

## B30MnSi 钢的动态再结晶行为

魏立群

(上海应用技术学院材料工程系, 上海 200235)

**摘 要** 采用 Gleeble-1500 热模拟试验机对 B30MnSi 钢(%:0.32C, 1.04Mn, 0.85Si, 0.019P, 0.009S)进行变形温度为 850~1 000 ℃, 应变速度为 0.1~10 1/s 的压缩变形试验, 以研究该钢的动态再结晶规律。并通过回归分析得出峰值应力  $\sigma_m$ , 应变  $\epsilon_p$ , 动态再结晶临界应变  $\epsilon_c$  与温度补偿变形速率因子 Z 之间关系式为  $\sigma_m = 16.689\text{Ln}(Z) - 347.41$ ;  $\epsilon_p = 0.047 4\text{Ln}(Z) - 1.102 3$ ;  $\epsilon_c \approx 0.039 3\text{Ln}(Z) - 0.915$ 。

**关键词** B30MnSi 钢 线材 应力-应变 动态再结晶

## Dynamic Recrystallization Behavior of Steel B30MnSi

Wei liqun

(Material Engineering Department, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235)

**Abstract** The compression deformation test at temperature between 850 ℃ and 1 000 ℃ with strain rate 0.1 ~ 10 1/s of steel B30MnSi- 0.32C, 1.04Mn, 0.85Si, 0.019P, 0.009S has been carried out using Gleeble-1500 thermal simulation machine to study the dynamic recrystallization behavior of the steel. And the relation of peak stress  $\sigma_m$ , peak strain  $\epsilon_p$ , dynamic recrystallization critical strain  $\epsilon_c$  with temperature compensating deformation rate factor Z has been got by regression analysis, that is  $\sigma_m = 16.689\text{Ln}(Z) - 347.41$ ,  $\epsilon_p = 0.047 4\text{Ln}(Z) - 1.102 3$ , and  $\epsilon_c \approx 0.039 3\text{Ln}(Z) - 0.915$ .

**Material Index** Steel B30MnSi, Rod, Stress- Strain, Dynamic Recrystallization

为了保证热轧线材的组织, 必须对相变前热轧过程中的奥氏体组织变化规律进行研究, 通过控制热轧变形来调节奥氏体组织状态, 从而控制奥氏体相变行为及相变组织, 获得所需的组织和性能<sup>[1-4]</sup>。本文研究了 B30MnSi 钢在一定条件下的动态再结晶行为, 目的在于为线材轧制生产工艺的制定提供理论依据。

### 1 试验方法

试验材料为宝钢高线厂生产的 B30MnSi 的线材, 其化学成分(%): 0.32C, 1.04Mn, 0.85Si, 0.019P, 0.009S。将热轧 B30MnSi 的线材切削加工成  $\Phi 8 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  圆柱型热压缩试样, 在 Gleeble-1500 热/力模拟机上压缩。试样以 20 ℃/s 升温到 1 100 ℃, 保温 5 min 后以 3.0 ℃/s 冷却到变形温度(850 ℃、900 ℃、950 ℃、1 000 ℃), 再分别以 0.1(1/s)、5(1/s)和 10(1/s)的应变速率变形, 其最大变形量为 70%, 卸载后立即淬火冷却, 并记录其应力应变曲线。

### 2 试验结果

#### 2.1 B30MnSi 钢应力-应变曲线

图 1 为 B30MnSi 钢的应力-应变曲线, 它属于动态再结晶型流变曲线。在本试验条件下, 峰值应力  $\sigma_m$  在 51.3~206.5 MPa 范围内变化, 其相应的应变  $\epsilon_p$  在 0.09%~0.35% 范围内变化。

图 1 可见: 变形温度  $T$ 、变形量  $\epsilon$  和变形速度  $\dot{\epsilon}$  等工艺参数对变形抗力值以及热变形奥氏体的动态再结晶行为都有明显的影响。在热变形过程中加工硬化和动态软化两种机制同时起作用。当应变变量超过峰值应变( $\epsilon_p$ )后, 加工硬化与软化达到平衡, 应力值趋于某一恒定值。在同一应变速率下, 相对于同一应变值, 变形温度越高, 所对应的应力值越低, 并随着变形温度的降低, 峰值应力( $\sigma_m$ )向应变增加的方向移动, 即峰值应力( $\sigma_m$ )所对应的应变  $\epsilon_p$  也增大, 开始动态在结晶的临界应变  $\epsilon_c$  (通常  $\epsilon_c \approx 0.83\epsilon_p$ ) 也增大, 即说明需要较大的变形量才能发生动态再结晶。在相同的变形温度下, 随着应变速率的提高, 峰值应力( $\sigma_m$ )向应变增加方向移动, 即应变  $\epsilon_p$  增大, 发生动态再结晶的临界应变  $\epsilon_c$  也随之增加, 发生动态再结晶变得困难。

当 B30MnSi 钢的应变速率  $\dot{\epsilon}$  为 0.1(1/s) 和

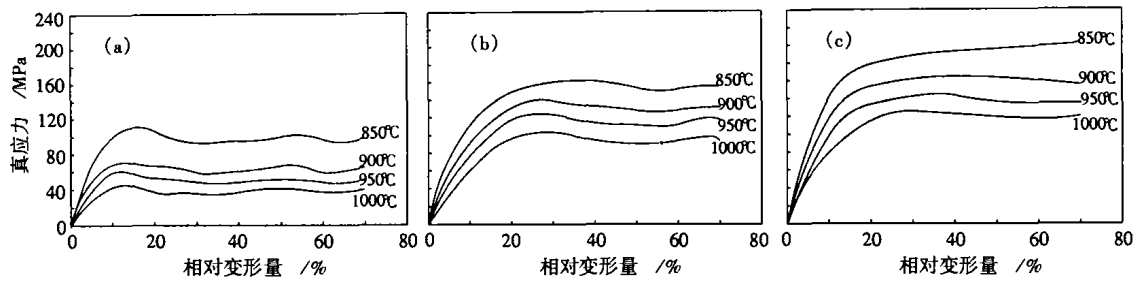


图 1 B30MnSi 钢的 850~1 000 °C 应力-应变曲线, 变形速度(1/s): (a) 0.1; (b) 5; (c) 10

Fig. 1 Stress-strain curves of steel B30MnSi at temperature between 850 °C and 1 000 °C, with deformation rate (1/s) 0.1 (a), 5 (b) and 10 (c)

5(1/s)时,各变形温度对应的应力-应变曲线都有明显的峰值,即 B30MnSi 钢变形中能发生动态再结晶,当应变速率提高到  $\dot{\epsilon} = 10(1/s)$  时,在变形温度大于 850 °C 时,仍然可以发生动态再结晶。随着变形温度的不断下降,动态再结晶变得愈来愈困难,到 850 °C 时,加工硬化大于动态软化,使应力随着应变增加而不断增加,表现为硬化过程。总体来说, B30MnSi 钢发生和完成动态再结晶的临界变形量较小,仍然是比较容易发生动态再结晶的。

在线材生产中,粗轧道次的应变速率一般小于 10(1/s),而变形温度高于 950 °C,所以能在轧制中发生完全动态再结晶。在预精轧和精轧过程中,尽管轧制速度很快,但道次之间的间隙时间很短(一般小于 1s),所以轧制间隙之间很难发生静态回复和静态再结晶的软化,从而使得应变能够累积下来,当累积应变超过动态再结晶的临界应变  $\epsilon_c$  时,变形奥氏体可发生动态再结晶。在生产现场的成品机架后取样观察变形奥氏体组织,证实了这一情况。

## 2.2 B30MnSi 钢动态再结晶激活能

从 B30MnSi 钢的应力-应变曲线实验结果可知:变形温度越低,峰值应力  $\sigma_m$  及其所对应的应变  $\epsilon_p$  就越大,越不容易发生再结晶。这一关系可以用 Zener-Hollomon 因子来表示<sup>[5]</sup>:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (1)$$

式中:  $Q$ -再结晶激活能/ $J \cdot mol^{-1}$ ;  $R$ -气体常数,  $R = 8.31 J/mol \cdot K$ ;  $T$ -热变形的绝对温度/ $K$ 。

$Z$  为温度补偿变形速率因子。当变形温度愈低、变形速率愈大时,  $Z$  值变大,动态再结晶开始的变形量和动态再结晶完成的变形量也变大,即需要较大的变形量才能发生动态再结晶。

而  $Z$  因子与变形峰值应力的关系为<sup>[6]</sup>:

$$Z = A_1 \exp(A_2 \sigma_m) \quad (2)$$

式中:  $A_1$ 、 $A_2$  为常数。

由(1)式和(2)式得:

$$\dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = A_1 \exp(A_2 \sigma_m) \quad (3)$$

对(3)式两边取对数整理后:

$$\ln(\dot{\epsilon}) = A_2 \sigma_m - Q/RT + \ln(A_1) \quad (4)$$

由 B30MnSi 钢的高温应力-应变曲线上采集  $\dot{\epsilon}$ 、 $T$ 、 $\sigma_m$  值,对(4)式进行线性回归,从而确定其中的参数  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $Q$ 。这样可以求得 B30MnSi 钢动态再结晶的激活能  $Q = 277.6 (kJ/mol)$ , 而  $A_1 = 1.15 \times 10^9 (1/s)$ ,  $A_2 = 0.059 4 (MPa^{-1})$ 。所以:

$$\begin{aligned} Z &= \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{277.6 \times 10^3}{8.31 T}\right) \\ &= 1.15 \times 10^9 \exp(0.059 4 \sigma_m) \end{aligned} \quad (5)$$

在本文的研究条件下, B30MnSi 钢的  $Z = 2.0 \times 10^{10} - 8.70 \times 10^{13} (1/s)$

## 2.3 B30MnSi 钢的峰值应力 $\sigma_m$ 、应变 $\epsilon_p$ 、动态再结晶临界应变 $\epsilon_c$ 与 $\ln Z$ 的关系

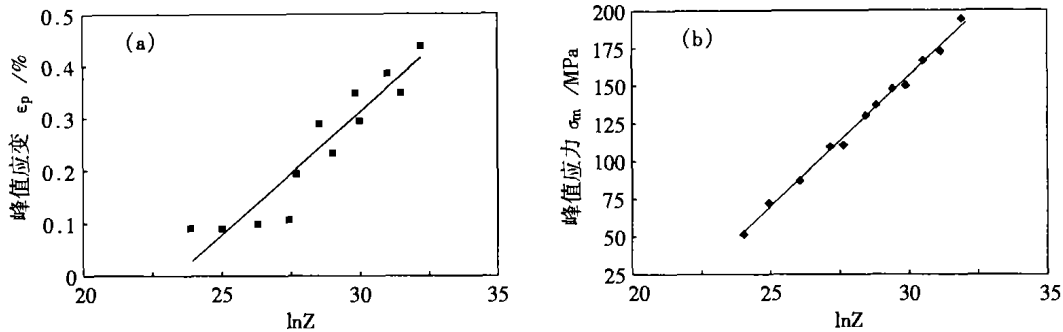
根据应变  $\epsilon_p$  与  $Z$  因子的实验关系曲线(图 2(a))和峰值应力  $\sigma_m$  与  $Z$  因子的实验关系曲线(图 2(b)),回归出它们之间的关系。

B30MnSi 钢峰值应力所对应的应变  $\epsilon_p$  与  $Z$  因子的关系为:

$$\epsilon_p = 0.047 4 \ln(Z) - 1.102 3 (\text{相关系数 } R = 0.916 5) \quad (6)$$

B30MnSi 钢动态再结晶的临界应变为:

$$\epsilon_c \approx 0.83 \epsilon_p = 0.039 3 \ln(Z) - 0.915 \quad (7)$$

图2  $\ln(Z)$ 对 B30MnSi 钢峰值应变  $\epsilon_p$  (a)、峰值应力  $\sigma_m$  (b)的影响Fig.2 Effect of  $\ln(Z)$  on peak strain  $\epsilon_p$  (a) and peak stress  $\sigma_m$  (b) for steel B30MnSi

B30MnSi 钢峰值应力  $\sigma_m$  与  $Z$  因子的关系为

$$\sigma_m = 16.689 \ln(Z) - 347.41 \quad (\text{相关系数 } R = 0.9958) \quad (8)$$

从图2看出,  $\sigma_m$ 、 $\epsilon_p$ 、 $\epsilon_c$  与  $\ln Z$  基本上是线性关系, 并且随  $\ln Z$  增加而增大。随着变形温度的升高和变形速率的减小,  $Z$  因子值降低, 动态再结晶的临界应变量  $\epsilon_c$  也逐渐减小, 发生和完成动态再结晶的临界变形量差也较小, 容易发生动态再结晶。但总的来看, 这种钢发生和完成动态再结晶的临界变形量较小。当变形温度为 900 °C 以上时, 应变速率为 10(1/s) 以下,  $\epsilon_c$  值小于 28%, 均能发生动态再结晶。因此在一般条件下, 这种钢容易发生和完成动态再结晶。考虑实际线材轧制时的粗轧变形温度为 980 ~ 1 050 °C, 应变速率为 10(1/s) 以下, 道次变形量不小于 30%, 因此 B30MnSi 钢在上述工艺条件下可以发生和完成动态再结晶。而预精轧和精轧变形温度为 900 ~ 980 °C, 尽管应变速率大于 10(1/s), 但由于轧制道次之间的间隙时间很短, 可以抑制静态回复和再结晶, 而获得较大的累积变形量而引发动态再结晶。

### 3 结论

(1) 当 B30MnSi 钢变形温度为 900 °C 以上, 应变速率为 10(1/s) 以下时, 发生和完成动态再结晶的临界变形量较小, 易发生和完成动态再结晶。

(2) 在高线的实际生产中, B30MnSi 钢线材轧制时的粗轧变形温度为 980 ~ 1 050 °C, 应变速率为 10(1/s) 以下, 道次变形量不小于 30%, 因此可以发生和完成动态再结晶。而预精轧和精轧变形温度为 900 ~ 980 °C, 尽管应变速率大于 10(1/s), 但由于轧制间隙时间很短, 可以抑制静态回复和

再结晶, 而获得较大的累积变形量而引发动态再结晶。

(3) 在本文给定的热变形条件下, B30MnSi 钢的热变形方程式为:  $Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{277.6 \times 10^3}{8.31 T}\right) = 1.15 \times 10^9 \exp(0.0594 \sigma_m)$ , 其中动态再结晶激活能  $Q$  为 277.6(kJ/mol)。

(4) 峰值应力  $\sigma_m$ 、应变  $\epsilon_p$ 、动态再结晶临界应变  $\epsilon_c$  与  $\ln Z$  的关系为:

$$\sigma_m = 16.689 \ln(Z) - 347.41$$

$$\epsilon_p = 0.0474 \ln(Z) - 1.1023$$

$$\epsilon_c \approx 0.0393 \ln(Z) - 0.915$$

上海市教委科学技术基金重点项目(03ZH01)

### 参考文献

- 1 王秉新, 刘相华, 王国栋. 22CrS 齿轮钢变形奥氏体动态再结晶行为及组织演变. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 24(5): 476
- 2 刘战英, 陈连生, 周满春, 等. 变形条件对 30MnSiV 钢动态再结晶行为的影响. 钢铁研究学报, 2004, 16(1): 49
- 3 Pauskar P, Shivpuri R. Microstructure and Mechanics Interaction in the Modeling of Hot Rolling of Rods. Annals of the CIRP, 1999, 48(1): 191
- 4 赵宪明, 吴迪, 陈学军. 60Si2Mn 钢动态再结晶数学模型的实验研究. 钢铁研究学报, 2003, 15(5): 32
- 5 Medina S F, Hernandez C A. General Expression of Zener-Hollomon Parameter as a Function of Chemical Composition of Low Alloy and Microalloyed Steel. Acta Mater, 1996, 44(1): 137
- 6 Karhausen K, Kopp R. Model for Integrated Process and Microstructure Simulation in Hot Forming. Steel Research, 1992, 63(6): 247

魏立群(1962-), 男, 副教授。1983 年上海工业大学毕业, 从事轧制工艺研究。