

汽车用高品质非调质钢 YF45MnVS 的热变形行为

邵肖静 邓小玄 崔睿 王新华 王万军 黄福祥

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要 用 Gleeble-1500 热模拟实验机对 YF45MnVS 钢(% : 0.48C, 0.45Si, 1.36Mn, 0.009P, 0.043S, 0.086V) 200 mm × 200 mm 铸坯上切取的 Φ8 mm 试样进行 950 ~ 1 200 °C, 变形速率 $10^{-2} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ 变形量 10% ~ 50% 的单道次等温压缩试验。结果表明, 低应变速率和大变形量有利于实验用钢动态再结晶的发生。通过计算得到 YF45MnVS 钢在 950 ~ 1 200 °C 的动态再结晶激活能为 299.55 kJ/mol。

关键词 非调质钢 YF45MnVS 热变形行为 动态回复 动态再结晶

Behavior of Thermal Deformation of High Quality Non-Quenched-Tempered Steel YF45MnVS for Automobile

Shao Xiaojing, Deng Xiaoxuan, Cui Rui, Wang Xinhua, Wang Wanjun and Huang fuxiang
(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The isothermal compression test for Φ8 mm specimen of steel YF45MnVS (% : 0.48C, 0.45Si, 1.36Mn, 0.009P, 0.043S, 0.086V) cut from 200 mm × 200 mm cast bloom with single pass strain rate $10^{-2} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ and strain 10% ~ 50% at 950 ~ 1 200 °C has been carried out by using Gleeble-1500 thermo-mechanical simulator. Results show that low strain rate and large strain are favorable to the occurrence of dynamic recrystallization of test steel. The calculated dynamic recrystallized activation energy of the steel YF45MnVS at 950 ~ 1 200 °C is 299.55 kJ/mol.

Material Index Non-Quenched-Tempered Steel YF45MnVS, Behavior of Thermal Deformation, Dynamic Recovery, Dynamic Recrystallization

非调质钢由于省去了耗能高的淬火和回火工序, 具有节能、环保和降低成本的特点。发达国家已将非调质钢广泛应用于汽车连杆、曲轴等轴类零件中^[1~3]。在当今大力倡导发展低碳经济的背景下, 我国作为汽车生产大国, 高品质非调质钢在汽车行业的使用无疑具有重要意义。

汽车车轴用钢对钢材的力学性能具有较高的要求。控制轧制过程中钢材的热变形行为, 能够达到同时提高钢材强度和韧性的目的。目前, 国内汽车用高品质非调质钢的应用还不广泛, 可供参考的资料较少。因此, 本实验采用 Gleeble-1500 热模拟试验机研究了应变速率、变形量和变形温度对该类钢动态回复和动态再结晶行为的影响。

1 实验方法

本实验研究了钢厂生产的易切削非调质钢 YF45MnVS 钢方坯, 主要用于生产高质量汽车的曲轴, 其化学成分(%)为: 0.48C、0.45Si、1.36Mn、0.009P、0.043S、0.086V。钢中添加较高的硫, 是为了改善钢材的切削性能。铸坯断面尺寸为 200 mm × 200 mm, 从中截取尺寸为 Φ8 mm × 15 mm 的试样, 取样位置如图 1 所示。用 Gleeble-1500 热模

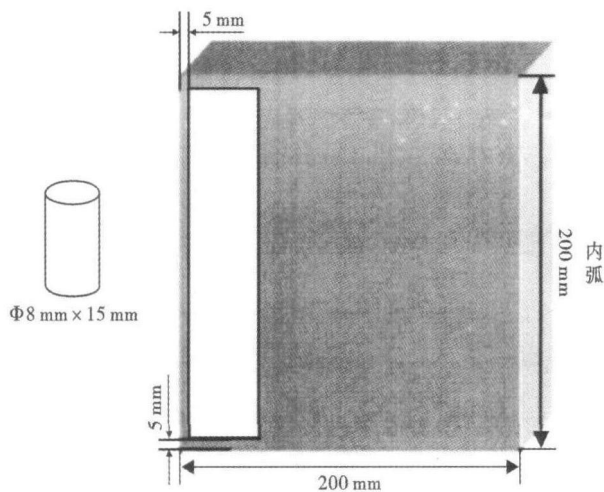


图 1 取样位置示意图

Fig. 1 Schematics of sampling location

拟试验机进行单道次压缩实验。进行热压缩实验时, 首先以 20 °C/s 的加热速率升温到变形温度保温 5 min, 接着按预先设定的变形速率和变形量进行压缩, 变形结束后迅速水冷。变形温度为 950 ~ 1 200 °C, 该温度范围内本次实验用钢均为奥氏体; 变形速率($\dot{\epsilon}$)分别为 10^{-2} 、 10^0 、 10^1 s^{-1} ; 变形量分别选择 10%、30%、50%。

2 实验结果及分析

2.1 真应力-应变曲线

在变形速率恒为 1 s^{-1} 下,进行不同变形量和变形温度的压缩实验得到的真应力-应变 (σ - ε) 曲线如图 2 所示。变形量为 10% 时的 σ - ε 曲线如图 2(a) 所示。由图 2(a) 可见,应力随应变的增加而增加,表明试样在变形过程中加工硬化起主导作用,没有明显的回复和再结晶发生。图 2(b) 是变形量为 30% 时不同温度对应的 σ - ε 曲线。由图 2(b) 可见,

材料在发生加工硬化的同时,动态回复也在逐步增加,致使形变位错不断消失,其造成的软化逐渐抵消一部分加工硬化,使曲线斜率下降,最终流变应力不再随应变的增加而增大,曲线保持水平。说明随着变形的进行,加工硬化与动态回复引起的软化逐渐达到平衡,本质上即位错的增殖和湮灭达到了动力学平衡状态,位错密度维持恒定。图 2(c) 是变形量为 50% 时相应的 σ - ε 曲线,其软化过程主要为动态再结晶。由图 2(c) 可见,当真应力达到峰值后随着

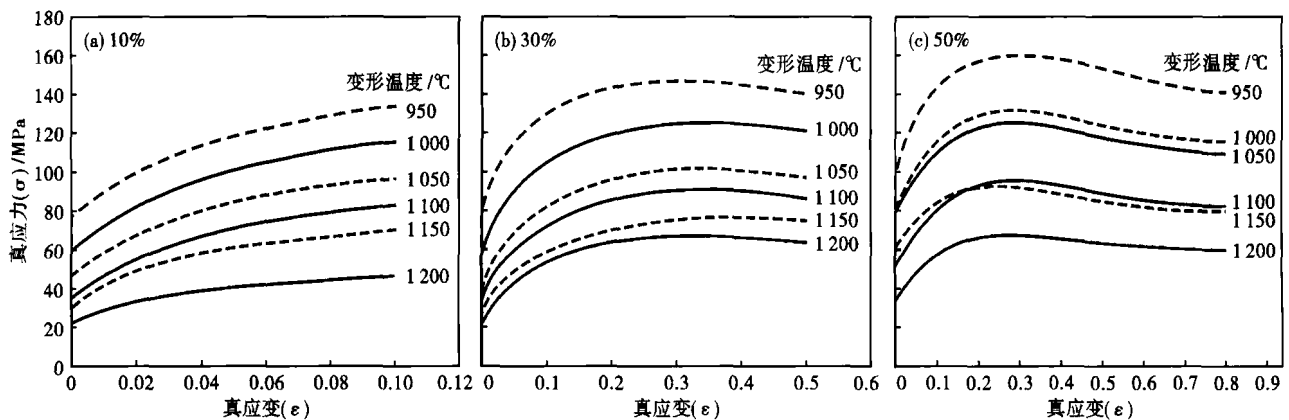


图 2 $\dot{\varepsilon}$ - 1 s^{-1} , ε -10% (a); 30% (b); 50% (c) 时, YF45MnVS 钢真应力-应变曲线

Fig. 2 True stress-strain curves of steel YF45MnVS, $\dot{\varepsilon}$ - 1 s^{-1} , ε -10% (a); 30% (b); 50% (c)

应变继续增加,真应力反而降低。

变形温度与峰值应力 σ_p 、动态再结晶临界应变 ε_c 的关系如图 3。本次实验将峰值应力对应的应变值的 0.83 倍作为动态再结晶临界应变 ε_c [4]。由图 3 可见,在变形量和变形速率恒定的条件下,随着变形温度的升高,对应的峰值应力和动态再结晶临界应变呈下降趋势。这主要是由于温度的升高使空位原子扩散加快,位错进行攀移、交滑移的驱动力增加,使动态回复和动态再结晶过程容易发生 [4]。

变形量对本次实验用钢热变形行为的影响可由上述分析得到。在相同的变形速率和变形温度下,当变形量以 10% → 30% → 50% 增加,材料相应的变化过程为:加工硬化为主 → 动态回复为主 → 动态再结晶为主。即大的变形量有利于材料发生动态再结晶。这点从图 3 (b) 中变形量增加,动态再结

晶发生所需的临界应变减小也可以得到。

图 4 为变形量恒为 30% 时,不同变形速率 (10^{-2} 、 10^0 、 10^1 s^{-1}) 和变形温度 (950 ~ 1200 °C) 下,实验用钢的 σ - ε 曲线。图 4(a) 中在变形温度为 950、1000、1050 °C 的 σ - ε 曲线表现出动态再结晶特征;变形为 1100、1150 °C 的 σ - ε 曲线为动态回复型曲线;变形温度为 1200 °C 时,材料主要发生加工

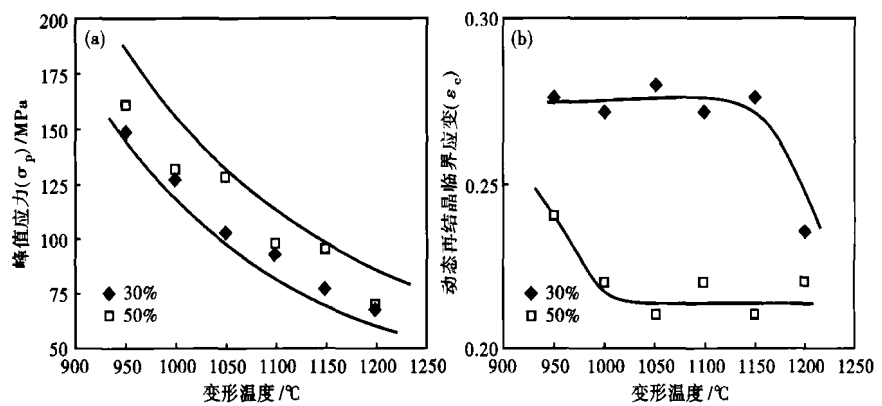


图 3 $\dot{\varepsilon}$ - 1 s^{-1} , ε -30%; 50% 时,变形温度对 YF45MnVS 钢峰值应力 σ_p (a)、动态再结晶临界应变 ε_c (b) 的影响

Fig. 3 Effect of deformation temperature on peak stress σ_p (a) and critical strain ε_c (b) of dynamic recrystallization of steel YF45MnVS, $\dot{\varepsilon}$ - 1 s^{-1} , ε -30%; 50%

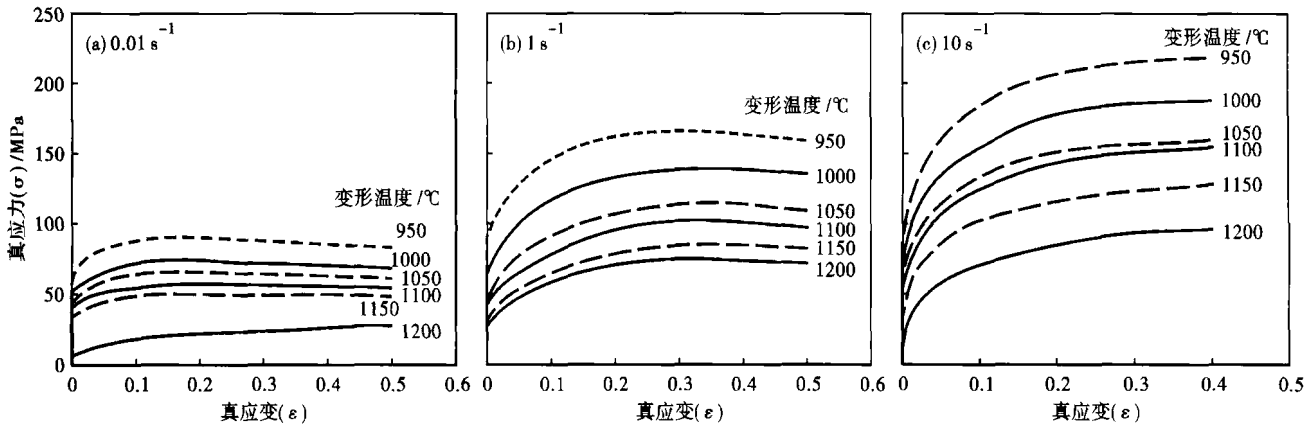


图 4 $\dot{\epsilon}$ -0.01 s⁻¹(a);1 s⁻¹(b);10 s⁻¹(c), ϵ -30%时,YT45MnVS 钢真应力-应变曲线
Fig.4 True stress-strain curves of steel YF45MnVS, $\dot{\epsilon}$ -0.01 s⁻¹(a);1 s⁻¹(b);10 s⁻¹(c), ϵ -30%

硬化,没有出现明显的软化现象。图 4(b)中随着应变的增加,变形抗力的增加速率逐渐减小,变形抗力在峰值应力处达到一个稳态。图 4(c)中由于具有大的应变速率(10 s⁻¹),随着应变的增加,变形抗力始终增加,未发生动态再结晶。以上分析表明,应变速率增加不利于动态再结晶的发生。变形温度对动态再结晶的影响并非简单的线性关系,与变形速率密切相关。

2.2 动态再结晶激活能

由上述分析得知,动态再结晶过程与变形量、变形速率和变形温度均密切相关,任何一个单独的变量都不能决定动态再结晶的发生与否。因此,本文引入用温度补偿应变速率 Zener-Hollomon 参数(Z)的概念,用以描述动态再结晶发生的难易程度。

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = B \exp(\beta \sigma_p) \quad (1)$$

式中: Q -再结晶激活能/(J·mol⁻¹); R -气体常数 8.314/[J·(mol·K)⁻¹]; T -变形温度/K; σ_p -峰值应力; B 、 β -系数。

采用刘战英等^[5]提出的求解方法,将式(1)进行数学变换,得到本次实验条件下,动态再结晶激活能表达式为:

$$Q = R\beta \left[\frac{\partial \sigma_p}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right]_{\dot{\epsilon}=D} = \left[\frac{R}{\left(\frac{\partial \sigma_p}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_{T=C}} \right] \left[\frac{\partial \sigma_p}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right]_{\dot{\epsilon}=D} \quad (2)$$

式中: D 、 C -分别表示变形速率和变形温度的恒定值,均为常数。

求解式(2)得到本次实验用钢动态再结晶激活能 $Q = 299.55$ kJ/mol。

由此得到 $Z = \dot{\epsilon} \exp(299.55/RT)$

Z 值存在有两种极限条件^[6]:一种极限条件为

动态再结晶最小值 Z_{min-c} ,其特点是在较高温和较低应变速率条件下,奥氏体动态回复完全抵消加工硬化导致的应力增高,动态再结晶过程没有发生,如图 3(a)中变形速率为 0.01 s⁻¹,变形温度为 1100 °C 时出现的情况;另一种极限条件为动态再结晶最大值 Z_{max-c} ,即材料处于发生未再结晶起始条件或形变将诱导相变的起始条件对应的 Z 值。

3 结论

(1) 变形温度和变形量恒定时,随着变形速率的减小,动态再结晶过程易发生。变形温度和变形速率恒定时,大的变形量有利于动态再结晶过程发生。

(2) 变形温度对动态再结晶的影响与变形速率密切相关。在动态再结晶可以发生的范围内,较高的变形温度动态再结晶容易进行。然而,在小的变形速率下,大的变形温度下材料发生动态回复而非动态再结晶,此时的 Zener-Hollomon 参数小于动态再结晶最小值 Z_{min-c} 。

(3) 经计算得到本次试验用钢在 950 ~ 1200 °C 的变形激活能 Q 为 299.55 kJ/mol。

参考文献

- 1 刘瑞宁,王福明.汽车用微合金化非调质钢的进展.特殊钢,2006,27(3):39
- 2 徐佐仁.中碳微合金非调质结构钢的发展及应用概况.铸锻热-热处理实践,1996,11(4):2
- 3 吴玮.汽车零部件用非调质钢的应用和发展.世界钢铁,2009,9(4):62
- 4 何建中.采用 CSP 技术生产 X60 管线钢的工艺研究:[博士学位论文].北京:北京科技大学,2005
- 5 刘战英,陈连生,周满春,等.变形条件对 30MnSi 钢动态再结晶行为的影响.钢铁研究学报,2004,16(1):49
- 6 翁宇庆.超细晶钢.北京:冶金工业出版社,2003

邵肖静(1983-),女,博士研究生,2006 年重庆大学毕业,高品质汽车用钢研究。

收稿日期:2010-06-28