

Ti-IF 钢铁素体变形动态再结晶临界应变模型

徐光 徐楚韶* 赵嘉蓉 刘显军 熊俊伟

(武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; * 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要 用 Thermecmaster-Z 热模拟试验机试验得出成分为 0.006 7% C-0.045 0% Ti 的 Ti-IF(无间隙原子)钢在变形温度 750~900 °C 和变形速率 0.1~40 s⁻¹ 时的应力-应变曲线, 确定了 Zener-Holloman 参数 Z 与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和温度 T(K) 的关系式 $Z = \dot{\epsilon} \exp(39\ 507/T)$, 并建立了临界应变 ϵ_c 与原始晶粒尺寸 d_0 和 Z 参数的临界应变方程 $\epsilon_c = 2.314\ 4 \times 10^{-3} \times d_0^{0.803\ 9} \times Z^{0.050}$ 。结果表明, 在相同变形速率下, 850 °C 变形时动态再结晶最易发生, 当变形温度提高至 900 °C(两相区)时, 即使在低变形速率(1 s⁻¹), 也不发生动态再结晶。当变形速率大于 1 s⁻¹ 时, Ti-IF 钢热加工时不能出现动态再结晶。临界应变预测值与实测值比较, 平均误差 ≤ 5%。

关键词 Ti-IF 钢 铁素体变形 动态再结晶 临界应变模型

Model of Dynamic Recrystallization Critical Strain in Ferrite Deformation of Ti-IF Steel

Xu Guang, Xu Chushao*, Zhao Jiarong, Liu Xianjun and Xiong Junwei

(College of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

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

Abstract The stress-strain curves of 0.006 7C-0.045 0Ti Ti-IF (interstitial free) steel with deformation temperature 750~900 °C and deformation rate 0.1~40 s⁻¹ has been tested and obtained by Thermecmaster-Z thermal simulation test machine, based on that the relational expression between Zener-Holloman parameter Z and deformation rate $\dot{\epsilon}$ -temperature T(K): $Z = \dot{\epsilon} \exp(39\ 507/T)$ is defined, and the critical strain formula for relation between critical strain ϵ_c and original grain size d_0 -Z parameter: $\epsilon_c = 2.314\ 4 \times 10^{-3} \times d_0^{0.803\ 9} \times Z^{0.050}$ is established. The results showed that with same deformation rate the dynamic recrystallization of steel occurred most easily at 850 °C, as deformation temperature increased to 900 °C (dual phase region), the dynamic recrystallization un-occurred even at low deformation rate (1 s⁻¹), and as deformation rate was more than 10 s⁻¹, the dynamic recrystallization of Ti-IF steel also un-occurred during hot rolling. With comparison between predicted value of critical strain and measured value, the average error was no more than 5%.

Material Index Ti-IF Steel, Ferrite Deformation, Dynamic Recrystallization, Critical Deformation Model

近年来, Ti-IF 钢的低温轧制技术(铁素体轧制技术)受到越来越多的重视^[1,2], 国外已有用铁素体轧制工业化生产 Ti-IF 钢的报道^[3]。本文对 Ti-IF 钢粗轧板坯进行了热模拟实验研究, 探讨变形工艺参数对该钢种铁素体轧制时再结晶的影响规律。

1 动态再结晶临界应变模型

采用目前应用最广泛的 Sellars 模型结构^[4], 即:

$$\epsilon_c = (0.6 \sim 0.85)\epsilon_p \quad (1)$$

$$\epsilon_p = a_1 \times d_0^{a_2} \times Z^{a_3} \quad (2)$$

式中: ϵ_c -临界应变; ϵ_p -峰值应变; d_0 -原始晶粒尺寸; a_1, a_2, a_3 -模型系数, 取决于不同的钢种, 通过实验确定。Z 为 Zener-Holloman 参数, 它反映了

温度和变形速度对变形的影响, 用下式表示^[5]。

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_{\text{rec}}}{RT}\right) \quad (3)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ -应变速率; Q_{rec} -变形激活能/kJ·mol⁻¹; R-气体常数, 取 8.318 J/(mol·K); T-绝对温度/K。

目前还没有简单易行的方法来确定临界应变和峰值应变之间的关系, 可用的方法之一是通过加工硬化率和应变的关系来确定临界应变和峰值应变之间的系数^[6]。根据文献[7], 本研究取峰值应变的 80% 为临界应变。因此只要确定出峰值应变, 临界应变也就确定了。

2 实验材料和实验方法

实验用 32 mm Ti-IF 钢板取自热连轧粗轧出口

处,实验材料化学成分(%)为:0.0067C,0.12Mn,0.018Si,0.011S,0.011P,0.045Ti, < 0.005Nb。

将所取钢板加工成 $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱压缩试样,试样两端刻槽加入润滑剂以消除摩擦的影响。试样在 Thermecmaster-Z 热模拟实验机上进行单道次压缩实验。变形温度为 750, 800, 850, 900 $^{\circ}\text{C}$;变形速率为 0.1, 1, 10, 40 s^{-1} 。

3 实验结果及分析

由实验结果图 1(a)(b)(c)可以看出,变形温

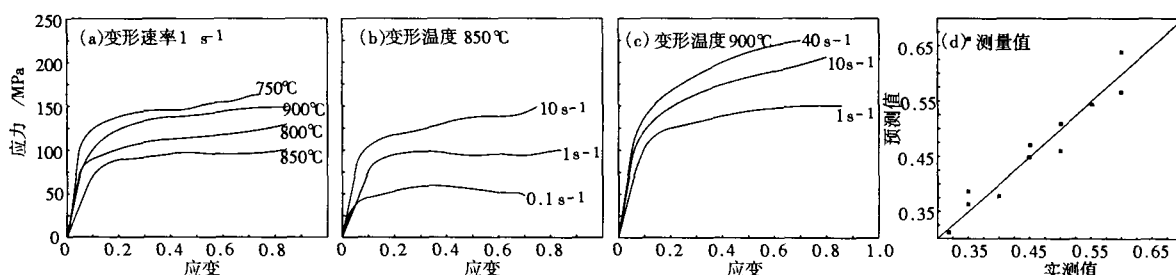


图 1 (a)(b)(c)Ti-IF 钢实验应力-应变曲线;(d)临界应变实测值与预测值比较

Fig. 1 (a) (b) (c) Stress-strain curves of test Ti-IF steel; (d) comparison of prediction values and measured values for critical strain

4 临界应变模型的建立

4.1 Zener-Holloman 方程的确定

对实验数据进行处理,首先求出该实验钢种的动态软化过程激活能为 $Q_{\text{rec}} = 328.304 \text{ kJ/mol}$ 。然后求出 Zener-Holloman 参数方程为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{39\,507}{T}\right) \quad (4)$$

4.2 临界应变方程的确定

用实验数据对方程(2)进行非线性回归,得到峰值应变方程(5):

$$\epsilon_p = 2.893 \times 10^{-3} \times d_0^{0.8039} \times Z^{0.050} \quad (5)$$

回归相关系数为 0.953 2。

将式(5)代入式(1),得到临界应变方程:

$$\epsilon_c = 2.3144 \times 10^{-3} \times d_0^{0.8039} \times Z^{0.050} \quad (6)$$

图 1(d)给出了模型计算结果和临界应变实测值之间的比较,平均误差在 5% 以内。

5 结论

(1) 在相同的变形速率下,变形温度为 850 $^{\circ}\text{C}$ 时动态再结晶最容易发生。

度和变形速率对 Ti-IF 钢的动态再结晶有较大的影响。当变形速率较低时,动态再结晶才能发生。相同的变形速率下,当温度较低时,发生了动态再结晶,而当温度较高时(900 $^{\circ}\text{C}$),即使变形速率很低,也没有发生动态再结晶。这点与奥氏体区变形时,温度增大,动态再结晶越容易发生是不同的。这可能是由于两相区内变形时,奥氏体和铁素体两相的不均匀变形增大了金属内部畸变能,为动态再结晶的出现提供了能量。

(2) 当变形速率大于 10 s^{-1} 时, Ti-IF 钢热加工时不能出现动态再结晶。

(3) 给出了 Ti-IF 钢低温变形时的临界应变模型,该模型的平均误差小于 5%。

参考文献

- 1 Barnett M R and Jonas J J. Distinctive Aspects of the Physical Metallurgy of Warm Rolling, ISIJ International, 1999, 39(9): 856
- 2 赵昆,何晓明,吴景辉,等.铁素体轧制力模型的改进.轧钢, 2000, 17(2): 8
- 3 Neutjens J, De Ball J B, Harlet Ph, et al. The Use of Ferritic Rolling for the Production of Soft Steel Grades and Tin Plate Can Body Applications, 41st Mwsp Conf. Proc., ISS, Vol. XXXV II, 1999, 963
- 4 Devadas C, Samarasekera I V and Hawbolt E B. The Thermal and Metallurgy State of Steel Strip during Hot Rolling: Part 3. Microstructure Evolution., Metallurgical Transaction A, 1991, 22A: 335
- 5 Zener C and Hollomon J H. Effect of Strain Rate Upon Plastic Flow of Steel, Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22
- 6 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
- 7 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

徐光(1961-),男,教授,1982年北京科技大学毕业,从事金属材料组织、性能和工艺研究。