

# Cu-Ni-Sn 合金高温本构模型及动态再结晶行为

马艺霖 樊文欣 贾岩峰 侯军伟 鲍继轩 李靖飞

(中北大学机械工程学院)

**摘要** 以 Cu-Ni-Sn 合金为研究对象,在 Gleeble-3800 热模拟试验机进行变形温度为 650~850 °C,应变速率为 0.001~1 s<sup>-1</sup> 的热压缩试验,根据采集数据绘制应力-应变曲线,构建 Cu-Ni-Sn 合金高温本构模型,确定动态再结晶临界条件,并基于 Avrami 方程建立其动态再结晶体积分数模型。结果表明,所构建的 Cu-Ni-Sn 合金本构模型与试验结果相符合,平均相对误差为 5.06%;其动态再结晶体积分数与真应变之间呈 S 形变化,并且较高温度和较低应变速率有利于动态再结晶。

**关键词** Cu-Ni-Sn 合金;Arrhenius 本构模型;动态再结晶

**中图分类号** TG146.1<sup>+</sup>1;TG111.7

**文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2022.03.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## High Temperature Constitutive Model and Dynamic Recrystallization Behavior of Cu-Ni-Sn Alloy

Ma Yilin, Fan Wenxin, Jia Yanfeng, Hou Junwei, Bao Jixuan, Li Jingfei

(College of Mechanical Engineering, North University of China)

**Abstract:** The hot compression behavior of Cu-Ni-Sn alloy with deformation temperature of 650~850 °C and the strain rate of 0.001~1 s<sup>-1</sup> was carried out on Gleeble-3800 thermal simulation testing machine. The high-temperature constitutive model of Cu-Ni-Sn alloy was constructed based on the stress-strain curves combined with the experimental data. The critical conditions of dynamic recrystallization were determined, and the volume fraction model was established based on Avrami equation. The results indicate that the constitutive model is well matched with the experimental results with the average relative error of 5.06%. The variation curve of dynamic recrystallization volume fraction with true strain is S-shaped, proving that the higher temperature and lower strain rate are favorable to the occurrence of dynamic recrystallization behavior.

**Key Words:** Cu-Ni-Sn Alloy, Arrhenius Constitutive Model, Dynamic Recrystallization

Cu-Ni-Sn 合金具有高强、耐磨、耐腐蚀、热稳定性良好等特点,是制造滑动轴承的理想材料。随着航空航天、兵器制造等行业的发展,对高性能 Cu-Ni-Sn 合金的需求越来越大。目前,国内外对 Cu-Ni-Sn 合金的研究较少<sup>[1]</sup>,因此,研究 Cu-Ni-Sn 合金的热变形行为对其热加工工艺具有积极意义。

双曲正弦型 Arrhenius 本构模型常被用来预测合金在变形过程中的流变应力与变形温度和应变速率之间的关系,受到了研究者广泛关注<sup>[2]</sup>。丁宗业等<sup>[3]</sup>以 Cu-0.6Cr-0.03Zr 合金为研究对象,构建了包含 Zener-Hollomon 参数的 Arrhenius 双曲正弦模型,结果表明该模型与试验结果一致性较好。建立材料的动态再结晶模型以预测其动态再结晶规律,对揭示材料的形变特

性具有重要意义<sup>[4,5]</sup>。任伟等<sup>[6]</sup>基于 Avrami 动力学方程,建立了控氮 304 不锈钢的动态再结晶动力学模型,模型预测的动态再结晶分数曲线与试验得到的变化趋势一致,证明了该数学模型的有效性。陈军等<sup>[7]</sup>基于 AZ80 镁合金热压缩试验,对合金热变形行为进行了研究,得到了 AZ80 镁合金本构模型及动态再结晶模型。目前,有关 Cu-Ni-Sn 合金热变形行为方面的研究报道较少。

本课题在 Cu-Ni-Sn 合金热压缩试验的基础上,绘制了流变曲线,建立了 Arrhenius 双曲正弦型本构模型,最后基于 Avrami 方程建立了 Cu-Ni-Sn 合金的动态再结晶模型。系统研究了 Cu-Ni-Sn 合金的流变应力及动态再结晶行为,以期研究 Cu-Ni-Sn 合金的热变

收稿日期:2021-06-21;修改稿收到日期:2021-07-06

基金项目:山西省重点研发计划国际科技合作项目(201903D421035)

第一作者简介:马艺霖,女,1997 年出生,硕士研究生,太原(030051),E-mail:2091472580@qq.com

引用格式:马艺霖,樊文欣,贾岩峰,等. Cu-Ni-Sn 合金高温本构模型及动态再结晶行为[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(3):376-379.

MA Y L, FAN W X, JIA Y F, et al. High temperature constitutive model and dynamic recrystallization behavior of Cu-Ni-Sn alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(3):376-379.

形行为提供参考。

1 热压缩试验

试验材料为固溶态 Cu-Ni-Sn 合金,其成分见表 1。图 1 为该合金热压缩试验前的显微组织。可以看出,原始组织为  $\alpha$  单相等轴晶,其平均晶粒尺寸为  $60.2\ \mu\text{m}$ ,分布较均匀,存在部分孪晶。用线切割从棒料上切取尺寸为  $\phi 15\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$  的热压缩试样。在 Gleeble-3800 型热模拟试验机上进行热压缩试验。采用单因素试验设计方法,压缩温度分别为 650、700、750、800、850  $^{\circ}\text{C}$ ,应变速率分别为 0.001、0.01、0.1、1  $\text{s}^{-1}$ ,总压缩量为 60%。热压缩试验工艺过程见图 2。

表 1 Cu-Ni-Sn 合金的化学成分

| Tab.1 Chemical compositions of Cu-Ni-Sn alloy % |           |      |      |      |      |      |      |    |
|-------------------------------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|----|
| $w_B$                                           |           |      |      |      |      |      |      |    |
| Ni                                              | Sn        | Si   | Sc   | Mn   | Fe   | Co   | Zn   | Cu |
| 5.45~6.72                                       | 5.38~6.51 | 1.19 | 0.36 | 0.11 | 0.11 | 0.21 | 0.15 | 余量 |

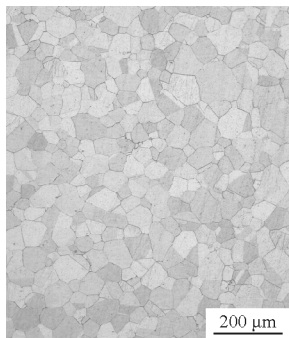


图 1 Cu-Ni-Sn 合金的原始组织  
Fig.1 Original structure of Cu-Ni-Sn alloy

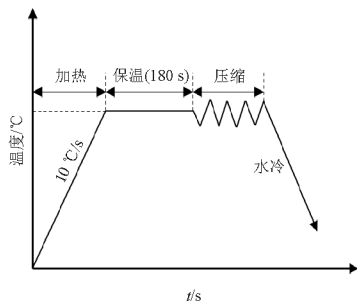


图 2 热压缩试验过程  
Fig.2 Hot compression test process

2 试验结果与分析

图 3 为热压缩试样的真应力-真应变曲线。从图 3a 可以看出,当应变温度保持恒定时,应变速率提高,真应力随之增加,这是因为应变速率过快,位错密度急剧增加,动态再结晶不充分,再结晶晶粒没有足够的时间形

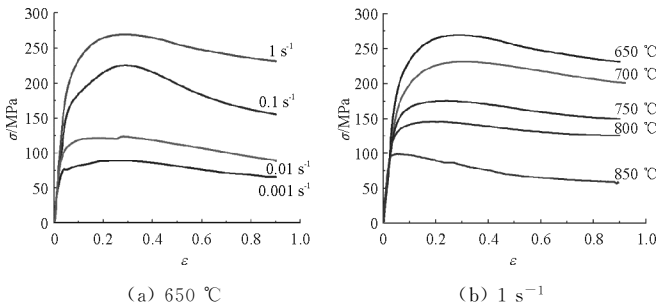


图 3 不同变形条件下 Cu-Ni-Sn 合金的真应力-真应变曲线  
Fig.3 True stress-true strain curves of Cu-Ni-Sn alloy under different deformation conditions

核、长大,使得真应力增加。从图 3b 可以看出,当应变速率保持恒定时,随着变形温度升高真应力减小,这是因为随着变形温度升高,位错容易产生攀移和交滑移,同时晶界开始软化并且更容易滑移,使得变形更容易发生。

3 基于峰值应力的热变形本构模型

以 SELLARS C M 等<sup>[8]</sup>提出的双曲正弦形式 Arrhenius 本构方程为基础,将热压缩试验数据代入拟合,提出基于峰值应力的 Cu-Ni-Sn 合金热变形本构模型。

Arrhenius 本构方程为:

$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp[-Q/(RT)] \quad (\alpha\sigma < 0.8) \quad (1)$

$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp[-Q/(RT)] \quad (\alpha\sigma > 1.2) \quad (2)$

全应力水平下:

$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (3)$

式中,  $\dot{\epsilon}$  为应变速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\sigma$  为峰值应力, MPa;  $T$  为热力学温度, K;  $A$  为材料的结构因子;  $Q$  为材料的热激活能, kJ/mol;  $R$  为气体摩尔常数, 8.314 J/(mol · K);  $n_1$ 、 $n$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  为与材料有关的常数,且  $\alpha = \beta/n_1$ 。

将式(1)~式(3)等式两边取自然对数得:

$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - Q/(RT) \quad (4)$

$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \beta\sigma - Q/(RT) \quad (5)$

$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - Q/(RT) \quad (6)$

将式(4)~式(6)对峰值应力、峰值应变数据进行线性拟合,见图 4,得  $\alpha = \beta/n_1 = 0.01$ ,  $n = 3.08$ ,  $Q = 249.56\ \text{kJ/mol}$ 。

将温度参数引入,采用 Z(Zener-Hollomon)参数来表示流变应力:

$Z = \dot{\epsilon} \exp[Q/(RT)] = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (7)$

式(7)两边同时取对数得:

$\ln Z = \ln A + n [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (8)$

由式(8)可知,  $\ln Z$  与  $\sinh(\alpha\sigma)$  之间的关系成线性函数,且截距为  $\ln A$ ,见图 5,可得  $A = 7.48 \times 10^{10}$ 。

将各参数带入方程,得到 Cu-Ni-Sn 合金的本构方程为:

$\dot{\epsilon} = 7.48 \times 10^{10} [\sinh(0.01\sigma)]^{3.08} \times \exp[-249\ 563.42/(RT)] \quad (9)$

包含  $Z$  参数的 Arrhenius 型方程为:

$$\sigma = \frac{1}{0.01} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{7.48 \times 10^{10}} \right)^{\frac{1}{3.08}} + \left[ \left( \frac{Z}{7.47 \times 10^{10}} \right)^{\frac{1}{1.54}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (10)$$

其中,

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left( \frac{249\ 563.42}{RT} \right) \quad (11)$$

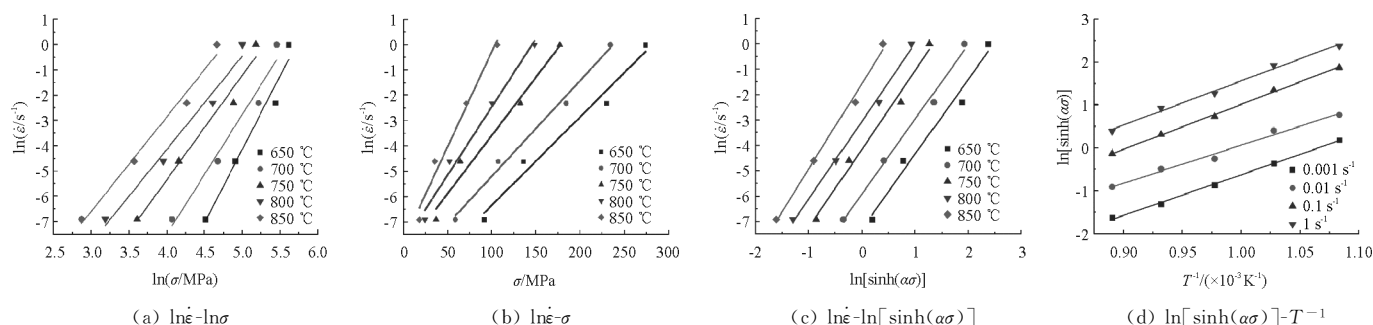


图 4 Cu-Ni-Sn 合金本构模型中各参数的关系曲线

Fig.4 The relationship between each parameters in the Cu-Ni-Sn alloy constitutive model

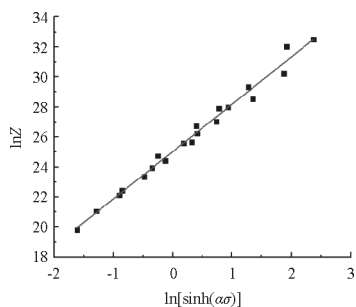

 图 5 Cu-Ni-Sn 合金  $\ln Z$  与  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  关系曲线

 Fig.5 Relation curve of  $\ln Z$  and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  of Cu-Ni-Sn alloy

通过计算平均相对误差( $E_r$ )和线性相关系数( $R$ )来验证 Cu-Ni-Sn 合金本构方程的预测精确度,其表达式如下:

$$E_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\% \quad (12)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (13)$$

式中, $E_i$ 、 $P_i$  分别为真应力的试验值和计算值,MPa。计算得  $E_r=5.06\%$ ,  $R=0.99$ ,说明该本构方程有较高的精确性。

## 4 Cu-Ni-Sn 合金的动态再结晶行为

### 4.1 Cu-Ni-Sn 合金的动态再结晶临界条件

RYAN N D 等<sup>[9]</sup>研究发现,动态再结晶的临界条件可由加工硬化率  $\theta$  与真应力  $\sigma$  的关系来表征,其关系曲线中拐点所对应的应力为动态再结晶临界应力。根据应力-应变关系可计算加工硬化率  $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ ,并绘制  $\theta$ - $\sigma$  图,见图 6。

Cu-Ni-Sn 合金各条件下动态再结晶临界点即为图中各曲线拐点,但该方法得到的临界应力数值精确度不足。为准确识别曲线上拐点,将  $\theta$ - $\sigma$  曲线为正值的部分数据进行多项式拟合,并作  $\theta = d\theta/d\sigma$  关系图,当应力达到临界应力  $\sigma_c$  时,该函数有极大值,见图 7,图中曲线

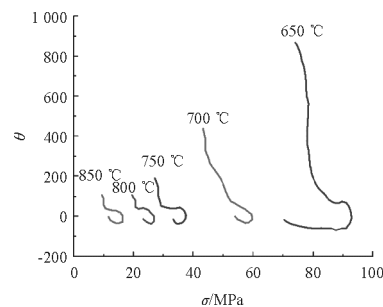

 图 6 Cu-Ni-Sn 合金  $\theta$  与  $\sigma$  关系曲线( $\dot{\varepsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$ )

 Fig.6 Relation curves of  $\theta$  and  $\sigma$  of Cu-Ni-Sn alloy

( $\dot{\varepsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$ )

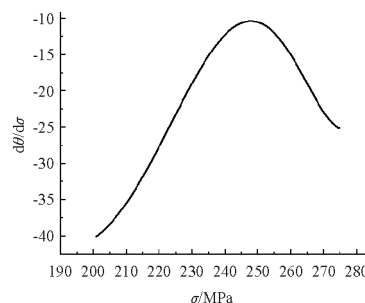

 图 7 Cu-Ni-Sn 合金  $d\theta/d\sigma$  与  $\sigma$  关系曲线

 Fig.7 Relation curve of  $d\theta/d\sigma$  and  $\sigma$  of Cu-Ni-Sn alloy

最高峰值点对应图 6 曲线  $\theta$ - $\sigma$  的拐点,其横坐标为临界应力值  $\sigma_c$ ,其对应的应变为临界应变值  $\varepsilon_c$ 。

图 8 为 Cu-Ni-Sn 合金  $\varepsilon_c$  与  $\varepsilon_p$  的关系曲线,结合流变应力曲线得到峰值应力  $\sigma_p$ 、峰值应变  $\varepsilon_p$ 、临界应变  $\varepsilon_c$  以及稳态应力  $\sigma_{ss}$  的值。临界应变和峰值应变之间均存在线性关系,经拟合可得:

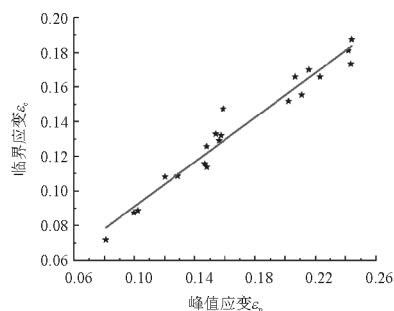

 图 8 Cu-Ni-Sn 合金的  $\varepsilon_c$  与  $\varepsilon_p$  关系曲线

 Fig.8 Relation curve of  $\varepsilon_c$  and  $\varepsilon_p$  of Cu-Ni-Sn alloy

$$\epsilon_c = 0.64\epsilon_p + 0.03 \quad (14)$$

## 4.2 Cu-Ni-Sn 合金的动态再结晶体积分数

动态再结晶体积分数可用 Avrami 定律表示,其表达式为:

$$X_{\text{drx}} = 1 - \exp\left[-k\left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_p}\right)^t\right] \quad (15)$$

式中,  $X_{\text{drx}}$  为动态再结晶体积分数;  $k$ 、 $t$  为材料常数。

另外,动态再结晶体积分数  $X_{\text{drx}}$  与流变应力  $\sigma$  符合以下关系:

$$X_{\text{drx}} = \frac{\sigma_p - \sigma}{\sigma_p - \sigma_{ss}} \quad (16)$$

式中,  $\sigma$  为流变应力, MPa;  $\epsilon_p$  为峰值应力, MPa。

将由式(15)体积分数  $X_{\text{drx}}$  代入式(16),并将等式两端作对数运算如下:

$$\ln[-\ln(1 - X_{\text{drx}})] = \ln k + c \ln[(\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon_p] \quad (17)$$

通过绘制部分变形条件下的  $\ln[-\ln(1 - X_{\text{drx}})] - \ln[(\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon_p]$  图像,并进行线性拟合,见图 9,曲线斜率为材料常数  $c$ ,截距为  $\ln k$ 。计算可得到  $c = 3.86$ ,  $k = 0.05$ 。即 Cu-Ni-Sn 合金动态再结晶方程为:

$$X_{\text{drx}} = 1 - \exp\left[-0.05\left(\frac{\epsilon - \epsilon_p}{\epsilon_p}\right)^{3.86}\right] \quad (18)$$

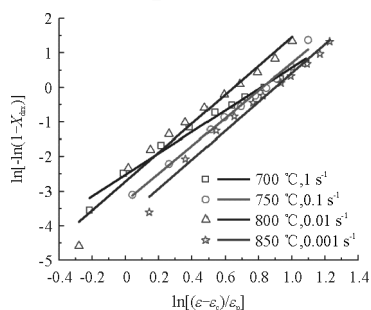


图 9 Cu-Ni-Sn 合金部分变形条件下  $\ln[-\ln(1 - X_{\text{drx}})]$  与  $\ln[(\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon_p]$  关系曲线

Fig.9 Relation curves of  $\ln[-\ln(1 - X_{\text{drx}})]$  and  $\ln[(\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon_p]$  of Cu-Ni-Sn alloy under partial deformation conditions

根据式(15)与式(16)绘制的 Cu-Ni-Sn 合金在不同变形条件下  $X_{\text{drx}} - \epsilon$  曲线见图 10。可以看出,应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  和  $1 \text{ s}^{-1}$  时合金的动态再结晶体积分数  $X_{\text{drx}}$  随着真应变的增加呈 S 形递增。对比图 10a 和图 10b 可以发现,在应变速率为  $0.01 \text{ s}^{-1}$  时,动态再结晶充分发生,所有温度条件下动态再结晶体积分数都可以达到 100%;在应变速率为  $1 \text{ s}^{-1}$  时,动态再结晶不能完全发生,变形温度为 650、700、750、800 °C 时只有部分晶粒发生了动态再结晶。同时,在一般情况下,当应变速率一定时,温度越高,发生动态再结晶的所需临界应变越小,真应变相同时动态再结晶体积分数随温度的升高而增加。结果表明,较低应变速率和较高温度的变形条件有

利于动态再结晶的发生。

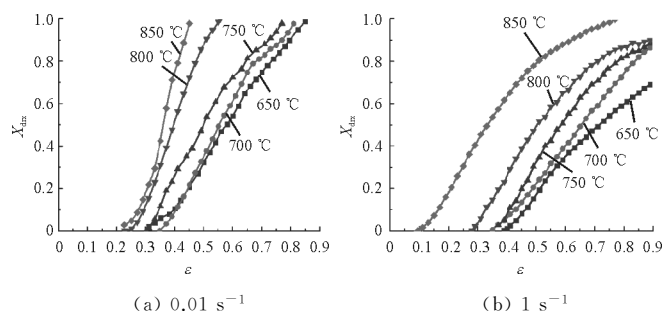


图 10 不同变形条件下 Cu-Ni-Sn 合金  $X_{\text{drx}}$  与  $\epsilon$  关系曲线

Fig.10 Relation curves of  $X_{\text{drx}}$  and  $\epsilon$  of Cu-Ni-Sn alloy under different deformation conditions

## 5 结 论

(1) Cu-Ni-Sn 合金在变形温度为 650~850 °C、应变速率为  $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$  条件下的流变应力随着应变量的增大、变形温度的降低和应变速率的增加而增加。

(2) 建立了在变形温度为 650~850 °C、应变速率为  $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$  条件下 Cu-Ni-Sn 合金包含  $Z$  参数的高温本构方程,该模型能较准确预测 Cu-Ni-Sn 合金流变应力。

(3) 通过绘制加工硬化率-流变应力曲线,确定了 Cu-Ni-Sn 合金在不同变形条件下发生动态再结晶的临界值,确定了该合金再结晶临界应变与峰值应变之间的线性关系,根据 Avrami 方程建立了 Cu-Ni-Sn 合金动态再结晶体积分数方程。

## 参 考 文 献

- [1] 赵超,高强韧 Cu-15Ni-8Sn 合金的制备及相关基础研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [2] 宋仁伯,项建英,侯东坡,等.316L 不锈钢热加工硬化行为及机制[J].金属学报,2010,46(1): 57-61.
- [3] 丁宗业,贾淑果,宁向梅,等.Cu-Cr-Zr 合金的高温热变形行为[J].中国有色金属学报,2020,30(8): 1 811-1 817.
- [4] 罗锐,陈乐利,曹赞,等.铬钼高温铁素体钢的形变特性与动态再结晶模型[J].材料导报,2020,34(20): 20 118.
- [5] 孙宇,周琛,王志鹏,等.金属材料动态再结晶模型研究现状[J].材料导报,2017,31(13): 12-16.
- [6] 任伟,吴冰洁,邱阳,等.控氮 304 不锈钢热变形过程中的动态再结晶行为研究[J].西安交通大学学报,2021,55(3): 145-154.
- [7] 陈军,纪兴华,吕昕晖,等.AZ80 镁合金热变形本构模型及动态再结晶行为研究[J].特种铸造及有色合金,2019,39(10): 1 045-1 049.
- [8] SELLARS C M, MCQUEEN W J. On the mechanism of hot deformation[J]. Acta Metallurgica, 1996, 14(9): 11-36.
- [9] RYAN N D, MCQUEEN H J. Flow stress, dynamic restoration, strain hardening and ductility in hot working of 316 steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1990, 21(2): 177-199.

(编辑:刘晨辉)