

## Ti-IF 钢动态再结晶模型

徐光 徐楚韶

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘要** 通过 Thermecmaster-Z 热模拟实验机对 Ti-IF (无间隙原子) 钢 (0.009C、0.017Si、0.13Mn、0.012P、0.013S、0.05Ti、0.025Al) 在 750 °C、850 °C 和变形速率 0.1、1、20 s<sup>-1</sup> 下进行单道次压缩变形实验。得出 Ti-IF 钢加工硬化率-应变曲线、动态再结晶状态图和动态再结晶体积分数方程。实验结果表明,对于无明显峰值应变的应力-应变曲线,采用加工硬化率方法确定峰值应变和稳态应变是一种有效的方法。

**关键词** Ti-IF 钢 加工硬化率 峰值应变 动态再结晶

## Modelling of Dynamic Recrystallization for a Ti-IF Steel

Xu Guang and Xu Chushao

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract** Single pass reduction deformation experiment of a Ti-IF (interstitial atom free) steel - 0.009C, 0.017Si, 0.13Mn, 0.012P, 0.013S, 0.05Ti, 0.025Al with deformation rate 0.1, 1 and 20 s<sup>-1</sup> at 750 °C and 850 °C has been carried out by Thermecmaster-Z thermal simulation machine. The curves of work hardening rate - strain for the Ti-IF steel, the dynamic recrystallization diagram and the volume fraction equation of dynamic recrystallization were obtained. Test results show that for the stress-strain curves with no obvious peak strain, it is available to use work hardening rate method to determine peak strain and stable strain.

**Material Index** Ti-IF Steel, Work Hardening Rate, Peak Strain, Dynamic Recrystallization

一般根据应力应变曲线上的峰值应变来确定动态再结晶开始的临界应变<sup>[1-3]</sup>,本文提出了采用应变硬化率<sup>[4]</sup>来研究 Ti-IF 钢动态再结晶。

### 1 实验方法

实验 Ti-IF 钢 (0.009C、0.013S、0.017Si、0.13Mn、0.012P、0.05Ti、0.025Al) 的热模拟实验试样见图 1,实验时在凹槽内填入润滑剂以减小摩擦的影响。

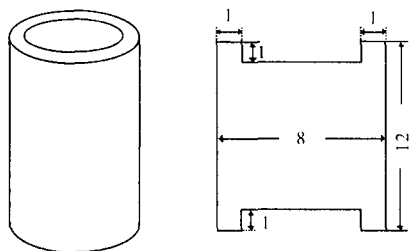


图1 试样尺寸  
Fig.1 Dimension of sample

在 Thermecmaster-Z 热模拟实验机上进行单道次压缩变形实验,变形温度为 750 °C 和 850 °C,变形速率为 0.1、1、20 s<sup>-1</sup>。试样以 5 °C/s 的加热速度加

热到 1020 °C,保温 5 min 以奥氏体均匀化,然后冷却到变形温度进行等温变形。

### 2 实验结果和数据处理

由流变应力-应变数据可计算出对应于各应变的加工硬化率<sup>[4,5]</sup>:

$$\theta = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \approx \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

式中:Δσ- 真应力增量;Δε- 真应变增量。

加工硬化率可根据应力-应变实验数据计算得到,在不同的应变间隔内,找到对应的应力变化(一般计算时取相同的应变间隔),用式(1)就可求出不同应变时的加工硬化率。根据实验数据得到的 Ti-IF 钢的加工硬化率 θ 与应变 ε 的关系曲线见图 2。

由图 2 可见,随着 ε 的增加,θ 迅速达到极大值后逐渐低到小于 0 的一个极小值,而 θ=0 时的应变值就是峰值应变 ε<sub>p</sub>;随着 ε 进一步增加,若 θ 又增加到 0 且维持在 0 值,说明此时发生的动态再结晶为连续型的;若 θ 又在 0 值上下波动,则动态再结晶为周期型的。在动态再结晶模型中,可以把 θ 第一次恢复到 0 值时的 ε 作为稳态应变 ε<sub>s</sub>。由此可得到不同变形条件下的两个特征值:峰值应变 ε<sub>p</sub>、动

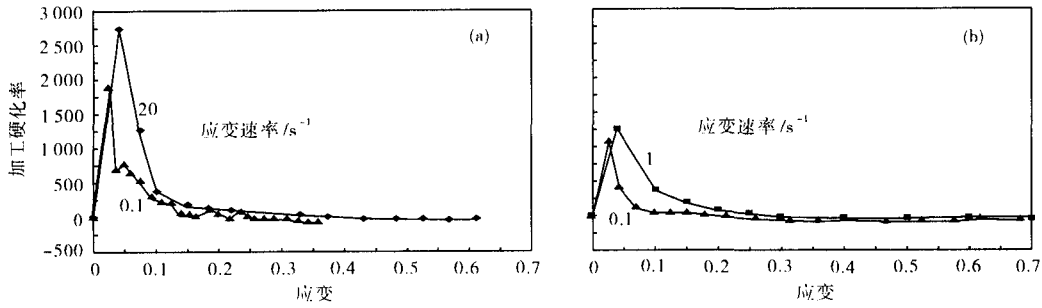


图 2 Ti-IF 钢加工硬化率-应变曲线:(a) 750 °C;(b) 850 °C  
 Fig. 2 Curves of work hardening rate - strain of Ti-IF steel: (a) 750 °C; (b) 850 °C

表 1 Ti-IF 钢变形的参数

Table 1 Parameters of deformation of Ti-IF steel

变形温度/°C	变形速率/s <sup>-1</sup>	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	Z	lnZ
750	0.1	0.280 8	0.563 4	7.833 5E+16	38.90
750	20	0.286 7	0.587 6	1.566 7E+19	44.20
850	0.1	0.209 9	0.482 7	1.997 8E+15	35.23
850	1	0.244 1	0.521 6	1.997 8E+16	37.53

态再结晶完成后的稳态应变  $\epsilon_s$ , 然后根据临界应变和  $\epsilon_p$  的关系得到动态再结晶临界应变  $\epsilon_c$ , 其参数见表 1。

$$\text{Zener-Holloman 参数为: } Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_{\text{def}}}{RT}\right) \quad (2)$$

式中:  $\dot{\epsilon}$ - 变形速率/s<sup>-1</sup>; T- 变形温度/K; Q- 变形激活能,  $Q_{\text{def}} = 350\,452 \text{ J/mol}$ ; R- 气体常数,  $R = 8.314\,4 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ 。

根据(2)式计算出实验超低碳 Ti-IF 钢在不同变形条件下的 lnZ 的值, 见表 1。根据表 1 的实验结果可以作出 Ti-IF 钢的动态再结晶状态图(图 3), 图中 A、B、C 3 个区分别表示未动态再结晶区、部分动态再结晶区以及完全动态再结晶区。

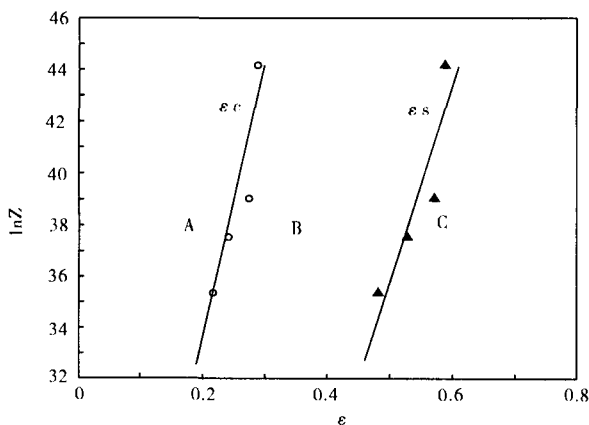


图 3 Ti-IF 钢动态再结晶状态图  
 Fig. 3 Dynamic recrystallization diagram of Ti-IF steel

### 3 动态再结晶体积分数方程

本文采用文献[6]介绍的 Febregue 方法描述金属热变形过程动态再结晶分数, 得到不同变形条件下的动态再结晶分数, 然后利用实验得到的变形特征值, 根据实验数据得到 Ti-IF 钢动态再结晶体积分数方程为:

$$F = 1 - \exp\left[-2.929\,0\left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_s - \epsilon_c}\right)^{2.184\,9}\right] \quad (3)$$

方程(3)的相关系数  $R = 0.937\,8$ 。

### 4 结论

采用加工硬化率方法, 经实验得出 Ti-IF 钢动态再结晶体积分数方程为:

$$F = 1 - \exp\left[-2.929\,0\left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_s - \epsilon_c}\right)^{2.184\,9}\right]$$

湖北省教育厅重点科研基金资助项目(2002A01010)

### 参考文献

- 1 Kirihata A, Siciliano F, Maccagno T M, et al. Mathematical Modelling of Mean Flow Stress during the Hot Strip Rolling of Multiply-alloyed Medium Carbon Steels. ISIJ International, 1998, 38(2):187
- 2 刘丹, 杭乃勤, 黄灿. 82B 高碳钢临界应变的数学模型. 特殊钢, 2004, 25(4):19
- 3 窦晓峰, 鹿守理, 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
- 4 Poliak E I, Jonas J J. Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation. ISIJ International, 2003, 43(5):684
- 5 吴瑞恒, 朱洪涛, 张鸿冰, 等. 0.95C-18W-4Cr-1V 高速钢动态再结晶的数学模型. 上海交通大学学报, 2001, 35(3):339
- 6 张斌, 张鸿冰. 35CrMo 结构钢的热变形行为. 金属学报, 2004, 40(10):1109

徐光(1961-), 男, 教授, 系副主任, 金属材料加工工艺和组织性能控制。

收稿日期:2006-04-27