

钒微合金化非调质钢 48MnVS 的奥氏体动态再结晶行为

周湛¹ 程勇¹ 周志伟¹ 满廷慧² 徐海峰^{2,3} 包耀宗²

(1 江苏苏钢集团苏信特钢, 苏州 215151; 2 钢铁研究总院特殊钢研究所, 北京 100081;

3 华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要 实验用非调质钢 48MnVS (/% : 0.48C, 0.60Si, 1.50Mn, 0.35Cr, 0.14V, 0.05S, 0.020Al, 0.015ON) 由 100 t EAF 冶炼, 连铸成 280 mm × 360 mm 坯, 轧成 Φ100 mm 棒材。通过 Gleeble-3800 热模拟实验机研究了变形温度 950 ~ 1 150 °C, 变形速率 0.1 ~ 10 s⁻¹, 变形量 60% 的单道次压缩钒微合金非调质钢 48MnVS 的奥氏体再结晶过程得出真应力-应变曲线, 计算得出实验钢的动态再结晶晶粒尺寸模型和动态再结晶状态图。结果表明, 钒微合金化非调质钢 48MnVS 变形温度越高, 变形速率越低, 则发生动态再结晶的形变储能越小, 越容易发生动态再结晶。实验钢 48MnVS 的动态再结晶激活能为 $Q_d = 343.202$ kJ/mol。

关键词 V 微合金化非调质钢 48MnVS 动态再结晶 奥氏体晶粒尺寸

Behavior of Dynamic Recrystallization of Austenite in V Microalloying Non-Quenched-Tempered Steel 48MnVS

Zhou Zhan¹, Cheng Yong¹, Zhou Zhiwei¹, Man Tinghui², Xu Haifeng^{2,3} and Bao Yaorong²
(1 Suxin Special Steel, Jiangsu Susteel Group, Suzhou 215151; 2 Institute for Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 3 College of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract The tested non-quenched-tempered steel 48MnVS (/% : 0.48C, 0.60Si, 1.50Mn, 0.35Cr, 0.14V, 0.05S, 0.020Al, 0.015ON) is melted by an 100 t EAF, cast to 280 mm × 360 mm bloom and rolled to Φ100 mm bar products. The recrystallization process of austenite in vanadium microalloying non-quenched-tempered steel 48MnVS single-pass compressed with deformation 60% and deformation rate 0.1 ~ 10 s⁻¹ temperature at 950 ~ 1 150 °C is studied by using a Gleeble-3800 thermal simulation tests machine to get true stress-true strain curves, and the dynamic recrystallization grain size model and the dynamic recrystallization state diagram in tested steel are obtained by calculation. Results show that with higher deformation temperature and lower deformation rate, the stored energy of deformation for occurring dynamic recrystallization is lower therefore dynamic recrystallization of vanadium microalloying non-quenched-tempered steel 48MnVS occurs more easily. The activation energy Q_d for dynamic recrystallization of tested steel 48MnVS is 343.202 kJ/mol.

Material Index V Microalloying Non-Quenched-Tempered Steel 48MnVS, Dynamic Recrystallization, Grain Size of Austenite

通过非调质钢在奥氏体区域变形再结晶细化、铁素体区域控制冷却温度下满足析出大量弥散微细的合金碳氮化物, 通过细化奥氏体晶粒及铁素体析出强化, 提供非调质钢的强度和综合性能^[1-3]。

采用 B2 非调质钢的不同变形条件下的热变形行为及动态再结晶过程中的力学参数, 建立该实验钢热变形过程中的动态再结晶晶粒尺寸模型和动态再结晶状态图, 为制定优化的、合理的生产工艺及微观组织提供依据^[4-5]。

1 试样制备与试验方法

实验用非调质钢 (48MnVS) 由苏钢集团提供,

实验钢化学成分见表 1, 实验钢采用 100 t 电弧炉冶炼, 浇铸 280 mm × 360 mm 的连铸坯, 随后控轧控冷获得 Φ100 mm 棒材, 在棒材半径 1/2 处取样加工成 Φ8 mm × 12 mm 的圆柱体, 在 Gleeble-3800 热模拟实验机上进行热压缩实验。首先将试样以 10 °C/s 的速率升温到 1 200 °C, 为消除试样内部温度梯度保温 60 s。再以 10 °C/s 的速率降至相应的变形温

表 1 实验用 48MnVS 钢的化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of tested steel 48MnVS / %

C	Si	Mn	Cr	Al	V	S	N
0.48	0.60	1.50	0.35	0.020	0.14	0.05	0.015 0

通讯作者: 包耀宗, 博士, 教授级高级工程师, 钢铁研究总院特殊钢研究所, 北京 100081

E-mail: baoyaozong@necast.com

度,然后分别以变形速率为 0.1、1、10 s⁻¹ 和变形量为 60% 的变形条件进行高温变形试验,变形完后立即水淬以保留高温奥氏体晶粒形貌,并测得其真应力-应变曲线及数据。再经水淬后的试样沿长轴方向1/2切开,磨制抛光后使用铬酸电解腐蚀。使用截点法测量晶粒尺寸。

2 实验结果与分析

2.1 真应力-应变曲线

从图 1、图 2 中可以看出,在相同的变形速率下,真应力随温度的降低显著升高,且在 950 °C 时的真应力远高于其他温度时的真应力;在相同的变形温度下,变形速率越大,真应力越大,且变形温度越低,真应力的增加率越高。变形温度越高,变形速率越低,发生动态再结晶的临界储蓄能越小,动态再结晶越容易发生^[6-9]。

2.2 动态再结晶的激活能

为研究变形温度和变形速率对动态再结晶的影

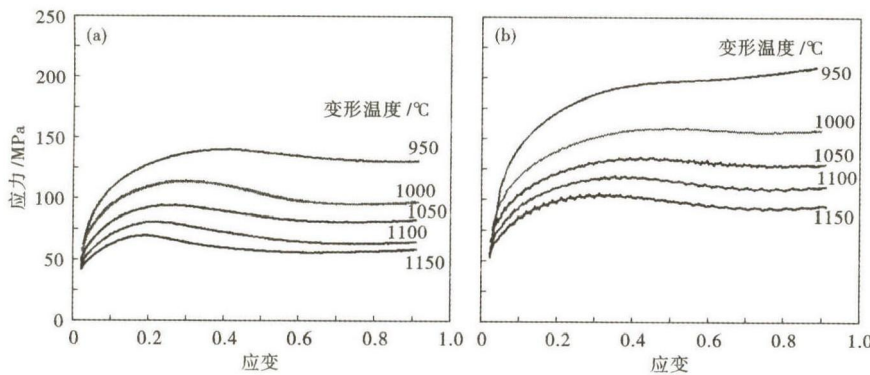


图 1 实验钢 48MnVS 在 950 ~ 1150 °C 的真应力-应变曲线,变形速率:(a)0.1 s⁻¹; (b)1 s⁻¹

Fig. 1 True stress-true strain curves of tested steel 48MnVS at 950 ~ 1150 °C, deformation rate: (a) 0.1 s⁻¹; (b) 1 s⁻¹

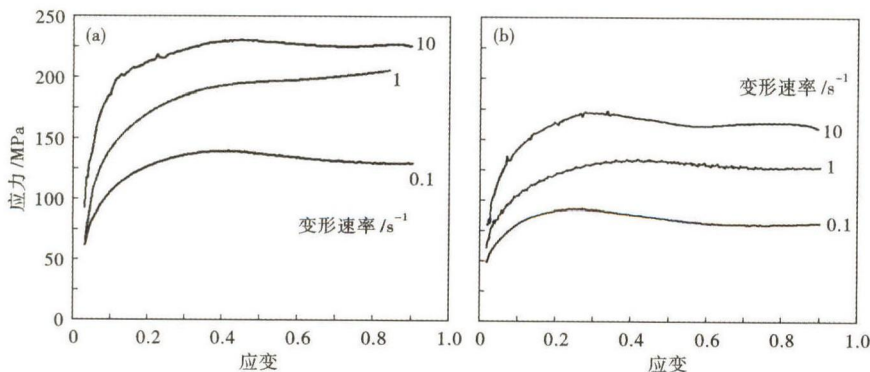


图 2 实验钢 48MnVS 变形速率 0.1 ~ 10 s⁻¹ 时的真应力-应变曲线,变形温度:(a)950 °C;(b)1050 °C

Fig. 2 True stress-true strain curves of tested steel 48MnVS with deformation rate 0.1 ~ 10 s⁻¹, deformation temperature: (a) 950 °C; (b) 1050 °C

表 2 变形温度和速率对实验 48MnVS 钢峰值应力的影响/MPa

Table 2 Effect of deformation temperature and rate on peak stress of tested steel 48MnVS /MPa

变形温度/ °C	变形速率/s ⁻¹		
	0.1	1	10
1 150	70.20	105.25	138.16
1 100	81.36	119.76	163.12
1 050	94.71	134.84	174.51
1 000	115.03	158.79	184.53
950	140.81	208.67	231.31

响,可以引入 Zener-Hollomon 变形因子来修正变形温度对变形速率的影响^[10-11]: $Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_d}{RT}\right)$ (1)

式中: Z - Zener-Hollomon 参数; $\dot{\epsilon}$ - 变形速率/s⁻¹; Q_d - 动态再结晶变形激活能/(J · mol⁻¹); R - 气体常数,通常取 8.314 J/(mol · K); T - 绝对温度/K。

研究表明,变形因子 Z 与峰值应力 σ_p 存在幂函数关系: $Z = A \exp(\beta \sigma_p)$ (2)

式中: A, β - 常数; σ_p - 峰值应力。

因此,可以得到:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q_d/RT) = \exp(\beta \sigma_p) \quad (3)$$

在温度恒定的情况下,对上式两边取自然对数,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 :

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

表 2 为实验钢峰值应力随变形参数的变化。图 3(a) 为 σ_p 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 的关系曲线,各直线的平均斜率为 $\bar{K}_1 = 16.92$,代

入式(4)中得到:

$$\beta = \frac{1}{\bar{K}_1} = \frac{1}{16.92} = 0.059115 \quad (6)$$

图 3(b) 为 σ_p 与 $1/T$ 的关系曲线。各直径的平均斜率为:

$$\bar{K}_2 = 698300.2 \quad (7)$$

将式(6)、(7)代入到式(5)中,得出:

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

$$8.314 \times 0.059115 \times 698300.2 = 343.202 \text{ kJ/mol}$$

2.3 动态再结晶晶粒尺寸模型

图 4 为在变形速率 1 s^{-1} 、不同变形温度下的奥氏体晶粒形貌。从图 4 可以看出,随着变形温度的升高,实验钢变形后的动态再结晶晶粒尺寸显著增大。这是由于动态再结晶过程是热激活过程,温度升高原子热运动速度加快,动态再结晶越容易发生,

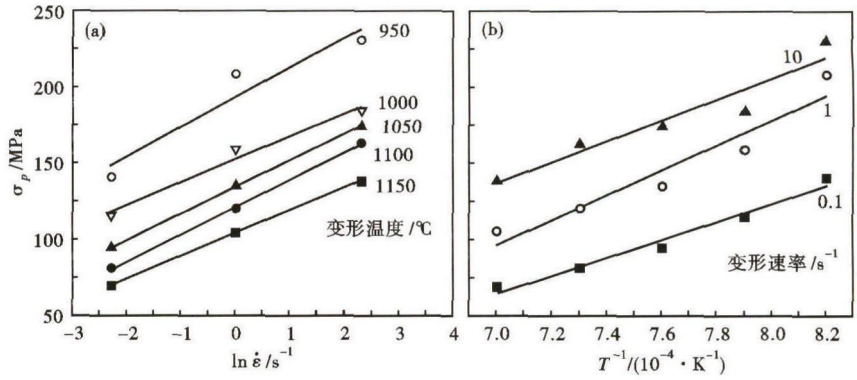


图 3 实验钢 48MnVS 950 ~ 1 150 °C 峰值应力 σ_p 与 $\ln \dot{\epsilon}$ (a) 和变形速率 $0.1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 时 σ_p 与 $1/T$ (b) 的关系

Fig. 3 Relation between peak stress σ_p and $\ln \dot{\epsilon}$ at 950 ~ 1 150 °C (a) and relation between peak stress σ_p and $1/T$ (b) with deformation rate $0.1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ for tested steel 48MnVS

从而导致动态再结晶形核后长大速度越快,故温度升高所获得的动态再结晶晶粒增大。

动态再结晶晶粒尺寸取决于变形温度和变形速率,通常表示为 Zener-Hollomon 参数的函数^[12],以 $\ln Z$ 和 $\ln D_{\text{DRX}}$ (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 5 所示。由图 5 可见,随着 Z 的增加,动态再结晶晶粒尺寸

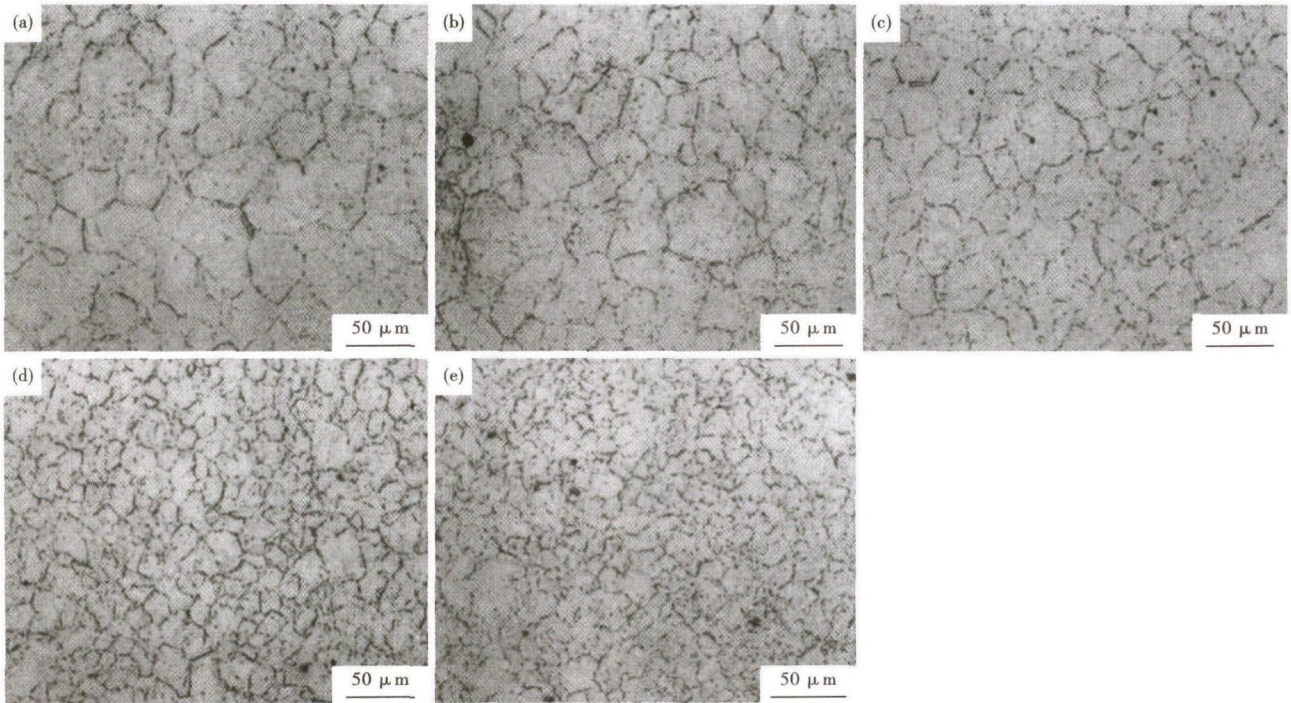


图 4 变形速率为 1 s^{-1} 、变形温度 1150 °C (a), 1100 °C (b), 1050 °C (c), 1000 °C (d) 和 950 °C (e) 时实验钢 48MnVS 的奥氏体晶粒形貌

Fig. 4 Morphology of austenite grains in tested steel 48MnVS with deformation rate 1 s^{-1} temperature at 1150 °C (a), 1100 °C (b), 1050 °C (c), 1000 °C (d) and 950 °C (e)

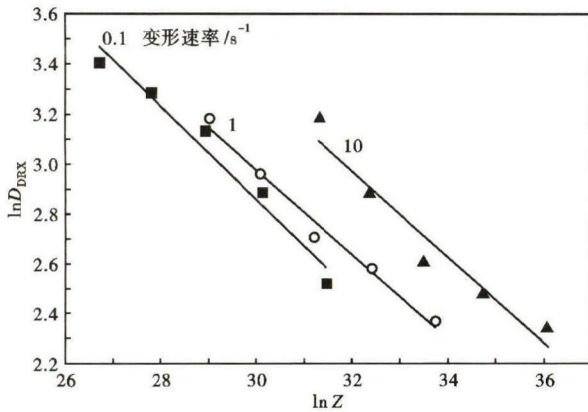


图5 实验钢 48MnVS 的动态再结晶晶粒尺寸模型
Fig.5 Dynamic recrystallization grain size model of tested steel 48MnVS

逐渐减小,即较高的变形速率和较低的变形温度容易获得更细小的再结晶晶粒尺寸。

2.4 动态再结晶状态图

根据 ϵ_c 、 ϵ_s 和对应的变形因子 Z ,可以得到动态再结晶状态图。其中, ϵ_c 为发生动态再结晶的临界变形量,一般认为 $\epsilon_c = 0.83 \epsilon_p^{[13-14]}$, ϵ_p 为峰值应变,表示为发生动态再结晶时峰值应力所对应的应变, ϵ_s 表示完全动态再结晶的临界变形量。再根据计算出来的实验钢动态再结晶激活能 Q_d ,可以分别计算出各变形条件下的因子 Z 值,从而结合 ϵ_c 、 ϵ_s 可以作出相应的动态再结晶状态图,如图 6 所示。从图 6 可以看出,因子 Z 越小,动态再结晶开始和完成的临界变形量越小,动态再结晶越容易。

参考文献

[1] 董成瑞,任海鹏,金同哲,等. 微合金非调质钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2000.
[2] 陈明香,胡儒卓,李润洪,等. 微合金钢的开发与研究[J]. 钢管, 2002,31(4):14-16.
[3] 吴晋彬,刘国权,王承阳,等. C、V 含量对微合金钢变形奥氏体动态再结晶峰值应变的影响[J]. 热加工工艺,2010,39(18):47-49.
[4] 谭利,詹肇麟,刘攀,等. 微合金化非调质钢 C38N2 动态再结晶行为[J]. 特殊钢,2012,33(4):50-52.
[5] 王进,陈军,赵震,等. F40MnV 非调质钢的热变形行为[J]. 钢铁研究学报,2007,19(5):68-71.
[6] 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[J]. 铁と钢,2005,91(7):602-608.
[7] Sellar C M, Davies G J. Hot Working and Forming Processes[J]. Metals Society,1979,22:1545-1548.
[8] White F E, Rossard C. Deformation Under Hot Working Condition [J]. Iron Steel International,1968,14:14-20.
[9] 刘攀,魏元生,惠卫军,等. 研究非调质钢 38MnVS 锻造过程中奥氏体再结晶现象[C]. 2011 年全国高品质特殊钢生产技术研讨会文集,西宁:2011.08.
[10] 何宜柱,陈大宏,雷廷权. 变形 Z 因子与动态再结晶晶粒尺寸间的理论模型[J]. 钢铁研究学报,2000,12(1):26-30.

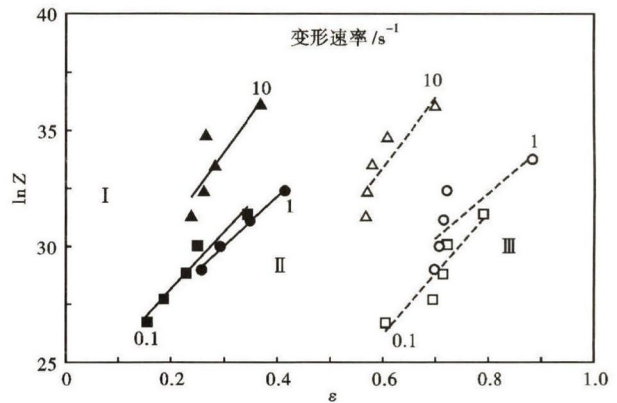


图6 实验钢 48MnVS 动态再结晶状态图: I - 未再结晶区; II - 部分再结晶区; III - 完全再结晶区
Fig.6 Dynamic recrystallization state diagram of tested steel 48MnVS: I - non-recrystallization region; II - partial recrystallization region; III - complete recrystallization region

3 结论

(1) 实验钢的变形温度越高,变形速率越低,发生动态再结晶的临界储蓄能越小,动态再结晶越容易发生,这种条件下得到的再结晶组织不是细化晶粒。通过计算得出,实验钢的动态再结晶激活能为 $Q_d = 343.202 \text{ kJ/mol}$ 。

(2) 在热变形过程中,变形温度和变形速率是影响非调质钢奥氏体动态再结晶晶粒尺寸的主要因素,奥氏体动态再结晶晶粒尺寸随变形温度的降低和变形速率的增大而细化。

国际钒技术委员会(Vanitec)合作项目资助(V137)

周 湛(1963-),男,硕士(2006 年大连理工大学),高级工程师,1996 年大连理工大学(本科)毕业,材料检测和材料工程研究。E-mail:zhouzhan@sugang.com.cn

收稿日期:2016-05-16