

304 不锈钢的热变形行为及热加工图

张志红¹, 刘 洁^{1,2}

(1. 晋中信息学院 智能工程学院, 山西 太谷 030800; 2. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 采用 Gleeble-3800 试验机对 304 不锈钢进行热压缩试验, 变形温度为 900~1200 ℃, 应变速率为 0.01~1 s⁻¹, 热压缩试验完成后迅速水冷。对 304 不锈钢的真应力-真应变曲线进行分析, 结果表明, 304 不锈钢的真应力-真应变曲线的类型包括动态回复+动态再结晶曲线和动态再结晶曲线, 并且流动应力随变形温度的升高和应变速率的降低而减小。根据真应力-真应变数据构建了应变补偿的 Arrhenius 本构模型, 相关系数为 0.9932, 相对误差为 6.849%。此外, 根据真应力-真应变数据, 确定了不同温度下各应变速率的功率耗散因子 η 和失稳参数 $\xi(\dot{\epsilon})$, 进而构建了 304 不锈钢的热加工图。根据热加工图确定了 304 不锈钢的最佳加工范围为变形温度为 940~1200 ℃、应变速率为 0.01~1 s⁻¹。

关键词: 304 不锈钢; 热压缩; 真应力-真应变曲线; 本构模型; 热加工图

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.027

中图分类号: TG335.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 11-0202-08

Hot deformation behavior and hot processing map on 304 stainless steel

Zhang Zhihong¹, Liu Jie^{1,2}

(1. School of Intelligent Engineering, Jinzhong College of Information, Taigu 030800, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The hot compression test of 304 stainless steel was carried out by Gleeble-3800 testing machine under the deformation temperature of 900-1200 ℃ and the strain rate of 0.01-1 s⁻¹, and it was quickly water-cooled after the hot compression test. The analysis results of the true stress-true strain curve for 304 stainless steel shows that the types of true stress-true strain curves include dynamic recovery+dynamic recrystallization curve and dynamic recrystallization curve, and the flow stress decreases with the increasing of deformation temperature and the decreasing of strain rate. A strain-compensated Arrhenius constitutive model is constructed based on the true stress-true strain data, with the correlation coefficient of 0.9932 and the relative error of 6.849%. In addition, based on the true stress-true strain data, power dissipation factor η and the instability parameter $\xi(\dot{\epsilon})$ of each strain rate at different temperatures are determined, and then the hot processing map of 304 stainless steel is constructed. According to the hot processing map, the optimal processing range for 304 stainless steel is the temperature of 940-1200 ℃ and the strain rate of 0.01-1 s⁻¹.

Key words: 304 stainless steel; hot compression; true stress-true strain curve; constitutive model; hot processing map

304 奥氏体不锈钢是核电大锻件的主要材料之一^[1]。国内关于 304 不锈钢的研究较多, 肖云鹤等^[2]对不同表面粗糙度的 304 不锈钢在 3.5% NaCl 溶液中进行空蚀腐蚀联合作用试验, 发现随着粗糙度的增大, 304 不锈钢的耐腐蚀性能呈不断下降趋势。刘子放等^[3]研究了超声波滚压强化对 304 不

锈钢表面质量的影响, 发现滚压可以提高 304 不锈钢的表面质量和表面硬度。秦明军等^[4]利用激光熔覆技术在 304 不锈钢表面制备 Inconel625 合金涂层, 提高了 304 不锈钢的表面硬度和耐磨耐腐蚀性能。但是, 对于该钢的研究主要是基于如何提高 304 不锈钢的表面质量, 关于 304 不锈钢的基础研究鲜有报道, 仅有孙文伟等^[5]研究了 304 不锈钢的热压缩本构方程及动态再结晶行为, 但是本构方程的建立, 所采用的数据较少, 并且只适用于峰值应力应变, 限制了本构方程的应用。

目前, 关于材料本构方程方面的研究较多, 主要是基于 Johnson-Cook 模型或者 Arrhenius 模型构建本构模型。其中, Johnson-Cook 模型由于其乘法形

收稿日期: 2024-01-05; 修订日期: 2024-04-07

基金项目: 2023 年山西省高等学校教学改革创新项目 (J20231722); 2023 年山西省高等学校教学改革创新项目 (J20231720); 2022 年山西省教育科学“十四五”规划项目 (GH-220338); 2023 年山西省高等学校科技创新项目 (2023L513)

作者简介: 张志红 (1985-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: 574055042@qq.com

式简单, 被广泛用于解释合金的热变形行为, 杨东等^[6]采用修正 Johnson-Cook 模型构建了钛合金 Ti6Al4V 的本构模型, 能够准确地预测 Ti6Al4V 钛合金的塑性流动应力-应变响应。谭毅等^[7]采用 Johnson-Cook 模型构建了 ZL114A 铝合金在大应变、宽温度、高应变率下的本构模型。而 Arrhenius 模型由 Sellars 和 McTegart 根据双曲正弦定律来表示流动应力, 该定律已经得到了多次改进, 可以应用于各种合金的高温流变行为^[8,11]。白杰等^[9]基于 Arrhenius 本构模型构建了 EA4T 钢的本构模型。毛欢等^[10]基于应变补偿 Arrhenius 模型回归建立了 TC20 钛合金的高温本构方程。田英豪等^[11]分别利用 Johnson-Cook 模型和 Arrhenius 模型建立了 Q345 钢的本构模型, 发现应变补偿的 Arrhenius 模型具有更高的精度。

基于此, 本文建立了 304 不锈钢应变补偿的本构模型以及热加工图, 为科研人员对 304 不锈钢的热加工工艺制定以及模拟奠定基础。

1 试验材料及过程

本试验材料为 304 不锈钢, 其化学成分见表 1。用锯床、电火花线切割和磨床等设备将试样制备为 $\Phi 10\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 、表面粗糙度为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 的小圆柱体。然后将试样置于 Gleeble-3800 热模拟试验机中进行热压缩, 热压缩采用的变温度为 $900\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 每隔 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试验一次; 应变速率分别为 0.01 、 0.1 和 1 s^{-1} , 热压缩试验完成后迅速进行水冷。通过真应力-真应变曲线, 获得材料的高温流变力学行为。基于应力、应变数据构建 304 不锈钢应变补偿的本构方程和热加工图。

表 1 304 不锈钢的化学成分 (%, 质量分数)
Table 1 Chemical compositions of 304 stainless steel
(%, mass fraction)

C	Mn	P	Si	Ni	Cr	N	Cu	Co	Fe
0.035	1.859	0.023	0.45	9.41	18.90	0.068	0.041	0.022	余量

2 试验结果及分析

2.1 真应力-真应变曲线

通过热压缩试验, 得到 304 不锈钢的真应力-真应变曲线, 如图 1 所示。由图 1 可见, 304 不锈钢在 $900\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}/0.01\sim 1\text{ s}^{-1}$ 条件下, 真应力-真

应变曲线的类型包括动态回复+动态再结晶曲线和动态再结晶曲线^[11-12]。

当变形温度为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率为 1 s^{-1} 时, 表现为动态回复+动态再结晶曲线, 该阶段的曲线包括 3 个阶段: 第 1 阶段为加工硬化阶段, 该阶段晶格发生扭曲, 增加了滑移阻力, 从而出现加工硬化, 此时强度和硬度升高, 塑性和韧性下降; 第 2 阶段为回复阶段, 该阶段晶格扭曲被消除, 部分加工硬化被消除; 第 3 阶段为再结晶阶段, 此时金属原子获得更高的热能, 则开始以碎晶或杂质为结晶核心, 在晶界处形核长大, 进而消除了全部加工硬化现象, 动态再结晶使流变应力下降, 所以该阶段曲线出现下降趋势。

当变形温度为 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率为 0.01 s^{-1} 时, 表现为动态再结晶曲线。此时, 位错运动的驱动力增大, 位错密度增高, 促进动态再结晶的进程, 再结晶起到动态软化作用, 真应力-真应变曲线达到峰值后下降, 随着变形量的继续增大, 加工硬化和动态软化达到平衡, 进入平稳阶段, 因此, 真应力-真应变曲线为动态再结晶型曲线。

在应变速率一定时, 变形温度升高, 位错运动的驱动力随之增大, 动态再结晶软化越容易发生, 所以, 材料的真应力-真应变曲线越早弯曲, 并且峰值应力 σ_p 随着变形温度的升高而降低^[12]; 在温度一定时, 峰值应力 σ_p 随应变速率的增大而升高。由图 1 可知, 当应变速率为 0.01 s^{-1} 、变形温度为 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 曲线为动态再结晶型曲线, 即当应变速率为 0.01 s^{-1} 、变形温度为 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 304 不锈钢发生再结晶。

2.2 本构方程的建立

2.2.1 形变激活能的确定

采用 Arrhenius 方程计算形变激活能, 表达式为^[13-14]:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

当应力较低时, 表达式为:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

当应力较大时, 表达式为:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; R 为气体常数, 取为 $8.31\text{ J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$; T 为绝对温度, K ; Q 为形变激活能, $(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$; σ 为流变应力, MPa ; A 、 A_1 、 A_2 、 α 、 β 、 n 和 n_1 为材料常数, 材料不同, 其值也发生变化, 且 $\alpha=\beta/n_1$ 。

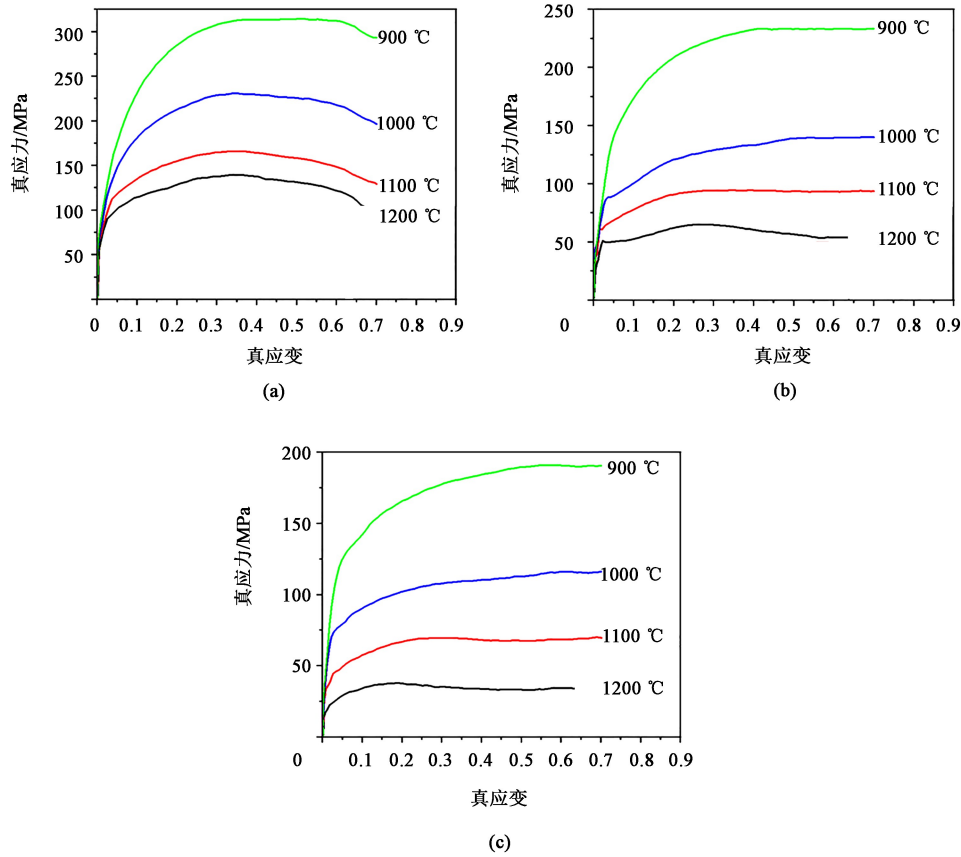
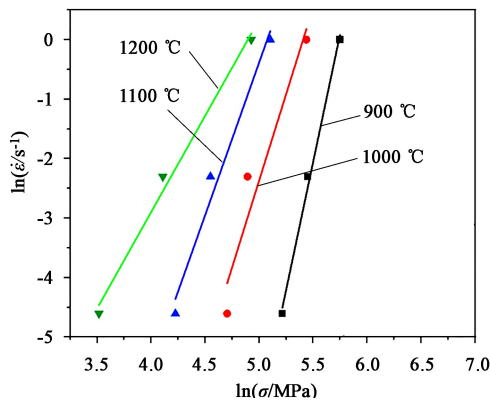


图 1 不同变形条件下 304 不锈钢的真应力-真应变曲线

(a) 1 s^{-1} (b) 0.1 s^{-1} (c) 0.01 s^{-1}

Fig. 1 True stress-true strain curves of 304 stainless steel under different deformation conditions

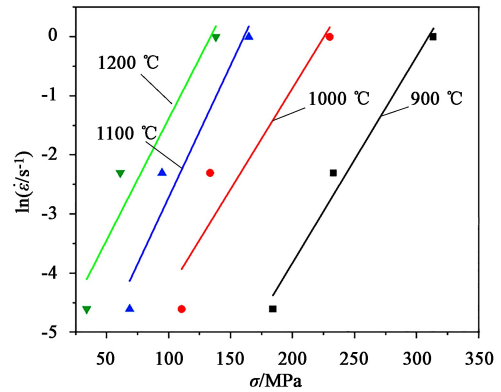
当变形温度相同时, 绘制 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ - σ 的关系图, 如图 2 和图 3 所示。计算 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ - σ 直线斜率的平均值, 即可得到 $n_1 = 5.6957575$, $\beta = 0.0387375 \text{ MPa}^{-1}$, 则 $\alpha = \beta/n_1 = 0.0068 \text{ MPa}^{-1}$ 。

图 2 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$ 关系图Fig. 2 Relationship diagram between $\ln \dot{\epsilon}$ and $\ln \sigma$

对 (1) 式两边取对数, 可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] - Q/RT \quad (4)$$

对式 (4) 两边求偏微分, 得到形变激活能 Q

图 3 $\ln \dot{\epsilon}$ - σ 关系图Fig. 3 Relationship diagram between $\ln \dot{\epsilon}$ and σ

的表达式为:

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial T^{-1}} \right\}_{\dot{\epsilon}} \cdot \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]} \right\}_T \quad (5)$$

当变形温度不变时, n 可表示为:

$$n = \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]} \quad (6)$$

绘制 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系图, 如图 4 所示。求出不同变形温度下的直线斜率的平均值, 得到 $n = 4.5512$ 。

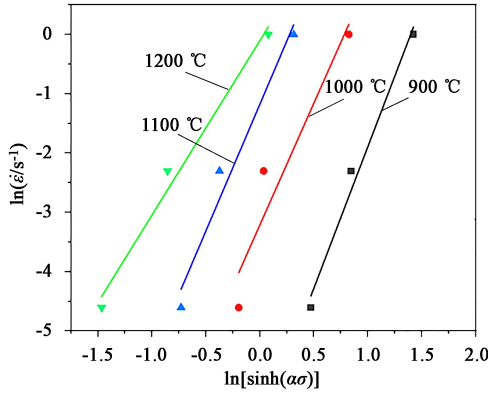


图 4 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系图

Fig. 4 Relationship diagram between $\ln \dot{\varepsilon}$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

当应变速率不变时, 形变激活能的关系式可表示为:

$$Q = Rn \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial T^{-1}} \quad (7)$$

绘制 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 的关系图, 如图 5 所示, 求出不同应变速率下直线斜率的平均值。通过直线斜率均值可得真应变为 0.3 时的形变激活能 $Q = 197.928 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

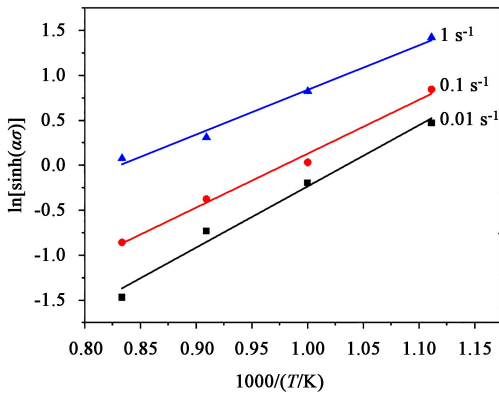


图 5 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 的关系图

Fig. 5 Relationship diagram between $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and $1000/T$

2.2.2 高温塑性本构方程的建立

高温塑性本构关系中热力学参数之间的关系可表示为:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (8)$$

式中: Z 为 Zener-Hollomon 参数, 即 Z 参数。

引入双曲正弦函数, 可得:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (9)$$

将求出的形变激活能、变形温度、应变速率及其他参数带入式 (8) 中, 求出 $\ln Z$ 的值。对式 (9) 两端求对数, 绘制 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系图, 如图 6 所示。由图 6 可知 $\ln Z$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 为线性关系, 线性相关度为 98.555%, 其中 $\ln A = 20.51215$, 则 $A = 8.0968 \times 10^8$ 。斜率为材料常数 n 值, $n = 3.9$ 。因此, 当 $\varepsilon = 0.3$ 时, 304 不锈钢的本构方程可表示为:

$$\dot{\varepsilon} = 8.0968 \times 10^8 \times [\sinh(0.0068\sigma)]^{3.9} \times \exp\left(\frac{-1.97928 \times 10^5}{RT}\right) \quad (10)$$

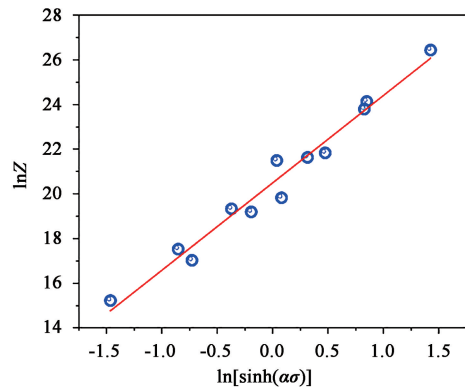


图 6 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系图

Fig. 6 Relationship diagram between $\ln Z$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

则 Z 参数可表示为:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{1.97928 \times 10^5}{RT}\right) = 8.0968 \times 10^8 \times [\sinh(0.0068\sigma)]^{3.9} \quad (11)$$

在上述本构方程模型的建立过程中, 计算参数被默认为常数, 并且 Arrhenius 模型未考虑应变, 仅适用于特定的应变 ($\varepsilon = 0.4$), 从而影响了模型的精准性, 因此, 为了更好地描述材料的流变特性, 需要补偿应变对流变应力的影响^[15-17]。在真应变为 0.1~0.7 范围内, 以 0.1 为单位进行划分, 并在每个应变上重复上述推导, 得到一系列 α 、 Q 、 n 和 $\ln A$ 的值, 以应变的多项式的形式加以表述, 如图 7 所示。采用五阶多项式拟合建立应变与各参数之间的函数关系, 如式 (12) 所示, 其中, $C_0 \sim C_5$ 、 $D_0 \sim D_5$ 、 $E_0 \sim E_5$ 、 $F_0 \sim F_5$ 分别为各参数的多项式系数, 其取值如表 2 所示, 图 8 给出了应变补偿函数的曲线图, 其中散点为试验值, 曲线为预测值。

$$\begin{cases} \alpha = C_0 + C_1\varepsilon + C_2\varepsilon^2 + C_3\varepsilon^3 + C_4\varepsilon^4 + C_5\varepsilon^5 \\ n = D_0 + D_1\varepsilon + D_2\varepsilon^2 + D_3\varepsilon^3 + D_4\varepsilon^4 + D_5\varepsilon^5 \\ Q = E_0 + E_1\varepsilon + E_2\varepsilon^2 + E_3\varepsilon^3 + E_4\varepsilon^4 + E_5\varepsilon^5 \\ \ln A = F_0 + F_1\varepsilon + F_2\varepsilon^2 + F_3\varepsilon^3 + F_4\varepsilon^4 + F_5\varepsilon^5 \end{cases} \quad (12)$$

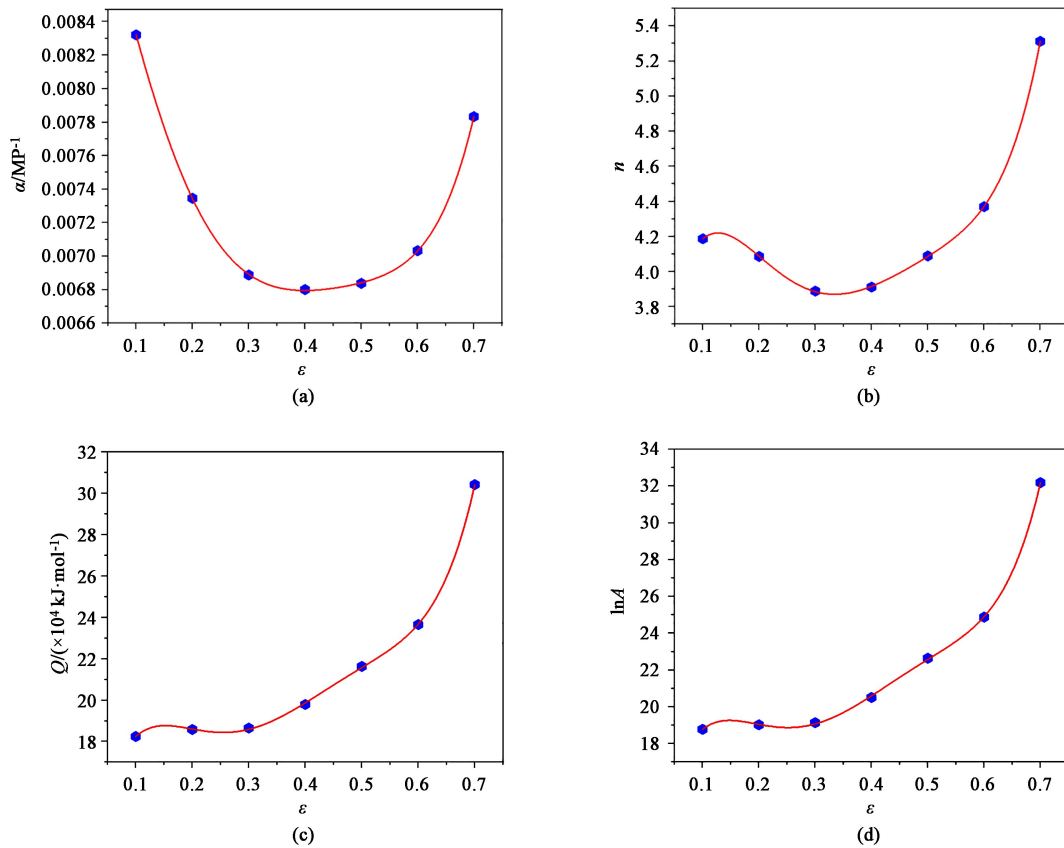
图 7 ε 与各材料参数的关系图(a) α (b) n (c) Q (d) $\ln A$ Fig. 7 Relationship diagrams between ε and each material parameter

表 2 304 不锈钢本构方程模型中各参数的多项式系数

Table 2 Polynomial coefficients of each parameter in constitutive equation model of 304 stainless steel

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
C_0	2.92764	D_0	9.96938	E_0	0.00969	F_0	31817.96556
C_1	26.87944	D_1	182.16009	E_1	-0.01397	F_1	3430236.023
C_2	-193.77637	D_2	-1296.19637	E_2	-0.01129	F_2	-21180700
C_3	584.89646	D_3	4105.68396	E_3	0.17161	F_3	74707000
C_4	-797.80417	D_4	-5841.15417	E_4	-0.33874	F_4	-157504000
C_5	413.2375	D_5	3118.05417	E_5	0.21374	F_5	193486000

最终可得出应变补偿的本构模型为:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{\alpha_{(\varepsilon)}} \ln \left\{ \left[\frac{\dot{\varepsilon} \exp(Q_{(\varepsilon)}/RT)}{A_{(\varepsilon)}} \right]^{\frac{1}{n_{(\varepsilon)}}} + \left[\left(\frac{\dot{\varepsilon} \exp(Q_{(\varepsilon)}/RT)}{A_{(\varepsilon)}} \right)^{\frac{2}{n_{(\varepsilon)}}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \\ \dot{\varepsilon} &= A_{(\varepsilon)} [\sinh(\alpha_{(\varepsilon)} \sigma)]^{n_{(\varepsilon)}} \exp\left(-\frac{Q_{(\varepsilon)}}{RT}\right) \\ Z &= A_{(\varepsilon)} [\sinh(\alpha_{(\varepsilon)} \sigma)]^{n_{(\varepsilon)}} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

本文构建的应变补偿型本构方程能够用来预测整个试验范围内的流动应力。为了评估该本构方程

的精确度,将预测的流动应力和试验值进行了比较,如图 9 所示。由图 9 可知,预测流动应力和试验值的吻合性较好,对其进行误差分析,相关系数 R 和平均相对误差 $AARE$ 的表达式为:

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{P_i} \right| \times 100\% \quad (14)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (15)$$

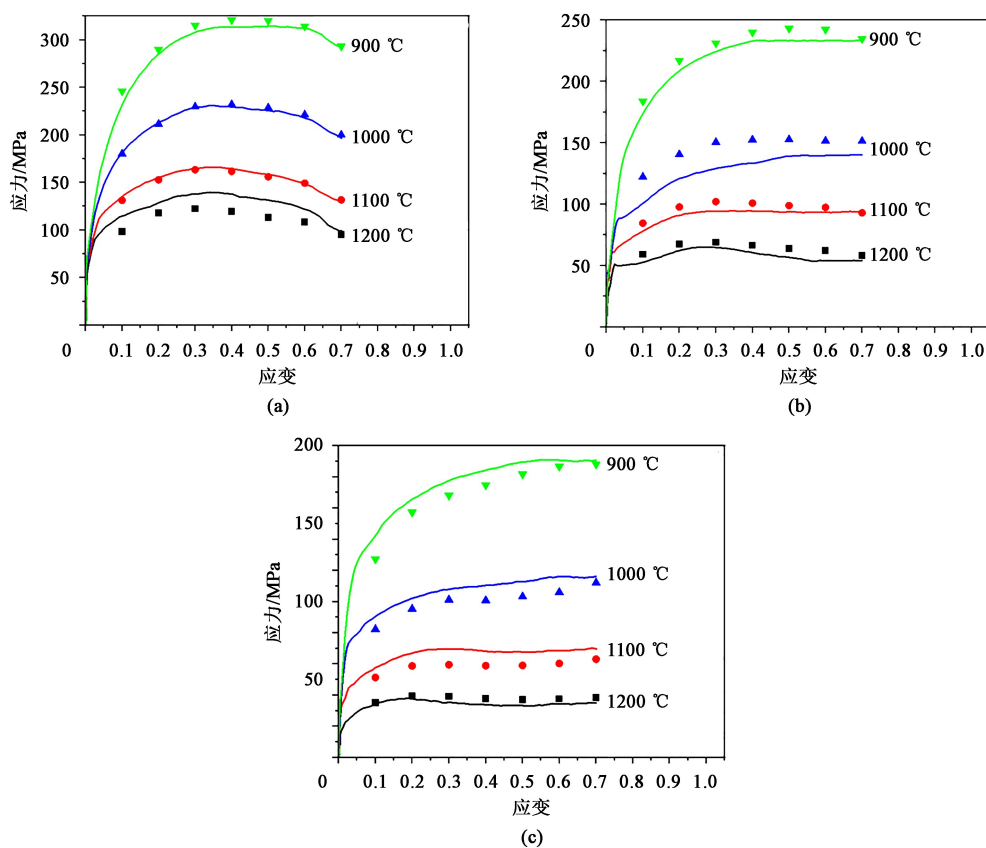


图 8 不同变形条件下流动应力的预测值和试验值对比

(a) 1 s^{-1} (b) 0.1 s^{-1} (c) 0.01 s^{-1}

Fig. 8 Comparison of flow stress between predicted and experimental values under different deformation conditions

式中: E_i 为第 i 个试验流变应力, MPa; P_i 为第 i 个预测的流变应力, MPa; \bar{E} 为 E_i 的平均值; \bar{P} 为 P_i 的平均值; N 为数据总量。

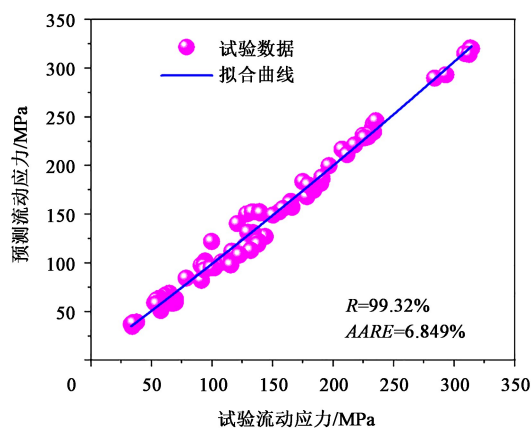


图 9 试验流动应力与预测流动应力的相关性

Fig. 9 Correlation between experimental and predicted flow stresses

2.3 热加工图的建立

热加工图记录了材料在不同变形条件下的塑性变形能力, 是用来制定和优化热加工工艺的重要

依据。

首先, 变形金属材料总输入功率有塑性变形和组织转变两个耗散途径, 如式 (16) 所示^[18-20]:

$$P = \sigma \dot{\varepsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\varepsilon}} \sigma d\dot{\varepsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma \quad (16)$$

式中: P 为输入变形体的总功率; G 为塑性变形所消耗的功率, 又称为耗散量; J 为组织转变所消耗的功率, 又称为耗散协量。

耗散量 G 和耗散协量 J 之间的关系一般采用应变速率敏感因子 m 进行描述, 即:

$$m = \left[\frac{\partial J}{\partial G} \right]_{\varepsilon, T} = \left[\frac{\partial (\ln \sigma)}{\partial (\ln \dot{\varepsilon})} \right]_{\varepsilon, T} \quad (17)$$

在变形温度和应变条件保持不变时, 流变应力和应变速率之间的关系可以表达为^[19,21]:

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \quad (18)$$

式中: K 为材料常数。

根据式 (16) 和式 (18) 可得:

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma = \frac{m\sigma\dot{\varepsilon}}{m+1} \quad (19)$$

当 $m=1$ 时, 材料处于理想的线性耗散过程, 此时 $G=J$, 耗散协量取最大值 J_{\max} , 即

$$J_{\max} = \frac{P}{2} = \frac{\sigma\dot{\varepsilon}}{2} \quad (20)$$

在非线性能量消耗过程中, J 与 J_{\max} 之比为功率耗散因子 η , 即:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (21)$$

动态材料模型根据不可逆热力学极值原理给出了失稳判据^[19], 用失稳参数 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 表示, 如式 (22) 所示。失稳参数 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 与应变速率、变形温度相关, 当 $\xi(\dot{\varepsilon}) < 0$ 时, 材料发生失稳, 在此区域容易出现开裂、空洞、局部流动和绝热剪切带等失稳现象。

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \lg\left(\frac{m}{m+1}\right)}{\partial \lg \dot{\varepsilon}} + m \leq 0 \quad (22)$$

根据不同温度下各应变速率的功率耗散因子 η 和失稳参数 $\xi(\dot{\varepsilon})$, 绘制 304 不锈钢的热加工图, 如图 10 所示。

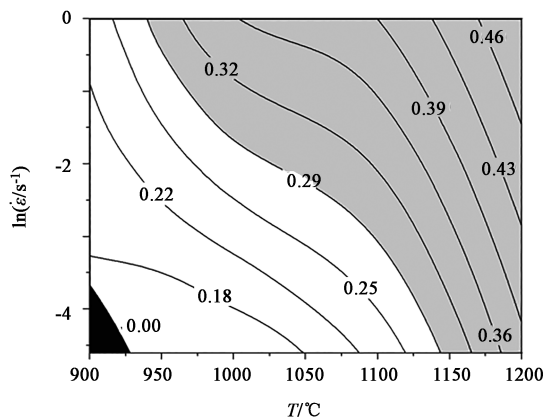


图 10 304 不锈钢的热加工图

Fig. 10 Hot processing map of 304 stainless steel

图 10 中, 等高线为功率耗散因子 η , 一般情况下, 较大的 η 意味着 304 不锈钢中用于微观组织演变的能量越多, 304 不锈钢越容易发生再结晶, η 值高的区域对应较好的加工区。由图 10 可知, 304 不锈钢的散耗因子随着应变量和变形温度的增加而逐渐增大, 在高温高应变速率区域达到最大, 为 49.8%, 研究发现, 当 η 值达到 30% 以上时, 合金

出现动态再结晶行为^[20]。图 10 中灰色区域的 η 值达到 30% 以上, 说明灰色区域的软化机制主要为动态再结晶, 其余区域的软化机制主要为动态回复。

材料具有良好的加工工艺需要满足两个条件: (1) 在加工安全区, 即在图 10 中黑色区域以外的区域; (2) 具有较高的功率耗散因子。对于 304 不锈钢来说, 满足以上两个条件的加工区为图 10 所示灰色区域, 即 304 不锈钢的最佳加工范围为: 变形温度为 940~1200 °C, 应变速率为 0.01~1 s⁻¹。

3 结论

(1) 根据 304 不锈钢的真应力-真应变曲线可知, 当应变速率一定时, 随着变形温度升高, 材料的真应力-真应变曲线越早弯曲, 并且峰值应力 σ_p 随着变形温度的升高而降低; 同时, 在变形温度一定时, 峰值应力 σ_p 随应变速率的增大而升高。

(2) 在 Arrhenius 方程基础上建立了 304 不锈钢

的本构关系: $\sigma = \frac{1}{\alpha_{(\varepsilon)}} \ln \left\{ \left(\frac{\dot{\varepsilon} \exp(Q_{(\varepsilon)}/RT)}{A_{(\varepsilon)}} \right)^{\frac{1}{n_{(\varepsilon)}}} + \left[\left(\frac{\dot{\varepsilon} \exp(Q_{(\varepsilon)}/RT)}{A_{(\varepsilon)}} \right)^{\frac{2}{n_{(\varepsilon)}}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$, $\dot{\varepsilon} = A_{(\varepsilon)} [\sinh(\alpha_{(\varepsilon)} \sigma)]^{n_{(\varepsilon)}} \times$

$\exp\left(-\frac{Q_{(\varepsilon)}}{RT}\right)$, $Z = A_{(\varepsilon)} [\sinh(\alpha_{(\varepsilon)} \sigma)]^{n_{(\varepsilon)}}$ 。

(3) 通过热加工图确定了 304 不锈钢的最佳加工范围为变形温度为 940~1200 °C、应变速率为 0.01~1 s⁻¹。

参考文献:

- [1] 赵晓东. 304 不锈钢热变形条件下动态再结晶行为研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2009.
Zhao X D. Study on Dynamic Recrystallization Behavior of 304 Stainless Steel Under Thermal Deformation Conditions [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2009.
- [2] 肖云鹤, 刘峰斌, 阎红娟, 等. 表面粗糙度对 304 不锈钢空蚀腐蚀联合作用的影响 [J]. 润滑与密封, 2024, 49 (5): 136-143.
Xiao Y H, Liu F B, Yan H J, et al. Effect of surface roughness on joint action of cavitation corrosion of 304 stainless steel [J]. Lubrication Engineering, 2024, 49 (5): 136-143.
- [3] 刘子放, 苑泽伟, 朱磊, 等. 超声波滚压强化对 304 不锈钢

- 表面质量的影响 [J]. 现代制造工程, 2023 (11): 86-93.
- Liu Z F, Yuan Z W, Zhu L, et al. Effect of ultrasonic rolling strengthening on surface quality of 304 stainless steel [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023 (11): 86-93.
- [4] 秦明军, 孙文磊, 管文虎, 等. 304 不锈钢表面激光熔覆 Inconel625 涂层组织与性能分析 [J/OL]. 表面技术, 1-14 [2024-07-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.tg.20231108.0910.002.html>.
- Qin M J, Sun W L, Guan W H, et al. Microstructure and properties of Inconel625 coating on 304 stainless steel surface by laser cladding [J/OL]. Surface Technology, 1-14 [2024-07-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.tg.20231108.0910.002.html>.
- [5] 孙文伟, 张楚函, 赵亚军, 等. 奥氏体不锈钢的热压缩本构方程及动态再结晶行为 [J]. 机械工程材料, 2022, 46 (6): 49-56, 63.
- Sun W W, Zhang C H, Zhao Y J, et al. Thermal compression constitutive equation and dynamic recrystallization behavior of austenitic stainless steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46 (6): 49-56, 63.
- [6] 杨东, 姜紫薇, 郑志军. 高温高应变速率下钛合金 Ti6Al4V 的动态力学行为及本构关系 [J]. 高压物理学报, 2024, 38 (1): 77-87.
- Yang D, Jiang Z W, Zheng Z J. Dynamic behavior and constitutive relationship of titanium alloy Ti6Al4V under high temperature and high strain rate [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38 (1): 77-87.
- [7] 谭毅, 杨书仪, 孙要兵, 等. ZL114A 铝合金本构关系与失效准则参数的确定 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44 (1): 88-107.
- Tan Y, Yang S Y, Sun Y B, et al. Determination of constitutive relation and fracture criterion parameters for ZL114A aluminum alloy [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44 (1): 88-107.
- [8] 王敬忠, 丁凯伦, 杨西荣, 等. Ti-62A 合金动态软化速率异常的热力学解释及其应变补偿本构方程 [J]. 材料研究学报, 2020, 34 (6): 401-409.
- Wang J Z, Ding K L, Yang X R, et al. Thermodynamic explanation of dynamic softening rate anomaly of Ti-62A alloy and its strain compensation constitutive equation [J]. Journal of Materials Research, 2020, 34 (6): 401-409.
- [9] 白杰, 霍元明, 何涛, 等. 基于 GA-Arrhenius 本构模型的 EA4T 钢高温变形行为 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (11): 246-253.
- Bai J, Huo Y M, He T, et al. High-temperature deformation behavior for EA4T steel based on GA-Arrhenius constitutive model [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (11): 246-253.
- [10] 毛欢, 韩莹莹. 基于应变补偿 Arrhenius 模型的 TC20 钛合金本构方程研究 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (9): 1939-1942, 1947.
- Mao H, Han Y Y. Study on constitutive equations of TC20 alloy based on strain-compensated arrhenius model [J]. Foundry Technology, 2018, 39 (9): 1939-1942, 1947.
- [11] Zhao G H, Tian Y H, Song Y H, et al. A comparative study of three constitutive models concerning thermo-mechanical behavior of Q345 steel during hot deformation [J]. Crystals, 2022, 12 (9): 1262-1262.
- [12] 焦永振. 铸态 2.25Cr1Mo0.25V 钢热变形过程中组织演变的研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2012.
- Jiao Y Z. Microstructure Evolution of As-cast 2.25Cr1Mo0.25V Steel During Hot Deformation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2012.
- [13] 王智祥, 刘学峰, 谢建新. AZ91 镁合金高温变形本构关系 [J], 金属学报, 2008, 44 (11): 1378-1383.
- Wang Z X, Liu X F, Xie J X. Constitutive relationship of hot deformation of AZ91 magnesium alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44 (11): 1378-1383.
- [14] 孙红磊, 殷璟, 马瑞, 等. Hpb59-1 铜合金高温流变行为的本构模型 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (7): 157-164.
- Sun H L, Yin J, Ma R, et al. Constitutive model of high temperature rheological behavior of Hpb59-1 copper alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (7): 157-164.
- [15] Song Y H, Li Y G, Li H Y, et al. Hot deformation and recrystallization behavior of a new nickel-base superalloy for ultra-supercritical applications [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 4308-4324.
- [16] Zhang J B, Wu C J, Peng Y Y, et al. Hot compression deformation behavior and processing maps of ATI 718 Plus superalloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 835 (prepublish).
- [17] Chen X X, Zhao G Q, Zhao X T, et al. Constitutive modeling and microstructure characterization of 2196 Al-Li alloy in various hot deformation conditions [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 326-342.
- [18] Wang S, Hou L G, Luo J R, et al. Characterization of hot workability in AA 7050 aluminum alloy using activation energy and 3D processing map [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 110-121.
- [19] Qin J, Zhang Z, Chen X G. Evolution of activation energy during hot deformation of Al-15% B₄C composites containing Sc and Zr [J]. AIMS Materials Science, 2019, 6 (4): 484-497.
- [20] Peng X Y, Su W S, Xiao D, et al. Investigation on hot workability of homogenized Al-Zn-Mg-Cu alloy based on activation energy and processing map [J]. JOM, 2018, 70 (6): 993-999.
- [21] Li X, Hou L F, Wei Y H, et al. Constitutive equation and hot processing map of a nitrogen-bearing martensitic stainless steel [J]. Metals, 2020, 10 (11): 1502-1502.