系数, n 为应变强化指数) 计算获得, 其表达式为:

$$m = \left. \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\varepsilon}} \right|_{\varepsilon, T} \quad (2)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s⁻¹; T 为变形温度, K。

图 7 为 304 奥氏体不锈钢在真实应变为 0.15 时的 $\ln \sigma - \ln \dot{\varepsilon}$ 关系曲线, 其直线斜率即为不同变形温度下的 m 值。显然, m 值随着变形温度的升高先减小后增大, 在 800 和 1100 °C 时分别为最小值 0.071 和最大值 0.250, 即 304 奥氏体不锈钢在 800 °C 时的抑制或抵抗颈缩的能力较弱, 这也可通过图 4b 中

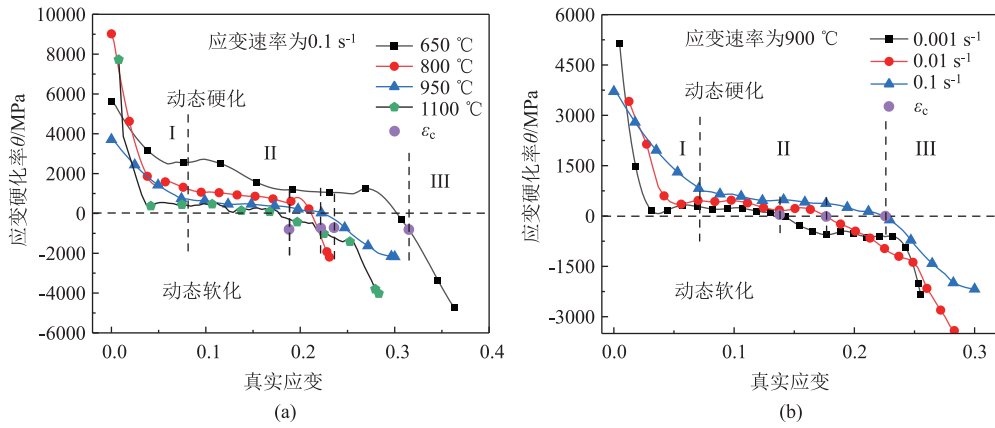


图 6 变形温度 (a) 与应变速率 (b) 对 304 奥氏体不锈钢应变硬化率的影响

Fig. 6 Effect of deformation temperature (a) and strain rate (b) on strain hardening rate for 304 austenitic stainless steel

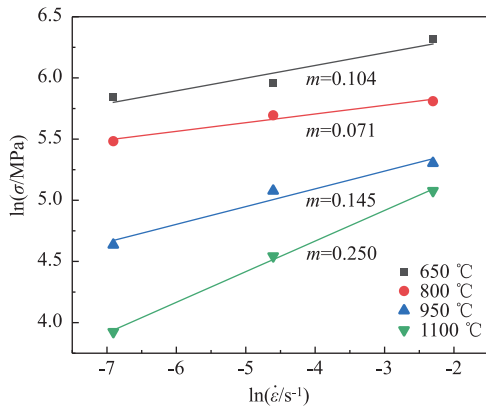


图 7 304 奥氏体不锈钢在应变为 0.15 时的应变速率敏感性指数

Fig. 7 Strain rate sensitivity indexes of 304 austenitic stainless steel at strain of 0.15

相对较低的伸长率来佐证。而 304 奥氏体不锈钢在高温 1100 °C 时较强的抵抗颈缩形成及扩展的能力与位错运动阻力减少和滑移系增大有关。

综合图 3~图 7 可知, 304 奥氏体不锈钢在火灾温度不超过 800 °C 时, 特别是在较低温 (650 °C) 及高应变速率 (0.1 s^{-1}) 和小应变 ($0 \sim 0.2$) 条件下具有较好的抵抗高温塑性变形的能力。

2.5 304 奥氏体不锈钢高温变形应变硬化模型构建、参数求解及有效性评估

根据图 3 所示的真实应力-真实应变曲线可知, 304 奥氏体不锈钢在高温变形时表现出较强的应变硬化和应变速率硬化行为。此外, 图 5 所示的应变硬化率曲线表现为线性和非线性叠加关系, 因此, 建立描述材料在硬化阶段的硬化率曲线特性的公式如下^[18]:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = A + B e^{-\mu \varepsilon} \quad (3)$$

式中: A 、 B 和 μ 为材料常数。

对式 (3) 积分, 获得真实应力与真实应变之间的关系:

$$\sigma = A \varepsilon - \frac{B}{\mu} e^{-\mu \varepsilon} + C \quad (4)$$

式中: C 为材料常数。

由于当 $\varepsilon = 0$ 时, 真实应力 $\sigma = 0$, 因此, 将此边界条件带入式 (4) 中得到:

$$\sigma = A \varepsilon + C(1 - e^{-\mu \varepsilon}) \quad (5)$$

显然, 式 (5) 中的稳态流变硬化率为常数, 这一假设与实际条件不符。考虑到应变速率对参数 A 的影响, 并基于 Fields-Backofen 方程对式 (5) 进行修正, 建立应变硬化型本构方程如下:

$$\sigma = A \varepsilon \dot{\varepsilon}^{m_1} + C_0 \dot{\varepsilon}^{m_2} (1 - e^{-\mu \varepsilon}) \quad (6)$$

式中: C_0 为材料常数; m_1 和 m_2 为该本构方程中的应变速率敏感性指数。

通过对同一变形温度、不同应变速率下的真实应力-真实应变曲线进行拟合, 获得 5 组材料常数, 其数值如图 8 中散点所示, 其中, R^2 为决定系数。考虑到本文所建的应变硬化型本构方程中的材料常数对变形温度的依赖性, 采用二次回归方法建立温度补偿。其中, 变形温度与材料常数之间的映射关系如式 (7) 所示:

$$\mathbf{M}_A \begin{bmatrix} T^2 \\ T \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ C_0 \\ \mu \\ m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: \mathbf{M}_A 为温度系数矩阵。

进一步, 通过式 (7) 对图 8 所示不同变形温

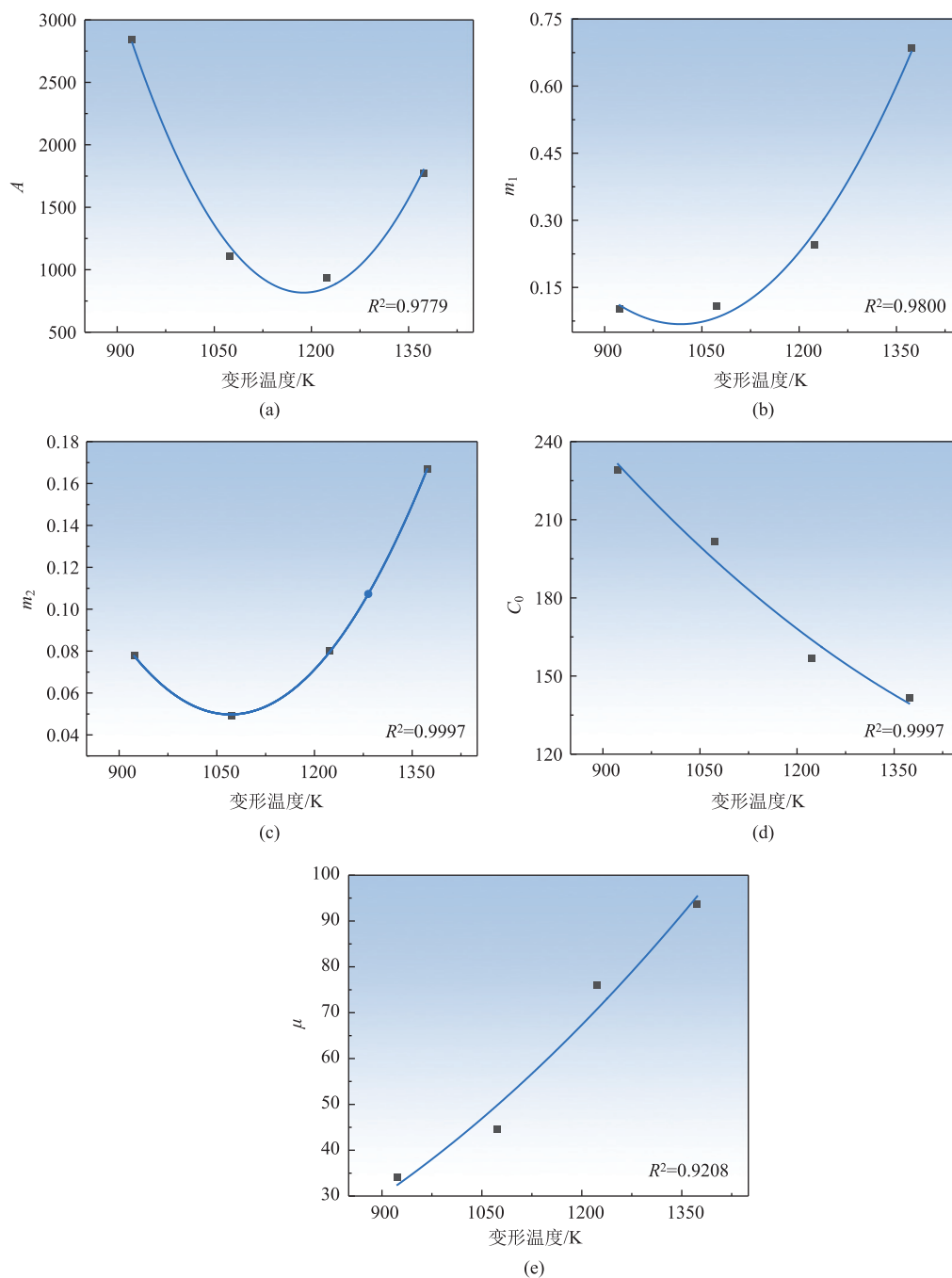


图 8 本构方程的参数拟合曲线

(a) A (b) m_1 (c) m_2 (d) C_0 (e) μ

Fig. 8 Parameter fitting curves of constitutive equation

度下的材料常数进行非线性拟合, 获得材料常数矩阵 \mathbf{M}_A 为:

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} 0.02858 & -67.89 & 41135.47 \\ 1.40 \times 10^{-4} & -0.5246 & 596.74 \\ 7.97 \times 10^{-5} & -0.04301 & 4.25 \\ 4.80 \times 10^{-6} & -0.00977 & 5.04 \\ 1.28 \times 10^{-6} & -0.00274 & 1.519 \end{bmatrix} \quad (8)$$

本文所构建的应变硬化型本构方程对不同变形条件下 304 奥氏体不锈钢的高温流动应力预测值与实验值的对比如图 9 所示, 其中, 曲线为预测结果, 散点为实验结果。显然, 本文所建立的应变硬化型本构方程可较好地预测 304 奥氏体不锈钢在不同变形温度及应变速率下的真实应力, 同时可较好地描述材料的应变硬化、应变速率硬化和高温软化行为。

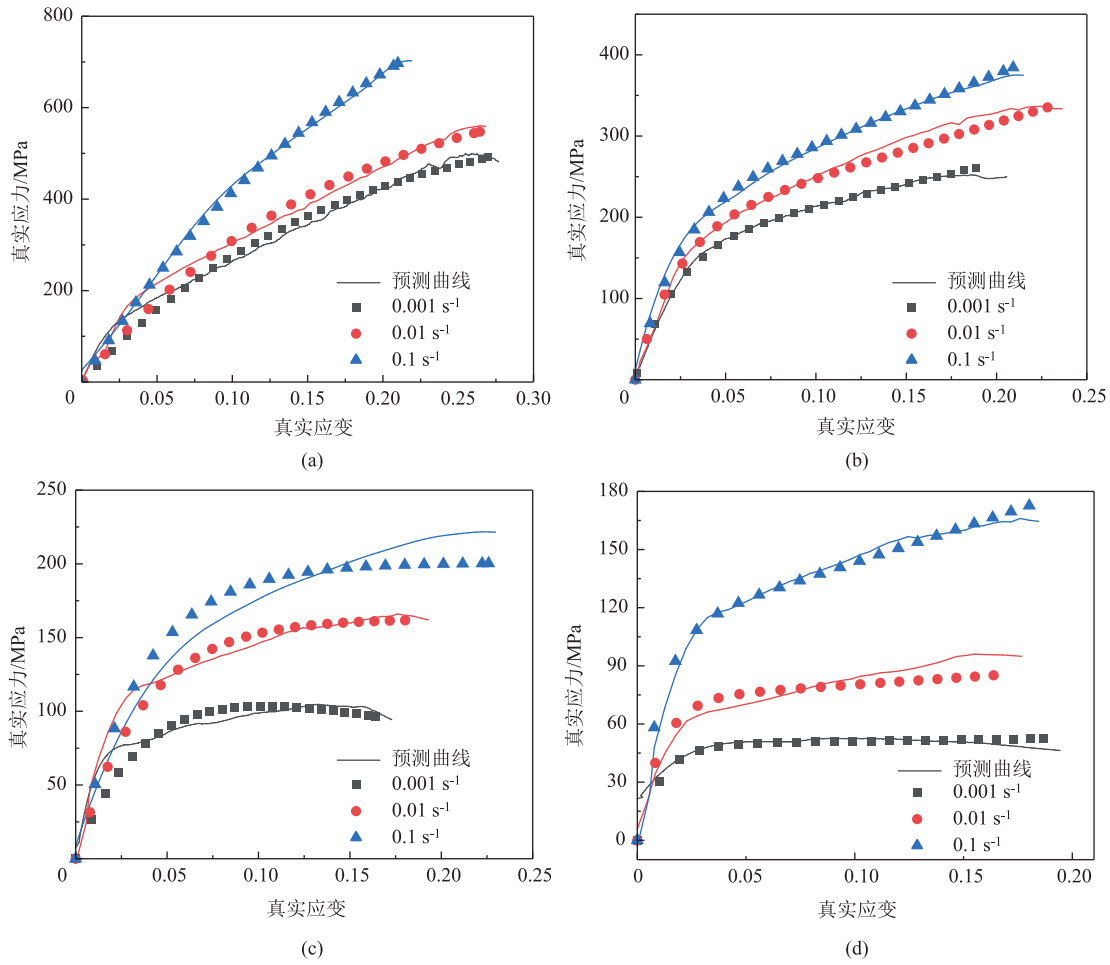


图 9 实验结果与本构模型预测结果对比

(a) 650 °C (b) 800 °C (c) 950 °C (d) 1100 °C

Fig. 9 Comparison between experimental results and prediction results by constitutive model

为了进一步量化所建立的应变硬化型本构方程的预测精度,采用统计学指标线性相关系数 R 和平均绝对误差 $AARE$ 对模型进行有效性评估,表达式为:

$$\left\{ \begin{aligned} R_{ij} &= \frac{\sum_{k=1}^N (E_{ijk} - \bar{E})(P_{ijk} - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (E_{ijk} - \bar{E})^2} \sqrt{\sum_{k=1}^N (P_{ijk} - \bar{P})^2}} \times 100\% \\ AARE &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| \frac{E_{ijk} - P_{ijk}}{E_{ijk}} \right| \times 100\% \end{aligned} \right. \quad (9)$$

式中: R_{ij} 为温度水平 i 和应变速率水平 j 条件下的相关系数, $i \in [1, 4]$, $j \in [1, 3]$; E_{ijk} 和 P_{ijk} 分别为温度水平 i 和应变速率水平 j 条件下,应变点 k 时真实应力的实验值与预测值; \bar{E} 和 \bar{P} 分别为 E_{ijk} 和 P_{ijk} 的平均值; N 为单条应力-应变曲线上的应变

点数。

图 10a 和图 10b 分别为不同变形温度和应变速率下,相关系数 R 和平均绝对误差 $AARE$ 的变化曲线。可见,相关系数在 95.12%~99.94% 之间,即本文所建立的应变硬化型本构方程的预测值与实验值之间具有较强的线性相关性。平均绝对误差 $AARE$ 在 1.75%~10.48% 之间。在 950 °C 变形时,平均绝对误差 $AARE$ 整体较高,其值均在 8.5% 以上。在 800 °C 变形时, $AARE$ 相对较低,其值均在 3.8% 以下。应变速率为 0.0005 s⁻¹ 时, $AARE$ 值最大,但随应变速率的增加, $AARE$ 值逐渐降低。综上,本文所建立的应变硬化型本构方程具有较高的预测精度,可以较好地用于预测 304 奥氏体不锈钢的高温流动行为。此外,该方程与常用于描述中、低应变速率下金属材料热变形行为的 Arrhenius 方程相比,具有模型形式简单、参数求解方便等优势。

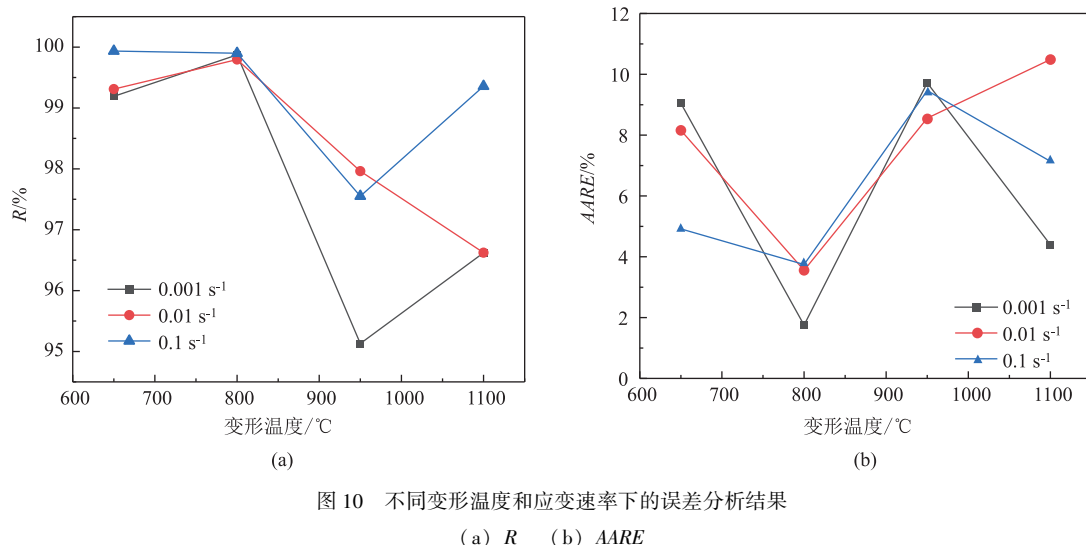


图 10 不同变形温度和应变速率下的误差分析结果

(a) R (b) AARE

Fig. 10 Error analysis results at different deformation temperatures and strain rates

3 结论

(1) 304 奥氏体不锈钢的微观组织对变形温度显著敏感。在温度不超过 800 °C 时, 材料组织主要由奥氏体及沿晶界析出的 $M_{23}C_6$ 型碳化物相组成, 且碳化物含量及尺寸均正比于变形温度。变形温度在 950 °C 以上时, 材料发生动态相变及动态再结晶, 材料组织主要为奥氏体和马氏体, 且再结晶晶粒会随温度升高而显著粗化。

(2) 304 奥氏体不锈钢的真实应力-真实应变曲线具有较长周期的应变硬化特征, 同时表现出应变速率硬化和高温流动软化特征, 即随变形温度升高或应变速率降低, 真实应力呈下降趋势。

(3) 基于应变硬化和应变速率硬化效应, 建立了 304 奥氏体不锈钢在变形温度为 650~1100 °C 和应变速率为 0.001~0.1 s⁻¹ 条件下的考虑温度补偿的应变硬化型本构方程, 真实应力预测值与实验值之间的相关系数在 95.12% 以上, 平均绝对误差值在 10.48% 以下, 即所建应变硬化型本构方程的预测精度较高。

参考文献:

- [1] Hwang B, Kim T, Ahn Y. Experimental and numerical investigation of austenitic stainless steel (304 type) slit damper structural behavior [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 196: 111551.
- [2] Xu S, He J S, Zhang R Z, et al. Hot deformation behaviors and dynamic softening mechanisms of 7Mo super-austenitic stainless steel with high stacking fault energy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23: 1738-1752.
- [3] Shaban G M, Eghbali B. Characterization of the hot deformation microstructure of AISI 321 austenitic stainless steel [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 730: 380-390.
- [4] Hu Y, Wang L H, Ouyang M H, et al. Hot deformation behaviors and dynamic softening mechanism of 6% Si high-silicon austenitic stainless steel [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 4263-4281.
- [5] Huang K, Logé R E. Microstructure and flow stress evolution during hot deformation of 304L austenitic stainless steel in variable thermomechanical conditions [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 711: 600-610.
- [6] 柳木桐, 钟平, 刘大博, 等. 超高强度不锈钢热变形行为及加工图 [J]. *航空材料学报*, 2022, 42 (4): 49-56.
Liu M T, Zhong P, Liu D B, et al. Hot deformation behavior and processing map of ultra-high strength stainless steel [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2022, 42 (4): 49-56.
- [7] 王刚, 李志刚, 韩鹏程, 等. 304 奥氏体不锈钢高温拉伸变形时的锯齿流变行为 [J]. *机械工程材料*, 2012, 36 (6): 64-67.
Wang G, Li Z G, Han P C, et al. Serrated flow behavior of 304 austenitic stainless steel during high temperature tension deformation [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2012, 36 (6): 64-67.
- [8] 高建斌, 刘洁, 王晓军. 304 L 不锈钢高温变形组织的演化 [J]. *铸造设备与工艺*, 2014 (2): 45-47.
Gao J B, Liu J, Wang X J. Microstructure evolution of 304L stainless steel during hot deformation [J]. *Foundry Equipment & Technology*, 2014 (2): 45-47.
- [9] 宋仁伯, 项建英, 刘良元, 等. 316L 不锈钢的热变形抗力模型 [J]. *机械工程材料*, 2010, 34 (6): 85-88.
Song R B, Xiang J Y, Liu L Y, et al. Hot deformation resistance model of 316L stainless steel [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2010, 34 (6): 85-88.
- [10] 赵慧俊, 王宝雨, 刘钢, 等. 基于球化机理的 TA15 钛合金热

- 变形统一本构模型[J]. 工程科学学报, 2014, 36 (7): 925-930.
- Zhao H J, Wang B Y, Liu G, et al. Unified constitutive model of TA15 titanium alloy in hot deformation based on the globularization mechanism [J]. Chinese Journal of Engineering, 2014, 36 (7): 925-930.
- [11] 孙越, 孙勇, 杨勇, 等. TC21 钛合金热压缩本构方程及热加工图[J]. 锻压技术, 2023, 48 (4): 242-248.
- Sun Y, Sun Y, Yang Y, et al. Constitutive equation and thermal processing map of thermal compression for TC21 titanium alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (4): 242-248.
- [12] Zhu F H, Xiong W, Li X F, et al. A new flow stress model based on Arrhenius equation to track hardening and softening behaviors of Ti6Al4V alloy [J]. Rare Metals, 2017, 37 (12): 1035-1045.
- [13] 曹建国, 王天聪, 李洪波, 等. 基于 Arrhenius 改进模型的无取向电工钢高温变形本构关系[J]. 机械工程学报, 2016, 52 (4): 90-96, 102.
- Cao J G, Wang T C, Li H B, et al. High-temperature constitutive relationship of non-oriented electrical steel based on modified Arrhenius model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (4): 90-96, 102.
- [14] 裴文娇, 郭训忠, 王文涛, 等. 316 L 奥氏体不锈钢的高温流变行为[J]. 塑性工程学报, 2014, 21 (3): 104-110.
- Pei W J, Guo X Z, Wang W T, et al. Flow behaviors of 316L stainless steel at high temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21 (3): 104-110.
- [15] Lyu J L, Luo H Y, Liang T X. Influence of pre-deformation, sensitization and oxidation in high temperature water on corrosion resistance of AISI 304 austenitic stainless steel [J]. Nuclear Engineering & Design, 2016, 309: 1-7.
- [16] Kelidari Y, Kashefi M, Mirjalili M, et al. Eddy current technique as a nondestructive method for evaluating the degree of sensitization of 304 austenitic stainless steel [J]. Corrosion Science, 2020, 173: 108742.
- [17] Ma L X, Wan M, Li W D, et al. Constitutive modeling and processing map for hot deformation of Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.2Si [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 808: 151759.
- [18] Gao F, Li W D, Meng B, et al. Rheological law and constitutive model for superplastic deformation of Ti-6Al-4V [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 701: 177-185.

《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, CJCRC)、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……。

(下转第 256 页)