

# 高强钢 300 M 静态再结晶动力学研究

赵立华<sup>1)</sup>✉, 孙 燕<sup>2)</sup>, 张艳姝<sup>2)</sup>

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083 2) 机械科学研究总院先进制造技术研究中心, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: sunyanzi205@163.com

**摘 要** 为研究高强钢 300 M 静态再结晶行为, 采用 Gleeble-3800 型热模拟试验机对 300 M 钢进行单/双道次热压缩试验. 通过双道次热压缩试验分析了变形温度、应变速率、变形量和初始晶粒尺寸对静态再结晶体积分数的影响. 变形温度越高, 应变速率越大, 变形量越大, 初始晶粒尺寸越小, 则静态再结晶体积分数越大. 其中变形温度、变形量和应变速率对静态再结晶体积分数影响较大, 初始晶粒尺寸的影响相比较小. 基于双道次热压缩试验结果建立了 300 M 钢的静态再结晶体积分数模型, 基于单道次热压缩试验结果建立了 300 M 钢完全静态再结晶晶粒尺寸模型, 并验证了静态再结晶体积分数模型的正确性.

**关键词** 高强钢; 静态再结晶; 热压缩; 动力学模型

**分类号** TG142.41

## Static recrystallization behavior of the high strength steel 300 M

ZHAO Li-hua<sup>1)</sup>✉, SUN Yan<sup>2)</sup>, ZHANG Yan-shu<sup>2)</sup>

1) School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Advanced Manufacture Technology Center, China Academy of Machinery Science and Technology, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: sunyanzi205@163.com

**ABSTRACT** To research the static recrystallization behavior of high strength steel 300 M, single/double-pass hot compression tests of 300 M steel were carried out using Gleeble-3800 thermal simulation experiment equipment. The effects of deformation temperature, strain rate, height reduction and initial grain size on the volume fraction of static recrystallization were analyzed by double-pass hot compression tests. It is found that the volume fraction of static recrystallization rapidly increases with increasing deformation temperature, strain rate or height reduction, while it decreases with increasing initial grain size. Initial grain size has less effect than the others. A static recrystallization volume fraction model and a completely static recrystallization grain size model of 300 M steel were established based on the results of double-pass and single-pass hot compression tests, respectively, and the static recrystallization volume fraction model was verified to be correct by single-pass hot compression tests.

**KEY WORDS** high strength steel; static recrystallization; hot compression; kinetic models

在热变形过程中, 发生动态再结晶的部分组织在随后的间隙时间里将发生亚动态回复和亚动态再结晶. 没有发生动态再结晶的部分组织在间隙时间里发生静态回复、静态再结晶及晶粒长大<sup>[1-2]</sup>. 这些现象的发生对热变形后的组织有很大的影响, 特别是在热轧和自由锻过程中, 需要合理控制工艺参数以得到最终

的微观组织性能.

300 M 钢是一种典型的低合金超高强度钢, 广泛应用于制造各种重要承力构件, 如飞机起落架. 目前关于 300 M 钢的研究主要集中在热变形行为、微观组织演变规律、晶粒长大等方面<sup>[3-5]</sup>, 关于静态再结晶方面的研究很少, 该过程的研究主要集中在某些钢方

面<sup>[6-16]</sup>。例如: Elwazri 等<sup>[10]</sup>通过双道次热压缩试验研究过共析钢的亚动态和静态再结晶行为,建立了过共析钢亚动态和静态再结晶动力学方程式,并计算得到过共析钢亚动态再结晶激活能  $136 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  和静态再结晶激活能  $270 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; 蔺永诚等<sup>[12]</sup>研究了 42CrMo 钢形变奥氏体的静态再结晶行为,重点分析了变形参数对静态再结晶行为的影响,并建立了 42CrMo 钢的静态再结晶动力学方程; 张进学等<sup>[9]</sup>分析了变形参数对核电用 304 不锈钢静态再结晶晶粒尺寸的影响,建立了核电用 304 不锈钢静态再结晶晶粒尺寸模型。本

文通过单、双道次热压缩试验和金相观察,建立了 300 M 钢静态再结晶动力学模型,旨在为实际生产工艺的制定和材料性能的控制提供一定的理论依据。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

试验所用材料为中国第二重型机械集团公司提供的锻坯高强钢 300 M,其化学成分如表 1 所示。图 1 为高强钢 300 M 原始金相图。从图中可以看出,原始晶粒呈等轴状,平均晶粒尺寸约为  $50 \mu\text{m}$ 。

表 1 高强钢 300 M 化学成分(质量分数)  
Table 1 Chemical composition of high strength steel 300 M

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	P	S	Fe
0.4 ~ 0.46	0.65 ~ 0.9	1.45 ~ 1.8	0.7 ~ 0.95	1.65 ~ 2.0	0.3 ~ 0.45	$\geq 0.05$	$\leq 0.035$	$\leq 0.04$	余量

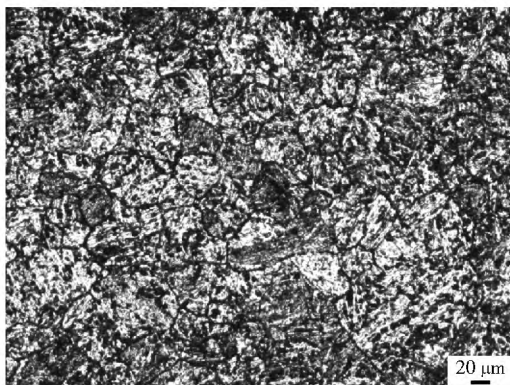


图 1 高强钢 300 M 原始金相图  
Fig. 1 Original microstructure of high strength steel 300 M

1.2 试验方法

将高强钢 300 M 加工成  $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  圆柱体试样,在 Gleeble-3800 热模拟试验机上进行热压缩试验。热压缩试验分为双道次热压缩试验和单道次热压缩试验。

双道次热压缩试验:将试样以  $20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度加热到初始温度并保温 5 min,将一部分试样立即水冷,另一部分试样以  $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度降到变形温度,保温 3 min 后进行热压缩试验。第 1 道次变形结束后卸载并在该变形温度下进行道次间隔保温,保温若干秒后重新加载进行第 2 道次热压缩,第 2 道次变形结束后立即水冷。双道次热压缩试验分三部分进行:

(1) 初始温度  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,变形温度分别为  $1000$ 、 $1050$  和  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,应变速率分别为  $0.1$ 、 $1$  和  $10 \text{ s}^{-1}$ ,保温时间分别为  $1.5$  和  $30 \text{ s}$ ,双道次变形量  $13\% + 13\%$ 。

(2) 初始温度分别为  $1050$ 、 $1100$  和  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,变形温度  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,应变速率分别为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  和  $1 \text{ s}^{-1}$ ,保温时间分别为  $1.5$  和  $30 \text{ s}$ ,双道次变形量  $13\% + 13\%$ 。

(3) 初始温度  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,变形温度  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,应变速

率  $1 \text{ s}^{-1}$ ,保温时间分别为  $1.5$  和  $30 \text{ s}$ ,双道次变形量分别为  $7\% + 13\%$ 、 $13\% + 13\%$  和  $18\% + 13\%$ 。

单道次热压缩试验:将试样以  $20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度加热到初始温度并保温 5 min,然后以  $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度降到变形温度,保温 3 min 后进行热压缩试验,变形结束在该变形温度下保温若干秒后立即水冷。单道次热压缩试验分两部分进行:

(1) 初始温度分别为  $1050$ 、 $1100$  和  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,变形温度  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,应变速率  $1 \text{ s}^{-1}$ ,保温时间  $5$ 、 $20$  和  $60 \text{ s}$ ,变形量  $13\%$ 。

(2) 初始温度  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,变形温度  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,应变速率  $1 \text{ s}^{-1}$ ,保温时间分别为  $5$ 、 $20$  和  $60 \text{ s}$ ,变形量  $7\%$ 、 $13\%$  和  $18\%$ 。

将双道次热压缩试验中加热到不同初始温度并保温 5 min 后立即水冷的未变形试样和单道次热压缩变形试样沿轴向切开,通过打磨、抛光后进行化学腐蚀,腐蚀液为饱和苦味酸和洗涤剂,体积比为  $4:1$ ,腐蚀温度  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2 试验结果与分析

2.1 双道次热压缩真应力-真应变曲线

图 2 为 300 M 钢在变形温度分别为  $1000$ 、 $1100$  和  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,应变速率分别为  $0.1$ 、 $1$  和  $10 \text{ s}^{-1}$ ,双道次变形量都为  $13\%$ ,道次间隔保温时间分别为  $1.5$  和  $30 \text{ s}$  的双道次热压缩真应力-真应变曲线。从图中可以看出:在同一个变形温度和应变速率条件下,随着保温时间的延长,第 2 道次屈服应力呈降低趋势,加工硬化逐渐明显。主要原因是:随着间隔保温时间的延长,静态再结晶体积分数增多,同时位错密度不断减小,要达到发生动态再结晶的临界应变,必须建立更多的位错密度,所以随着保温时间延长加工硬化现象越明显。当应变

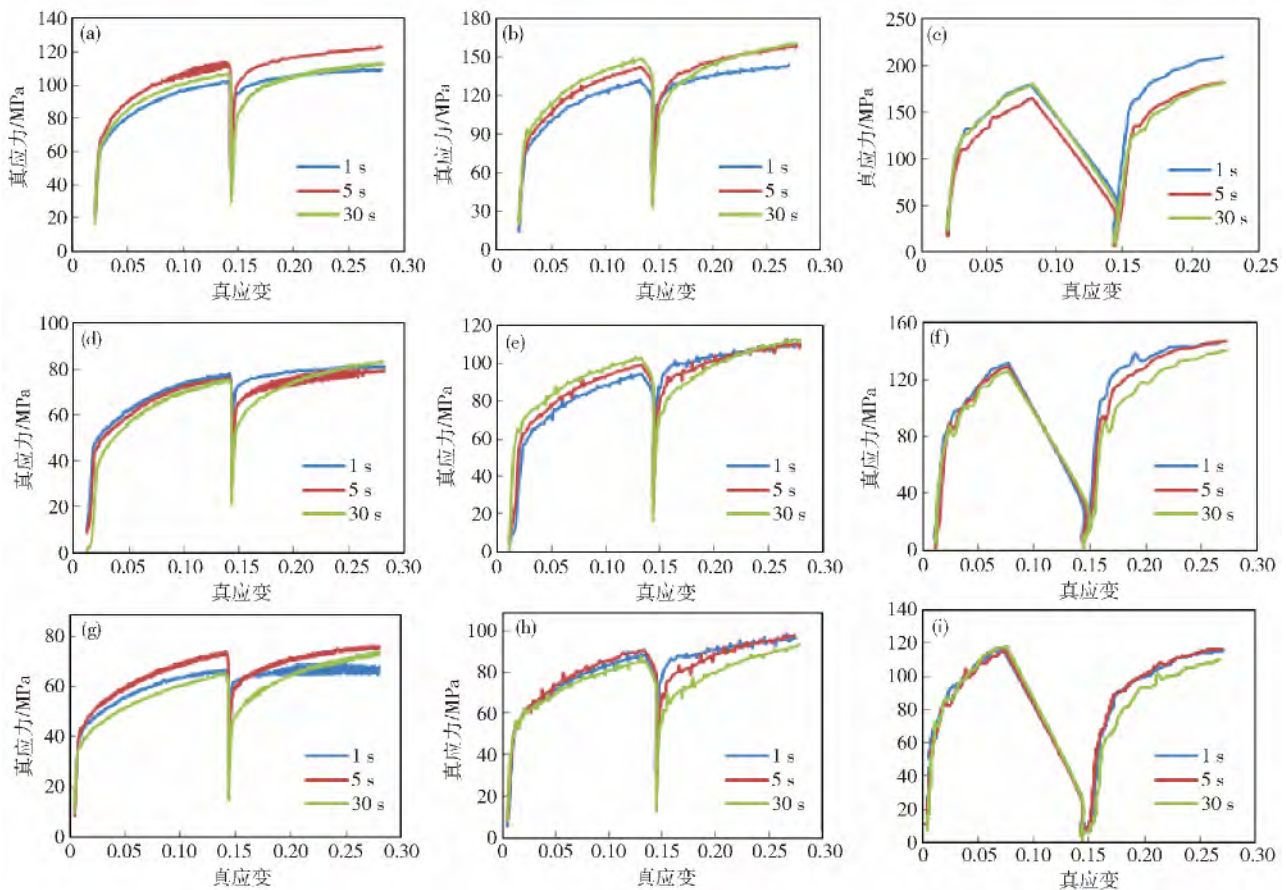


图2 不同变形温度和应变速率的双道次热压缩真应力-真应变曲线. (a) 1000 °C,  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ; (b) 1000 °C,  $1 \text{ s}^{-1}$ ; (c) 1000 °C,  $10 \text{ s}^{-1}$ ; (d) 1100 °C,  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ; (e) 1100 °C,  $1 \text{ s}^{-1}$ ; (f) 1100 °C,  $10 \text{ s}^{-1}$ ; (g) 1150 °C,  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ; (h) 1150 °C,  $1 \text{ s}^{-1}$ ; (i) 1150 °C,  $10 \text{ s}^{-1}$

Fig. 2 True stress-true strain curves of double-pass hot compression at different deformation temperatures and strain rates: (a) 1000 °C,  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ; (b) 1000 °C,  $1 \text{ s}^{-1}$ ; (c) 1000 °C,  $10 \text{ s}^{-1}$ ; (d) 1100 °C,  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ; (e) 1100 °C,  $1 \text{ s}^{-1}$ ; (f) 1100 °C,  $10 \text{ s}^{-1}$ ; (g) 1150 °C,  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ; (h) 1150 °C,  $1 \text{ s}^{-1}$ ; (i) 1150 °C,  $10 \text{ s}^{-1}$

速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$ , 道次间隔保温时间为  $1 \text{ s}^{-1}$ , 第2道应力应变曲线几乎没有加工硬化现象, 直接达到稳定状态. 说明在道次间隔保温时间内发生的静态再结晶没有使位错密度降到发生动态再结晶临界应变以下, 发生的动态再结晶软化与加工硬化相互抵消, 应力应变曲线处于稳定阶段.

图3为300 M钢在变形温度为1000 °C, 应变速率为  $1 \text{ s}^{-1}$ , 第1道次变形量分别为7%、13%和18%, 第2道次变形量均为13%, 间隔保温时间分别为1、5和30 s的双道次热压缩真应力-真应变曲线. 从图中可以看出: 当第1道次变形量分别为13%和18%时, 随着保温时间的延长, 第2道次真应力-真应变曲线屈服应力逐渐减小, 加工硬化现象明显. 主要原因是随着间隔保温时间的延长, 静态再结晶体积分数增大, 同时位错密度不断减小, 要达到发生动态再结晶的临界应变, 必须建立更多的位错密度, 所以随着保温时间延长, 第2道次的屈服应力逐渐变小, 加工硬化现象更明显. 当第1道次变形量为7%时, 由于变形量小, 加工硬化占主导地位, 随着保温时间的增大, 第2道次的屈服应力

逐渐增大.

图4为300 M钢不同初始晶粒尺寸在变形温度1000 °C, 应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$ , 保温间隔时间分别为1、5和30 s, 两道次变形量都为13%的双道次热压缩真应力-真应变曲线. 从图中可以看出: 当初始晶粒尺寸相同时, 第2道次的屈服应力随保温时间的增加而减小, 加工硬化现象明显. 这主要是因为随着间隔保温时间的增加, 发生静态再结晶的时间增加, 静态再结晶体积分数增大, 同时位错密度不断减小, 要达到发生动态再结晶的临界应变, 必须建立更多的位错密度, 所以随着保温时间延长, 第2道次的屈服应力逐渐减小, 加工硬化现象逐渐明显.

## 2.2 变形参数对静态再结晶的影响

### 2.2.1 静态再结晶体积分数的确定

在不同变形温度、应变速率、变形量和初始晶粒尺寸条件下, 得到300 M钢双道次热压缩真应力-真应变曲线. 根据0.2%的屈服强度确定静态再结晶体积分数  $X$ :

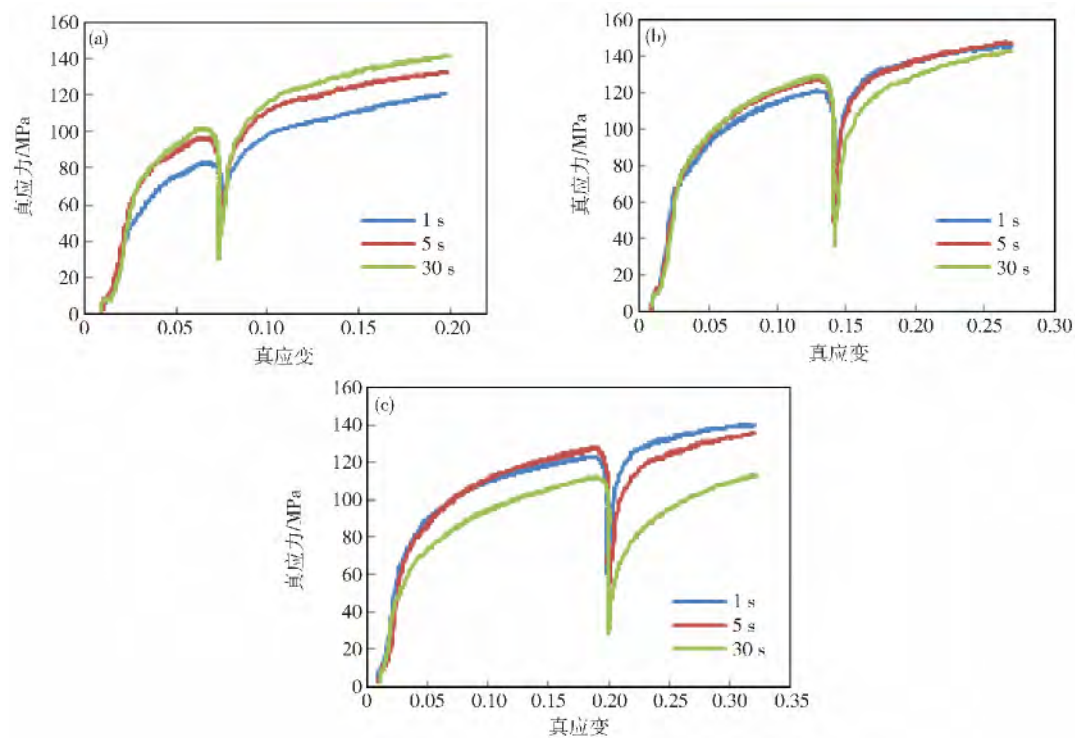


图3 不同变形量的双道次热压缩真应力-真应变曲线. (a)  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ , 7%; (b)  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ , 13%; (c)  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ , 18%

**Fig.3** True stress-true strain curves of double-pass hot compression under different deformations: (a)  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ , 7%; (b)  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ , 13%; (c)  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ , 18%

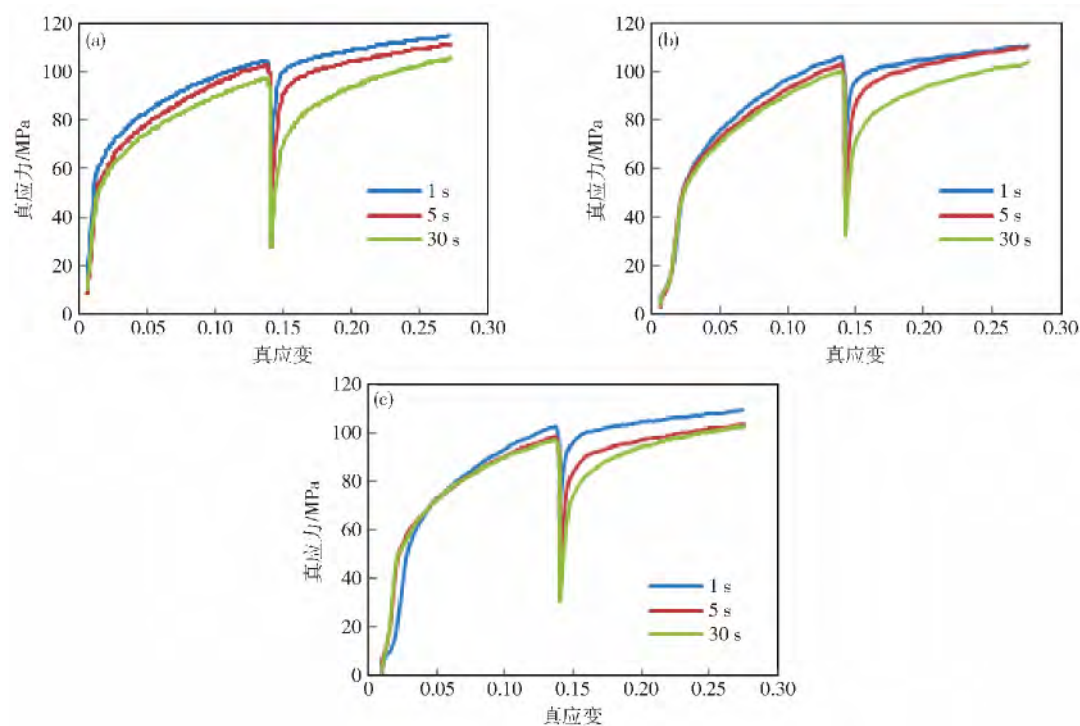


图4 不同初始晶粒尺寸的双道次热压缩真应力-真应变曲线. (a)  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0.1\text{ s}^{-1}$ ; (b)  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0.1\text{ s}^{-1}$ ; (c)  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0.1\text{ s}^{-1}$

**Fig.5** True stress-true strain curves of double-pass hot compression at different initial grain sizes: (a)  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0.1\text{ s}^{-1}$ ; (b)  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0.1\text{ s}^{-1}$ ; (c)  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0.1\text{ s}^{-1}$



$$X = \frac{\sigma_m - \sigma_2}{\sigma_m - \sigma_1} \times 100\%. \quad (1)$$

式中  $\sigma_m$  是中断时的屈服应力,  $\sigma_1$  是第 1 道次压缩时 0.2% 的屈服强度,  $\sigma_2$  是第 2 道次压缩时 0.2% 的屈服强度. 由式 (1) 可以求出不同变形条件下静态再结晶体积分数.

### 2.2.2 变形参数对静态再结晶体积分数的影响

图 5 为在相同变形温度、变形量和初始晶粒尺寸,

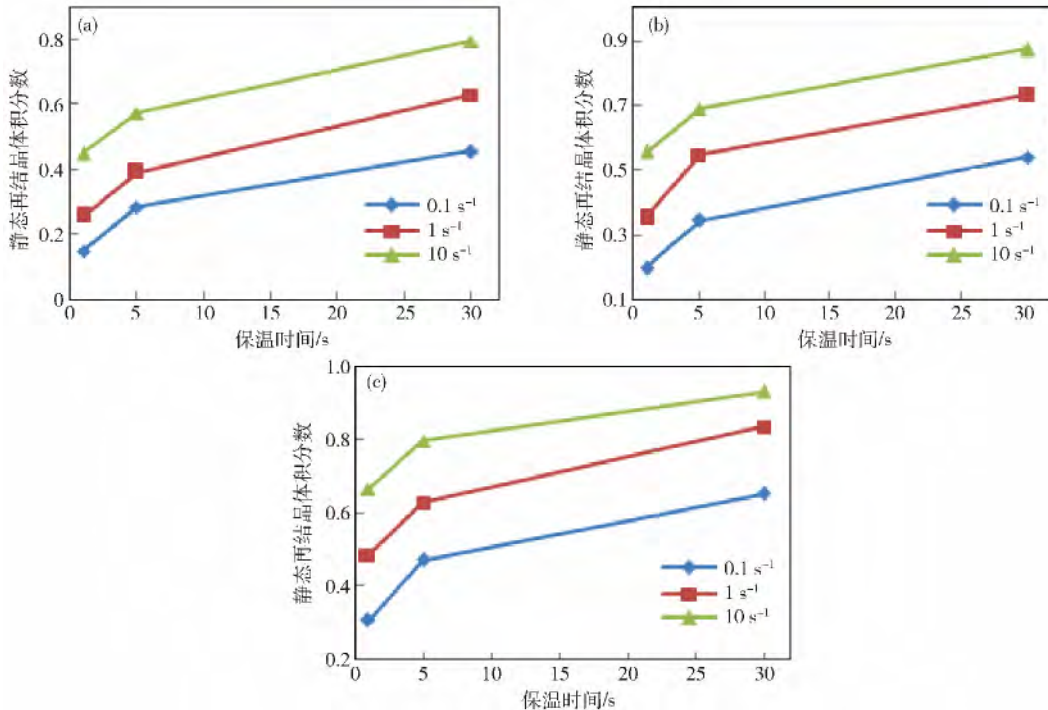


图 5 应变速率对静态再结晶体积分数的影响. (a) 1000 °C; (b) 1100 °C; (c) 1150 °C

Fig. 5 Effect of strain rate on static recrystallization volume fraction: (a) 1000 °C; (b) 1100 °C; (c) 1150 °C

图 6 为在相同应变速率、变形量和初始晶粒尺寸, 不同变形温度条件下, 300 M 钢双道次热压缩保温时间与静态再结晶体积分数的关系. 从图中可以看出: 当保温时间相同时, 变形温度越高, 静态再结晶体积分数越大. 主要原因是变形温度越高, 晶界迁移能力越强, 发生再结晶的时间越短, 再结晶的形核率及长大速率均很快. 在其他变形条件相同时, 静态再结晶体积分数越大.

图 7 为 300 M 钢在变形温度 1000 °C, 应变速率  $1 \text{ s}^{-1}$ , 第 1 道次变形量分别为 7%、13% 和 18%, 第 2 道次变形量均为 13% 变形条件下, 保温时间与静态再结晶体积分数的关系曲线图. 从图中可以看出: 当保温时间相同时, 第 1 道次变形量越大, 静态再结晶体积分数越大. 主要原因是变形量越大, 位错密度越大, 静态再结晶的驱动力越大. 其他变形条件相同时, 静态再结晶体积分数越大.

图 8 为 300 M 在变形温度 1000 °C, 应变速率  $0.1 \text{ s}^{-1}$ , 两道次变形量都为 13%, 不同初始晶粒尺寸

不同应变速率条件下, 300 M 钢双道次热压缩保温时间与静态再结晶体积分数的关系. 从图中可以看出: 当保温时间相同时, 应变速率越高, 静态再结晶体积分数越大. 主要原因是应变速率越高, 位错密度增大速度越快, 动态回复程度越低, 位错消失速度越慢, 从而使再结晶驱动力越大. 因此应变速率越大, 静态再结晶体积分数越大.

条件下, 300 M 双道次热压缩保温时间与静态再结晶体积分数的关系. 初始温度 1150、1100 和 1050 °C 对应的初始晶粒尺寸分别为 202.25、120.29 和 59.37  $\mu\text{m}$ , 从图中可以看出: 三条曲线非常接近, 说明初始晶粒尺寸对静态再结晶体积分数的影响较变形温度、应变速率和变形量等变形条件要小. 当保温时间相同时, 初始晶粒尺寸小的静态再结晶体积分数大. 主要原因是晶粒越小, 单位体积的晶界能越大. 静态再结晶潜在形核点的密度越大, 在其他变形条件相同的条件下, 静态再结晶体积分数越大.

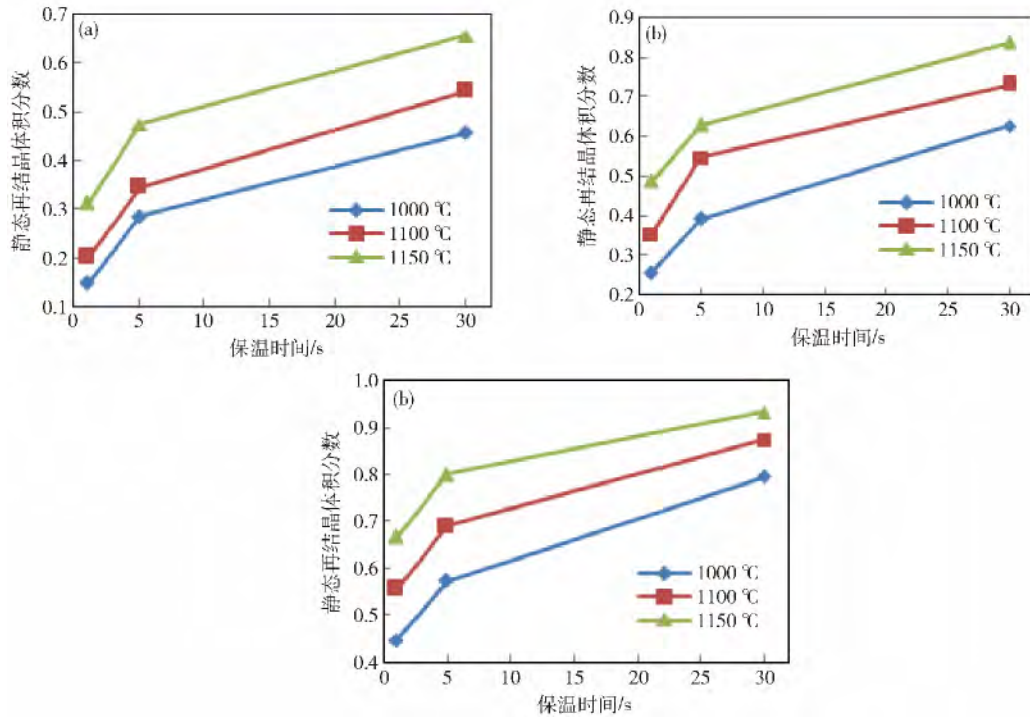
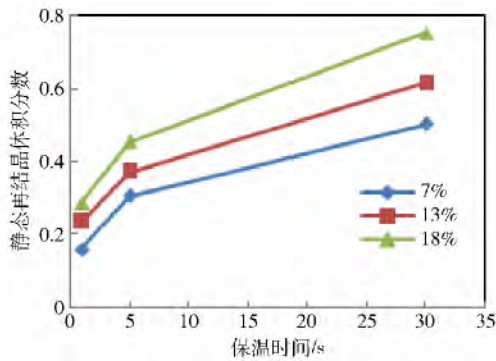
## 3 静态再结晶动力学

### 3.1 静态再结晶动力学方程的建立

静态再结晶动力学方程通常用 Avrami 方程描述:

$$X = 1 - \exp \left[ -0.693 \left( \frac{t}{t_{0.5}} \right)^n \right], \quad (2)$$

$$t_{0.5} = A d_0^q \varepsilon^r \varepsilon'^p \exp \left( \frac{Q_{\text{rex}}}{RT} \right). \quad (3)$$

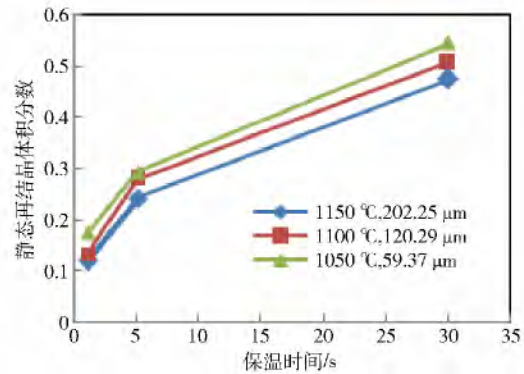
图 6 变形温度对静态再结晶体积分数的影响. (a)  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ; (b)  $1 \text{ s}^{-1}$ ; (c)  $10 \text{ s}^{-1}$ Fig. 6 Effect of deformation temperature on static recrystallization volume fraction: (a)  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ; (b)  $1 \text{ s}^{-1}$ ; (c)  $10 \text{ s}^{-1}$ 图 7 变形温度  $1000 \text{ °C}$  ,应变速率  $1 \text{ s}^{-1}$  时变形量对静态再结晶体积分数的影响Fig. 7 Effect of deformation on static recrystallization volume fraction at a deformation temperature of  $1000 \text{ °C}$  and a strain rate of  $1 \text{ s}^{-1}$ 

式中  $X$  为静态再结晶体积分数,  $t_{0.5}$  为静态再结晶体积分数达到 50% 所用的时间,  $d_0$  为初始晶粒尺寸,  $\varepsilon$  为第 1 道次变形量,  $Q_{\text{rex}}$  为静态再结晶激活能,  $R$  为摩尔气体常数;  $T$  为热力学温度;  $n$ 、 $A$ 、 $q$ 、 $r$  和  $p$  均为材料常数。

对式 (2) 两端取对数得:

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-X} \right) \right] = \ln 0.693 + n \ln t - n \ln t_{0.5}. \quad (4)$$

$t_{0.5}$  和  $n$  对于同种材料和同一变形参数是确定值, 通过

图 8 变形温度  $1000 \text{ °C}$  ,应变速率  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时初始晶粒尺寸对静态再结晶体积分数的影响Fig. 8 Effect of initial grain sizes on static recrystallization volume fraction at a deformation temperature of  $1000 \text{ °C}$  and a strain rate of  $0.1 \text{ s}^{-1}$ 

线性回归, 如图 9 ~ 图 11 所示, 可以确定  $n = 0.3476$ 。

对式 (3) 两端取对数得:

$$\ln t_{0.5} = \ln A + q \ln d_0 + r \ln \varepsilon + p \ln \dot{\varepsilon} + \frac{Q_{\text{rex}}}{RT}. \quad (5)$$

对式 (5) 两端进行线性回归, 如图 12 ~ 图 15 所示, 可以得到  $Q = 265338.3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $q = 0.247$ ,  $r = -1.167$ ,  $p = -0.533$ ,  $A = 4.14 \times 10^{12}$ 。

将所求参数代入式 (2) 和式 (3) 可得到 300 M 钢静态再结晶动力学方程:

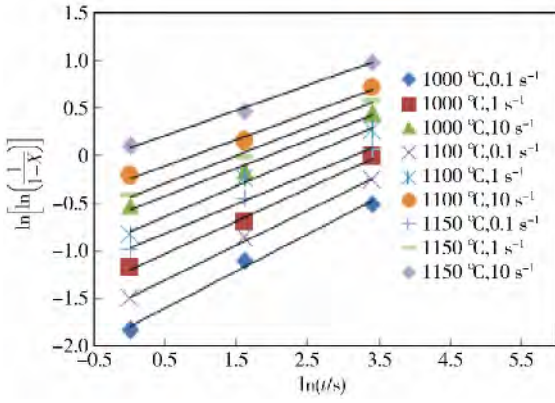


图9 不同变形温度和应变速率条件下  $\ln t$  与  $\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-X} \right) \right]$  关系曲线

Fig. 9 Curves of  $\ln t$  to  $\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-X} \right) \right]$  at different deformation temperatures and strain rates

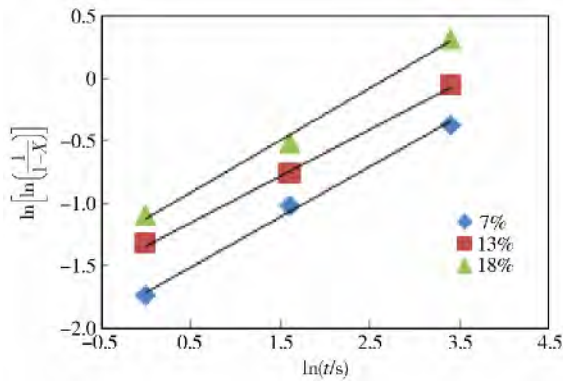


图10 不同变形量  $\ln t$  与  $\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-X} \right) \right]$  关系曲线

Fig. 10 Curves of  $\ln t$  to  $\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-X} \right) \right]$  under different deformations

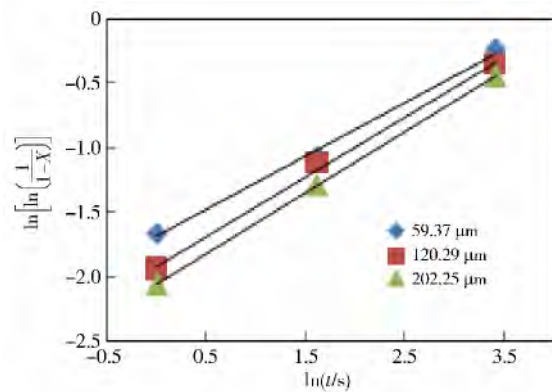


图11 不同初始晶粒尺寸  $\ln t$  与  $\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-X} \right) \right]$  关系曲线

Fig. 11 Curves of  $\ln t$  to  $\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-X} \right) \right]$  at different initial grain sizes

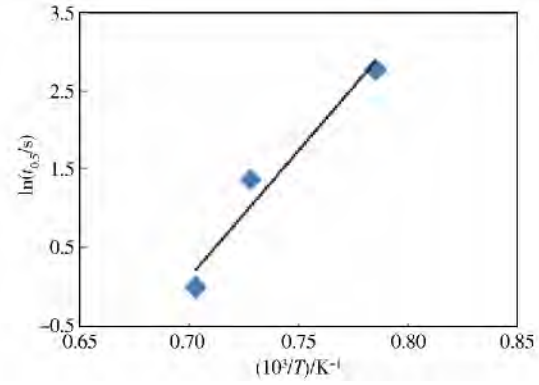


图12  $1000/T$  和  $\ln t_{0.5}$  关系曲线

Fig. 12 Curve of  $1000/T$  to  $\ln t_{0.5}$

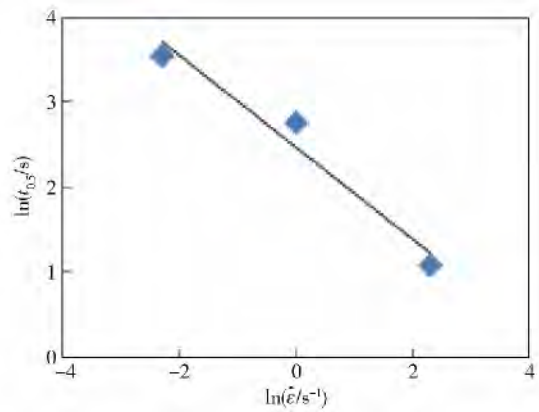


图13  $\ln \dot{\epsilon}$  和  $\ln t_{0.5}$  关系曲线

Fig. 13 Curve of  $\ln \dot{\epsilon}$  to  $\ln t_{0.5}$

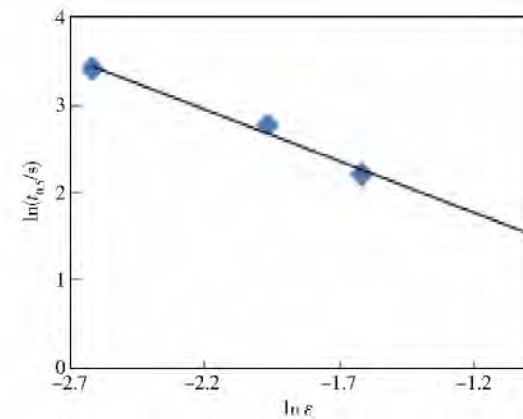


图14  $\ln \epsilon$  和  $\ln t_{0.5}$  关系曲线

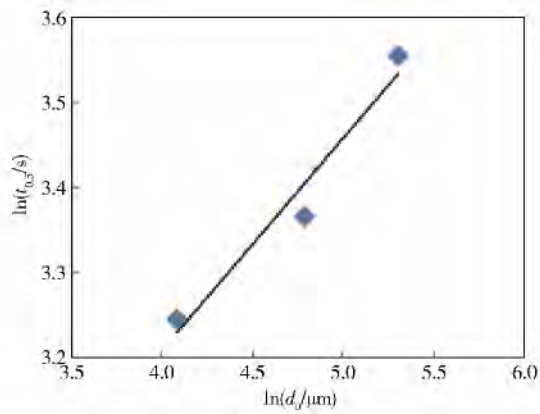
Fig. 14 Curve of  $\ln \epsilon$  to  $\ln t_{0.5}$

$$\begin{cases} X = 1 - \exp \left[ -0.693 \left( \frac{t}{t_{0.5}} \right)^{0.3476} \right], \\ t_{0.5} = 4.14 \times 10^{-12} d_0^{0.247} \dot{\epsilon}^{-1.167} \dot{\epsilon}^{-0.533} \exp \left( \frac{265338.3}{RT} \right). \end{cases} \quad (6)$$

### 3.2 静态再结晶晶粒尺寸模型的建立

根据所得300M钢静态再结晶动力学方程,可求



图 15  $\ln d_0$  和  $\ln t_{0.5}$  关系曲线Fig. 15 Curve of  $\ln d_0$  to  $\ln t_{0.5}$ 

出发生完全静态再结晶所用时间, 从而为设计发生完全静态再结晶单道次热压缩试验提供依据. 试验方案

如下.

(1) 试样以  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  速度升温到  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 保温  $5\text{ min}$ , 然后  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  降到变形温度  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 保温  $3\text{ min}$ , 开始试验, 变形量分别为  $13\%$ 、 $18\%$  和  $20\%$ , 应变速率为  $1\text{ s}^{-1}$ . 变形结束后在该变形温度下进行保温: 变形量  $13\%$  保温  $500\text{ s}$ ; 变形量  $18\%$  保温  $300\text{ s}$ ; 变形量  $20\%$  保温  $160\text{ s}$ . 保温结束后迅速水冷.

(2) 试样以  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  速度分别升温至  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 保温  $5\text{ min}$ , 然后以  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度降到变形温度  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 保温  $3\text{ min}$  后开始试验, 变形量为  $13\%$ , 应变速率为  $1\text{ s}^{-1}$ . 变形结束后在该变形温度下进行保温: 初始温度  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  保温  $200\text{ s}$ ; 初始温度  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  保温  $350\text{ s}$ . 保温结束后立即水冷.

图 16 为 300 M 钢单道次热压缩发生完全静态再结晶的金相图. 从图中可以看出: 晶粒基本呈等轴状

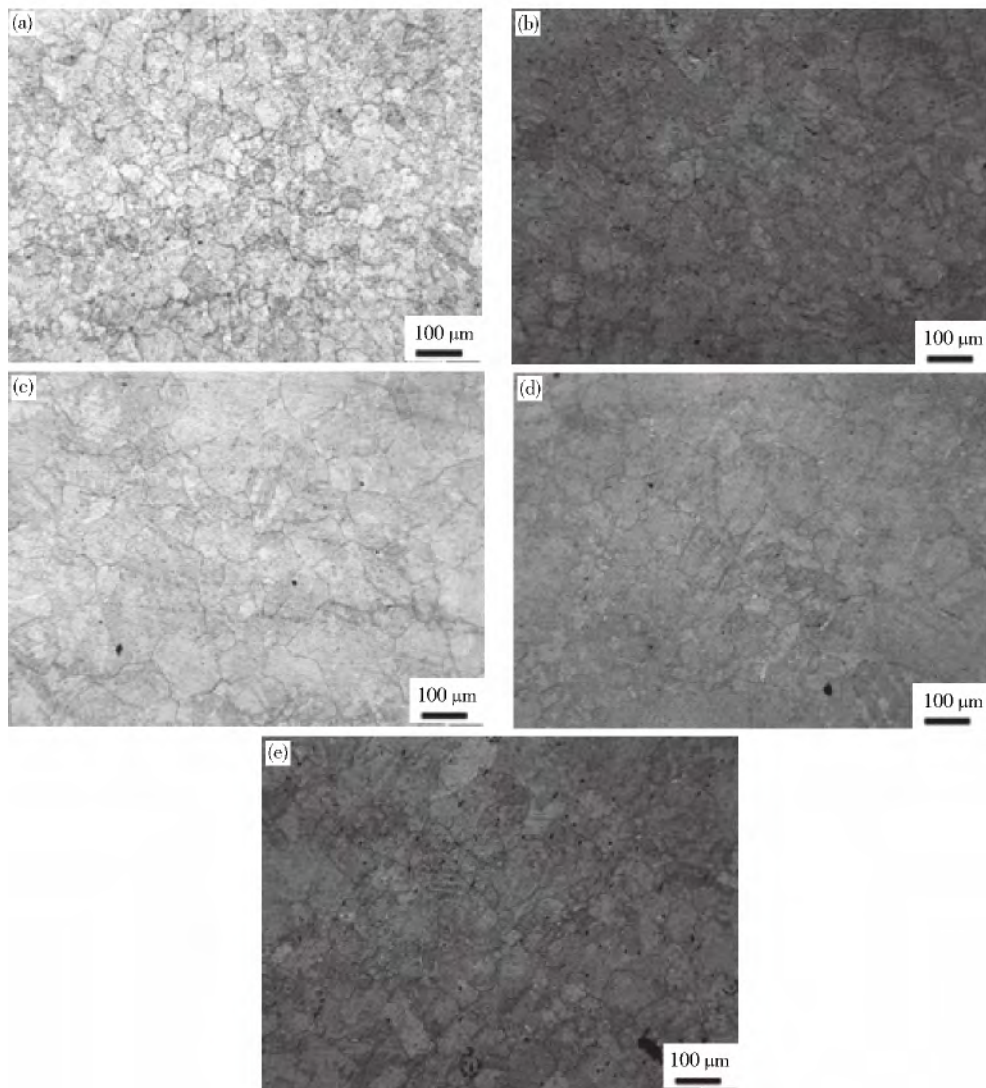


图 16 完全静态再结晶金相图. (a)  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ ,  $13\%$ ,  $200\text{ s}$ ; (b)  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ ,  $13\%$ ,  $350\text{ s}$ ; (c)  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ ,  $13\%$ ,  $500\text{ s}$ ; (d)  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ ,  $18\%$ ,  $300\text{ s}$ ; (e)  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ ,  $20\%$ ,  $160\text{ s}$

Fig. 16 Microstructures of completely static recrystallization: (a)  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ ,  $13\%$ ,  $200\text{ s}$ ; (b)  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ ,  $13\%$ ,  $350\text{ s}$ ; (c)  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ ,  $13\%$ ,  $500\text{ s}$ ; (d)  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ ,  $18\%$ ,  $300\text{ s}$ ; (e)  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ s}^{-1}$ ,  $20\%$ ,  $160\text{ s}$



分布,晶粒大小均匀,可以判断发生完全静态再结晶,由截距法可以测得发生完全静态再结晶的晶粒尺寸的大小,并通过拟合得图 17 和图 18,可以得到静态再结晶晶粒尺寸与初始晶粒尺寸以及变形量的关系式,如式(7)所示。从图 17 和图 18 可以看出:静态再结晶晶粒尺寸  $d_{\text{SRX}}$  随初始晶粒尺寸的增大而增大,随变形量的增大而减小。

$$d_{\text{SRX}} = 1.445 d_0^{0.518} \varepsilon^{-0.856} \quad (7)$$

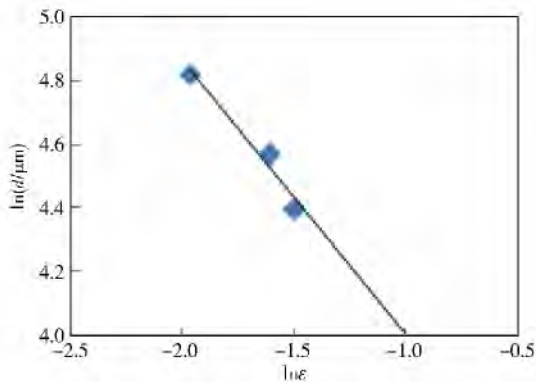


图 17  $\ln \varepsilon$  与  $\ln d$  关系

Fig. 17 Curve of  $\ln \varepsilon$  to  $\ln d$

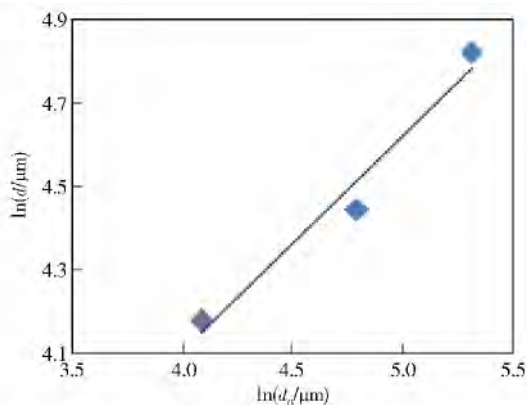


图 18  $\ln d$  与  $\ln d_0$  关系

Fig. 18 Curve of  $\ln d$  to  $\ln d_0$

### 3.3 静态再结晶模型的验证

图 19 为高强钢 300 M 静态再结晶体积分数的试验值与预测值的对比。试验值是通过单道次热压缩试验获得的,预测值是通过双道次热压缩试验得到的。从图中可以看出预测值与试验值基本吻合,从而证明所建静态再结晶动力学模型的准确性。

## 4 结论

(1) 高强钢 300 M 静态再结晶体积分数的与保温时间、应变速率、变形温度、变形量和初始晶粒尺寸有关。保温时间越长,应变速率和变形温度越高,变形量越大,初始晶粒尺寸越小,静态再结晶体积分数越大。其中初始晶粒尺寸的影响相对较小。

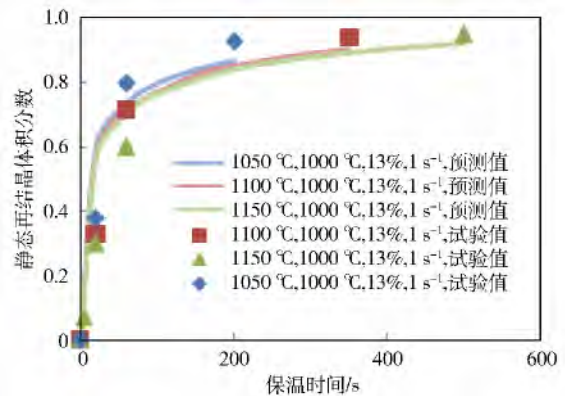


图 19 静态再结晶体积分数的预测值与试验值的对比

Fig. 19 Comparison of static recrystallization volume fraction between the predicted and the tested values

(2) 基于双道次热压缩试验,计算了高强钢 300 M 静态再结晶激活能为  $265.3383 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,建立了静态再结晶动力学模型,并通过单道次热压缩试验验证了模型的准确性。

(3) 通过单道次热压缩试验,拟合出高强钢 300 M 完全静态再结晶晶粒尺寸与初始晶粒尺寸、变形量的关系式。完全静态再结晶晶粒尺寸随初始晶粒尺寸增大而增大,随变形量的增大而减小。

## 参考文献

- [1] Medina S F, Mancilla J E. Static recrystallization modelling of hot deformed steels containing several alloying elements. *ISIJ Int.*, 1996, 36(8): 1070
- [2] Bai D Q, Yue S, Maccagno T, et al. Static recrystallization of Nb and Nb-B steels under continuous cooling conditions. *ISIJ Int.*, 1996, 36(8): 1084
- [3] Liu K, Lu S Q, Zheng H Z, et al. Investigation on hot deformation behavior and deformation structure evolution of 300 M steel. *Forg Stamping Technol*, 2012, 37(1): 149  
(刘凯, 鲁世强, 郑海忠, 等. 300M 钢的热变形行为及其变形组织演变研究. 锻压技术, 2012, 37(1): 149)
- [4] Jin Q L. An experimental study on hot deformation behavior and microstructure evolution of ultra-high strength steel 300 M. *Chin Mater Sci Technol Equip*, 2011(5): 80  
(金泉林. 超高强度钢 300 M 的热变形行为与微观组织演化规律. 中国材料科技与设备, 2011(5): 80)
- [5] Wen Y Y, Lu S Q, Liu J W, et al. Austenite growth behavior of 300 M alloy steel based on Matlab. *Trans Mater Heat Treat*, 2012, 33(9): 75  
(温余远, 鲁世强, 刘俊伟, 等. 基于 Matlab 的 300M 钢奥氏体晶粒的长大规律. 材料热处理学报, 2012, 33(9): 75)
- [6] Lin Y C, Chen M S, Zhong J. Static recrystallization behaviors of deformed 42CrMo steel. *J Cent South Univ Sci Technol*, 2009, 40(2): 411  
(蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 42CrMo 钢形变奥氏体的静态再结晶. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(2): 411)
- [7] Lin Y C, Chen M S. Study of microstructural evolution during

- metadynamic recrystallization in a low-alloy steel. *Mater Sci Eng A*, 2009, 501(1-2): 229
- [8] Li L X, Hong J, Deng N. Static and metadynamic recrystallization kinetic models for boron microalloyed steel. *J Wuhan Univ Sci Technol*, 2004, 27(4): 334  
(李立新, 洪杰, 邓宁. 含硼微合金钢静态及亚动态再结晶动力学模型研究. 武汉科技大学学报, 2004, 27(4): 334)
- [9] Zhang J X, Liu J, Zhang C B, et al. Establishment of the grain size model for the static recrystallization behaviors of nuclear power 304 stainless steel. *Foundry Equip Technol*, 2011(2): 13  
(张进学, 刘洁, 张传滨, 等. 核电用 304 不锈钢静态再结晶模型的建立. 铸造设备与工艺, 2011(2): 13)
- [10] Elwazri A M, Wanjara P, Yue S. Metadynamic and static recrystallization of hypereutectoid steel. *ISIJ Int*, 2003, 43(7): 1080
- [11] Ning X Z, Wang L M, Xing C J, et al. Behavior of static recrystallization of hot-compressed steel 403Nb for blade. *Spec Steel*, 2010, 31(3): 59  
(宁小智, 王立民, 邢长军, 等. 热压缩变形 403Nb 叶片钢的静态再结晶行为. 特殊钢, 2010, 31(3): 59)
- [12] Lin Y C, Chen M S, Zhong J. Model of static recrystallization grain size of 42CrMo steel // *Proceedings of Chinese Mechanical Engineering Society Annual Meeting*. Lanzhou, 2008: 413  
(简永诚, 陈明松, 钟掘. 42CrMo 钢静态再结晶晶粒尺寸模型 // 中国机械工程学会年会文集. 兰州, 2008: 413)
- [13] Li J F, Wang J, Chu Z. Investigation on model of static recrystallization for F35MnVN non-quenched and tempered steel. *Forg Stamping Technol*, 2012, 37(4): 144  
(李君飞, 王进, 褚忠. F35MnVN 非调质钢静态再结晶模型的研究. 锻压技术, 2012, 37(4): 144)
- [14] Li J, Zhang X Z, Liu J S. Static recrystallization model of low-alloy Q345E steel. *Heavy Cast Forg*, 2014(1): 14  
(李佳, 张秀芝, 刘建生. 低合金钢 Q345E 静态再结晶模型研究. 大型铸锻件, 2014(1): 14)
- [15] Chen J H, Wu H, Zhang W, et al. Study on static recrystallization of HSLA Q390 steel. *J Iron Steel Res*, 2010, 22(6): 45  
(陈建华, 吴洪, 张文, 等. 高强低合金钢 390 静态再结晶研究. 钢铁研究学报, 2010, 22(6): 45)
- [16] Serajzadeh S. A study on kinetic of static and metadynamic recrystallization during hot rolling. *Mater Sci Eng A*, 2007, 448(1): 146