

10 钢热变形过程动态再结晶行为

李超群, 张立文, 李 飞, 张 驰, 毛培刚

(大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在 Gleeble-1500 热模拟实验机上进行单道次压缩实验, 试样的尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 压缩变形温度为 $900 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, 应变速率为 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$, 压缩量为 63.2% (真应变为 1.0)。结果表明: 10 钢在高温单道次压缩实验过程中应力随着变形温度的升高而降低, 随着应变速率的升高而升高, 且在热变形过程中发生了动态再结晶现象。在此研究基础上, 得到了 10 钢的动态再结晶临界应变模型; 根据真应力-真应变曲线, 计算动态再结晶体积分数, 构建了 10 钢动态再结晶动力学模型; 根据金相统计晶粒尺寸, 建立了 10 钢动态再结晶晶粒尺寸模型。引入平均相对误差绝对值 (AARE), 验证 10 钢动态再结晶晶粒尺寸方程的拟合效果, 得到 $AARE = 6.32\%$, 说明拟合效果良好。

关键词: 10 钢; 动态再结晶; 临界应变; 动力学模型; 晶粒尺寸模型

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.033

中图分类号: TG142.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0207-06

Dynamic recrystallization behavior for 10 steel during thermal deformation process

Li Chaoqun, Zhang Liwen, Li Fei, Zhang Chi, Mao Peigang

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: For 10 steel, a single-pass compression test was carried out on the thermal simulator Gleeble-1500, and the size of sample was $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$. The compression deformation temperatures were $900 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, the strain rates were $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$, and the compression amount was 63.2% (the true strain was 1.0). The results show that the stress of 10 steel decreases with the increasing of deformation temperature and increases with the increasing of strain rate during the high-temperature single-pass compression test, and the dynamic recrystallization phenomenon occurs during the thermal deformation of 10 steel. On the basis of this research, the critical strain model of dynamic recrystallization for 10 steel was obtained, according to the true stress-true strain curves, the dynamic recrystallization volume fractions were calculated, and the recrystallization kinetic model of 10 steel was constructed. Furthermore, the dynamic recrystallization grain size model of 10 steel was established, according to the grain sizes measured by the metallographic photos. The average absolute relative error (AARE) was introduced to verify the fitting effect of dynamic recrystallization grain size equation for 10 steel, and the value of AARE was 6.32%, indicating that the fitting effect was good.

Key words: 10 steel; dynamic recrystallization; critical strain; kinetics model; grain size model

10 钢是一种典型的低碳钢, 由于塑性和韧性较好, 被广泛应用于制造高韧性的零件, 如冲压件、焊接结构件等。目前, 经常采用控制材料热变形过程中微观组织的方法获得较高品质的材料产品, 因此, 研究材料成形过程中的组织演变规律, 分析材料的最佳成形工艺条件是十分必要的。

在金属材料的高温热变形过程中, 动态再结晶是组织演变的一种十分重要的机制, 详细了解其整个过程, 有利于确定材料的最佳成形工艺条件。国内外许多学者对此展开了深入的研究。刘洁等^[1]研究了铸态 Mn18Cr18N 钢单道次直接轧制压下率对再结晶的影响。Li Y J 等^[2]建立了镍基 GH690 超合金钢的动态再结晶临界应变模型、动力学模型和晶粒尺寸模型, 并建立了三维有限元模型, 采用得到的实验规律, 对热压缩试样内部的晶粒演化过程进行了模拟。李立新等^[3]和 Li C M 等^[4]通过对 DB685 低碳贝氏体钢和 300M 钢的加工硬化率进行计算分析, 确定了动态再结晶过程中的临界应变, 得到了相应的动力学方程, 并研究了温度对动态再结晶过

收稿日期: 2020-12-21; 修订日期: 2021-03-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFA0705304); 辽宁省自然科学基金资助项目 (2019KF0506)

作者简介: 李超群 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 992742661@qq.com

通信作者: 张立文 (1962-), 男, 博士, 教授

E-mail: commat@mail.dlut.edu.cn

程的影响。同样,孔晓寒等^[5]和王忠堂等^[6]分别对 Q345E 低碳合金钢及 Inconel 690 合金整个动态再结晶过程进行分析,明确临界变形条件及再结晶转变规律,为工艺优化提供理论支持。

本文分析了 10 钢热变形过程中的动态再结晶行为,明确了 10 钢的动态再结晶临界应变条件,分析了 10 钢的动态再结晶动力学“S”形曲线,并对不同变形条件下再结晶体积分数进行预测,确定了相应的动力学模型,最后,通过对金相照片进行分析和晶粒尺寸的统计,研究了再结晶微观组织变化规律,确定了相应的晶粒尺寸模型。

1 实验方案

实验使用 10 钢的化学成分如表 1 所示。本文在

Gleeble-1500 热模拟实验机上进行单道次压缩实验,研究 10 钢的动态再结晶过程。将材料加工为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的圆柱形样品,变形温度为 $900 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$,应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 为 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 。压缩之前,将样品以 $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度加热至 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$,获得均匀的奥氏体初始组织。之后,将温度按照 $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冷却速度降至变形温度,并在变形温度下保温 30 s,以消除温度梯度。随后按照一定的应变速率进行压缩,使试样的压缩量达到 63.2% (真应变为 1.0),获得压缩过程中不同变形条件下的真应力-真应变曲线。再将变形后的试样快速冷却至室温,以观察并统计晶界。最后,将试样沿轴线切开,经过研磨、抛光、腐蚀处理后利用金相显微镜观察其微观组织。

表 1 10 钢的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 10 steel (% , mass fraction)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Fe
0.0800	0.2400	0.500	0.0090	0.0140	0.0450	0.0080	0.0120	0.0181	余量

2 结果与讨论

2.1 真应力-真应变曲线分析

10 钢的单道次压缩真应力-真应变曲线如图 1 所示,从图 1 中可以看出曲线可以分为 3 种类型:随着真应变增加真应力逐渐上升的加工硬化型、随着真应变增加真应力先增加后趋于平稳的动态回复型以及随着真应变增加真应力先增加后降低再趋于平稳的动态再结晶型。

图 1 中变形温度为 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 为 0.1 s^{-1} 条件下的真应力-真应变曲线为典型的动态再结晶型,其大致可以分为 3 个阶段:第 1 阶段,加工硬化占据主要地位,试样在压缩过程中位错密度逐渐上升使试样的变形抗力快速增长,且随着压缩的继续进行,位错密度越来越大,位错能也越来越高,促进了动态再结晶的发生;第 2 阶段,当变形基体储存的能量超过动态再结晶临界应变激活能时,动态再结晶发生,变形储能逐渐释放,畸形晶粒变成新的等轴晶粒,逐渐抵消加工硬化带来的位错塞积,此阶段真应力随变形量的增加而微量增加,当真应力增加至峰值应力时,动态软化与加工硬化首次达到平衡;第 3 阶段,动态再结晶的比重越来越大,位错密度逐渐降低,试样的变形抗力也逐渐降低,当动态再结晶逐渐发生完全时,动态软化与加工硬化再次逐渐

达到平衡状态,变形抗力保持稳定状态。

2.2 动态再结晶临界应变模型的构建

临界应变 ε_c 是判断材料在变形过程中是否发生动态再结晶的关键点,明确 ε_c 的具体数值是十分必要的。Mcqueen H J 等^[7]提出了一种利用加工硬化率 $\theta (\theta = d\sigma/d\varepsilon, \sigma$ 为应力, ε 为应变) 与 σ 的关系曲线来确定 ε_c 的方法。图 2 为变形温度为 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率为 0.1 s^{-1} 条件下 θ 与 σ 的关系曲线图。从图 2 中可以看出,曲线大致分为 3 个阶段:阶段 I, θ 从一个极大值快速线性下降;阶段 II, 由于回复的发生,削弱了加工硬化带来的位错塞积,使 θ 的线性下降速度变缓;阶段 III, 当试样的变形量超过 ε_c 时,动态再结晶发生, θ 的下降速度又逐渐增加。因此,可以根据图 2 曲线中第 2 阶段和第 3 阶段的交界处来确定 ε_c 对应的临界应力 σ_c 的值。此外,当 $\theta=0$ 时,动态再结晶的稳态应力 σ_{ss} 和峰值应力 σ_p 如图 2 所示,进而可以确定各个参数对应的应变值。

为了进一步确定 ε_c 的值,Polia E I 等^[8]指出 θ 与 σ 关系曲线的拐点即为 ε_c 点。根据式 (1),作出变形温度为 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率为 0.1 s^{-1} 条件下 $d(\ln\theta)/d\varepsilon$ 与应变 ε 的关系曲线图,如图 3 所示,曲线顶点即为 ε_c 点。

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

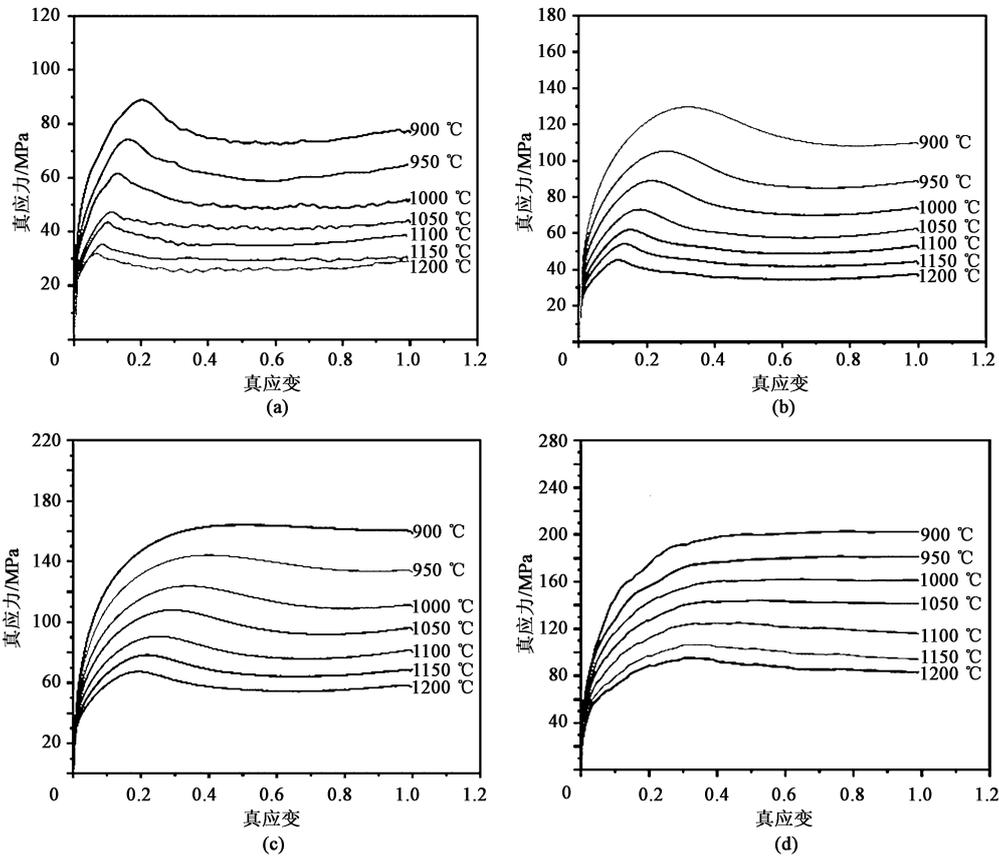


图 1 不同应变速率、不同变形条件下的 10 钢的真应力-真应变曲线
 (a) $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$

Fig. 1 Curves of true stress-true strain for 10 steel at different strain rates and different deformation temperatures

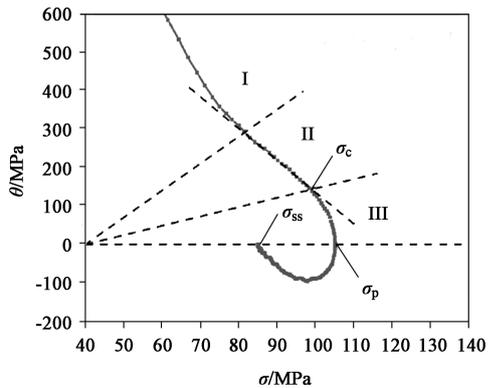


图 2 变形温度为 950 °C、应变速率为 0.1 s⁻¹ 条件下加工硬化率与应力的关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between work hardening rate and stress at deformation temperature of 950 °C and strain rate of 0.1 s⁻¹

经过研究发现， ϵ_c 与峰值应变 ϵ_p 有一定的线性关系，其关系表达式如式 (2) 所示^[9]：

$$\epsilon_c = k \cdot \epsilon_p \quad (2)$$

式中： k 为常数系数。

统计不同变形条件下的 ϵ_c 、 ϵ_p ，进行线性回归

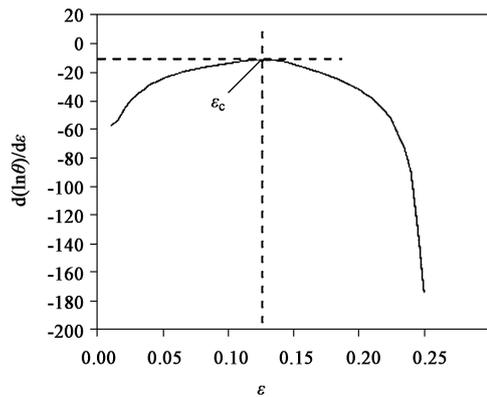


图 3 变形温度为 950 °C、应变速率为 0.1 s⁻¹ 条件下 $d(\ln\theta)/d\epsilon$ 与应变的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between $d(\ln\theta)/d\epsilon$ and strain at deformation temperature of 950 °C and strain rate of 0.1 s⁻¹

拟合，可以得到系数 k 为 0.687。

ϵ_p 可以用 Zener-Hollomon 参数 (Z 参数) 来表示，其表达式为^[9]：

$$\begin{cases} \epsilon_p = A \cdot Z^m \\ Z = \dot{\epsilon} \exp[Q/RT] \end{cases} \quad (3)$$

式中: A 和 m 为材料常数; Q 为动态再结晶临界应变激活能, ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$); R 为理想气体常数, ($\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$); T 为绝对温度, K 。

经计算本文研究的 10 钢的 $Q=301073.15 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

根据式 (3) 可以看出 $\ln \varepsilon_p$ 与 $\ln Z$ 呈线性关系, 通过线性拟合的方式可以得到 A 和 m 分别为 0.0023 和 0.174, 从而可以确定含 Z 参数的 ε_p 表达式。结合上述式 (2) 和式 (3), 可以得到动态再结晶临界应变模型, 见式 (4):

$$\begin{cases} \varepsilon_p = 0.0023 \dot{\varepsilon}^{0.174} \exp\left(\frac{301073.15}{RT}\right) \\ \varepsilon_c = 0.687 \varepsilon_p \end{cases} \quad (4)$$

2.3 动态再结晶动力学模型的构建

动态再结晶动力学方程描述了试样在压缩变形过程中再结晶进行的速度, 即等温条件下再结晶体积分数与时间的关系。动态再结晶从开始到完全的过程具有一定的规律性, 其体积分数随时间的变化呈现出“S”形^[10]。动态再结晶开始时有一个孕育期, 再结晶速度缓慢, 随着时间的增加再结晶速度逐渐增加, 当再结晶体积分数为 50% 时, 再结晶速度达到最大, 而后再结晶速度逐渐降低。经过研究发现^[11], 一般采用 Avrami 方程来描述动态再结晶过程中的再结晶变化规律, 其表达式为:

$$X_d = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right] \quad (5)$$

式中: X_d 为动态再结晶体积分数; n 为 Avrami 方程的指数; t 为动态再结晶所用的时间, s ; $t_{0.5}$ 为动态再结晶从开始到 $X_d=50\%$ 时所用的时间, s 。

$t_{0.5}$ 的数学表达式如下:

$$t_{0.5} = B \dot{\varepsilon}^p \exp\left(\frac{Q_1}{RT}\right) \quad (6)$$

式中: Q_1 为动态再结晶激活能, ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$); B 、 p 为材料常数。

为了确定不同实验条件下 X_d 的数值, 目前可以采用的手段有: (1) 统计金相图片中再结晶的面积, 除以总面积, 可以得到该条件下的 X_d 值; (2) 通过对不同条件下的真应力-真应变曲线的进一步处理, 并结合式 (7), 确定 X_d 的数值。在本文中, 由于金相观察需要大量实验, 而且通过肉眼确定再结晶分数比较困难, 所以, 采用第 2 种方法来计算 X_d 的数值。

$$X_d = \frac{\sigma_p - \sigma}{\sigma_p - \sigma_{ss}} \quad (7)$$

为了确定 Avrami 方程的指数 n 值, 对式 (5)

两边取对数并移项, 可以得到式 (8):

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-X_d}\right)\right] = \ln 0.693 + n \ln t - n \ln t_{0.5} \quad (8)$$

根据式 (8), n 值可以通过拟合 $\ln[-\ln(1-X_d)]$ 与 $\ln t$ 的线性关系得到, 经过计算的 n 的平均值为 1.39。

同样, 对式 (6) 两边取对数并进一步变换可以得到:

$$\ln t_{0.5} = \ln B + p \ln \dot{\varepsilon} + \frac{Q_1}{RT} \quad (9)$$

按照上述方法进行线性拟合, 可以得到 $p = -0.857$ 、 $Q_1 = 24504 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$, 进而可以求出 $B = 0.017$ 。

最终, 得到 10 钢的动态再结晶动力学模型如式 (10) 所示:

$$\begin{cases} X_d = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{1.39}\right] \\ t_{0.5} = 0.017 \dot{\varepsilon}^{-0.857} \exp\left(\frac{24504}{RT}\right) \end{cases} \quad (10)$$

图 4 给出了 X_d 计算值与实验值在不同应变速率及变形温度下的对比效果。可以直观地看出, 通过模型预测的 X_d 值与实验值吻合良好, 动态再结晶动力学模型可以很好地描述再结晶变化规律。除此之外, 再结晶动力学“S”形曲线因压缩温度不同而不同, 温度越高, 再结晶发生的速度越快, 再结晶完全使用的时间越短。

2.4 动态再结晶晶粒尺寸模型的构建

图 5 为不同压缩变形条件下 10 钢的微观组织形貌。对比图 5a 和图 5b 发现, 变形温度为 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率为 0.1 s^{-1} 条件下平均晶粒尺寸为 $59 \text{ } \mu\text{m}$, 变形温度达到 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 后, 平均晶粒尺寸上升为 $79 \text{ } \mu\text{m}$ 。这是因为温度主要影响晶界的迁移速度, 相同应变速率下, 温度越高, 晶界迁移速度越快, 晶粒长大的速度越快, 进而晶粒尺寸越大。同样, 对比图 5c 和图 5d 发现, 当变形温度为 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 应变速率从 0.1 s^{-1} 增加至 1 s^{-1} 时, 平均晶粒尺寸从 $89 \text{ } \mu\text{m}$ 降至 $50 \text{ } \mu\text{m}$ 。这主要是因为: 当温度一定时, 应变速率越大, 试样达到同样变形量会经历更短的热暴露时间, 晶粒的长大相对不足。

经研究发现^[12], 由于受到变形温度和应变速率的影响, 通常用含有 Z 参数的方程来描述动态再结晶晶粒尺寸的变化规律, 如式 (11) 所示:

$$d_{\text{DRX}} = C \cdot Z^\lambda \quad (11)$$

式中: d_{DRX} 为动态再结晶平均晶粒尺寸; C 、 λ 均为

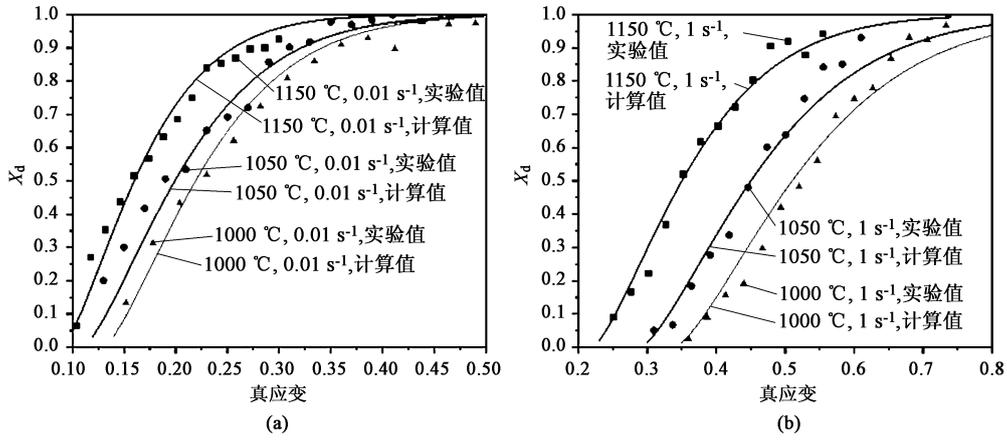


图 4 X_d 计算值与实验值在不同应变速率及变形温度下的对比图

(a) $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

Fig. 4 Comparison diagrams between calculated and experimental values of X_d at different strain rates and deformation temperatures

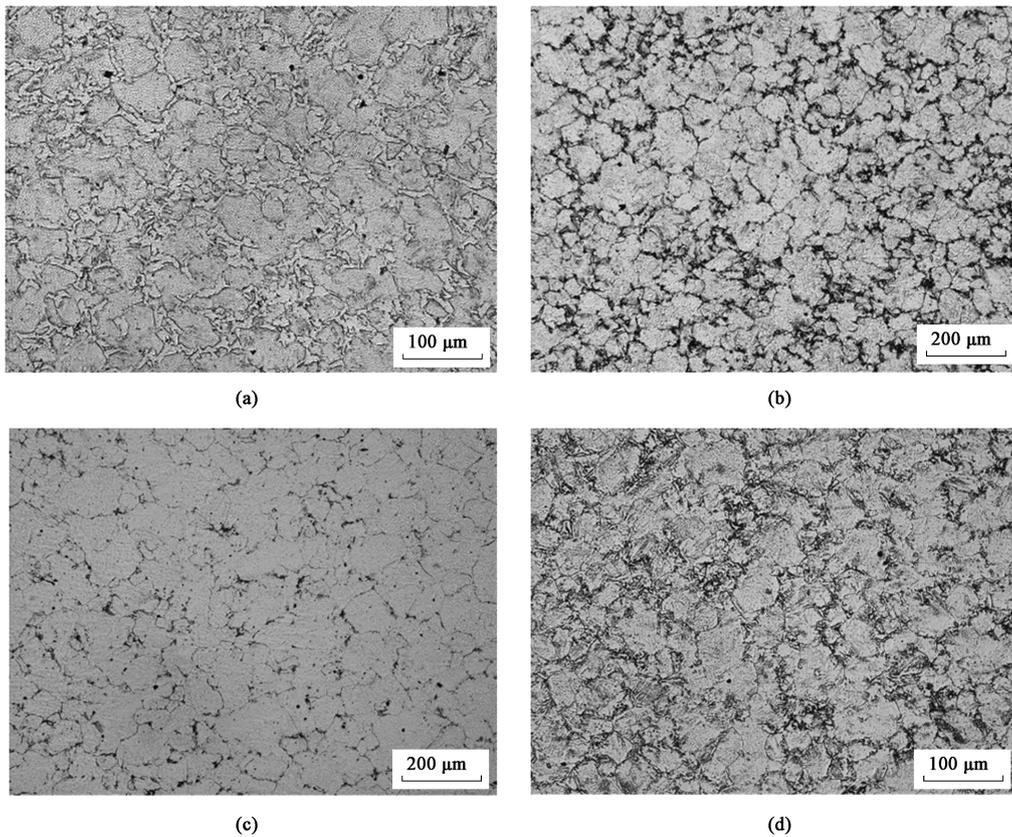


图 5 不同变形条件下 10 钢的微观组织形貌

(a) 变形温度为 1000 °C，应变速率为 0.1 s⁻¹ (b) 变形温度为 1050 °C，应变速率为 0.1 s⁻¹
 (c) 变形温度为 1100 °C，应变速率为 0.1 s⁻¹ (d) 变形温度为 1100 °C，应变速率为 1 s⁻¹

Fig. 5 Microstructure morphologies of 10 steel under different deformation conditions

(a) Deformation temperature of 1000 °C， strain rate of 0.1 s⁻¹ (b) Deformation temperature of 1050 °C， strain rate of 0.1 s⁻¹
 (c) Deformation temperature of 1100 °C， strain rate of 0.1 s⁻¹ (d) Deformation temperature of 1100 °C， strain rate of 1 s⁻¹

材料常数。

对式 (11) 两边取对数可以得到：

$$\ln d_{\text{DRX}} = \ln C + \lambda \cdot \ln Z \quad (12)$$

根据式 (12) 可知， $\ln d_{\text{DRX}}$ 与 $\ln Z$ 呈线性关系，斜率为 λ ，截距为 $\ln C$ ，通过线性拟合的方式可以得到 λ 和 C 分别为 -0.164 和 4372.5 ，拟合后的晶粒

尺寸方程如式 (13) 所示:

$$d_{\text{DRX}} = 4372.5Z^{-0.164} \quad (13)$$

为了验证拟合的晶粒尺寸方程的准确性, 本文引入平均相对误差绝对值 $AARE$ 来验证方程的拟合效果^[13]。图 6 为 10 钢再结晶晶粒尺寸计算值与实验值的对比效果, 经计算 $AARE = 6.32\%$, 说明计算值与实验值的误差很小, 可以采用该拟合方程准确地预测 10 钢动态再结晶晶粒尺寸的变化规律。

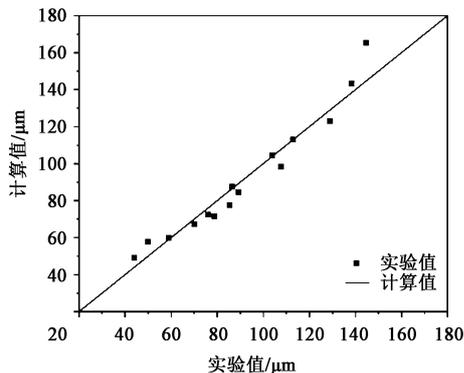


图 6 10 钢动态再结晶晶粒尺寸实验值与计算值对比

Fig. 6 Comparison between experimental and calculated values of dynamic recrystallization grain size for 10 steel

3 结论

(1) 进行 10 钢的单道次压缩实验, 建立了 θ 与 σ 的关系曲线和 $d(\ln\theta)/d\varepsilon$ 与 ε 的关系曲线, 确定不同变形条件下发生动态再结晶的临界变形条件。建立了 10 钢动态再结晶临界应变模型。

(2) 分析了 10 钢动态再结晶动力学曲线, 明确了在变形过程中再结晶转变规律。建立了 10 钢动态再结晶动力学模型。

(3) 分析了 10 钢在不同变形条件下的微观组织变化规律, 得到了平均晶粒尺寸随着变形温度和应变速率的变化规律。建立了晶粒尺寸模型。引进了拟合效果参数 $AARE$ 来验证拟合方程的准确性, 经计算 $AARE = 6.32\%$, 说明模型拟合效果良好。

参考文献:

[1] 刘洁, 张志红. 铸态 Mn18Cr18N 钢轧制热压缩实验分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 197-201.
Liu J, Zhang Z H. Experimental analysis of rolling hot compression for as-cast Mn18Cr18N steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 197-201.

[2] Li Y J, Zhang Y, Chen Z Y, et al. Hot deformation behavior and dynamic recrystallization of GH690 nickel-based superalloy [J].

Journal of Alloys and Compounds, 2020, 847: 156507.

[3] 李立新, 肖麟, 郑良玉, 等. 低碳贝氏体钢的动态再结晶行为 [J]. 金属热处理, 2018, 43 (4): 38-43.
Li L X, Xiao L, Zheng L Y, et al. Dynamic recrystallization behavior of low carbon bainitic steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43 (4): 38-43.

[4] Li C M, Huang L, Zhao M J, et al. Influence of hot deformation on dynamic recrystallization behavior of 300M steel: Rules and modeling [J]. Materials Science & Engineering A, 2020, 797: 139925.

[5] 孔晓寒, 陈慧琴, 刘建生, 等. 铸态 Q345E 钢的本构方程及动态再结晶行为 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (11): 199-204.
Kong X H, Chen H Q, Liu J S, et al. Constitutive equation and dynamic recrystallization behavior for as-cast Q345E steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (11): 199-204.

[6] 王忠堂, 邓永刚, 张士宏. 基于加工硬化率的高温合金 Inconel 690 动态再结晶临界条件 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35 (7): 193-197.
Wang Z T, Deng Y G, Zhang S H. Critical conditions of dynamic recrystallization for super-alloy Inconel 690 based on work hardening rate [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35 (7): 193-197.

[7] McQueen H J, Ryan N D. Constitutive analysis in hot working [J]. Materials Science & Engineering A, 2002, 322 (1-2): 43-63.

[8] Poliak E I, Jonas J J. A one-parameter approach to determining the critical conditions for the initiation of dynamic recrystallization [J]. Acta Materialia, 1996, 44 (1): 127-136.

[9] 王凌浩, 辛选荣, 许丁, 等. 50SiMnVB 合金钢动态再结晶临界模型的建立 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (17): 53-56.
Wang L H, Xin X R, Xu D, et al. Establishment of dynamic recrystallization critical model of 50SiMnVB alloy steel [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (17): 53-56.

[10] 程晓农, 桂香, 罗锐, 等. 核电装备用奥氏体不锈钢的高温本构模型及动态再结晶 [J]. 材料导报, 2019, 33 (11): 1775-1781.
Cheng X N, Gui X, Luo R, et al. Constitutive equation and dynamic recrystallization behavior of 316L austenitic stainless steel for nuclear power equipment [J]. Materials Reports, 2019, 33 (11): 1775-1781.

[11] Jonas J J, Quehenec X, Jiang L, et al. The Avrami kinetics of dynamic recrystallization [J]. Acta Materialia, 2009, 57: 2748-2756.

[12] 刘娟, 李居强, 崔振山, 等. 新的单参数动态再结晶动力学建模及晶粒尺寸预测 [J]. 金属学报, 2012, 48 (12): 1510-1519.
Liu J, Li J Q, Cui Z S, et al. A new one-parameter kinetics model of dynamic recrystallization and grain size prediction [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48 (12): 1510-1519.

[13] Zhao H T, Qi J J, Su R, et al. Hot deformation behaviour of 40CrNi steel and evaluation of different processing map construction methods [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (3): 2856-2869.