

# 低碳微合金化含硼冷镦钢的力学性能研究

周新龙<sup>1,2</sup>, 叶 飞<sup>1</sup>, 陈伟庆<sup>1</sup>, 刘振清<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 武汉钢铁(集团)公司 研究院, 湖北 武汉 430080)

**摘 要:** 实验室试制了低碳 Nb、V 微合金化含硼冷镦钢, 并对试验钢的组织 and 性能进行了对比研究。结果表明: 钢中添加适当的 Nb、V 细化了含硼钢的铁素体晶粒, 显著提高了含硼钢的抗拉强度, 其中, Nb、V 复合微合金化含硼钢的效果最好, 其次是含钒硼钢和含铌硼钢。分析表明, Nb、V 复合微合金化在含硼钢中的主要作用在于细化晶粒和沉淀强化。

**关键词:** 微合金化; 含硼冷镦钢; 力学性能

**中图分类号:** TG142.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-1043(2009)04-0061-04

## Study on mechanical properties of boron bearing low carbon micro-alloying cold heading steel

ZHOU Xin-long<sup>1,2</sup>, YE Fei<sup>1</sup>, CHEN Wei-qing<sup>1</sup>, LIU Zhen-qing<sup>2</sup>

(1. Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. The Research & Development Center of WISCO, Wuhan 430080, China)

**Abstract:** The low carbon boron bearing Nb and V micro-alloyed cold heading steel has been trial-produced in laboratory. The microstructure and mechanical properties of the testing steels have also been studied contrastively. The results indicated that a proper amount of Nb、V in steel can refine the ferrite grain of the boron steel and enhance its tensile strength obviously, and the effect of boron bearing Nb and V composite micro-alloyed steel is the best and next best is the boron bearing V and Nb steel. Analysis shows that the main function of Nb and V micro-alloying is assumed to refine the grain and enhance deposition.

**Key words:** micro-alloying; boron bearing; cold heading steel; mechanical properties

高强度标准件通常由中碳钢、中碳合金钢生产, 由于这些钢种的含碳量及合金含量较高, 冷镦开裂和延迟断裂敏感性相对较大, 且成本也相对较高。低碳含硼高强标准件用钢针对中碳钢、中碳合金钢的这些不足, 利用硼能提高淬透性的特点, 降低钢中含碳量, 提高钢的综合性能。其有如下优点: 可节约合金元素如 Cr、Ni、Mo 等; 钢材可直接进行冷加工, 省略球化退火工序; 淬火变形和开裂倾向小, 可以用水淬; 相同强度水平下, 塑性较中碳合金钢明显改善, 抗疲劳及延迟断裂能力强。

铌、钒微合金化提高钢的强度的应用已非常广泛, 如分别加入 0.01% 的铌和钒, 可使屈服强

度分别增加 80 MPa 和 70 MPa<sup>[1]</sup>。王瑞珍等人对铌、钒微合金化的非调质紧固件钢进行了试制研究<sup>[2]</sup>, 取得了很好的效果。在低碳含硼冷镦钢中加入铌、钒微合金元素, 能进一步提高标准件的强度, 本文对低碳含硼冷镦钢中分别加入铌、钒或同时加入铌、钒后钢的金相组织和力学性能进行了对比研究。

## 1 实验材料及方法

实验所用含硼钢在 50 kg 真空感应炉内冶炼, Nb、V 微合金化含硼钢在实验室碳管炉内冶炼, 化学成分见表 1~2。

作者简介: 周新龙(1962-), 男, 武汉钢铁(集团)公司研究院, 教授级高工, 博士生, 从事钢铁新产品研究及开发工作。

表 1 低碳含硼钢各化学成分的质量分数

编号	$w_B / \%$								
	C	Si	Mn	P	S	Al <sub>s</sub>	Ti	B	N
3	0.147	0.052	0.76	0.010	0.005 1	<0.005	<0.005	0.000 5	0.002 6
4	0.132	0.037	0.74	0.010	0.005 1	<0.005	<0.005	0.001 5	0.002 4
5	0.160	0.046	0.74	0.011	0.004 9	<0.005	<0.005	0.004 0	0.002 5
7	0.171	0.052	0.77	0.009	0.004 8	<0.005	<0.005	0.042 0	0.001 7
11	0.205	0.055	0.84	0.009	0.004 8	0.094	0.033	0.003 7	0.002 7

表 2 低碳微合金化含硼钢各化学成分的质量分数

编号	$w_B / \%$										
	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	B	Nb	V	N
1	0.220	0.050	0.90	0.019	0.017	0.180	0.030	0.004 9		0.096	
2	0.220	0.060	0.85	0.022	0.017	0.160	0.030	0.003 8	0.031		
3	0.235	0.050	0.83	0.018	0.016	0.075	0.021	0.000 5	0.011		0.022
4	0.182	0.027	0.74	0.019	0.016	0.080	0.017	0.001 7	0.022		0.011
5	0.221	0.045	0.84	0.019	0.016	0.073	0.016	0.001 0	0.033		0.017
6	0.228	0.042	0.83	0.019	0.016	0.053	0.018	0.000 5		0.050	0.016
7	0.265	0.043	0.85	0.015	0.016	0.065	0.015	0.001 5		0.033	0.017
8	0.232	0.054	0.85	0.019	0.015	0.080	0.017	0.001 6	0.028	0.032	0.014
9	0.239	0.046	0.83	0.019	0.019	0.089	0.012	0.002 2	0.032		0.019
10	0.313	0.049	0.85	0.018	0.016	0.068	0.020	0.002 7		0.046	0.014
11	0.280	0.052	0.85	0.019	0.016	0.065	0.016	0.001 7	0.024	0.055	0.013

将分别浇铸成的 30 kg 钢锭和 1 kg 圆型钢锭 (50 mm) 加热至 1 150 ~ 1 200 ℃, 然后轧制成 12 mm 的钢板试样或用空气锤锻打成 13 mm 的圆棒, 加工制成拉伸试样和金相试样。试验钢试样的热处理制度为: 加热温度 950 ~ 1 000 ℃, 保温 30 min, 淬火温度为 950 ℃, 回火温度 200 ℃。经研磨、抛光好的试样用 4 % 硝酸酒精浸蚀出基体组织, 置于金相显微镜下观察, 统计铁素体晶粒个数, 进而计算出铁素体晶粒尺寸; 在 MTS810 材料试验机上进行拉伸性能测试, 检测试验钢热处理前后的抗拉强度、延伸率、面缩率等力学性能指标。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 试验钢热轧后的显微组织

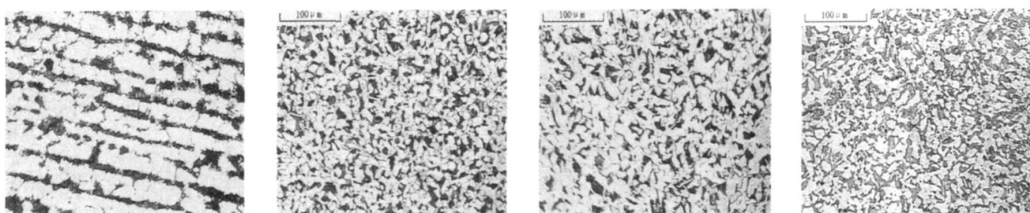
含硼钢经轧制后的室温组织为典型的铁素体

和珠光体, 如图 1a 所示, 珠光体沿着轧制方向延长, 呈条带状分布在铁素体之间, 铁素体则为不规则状的晶粒, 组织之间分界明显。Nb、V 微合金化含硼钢 (图 1b、1c、1d) 在热锻状态下的金相组织由大量的铁素体晶粒和少量的珠光体组成, 铁素体晶粒呈不规则的状态或多边形状态, 珠光体的分布也不均匀。

通过面积计算法来定量比较铁素体晶粒的大小可知, 单独加入 Nb、V 或同时加入 Nb、V 微合金化的含硼钢铁素体晶粒平均尺寸相差不大, 均小于 15 μm; 含硼钢的铁素体晶粒平均尺寸超过了 22 μm。对比说明, Nb、V 等元素的加入使得含硼钢的铁素体晶粒得到细化。

### 2.2 试验钢热处理后的显微组织

热处理后的低碳含硼钢和微合金化含硼钢的显微组织如图 2 所示。



(a) 含硼钢

(b) 含钒硼钢

(c) 含铌硼钢

(d) 含铌钒硼钢

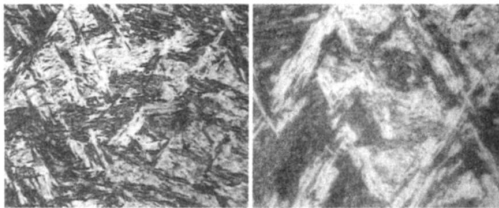
(w(V) = 0.096 %)

(w(Nb) = 0.022 %)

(w(V) = 0.03 %, w(Nb) = 0.028 %)

图 1 含硼钢和微合金化含硼钢的显微组织

试验钢经淬火、回火后的组织是低碳马氏体。这种组织具有良好的强度和韧性。一方面,低碳马氏体组织中溶解在原始铁素体内的碳原子与位错的弹性交互作用使得位错难以移动而造成固溶强化;另一方面,由于低碳马氏体特殊的板条结构和位错亚结构,在冲击力的作用下,能够吸收一部分冲击能量。



(a) 320 × (b) 800 ×  
图 2 试验钢热处理后的显微组织

### 2.3 试验钢的力学性能

#### 2.3.1 含硼钢的力学性能

不同碳含量的含硼钢热处理前后的抗拉强度如图 3 所示。

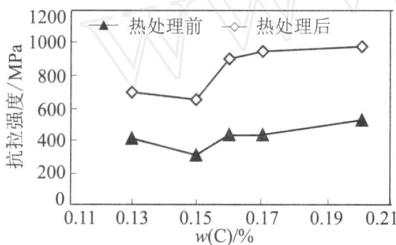


图 3 碳含量与含硼钢抗拉强度的关系

由图 3 可看出,热处理后含硼钢的抗拉强度得到了很大的提高,这与试验钢经热处理后的马氏体组织强化有关。随着碳含量的增加,含硼钢的抗拉强度呈上升的趋势,可见,碳含量的变化,显著影响着试验钢的强度性能。

另外,试验钢的断面收缩率在热处理前后没有明显的变化,均在 60 % 以上,而伸长率却从 34 % 下降到 14 %,但属于正常的水平。

#### 2.3.2 微合金化含硼钢的力学性能

图 4 为热处理后微合金化含硼钢的力学性能对比。

由图 4 可以看出,随 Nb、V 或 Nb + V 含量增加,微合金化含硼钢的抗拉强度呈升高趋势,其抗拉强度均超过了 1 250 MPa,其中最高的超过了 1 600 MPa。在微合金化元素含量范围内,铌钒

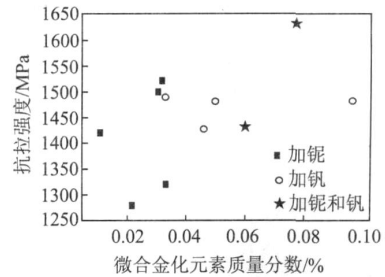


图 4 微合金化元素含量对含硼钢抗拉强度的影响

复合微合金化硼钢的平均抗拉强度最高,其次是含钒硼钢和含铌硼钢。含铌硼钢和含钒硼钢的平均断面收缩率超过了 35 %,铌钒复合微合金化硼钢的平均断面收缩率略低于 30 %,说明随强度升高断面收缩率降低。各类含铌、钒试验钢的平均延伸率略低于 8 %,其原因可能与试验钢的回火温度低,内应力较大有关。

#### 2.3.3 含硼钢与微合金化含硼钢对比

比较试验钢热处理后的平均抗拉强度可知,Nb、V 微合金化含硼钢的强度明显高于含硼钢,其平均抗拉强度均超过了 1 400 MPa,而含硼钢的平均抗拉强度仅在 800 MPa 左右。

## 3 讨论

Nb、V 微合金化提高含硼钢的强度,主要是由于 Nb、V 这两种元素在钢中的作用决定的。有关研究表明,Nb 的氮化物、碳化物可在高温奥氏体区内溶解,又在低温奥氏体区内析出,析出的碳、氮化铌有阻碍原始奥氏体晶粒长大作用。V 的氮化物和碳化物在奥氏体内几乎完全溶解,对控制奥氏体晶粒不起作用,V 的化合物仅在 / 相变过程中或相变之后析出,析出物非常细小。析出的 Nb、V 碳和氮化物对奥氏体晶界的钉扎作用使相变后铁素体晶粒得到细化。晶粒大小对强度影响的研究很多,并且取得了一致的结论。多边形铁素体晶粒尺寸  $d$  对不连续的屈服强度  $\sigma_s$  的影响可以用霍尔-佩奇 (Hall-Petch) 方程式来表示<sup>[3]</sup>:

$$\sigma_s = \sigma_0 + k d^{-1/2} \tag{1}$$

式(1)中: $\sigma_0$ 为应力常数,受点阵摩擦和溶质原子的影响; $k$ 为晶粒尺寸系数,与越过位错源所需要的应力集中有关。

由式(1)可知,晶粒尺寸越小,强度的增加越明显。对比含硼钢和微合金化含硼钢的铁素体晶粒大小,可见,晶粒的细化对强度的提高起到重要

的作用。

Nb、V 的沉淀强化作用已有多方面的研究,细小的 Nb 和 V 的碳、氮化物通过溶解-析出,进而沉淀强化而使钢的屈服强度增加。沉淀强化的强度增量取决于析出物颗粒的尺寸和析出物的体积分数,析出物越细小,析出物析出数量越多,强化效果越大。由 Nb 和 V 的碳、氮化物在不同温度下溶解度积可以得出,V 具有比 Nb 更强的溶解-析出行为,从而具有更强的沉淀强化作用。如在 1 000 ℃ 下,V 和 Nb 的碳化物溶解度积分别为  $1.8 \times 10^{-1}$  和  $1.6 \times 10^{-3}$ 。在铁素体晶粒尺寸差别不明显情况下,沉淀强化起到了主要的作用,于是含钒硼钢提高强度的作用强于含铌硼钢。Nb、V 复合微合金化硼钢强化的效果最好,可能与其析出的碳、氮化物粒子更小且数量较多有关。

#### 4 结 论

(1) 低碳含硼钢和微合金化含硼钢热轧后的室温组织为铁素体 + 珠光体,微合金化含硼钢的铁素体晶粒平均尺寸在 15 μm 以下,含硼钢的铁

素体晶粒尺寸在 22 μm 以上。Nb、V 微合金化细化了低碳含硼钢的铁素体晶粒。

(2) 低碳含硼钢经淬火、回火获得的低碳马氏体组织具有良好的强韧性,试验钢的抗拉强度得到大幅度提高。随着碳含量的增加,含硼钢的抗拉强度呈上升趋势。

(3) Nb、V 微合金化能显著提高低碳含硼钢的抗拉强度。Nb、V 复合微合金化含硼钢的强度最高,其次是含钒硼钢和含铌硼钢。分析表明,Nb、V 微合金化是通过细化铁素体晶粒和沉淀强化来提高低碳含硼钢的强度。

#### [参 考 文 献]

- [1] Korchynsky M, Stuart H. Proceedings of the symposium on low-alloy[J]. High-Strength Steels, 1970, 17-27.
- [2] 王瑞珍,章洪涛. 铌、钒微合金紧固件钢的研究[J]. 钢铁研究学报, 1994, 6(增刊): 10-17.
- [3] 翁宇庆. 超细晶钢-钢的组织细化理论与控制技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2003.

(修回日期: 2008-1-07)

(上接第 48 页)

间内,脱碳终点碳含量越低;随着浸渍管内径的增加,脱碳速率相应增大,但当浸渍管内径超过一定值后,再继续增大管径对脱碳速率的影响逐渐减弱;

(3) 利用 Microsoft Visual. Basic. net 程序设计软件以及 Microsoft SQL Server 2000 数据库软件,建立了 RH-TB 精炼脱碳过程离线数据库。模型通过离线测试后可以找出模型中存在的缺陷,进一步优化模型的结构参数。

#### [参 考 文 献]

- [1] Yamaguchi K. Effect of refining conditions for ultra low carbon steel on decarburization reaction in RH degasser[J]. ISIJ International, 1992, 32(1): 126.

(修回日期: 2008-08-26)

- [2] 靖雪晶,张立峰,蔡开科,等. RH 真空处理 IF 钢时脱碳行为的研究[J]. 南方钢铁, 1998, (8): 4-8.
- [3] 李 青,马志刚,杜 斌. RH 脱碳模型的建立和测试[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2002, 8(2): 119-123.
- [4] 汪明东. 130 t RH 脱碳模型建立及超低碳钢处理工艺优化[J]. 炼钢, 2003, 19(4): 15-19.
- [5] Kita Y, Satio. Refining technology for interstitial free steel in Kakogawa Works [C]// Steelmaking Conference Proceedings, 1990, 73: 79-84.
- [6] 刘 浏. RH 真空精炼工艺与装备技术的开发[J]. 钢铁, 2006, 41(8): 1-11.
- [7] Kuwabara T, Umezawa K. Investigation of decarburization behavior in RH-reactor and its operation improvement[J]. ISIJ International, 1988, 28(4): 305-314.