

## 微合金化非调质钢 C38N2 动态再结晶行为

谭利<sup>1,3</sup> 詹肇麟<sup>1</sup> 刘攀<sup>1,3</sup> 魏元生<sup>2</sup> 雍岐龙<sup>3</sup> 包耀宗<sup>3</sup>

(1 昆明理工大学,昆明 650093; 2 长城汽车股份有限公司,保定 071000; 3 钢铁研究总院,北京 100081)

**摘要** 针对微合金化非调质钢热轧过程的变形特征,通过 Gleeble-3800 热模拟试验机研究了 Nb-Ti-V 非调质钢 C38N2(∕% : 0.40C、0.52Si、1.42Mn、0.010P、0.047S、0.028V、0.025Ti、0.022Nb) 在 950 ~ 1 150 ℃,变形速率 0.1 ~ 10 s<sup>-1</sup> 变形量 60%,单道次压缩时的奥氏体动态再结晶过程,计算得出 C38N2 钢的动态再结晶晶粒尺寸模型和动态再结晶状态图。结果表明,C38N2 钢变形温度越高,变形速率越低,则发生动态再结晶的储蓄能越小,动态再结晶越易发生。C38N2 钢的动态再结晶激活能  $Q_d = 294.905$  kJ/mol。

**关键词** Nb-Ti-V 微合金化 非调质钢 C38N2 动态再结晶状态图 奥氏体晶粒尺寸

## Behavior of Dynamic Recrystallization of Microalloying Non-Quenched and Non-Tempered Steel C38N2

Tan Li<sup>1,3</sup>, Zhan Zhaolin<sup>1</sup>, Liu Pan<sup>1,3</sup>, Wei Yuansheng<sup>2</sup>, Yong Qilong<sup>3</sup> and Bao Yaorong<sup>3</sup>

(1 Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 Great Wall Motors Co Ltd, Baoding 071000; 3 Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** According to the deformation characteristics of microalloying non-quenched and non-tempered steel during hot rolling process, the austenite dynamic recrystallization process of Nb-Ti-V non-quenched and non-tempered steel C38N2 (∕% : 0.40C, 0.52Si, 1.42Mn, 0.010P, 0.047S, 0.028V, 0.025Ti, 0.022Nb) in single pass compression with strain rate 0.1 ~ 10 s<sup>-1</sup> and deformation 60% at 950 ~ 1 150 ℃ is studied by using Gleeble-3800 thermal simulation machine. The dynamic recrystallization state diagram and dynamic recrystallization grain size model for steel C38N2 are obtained by calculation. Results show that for steel C38N2 the higher deformation temperature and lower strain rate, the lower cumulative energy  $Q_d$  to occur dynamic recrystallization and the more easily to carry out the dynamic recrystallization. The activation energy for  $Q_d$  dynamic recrystallization of steel C38N2 is 294.905 kJ/mol.

**Material Index** Nb-Ti-V Microalloying, Non-Quenched and Non-Tempered Steel C38N2, Dynamic Recrystallization State Diagram, Austenite Grain Size

钢在轧制成型过程中奥氏体晶粒会发生动态回复和动态再结晶<sup>[1]</sup>,尤其是动态再结晶因对热加工零件的晶粒尺寸有着显著影响而备受关注,通过控制奥氏体晶粒尺寸可以提高零件的强度,特别是可以改善和提高零件的韧性。本研究采用南京钢铁有限公司生产的非调质钢 C38N2,模拟轧制过程中奥氏体动态再结晶现象,为进一步优化制定合理轧制工艺制度提供可靠参数。

### 1 实验材料和方法

实验采用非调质钢 C38N2 的化学成分如表 1 所示,在直径为 Φ85 mm 的热轧态棒材的 1/2R 处掏取 Φ8 mm × 15 mm 的热模拟试样,采用 Gleeble-3800 型热模拟试验机对试验钢进行单道次等温压缩实验,实验工艺如图 1 所示。以 10 ℃/s 的加热速度升温到 1 200 ℃ 保温 60 s,然后以 10 ℃/s 的冷却速度分别降至预设的变形温度(1 150、1 100、1 050、1 000、950 ℃)保温 30 s 消除温度梯度,然后进行单道次压缩,变形量为 60%,变形速率分别为 0.1、1、

表 1 实验用非调质钢 C38N2 的化学成分/∕%

Table 1 Chemical composition of test non-quenched and non-tempered steel C38N2 /∕%

C	Si	Mn	S	P	V	Cr	Ni	Ti	Nb
0.40	0.52	1.42	0.047	0.010	0.028	0.15	0.019	0.025	0.022

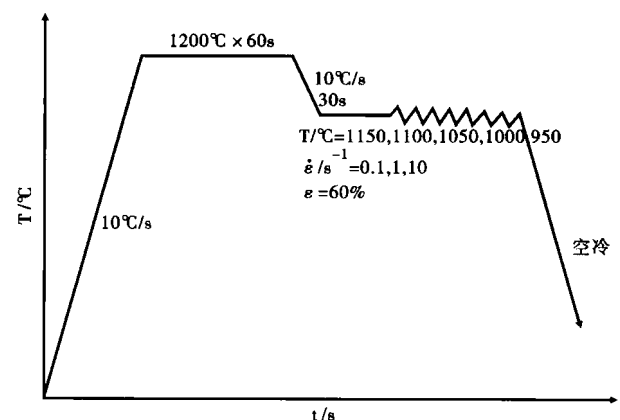


图 1 非调质钢 C38N2 锻造工艺热模拟示意图

Fig. 1 Schematics of thermal simulation of forging process for non-quenched and non-tempered steel C38N2

$10\text{ s}^{-1}$ , 变形结束后立即空冷至室温, 记录变形过程中的真应力-真应变曲线。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 应力-应变曲线

试样在不同变形温度和变形速率下的真应力-真应变曲线如图2, 横坐标为真应变, 纵坐标为真应力。实验结果表明, 在同一应变速率条件下, 真应力随温度的增加显著下降; 在同一温度下应变, 应变速率越高, 流变应力越大, 且流变应力的增加率随温度而变化, 温度越低, 增加率越高, 温度越高, 增加率越低。变形温度越高, 变形速率越低, 发生动态再结晶的临界储蓄能越小, 动态再结晶越易发生。

### 2.2 动态再结晶激活能计算

变形温度和变形速率通过 Zener-Hollomon 变形参数来影响组织演变, 且对动态再结晶模型产生影响, 因此动态再结晶激活能的精确确定对组织演化模型以及随后的一系列模拟都有重要的意义。为探索变形温度、变形速率对动态再结晶的影响, 引入 Zener-Hollomon 变形因子来修正变形温度对变形速率的影响<sup>[2-4]</sup>:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_d}{RT}\right) \quad (1)$$

式中:  $Z$ - Zener-Hollomon 参数, 其物理意义是有温度补偿的应变速率因子/ $\text{s}^{-1}$ ;  $\dot{\epsilon}$ - 变形速率/ $\text{s}^{-1}$ ;  $Q_d$ - 动态再结晶激活能/ $(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$ ;  $R$ - 气体常数, 通常取  $8.314\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T$ - 绝对温度/ $\text{K}$ 。

另一方面, 分析表明, 不仅峰值应力  $\sigma_p$  和稳定应力  $\sigma_s$ , 而且任意应变时对应的应力都符合(2)式, 即变形因子  $Z$  与峰值应力  $\sigma_p$  存在幂函数关系:

$$Z = A_1 \sigma^n = A_2 \exp(\beta_2 \sigma_p) = A_3 \exp(\beta_3 \sigma_s) \quad (2)$$

式中:  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ - 常数;  $n$ - 应力指数。

$$\text{因此有: } Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_d}{RT}\right) = A \exp(\beta \sigma_p) \quad (3)$$

在温度恒定的情况下, 对(3)式两边取自然对

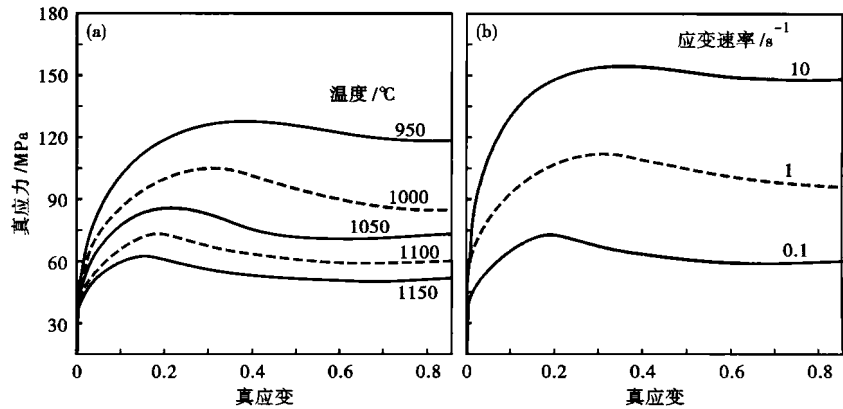


图2 C38N2 钢的真应力-真应变曲线: (a) 应变速率  $0.1\text{ s}^{-1}$ ; (b) 变形温度  $1100\text{ }^\circ\text{C}$   
Fig. 2 True stress-true strain curves of steel C38N2; (a) strain rate  $0.1\text{ s}^{-1}$ ; (b) deformation temperature  $1100\text{ }^\circ\text{C}$

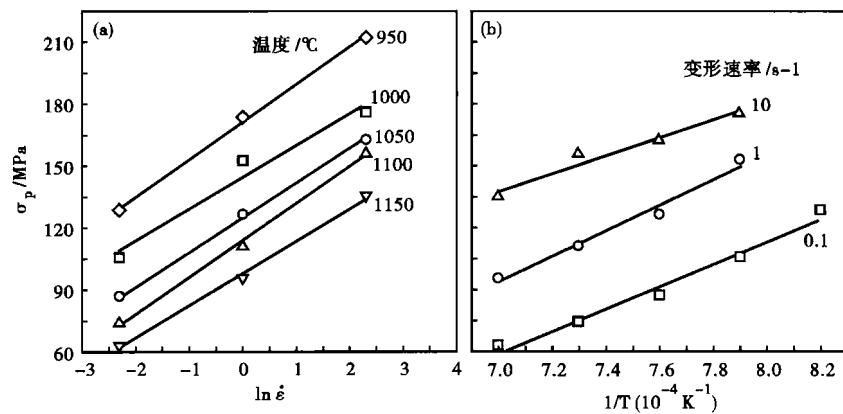


图3 C38N2 钢  $\sigma_p$  与  $\ln \dot{\epsilon}$  (a) 和  $1/T \times 10^{-4}$  和  $\sigma_p$  (b) 的关系曲线  
Fig. 3 Relation curves between  $\sigma_p$  and  $\ln \dot{\epsilon}$  (a) and between  $1/T \times 10^{-4}$  and  $\sigma_p$  (b), steel C38N2

数, 再对  $\sigma_p$  求偏微分, 则系数  $\beta$  可表示为:

$$\beta = \left[ \frac{\partial(\ln \dot{\epsilon})}{\partial \sigma_p} \right]_{T=C} = \frac{1}{\left[ \frac{\partial \sigma_p}{\partial(\ln \dot{\epsilon})} \right]_{T=C}} \quad (4)$$

在恒定变形速率时, 式(3)对  $1/T$  求偏导数, 可以求出动态再结晶激活能  $Q_d$ :

$$Q_d = R\beta \left[ \frac{\partial \sigma_p}{\partial(1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}=C} = R \left\{ \frac{1}{\left[ \frac{\partial \sigma_p}{\partial(\ln \dot{\epsilon})} \right]_{T=C}} \right\} \cdot \left\{ \left[ \frac{\partial \sigma_p}{\partial(1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}=C} \right\} \quad (5)$$

以  $\ln \dot{\epsilon}$  为横坐标,  $\sigma_p$  为纵坐标, 用 Origin 软件对其进行线性回归(图3a)。由图3(a)可见, 在不同变形温度下,  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\sigma_p$  线性关系拟合较好, 各直线

平均斜率  $\overline{K_1} = 16.7$ , 代入式(4)得:

$$\beta = \frac{1}{K_1} = \frac{1}{16.7} = 0.05988 \quad (6)$$

以  $1/T$  为横坐标,  $\sigma_p$  为纵坐标, 用 Origin 软件对其进行线性回归, 分别求出各直线的斜率  $K$  (图 3b)。由图 3(b) 可见, 在不同变形速率下,  $1/T \times 10^{-4}$  和  $\sigma_p$  的线性关系拟合较好, 各直线的平均斜率  $\overline{K_2} = 592365.53$  (7)

将式(6)和式(7)代入式(5)得:

$$Q_d = 8.314 \times 0.05988 \times 592365.53 = 294.905 \text{ kJ/mol} \quad (8)$$

### 2.3 动态再结晶晶粒尺寸模型

动态再结晶晶粒尺寸取决于变形温度和变形速度, 通常表示为 Zener-Hollomon 参数的函数<sup>[5]</sup>, 以  $\ln Z$  和  $\ln D_{DRX}$  ( $D_{DRX}$  为奥氏体晶粒尺寸) 作图进行线性拟合获得动态再结晶晶粒尺寸模型如图 4 所示。由图 4 可见, 随着  $Z$  的增加, 动态再结晶晶粒尺寸减小, 即较高的变形速率和较低的变形温度容易获得更细小的再结晶晶粒尺寸。

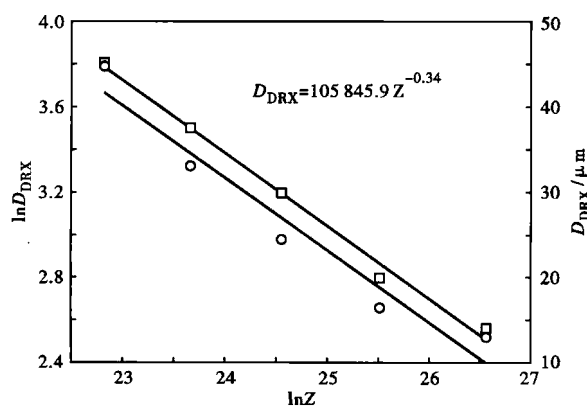


图 4 C38N2 钢的动态再结晶晶粒尺寸模型, 应变速率  $1 \text{ s}^{-1}$   
Fig. 4 Dynamic recrystallization grain size model of steel C38N2, strain rate  $1 \text{ s}^{-1}$

### 2.4 动态再结晶状态图

根据  $\varepsilon_c$ 、 $\varepsilon_s$  和对应的变形参数  $Z$ , 可以获得相应的动态再结晶状态图。其中  $\varepsilon_c$  为发生动态再结晶的临界变形量<sup>[6]</sup>,  $\varepsilon_c = (0.65 \sim 0.95) \varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_p$  为峰值应变, 表示为发生动态再结晶时峰值应力对应的应变,  $\varepsilon_s$  表示动态再结晶产生结晶核心到全部完成一轮再结晶所需要的变形量。由  $\varepsilon_c$ 、 $\varepsilon_s$  和  $\ln Z$  可作出相应变形条件下的动态再结晶状态图, 如图 5 所示。由图 5 可见, 变形温度越高、变形速率越低, 越容易

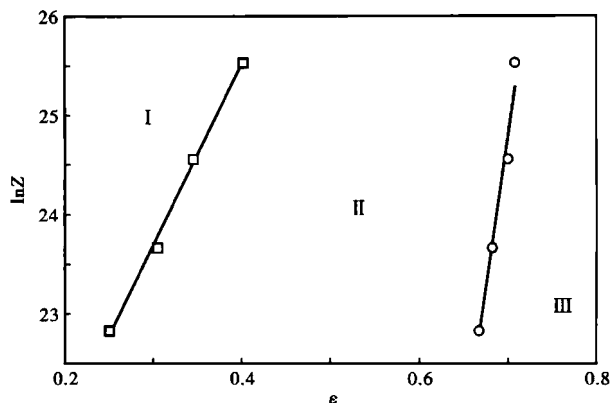


图 5 C38N2 钢动态再结晶状态图, 应变速率  $1 \text{ s}^{-1}$ : I 未再结晶区; II 部分再结晶区; III 完全再结晶区

Fig. 5 Dynamic recrystallization state diagram of steel C38N2, strain rate  $1 \text{ s}^{-1}$ : I non-recrystallization region; II partial recrystallization region; III complete recrystallization region

发生动态再结晶。

### 3 结论

(1) 非调质钢 C38N2 变形温度越高, 变形速率越低, 发生动态再结晶的临界储蓄能越小, 动态再结晶越易发生。

(2) 微合金非调质钢 C38N2 动态再结晶激活能为  $Q_d = 294.905 \text{ kJ/mol}$ 。

(3) 通过计算得到了微合金非调质钢 C38N2 动态再结晶晶粒尺寸模型。

(4) 根据不同变形条件下的实验参数, 得出对应的动态再结晶状态图, 为优化生产工艺提供了理论依据。

### 参考文献

- 董成瑞, 任海鹏, 金同哲. 微合金非调质钢. 北京: 冶金工业出版社, 2000
- Dehghan-Manshadi A, Hodgson P D. Dependency of Recrystallization Mechanism to the Initial Grain Size. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39: 2830
- 包耀宗, 足立 吉隆, 友田 陽. 18Ni, 17Ni-0.2C, SM490 マルテンサイト鋼の动态再结晶探索. 铁と钢, 2005, 91(7): 602
- Karhausen K, Kopp R. Model for Integrated Process and Microstructure Simulation in Hot Forming. Steel Research, 1992, 63(6): 247
- Sellar C M, Whiteman J A. Recrystallization and Grain Growth in Hot Rolling. Materials Science and Technology, 1979, 13(3-4): 187
- Wang J, Chen J, Zhao Z, et al. Modeling of Microstructural Evolution in Microalloyed Steel during Hot Forging Process. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 19(4): 279

谭利 (1986-), 男, 硕士研究生, 微合金非调质钢开发及研究。E-mail: tanli19861225@.163.com

收稿日期: 2012-01-14