

· 组织和性能 ·

非调质钢 38MnVS 奥氏体动态再结晶的研究

刘攀^{1,3} 刘荣佩¹ 魏元生² 惠卫军³ 雍岐龙³ 包耀宗³

(1 昆明理工大学材料科学与工程学院,昆明 650093; 2 长城汽车股份有限公司,保定 071000; 3 钢铁研究总院,北京 100081)

摘要 研究了 V-Ti 微合金非调质钢 38MnVS(/% :0.42C、0.76Si、1.33Mn、0.011S、0.013P、0.10V、0.02Ti) 的奥氏体动态再结晶过程。通过 Gleeble-3800 热模拟试验机,研究了变形温度(950 ~ 1150 ℃)和变形速率(0.1 ~ 10 s⁻¹)对 38MnVS 钢奥氏体动态再结晶过程的影响,并建立了 Zener-Hollomon 参数为变量的方程、动态再结晶尺寸模型和动态再结晶状态图。结果表明,变形温度越高,变形速率越低,发生动态再结晶的临界驱动力越小,动态再结晶越易进行;微合金非调质钢 38MnVS 动态再结晶激活能为 $Q_d = 275.453$ kJ/mol。

关键词 非调质钢 38MnVS 奥氏体 动态再结晶 激活能

A Study on Austenite Dynamic Recrystallization of Non-Quenching-Tempering Steel 38MnVS

Liu Pan^{1,3}, Liu Rongpei¹, Wei Yuansheng², Hui Weijun³, Yong Qilong³ and Bao Yaozong³

(1 Institute of Material Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 Great Wall Motors Co Ltd, Baoding 071000; 3 Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The austenite dynamic recrystallization process of V-Ti microalloying non-quenching-tempering steel 38MnVS (/% : 0.42C, 0.76Si, 1.33Mn, 0.011S, 0.013P, 0.10V, 0.02Ti) has been studied. The effect of deformation temperature (950 ~ 1150 ℃) and strain rate (0.1 ~ 10 s⁻¹) on austenite dynamic recrystallization of steel 38MnVS is studied by Gleeble-3800 thermal simulation test machine, and the function related Zener-Hollomon parameter, dynamic recrystallization size model and dynamic recrystallization diagram are established. Results show that the higher deformation temperature and the lower strain rate, the smaller critical driving force to occur dynamic crystallization and the easier to carry out dynamic recrystallization; the activation energy Q_d for dynamic crystallization of microalloying non-quenching-tempering steel 38MnVS is 275.453 kJ/mol.

Material Index Non-Quenching-Tempering Steel 38MnVS, Austenite, Dynamic Recrystallization, Activation Energy

钢在热塑性成型过程中奥氏体晶粒会发生动态回复和动态再结晶^[1],尤其是动态再结晶因对热加工零件的晶粒尺寸有着显著影响而备受关注,通过控制奥氏体晶粒尺寸既可以提高零件的强度,也可以改善零件的韧性。本研究采用宣化钢铁集团有限责任公司生产的非调质钢 38MnVS 模拟锻造过程中奥氏体动态再结晶现象,为制定合理锻造工艺提供可靠参数。

1 实验材料和方法

实验采用宣化钢铁集团有限责任公司生产的非调质钢 38MnVS(表 1),在直径为 Φ85 mm 的热轧态棒材的 1/2 半径处掏取 Φ8 mm × 15 mm 的热模拟试样,采用 Gleeble-3800 型热模拟试验机对试验钢进行单道次等温压缩实验:以 10 ℃/s 的加热速度升温到 1200 ℃ 保温 60 s,然后以 10 ℃/s 的冷却速度分别降至预设的变形温度(1150 ~ 950 ℃)保温 30 s,然后进行单道次压缩,变形量为 60%,变形速率分别为 0.1、1、10 s⁻¹,变形后立即空冷至室温。

表 1 实验用非调质钢 38MnVS 的化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of test non-quenching-tempering steel 38MnVS /%

C	Si	Mn	S	P	V	Cr	Ni	Ti
0.42	0.76	1.33	0.011	0.013	0.10	0.13	0.02	0.02

2 实验结果及分析

2.1 应力-应变曲线

试样在不同变形温度和速率下的真应力-真应变曲线如图 1。由图 1 可见,应变速率相同,真应力随温度的增加显著下降;在同一温度下应变,应变速率越高,流变应力越大,且流变应力的增加率随温度而变化,温度越低,增加率越高,温度越高,增加率越低。变形温度越高,变形速率越低,发生动态再结晶的临界驱动力越小,动态再结晶越易进行。

2.2 动态再结晶激活能计算

变形温度和变形速率通过 Zener-Hollomon 变形参数来影响组织演变,且对动态再结晶模型产生影响,因此动态再结晶激活能的精确确定对组织演化

模型以及随后的一系列模拟都有重要的意义。为探索变形温度、变形速率对动态再结晶的影响,引入 Zener-Hollomon 变形因子来修正变形温度对变形速率的影响^[2-4]: $Z = \dot{\epsilon} \exp \frac{Q_d}{RT}$ (1)

式中: Z - Zener-Hollomon 参数,其物理意义是有温度补偿的应变速率因子/ s^{-1} ; $\dot{\epsilon}$ - 变形速率/ s^{-1} ; Q_d - 动态再结晶激活能/ $(J \cdot mol^{-1})$; R - 气体常数,通常取 $8.314 J/(mol \cdot K)$; T - 绝对温度/ K 。

另一方面,分析表明,不仅峰值应力 σ_p 和稳定应力 σ_s ,而且任意应变时对应的应力都符合下式,即变形因子 Z 与峰值应力 σ_p 存在幂函数关系:

$$Z = A_1 \sigma^n = A_2 \exp(\beta_2 \sigma_p) = A_3 \exp(\beta_3 \sigma_s) \quad (2)$$

式中: A_1, A_2, A_3 - 常数; n - 应力指数。

$$\text{因此有: } Z = \dot{\epsilon} \exp \frac{Q_d}{RT} = A \exp(\beta \sigma_p) \quad (3)$$

在温度恒定的情况下,对上式两边取自然对数,

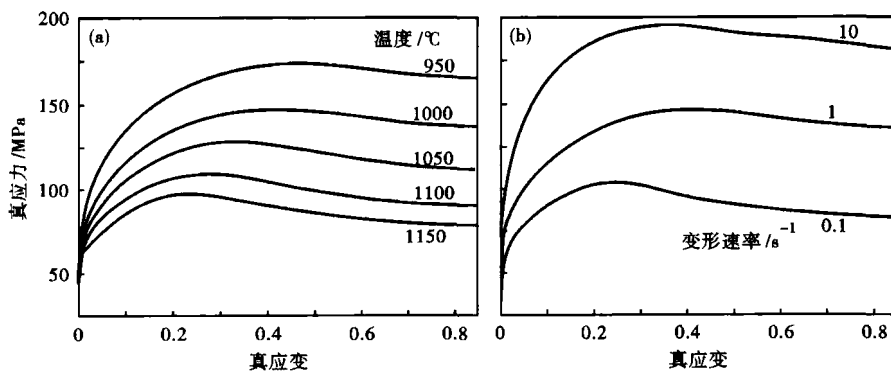


图 1 38MnVS 钢的真应力-真应变曲线:(a)应变速率 $1 s^{-1}$; (b)变形温度 $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$
Fig. 1 True stress-true strain curves of steel 38MnVS: (a) strain rate $1 s^{-1}$; (b) deformation temperature $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$

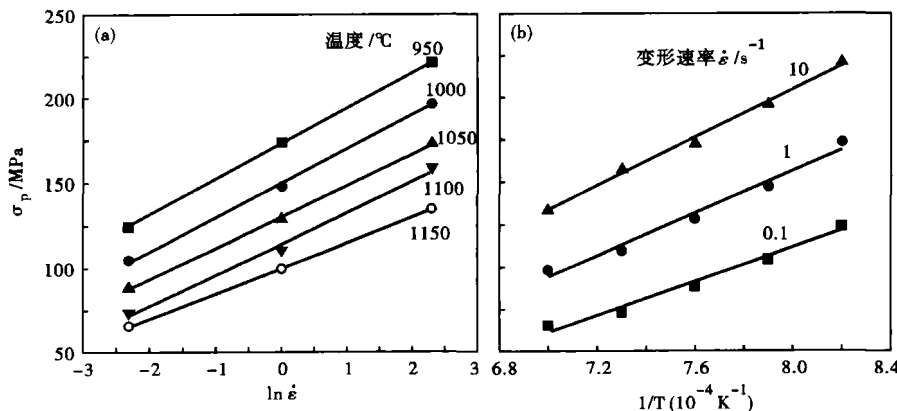


图 2 38MnVS 钢 $\ln \dot{\epsilon}-\sigma_p$ (a) 和 $1/T-\sigma_p$ (b) 曲线
Fig. 2 Curves of $\ln \dot{\epsilon}-\sigma_p$ (a) and $1/T-\sigma_p$ (b), steel 38MnVS

再对 σ_p 求偏微分,则系数 β 可表示为:

$$\beta = \left[\frac{\partial(\ln \dot{\epsilon})}{\partial \sigma_p} \right]_{T=C} = \frac{1}{\left[\frac{\partial \sigma_p}{\partial(\ln \dot{\epsilon})} \right]_{T=C}} \quad (4)$$

在恒定变形速率时,式(3)对 $1/T$ 求偏导数,可以求出动态再结晶激活能 Q_d :

$$Q_d = R\beta \left[\frac{\partial \sigma_p}{\partial(1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}=C} = R \left\{ \frac{1}{\left[\frac{\partial \sigma_p}{\partial(\ln \dot{\epsilon})} \right]_{T=C}} \right\} \cdot \left\{ \left[\frac{\partial \sigma_p}{\partial(1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}=C} \right\} \quad (5)$$

以 $\ln \dot{\epsilon}$ 为横坐标, σ_p 为纵坐标,用 Origin 软件对其进行线性回归,见图 2(a)。由图 2(a) 可见,在不同变形温度下, $\ln \dot{\epsilon}$ 与 σ_p 线性关系拟合较好,各直线平均斜率为 $\bar{K}_1 = 18.467086$,代入式(4)得:

$$\beta = \frac{1}{\bar{K}_1} = \frac{1}{18.467086} = 0.05415 \quad (6)$$

以 $1/T$ 为横坐标, σ_p 为纵坐标,用 Origin 软件对其进行线性回归,分别求出各直线的斜率 K ,见图 2(b)。由图 2(b) 可见,在不同变形速率下, $1/T$ 和 σ_p 的线性关系拟合较好,各直线的平均斜率为:

$$\bar{K}_2 = 611841.11111 \quad (7)$$

将式(6)和式(7)代入式(5)得:

$$Q_d = 8.314 \times 0.05415 \times 611841.11111 = 275.453 \text{ kJ/mol} \quad (8)$$

2.3 动态再结晶晶粒尺寸模型

动态再结晶晶粒尺寸决定于变形温度和变形速度,通常表示为 Zener-Hollomon 参数的函数^[5],以 $\ln Z$ 和 $\ln D_{DRX}$ (D_{DRX} 为奥氏体晶粒尺寸)作图进行线性拟合获得动态再结晶晶粒尺寸模型如图 3 所示。由图 3 可见,随着 Z 增加,动态再结晶晶粒尺寸减小,即较高的变形速率和较低的变形温度易获得更细小的再结晶晶粒。

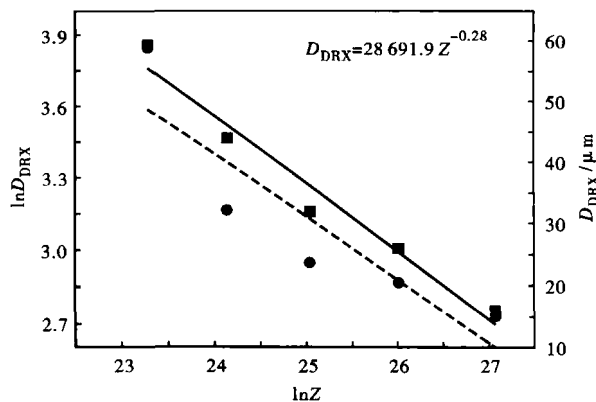


图 3 38MnVS 钢的动态再结晶晶粒尺寸模型,应变速率 1 s^{-1}
Fig. 3 Dynamic recrystallization grain size model for steel 38MnVS, strain rate 1 s^{-1}

2.4 动态再结晶状态图

根据 ε_c 、 ε_s 和对应的变形参数 Z , 可以获得相应的动态再结晶状态图。其中 ε_c 为发生动态再结晶的临界变形量^[6], $\varepsilon_c = (0.65 \sim 0.95) \varepsilon_p$, ε_p 为峰值应变, 表示为发生动态再结晶时峰值应力对应的应变, ε_s 表示动态再结晶产生结晶核心到全部完成一轮再结晶所需要的变形量。由 ε_c 、 ε_s 和 $\ln Z$ 可作出相应变形条件下的动态再结晶状态图, 如图 4 所

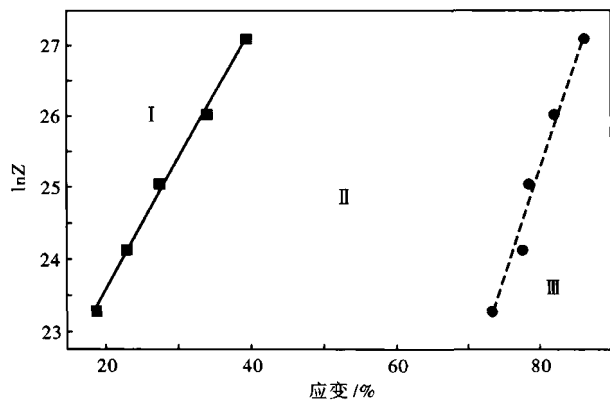


图 4 38MnVS 钢动态再结晶状态图,应变速率 1 s^{-1} : I - 未再结晶区; II - 部分再结晶区; III - 完全再结晶区
Fig. 4 Diagram of dynamic recrystallization of steel 38MnVS, strain rate 1 s^{-1} : I - non-recrystallization region; II - partial recrystallization region; III - complete recrystallization region

示。由图 4 可见, 变形温度越高、变形速率越低, 越容易发生动态再结晶。

2.5 再结晶组织及其影响因素

图 5 为 38MnVS 在相同的奥氏体化温度保温冷却至不同变形温度变形后空冷得到的室温显微组织。由图 5 可见, 该钢的组织为铁素体和珠光体, 随着变形温度升高, 铁素体减少, 珠光体增加, 它们的

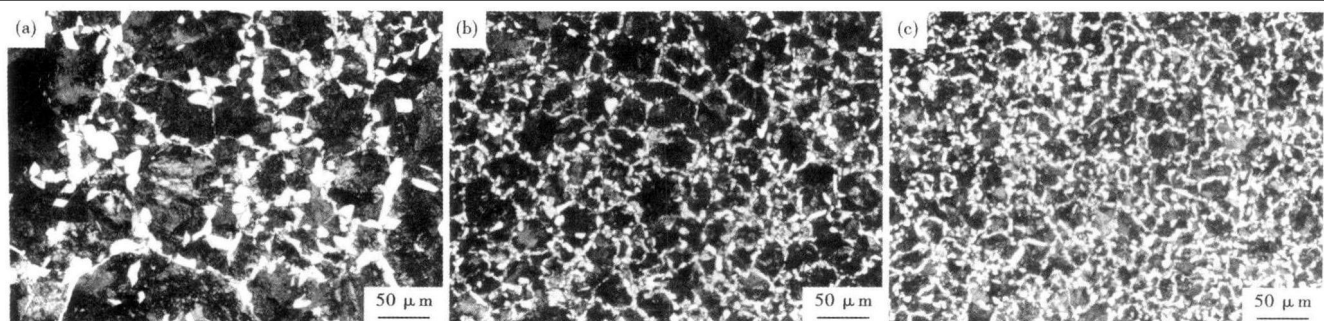


图 5 变形温度和应变速率对 38MnVS 钢组织的影响:(a) $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, 0.1 s^{-1} ; (b) $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 s^{-1} ; (c) $950 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 s^{-1}
Fig. 5 Effect of deformation temperature and strain rate on structure of steel 38MnVS: (a) $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, 0.1 s^{-1} ; (b) $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 s^{-1} ; (c) $950 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 s^{-1}

尺寸也增大;随着变形速率增加,晶粒尺寸减小。

3 结论

(1) 变形温度越高, 变形速率越低, 发生动态再结晶的临界驱动力越小, 动态再结晶越易进行。

(2) 微合金非调质钢 38MnVS 动态再结晶激活能为 $Q_d = 275.453 \text{ kJ/mol}$ 。

参考文献

1 董成瑞,任海鹏,金同哲. 微合金非调质钢. 北京:冶金工业出版社,2000
2 魏立群,祁捷. B72LX 钢的动态再结晶数学模型. 钢铁研究学

报,2006,18(9):44
3 包耀宗,足立吉隆,友田陽. 18Ni,17Ni-0.2C,SM490 マルテンサイト鋼の动态再结晶探索. 铁と钢,2005,91(7):602
4 Karhausen K, Kopp R. Model for Integrated Process and Microstructure Simulation in Hot Forming. Steel Research,1992,63(6):247
5 Sellar C M, Whiteman J A. Recrystallization and Grain Growth in Hot Rolling. Materials Science and Technology,1979,13(3-4):187
6 Wang J, Chen J, Zhao Z, et al. Modeling of Microstructural Evolution in Microalloyed Steel during Hot forging Process. Acta Metallurgica Sinica,2006,19(4):279

刘攀(1986-),男,硕士研究生(在读),2009年昆明理工大学毕业,材料成型与控制研究。

收稿日期:2011-09-20