

· 组织和性能 ·

Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢高温变形奥氏体的动态再结晶

张春玲 孙睿璇 蔡大勇 廖波

(燕山大学亚稳材料制备技术与科学重点实验室, 秦皇岛 066004)

摘要 用 Gleeble-3500 热模拟试验机研究了 Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢 (% : 0.10C, 0.075P, 0.65Cr, 0.22Ni, 0.43Mo, 0.28Cu) 在应变速率 $0.01 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 、温度 $850 \sim 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的动态再结晶行为, 得出该钢奥氏体区的真应力-真应变曲线和动态再结晶图, 分析了变形参数对峰值应力的影响和不同热变形时耐候钢的动态再结晶体积分数与真应变的关系, 建立了该钢的奥氏体热变形方程、动态再结晶临界条件回归方程和奥氏体动态再结晶体积分数数学模型。结果表明, 随变形温度升高, 峰值应力下降; 随变形速率增大, 峰值应力升高; 随 Z 参数增大即变形温度降低, 应变速率增加, 发生再结晶的临界应变 ε_c 和发生完全再结晶的应变 ε_s 均呈线性增加。

关键词 Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢 高温变形奥氏体 动态再结晶

Dynamic Recrystallization of Elevated Temperature Deforming Austenite of Cu-P-Cr-Ni-Mo Weathering Steel

Zhang Chunling, Sun Ruixuan, Cai Dayong and Liao Bo

(Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract The dynamic recrystallization behavior of Cu-P-Cr-Ni-Mo weathering steel (% : 0.10C, 0.075P, 0.65Cr, 0.22Ni, 0.43Mo, 0.28Cu) with strain rate $0.01 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ at $850 \sim 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ has been studied by Gleeble-3500 thermal simulation test machine to get true strain-true stress curves in austenite area and dynamic recrystallization diagram of the steel, the effect of deformation parameters on peak stress and the relation between true strain and volume fraction of dynamic recrystallization of the weathering steel with various hot deformation are analyzed, and the thermal deformation formula of austenite of the steel, the regression formula of dynamic recrystallization at critical conditions and the math model of dynamic recrystallization volume fraction of austenite are established. Results show that with raising deformation temperature the peak stress decreases and with increasing strain rate the peak stress increases; with increasing Z parameter i. e. decreasing deformation temperature and increasing strain rate the critical strain ε_c of occurred recrystallization and the strain ε_s of occurred complete recrystallization increase linearly.

Material Index Cu-P-Cr-Ni-Mo Weathering Steel, Elevated Temperature Deforming Austenite, Dynamic Recrystallization

Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢是在 09CuPCrNi 基础上开发的一种新型耐候钢, 可进行热轧双相化, 使其兼有耐候钢优良的耐大气腐蚀性能和双相钢优良的成形性能。本文采用 Gleeble-3500 热加工模拟试验机对 Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢高温流变行为进行了研究, 为热轧 Cu-P-Cr-Ni-Mo 双相耐候钢控轧控冷工艺的制定奠定理论基础。

1 试验材料及方法

Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢的化学成分 (%) 为: 0.10C、0.42Mn、0.45Si、0.075P、0.008S、0.65Cr、0.22Ni、0.28Cu、0.43Mo。热变形试样直径 8 mm、长 15 mm, 圆柱试样在 Gleeble-3500 热加工模拟试验机上进行等温压缩变形, 应变速率分别为 0.01 、 0.05 、 0.1 、 1 s^{-1} , 变形温度 $850 \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$, 最大真应变为 0.7。试样以 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ 的速度加热到 $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温 5 min, 再以 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ 的速度冷却到变形温度, 保

温 2 min 以消除试样内部的温度梯度, 最后在变形温度下等温变形。试样变形结束后迅速喷水冷却, 冻结高温变形后的组织。

2 试验结果与分析

2.1 压缩试验结果

Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢在变形温度 $850 \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率 $0.01 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 条件下压缩试验的真应力-真应变 (σ - ε) 曲线如图 1 所示。Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢的 σ - ε 曲线可分为两种类型, 一种是动态再结晶型: 应力达到峰值应力 (σ_p) 后下降至稳定应力 σ_s , 且峰值应力随变形温度的降低和应变速率的升高而升高。一种是动态回复型, 具有动态回复机制的流变应力曲线可分为两种情况: (1) 当加工硬化和动态回复基本达到平衡时应力趋向恒定值; (2) 动态回复发生后, 仍有加工硬化, 应力-应变曲线的最后阶段仍呈上升趋势。

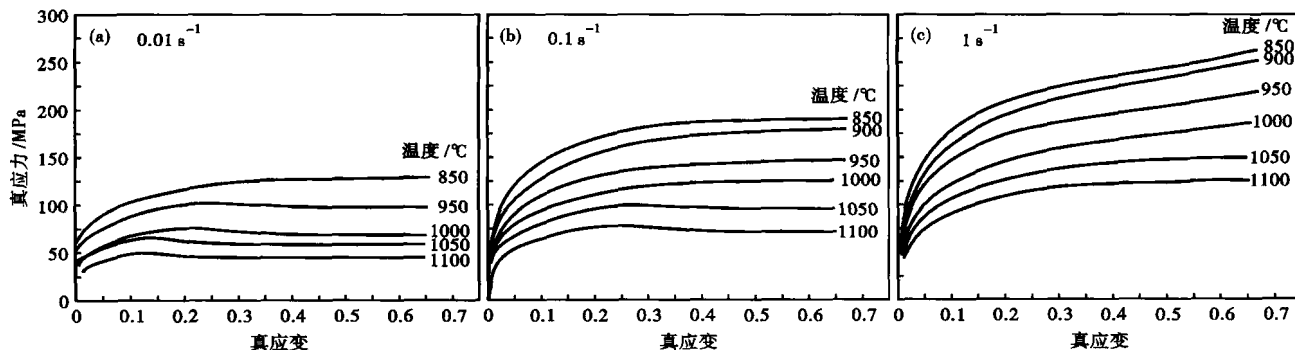


图 1 Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢奥氏体区的真应力-真应变曲线:应变速率/ s^{-1} : (a) 0.01; (b) 0.1; (c) 1

Fig.1 True stress-strue train curves of Cu-P-Cr-Ni-Mo weathering steel in austenite region, strain rate / s^{-1} : (a) 0.01; (b) 0.1; (c) 1

从 Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢的真应力-真应变曲线可以看出,当其他变形条件相同,而变形温度(T)不同时,随着变形温度的升高,应力峰值向左偏移,再结晶进程随之加快;当其他变形条件相同而应变速率不同时,随着应变速率的降低,再结晶进程随之加快。峰值应力 σ_p 、峰值应力相应的应变 ϵ_p 以及稳定应力 σ_s 、起始点所对应的应变 ϵ_s ,均随变形温度的降低和应变速率的升高而增加。

图 2 给出了变形温度和应变速率对峰值应力的影响。由图 2 可见,随变形温度升高,峰值应力下降;应变速率增大则使峰值应力升高。

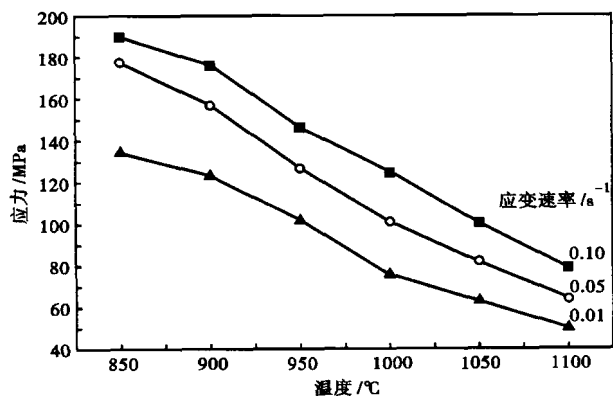


图 2 应变速率和温度对 Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢峰值应力的影响

Fig.2 Effect of strain rate and temperature on peak stress of Cu-P-Cr-Ni-Mo weathering steel

2.2 热变形方程

Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢的变形温度及应变速率对峰值应力的影响可用 Arrhenius 方程表示^[1-4],根据试验数据,作线性回归分析,可得:激活能 $Q = 249.3 \text{ kJ/mol}$,应力指数 $n = 4.608$,决定于材料的常数 $A = 4.915 \times 10^{10}$,同时常数 $\alpha = 0.005$,得出 Cu-P-

Cr-Ni-Mo 耐候钢的热变形方程为:

$$\dot{\epsilon} = 4.915 \times 10^{10} [\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)]^{4.608} \exp\left(-\frac{249300}{RT}\right) \quad (1)$$

2.3 发生动态再结晶的边界条件

金属材料在热变形过程中能否发生动态再结晶取决于变形温度(T)和应变速率($\dot{\epsilon}$)。变形温度越高,应变速率越低,动态再结晶越容易发生。在热变形过程中,变形温度 T 、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 与 Z 参数(Zener-Hollomon 因子)的关系式如下:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中: Z -带有温度补偿的应变速率参数; Q -扩散激活能,对于 Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢而言, $Q = 249300 \text{ J/mol}$; R -气体常数; T -绝对温度。

Z 参数被广泛用以表示变形温度及应变速率对热变形过程的综合作用。根据已求得的热变形激活能 Q ,可以计算出 Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢热变形的 Z 参数。

热变形峰值应力 σ_p 、发生动态再结晶的临界变形量 ϵ_c 、发生完全动态再结晶的临界变形量 ϵ_s 、动态再结晶体积分数 X_d 、动态再结晶晶粒尺寸以及真应力-真应变曲线形状与 Z 参数密切相关。

一般认为,发生动态再结晶的临界应变 ϵ_c 与峰值应力所对应的峰值应变 ϵ_p 存在一定的比例关系^[5,6],即 ϵ_c 约为 ϵ_p 的 0.833 倍。发生完全动态再结晶的临界变形量为稳定应力开始点对应的应变 ϵ_s 。

根据本试验的真应力-真应变曲线,Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢热临界应变 ϵ_c 与 Z 参数的关系如图 3 所示。 $\ln Z$ 与临界应变 ϵ_c 和稳态流变应变 ϵ_s 值均呈线性关系。

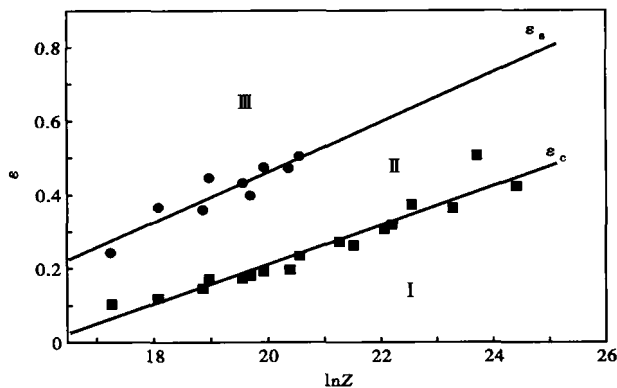


图3 Cu-P-Cr-Ni-Mo 耐候钢的动态再结晶图

Fig.3 Dynamic recrystallization of Cu-P-Cr-Ni-Mo weathering steel

通过回归分析求得如下关系式:

$$Z = 1.36 \times 10^7 \exp(17.29\epsilon_c) \quad (3)$$

$$Z = 1.39 \times 10^6 \exp(12.39\epsilon_s) \quad (4)$$

图3即为Cu-P-Cr-Ni-Mo耐候钢的动态再结晶图。图3中I、II、III区分别为未再结晶区、部分再结晶区和完全再结晶区。随着Z参数的增大,即变形温度的降低、应变速率的增加,发生再结晶的临界应变 ϵ_c 和发生完全再结晶的应变 ϵ_s 均呈线性增加。

2.4 动态再结晶行为

在一定变形条件下金属发生动态再结晶的程度可用动态再结晶体积分数 X_d 表示。根据文献[7] X_d 可用真应力-真应变曲线法来确定。根据本试验获得的真应力-真应变曲线,得到的动态再结晶体积分数 X_d 与变形条件的关系如图4所示。

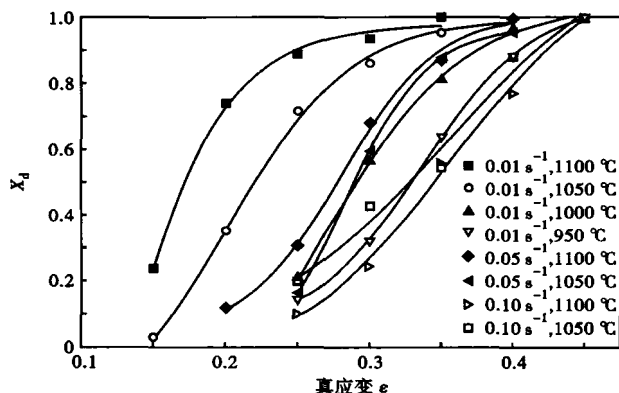


图4 不同热变形条件Cu-P-Cr-Ni-Mo耐候钢动态再结晶体积分数与真应变的关系

Fig.4 Relation between true strain and volume fraction of dynamic recrystallization in Cu-P-Cr-Ni-Mo weathering steel with different thermal deforming conditions

根据真应力-真应变曲线,可采用以下方程式来表示动态再结晶的体积分数与变形条件的关系^[7,8]:
$$X_d = 1 - \exp\left[-k\left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_p}\right)^m\right] \quad (5)$$

式中: X_d -动态再结晶的体积分数; ϵ_c -动态再结晶的临界应变; ϵ_p -动态再结晶的峰值应力对应的应变; ϵ -应变; k 、 m -取决于变形材料的常数。

根据本试验数据,得到的常数值为 $m = 1.66$, $k = 3.55$ 。所以,Cu-P-Cr-Ni-Mo耐候钢的动态再结晶体积分数与变形条件的关系为:

$$X_d = 1 - \exp[-3.55(\epsilon/\epsilon_p - 0.833)^{1.66}] \quad (6)$$

$$\epsilon_p = (\ln Z - 16.43)/14.85 \quad (7)$$

3 结论

在变形温度850~1150℃和应变速率0.01~1s⁻¹的条件下,研究了Cu-P-Cr-Ni-Mo耐候钢的高温热变形行为,所得结果如下:

(1)建立了Cu-P-Cr-Ni-Mo耐候钢的热变形方程,其热变形激活能为249.3kJ/mol。

(2)确定了Cu-P-Cr-Ni-Mo耐候钢发生动态再结晶以及完全再结晶的条件。

(3)建立了Cu-P-Cr-Ni-Mo耐候钢动态再结晶的数学模型。

河北省自然科学基金-钢铁联合研究基金资助项目(E2008000843)

参考文献

- 1 雍歧龙,马鸣图,吴宝裕.微合金钢-物理和力学冶金.北京:机械工业出版社,1989
- 2 Laasroui A, Jonas J J. Prediction of Flow Stress at High Temperature and Strain Rates. Metall. Trans. A, 1991, 22(5):1545
- 3 毛为民,赵新兵.金属的再结晶与晶粒长大.北京:冶金工业出版社,1994
- 4 刘振宇,王国栋,张强. C-Mn 钢板带热连轧生产过程中再结晶行为的模拟计算. 钢铁研究学报, 1995, 7(6):27
- 5 Sellars C M. Hot Rolling and Forming Processes. London: The Metals Society, 1980:2
- 6 Laasroui A, Jonas J J. Recrystallization of Austenite After Deformation at High Temperature and Strain Rates-Analysis and Modeling. Metall. Trans. A, 1991, 22(1):151
- 7 苏连锋,王昭东,刘相华.一种高强度合金钢的高温流变和软化行为.黄金学报,2001,3(3):171
- 8 Cho S H, Kang K B, Jonas J J. The Dynamic, Static and Metadynamic Recrystallization of Nb-microalloyed Steel. ISIJ International, 2001, 41(1):63

张春玲(1972-),女,副教授,燕山大学毕业,耐候钢研究。

收稿日期:2010-02-08