

· 试验研究 ·

# Ti-IF 钢 750 ~ 850 °C 变形的 Zener-Hollomon 参数方程

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 THERMECMASTOR-Z 热模拟机对成分 (%) 为 0.009C、0.047Ti 的 Ti-IF 钢进行 750 ~ 850 °C 变形速率 1 ~ 70 s<sup>-1</sup> 的单道次压缩变形试验。从不同变形温度和速度下所得应力-应变曲线表明, 随变形速率和应变的增加, 流动应力增大, 但在实验温度范围内, 变形温度对流动应力的影响不显著。该 Ti-IF 钢的 Zener-Hollomon 参数  $Z$  与变形速率  $\dot{\epsilon}$  和变形温度  $T$  的关系为:  $Z = \dot{\epsilon} \exp(42150/T)$ 。

**关键词** Ti-IF 钢 750 ~ 850 °C 变形 Zener-Hollomon 方程

## Zener-Hollomon Equation of a Ti-IF Steel Deformed at 750 ~ 850 °C

Xu Guang and Xu Chushao

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

**Abstract** The single pass reduction deformation experiments of a Ti-IF steel (0.009C, 0.047Ti) at 750 ~ 850 °C with strain rate of deformation 1 ~ 70 s<sup>-1</sup> have been carried out by THERMECMASTOR-Z thermal simulation machine. Based on obtained stress - strain curves with different temperature and strain rate of deformation, it showed that with increasing speed and strain of deformation, the flowing stress increased, while at experimental temperature range the effect of deformation temperature on flowing stress was not obvious. The relation between Zener-Hollomon parameter  $Z$  of the Ti-IF steel and strain rate  $\dot{\epsilon}$  and temperature  $T$  of deformation was  $Z = \dot{\epsilon} \exp(42150/T)$ .

**Material Index** Ti-IF Steel, Deformation at 750 ~ 850 °C, Zener-Hollomon Equation

铁素体低温变形是近 10 年来发展起来的一种新的金属加工技术, 相比于高温奥氏体区热轧具有一系列优点<sup>[1-3]</sup>。本实验采用热模拟方法, 研究了一种 Ti-IF 钢的低温变形行为, 得到该钢的动态再结晶激活能和 Zener-Hollomon 参数方程。

### 1 实验材料和方法

实验用钢为武钢生产的一种 Ti-IF 钢, 其化学成分 (%) 为: 0.009C、0.013S、0.017Si、0.13Mn、0.012P、0.047Ti、0.025Als。热模拟实验试样取自热连轧粗轧后轧件, 加工成  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  的圆柱形试样。首先用激光热膨胀法测定该钢种的  $Ar_3$  和  $Ar_1$  分别为 880 °C 和 865 °C。

在 THERMECMASTOR-Z 热模拟实验机上进行单道次压缩变形实验, 研究 Ti-IF 钢在温度为 750, 800, 850 °C; 变形速率为 1, 10, 40, 70 s<sup>-1</sup> 的变形行为。试样以 5 °C/s 的加热速度升温到 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, 得出真应力和真应变图。

### 2 实验结果和数据处理

由图 1 可见, 随变形速率增加, 流动应力增

大; 随变形程度增加, 流动应力亦增大。但在实验温度区间, 变形温度对流动应力影响不大, 一方面随变形温度降低, 流动应力增大, 但另一方面, 随温度降低, 奥氏体向铁素体转变量增加, 铁素体比例增加, 而铁素体较软, 使流动应力降低, 因此两者的综合作用使温度对流动应力的影响较小。

#### 2.1 动态再结晶激活能

根据文献[4], Zener-Hollomon 参数可表示为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_{\text{def}}}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \quad (1)$$

式中:  $\dot{\epsilon}$ - 变形速率/s<sup>-1</sup>;  $T$ - 变形温度/K;  $Q_{\text{def}}$ - 变形激活能/(J · mol<sup>-1</sup>);  $R$ - 气体常数,  $R = 8.3144 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $\sigma_p$ - 峰值应力/MPa;  $A, \alpha, h$ - 与钢种有关的常数,  $\alpha$  变化很小, 根据文献[5],  $\alpha$  为 0.012。由式(1)可得到:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \cdot \exp\left(\frac{-Q_{\text{def}}}{RT}\right)$$

对上式两边取对数:

$$\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q_{\text{def}}}{RT} - \ln A = n \cdot \ln [\sinh(\alpha\sigma_p)] \quad (2)$$

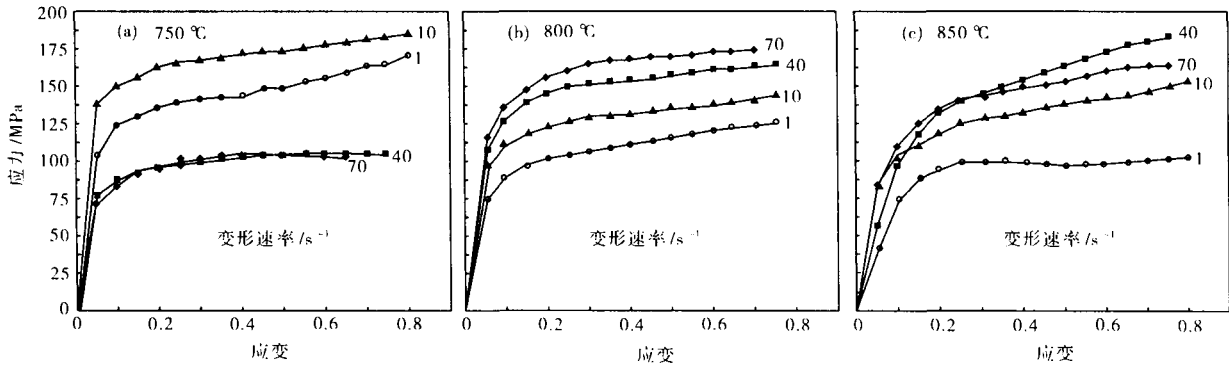


图 1 Ti-IF 钢应力-应变曲线  
Fig. 1 Curves of stress and strain of a Ti-IF steel

当 $\dot{\epsilon}$ 一定时,根据上式,对 $1/T$ 求偏导数:

$$Q_{def} = Rn \left\{ \frac{\partial [\ln \sinh(\alpha \sigma_p)]}{\partial (1/T)} \right\} = Rnb \quad (3)$$

其中: 
$$b = \left. \frac{\partial [\ln \sinh(\alpha \sigma_p)]}{\partial (1/T)} \right|_{\dot{\epsilon} = c} \quad (4)$$

用单道次压缩实验数据,回归得到 $1/T$ 与 $\ln \sinh(\alpha \sigma_p)$ 之间的关系曲线,其平均斜率就是 $b$ 。

若变形温度一定,根据式(2),对 $\ln \dot{\epsilon}$ 求偏导数,可以求得 $n$ 值,即:

$$n = \left. \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]} \right|_{T=c} \quad (5)$$

$\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 之间存在线性关系,采用最小二乘法回归,其关系曲线平均斜率的倒数即为 $n$ 。

将按式(4)和(5)得到的 $n$ 、 $b$ 值代入式(3),即得到实验用Ti-IF钢的动态软化过程激活能

$Q_{def}$ 为350 452 J/mol。

### 2.2 Zener-Hollomon 参数方程

实验用Ti-IF钢在不同变形条件下的Zener-Hollomon参数见表1。根据表1中的实验数据,可得到Zener-Hollomon参数方程为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{42\ 150}{T}\right) \quad (6)$$

### 3 结论

(1)在铁素体低温变形区间,变形温度对Ti-IF钢流动应力的影响较小。

(2)实验得到了Ti-IF钢的动态激活能为350 452 J/mol。

(3)根据实验结果,建立了Ti-IF钢的低温变形条件下的Zener-Hollomon参数方程。

湖北省教育厅重点科研项目(2002A01010)

### 参考文献

- Barnett M R, Jonas J J. Distinctive Aspects of the Physical Metallurgy of Warm Rolling. ISIJ International, 1999, 39(9): 856
- 徐光, 徐楚韶, 赵嘉蓉. 国内外铁素体轧制的应用. 特殊钢, 2005, 26(5): 35
- 毛新平. 薄板坯连铸连轧铁素体轧制工艺. 钢铁, 2004, 39(5): 71
- Zener C, Hollomon J H. Effect of Strain Rate Upon Plastic Flow of Steel. Journal of Applied Physics, 1944(15): 22
- Huang C, Hawbolt E B, Chen X, et al. Flow Stress Modeling and Warm Rolling Simulation Behavior of Two Ti-Nb Interstitial-Free Steels in the Ferrite Region. Acta Mater, 2001, 49(8): 1445

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

表 1 不同变形温度、变形速率下 Ti-IF 钢的 Z 参数  
Table 1 Z parameters of a Ti-IF steel at different temperature and strain rate of deformation

温度/ K	变形速 率/s <sup>-1</sup>	峰值应 力/MPa	峰值 应变	Z 参数/ s <sup>-1</sup>	lnZ
1 023	70	102.06	0.40	5.483 40E+19	45.450 84
1 023	40	102.19	0.50	3.133 70E+19	44.891 23
1 023	10	174.47	0.55	7.833 42E+18	43.504 93
1 023	1	158.19	0.65	7.833 42E+17	41.202 35
1 073	70	170.01	0.50	8.039 36E+18	43.530 88
1 073	40	159.18	0.55	4.593 92E+18	42.971 27
1 073	10	134.30	0.50	1.148 48E+18	41.584 97
1 073	1	118.22	0.60	1.148 48E+17	39.282 39
1 123	70	159.17	0.60	1.398 44E+18	41.781 89
1 123	40	171.16	0.60	7.991 08E+17	41.222 27
1 123	10	140.55	0.60	1.997 77E+17	39.835 98
1 123	1	97.92	0.37	1.997 77E+16	37.533 39