

文章编号:1673-9981(2011)04-0279-04

# 不同应变速率下硼对低碳冷轧钢再结晶过程组织转变影响的研究

王武军<sup>1,2</sup>, 崔凤奎<sup>1</sup>, 王冠军<sup>1,2</sup>

1. 河南科技大学, 河南 洛阳 471003; 2. 河南天海电器有限公司, 河南 鹤壁 458030

**摘要:**利用 Gleeble-1500 热模拟试验机和光学显微镜研究了低碳冷轧钢在不同应变速率下, 硼的加入对其应力-应变曲线和初始奥氏体晶粒的影响. 结果表明: 在应变速率为 0.05, 10 s<sup>-1</sup> 时, 硼的加入导致了  $\epsilon_c/\epsilon_p$  增加, 且含硼钢初始奥氏体晶粒尺寸较大、形状不均匀, 硼的加入推迟了动态再结晶; 在应变速率为 4 s<sup>-1</sup> 时, 硼的加入导致了  $\epsilon_c/\epsilon_p$  降低, 且含硼钢初始奥氏体晶粒尺寸较小, 其形状近似于球状, 形核较均匀, 硼的加入加速了动态再结晶.

**关键词:** 低碳钢; 再结晶; 硼; 应变速率; 奥氏体

**中图分类号:** TG335.5 **文献标识码:** A

硼作为微量合金化元素, 在钢、Fe-Al 合金、Fe-Ni 合金以及许多金属化合物中被广泛应用<sup>[1-6]</sup>. 通过硼元素在晶界上的偏聚与析出来细化晶粒组织以及改变相变转变温度, 可获得预期的组织, 大幅度提高产品的性能<sup>[7-8]</sup>. 本文探讨了低碳冷轧钢在不同应变速率下, 硼的加入对其应力-应变曲线和初始奥氏体晶粒的影响, 以研究在再结晶过程中, 硼的加入对

低碳冷轧钢变形及组织转变的影响.

## 1 实验方法

试验中采用安阳钢铁集团有限责任公司生产的厚 5 mm 的无硼和含硼热轧卷(缓冷后)作为试样, 其化学成分列于表 1.

表 1 试样的化学成分

Table 1 Chemical composition of the tested steel

样品	w/%										
	C	Si	Mn	P	S	Al <sub>1</sub>	Al <sub>2</sub>	Ca	O	N	B
无硼钢	0.047	0.029	0.22	0.009	<0.002	0.034	0.012	0.0029	0.0016	0.0039	—
含硼钢	0.03	0.03	0.14	0.006	0.002	0.037	0.014	0.0017	0.0052	0.0064	0.0016

从 520 °C 的含硼和无硼低碳冷轧板上, 各取 3 个  $\Phi 4 \times 10$  mm 圆柱形试样, 在美国 DSI 公司生产的 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行动态再结晶实验. 实验方案如图 1 所示. 以 10 °C/s 速率将试样加热至 1150 °C, 保温 300 s. 再以 5 °C/s 速率将试样冷却至 1100 °C, 保温 30 s 后进行压缩实验. 将处于 1100 °C 的试样, 分别以 0.05, 4, 10 s<sup>-1</sup> 变形速率

进行多道轧制, 保证试样的工程应变均为 40%, 最后将试样淬火至室温. 实验过程中, 通过 Gleeble-1500 热模拟试验机的配套管理软件记录和采集应力、应变数据, 绘制不同应变速率下的变形抗力曲线. 利用 XSP-BM21AY 型光学显微镜观察 1100 °C 和不同变形速率下试样的金相组织.

收稿日期: 2011-04-25

作者简介: 王武军(1969-), 男, 河南鹤壁人, 工程师, 硕士.

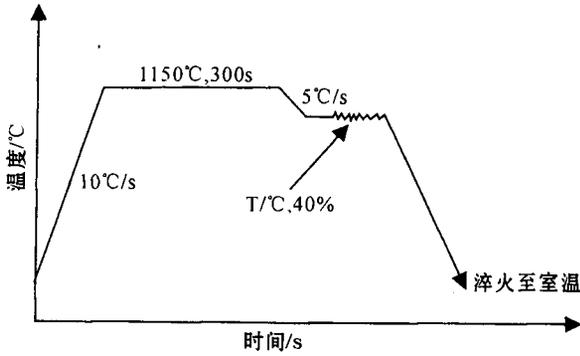


图1 动态再结晶实验的工艺简图

Fig. 1 Graphic picture of the process of dynamic recrystallization

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 应力-应变曲线

材料在热变形过程中显微组织的变化,可以通过热加工过程中应力-应变曲线斜率的变化来描述,并且发生动态再结晶时的临界应变可通过应力-应变曲线的拐点来获得.应力-应变曲线斜率的第一次突变意味着亚晶的形成,而斜率的第二次突变意味着动态再结晶的发生,此时对应的应变即为动态再

结晶过程的临界应变  $\epsilon_c$ <sup>[9]</sup>.当钢中的位错积累到一定程度时,塑性应变量大于动态再结晶临界变形量,大量位错被再结晶核心的大角度界面推移而消除,此时应变分布曲线上最高点所对应的应变值,即为峰值应变  $\sigma_p$ <sup>[10]</sup>.图2为变形温度1100℃时,含B与无B冷轧基板在不同应变速率下的应力-应变曲线.当应变速率为0.05 s<sup>-1</sup>时,无B钢和含B钢所对应的峰值应变分别为0.135和0.155,所对应的临界应变分别为0.095和0.12,则无B钢的  $\epsilon_c/\epsilon_p = 0.70$ ,含B钢的  $\epsilon_c/\epsilon_p = 0.75$ ,说明B的加入导致了  $\epsilon_c/\epsilon_p$  增加,从而推迟了再结晶.当应变速率为4 s<sup>-1</sup>时,无B钢和含B钢所对应的峰值应变分别为0.33和0.28,所对应的临界应变分别为0.21和0.17,则无B钢的  $\epsilon_c/\epsilon_p = 0.64$ ,含B钢的  $\epsilon_c/\epsilon_p = 0.60$ ,说明硼的加入加速了动态再结晶.当应变速率为10 s<sup>-1</sup>时,含硼低碳钢应力-应变曲线中没有出现峰值应变,说明在此应变速率下,含B低碳钢冷轧基板只是发生了动态回复,未发生动态再结晶.因此,只有在一定应变速率下,硼的加入才能促进低碳钢的再结晶.

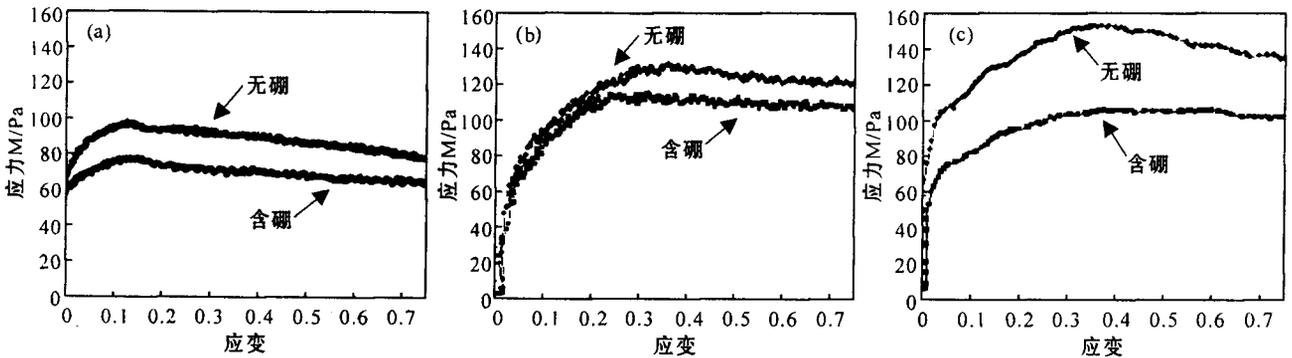


图2 不同应变速率下含硼与无硼冷轧基板的应力-应变曲线

(a)应变速率 0.05 s<sup>-1</sup>; (b)应变速率 4 s<sup>-1</sup>; (c)应变速率 10 s<sup>-1</sup>

Fig. 2 Stress-strain curves of tested steel containing or not containing B at different strain rates

(a) strain rate of 0.05s<sup>-1</sup>; (b) strain rate of 4s<sup>-1</sup>; (c) strain rate of 10s<sup>-1</sup>

### 2.2 应变速率对奥氏体晶粒的影响

图3是变形温度为1100℃,不同应变速率下无B钢和含B钢的初始奥氏体晶粒.由图3可知,在相同的应变速率下,无B钢的初始奥氏体晶粒尺寸均小于含B钢的晶粒尺寸,说明B的加入对动态再结晶过程中流变应力的软化有一定的促进作用.由于B原子在奥氏体晶格和其他环境中的双重特

性<sup>[11]</sup>,其能够占据置换原子位置或原子间隙位置,使B原子在再结晶过程中随晶界一起运动,导致B的加入促进了动态再结晶过程;同时,在不同应变速率下,初始奥氏体晶粒尺寸对动态再结晶过程中的动态流变应力也有影响作用.由图3(b)、(d)和(f)可看出,当应变速率为0.05 s<sup>-1</sup>和10 s<sup>-1</sup>时,含B钢初始奥氏体晶粒尺寸较大、形状不均匀,形核位

置集中在奥氏体晶界、亚晶界、形变带和孪晶界等位置,而这些位置对应变的敏感程度不同,从而推迟了再结晶;当应变速率为  $4\text{ s}^{-1}$  时,含 B 钢初始奥

氏体晶粒尺寸较小,其形状近似于球状,动态再结晶的形核位置在晶界较多,形核较均匀,说明在  $4\text{ s}^{-1}$  的应变速率下硼的加入加速了动态再结晶。

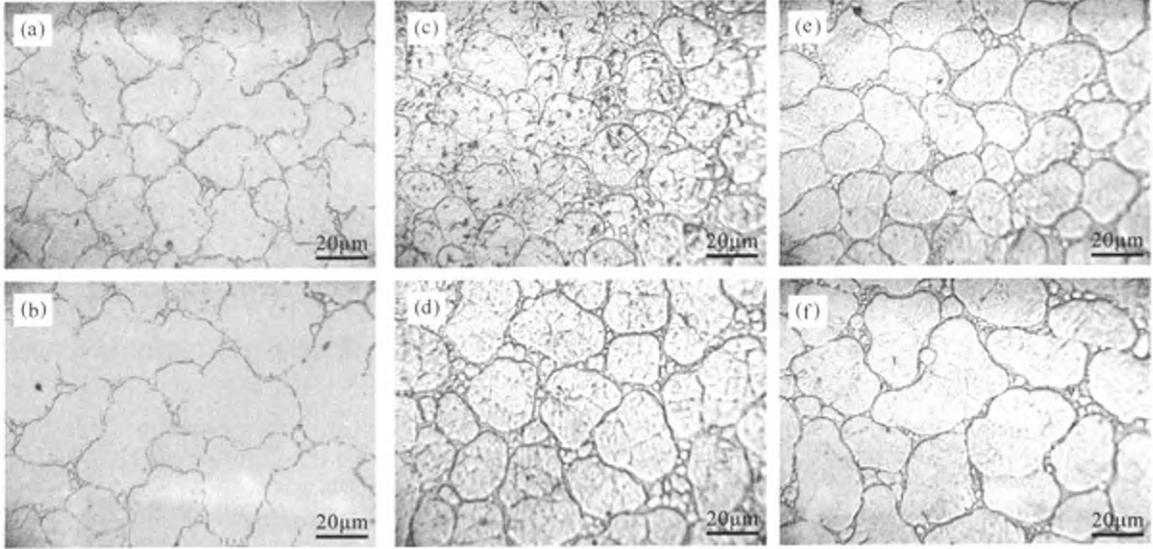


图3 变形温度为  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,不同应变速率下的初始奥氏体晶粒

(a) 无 B,应变速率  $0.05\text{ s}^{-1}$ ; (b) 含 B,应变速率  $0.05\text{ s}^{-1}$ ; (c) 无 B,应变速率  $4\text{ s}^{-1}$ ;  
 (d) 含 B,应变速率  $4\text{ s}^{-1}$ ; (e) 无 B,应变速率  $10\text{ s}^{-1}$ ; (f) 含 B,应变速率  $10\text{ s}^{-1}$

Fig. 3 Initial austenite grain size at different strain rates at the deformation temperature of  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$

(a) Not containing B with strain rate  $0.05\text{ s}^{-1}$ ; (b) Containing B with strain rate  $0.05\text{ s}^{-1}$ ;  
 (c) Not containing B with strain rate  $4\text{ s}^{-1}$ ; (d) Containing B with strain rate  $4\text{ s}^{-1}$ ;  
 (e) Not containing B with strain rate  $10\text{ s}^{-1}$ ; (f) Containing B with strain rate  $10\text{ s}^{-1}$

综上所述,动态再结晶晶粒在原始奥氏体三叉界及晶界等处形成,是由于加入的 B 和初始奥氏体晶粒尺寸的共同作用,使动态再结晶过程中动态流变应力软化而造成的. 当应变速率处于较高水平时, B 在再结晶过程中随晶界一起运动. 因此,在  $4\text{ s}^{-1}$  的应变速率下硼的加入加速了动态再结晶。

### 3 结论

当应变速率为  $0.05\text{ s}^{-1}$  时,无 B 钢的  $\epsilon_c/\epsilon_p = 0.70$ ,含 B 钢的  $\epsilon_c/\epsilon_p = 0.75$ ,硼的加入推迟了动态再结晶;当应变速率为  $4\text{ s}^{-1}$  时,无 B 钢的  $\epsilon_c/\epsilon_p = 0.64$ ,含 B 钢的  $\epsilon_c/\epsilon_p = 0.60$ ,硼加速了动态再结晶;当应变速率为  $10\text{ s}^{-1}$  时,含硼低碳钢的应力-应变曲线中没有出现峰值应变,未发生动态再结晶. 在应变速率为  $0.05\text{ s}^{-1}$  和  $10\text{ s}^{-1}$  时,含 B 钢初始奥氏体晶粒尺寸较大、形状不均匀,硼的加入推迟了动态再

结晶;在应变速率为  $4\text{ s}^{-1}$  时,含 B 钢初始奥氏体晶粒尺寸较小,其形状近似于球状,形核较均匀,硼加速了动态再结晶. 因此,只有在一定应变速率下,硼的加入才能促进低碳钢的再结晶。

### 参考文献:

[1] 王永萍,高立. 连续退火炉冷却技术的发展和现状[J]. 工业炉,2002,24(1):21-24.  
 [2] 殷瑞钰. 钢的质量现代进展[M]. 北京:冶金出版社,1995.  
 [3] LIU D L, WANG Y L, HUO X D, et al. Electron microscopic study on nanoscaled precipitation in low carbon steels[J]. J Chinese Electron Microscopy Society, 2002, 21(3):283-287.  
 [4] LIU Dongyu, BAI Bingzhe, FANG Hongsheng, et al. Effect of tempering temperature on the strength and toughness of a novel carbide free bainite/martensite duplex phase steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2002, 9(1):46-49.

- [5] 康永林. 薄板坯连铸连轧低成本高性能微合金化钢的研发进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(5): 56-58.
- [6] YAMAGUCHI M, INUI H, ITO K. High temperature structural intermetallics [J]. Acta Mater, 2000, 48: 306-308.
- [7] 孔君华, 吴力新, 谢长生. 热轧工艺对低碳微合金钢组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2004(11): 43-47.
- [8] 杨景红, 刘清友, 孙冬柏, 等. 加热温度对微合金高强度奥氏体组织及其再结晶的影响[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(3): 37-38.
- [9] POLIAK E I, JONAS J J. A one-parameter approach to determining the critical conditions for the initiation of dynamic recrystallization [J]. Acta Materialia, 1996, 44: 127-136.
- [10] 马宁, 胡平, 闫康康, 等. 高强度硼钢热成形技术研究及其应用[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 69-71.
- [11] MORITO S, TANAKA H, KONISHI R, et al. The morphology and crystallography of lath martensite in Fe-C alloys [J]. Acta Mater, 2003, 51: 1789-1799.

## Investigation on the effect of boron on phase transformation of low carbon cold-rolled steel during the crystallization process at different strain rates

WANG Wujun<sup>1,2</sup>, CUI Fengkui<sup>1</sup>, WANG GuanJun<sup>1,2</sup>

1. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. Henan THB Electric CO., LTD, Hebi 458030, China

**Abstract:** In this study, the effects of adding B on the stress-strain curve of low-carbon cold-rolled steel and the initial austenite grain size were investigated at different strain rates by using Gleeble-1500 thermal simulation testing machine and optical microscopy. The results showed that when the strain rate was  $0.05 \text{ s}^{-1}$  and  $10 \text{ s}^{-1}$ , the  $\epsilon_c/\epsilon_p$  of low-carbon cold-rolled steel increased due to adding B element and meanwhile, the B-containing steel had large initial austenite grain size and uneven shape, and thereby adding boron delayed dynamic recrystallization; when the strain rate was  $4 \text{ s}^{-1}$ , the  $\epsilon_c/\epsilon_p$  of low-carbon cold-rolled steel decreased due to adding B element and the B-containing steel had smaller initial austenite grain size and shape similar to spherical as well as more uniform nucleation, and thereby adding boron accelerated the dynamic recrystallization.

**Key words:** low carbon steel; recrystallization; boron; strain rate; austenite