

Nb-V-Ti 微合金化 0.37C-1.45Mn 非调质钢动态再结晶行为

满廷慧^{1,2} 高鹏¹ 杨红新³ 周湛⁴ 雍岐龙² 包耀宗²

(1 昆明理工大学材料科学与工程学院,昆明 650093;2 钢铁研究总院特钢所,北京 100081;

3 长城汽车股份有限公司,保定 071000;4 江苏苏州钢铁集团技术中心,苏州 215151)

摘要 借助 Gleeble-3800 热模拟实验机研究了真空感应炉熔炼,并锻成 $\Phi 25$ mm 棒材的 Nb-V-Ti 微合金化 0.37C-1.45Mn 非调质钢(质量分数:0.37C,0.60Si,1.45Mn,0.025Nb,0.078V,0.017Ti)在 950~1150 °C,形变速率 0.1~10 s⁻¹,形变量 60% 的单道次压缩的奥氏体动态再结晶过程。结果表明,Nb-V-Ti 微合金化 0.37C-1.45Mn 钢形变温度越高,形变速率越低,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。试验用钢因含有 Nb 而动态再结晶激活能较高,为 $Q_d = 353.80$ kJ/mol。

关键词 Nb-V-Ti 微合金化 0.37C-1.45Mn 非调质钢 动态再结晶

Behavior of Dynamic Recrystallization of Nb-V-Ti Microalloying 0.37C-1.45Mn Non-Quenched and Tempered Steel

Man Tinghui^{1,2}, Gao Peng¹, Yang Hongxin³, Zhou Zhan⁴, Yong Qilong² and Bao Yaozong²

(1 Materials Science and Engineering School, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093;

2 Institute for Special Steel, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;

3 Great Wall Motor Co Ltd, Baoding 071000; 4 Technology Center, Jiangsu Suzhou Iron and Steel Group, Suzhou 215151)

Abstract The austenite dynamic recrystallizing process of VIF melted and forged $\Phi 25$ mm bar of Nb-V-Ti microalloying 0.37C-1.45Mn non-quenched and tempered steel (mass fraction: 0.37C, 0.60Si, 1.45Mn, 0.025Nb, 0.078V, 0.017Ti) with single pass compression, strain rate 0.1~10 s⁻¹ and reduction by 60% at 950~1150 °C has been studied by using Gleeble-3800 thermal simulation machine. Results show that of Nb-V-Ti microalloying 0.37C-1.45Mn steel the higher deformation temperature and the lower strain rate, the smaller deformation cumulative energy to occur the dynamic recrystallization and the more easily to carry out the dynamic crystallization. Due to containing Nb in steel, the activation energy of dynamic recrystallization of test steel is higher, i. e. $Q_d = 353.80$ kJ/mol.

Material Index Nb-V-Ti Microalloying, 0.37C-1.45Mn Non-Quenched and Tempered Steel, Dynamic Recrystallization

钢在热形变过程中奥氏体晶粒会发生动态回复(DRV)和动态再结晶(DRX)^[1]。在 Gleeble-3800 热模拟试验机对 Nb-V-Ti 微合金化钢的动态再结晶过程进行模拟试验,求出了试验钢的动态再结晶激活能并作出了动态再结晶图。

1 试样制备与试验方法

试验用 Nb-V-Ti 钢(表 1)为 50 kg 真空感应炉冶炼,锻成 $\Phi 25$ mm 的棒材,热模拟试样的尺寸为 $\Phi 8$ mm \times 12 mm,在 Gleeble-3800 热模拟试验机上进行热压缩试验。首先以 20 °C/s 升至 1200 °C 30 s,再以 5 °C/s 分别冷却到各预设形变温度 950~1050 °C,进行 0.1~10 s⁻¹,60% 形变试验。

表 1 试验用钢化学成分 / %
Table 1 Analysis of test steel / %

C	Si	Mn	Cr	Al	Nb	V	Ti
0.37	0.60	1.45	0.32	0.02	0.025	0.078	0.017

2 试验结果与分析

2.1 真应力-应变曲线

图 1 所示的真应力-应变曲线说明了钢在热形变过程中加工硬化与动态软化是同时进行的,可分为 3 个阶段^[2-3]:(1)形变初期的加工硬化阶段;(2)部分再结晶阶段;(3)连续动态再结晶。

2.2 形变条件对动态再结晶的影响

一般认为开始发生动态再结晶时的临界应变变量(ϵ_c)在峰值应力(σ_p)对应的应变变量(ϵ_p)之前,在真应力-应变曲线上难以确定,多数用经验公式 $\epsilon_c = (0.65 \sim 0.95) \epsilon_p$ 获得^[4-6]。而将真应力-应变曲线上达到稳态应力值临界点(σ_s)对应的应变变量作为完全再结晶临界应变变量(ϵ_s)。从图 1(a)可得,当形变速率 0.1 s⁻¹,形变量 60% 时,试验钢在 1150~1000 °C 发生了动态再结晶,在 950 °C 时试样只发生动态回复;从图 1(b)可见,当试验钢在 1000 °C 以 1 s⁻¹

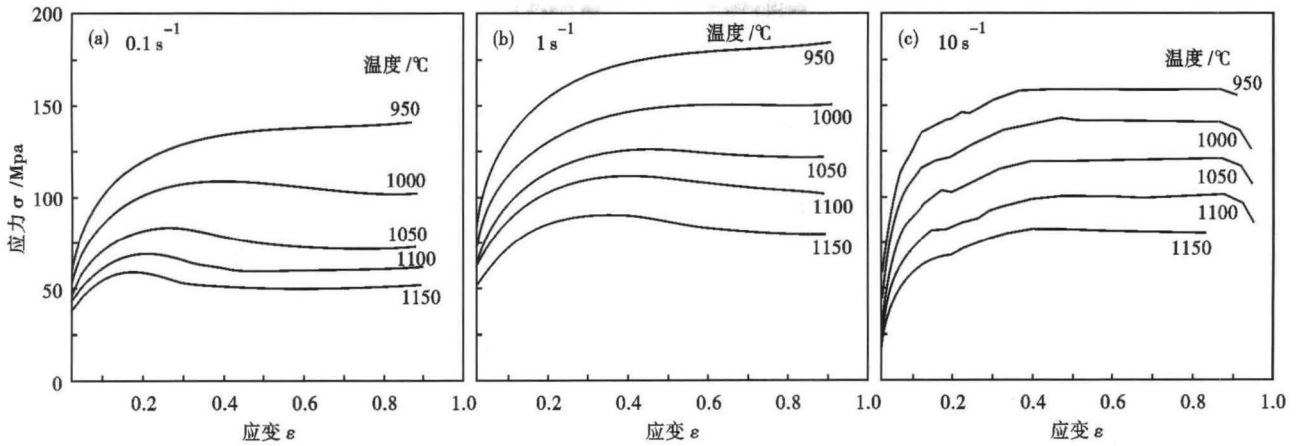


图 1 Nb-V-Ti 微合金化 0.37C-1.45Mn 非调质钢的真应力-应变曲线, 形变速率/s⁻¹: (a) 0.1; (b) 1; (c) 10

Fig. 1 True stress-strain curves of Nb-V-Ti microalloying 0.37C-1.45Mn non-quenched and tempered steel, strain rate /s⁻¹: (a) 0.1; (b) 1; (c) 10

形变 60% 时试样发生了动态再结晶但不完全。

从图 2 可见, 形变速率越小, 动态再结晶越容易发生, 临界应变变量越小, 动态回复以及形核和长大时间相对越长, 促进了动态再结晶的开始和完成。但在 950 °C 的开始再结晶临界应变变量变化不显著。从图 3 可见, 不同形变速率下的动态再结晶开始和完全临界应变变量均随温度的降低而逐渐增加, 动态再结晶越困难, 温度越低原子热运动越迟缓, 再结晶形核率以及长大速率都减小^[5-7], 推迟了动态再结晶的发生和完成。

2.3 动态再结晶的激活能

引入 Zener-Hollomon 形变因子来修正形变温度对形变速率的影响^[8-10]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_d}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: Z - Zener-Hollomon 参数; $\dot{\epsilon}$ - 形变速率/s⁻¹; Q_d - 动态再结晶形变激活能/(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, 形变因子 Z 与峰值应力 σ_p 存在幂函数关系:

$$Z = A \exp(\beta \sigma_p) \quad (2)$$

式中: A, β - 常数; σ_p - 峰值应力。

根据热模拟试验结果及动态再结晶形变激活能公式(1)和(2)推导出微合金非调质钢动态再结晶形变激活能计算流程图(图 4)。

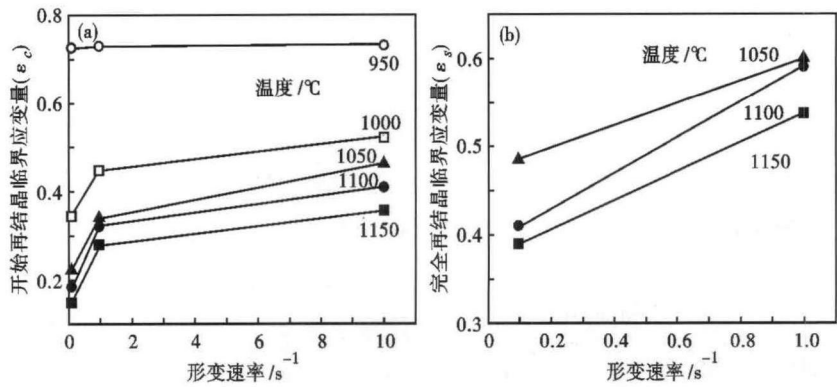


图 2 形变速率对 Nb-V-Ti 微合金化 0.37C-1.45Mn 非调质钢开始 (a) 和完全 (b) 动态再结晶临界应变量的影响

Fig. 2 Effect of strain rate on critical extent of deformation of beginning (a) and completed (b) dynamic recrystallization of Nb-V-Ti microalloying 0.37C-1.45Mn non-quenched and tempered steel

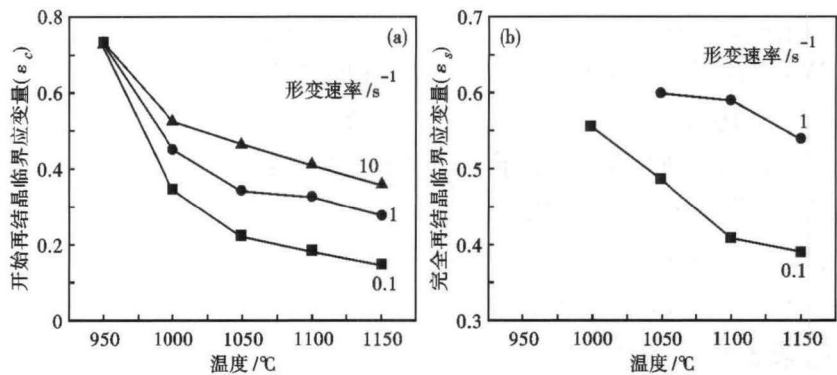


图 3 温度对 Nb-V-Ti 微合金化 0.37C-1.45Mn 非调质钢开始 (a) 和完全 (b) 动态再结晶临界应变量的影响

Fig. 3 Effect of temperature on critical extent of deformation of beginning (a) and completed (b) dynamic recrystallization of Nb-V-Ti microalloying 0.37C-1.45Mn non-quenched and tempered steel

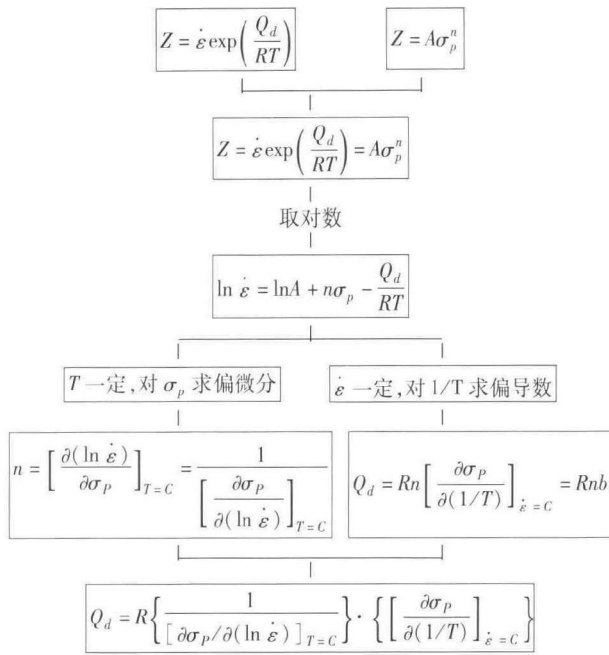


图 4 动态再结晶形变激活能计算流程图

Fig. 4 Flow chart for calculation of deformation activation energy of dynamic recrystallization

根据图 4 中得到的动态再结晶激活能的求解公式,在温度(T)恒定时,求出 σ_p 对 $\ln \dot{\epsilon}$ 的偏导数;在形变速率($\dot{\epsilon}$)恒定时,求出 σ_p 对 $1/T$ 的偏导数,计算可以得出 Nb-V-Ti 微合金化钢的平均动态再结晶激活能: $Q_d = 8.314 \times 0.058572 \times 726531.8 = 353.80 \text{ kJ/mol}$ 。比非调质钢 38MnVS 再结晶激活能 $275.45 \text{ kJ/mol}^{[11]}$ 和 C38N2 再结晶激活能 $294.91 \text{ kJ/mol}^{[4]}$ 分别高出 78.35 kJ/mol 和 58.89 kJ/mol 。

2.4 动态再结晶状态图

根据计算出来的 Nb-V-Ti 微合金化钢的动态再结晶激活能 Q_d ,可以分别计算出各形变条件下的因子 Z 值,再根据 ϵ_c 、 ϵ_s 和对应的因子 Z ,可以获得动态再结晶状态图^[5,6],如图 5 所示。

参考文献

[1] 董成瑞,任海鹏,金同哲. 微合金非调质钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2000.
 [2] 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.
 [3] Sellar C M, Davies G J. Hot Working and Forming Processes[J]. Metals Society,1979,22:1545-1548.
 [4] 谭利,詹肇麟,刘攀. 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] 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.
 [6] 方剑,邹喜洋,谢凯意. 40Mn2V 非调质钢热变形再结晶的研究[J]. 特殊钢,2009,30(5):65-67.
 [7] 王进,褚忠,陈军. 非调质钢奥氏体动态再结晶研究[J]. 材料导报,2010,24(11):116-118.
 [8] 余永宁. 金属学原理[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
 [9] Zhang B,Zhang H B,Ruan X Y. The Hot Deformation Behavior and

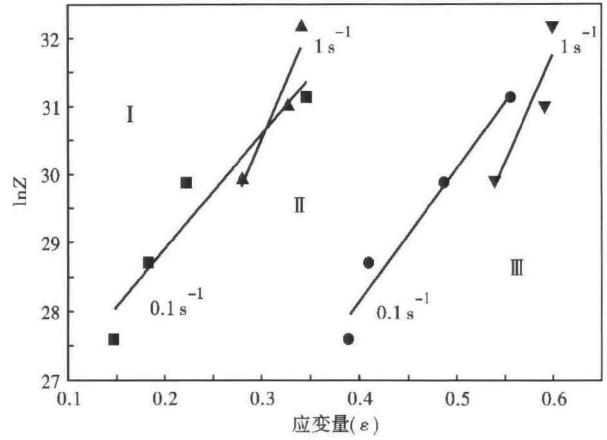


图 5 Nb-V-Ti 微合金化 0.37C-1.45Mn 非调质钢动态再结晶状态图: I - 未再结晶区; II - 部分再结晶区; III - 完全再结晶区

Fig. 5 Dynamic recrystallization state diagram of Nb-V-Ti microalloying 0.37C-1.45Mn non-quenched and tempered steel: I - Non-crystallization region; II - Partial crystallization region; III - Completed recrystallization region

从图 5 可以看出,因子 Z 越小,动态再结晶开始和完成的临界应变变量越小,动态再结晶越容易。当 $\ln Z = 27.602$ 时,动态再结晶开始和完成临界应变变量最小,分别为 0.148 和 0.390 ;当 $\ln Z > 32.165$ 时,动态再结晶难以完成。

3 结论

(1) 随形变温度升高,或形变速率降低,Nb-V-Ti 微合金化钢发生动态再结晶的临界储能变小,动态再结晶则越易发生,即因子 Z 越小,动态再结晶开始和完成的临界应变变量越小,动态再结晶越容易。

(2) Nb-V-Ti 微合金化非调质钢动态再结晶激活能 $Q_d = 353.80 \text{ kJ/mol}$;较不含 Nb 的非调质钢 38MnVS 再结晶激活能分别高 78.35 kJ/mol 和 58.89 kJ/mol 。

Dynamic Recrystallization Model of 35CrMo Steel. Acta Metallurgica Sinica,2003,16(3):183-191.
 [10] Zhu F X,Liu C,Chui G Z. Effect of Hot Deformation Parameters on Recrystallization of Steel T91. Acta Metallurgica Sinica,2003,13(1):335-341.
 [11] 刘攀,魏元生,惠卫军. 研究非调质钢 38MnVS 锻造过程中奥氏体再结晶现象[C]. 西宁:2011 年全国高品质特殊钢生产技术研讨会文集,2011.

满廷慧(1990-),女,硕士研究生(昆明理工大学),2012 年辽宁科技大学(本科)毕业,微合金非调质钢研究。
 E-mail:mantinghuilove@163.com