

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170623

## 基于 L-J 位错密度模型模拟 Cr8 合金钢动态再结晶行为

陈学文, 王继业, 皇涛, 周旭东, 宋克兴

(河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 为了研究 Cr8 合金钢动态再结晶行为, 利用 Gleeble-1500D 热模拟试验机对 Cr8 合金钢进行了热压缩试验。基于试验得到的数据, 建立了 Cr8 合金钢修正的 Laasraoui-Jonas(L-J)位错密度模型, 结合动态再结晶形核长大模型, 采用 Deform-3D 有限元软件中元胞自动机(CA)模块模拟了 Cr8 合金钢的动态再结晶行为, 并和试验得到的动态再结晶组织进行比较。结果表明, 当变形温度为 900~1 200 °C 时, Cr8 合金钢变形抗力与变形量曲线图呈现出典型的动态再结晶特征; Cr8 合金钢的热激活能  $Q$  为 340.332 kJ/mol; 应变速率一定时, 随着温度的升高, Cr8 合金钢动态再结晶晶粒尺寸增大, 其再结晶晶粒尺寸的模拟结果与试验结果较为吻合, 平均相对误差在 7% 以内, 说明所建立修正的 L-J 位错密度模型能够准确预测 Cr8 合金钢动态再结晶组织的变化。

**关键词:** Cr8 合金钢; L-J 位错密度模型; 动态再结晶; 元胞自动机

**文献标志码:** A **文章编号:** 0449-749X(2018)07-0074-06

## Dynamic recrystallization behavior simulation for Cr8 alloy based on modified Laasraoui-Jonas dislocation density model

CHEN Xue-wen, WANG Ji-ye, HUANG Tao, ZHOU Xu-dong, SONG Ke-xing

(School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China)

**Abstract:** In order to study dynamic recrystallization behavior of Cr8 alloy, the hot compression tests of Cr8 alloy was carried out on the Gleeble-1500D thermal simulation test machine. Based on the data of experiment, the modified Laasraoui-Jonas(L-J) dislocation density model of Cr8 alloy was established. Combined with dynamic recrystallization nucleation and growth model, the dynamic recrystallization behavior of Cr8 alloy was simulated by the cellular automata (CA) module of Deform-3D finite element software, and the simulation dynamic recrystallization microstructure was compared with experimental microstructure. The results show that the deformation resistance-strain curves of Cr8 alloy show the typical characteristics of dynamic recrystallization at deformation temperature ranging from 900 to 1 200 °C. The hot deformation activation energy of Cr8 alloy is 340.332 kJ/mol. Under the same strain rate, the dynamic recrystallization grain size of the Cr8 alloy increases when the deformation temperature increases. The simulation results of recrystallized grain size agree well with experiments. The average relative error is within 7%, which prove the established L-J dislocation density model can accurately predict the microstructure evolution during dynamic recrystallization of the Cr8 alloy.

**Key words:** Cr8 alloy; L-J dislocation density model; dynamic recrystallization; cellular automata

轧辊是轧钢机上的一种重要部件, 其工作环境非常恶劣, 轧制时主要承受冲击、磨损和冷热疲劳的影响<sup>[1-3]</sup>。Cr8 合金钢具有良好的淬透性、耐磨性和抗热裂性, 在轧辊的生产和制造中被逐渐采用。近些年来, 许多学者对 Cr8 合金钢作了多方面的研究。迟宏宵等<sup>[4]</sup>对 Cr8Mo2SiV 钢的二次硬化机理进行了研究, 将残余奥氏体对二次硬化的贡献和碳化物析出对二次硬化的贡献作比较, 发现残余奥氏体的贡献更大。霍连喆等<sup>[5]</sup>对 Cr8 钢不同温度和应变速率下的再结晶行为及物相变化进行了研究, 但是

没有与微观组织模拟相结合。王葛等<sup>[6]</sup>考虑加热温度和保温时间的影响, 研究了 Cr8 钢再结晶过程中奥氏体晶粒长大规律, 并根据试验数据建立了奥氏体晶粒长大数学模型。并且还利用数值模拟与试验相结合, 研究了 Cr8 钢轧辊的最终热处理工艺, 但并没有涉及对材料的实际工艺参数与所建模型之间的关系<sup>[7]</sup>。张岩等<sup>[8]</sup>对 Cr8 钢不同淬火、回火温度下的组织和性能进行了研究, 为其最佳热处理工艺的确定提供依据。

材料在热变形过程中发生动态再结晶能够获

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51575162); 河南省自然科学基金资助项目(162300410085)

**作者简介:** 陈学文(1970—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** chenxw@163.com; **收稿日期:** 2017-12-29

得细小的等轴晶,较高的位错密度和大量位错缠结存在于晶粒内部,使材料的微观组织得到改善,进而提高材料的综合性能<sup>[9-14]</sup>。材料在变形过程中位错密度的消散为再结晶的发生提供驱动力,以位错密度为内变量的微观组织模型能够很好地研究其微观组织演变规律<sup>[15-17]</sup>。陈飞等<sup>[18]</sup>总结了目前元胞自动机(CA)法在微观组织演变中的研究进展,表明了模拟微观组织演变中采用CA法能够较为准确地获得晶粒的尺寸、形状、分布和织构等信息。LIU Xiao等<sup>[19]</sup>采用CA法结合L-J位错密度模型精确地模拟了AZ31镁合金的动态再结晶过程。邓小虎等<sup>[20]</sup>采用建立的二维CA模型,对GCr15钢双道次热变形过程进行了研究,结果表明,利用建立的CA模型能够较为准确地模拟热变形中GCr15钢的微观组织演变过程。董洪波等<sup>[21]</sup>基于位错密度模型对Q550D钢的动态软化及加工硬化行为进行了研究,结果表明,建立的位错密度模型在模拟过程中具有较高的精度。目前,基于位错密度模型对Cr8合金钢动态再结晶行为的研究尚未见报道,建立较为准确的位错密度模型对其进一步的研究至关重要。本文通过热模拟试验得到Cr8合金钢的变形抗力-变形量曲线,经过对变形抗力-变形量曲线的分析处理,得到了不同变形条件下Cr8合金钢的 $2\theta\sigma-\sigma^2$ 曲线及

$\ln\dot{\epsilon}-1/T$ 曲线,建立了Cr8合金钢修正的L-J位错密度模型,利用有限元模拟软件Deform-3D中的CA模块,对Cr8合金钢热压缩过程中的动态再结晶行为进行模拟验证,模拟结果与试验结果较为吻合。

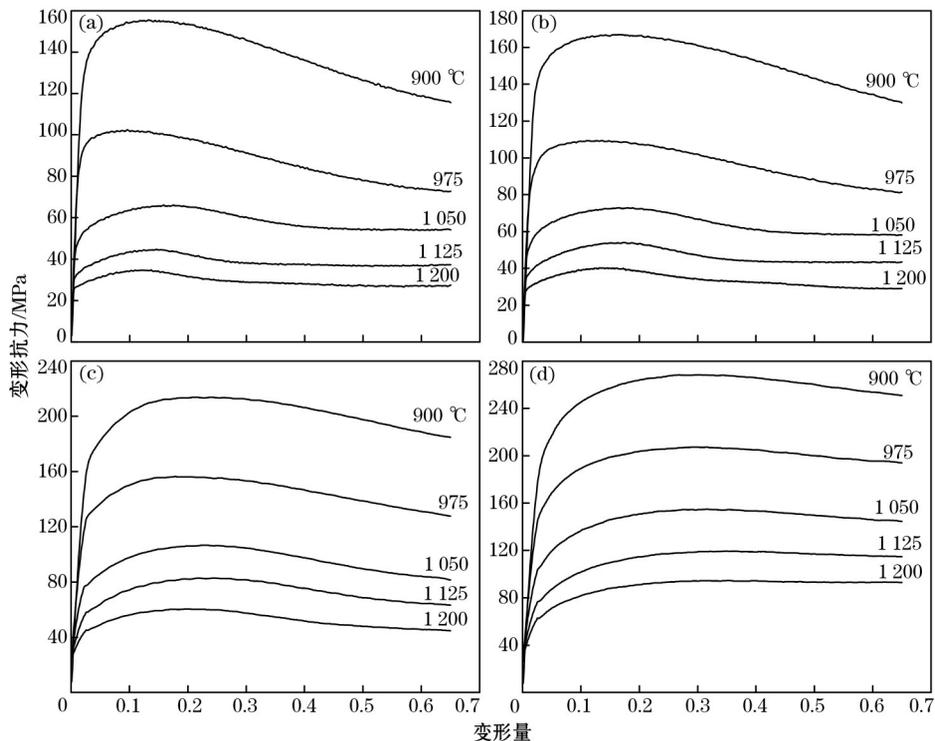
## 1 试验材料及方法

试验材料为Cr8合金钢,化学成分(质量分数)为C 0.48%,Si 0.54%,Mn 0.6%,Cr 7.46%,Ni 0.48%,Mo 0.45%,V 0.13%。试验采用尺寸为 $\phi 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的试样,在Gleeble-1500D热模拟试验机上进行等温热压缩试验。为了减小摩擦力,在试样端面与试验设备的两压头之间填充润滑剂。试验的变形温度为900、975、1 050、1 125、1 200  $^{\circ}\text{C}$ ,应变速率为0.005、0.01、0.1、1、5  $\text{s}^{-1}$ 。压缩前设置10  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速率,加热试样到变形温度之后保温5 min,进行压缩变形。结束后立即取出试样水淬,进行磨样、抛光、腐蚀,在光学显微镜下观察微观组织。

## 2 模型的建立

### 2.1 变形抗力-变形量曲线

图1所示为不同变形温度和应变速率下Cr8合金钢的变形抗力-变形量曲线。在变形过程中加工硬化和动态软化同时进行,两者共同影响着变形抗



(a)  $\dot{\epsilon}=0.005\text{ s}^{-1}$ ; (b)  $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ ; (c)  $\dot{\epsilon}=0.1\text{ s}^{-1}$ ; (d)  $\dot{\epsilon}=1\text{ s}^{-1}$ 。

图1 Cr8合金钢在不同变形条件下的变形抗力-变形量曲线

Fig. 1 Deformation resistance-strain curves of Cr8 alloy at different deformation conditions

力的变化。由图可知,在变形初始阶段,变形抗力随着应变的增加而急剧增大,加工硬化起主导作用,这是由于位错密度急剧增加,出现位错塞积。随着变形量增加,位错通过攀移、交滑移和位错重排,使材料内部发生动态回复,变形抗力的增长速率减小。当位错密度达到临界条件,动态再结晶造成的软化作用占主导,位错密度降低,变形抗力达到峰值后开始减小。在变形的后阶段,加工硬化速率与动态回复和动态再结晶引起的软化速率达到动态平衡,变形抗力趋向一条直线。此外,当变形温度恒定时,例如变形温度为 1 050 °C,随着应变速率由 0.005 增加到 1 s<sup>-1</sup>,动态软化所进行的时间缩短,软化作用减弱,导致变形抗力增加,并且峰值应力出现的时间更长。当应变速率恒定时,随着变形温度的升高,变形抗力减小,达到峰值应力的时间更短,这是因为较高的温度提供的热激活能增高,原子扩散速率变大,位错产生攀移、交滑移及位错重排的频率更高,动态软化作用明显增强,导致变形抗力下降。

## 2.2 L-J 位错密度模型

材料在热变形过程中发生的加工硬化使位错密度增殖,由动态回复和动态再结晶引起的软化作用使位错密度湮灭。晶粒内部位错密度的演变可以通过改进的 Laasraoui-Jonas (L-J) 位错密度模型表示<sup>[22-23]</sup>。

$$\frac{d\rho_i}{d\varepsilon} = h - r\rho - rdV \quad (1)$$

$$r = r_0 \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{-m} \cdot \exp\left( \frac{-mQ}{RT} \right) \quad (2)$$

$$h = h_0 \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^m \cdot \exp\left( \frac{mQ}{RT} \right) \quad (3)$$

式中:  $\rho_i$  为第  $i$  个新晶粒的位错密度;  $\varepsilon$  为应变;  $\rho$  为位错密度;  $h$  为硬化系数;  $r$  为动态回复软化系数;  $V$  为晶界迁移扫过的体积;  $r_0$  为软化常数;  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率;  $\dot{\varepsilon}_0$  为应变速率修正常数(一般取 1);  $m$  为敏感系数;  $h_0$  为硬化常数;  $Q$  为扩散激活能;  $R$  为气体常数;  $T$  为温度。

晶界迁移对位错密度的变化影响很小,所以忽略不计。对式(1)进行求解可得

$$\rho = \frac{h}{r} - \frac{C}{r} \cdot \exp(-r\varepsilon) \quad (4)$$

当应变足够大时,可以近似认为流变应力等于回复应力

$$\sigma_{\text{sat}} \approx \alpha \mu b \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{\text{sat}}$  为动态饱和应力;  $\alpha$  为泰勒因子,一般取

0.5;  $\mu$  为剪切模量;  $b$  为柏氏矢量。

经推导可得动态回复软化系数  $r$  与应力应变的关系为

$$\sigma = [\sigma_{\text{sat}}^2 - (\sigma_{\text{sat}}^2 - \sigma_0^2) \exp(-r\varepsilon)]^{0.5} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_0$  为屈服应力。

根据加工硬化率的定义  $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ , 式(6)求导变换可得

$$2\sigma\theta = r\sigma_{\text{sat}}^2 - r\sigma^2 \quad (7)$$

由式(7)可知,根据  $2\sigma\theta - r\sigma^2$  曲线斜率能够得到各变形条件下的软化系数  $r$ , 令  $2\sigma\theta - r\sigma^2$  曲线斜率为  $k$ , 则  $r = -k$ 。

通过 Cr8 合金钢热压缩试验得到的变形抗力-变形量曲线,建立  $2\sigma\theta - r\sigma^2$  关系曲线图,如图 2 所示(图中虚线的斜率就是  $2\sigma\theta - r\sigma^2$  曲线的近似斜率  $k$ )。

将  $\dot{\varepsilon}_0 = 1$  代入式(2),且对等式两边同时取对数得

$$\ln r = \ln r_0 - m \ln \dot{\varepsilon} - \frac{mQ}{RT} \quad (8)$$

将各变形条件下所得的  $r$  值代入式(8),并进行多元线性拟合,如图 3 所示为  $\ln r - T^{-1}$  曲线图,从图中可知不同应变速率下  $\ln r$  与  $T^{-1}$  呈线性关系,相关系数  $R^2$  为 0.990 2,且曲线斜率相似,表明修正的 L-J 位错密度模型能够用于 Cr8 合金钢热变形过程中位错密度演变的计算。求得各个参数为:  $r_0 = 8\,731.832$ ,  $m = 0.179\,36$ ,  $Q = 340\,332.2$  J/mol。

通过将加工硬化率曲线  $\theta - \sigma$  延长到  $\theta = 0$  处可以得到动态回复饱和应力  $\sigma_{\text{sat}}$ <sup>[24]</sup>。把得到的各个参数代入式(5),即可求出不同变形条件下的硬化系数  $h$ ,然后将所求的值分别代入到式(3),从而得到硬化常数  $h_0 = 0.609$ 。

## 2.3 形核和长大模型

动态再结晶的形核一般优先出现在晶界或高位错密度区,当位错密度到达一个临界值时,动态再结晶形核就会开始发生。DING R 和 GUO Z X 认为形核速率与温度、应变速率的关系可以由式(9)表示<sup>[12]</sup>。

$$\dot{n} = C \dot{\varepsilon}^m \exp\left( -\frac{Q_{\text{act}}}{RT} \right) \quad (9)$$

式中:  $\dot{n}$  为形核速率;  $C$  为材料参数;  $Q_{\text{act}}$  为再结晶热激活能。

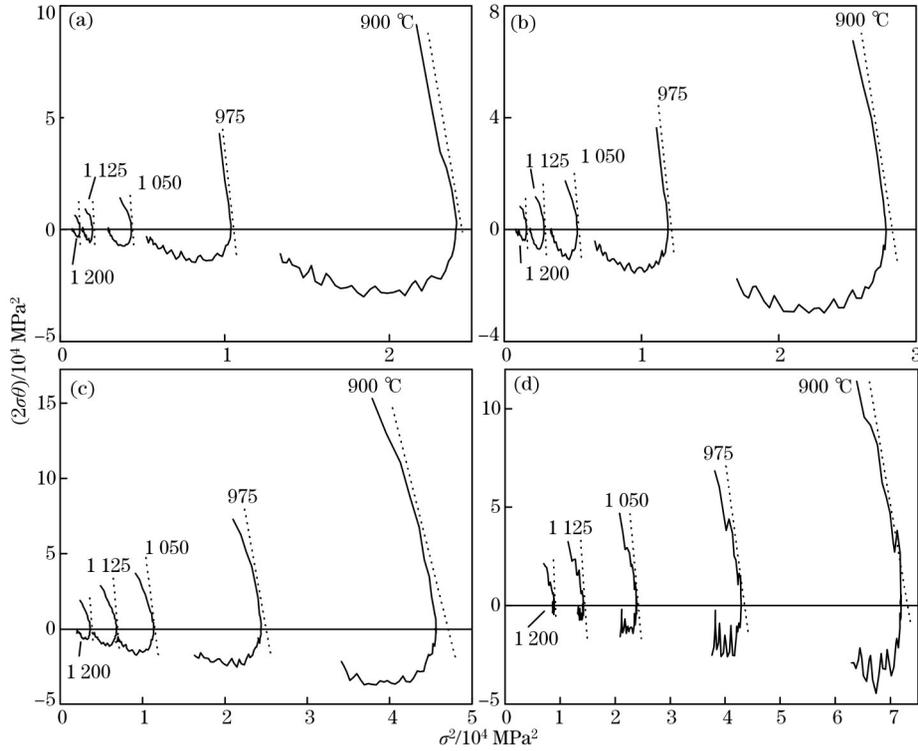
动态再结晶发生之后,新生成的晶粒与基体晶粒之间存在较大位错密度差,这为新晶粒的长大提供了驱动力。动态再结晶晶粒长大模型可以表示为

$$v_i = \frac{b}{KT} D \exp\left( \frac{-Q}{RT} \right) F_i / (4\pi r_i^2) \quad (10)$$

$$F_i = 4\pi r_i^2 \tau (\rho_m - \rho_i) - 8\pi r_i \gamma_i \quad (11)$$

式中:  $v_i$  为第  $i$  个新品粒的生长速度;  $D$  为扩散有效系数;  $K$  为波尔赫兹常数;  $F_i$  为第  $i$  个新品粒的

趋动力;  $r_i$  为第  $i$  个新品粒的半径;  $\rho_m$  为基体晶粒位错密度;  $\tau$  为位错线能量,  $\tau = 0.5\mu b^2$ ;  $\gamma_i$  为第  $i$  个新品粒的晶界能。



(a)  $\dot{\epsilon} = 0.005 \text{ s}^{-1}$ ; (b)  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ ; (c)  $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ ; (d)  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ 。

图2  $2\theta\sigma$  和  $\sigma^2$  关系曲线

Fig. 2 Relationship between  $2\theta\sigma$  and  $\sigma^2$

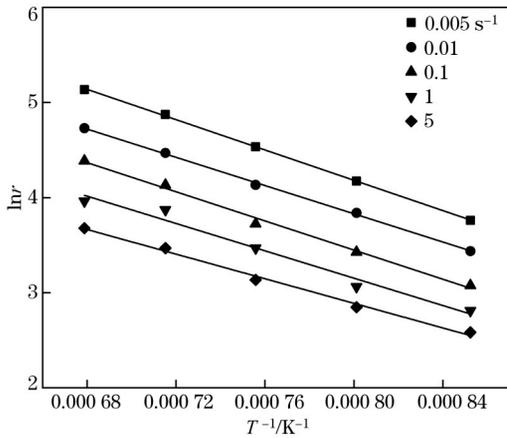


图3  $\ln r$  和  $T^{-1}$  关系曲线

Fig. 3 Relationship between  $\ln r$  and  $T^{-1}$

### 3 模拟结果和分析

将上述所求修正的L-J位错密度模型导入到Deform-3D软件的CA模块中,对Cr8合金钢动态再结晶行为进行了模拟,模拟所采用的变形条件和热压缩试验保持一致,模拟过程中环境温度设置为20 °C,试样与模具的摩擦因数设置为0.3,热传递系

数设置为1000 W/(m<sup>2</sup>·°C),所取的模拟区域划分网格为150×150个,绝对长度设置为2 μm,代表300 μm×300 μm的实际样品,元胞邻居类型采用Moore邻居类型,初始晶粒尺寸为25 μm,位错初始密度为0.01 μm<sup>-2</sup>。Cr8合金钢的材料参数见表1。

表1 Cr8合金钢的材料参数

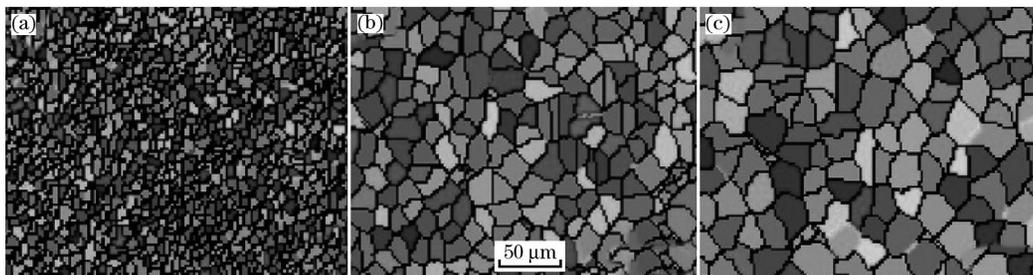
Table 1 Material parameters of Cr8 alloy

泊松比	热辐射系数	激活能/(kJ·mol <sup>-1</sup> )	剪切模量/MPa	柏氏矢量/m	边界扩散能/(kJ·mol <sup>-1</sup> )
0.3	0.7	340.332	79 000	$2.3 \times 10^{-10}$	178

图4所示为应变速率为0.1 s<sup>-1</sup>、变形量为55%时,不同变形温度下模拟的微观组织。从图中可知,晶粒基本为比较均匀的等轴晶,在相同的应变速率和变形量时,随着温度的升高,再结晶晶粒尺寸也随之增大。这是因为随着温度的增加,位错的攀移、交滑移和重排速度提高,使得形核率降低,同时,动态再结晶孕育期缩短,使其更容易发生,晶界的迁移速率增大,新生晶粒能够迅速生长,导致晶

粒粗化。图 5 所示为试验得到的微观组织。从图中可知,随着温度的升高,晶粒尺寸越来越大。对比图 4 和图 5 可得,模拟结果与试验结果非常相近,模拟的平均晶粒尺寸与试验的平均晶粒尺寸相比较见表 2,两者的误差均在 7% 以内。Cr8 合金钢在实

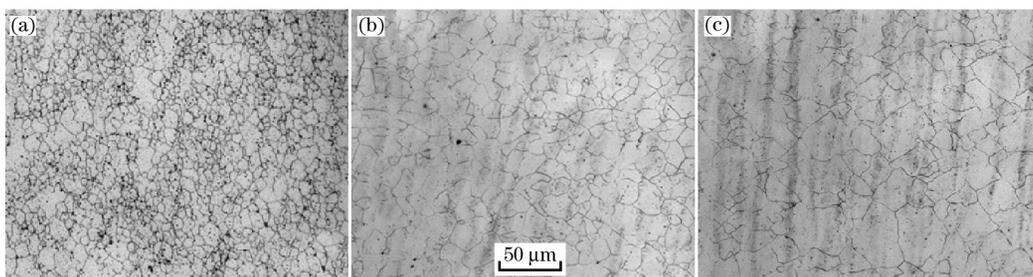
际生产中通常由于变形不均匀,造成内部组织不均匀,从而影响到材料的综合性能,采用本文所建立修正的 L-J 位错密度模型,结合 CA 法能够直观的预测不同变形区域内晶粒大小变化情况,对 Cr8 合金钢在实际生产中工艺的制定具有很大指导作用。



(a) 变形温度为 1 050 °C; (b) 变形温度为 1 125 °C; (c) 变形温度为 1 200 °C。

图 4 应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时不同变形温度下的模拟组织

Fig. 4 Simulated microstructures at strain rate of  $0.1 \text{ s}^{-1}$  with different temperatures



(a) 变形温度为 1 050 °C; (b) 变形温度为 1 125 °C; (c) 变形温度为 1 200 °C。

图 5 应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时不同变形温度下的金相组织

Fig. 5 Optical microstructures at strain rate of  $0.1 \text{ s}^{-1}$  with different temperatures

表 2 模拟和试验的平均晶粒尺寸比较

Table 2 Average grain size comparison of simulation and experimental data

变形温度/°C	模拟平均晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$	试验平均晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$	相对误差/%
1 050	7.23	7.66	5.6
1 125	14.74	14.05	4.9
1 200	22.13	20.72	6.8

## 4 结论

(1) 在本试验条件下, Cr8 合金钢的变形抗力与变形量关系曲线图中均存在明显的峰值, 是典型的动态再结晶特征; 变形抗力随着温度的升高而降低, 随着应变速率的增大而增大。

(2) Cr8 合金钢的热激活能  $Q$  为 340.332 kJ/mol, 得到了改进的 L-J 位错密度模型中的动态回复软化系数为  $r$  和加工硬化系数为  $h$ , 相关系数  $R^2$  为 0.990 2。

(3) 将修正的 L-J 位错密度模型和 Deform-3D

软件中的 CA 模块相结合, 对 Cr8 合金钢动态再结晶过程进行了模拟, 当应变速率一定时, 在较高温度下, 材料内部位错运动加剧, 动态再结晶晶粒尺寸增大, 晶粒尺寸的模拟值与试验值平均相对误差在 7% 以内。

## 参考文献:

- [ 1 ] 崔振山, 陈文, 陈飞, 等. 大锻件控性锻造过程的计算机模拟技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(11): 2. (CUI Zhen-shan, CHEN Wen, CHEN Fei, et al. Computer modeling of property-controlled forging process for heavy forgings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(11): 2.)
- [ 2 ] 刘云峰, 周莲莲, 宋和川. 冷连轧机辊型参数综合优化设计方法及应用[J]. 中国冶金, 2017, 27(8): 14. (LIU Yun-feng, ZHOU Lian-lian, SONG He-chuan. Method and application of roll profile optimization design for cold continuous rolling mill [J]. China Metallurgy, 2017, 27(8): 14.)
- [ 3 ] 郭薇, 王秋娜, 王凤琴, 等. 热连轧工作辊热平衡的优化研究与应用[J]. 中国冶金, 2017, 27(7): 50. (GUO Wei, WANG Qiu-na, WANG Feng-qin, et al. Research and application of optimization of thermal balance of work roll in hot strip mill[J].

- China Metallurgy, 2017, 27(7): 50.)
- [ 4 ] 迟宏宵, 马党参, 王昌, 等. Cr8Mo2SiV 钢二次硬化机理的研究[J]. 金属学报, 2010, 46(10): 1181. (CHI Hong-xiao, MA Dang-shen, WANG Chang, et al. Study on secondary hardening mechanism of Cr8Mo2SiV steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(10): 1181.)
- [ 5 ] 霍连喆, 赵鹏飞, 孙丽坤, 等. Cr8 钢的动态再结晶行为及组织转变[J]. 理化检测(物理分册), 2012, 48(10): 640. (HUO Lian-zhe, ZHAO Peng-fei, SUN Li-kun, et al. Dynamic recrystallization behavior and microstructure transformation of Cr8 steel[J]. PTCA(Part A: Physical Testing), 2012, 48(10): 640.)
- [ 6 ] 王葛, 王东冉, 刘利刚, 等. Cr8 钢奥氏体晶粒长大规律[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(2): 94. (WANG Ge, WANG Dong-ran, LIU Li-gang, et al. Austenite grain growth behavior of Cr8 steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(2): 94.)
- [ 7 ] 王葛, 刘智超, 常旭东, 等. Cr8 钢轧辊最终热处理过程数值模拟与实验研究[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(6): 241. (WANG Ge, LIU Zhi-chao, CHANG Xu-dong, et al. Numerical simulation and experimental research on final heat treatment process of a Cr8 steel roll[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(6): 241.)
- [ 8 ] 张岩, 赵爱民, 何建国, 等. 热处理工艺对 Cr8 钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(1): 79. (ZHANG Yan, ZHAO Ai-min, HE Jian-guo, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of Cr8 steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(1): 79.)
- [ 9 ] CHEN Fei, CUI Zhen-shan, LIU Juan, et al. Modeling and simulation on dynamic recrystallization of 30Cr2Ni4MoV rotor steel using the cellular automation method[J]. Modeling Simul Mater Sci Eng, 2009, 17(7): 1.
- [ 10 ] 周海涛, 刘志超, 温盛发, 等. GH625 合金的动态再结晶行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(11): 1917. (ZHOU Hai-tao, LIU Zhi-chao, WEN Sheng-fa, et al. Dynamic recrystallization behavior of GH625 superalloy during hot deformation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(11): 1917.)
- [ 11 ] HE Yun-bin, PAN Qing-lin, CHEN Qin, et al. Modeling of strain hardening and dynamic recrystallization of ZK60 magnesium alloy during hot deformation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 46.
- [ 12 ] DING R, GUO Z X. Coupled quantitative simulation of microstructure evolution and plastic flow during dynamic recrystallization[J]. Acta Materialia, 2001, 49: 3163.
- [ 13 ] 龚乾江, 梁益龙, 杨明, 等. 20CrMnTiH 钢唯象本构模型及动态再结晶行为[J]. 钢铁, 2017, 52(6): 67. (GONG Qian-jiang, LIANG Yi-long, YANG Ming, et al. Phenomenological constitutive model and dynamic recrystallization behavior of 20CrMnTiH steel[J]. Iron and Steel, 2017, 52(6): 67.)
- [ 14 ] 周敏, 厉勇, 刘荣佩, 等. 新型二次硬化渗碳钢的高温塑性及热加工图[J]. 钢铁, 2016, 51(6): 76. (ZHOU Min, LI Yong, LIU Rong-pei, et al. Hot ductility and processing maps of a new secondary hardening carburized steel[J]. Iron and Steel, 2016, 51(6): 76.)
- [ 15 ] Humphreys F J, Hatherly M. Recrystallization and Related Annealing Phenomena[M]. Oxford: Pergamon, 1995.
- [ 16 ] 李落星, 何凤仪, 刘筱, 等. AM80-0.2Sr-1.5Ca 镁合金高温压缩过程的动态再结晶模拟[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(12): 46. (LI Luo-xing, HE Feng-yi, LIU Xiao, et al. Simulation of the dynamic recrystallization of AM80-0.2Sr-1.5Ca magnesium alloy during hot compression deformation[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2011, 38(12): 46.)
- [ 17 ] DENG X H, QU Z D, ZHANG L W, et al. Modeling and simulation of dynamic recrystallization of GCr15 steel using cellular automaton method[J]. Materials Science Forum, 2013, 750: 156.
- [ 18 ] 陈飞, 崔振山, 董定乾. 微观组织演变元胞自动机模拟研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(4): 30. (CHEN Fei, CUI Zhen-shan, DONG Ding-qian. Research progress in cellular automaton simulation of microstructure evolution[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(4): 30.)
- [ 19 ] LIU Xiao, LI Luo-xing, HE Feng-yi, et al. Simulation on dynamic recrystallization behavior of AZ31 magnesium alloy using cellular automaton method coupling Laasraoui-Jonas model[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(9): 2692.
- [ 20 ] 邓小虎, 张立文, 曲周德. GCr15 钢双道次热变形过程的元胞自动机模拟[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(8): 226. (DENG Xiao-hu, ZHANG Li-wen, QU Zhou-de. Modeling of two-pass hot deformation process in GCr15 steel by using cellular automaton method[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(8): 226.)
- [ 21 ] 董洪波, 余新平, 章威. 基于位错密度理论的 Q550D 钢动态软化及加工硬化行为[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(3): 98. (DONG Hong-bo, YU Xin-ping, ZHANG Wei. Dynamic softening and strain hardening behavior of Q550D steel based on the dislocation density theory[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(3): 98.)
- [ 22 ] Meck H, Kocks U F. Kinetics of flow and strain-hardening[J]. Acta Metallurgica, 1981, 29(11): 1865.
- [ 23 ] Laasraoui A, Jonas J J. Prediction of steel flow stresses at high temperatures and rates[J]. Metall Trans A, 1991, 22(7): 1545.
- [ 24 ] 何运斌, 潘清林, 覃银江, 等. ZK60 镁合金热变形过程中的动态再结晶动力学[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1205. (HE Yun-bin, PAN Qing-lin, QIN Yin-jiang, et al. Dynamic recrystallization kinetics of ZK60 magnesium alloy during hot deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(6): 1205.)