

BH08G 焊接用钢的热变形行为及动力学再结晶模型

魏立群

(上海应用技术学院材料工程系, 上海 200235)

摘要 用 Gleeble-1500 热模拟试验机研究了成分 (%) 为 0.08C、1.59Mn、0.34Mo、0.12Ti 的 BH08G 焊接用钢在 950 ~ 1050 °C、变形速率 $\dot{\epsilon}$ 为 0.1 ~ 10.0 s⁻¹ 时的热变形行为。通过奥氏体再结晶动力学回归计算得出: BH08G 钢的 Zener-Hollomon 参数 Z 与峰值应力的关系式为 $Z = 3.829 \times 10^{12} \exp(0.04646 \sigma_m)$; 峰值应力 σ_m 、动态再结晶临界应变 ϵ_c 、峰值应变 ϵ_m 、动态再结晶完成应变 ϵ_f 与 $\ln Z$ 的关系为: $\sigma_m = 21.338 \ln Z - 516.49$, $\epsilon_c \approx 0.83 \epsilon_m = 0.0326 \ln Z - 0.732$, $\epsilon_f = 0.0522 \ln Z - 0.9801$ 。通过 BH08G 钢动态再结晶状态图得出, BH08G 钢粗轧温度为 980 ~ 1050 °C、精轧温度为 930 ~ 980 °C, 有利于变形晶粒细化, 改善材料的力学性能。

关键词 BH08G 焊接用钢 热变形行为 动力学再结晶模型

Thermal Deformation Behavior and Dynamic Recrystallization Model of BH08G Welded Steel

Wei Liqun

(Department of Materials and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235)

Abstract The thermal deformation behavior of BH08G welded steel-0.08C, 1.59Mn, 0.34Mo, 0.12Ti with strain rate $\dot{\epsilon}$ 0.1 ~ 10.0 s⁻¹ at 950 ~ 1050 °C has been studied by Gleeble-1500 thermal simulation machine. It is obtained by regression calculation of austenite recrystallization dynamics that relation between Zener-Hollomon parameter Z and peak stress σ_m is $Z = 3.829 \times 10^{12} \exp(0.04646 \sigma_m)$, and relation of $\ln Z$ with peak stress σ_m , dynamic recrystallization critical strain ϵ_c , peak strain ϵ_m , and dynamic recrystallization finishing strain ϵ_f is respectively $\sigma_m = 21.338 \ln Z - 516.49$, $\epsilon_c \approx 0.83 \epsilon_m = 0.0326 \ln Z - 0.732$, and $\epsilon_f = 0.0522 \ln Z - 0.9801$. The dynamic recrystallization state diagram of BH08G steel shows that with rough rolling at 980 ~ 1050 °C and finishing rolling at 930 ~ 980 °C it is available to fine deformed grain and improve mechanical properties of material.

Material Index BH08G Welded Steel, Thermal Deformation Behavior, Dynamic Recrystallization Model

研究 BH08G 钢在不同形变条件下的热变形行为及其动态再结晶过程的各种动力学参数, 能为数值模拟提供依据, 同时可以提供合理的热塑性成形工艺, 改进材料的微观结构, 提高产品力学性能。

1 BH08G 钢热变形行为试验方法

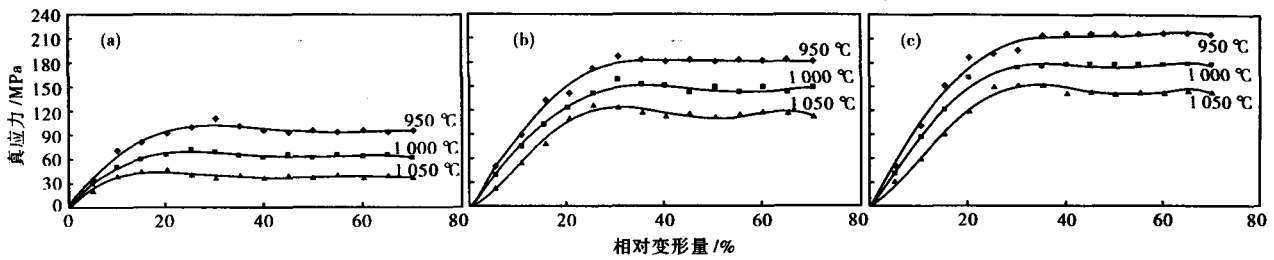
热压缩试验钢 BH08G 试样取自宝钢高线的退火态线材, 成分 (%) 为: 0.08C、0.26Si、1.59Mn、0.34Mo、0.12Ti、0.011P、0.025S。试样直径 10 mm, 长度 12 mm, 在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行等温压缩变形。BH08G 钢试验的应变速率 $\dot{\epsilon}$ 分别为 0.1、5.0、10.0 s⁻¹, 形变温度 T 分别为 950、1000、1050 °C, 最大相对应应变为 70%。试样以 10 °C/s 的加热速率加热至 1200 °C, 保温 5 min, 然后以 5 °C/s 的速率降温至形变温度, 保温 15 s 以消除试样内部温度梯度, 最后在形变温度下等温变形。所有试样在变形结束后迅速淬火, 在变形过程中, 用石墨片润滑以减小压头与试样之间的摩擦作用。

2 试验结果与讨论

2.1 形变温度及应变速率对流变应力的影响

BH08G 焊接用钢在不同变形温度 T 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 下的高温应力-应变曲线见图 1, 当应变速率 $\dot{\epsilon}$ 较低 ($\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$) 时, σ - ϵ 曲线均出现峰值 (图 1a), 属动态再结晶型; 而当应变速率 $\dot{\epsilon}$ 达到 5.0 s⁻¹ (图 1b) 时, 只在变形温度 $T \geq 1000$ °C 时, 材料才在变形时发生动态再结晶, 变形温度 $T \leq 950$ °C 时, σ - ϵ 曲线不出现峰值, 材料在变形过程中只发生动态回复, 而不发生动态再结晶; 当应变速率 $\dot{\epsilon}$ 升高到 10.0 s⁻¹ 时, 即使变形温度 T 升高到 950 °C, σ - ϵ 曲线亦不出现峰值 (见图 1c), 仍属动态回复型。

这一结果表明, 应变速率 $\dot{\epsilon}$ 较低时, 材料中的储存能较高, 从而有利于材料在热变形过程中发生动态再结晶, 且随变形温度的升高, 峰值应力下降 (图 1), 即变形温度愈高, 愈有利于动态再结晶。在生产中, 通过升高温度并降低应变速率 $\dot{\epsilon}$, 可使材料迅

图 1 BH08G 钢的应力-应变曲线: 变形速率 0.1 s^{-1} (a); 5.0 s^{-1} (b); 10.0 s^{-1} (c)Fig. 1 Stress - strain curves of BH08G steel: strain rate 0.1 s^{-1} (a); 5.0 s^{-1} (b) and 10.0 s^{-1} (c)

速达到动态再结晶状态,从而有利于变形金属的晶粒细化。由图 1(b)、(c)可见,当 $T \leq 950 \text{ }^\circ\text{C}$,且应变速率 $\dot{\varepsilon} > 5.0 \text{ s}^{-1}$ 时,曲线为典型的加工硬化和动态回复基本平衡类型。

2.2 BH08G 焊接用钢形变激活能及峰值应力

在热变形过程中高温屈服应力决定于变形温度 T 和应变速率 $\dot{\varepsilon}$,可用如下蠕变方程表示^[1-3]:

$$Z = \dot{\varepsilon} e^{Q/RT} = f(\sigma) \quad (1)$$

式中: Z - Zener-Hollomon 参数(温度补偿的应变速率因子); Q - 形变激活能,反映材料热变形的动态再结晶难易程度; T - 变形温度/K; R - 气体常数; $f(\sigma)$ - 应力函数; $\dot{\varepsilon}$ - 应变速率/ s 。

当变形温度 T 愈低、应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 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。分析表明,峰值应力 σ_m 、稳态应力 σ_s 和任意应变时刻对应的流变应力都符合式(1), $f(\sigma)$ 有 2 种表示形式:

$$f_1(\sigma) = A_1 e^{A_2 \sigma} \quad (2)$$

$$f(\sigma) = B \sigma^n \quad (3)$$

式中: A_1 、 A_2 、 B - 均为常数; n - 应力指数。

一般认为,式(2)适用于应力较高的热变形,式(3)适用于应力较低的热变形,两式如应用于不合适的应力条件,则会造成较大误差。对于宝钢高线的轧制条件的热变形工艺状况,用式(2)计算 BH08G 焊接用钢形变激活能是比较适合的。

式(2)中一般认为是稳态应力 σ_s ,但由于 σ_s 的精度受测量精度的影响较大,故一般用峰值应力 σ_m 代替 σ_s 。所以 Z 因子与峰值应力 σ_m 的关系可以表示为:

$$Z = A_1 \exp(A_2 \sigma_m) \quad (4)$$

由(1)式和(4)式取对数整理后得:

$$\ln(\dot{\varepsilon}) = A_2 \sigma_m - Q/RT + \ln(A_1) \quad (5)$$

由 BH08G 焊接用钢的高温应力-应变曲线上采集 $\dot{\varepsilon}$ 、 T 、 σ_m 值,对(5)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 BH08G 焊接用钢动态再结晶的形变激活能 $Q = 353.96 \text{ kJ/mol}$,而 $A_1 = 3.829 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$, $A_2 = 0.04646 \text{ MPa}^{-1}$ 。所以:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{353.96 \times 10^3}{8.31 T}\right) = 3.829 \times 10^{12} \exp(0.04646 \sigma_m) \quad (6)$$

在本试验的研究条件下, BH08G 焊接用钢的 $Z = 9.60 \times 10^{12} \sim 1.34 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$ 。

2.3 BH08G 焊接用钢峰值应力 σ_m 、应变 ε_m 、动态再结晶临界应变 ε_c 和完成应变 ε_s 与 $\ln Z$ 的关系

为了进一步确定变形参数与 Z 因子的关系,建立峰值应力 σ_m 、应变 ε_m 、动态再结晶临界应变 ε_c 与 Z 因子的关系^[4-6],便于轧制生产中对 BH08G 焊接用钢的动态再结晶进行有效的控制。根据应变 ε_m 与 Z 因子的试验关系曲线(如图 2a 所示)和峰值应力 σ_m 与 Z 因子的试验关系曲线(如图 2b 所示),回归出它们之间的关系:

$$\varepsilon_m = 0.0393 \ln(Z) - 0.8823 \text{ (相关系数 } R = 0.927) \quad (7)$$

$$\varepsilon_c \approx 0.83 \varepsilon_m = 0.0326 \ln(Z) - 0.732 \quad (8)$$

$$\sigma_m = 21.338 \ln(Z) - 516.49 \text{ (相关系数 } R = 0.991) \quad (9)$$

根据动态再结晶完成应变 ε_s 与 Z 因子的实验关系曲线(如图 2c 所示),回归出它们之间的关系:

$$\varepsilon_s = 0.0522 \ln(Z) - 0.9801 \text{ (相关系数 } R = 0.933) \quad (10)$$

从图 2(a)、(b)、(c)看出, σ_m 、 ε_m 、 ε_c 、 ε_s 与 $\ln Z$ 基本上线性关系,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 ε_c 和动态再结晶的完成

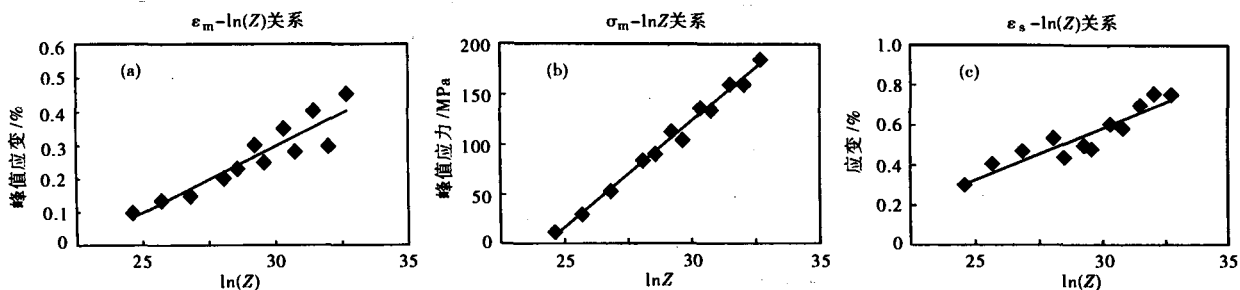


图 2 峰值应变 ϵ_m (a)、峰值应力 σ_m (b)、动态再结晶完成应变 ϵ_s (c) 与 $\ln(Z)$ 的关系

Fig. 2 Relation of $\ln(Z)$ with peak strain ϵ_m (a), peak stress σ_m (b) and dynamic recrystallization finishing strain ϵ_s (c)

应变变量 ϵ_s 也逐渐减小,即容易发生和完成动态再结晶。

2.4 BH08G 钢的动态再结晶状态图

根据前面的试验回归建立的 BH08G 钢动态再结晶开始的临界应变 ϵ_c 、动态再结晶的完成应变 ϵ_s 与 Z 因子的关系,可以建立 BH08G 钢动态再结晶状态图(见图 3)。

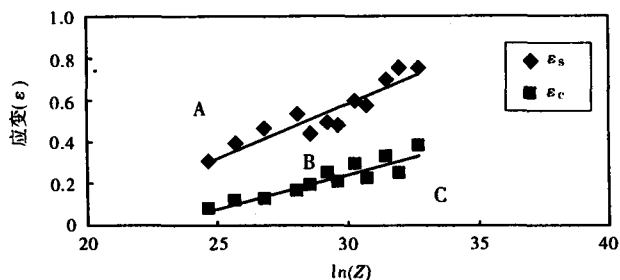


图 3 BH08G 钢的动态再结晶状态图

Fig. 3 Dynamic recrystallization state diagram of BH08G steel

由图 3 可见,随着 Z 因子的降低,发生动态再结晶的临界应变降低。图中 A 区为完全动态再结晶区;B 区为部分动态再结晶区;C 区为未发生动态再结晶区,即加工硬化区。通过应变速率和变形温度对变形机制产生影响的分析,升高变形温度和降低应变速率均有利于变形过程中发生动态再结晶,从而有利于变形晶粒的细化,改善材料的机械性能。

3 结论

(1) BH08G 焊接用钢的动态再结晶的激活能 $Q = 353.96 \text{ kJ/mol}$, 其热变形方程式为: $Z = \epsilon \exp\left(\frac{353.96 \times 10^3}{8.31 T}\right) = 3.829 \times 10^{12} \exp(0.04646\sigma_m)$ 。

(2) 在本试验给定的热变形条件下, BH08G 焊接用钢的峰值应力 σ_m 、动态再结晶临界应变 ϵ_c 、动

态再结晶完成应变 ϵ_s 与 $\ln Z$ 的关系为:

$$\sigma_m = 21.338 \ln(Z) - 516.49$$

$$\epsilon_c \approx 0.83 \epsilon_m = 0.0326 \ln(Z) - 0.732$$

$$\epsilon_s = 0.0522 \ln(Z) - 0.9801$$

(3) 在宝钢高线的实际生产中, BH08G 焊接用钢材轧制时的粗轧变形温度为 $980 \sim 1050 \text{ }^\circ\text{C}$, 应变速率 $\leq 10.0 \text{ s}^{-1}$, 道次变形量 $\geq 30\%$, 因此, BH08G 焊接用钢在上述工艺条件下, 可发生和完成动态再结晶。而预精轧和精轧变形温度为 $930 \sim 980 \text{ }^\circ\text{C}$, 尽管应变速率 $> 10.0 \text{ s}^{-1}$, 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, 获得较大的累积形变储能而引发动态再结晶, 从而有利于变形晶粒的细化, 改善材料的机械性能。

上海市重点建设基金资助项目(编号: P1502)

参考文献

- 1 魏立群. B30MnSi 钢的动态再结晶行为. 特殊钢, 2005, 26(4): 13
- 2 Pauskar P, Shivpuri R. Microstructure and Mechanics Interaction in the Modeling of Hot Rolling of Rods. Annals of the CIRP, 1999, 48(1): 191
- 3 张斌, 张鸿冰. 20CrMnTi 结构钢热变形行为及数学模型. 上海交通大学学报, 2003, 37(12): 1826
- 4 冯贺滨, 李连诗, 李明哲, 等. 控轧控冷生产中高碳钢线材组织和性能的预测模型. 钢铁研究学报, 2000, 12(5): 22
- 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, 1988 年上海工业大学毕业, 轧制工艺和金属变形过程组织与性能控制。

收稿日期: 2006-08-07