

23Cr-12Ni钢热压缩行为及热本构方程

张宝伟¹, 曾志伟¹, 尤佳惠¹, 张玉祥^{1, 2}, 王宪¹, 王国¹

1. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所 河南洛阳 471023

2. 海洋腐蚀与防护全国重点实验室 山东青岛 266100

摘要: 利用GLEEBLE 3500热力模拟试验机对23Cr-12Ni钢进行等温压缩试验, 温度为1000~1250℃, 应变率为0.001~10/s。根据不同条件下的应力-应变曲线, 拟合获得23Cr-12Ni钢的热本构方程, 通过计算加工硬化率 θ , 得到该钢发生动态再结晶时的临界应力 σ_c 和临界应变 ε_c , 并建立临界值与峰值之间的定量关系。结果表明: 23Cr-12Ni钢发生动态再结晶的临界条件为 $\varepsilon > \varepsilon_c = 5.06 \times 10^{-2} Z^{0.011}$; 临界值与峰值之间存在的关系为: $\sigma_c = 0.8404\sigma_p$; $\varepsilon_c = 0.088\varepsilon_p$ 。

关键词: 热本构方程; GLEEBLE-3500; 动态再结晶

Hot compression behavior and thermal constitutive equation of 23Cr-12Ni steel

ZHANG Baowei¹, ZENG Zhiwei¹, YOU Jiahui¹, ZHANG Yuxiang^{1, 2}, WANG Xian¹, WANG Dun¹

1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, Henan, China

2. National Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Qingdao 266100, Shandong, China

Abstract: The high temperature flow behavior of 23Cr-12Ni steel was studied through GLEEBLE 3500 thermo-mechanical simulator at 1000℃ to 1250℃ and strain rate of 0.001 to 10s⁻¹. By computing the strain-hardening θ , under various deformation situations, the critical stress σ_c and critical strain ε_c were ascertained, and the correlation between critical values and peak values was discovered. The results show that: the critical conditions for onset of dynamic recrystallization is: $\varepsilon > \varepsilon_c = 5.06 \times 10^{-2} Z^{0.011}$; and the relationship between the critical values and peak values of dynamic recrystallization is: $\sigma_c = 0.8404\sigma_p$; $\varepsilon_c = 0.088\varepsilon_p$.

Keywords: thermal constitutive equation; GLEEBLE-3500; dynamic recrystallization

1 序言

23Cr-12Ni钢是一种新型高氮奥氏体钢, N元素的添加有效提高了奥氏体钢强度^[1], 该钢屈服强度超过600MPa。当前在生产时缺乏可借鉴的加工工艺, 在不断试错的过程中必然造成材料浪费^[2, 3]。为了制定合理的锻打、轧制加工工艺, 保证产品质量, 避免产生裂纹等缺陷, 常采用数值仿真技术进行模拟验证和优化工艺, 为了使有限元模拟结果具有参考价值, 需要使用材料在高温下的热本构方程

进行有限元计算, 热本构方程的精度直接决定有限元模拟的精度^[4]。国内外研究者开发了多种本构模型, 用来预测和解释材料在加工过程中的行为, 实用性较高的有Arrhenius模型、J-C模型、Z-A模型等^[5, 6]。通过构建材料热本构方程, 利用相关软件实现对材料轧制过程的预测。

本文研究23Cr-12Ni钢压缩过程中流变行为, 并通过计算加工硬化率 θ , 建立发生动态再结晶临界应变 ε_c , 确定临界应变 ε_c 与峰值应变 ε_p 和Zener-

Hollomon参数的定量关系, 以期为制定合理的热加工工艺提供指导。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验材料为23Cr-12Ni钢, 在轧制钢板上取样, 试样尺寸为 $\phi 10\text{mm} \times 15\text{mm}$, 典型化学成分见表1。

表1 23Cr-12Ni钢典型化学成分(质量分数)(%)

Cr	Ni	Mn	Mo	N	C
23.0	12.1	10.2	3.2	0.7	0.02

2.2 试验方法

利用GLEEBLE 3500热力模拟试验机进行压缩试验。试验温度分别选取1000℃、1050℃、

1100℃、1150℃、1200℃和1250℃, 应变率分别选取0.001/s、0.01/s、0.1/s、1/s和10/s, 在压缩过程中保持温度恒定和应变率恒定。试验时以10℃/s的升温速度加热到试验温度, 保温5min, 再以不同的应变率进行压缩, 最大真应变为0.7, 压缩完成后快速将试样放入水中冷却。压缩后的试样沿轴向截面线切割, 对截面进行打磨、机械抛光、电解抛光及腐蚀处理, 然后采用高分辨场发射扫描电子显微镜配合Oxford公司的EBSD探头进行背散射电子衍射分析。

3 试验结果

3.1 应力-应变曲线

不同压缩温度和应变率下的应力-应变曲线如图1所示。从图1可看出, 随着应变率的增加, 应力

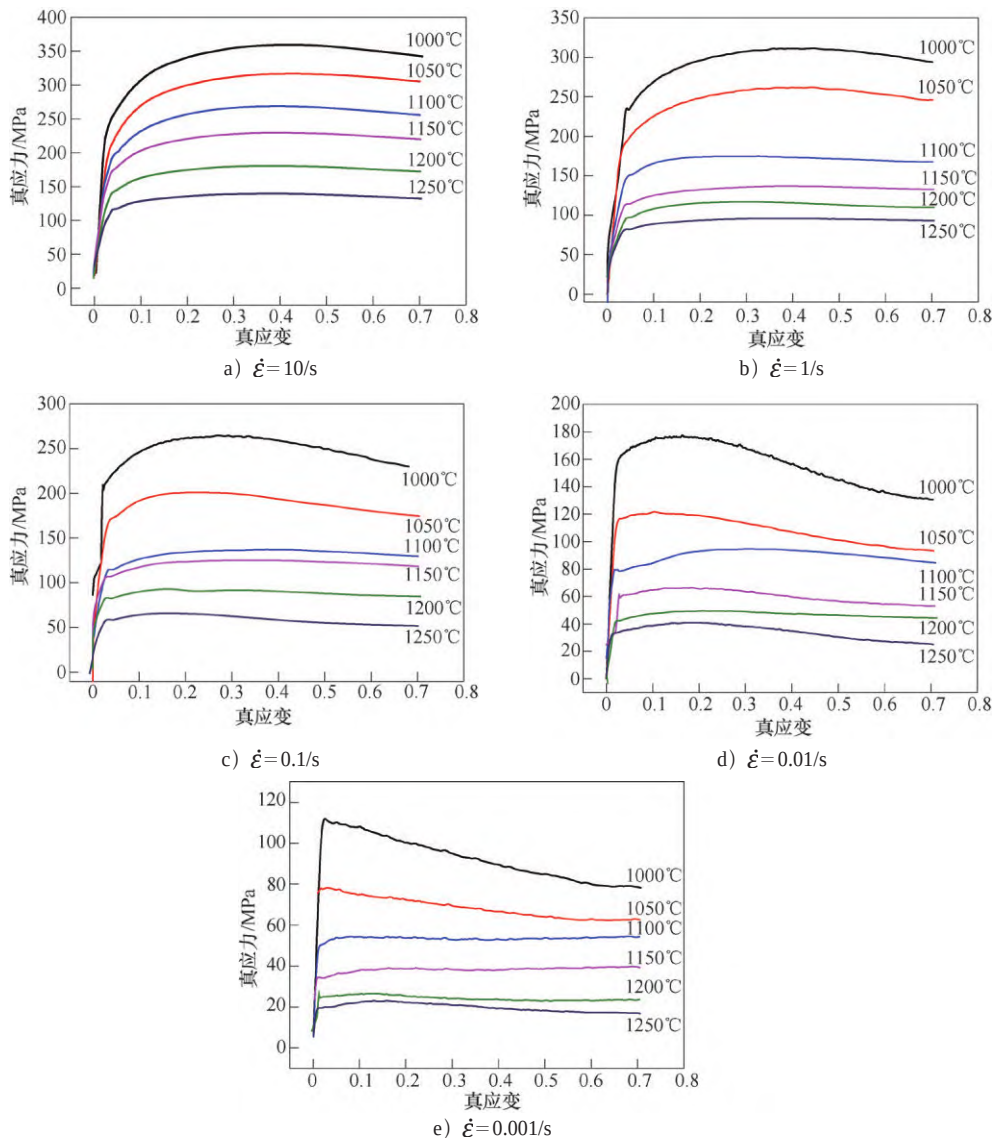


图1 23Cr-12Ni钢应力-应变曲线

增加明显,随着温度的增加应力下降显著。在变形的初始阶段,由于位错和缠结引起的加工硬化导致流动应力快速增加,而动态恢复(DRV)的软化效应相对较弱。随着变形程度的增加,在临界应变处发生动态再结晶(DRX),导致软化效应增强,软化效应缓慢增强,然后在加工硬化和动态软化达到平衡时出现了峰值应力^[7]。随后,随着应变的进一步增加,动态再结晶程度加深,位错密度降低,因此动态恢复和动态再结晶的软化效应超过了加工硬化,导致流动应力降低。应力随着温度的提高和应变率的降低而降低,这是因为较高的温度可为动态再结晶晶粒的形核和成长提供更高的晶界迁移率,较低的应变率可为活化能积累更长的时间。不同温度 and 不同应变率下的真应力-真应变曲线都出现从快速升高到缓慢升高,到达最高点后缓慢下降趋势,属于典型的动态再结晶型流变曲线^[8, 9]。

3.2 EBSD分析

图2所示为23Cr-12Ni钢在不同压缩条件下的EBSD IQ图。当 $T=1100^{\circ}\text{C}$ 时,从图2a与图2b对比来看, $\dot{\epsilon}=0.001/\text{s}$ 比 $\dot{\epsilon}=0.1/\text{s}$ 时的晶粒粗大很多,说明 $\dot{\epsilon}=0.001/\text{s}$ 时热压缩时间长($>15\text{min}$),组织发生了完全动态再结晶且晶粒长大明显, $\dot{\epsilon}=0.1/\text{s}$ 时热压缩时间短(9.1s),大部分动态再结晶晶粒细小,只有个别晶粒长大;当 $\dot{\epsilon}=10/\text{s}$ 时,热压缩过程为 0.09s ,时间短,没有发生动态再结晶(见图2c);当 $\dot{\epsilon}=0.1/\text{s}$ 、 $T=1000^{\circ}\text{C}$ 时,晶粒经过压缩变形后晶粒被压扁和破碎化,大部分区域虽然发生了动态再结晶,由于温度低,再结晶晶粒细小,大部分晶粒在 $1\sim 5\mu\text{m}$,且仍有部分扁平的没有发生动态再结晶的晶粒(见图2d);,当 $\dot{\epsilon}=0.1/\text{s}$ 、 $T=1250^{\circ}\text{C}$ 时,由于温度提高,动态再结晶晶粒长大明显,大部分晶粒粗大(见图2e)。

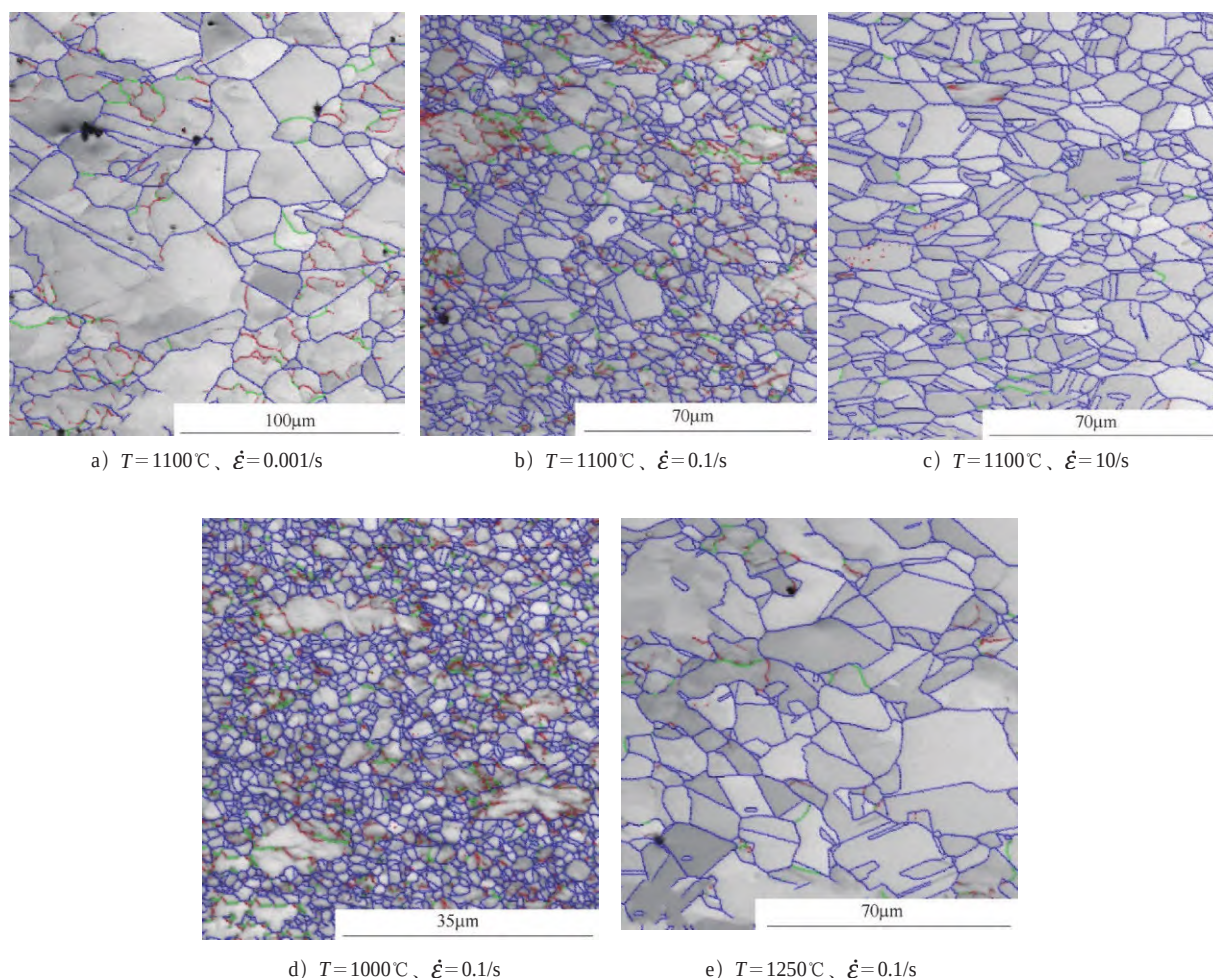


图2 不同压缩条件下的EBSD IQ图

3.3 峰值应力本构模型

变形温度和应变率对金属流变应力的综合影响可用Zener-Hollomon参数 Z 来表征^[10],其表达式为

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中 $\dot{\varepsilon}$ ——应变率;

T ——绝对温度 (K);

R ——通用气体常数[8.314J/(mol·K)];

Q ——热变形激活能 (J/mol)。

金属的热变形是一个热激活过程,通常采用3种不同形式的Arrhenius方程表示 σ 与 $\dot{\varepsilon}$ 和 T 的关系,即

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta \sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma_p)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

式中 A_1 、 A_2 、 A 、 n_1 、 α 、 β ——方程系数,均与温度和应变率无关;

n ——应变率敏感性指数相关的参数。

α 与 n_1 和 β 的关系^[11]为

$$\alpha = \beta / n_1 \quad (5)$$

对式(2)、式(3)、式(4)分别两边取对数可得

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - \frac{Q}{RT} \quad (6)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma - \frac{Q}{RT} \quad (7)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)] - \frac{Q}{RT} \quad (8)$$

为了准确表示23Cr-12Ni钢的高温变形特性,采用峰值应力数据建立本构关系,不同变形条件下的峰值应力 σ_p 可在对应的曲线中得到,整理数据结果见表2。

表2 不同温度和应变率下的峰值应力

应变率 (1/s)	温度/℃					
	1000	1050	1100	1150	1200	1250
	峰值应力/MPa					
10	360	317	268	230	180	140
1	312	262	175	137	128	96
0.1	265	201	137	87	94	66.5
0.01	178	121	99	66	52	41
0.001	112	78	54	40	26.5	23

根据表2中的数据计算 $\ln \dot{\varepsilon}$ 与 $\ln \sigma_p$ 的数值,建立两者之间的关系,如图3a所示。对图3a曲线进行线性

拟合,计算出6条曲线斜率的均值,通过式(6)可计算出 $n_1 = 6.1662$ 。根据同样方法,对 $\ln \dot{\varepsilon}$ 与 σ_p 的关系曲线进行线性拟合,如图3b所示。通过式(7)可计算出 $\beta = 0.048$ 。由于 $\alpha = \beta / n_1$,则 $\alpha = 0.048 / 6.1662 = 0.0078/\text{MPa}$ 。

根据式(8),当温度 T 一定时, $\ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}$ 呈线性关系,拟合出 $\ln[\sinh(\alpha \sigma)] - \ln \dot{\varepsilon}$ 曲线(见图3c),可计算出 $n = 1/0.23367 = 4.28$ 。在应变率 $\dot{\varepsilon}$ 一定时, $\ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 与 $1/T$ 呈线性关系,拟合出 $\ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 与 $1/T$ 的关系图(见图3d)^[12]。

得 $Q = R \times 4.28 \times 16549 = 8.314 \times 4.28 \times 16549 = 588878$ (J/mol)。

将计算所得常数代入式(8),可计算出 $\ln A = 46.4$,得 $A = e^{46.4}$ 。

根据式(4),得出热本构方程为

$$\dot{\varepsilon} = e^{46.4} [\sinh(0.0078 \sigma_p)]^{4.28} \exp\left(-\frac{588878}{8.314 T}\right) \quad (9)$$

为了验证上述热本构方程的准确性,根据式(9)计算不同条件下的峰值应力,并与测试数据进行比较,如图4所示。从图4可看出,计算值和测试数据非常接近,最大偏差为15MPa,说明本构方程精确性高。

3.4 动态再结晶临界值的确定

当变形温度和应变率一定时,加工硬化率 $\theta = \partial \sigma / \partial \varepsilon$ 。Poliak和Jonas在考虑不可逆热力学基础上,认为 $\theta - \sigma$ 曲线的转折点意味着动态再结晶的发生^[13]。

采用Poliak和Jonas提出的方法,确定临界应力和饱和应力。为了准确拟合应力-应变曲线,首先对试验获得流动应力曲线采用9阶多项式进行拟合,将获得 $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ 方程,对真应变 ε 进行求导,得到加工硬化率 $\theta = \partial \sigma / \partial \varepsilon$ 值^[4]。

图5所示为温度为1100℃时的 $-\partial \theta / \partial \sigma - \sigma$ 曲线图。从图5可看出,不同应变率下的临界应力 σ_c 。临界应力 σ_c 对应的应变为临界应变 ε_c ,在图1中提取不同条件下的临界应变 ε_c 。

引入Zener-Hollomon参数分析变形温度 T 和应变率 $\dot{\varepsilon}$ 对临界应变 ε_c 的影响,根据试验数据得到 ε_c ,做 $\ln \varepsilon_c - \ln Z$ 曲线,如图6所示,通过线性回归获得以下关系式,即

$$\ln \varepsilon_c = -2.983 + 0.011 \ln Z \quad (10)$$

因此,23Cr-12Ni钢发生动态再结晶的临界条件为

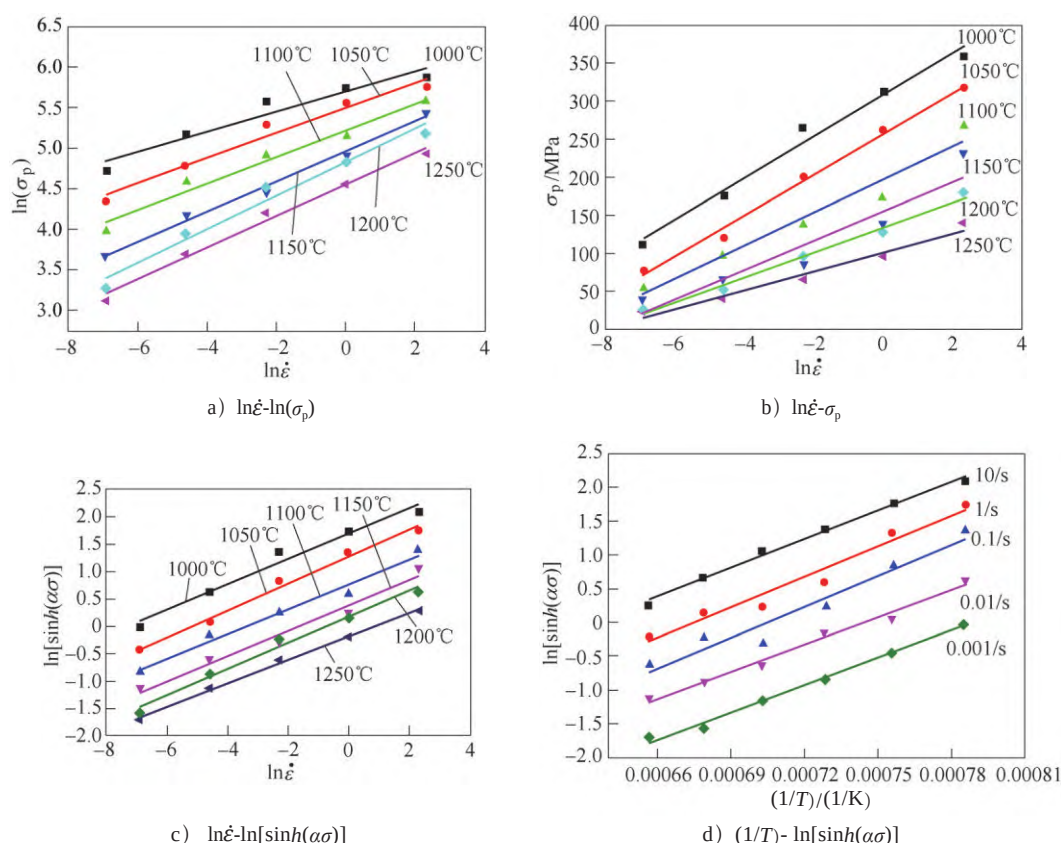


图3 不同变量之间的线性拟合

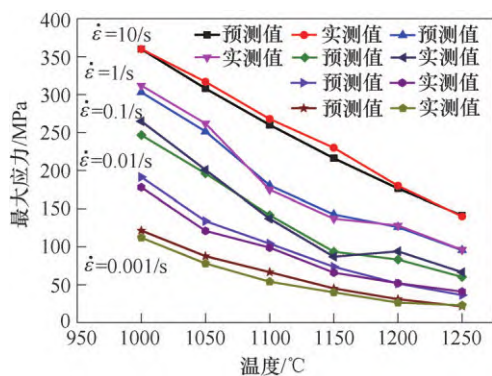


图4 峰值应力的计算值和试验值对比

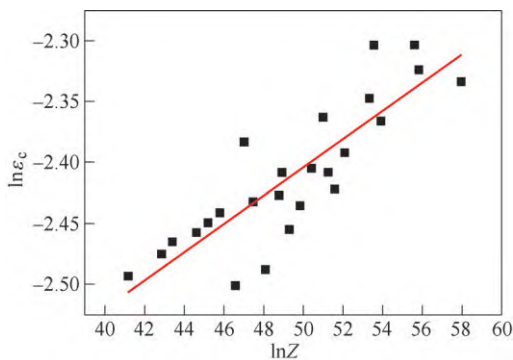


图6 临界应变 ϵ_c 与Z参数的关系

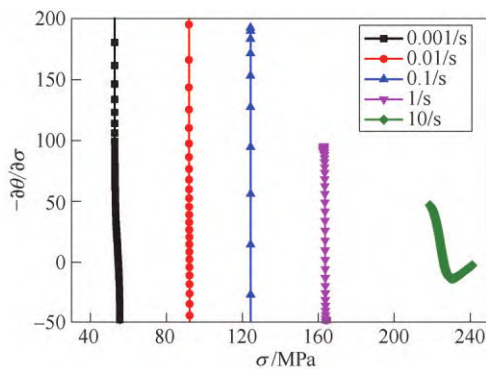


图5 1100°C时不同应变率下 $(-\partial \theta / \partial \sigma) - \sigma$ 关系

$$\epsilon > \epsilon_c = 5.06 \times 10^{-2} Z^{0.011} \quad (11)$$

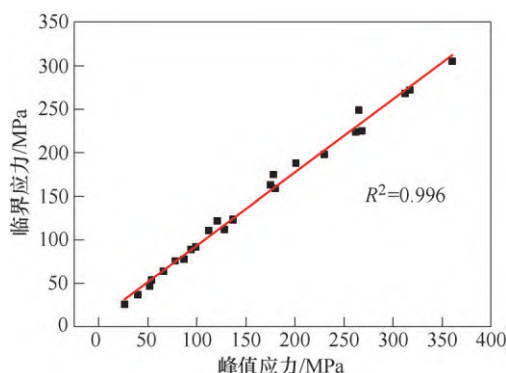
3.5 各特征变量的关系

由于峰值应力 σ_p 和峰值应变 ϵ_p 在压缩试验应力-应变曲线中可以确定,有必要确定 σ_p 、 ϵ_p 、 σ_c 、 ϵ_c 之间的定量关系。

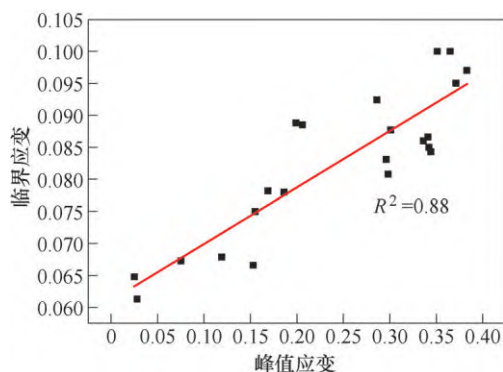
根据试验结果,绘制本试验条件下的曲线,如图7所示。通过回归分析,得

$$\sigma_c = 0.8404 \sigma_p \quad (12)$$

$$\epsilon_c = 0.088 \epsilon_p \quad (13)$$



a) 应力



b) 应变

图7 临界值-峰值关系

4 结束语

综上所述,可得出如下结论。

1) 23Cr-12Ni钢应力-应变曲线随着温度的升高而降低,随着应变率的升高而升高,属于典型的动态再结晶型流变曲线。

2) 通过回归分析的方法得到23Cr-12Ni钢热本构方程为

$$\dot{\varepsilon} = e^{46.4} [\sinh(0.0078\sigma_p)]^{4.28} \exp\left(-\frac{588878}{8.314T}\right)$$

3) 23Cr-12Ni钢发生动态再结晶的临界条件为

$$\varepsilon > \varepsilon_c = 5.06 \times 10^{-2} Z^{0.011}$$

4) 23Cr-12Ni钢动态再结晶的特征量之间的关系式为: $\sigma_c = 0.8404\sigma_p$; $\varepsilon_c = 0.088\varepsilon_p$ 。

参考文献:

- [1] ZHOU R, DEREK O N, LIU CH. On nitrogen diffusion during solution treatment in a high nitrogen austenitic stainless steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (2) : 2331-2337.
- [2] 李梁, 宋德军. Ti6213合金的热加工图研究[J]. 材料开发与应用, 2012, 27 (3) : 51-55.

- [3] 张宝伟, 黄东, 张玉祥, 等. 23Cr-8Ni不锈钢热变形行为及热加工图[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (8) : 44-48.
- [4] 胡丰泽, 林军, 陈文, 等. 34Cr2Ni2Mo合金结构钢热本构方程研究[J]. 精密成形工程, 2016, 8 (6) : 70-75.
- [5] 罗登, 赵菲, 刘丹, 等. 工程机械用Q1100钢的J-C本构修正模型[J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (6) : 155-163.
- [6] SAMAL S, RAHUL M R., KOTTADA R S. Hot deformation behavior and processing map of Co-Cu-Fe-Ni-Ti eutectic high entropy alloy[J]. Materials Science & Engineering: A, 2018, 664: 227-235.
- [7] 刘莹莹, 李嘉懿, 郭文虎, 等. 细晶TC4钛合金的动态再结晶行为及数值模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 15 (11) : 4137-4145.
- [8] 黄顺喆, 厉勇, 王春旭, 等. 高强渗碳钢高温热变形的本构方程[J]. 材料热处理学报, 2014, 35 (10) : 211-217.
- [9] FENG H, ZHANG S CH, MAN M J. Hot deformation constitutive equation and processing map of alloy 690[J]. Energy Materials, 2014: 473-480.
- [10] 陈益哲, 庞玉华, 王建国, 等. GH2907合金热变形本构方程[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48 (11) : 3578-3584.
- [11] MIRZADEH H, CABRERA J M, PRADO J M, et al. Hot deformation behavior of a medium carbon micro alloyed steel[J]. Mater. Sci. Eng.: A, 2011, 528: 3876-3882.
- [12] POLIAK E I, JONAS J J. A one-parameter approach to determining the critical conditions for the initiation of dynamic recrystallization[J]. Acta Mater., 1996, 44: 127-136.
- [13] 周琛, 孙宇, 胡连喜, 等. 6A02铝合金动态再结晶临界模型研究[J]. 中国科技论文, 2017, 21 (4) : 449-453.

MW 20240611