

## 40Mn2V 非调质钢热变形再结晶的研究

方 剑<sup>1,2</sup> 邹喜洋<sup>2</sup> 谢凯意<sup>2</sup> 袁泽喜<sup>1</sup>

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 湖南衡阳华菱钢管(集团)有限公司技术中心, 衡阳 421001)

**摘 要** 采用 Gleeble-1500 热模拟机测得 40Mn2V 微合金化非调质钢(%:0.38C、1.48Mn、0.12V)Φ90 mm 管坯在 800~1 000 ℃、变形速率 0.5~2.0 s<sup>-1</sup> 时的真应力-应变曲线,并研究了该钢的动态再结晶行为。结果表明,40Mn2V 钢的动态再结晶激活能  $Q_d$  为 382.21 kJ/mol,通过动态再结晶图得出,因子  $Z > 2.621 \times 10^{15}$  时,40Mn2V 钢动态再结晶难以完成,当因子  $Z > 2.014 \times 10^{17}$  时,该钢动态再结晶难以发生。

**关键词** 非调质钢 管坯 热变形 动态再结晶

## A Study on Recrystallization of Non-Quenched-Tempered Steel 40Mn2V during Thermal Deformation

Fang Jian<sup>1,2</sup>, Zou Xiyang<sup>2</sup>, Xie Kaiyi<sup>2</sup> and Yuan Zexi<sup>1</sup>

(1 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Technical Center, Hengyang Hualing Steel Tube (Group) Co Ltd, Hengyang 421001)

**Abstract** True stress-strain curves of Φ90 mm tube blank of microalloying non-quenched-tempered steel 40Mn2V (%: 0.38C, 1.48Mn, 0.12V) with deformation rate 0.5~2.0 s<sup>-1</sup> at 800~1 000 ℃ have been measured by Gleeble-1500 thermal simulator to study the dynamic recrystallization behavior of the steel. Results show that the dynamic recrystallization activation energy  $Q_d$  of steel 40Mn2V is 382.21 kJ/mol; it is obtained by dynamic recrystallization figure that it is difficult to complete the dynamic recrystallization of steel 40Mn2V as factor  $Z > 2.621 \times 10^{15}$ , and occurrence of the dynamic recrystallization of steel is difficult as factor  $Z > 2.014 \times 10^{17}$ .

**Material Index** Non-Quenched-Tempered Steel, Tube Blank, Thermal Deformation, Dynamic Recrystallization

通过 Gleeble-1500 热模拟机,对微合金非调质钢管 40Mn2V 的热轧变形过程进行了模拟,分析了变形条件对动态再结晶的影响,求出了动态再结晶激活能并作出了动态再结晶图。

### 1 试验材料及方法

试验用钢采用衡阳华菱钢管(集团)有限公司生产的微合金非调质钢管 40Mn2V,其尺寸为 Φ90 mm × 2 000 mm,化学成分如表 1 所示。

从 40Mn2V 钢管坯上取 14 组经加工的 Φ8 mm × 12 mm 圆柱体试样,在 Gleeble-1500 热模拟试验机中,分别以 10 ℃/s 的速度加热到 1 250 ℃,保温 3 min 后,再以 3 ℃/s 的速率分别冷却到各预设变形温度并保温 1 min,再以预设的变形量和变形速率进行高温变形试验,变形完后立即水淬,测得其真实应

力-应变曲线及数据。试验参数见表 2。

### 2 试验结果及分析

#### 2.1 真应力-应变曲线

从图 1 中看出,变形抗力随变形量的增加,先急剧增加后慢慢的到达一个较平稳值,这是加工硬化与高温软化的综合作用的结果。有的曲线上出现了峰值(如图 1a, b, c 各条曲线),说明在热变形过程中发生了动态再结晶。有的曲线上没有出现明显的峰值(如图 1d),说明在热变形过程中没有发生动态

表 2 40Mn2V 钢的实验参数  
Table 2 Test parameters of steel 40Mn2V

试样号	试验温度 (T)/℃	变形量 (ε)	变形速率 (ε̇)/s <sup>-1</sup>	试样号	试验温度 (T)/℃	变形量 (ε)	变形速率 (ε̇)/s <sup>-1</sup>
1	1 200	0.8	2.0	8	1 000	0.8	1.0
2	1 100	0.8	1.0	9	1 000	0.8	1.5
3	1 100	0.8	1.5	10	1 000	0.8	2.0
4	1 100	0.8	2.0	11	950	0.8	0.5
5	1 050	0.8	1.0	12	900	0.8	0.5
6	1 050	0.8	1.5	13	850	0.8	0.5
7	1 050	0.8	2.0	14	800	0.8	0.5

注:1<sup>#</sup>试样近似模拟钢管穿孔过程,2<sup>#</sup>~10<sup>#</sup>近似模拟钢管连轧过程,11<sup>#</sup>~14<sup>#</sup>近似模拟钢管定径过程。

表 1 非调质钢 40Mn2V 管坯的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tube blank of non-quenched-tempered steel 40Mn2V / %

C	Si	Mn	P	S	Cu	V	Sn	As
0.38	0.23	1.48	0.018	0.006	0.11	0.12	0.01	0.012

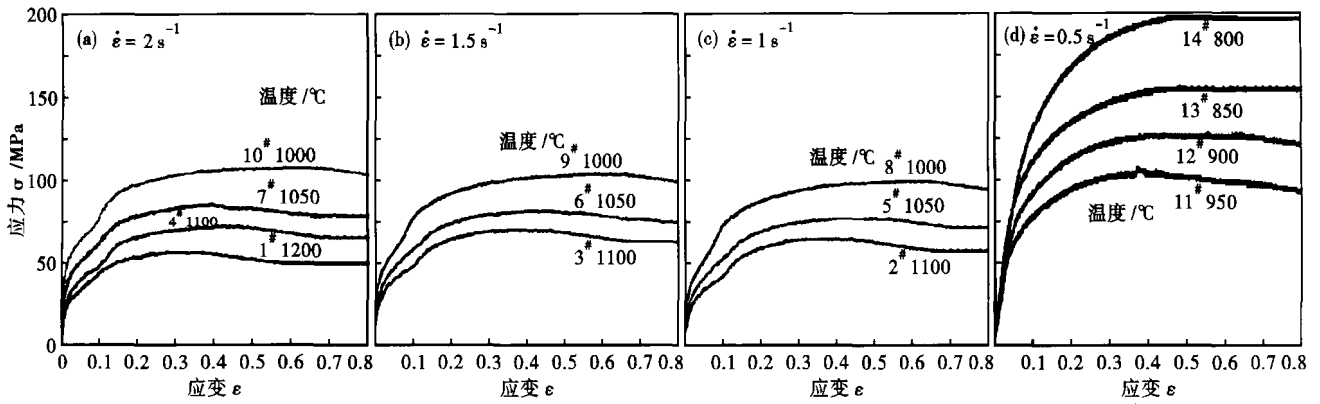


图 1 40Mn2V 钢的真应力-应变曲线, 变形速率/ $s^{-1}$ : (a) 2.0; (b) 1.5; (c) 1.0; (d) 0.5

Fig. 1 True stress-strain curves of steel 40Mn2V, deformation rate / $s^{-1}$ : (a) 2.0; (b) 1.5; (c) 1.0; (d) 0.5

再结晶, 只发生了动态回复软化。

### 2.2 变形条件对动态再结晶的影响

一般认为开始发生动态再结晶时的临界变形量( $\epsilon_c$ ) 在峰值应力( $\sigma_p$ ) 对应的变形量( $\epsilon_p$ ) 之前, 在真应力-应变曲线上难以确定, 多数用经验公式  $\epsilon_c = 0.83 \epsilon_p$  获得<sup>[1-3]</sup>。而将真应力-应变曲线上达到稳态应力值临界点( $\sigma_s$ ) 对应的变形量作为完全再结晶临界变形量( $\epsilon_s$ )。从图 1 中真应力-应变曲线可以得出, 1# ~ 7# 试样发生并完成了动态再结晶, 8# ~ 12# 试样发生了动态再结晶但没能完成, 13# 和 14# 试样没有发生动态再结晶。

从图 2 看出, 不同变形速率下的动态再结晶开始和完成临界变形量均随温度的升高而逐渐减少, 动态再结晶越容易, 温度越高原子热运动越剧烈, 再结晶形核率及长大速率都成指数增长<sup>[1]</sup>, 促进了动态再结晶的发生和完成。从图 3 看出, 不同温度下的动态再结晶开始和完成临界变形量均随变形速率的增加而增加, 动态再结晶越困难, 变形速率越大, 动态回复以及形核和长大时间相对越短, 推迟了动态再结晶的开始和完成。

### 2.3 动态再结晶的激活能

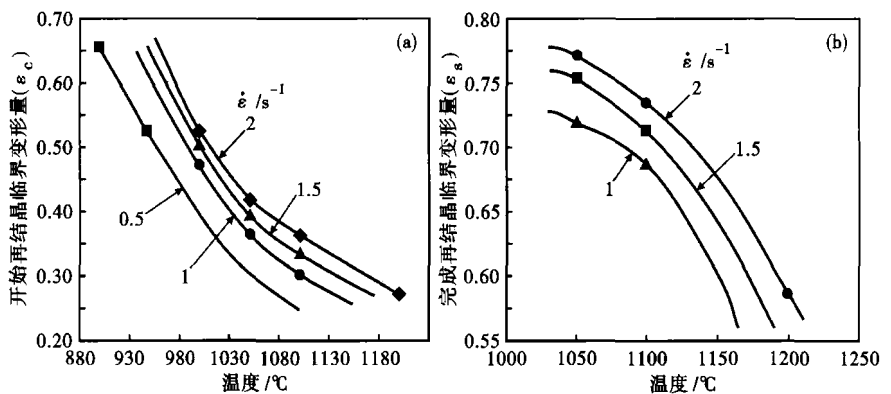


图 2 温度对 40Mn2V 钢开始再结晶临界变形量(a) 和完成再结晶临界变形量(b) 的影响

Fig. 2 Effect of temperature on critical extent of deformation of beginning (a) and complete (b) dynamic recrystallization of steel 40Mn2V

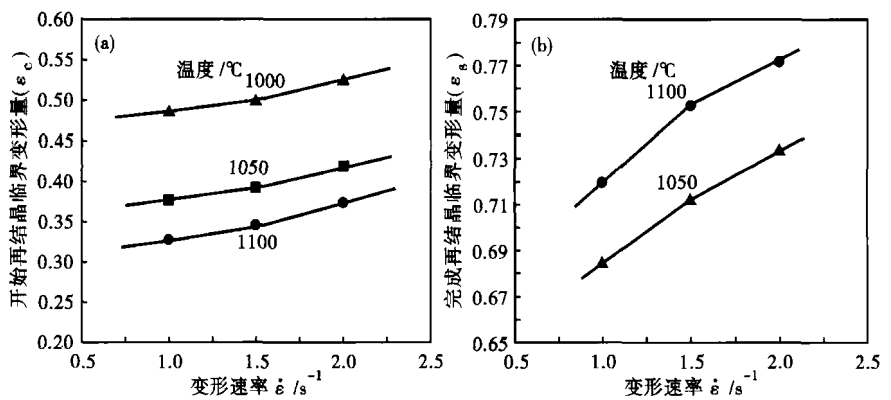


图 3 变形速率对 40Mn2V 钢开始再结晶临界变形量(a) 和完成再结晶临界变形量(b) 的影响

Fig. 3 Effect of deformation rate on critical extent of deformation of beginning (a) and complete (b) dynamic recrystallization of steel 40Mn2V

动态再结晶行为是一个热激活过程<sup>[4,5]</sup>。变形条件对动态再结晶是一个综合的影响关系, 因此引入 Zener-Hollomen 因子  $Z$  来修正变形温度和变形速率的影响, 因子  $Z$  表达式为<sup>[5-7]</sup>:

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

式中:  $Z$ - 影响因子;  $\varepsilon$ - 变形速率/ $s^{-1}$ ;  $Q_d$ - 动态再结晶激活能;  $R$ - 气体常数(8.314 J/mol);  $T$ - 变形温度/K。

研究表明, 因子  $Z$  与稳态应力( $\sigma_s$ )成幂函数关系, 通常以峰值应力( $\sigma_p$ )近似代替  $\sigma_s$ , 其关系式为:

$$z = B \exp(\beta \sigma_p) \quad (2)$$

式中  $B$ 、 $\beta$  为系数<sup>[8-11]</sup>。因此联合式(1)(2), 通过数学转换, 可得动态再结晶激活能的求解公式(3):

$$Q_d = R\beta \left[ \frac{\partial \sigma_p}{\partial (1/T)} \right]_{\varepsilon=c} = R \times \left\{ 1 \left[ \frac{\partial \sigma_p}{\partial (\ln \varepsilon)} \right]_{T=c} \right\} \times \left[ \frac{\partial \sigma_p}{\partial (1/T)} \right]_{\varepsilon=c} \quad (3)$$

式中:  $Q_d$ - 动态再结晶激活能;  $R$ - 气体常数(8.314 J/mol);  $\beta$ - 系数;  $\varepsilon$ - 变形速率/ $s^{-1}$ ;  $\sigma_p$ - 峰值应力;  $T$ - 变形温度/K。

根据公式(3), 在温度( $T$ )恒定时, 求出  $\sigma_p$  对  $\ln \varepsilon$  的偏导数, 在  $\varepsilon$  恒定时, 求出  $\sigma_p$  对  $1/T$  的偏导数, 可计算得出微合金非调质钢管 42Mn2V 的平均动态再结晶激活能为:  $Q_d = 8.314 \times 0.079838 \times 575820.9 = 382.21$  kJ/mol。比普通低碳钢再结晶激活能 287.00 kJ/mol<sup>[11]</sup>高出 95.21 kJ/mol。

### 2.4 动态再结晶图

根据计算出来的非调质钢管 40Mn2V 动态再结晶激活能  $Q_d$ , 可以分别计算出各变形条件下的因子  $Z$  值, 因此可以建立起因子  $Z$  和变形量对动态再结晶开始和完成综合影响的动态再结晶图(图4)。

### 参考文献

- 1 何宜柱, 陈大宏, 雷廷权. 变形  $Z$  因子与动态再结晶晶粒尺寸间的理论模型. 钢铁研究学报, 2000, 12(1): 26
- 2 Ryan N D, McQueen H J. Comparison of Dynamic Softening in 301, 304, 316 and 317 Stainless Steels. High Temperature Technology, 1990, 8(3): 185
- 3 Bin Z, Hongbing Z, Xueyou R. Dynamic Recrystallization Behavior of 35CrMo Structural Steel. Journal of Central South University of Technology, 2003, 10(1): 13
- 4 窦小峰, 鹿手理, 赵 辉. Q235 钢动态再结晶模型的建立. 北京科技大学学报, 1998, 20(5): 467
- 5 Zhang B, Zhang H B, Ruan X Y. The Hot Deformation Behavior and Dynamic Recrystallization Model of 35CrMo Steel. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 16(3): 183
- 6 Xiong L, Hongbing Z, Xueyou R. Kinetics for Static Recrystallization After Hot Working of 0.38C-0.99Cr-0.06Mo Steel. Journal of South China University of Technology, 2004, 11(4): 353
- 7 Zhu F X, Liu C, Chui G Z. Effect of Hot Deformation Parameters on Recrystallization of Steel T91. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 13

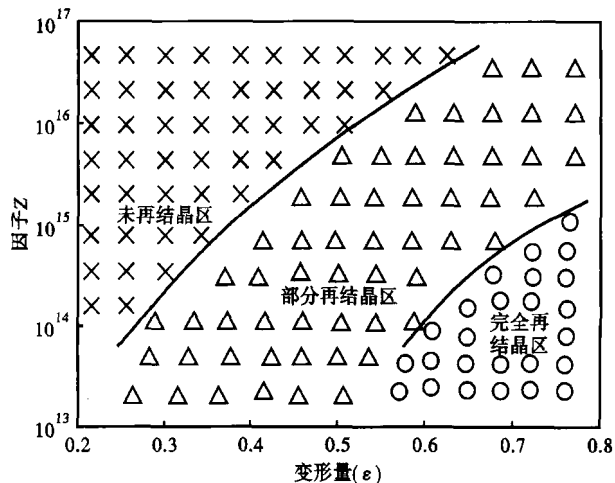


图4 40Mn2V 钢动态再结晶图  
Figure 4 Figure of dynamic crystallization of steel 40Mn2V

从图4可以看出, 因子  $Z$  越小, 动态再结晶开始和完成的临界变形量越小, 动态再结晶越容易。当  $Z = 7.169 \times 10^{13}$  时, 动态再结晶开始和完成临界变形量最小, 分别为 0.237 和 0.586; 当  $Z > 2.621 \times 10^{15}$  时, 动态再结晶难以完成, 当因子  $Z > 2.014 \times 10^{17}$  时, 动态再结晶难以发生。

### 3 结论

(1) 温度越高, 变形速率越低, 40Mn2V 钢动态再结晶开始和完成的临界变形量均越小, 动态再结晶越容易。

(2) 微合金非调质钢管 40Mn2V 的动态再结晶激活能  $Q_d$  为 382.21 kJ/mol, 比低碳钢再结晶激活能 287.00 kJ/mol 高出 95.21 kJ/mol。

(3) 因子  $Z$  越小, 40Mn2V 钢动态再结晶开始和完成的临界变形量均越小, 动态再结晶越容易。当  $Z > 2.621 \times 10^{15}$  时, 动态再结晶难以完成, 当因子  $Z > 2.014 \times 10^{17}$  时, 动态再结晶难以发生。

- (1): 335
- 8 Cho S H, Kang K B, Jonas J J. The Dynamic, Static and Metadynamic Recrystallization of a Nb-Microalloyed Steels. ISIJ International, 2001, 41(1): 63
- 9 Yunlong Z, Gouquan L, Jiankai H, et al. Research on Dynamic Recrystallization Law of New Steel 33Mn2V for Oil Well Tubes. Iron and Steel, 2003, 38(2): 42
- 10 Karjalainen L P, Somani M C. Discrepancies in the Regressing Modelling of Recrystallization Rate as Using the Data From Physical Simulation Tests. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 17(30): 221
- 11 刘战英, 陈连生, 周满春. 变形条件对 30MnSiV 钢动态再结晶行为研究. 钢铁研究学报, 2004, 16(1): 49

方 剑(1980-), 男, 在读博士研究生, 油套管产品研发。