

## 热压缩变形 403Nb 叶片钢的静态再结晶行为

宁小智<sup>1</sup> 王立民<sup>1</sup> 邢长军<sup>1</sup> 刘正东<sup>1</sup> 杨钢<sup>1</sup> 卢伦<sup>2</sup> 吕成林<sup>3</sup>

(1 钢铁研究总院结构所,北京 100081; 2 抚顺特殊钢股份有限公司技术中心,抚顺 113001;

3 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所燃气轮机研究室,哈尔滨 150036)

**摘要** 通过 Gleeble-3500 热模拟试验机对 403Nb 马氏体钢(% : 0.16C、11.98Cr、0.03Mo、0.22Nb、0.01V、0.12Ni)在 950~1150 °C 进行应变速率 0.01~10 s<sup>-1</sup>,道次间隔 1~100 s 的二道次热压缩试验。通过总结已发表的各种静态再结晶数学模型,得出 403Nb 钢静态再结晶激活能  $Q_{\text{rex}}$  为 168.40 kJ/mol 及静态再结晶模型  $t_{0.5} = 6.5999 \times 10^{-10} \varepsilon^{-1.6} \dot{\varepsilon}^{-0.46} d_0 \exp(168400/RT)$ 。结果表明,热压缩道次间隔时间短,钢的晶粒粗大,静态再结晶率低;道次间隔时间长,静态再结晶接近完成,大部分为等轴晶粒;在热压缩过程中,剪应变最大的区域再结晶最完全,晶粒最细小。

**关键词** 403Nb 叶片钢 热压缩 静态再结晶

## Behavior of Static Recrystallization of Hot-Compressed Steel 403Nb for Blade

Ning Xiaozhi<sup>1</sup>, Wang limin<sup>1</sup>, Xing Changjun<sup>1</sup>, Liu Zhengdong<sup>1</sup>, Yang Gang<sup>1</sup>, Lu Lun<sup>2</sup> and Lü Chenglin<sup>3</sup>

(1 Institute for structural Material, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Technical Center, Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001; 3 Gas Department, Harbin Marine Boiler and Turbine Research Institute, Harbin 150036)

**Abstract** Double passes hot-compression test of martensite steel 403Nb (% : 0.16C, 11.98Cr, 0.03Mo, 0.22Nb, 0.01V, 0.12Ni) with internal time between passes 1~100 s and strain rate 0.01~10 s<sup>-1</sup> at 950~1150 °C has been carried out by using Gleeble-3500 thermal simulator. With summarizing established different static recrystallization math models, it is obtained that the activation energy  $Q_{\text{rex}}$  of static recrystallization of steel 403Nb is 168.40 kJ/mol, the static recrystallization model is  $t_{0.5} = 6.5999 \times 10^{-10} \varepsilon^{-1.6} \dot{\varepsilon}^{-0.46} d_0 \exp(168400/RT)$ . Results show that with short internal time, the steel grain size coarsens and the static recrystallization rate decreases; with longer internal time, the static recrystallization is nearly completed with most equiaxial grains. During hot compression, the static recrystallization is almost completed with finest grains in the region with maximum shear strain.

**Material Index** Steel 403Nb for Blade, Hot Compression, Static Recrystallization

### 1 试验方法及过程

试验用 403Nb 钢(% : 0.16C、0.46Mn、0.28Si、0.002S、0.016P、11.98Cr、0.029Mo、0.22Nb、0.012V、0.12Ni)由 500 kg 碱性电弧炉+电渣重熔(ESR)冶炼,锭重 300 kg,经锻造开坯轧制成  $\Phi 42$  mm 棒材,加工成  $\Phi 8$  mm  $\times$  15 mm 圆柱体热压缩试样。

热压缩试验在 Gleeble-3500 热模拟机上进行氩气保护,试样两端加放钼片,以减少摩擦对应力状态的影响。将试样以 10 °C/s 的速度升温至 1200 °C 保温 5 min,再以 10 °C/s 的速度冷却至变形温度  $T_{\text{def}}$  (950、1050、1150 °C),并以一定的应变速率(0.01、1、10 s<sup>-1</sup>)和变形量进行压缩,总压缩量均为 58%,变形后水冷。

### 2 试验结果与分析

#### 2.1 静态再结晶

静态再结晶的驱动力是变形蓄积的应变能,因

此能够影响应变能的因素均对静态再结晶有影响,国外学者也计算并得出了一些静态再结晶数学模型,如表 1<sup>[1~4]</sup>。其中 Sun 和 Hawbolt 采用双道次法研究了变形工艺参数、奥氏体晶粒度等因素对 A36 和 DQSK 钢静态再结晶动力学的影响。

研究表明,变形温度的提高使静态再结晶过程均显著加快;应变速率对静态再结晶过程有很大的影响,随着应变速率的增加,静态再结晶过程加快,这是由于应变速率增加,变形过程的动态回复程度减少,位错密度增大,而使再结晶驱动力增大的缘故。应变能对静态再结晶过程的影响与应变速率的影响类似,即随着变形量的增大,再结晶过程加速,这也是由于位错密度增大所导致的。

#### 2.2 静态再结晶模型计算

图 1 为压缩温度 1050 °C,应变速率 0.01 s<sup>-1</sup>,道次间隔时间分别为 1 s 和 100 s 时的真应力-真应

表 1 国外学者得出的静态再结晶数学模型

Table 1 Static recrystallization model researched by scholars outside country

作者	静态再结晶数学模型
Sellars <sup>[1]</sup>	$X = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5})^2]$ $t_{0.5} = 2.5 \times 10^{-19} \varepsilon^{-4} d_0^2 \exp(300\,000/RT) \quad \varepsilon > 0.8 \varepsilon_p$ $t_{0.5} = 1.6 \times 10^{-5} Z^{-0.6} \exp(300\,000/RT) \quad \varepsilon < 0.8 \varepsilon_p$
Saito <sup>[2]</sup>	$X = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5})^2]$ $t_{0.5} = 2.5 \times 10^{-19} \varepsilon^{-4} d_0^2 \exp(300\,000/RT)$
Yada <sup>[3]</sup>	$X = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5})^2]$ $t_{0.5} = 2.2 \times 10^{-12} S_v^{-0.5} \dot{\varepsilon}^{-0.2} \varepsilon^{-2} \exp(30\,000/RT)$ $S_v = 24/\pi \times [0.491 \exp(\varepsilon) + 0.155 \exp(-\varepsilon) + 0.1433 \exp(-3\varepsilon)]$
Roberts <sup>[4]</sup>	$X = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5})^2]$ $t_{0.5} = 5 \times 10^{-21} \varepsilon^{-4} d_0^2 \exp(Q_R/RT)$ $Q_R = 330\,000 \text{ J/mol}$

注:  $\dot{\varepsilon}$ -应变速率/ $s^{-1}$ ;  $R$ -气体常数,取  $8.314 \text{ J/mol}$ ;  $T$ -形变温度/ $K$ ;  $X$ -再结晶体积百分数;  $t$ -道次间隔时间/ $s$ ;  $t_{0.5}$ -再结晶发生 50% 所用时间/ $s$ ;  $\varepsilon$ -变形量;  $d_0$ -初始晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$ ;  $Q_R$ -静态再结晶激活能/ $(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$ ;  $S_v$ -单位体积内的晶粒面积。

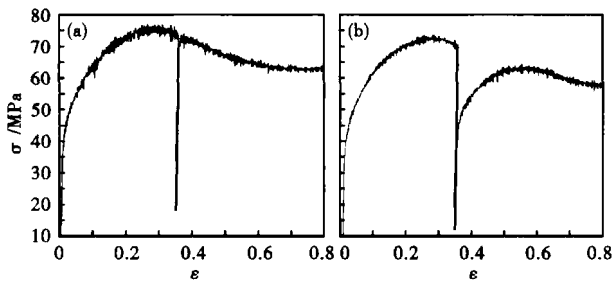


图 1 403Nb 钢应力-应变曲线,  $1\,050 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.01 \text{ s}^{-1}$ , 道次间隔时间  $t$ : (a)  $1 \text{ s}$ ; (b)  $100 \text{ s}$

Fig. 1 Stress-strain curves of steel 403Nb,  $1\,050 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.01 \text{ s}^{-1}$ , internal time  $t$  between passes: (a)  $1 \text{ s}$ ; (b)  $100 \text{ s}$

变曲线。

静态再结晶动力学方程可按相加性原理由 Avrami 公式按 50% 再结晶方式描述<sup>[5]</sup>:

$$F_x = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5})^n] \quad (1)$$

式中:  $F_x$ -静态再结晶率;  $n$ -Avrami 指数。

静态再结晶 50% 时间<sup>[6]</sup>:

$$t_{0.5} = A \varepsilon^p \dot{\varepsilon}^q D^s \exp \frac{Q_{\text{rex}}}{RT} \quad (2)$$

将公式(2)做线性处理,两边取对数可得:

$$\ln t_{0.5} = \ln A + p \ln \varepsilon + q \ln \dot{\varepsilon} + \frac{Q_{\text{rex}}}{RT} \quad (3)$$

做出  $\ln t_{0.5}$  与  $1/T$  的曲线,可以得出  $Q_{\text{rex}}$  值。

再结晶激活能  $Q_{\text{rex}}$  也可以通过钢的成分来计算。Medina 和 Mancilla 得出激活能的表达式<sup>[7]</sup>:

$$Q(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}) = 124\,714 + 28\,385.68 [\text{Mn}] + 64\,716.68 [\text{Si}] + 72\,775.40 [\text{Mo}] + 76\,830.32 [\text{Ti}]^{0.213} + 12\,100.37 [\text{Nb}]^{0.1} \quad (4)$$

得出:  $Q_{\text{rex}} = 168.40 \text{ kJ/mol}$ 。

但是其他学者得出与公式(4)不同的表达式<sup>[8]</sup>:

$$Q(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}) = 148\,637 - 71\,981 [\text{C}] + 56\,538 [\text{Si}] + 21\,180 [\text{Mn}] + 12\,143 [\text{Mo}] + 64\,470 [\text{V}] + 109\,732 [\text{Nb}]^{0.15} \quad (5)$$

及  $Q_{\text{rex}} = 259\,834 + 7\,604 \exp\left(\frac{C_{\text{eq}}}{0.08}\right)$ ;

$$C_{\text{eq}} = (\text{C}) + \frac{(\text{Mn})}{6} \quad (6)$$

403Nb 钢中含有高百分比的 Cr, 而成分公式并没给出 Cr 对 403Nb 的再结晶激活能的影响,这对计算静态再结晶激活能有一定的影响。

本文计算出的  $Q_{\text{rex}} = 162.945 \text{ kJ/mol}$ , 比较数据,发现与公式(4)中得出的值很相近。因此,采用公式(4)来描述激活能  $Q_{\text{rex}} = 168.40 \text{ kJ/mol}$ 。

由  $A = 3.754 \times 10^{-4} \exp(-7.869 \times 10^{-5} Q_{\text{rex}})$ , 得  $A = 6.599 \times 10^{-10}$ 。

另外,公式(1)和(2)中的  $n$ 、 $p$ 、 $q$ 、 $s$  通过试验得出的再结晶率,用高斯-牛顿法非线性原理,数值回归得出。经过回归可知,其值分别为  $p = -1.6$ 、 $q = -0.46$ 、 $s = 1$ 、 $n = 1.029$ 。

$$t_{0.5} = 6.599 \times 10^{-10} \varepsilon^{-1.6} \dot{\varepsilon}^{-0.46} d_0 \exp \frac{168\,400}{RT}$$

### 2.3 微观组织分析

图 2(a) 为  $950 \text{ }^\circ\text{C}$   $\dot{\varepsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$  道次间隔时间 100 s 时 403Nb 钢的组织形态照片,形变储能仍在促进静态回复,晶粒粗大且很少呈现等轴状态,在大晶粒周围很多小晶粒还在长大之中,没有明显的晶界,静态再结晶率不到 50%;而在图 2(b) 中  $1\,050 \text{ }^\circ\text{C}$   $\dot{\varepsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$  道次间隔时间 100 s 条件下,长时间的道次间隔使 403Nb 钢马氏体组织静态回复完全,位错

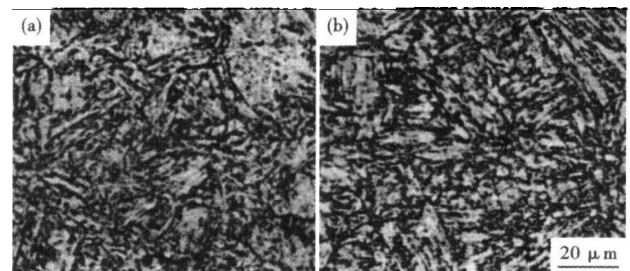


图 2 403Nb 钢的组织形貌, 间隙时间  $t$  100 s, 热压缩: (a)  $0.01 \text{ s}^{-1}$ ,  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $10 \text{ s}^{-1}$ ,  $1\,050 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 2 Morphology of structure of steel 403Nb, internal time  $t$  100 s, hot compression with  $0.01 \text{ s}^{-1}$  at  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  (a) and with  $10 \text{ s}^{-1}$  at  $1\,050 \text{ }^\circ\text{C}$  (b)

密度明显下降,板条排列均匀,静态再结晶接近完成,对应模型计算的静态再结晶率 95%,大部分为等轴晶粒,与通过模型预测结果基本吻合。

### 2.4 热压缩非均匀变形

将试样如图 3(e) 部分取样,在金相试验中观察发现图 3(a, b, c, d) 中试样的 I 区晶粒尺寸很细小且比较均匀,零星分布着较大的等轴晶粒和仍处于拉伸状态的晶粒,说明静态再结晶正在进行且再结

晶晶粒的长大程度较小。II 区的晶粒尺寸比 I 区大且不均匀,而且大晶粒呈现被压扁的形状,由此可见这个区域的静态再结晶程度较小。III 区的晶粒尺寸与其他区域相比是最大的,而且呈等轴状。IV 区的晶粒尺寸比 I 区大,比 II 区小,晶粒分布不是很均匀,在大晶粒周围分布着等轴状的较小晶粒,说明变形过程中发生不完全静态再结晶,但与 II 区相比,再结晶程度更大。

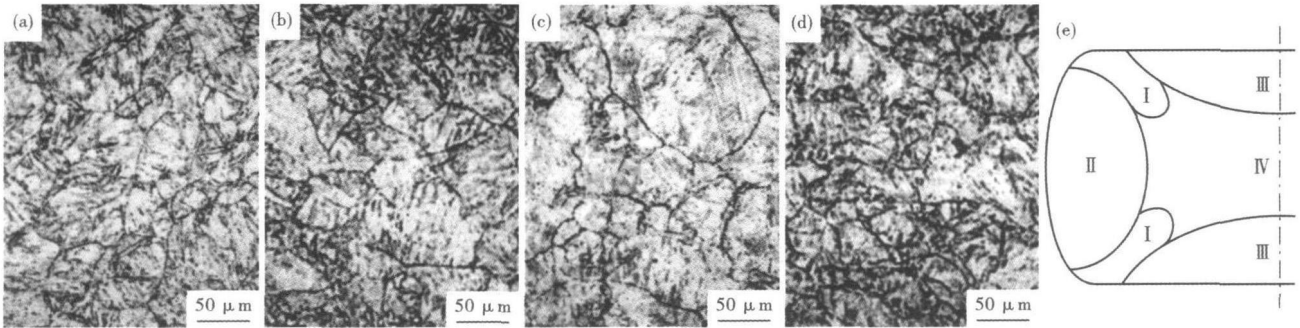


图 3 950 °C 热压缩 403Nb 钢的晶粒形貌:(a) I 区;(b) II 区;(c) III 区;(d) IV 区;(e) 压缩试样断面区域

Fig. 3 Morphology of grain of steel 403Nb hot-compressed at 950 °C; zone I (a), II (b), III (c) and IV (d); (e) each zone in cross section of hot-compressed sample

通过有限元分析软件 ANSYS 模拟发现,在 I 区剪应变最大,IV 区次大,II 区次小,III 区最小<sup>[9]</sup>。如图 4 热模拟变形过程中试样内部的非均匀应变剪应变云图表明,剪应变对再结晶的影响,导致不同区域的再结晶情况不同,造成不同区域的晶粒尺寸存在明显差别,在剪应变最大的区域,再结晶最完全,晶粒最细小。

(3)热压缩道次间隔时间短,静态再结晶率低;道次间隔时间长,静态再结晶接近完成,大部分为等轴晶粒。

(4)在剪应变最大的区域,再结晶最完全,晶粒最细小。

国家自然科学基金重点项目资助(50634030)

### 参考文献

- Sellars C M. Modeling Microstructural Development during Hot Rolling. *Mater. Sci. Technol.*, 1990, 6(11):1072
- Saito Y, Saeki M, Nishida M, et al. Proc. of International Conference on Steel Rolling, ISIJ, Tokyo, 1980, 1300
- Yada H, Senuma T. Resistance to Hot Deformation of Steels. *Jpn. Social Technology Plast.*, 1986, 27(300):34
- Rorberts W, Sandberg A, Siwecki T, et al. Prediction of Microstructure Development during Recrystallization Hot Rolling of Ti-V Steels. *International Conference on Technology and Applications of HSLA Steels*, ASM, Philadelphia, 1983, 3-6(10):67
- Sellars C M. Modeling Microstructural Development during Hot Rolling. *Mater. Sci. Technol.*, 1990, 6(11):1072
- 刘振宇,许云波,王国栋. 热轧钢材组织-性能演变的模拟和预测. 沈阳:东北大学出版社,2004
- Medina S F, Mancilla J E. Static Recrystallization Modeling of Hot Deformed Steels Constaining Several Alloying Elements. *ISIJ International*, 1996, 36(8):1071
- Medina S F, Qiuspe A. New Modeling of Static Recrystallization Kinetics in Low Alloy and Microalloyed Steel. *Met. Church House*. London, 2004, 401
- 魏洁. C-Mn 钢热轧过程变形及组织演变的数学模拟及实验研究:[学位论文]. 北京:钢铁研究总院,2006

宁小智(1981-),男,硕士,助理工程师,钢铁冶金和性能研究。

收稿日期:2009-11-05

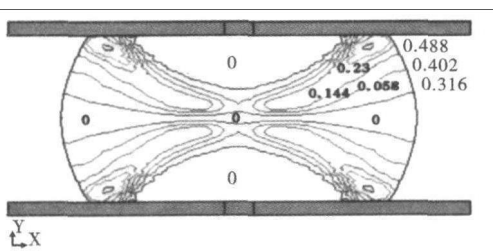


图 4 试样中剪应变云图

Fig 4 Contours of shear strain in sample

### 3 结论

(1) 变形温度、应变速率和应变量的增加都会加速 403Nb 叶片钢静态再结晶进程。

(2) 403Nb 钢的静态再结晶激活能为:  $Q_{rx} = 168.40 \text{ kJ/mol}$ , 静态再结晶模型为:  $t_{0.5} = 6.599 \times 10^{-10} \varepsilon^{-1.6} \dot{\varepsilon}^{-0.46} d_0 \exp \frac{168400}{RT}$ 。