

含 Nb 微合金钢 Q345E 热变形行为研究

王生朝

(湖南冶金职业技术学院, 株洲 412000)

张永青

(首钢钢铁设计研究院, 北京 100043)

摘要 通过 Thermecmaster-Z 热模拟机研究了 (%)0.084C-1.05Mn-0.026Nb-0.003Ti-0.007Mo-0.003V 微合金钢 Q345E, 在变形温度 1 000 ~ 1 100 °C, 变形速率 1 ~ 10 s⁻¹ 时, 单道次变形时变形温度和变形速度对临界应变和动态再结晶的影响, 以及在变形温度 950 ~ 1 050 °C, 变形速率 10 s⁻¹ 双道次变形时变形温度和停留时间对静态再结晶的影响。试验结果表明, 单道次变形时高的变形温度促进钢的再结晶, 但高的变形速度加速钢的硬化; 双道次变形时, 停留时间延长和变形温度升高均增加静态再结晶百分率。

关键词 含 Nb 微合金化钢 热变形模拟 真应力-应变曲线

A Study on Hot Deformation Behavior of a Microalloyed Steel Q345E Containing Nb

Wang Shengzhao

(Hunan Metallurgical Professional Technology College, Zhuzhou 412000)

Zhang Yongqing

(Beijing Shougang Design Institute, Beijing 100043)

Abstract The effect of strain temperature and strain rate on critical deformation and dynamic recrystallization during single pass deformation at strain temperature between 1 000 °C and 1 100 °C and strain rate 1 ~ 10 s⁻¹ and the effect of strain temperature and inter-pass time on static recrystallization at temperature between 950 °C and 1 050 °C and strain rate 10 s⁻¹ during double pass rolling of a microalloyed steel Q345E: 0.084C-1.05Mn-0.026Nb-0.003Ti-0.007Mo-0.003V have been studied by a Thermecmaster-Z thermal simulation machine. The test results showed that during single pass deformation the higher strain temperature was contributed to recrystallization of steel but the higher strain rate speeded up hardening of steel; during double pass deformation with prolonged inter-pass time and increased strain temperature, the static recrystallization percent increased.

Material Index Microalloyed Steel Containing Nb, Thermal Deformation Simulation, Stress-Strain Curve

含 Nb 微合金高强度热轧带钢是在普通 C-Mn 钢的基础上添加微量合金元素(如铌、钒、钛或它们之间的组合), 并结合控轧控冷加工工艺, 通过控制微合金元素的固溶、析出行为, 达到细化晶粒和沉淀强化的目的^[1]。为此, 在实验室模拟了 Q345E 含 Nb 微合金热轧带钢的变形过程, 研究含铌钢 Q345E 热变形行为, 分析其再结晶机制。

1 实验方案

试验是在日本富士电气工业有限公司(Fuji Electronic Industrial Co., Ltd)与 NKK 技术研究所(Nippon Kokan Co., Ltd)联合开发的 Thermecmaster-

Z 型热模拟试验机上进行。试验用钢(表 1)从热连轧精轧前中间带坯切头处取得, 在实验室加工成 Φ8 mm × 12 mm 圆柱形试样。

实验内容包括两个方面:(1) Q345E 钢单道次真应力-应变曲线的变形模拟(表 2), 模拟粗轧阶段微合金元素 Nb 延迟奥氏体再结晶行为, 确定一定变形条件下的动态临界应变及软化百分比, 并用于修正模型;(2) Q345E 钢双道次真应力-应变曲线变形模拟(表 3)。模拟精轧轧制道次间发生的静态再结晶行为, 确定在给定变形条件下静态再结晶的可能性及百分比, 并修正模型。

表 1 实验用钢 Q345E 的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steel Q345E / %

C	Si	Mn	S	P	Als	Nb	Cu	Ni	Cr	Ti	Mo	V
0.084	0.199	1.049	0.005	0.019	0.037 6	0.026	0.099	0.017	0.019	0.003	0.007	0.003

表 2 Q345E 钢单道次真应力-应变实验参数
Table 2 Parameters of single pass stress-strain test of steel Q345E

试样编号	加热温度 /°C	保温时间 /min	冷却速度 /°C·s ⁻¹	变形温度 /°C	变形速率 /s ⁻¹	变形程度 (相对)	变形程度 (真应变)	备注
A1	1 200	10	5	1 000	1	0~0.7	1~1.12	
A2	1 200	10	5	1 000	5	0~0.7	1~1.12	
A3	1 200	10	5	1 000	10	0~0.7	1~1.12	
A4	1 200	10	5	1 050	1	0~0.7	1~1.12	
A5	1 200	10	5	1 050	5	0~0.7	1~1.12	
A6	1 200	10	5	1 050	10	0~0.7	1~1.12	
A7	1 200	10	5	1 100	1	0~0.7	1~1.12	
A8	1 200	10	5	1 100	5	0~0.7	1~1.12	
A9	1 200	10	5	1 100	10	0~0.7	1~1.12	淬火

表 3 Q345E 钢双道次真应力-应变实验参数
Table 3 Parameters of double pass stress-strain test of steel Q345E

试样编号	加热温度 /°C	保温时间 /min	冷却速度 /°C·s ⁻¹	变形温度 /°C	变形速率 /s ⁻¹	变形程度 (相对)	停留时间 /s	再次变形程度 (相对)	备注
B1	1 200	10	5	950	10	0.3	0.5	0.3	
B2	1 200	10	5	950	10	0.3	2	0.3	
B3	1 200	10	5	950	10	0.3	5	0.3	
B4	1 200	10	5	1 000	10	0.3	0.5	0.3	
B5	1 200	10	5	1 000	10	0.3	2	0.3	
B6	1 200	10	5	1 000	10	0.3	5	0.3	
B7	1 200	10	5	1 050	10	0.3	0.5	0.3	
B8	1 200	10	5	1 050	10	0.3	2	0.3	
B9	1 200	10	5	1 050	10	0.3	5	0.3	淬火

2 实验结果及分析

2.1 单道次变形

A 组单道次变形真应力-真应变曲线见图 1。随变形量增加,试样将发生加工硬化,故真应力不断上升,在应变达到一定程度发生再结晶。加工硬化与动态再结晶相平衡时,真应力为一定值。随变形温度的提高,真应力下降,并在一定应变状态下达到完全再结晶;而随变形速度的提高,真应力显著增加,并且高的变形速度等价于温度降低,使再结晶难于进行。

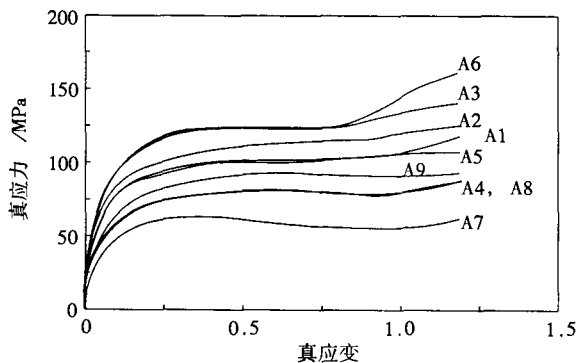


图 1 Q345E 钢单道次试验的真应力-真应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of steel Q345E of single pass test

2.1.1 Q345E 动态再结晶变形激活能 Q_d 的确定
热变形的温度和变形速率对变形的影响可引入 Zener-Hollomon(Z)参数来表示:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q_d / RT) \quad (1)$$

式中: Z -温度补偿变形速率因子(Zener-Hollomon 参数); R -气体常数, $R = 8.318 \text{ J/mol}$; Q_d -变形激活能,是表征材料热变形特征的重要参数,在单相奥氏体区,只与钢种的成分有关。

Z 与峰值抗力的关系如式(2)所示^[2]。

$$Z = A \sigma_p^m \quad (2)$$

式中: A, m 为模型参数。

由式(1)和(2)及试验测得的数据(见表4),

表 4 Q345E 不同温度和变形速率下的峰值应力 σ_p 和峰值应变 ϵ_p

Table 4 Peak stress σ_p and peak strain ϵ_p of steel Q345E at different strain temperature and strain rate

变形温度 /°C	变形速率/s ⁻¹					
	1		5		15	
	σ_p /MPa	ϵ_p	σ_p /MPa	ϵ_p	σ_p /MPa	ϵ_p
1 000	102.88	0.523	118.30	0.663	135.32	0.805
1 050	95.32	0.402	104.78	0.517	124.32	0.653
1 100	77.86	0.353	92.37	0.446	108.78	0.512

经回归可得参数 A, m, Q_d 的值: $A = 0.117\ 604\ 727\ 3$;
 $m = 5.944\ 994\ 337$; $Q_d = 262\ 400.930\ 1\ \text{J/mol}$ 。

2.1.2 临界应变数学模型的建立

通常临界应变是峰值应变的函数^[3],即

$$\epsilon_c = c \times \epsilon_p \quad (3)$$

$$\epsilon_p = A_1 \cdot D_0^{A_2} \cdot Z^{A_3} \quad (4)$$

式中: ϵ_c -临界应变; ϵ_p -峰值应变; D_0 -初始晶粒尺寸/ μm ; A_1, A_2, A_3 -常数; C -常数,取值在 0.65 ~ 0.85,含铌钢取 0.8。

在试验中所给的加热条件相同,得到的初始晶粒大小基本上一致, A_2 无法拟合,据大多数研究者所给的参数 $A_2 = 0.3 \sim 0.5$,取 $A_2 = 0.5$ 。对(4)式两边取对数:

$$\ln \epsilon_p = \ln(A_1 D_0^{0.5}) + A_3 \ln \dot{\epsilon} + A_3 Q_d / RT$$

由测得的 D_0 值,将试验数据代入进行多元回归,得到 A_1, A_3 的值: $A_1 = 8.943\ 2\text{E} - 5$, $A_3 = 0.183\ 68$ 。由此可得:

$$\epsilon_c = 7.15 \times 10^{-5} \times D_0^{0.5} Z^{0.183\ 68} \quad (5)$$

变形温度 (T) 和变形速率 ($\dot{\epsilon}$) 对临界应变的影响,如图 2 所示。

2.2 双道次变形实验

双道次变形实验主要是确定变形温度和道次间隙时间对软化比的影响。试验表明随停留时间的延长,静态再结晶百分比增加;变形温度越高,屈服应力越低,静态再结晶速度越快,静态再结晶

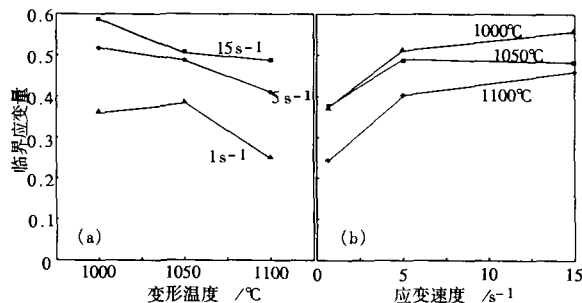


图 2 (a) 变形速度为 $1\ \text{s}^{-1}$, $5\ \text{s}^{-1}$ 和 $15\ \text{s}^{-1}$ 时变形温度对钢的临界应变量的影响; (b) 变形温度为 $1\ 000\ \text{°C}$, $1\ 050\ \text{°C}$ 和 $1\ 100\ \text{°C}$ 时,应变速度对钢的临界应变量的影响

Fig.2 (a) Effect of strain temperature on critical strain of steel at strain rate $1\ \text{s}^{-1}$, $5\ \text{s}^{-1}$ and $15\ \text{s}^{-1}$; (b) effect of strain rate on critical strain of steel at strain temperature $1\ 000\ \text{°C}$, $1\ 050\ \text{°C}$ and $1\ 100\ \text{°C}$

程度越大。一方面由于静态恢复对最终组织的影响相对较小,一般把静态恢复归入静态再结晶;另一方面在确定静态再结晶百分比时,必须排除动态再结晶的干扰^[4]。图 3 表明静态再结晶百分比随停留时间和变形温度的变化趋势。停留时间越长,再结晶越充分,但到达一定时间后,增长趋势减缓;变形温度主要影响静态再结晶的速度,在 $1\ 000\ \text{°C}$ 以上,再结晶百分比很快达到 80%,然后放缓,但在低变形温度,再结晶百分比与停留时间近似成线性关系。

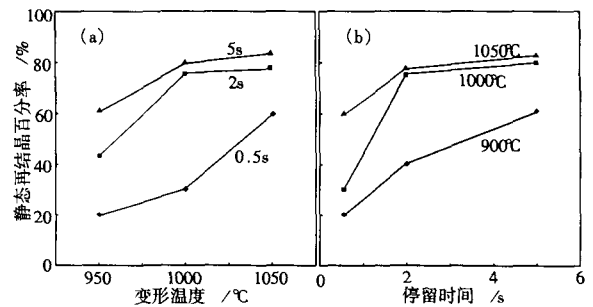


图 3 (a) 变形温度在停留时间 0.5 s, 2 s 和 5 s 时对静态再结晶百分率的影响; (b) 在变形温度 $900\ \text{°C}$, $1\ 000\ \text{°C}$, $1\ 050\ \text{°C}$ 时停留时间对静态再结晶百分率的影响

Fig.3 (a) Effect of strain temperature on static recrystallization percent of steel with inter-pass time 0.5 s, 2 s and 5 s; (b) inter-time on static recrystallization percent of steel at strain temperature $900\ \text{°C}$, $1\ 000\ \text{°C}$ and $1\ 050\ \text{°C}$

3 结论

(1) 单道次变形时,高的变形温度促进再结晶,而高的变形速度则加剧了加工硬化程度,反而抑制动态再结晶发生。

(2) 双道次变形时,随给定变形温度下停留时间延长,静态再结晶程度增加;而随变形温度升高,静态再结晶程度增大,并且结晶速度变快。

参考文献

- 1 杨雄飞. 铌-科学与技术. 北京:冶金工业出版社,2003,290
- 2 Minami K, Siciliano F Jr., Maccagno T M, et al. Mathematical Modeling of Mean Flow Stress during the Hot Strip Rolling of Nb Steels, ISIJ International, 1996, 36(12): 1507
- 3 Takehide Senuma, Masayoshi Suehiro and Hiroshi Yada. Mathematical Models for Predicting Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Hot Strips, ISIJ International, 1992, 32(3): 423
- 4 翁宇庆. 超细晶钢. 北京:冶金工业出版社,2003,50

王生朝(1970-),男,讲师,硕士,从事材料加工领域教学与研究。