

文章编号:1671-6833(2011)01-0059-05

## B 对 ZG40MnCr 组织和性能的影响

孙玉福, 刘金庆, 王 璐, 赵靖宇

(郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对低合金钢 ZG40MnCr 淬透性和淬硬性不足的问题, 研究了合金元素硼对 ZG40MnCr 组织、力学性能及耐磨性能的影响。结果表明: 当 B 的质量分数为 0.005 9%, 经 880 ℃ 淬火 + 300 ℃ 回火处理后, 该铸钢具有良好的力学性能, 硬度达到 54.2 HRC, 冲击功达到 24.6 J, 获得的组织为回火马氏体 + 少量残余奥氏体 + 少量碳化物, 耐磨性与不加硼元素时相比提高了约 21%。

**关键词:** ZG40MnCr; B; 组织; 性能; 耐磨性

**中图分类号:** TG142 **文献标志码:** A

### 0 引言

微量合金化技术之所以得到迅速的发展和广泛的应用, 在于世界各国材料研究工作者 20 多年的通力研发, 以及美国、前苏联和其它一些国家的石油、天然气管线工程对管线钢不断提出高强度、高韧性、高可焊接性能及高耐蚀性的要求。近年来, 我国微量合金化技术加快了发展步伐, 硼是我国富有的元素, 价格低而且稳定<sup>[2]</sup>, 硼微量合金化铸钢可在相当低的成本下获得良好的强度和韧性, 并且具有优良的成形性及焊接性相结合的综合使用性能, 性价比较高<sup>[1]</sup>。该元素的加入使硼微量合金化铸钢具有良好的淬透性和淬硬性, 可以减少贵重合金元素的加入, 生产成本低廉。笔者针对低合金钢 ZG40MnCr 淬透性和淬硬性不足的

问题, 通过加入合金元素硼, 研究了合金元素硼对微量合金化铸钢力学性能及耐磨性能的影响, 以获得硬度和冲击功的良好配合。

### 1 试验内容和方法

#### 1.1 试样的制备

试验所用材料的熔炼采用 50 kW 酸性中频感应电炉, 熔炼时加料的顺序为: 废钢、生铁、硅铁、锰铁、铬铁、钛铁、硼铁和稀土硅铁, 出钢前用铝进行终脱氧。浇铸温度控制在 1 550 ~ 1 570 ℃。试验设计微量合金化铸钢成分见表 1。硼含量在 0 ~ 0.010% 之间变化, 具体设计含量见表 2。造型工艺为呋喃树脂砂型铸造, 浇铸成标准铸钢 Y 型试块。

表 1 微量合金化铸钢中各元素的质量分数

Tab. 1 Content of the element for micro-alloying steel

元素	C	Si	Mn	Cr	Ti	RE
含量	0.38 ~ 0.40	1.2	1.0 ~ 1.2	0.5 ~ 0.8	0.02	0.08 ~ 0.25

表 2 硼的质量分数

Tab. 2 Content of B

试样编号	1#	2#	3#	4#
硼含量	0	0.002	0.006	0.010

试验所用试样都取自浇铸的标准铸钢 Y 型试块。采用线切割机在试块上截取金相试样 (10 mm × 10 mm × 20 mm)、冲击试样 (10 mm × 10 mm × 55 mm 无缺口) 及耐磨试样 (Φ6 × 15 mm 圆柱形试样)。采用 ML-100 型磨料磨损试验机 (销盘

收稿日期: 2010-06-28; 修订日期: 2010-08-10

基金项目: 河南省教育厅科技攻关资助项目 (072102260023)

作者简介: 孙玉福 (1958-), 男, 河南浚县人, 郑州大学教授, 主要从事铸造合金材料的研究工作, E-mail: yufusun@zzu.edu.cn.

式,回转式磨料磨损机)进行耐磨性试验,试验条件为:磨程 50 m、磨料为 80  $\mu\text{m}$  (0.08 mm) 砂纸、载荷 6 N、失重量采用 AB204 - N 型电子分析天平 (0.1 mg) 称量. 用 HRS - 150 型洛氏硬度计测定试样的硬度,用 OLYMPUS BH - 2 金相显微镜进行金相观察,用 JB - 30 型摆锤式冲击试验机进行冲击试验 (冲击跨距为 40 mm),用 Philips - quanta - 2000 型扫描电子显微镜对冲击断口和磨损表面形貌进行扫描,了解断口形貌及断裂机理.

2 试验结果与分析

2.1 热处理工艺对 ZG40MnCr 钢力学性能的影响

在浇铸的 Y 型试块上切取 20 mm  $\times$  20 mm  $\times$  15 mm 四方体,将表面打磨平整,用直读光谱成分分析仪进行成分分析,分析结果见表 3.

2.1.1 淬火温度对 ZG40MnCr 钢力学性能的影响

图 1 为含不同硼量的 ZG40MnCr 钢在不同淬火温度下的力学性能. 可以看出,随着含硼量的增加,铸钢的硬度和冲击功也随之增加,合金元素硼表现出了良好的淬透性和固溶强化效果,但硼的质量分数超过 0.005 9% 时,铸钢的冲击功却开始下降. 相同含硼量条件下,从 850  $^{\circ}\text{C}$  随着淬火温度提高,硬度和冲击功均增加,温度高于 880  $^{\circ}\text{C}$  以后,硬度和冲击功均有不同程度的下降,可见其最佳的淬火温度为 880  $^{\circ}\text{C}$ ,这是因为 850  $^{\circ}\text{C}$  淬火时,淬火温度偏低造成奥氏体化不完全,奥氏体不够均匀,淬火组织不完全为马氏体,而当 910  $^{\circ}\text{C}$  淬火时,淬火温度偏高,得到的马氏体出现粗大的趋势,造成铸钢硬度和冲击功的下降.

表 3 试验材料的质量分数

Tab.3 Chemical components of test material

%

试样编号	C	Si	Mn	Cr	S	P	B	Ti
1#	0.39	1.2	1.1	0.55	0.028	0.025	0.000 0	0.021
2#	0.38	1.1	1.0	0.52	0.029	0.022	0.001 7	0.022
3#	0.41	1.3	1.1	0.68	0.024	0.026	0.005 9	0.019
4#	0.38	1.0	1.0	0.63	0.022	0.033	0.010 3	0.021

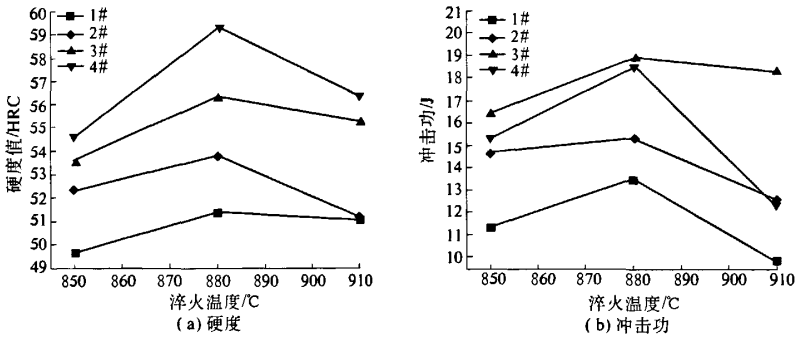


图 1 含不同硼量的试样在不同淬火温度下的力学性能

Fig.1 Mechanical properties of samples added different B at different quenching temperatures

2.1.2 回火温度对 ZG40MnCr 钢力学性能的影响

图 2 为不同含硼量的微量合金化铸钢在 880  $^{\circ}\text{C}$  淬火不同温度回火时的力学性能. 由图可知,铸钢的硬度随着回火温度的升高而降低,300  $^{\circ}\text{C}$  之前下降缓慢,300  $^{\circ}\text{C}$  之后显著下降;而冲击功却随回火温度的升高而升高,300  $^{\circ}\text{C}$  之前上升较快,300  $^{\circ}\text{C}$  之后略有减缓. 经 880  $^{\circ}\text{C}$  淬火 + 300  $^{\circ}\text{C}$  回火处理后,3#试样 (B 的质量分数为 0.0059%) 的铸钢硬度值达到 54.2 HRC,冲击功达到 24.6 J,表

现出了较好的力学性能. 最后,选取的热处理工艺为:880  $^{\circ}\text{C}$  淬火 + 300  $^{\circ}\text{C}$  回火.

2.2 硼对 ZG40MnCr 钢组织的影响

对铸态下的试样进行金相组织观察,结果如图 3 所示. 试样的铸态组织为片状珠光体组织 + 铁素体. 可以发现,当 B 的质量分数为 0.005 9% 时,铸态组织趋于均匀化,片状珠光体的片间距变小.

硼作为微量元素加入钢中,能显著提高钢的淬透性,但也可以与钢中残留的 N、O 化合形成稳定的夹杂物,而失去有益的作用. 硼在铁中只能微量

固溶,而且固溶形式是能够形成置换式和间隙式两种固溶体.只有以固溶形式存在的硼才起有益作用,硼在 $\text{Fe}_3\text{C}$ 中能够置换碳而大量固溶,成为含硼渗碳体 $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ ,这部分B大多富集或吸附在晶

界上.硼在奥氏体中的溶解度约为0.02%.另外硼与钛复合加入钢中,可形成细小的 $\text{TiB}_2$ ,改善铸钢的强度和耐磨性;若加入量过多,易在晶界上形成 $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 或硼化物使钢的脆性增大<sup>[3]</sup>.

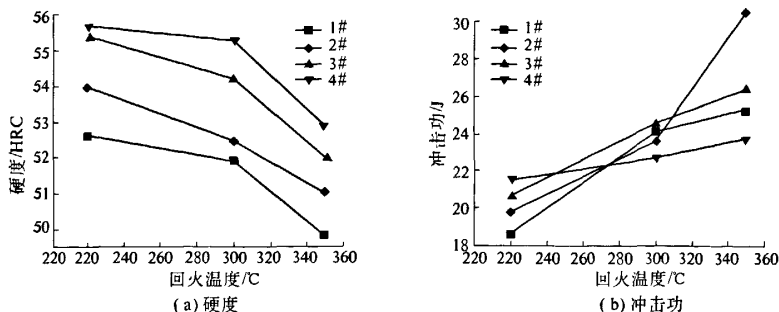


图2 不同含硼量的试样在880 °C淬火不同温度回火时的力学性能

Fig.2 Mechanical properties of samples added different B at 880 °C quenching temperature and different tempering process

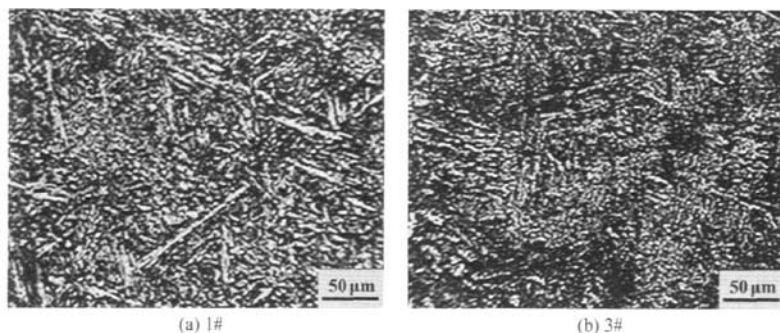


图3 铸态试样的金相组织

Fig.3 Metallographic structure of the as-cast samples

不同硼含量对ZG40MnCr钢的金相组织的影响如图4所示.图4分别为试样经880 °C淬火+300 °C回火后的金相组织.可以看出,试样的组织为回火马氏体+少量碳化物+少量残余奥氏体.随着含B量的增加,组织趋于细化和均匀,这说明在硼含量在0~0.01%范围内含硼量的范围内,硼具有良好的细化组织的作用.

### 2.3 硼对ZG40MnCr钢力学性能的影响

表4为不同含硼量的ZG40MnCr钢经880 °C淬火+300 °C回火后的硬度和冲击功.

由表4可见,不同含硼量的ZG40MnCr钢的硬度随硼含量的增加,逐渐升高.这是由于硼含量的增加,使试样中的含硼碳化物体积分数增多,基体得到强化,提高了钢的淬透性,使硬度呈上升趋势.试样的冲击功随着含硼量的增加,变化不是很明显.这是因为加入钢中的硼大部分以固溶形式存在,其余部分硼以硼碳化物的形式弥散分布于

基体中.

图5(a)是3#试样(B的质量分数为0.0059%)经880 °C淬火+300 °C回火处理后,冲击试样断口的扫描电镜的形貌及能谱分析图片.试样断口中韧窝较大,且非常深,属于微孔聚集型断裂,是典型的韧性断裂,韧性较好,冲击功较高.这是因为材料在300 °C回火时发生了过渡碳化物的沉淀,这种过渡碳化物(可以看成硬而且小的质点)弥散分布在淬火马氏体中,这些质点由于弥散强化而增加了材料的强度.从图5(a)的形貌图片中能看到分布于韧窝中小球,这是由于钢中的碳化物和夹杂物的塑性变形,而使其与基体在界面处产生分离,形成孔洞.而韧窝正是以析出相粒子和夹杂物为核心形成的.对这些析出相粒子进行能谱分析(图5(b)),发现这些颗粒的成分为Fe,C和O,根据各元素成分含量初步判定为Fe的氧化物和碳化物,作为第二相粒子影响试样

的冲击功.加硼处理后,由于硼是表面活性元素,吸附在氧化物、硫化物表面,组织夹杂进一步长大,使夹杂变得圆整、细小,均匀分布于晶界,基本消除了夹杂在晶界偏聚,强化了晶界,减小了局部应力集中,抑制了裂纹萌生,降低了裂纹扩展速度,使材料韧性提高.

表 4 不同含硼量的 ZG40MnCr 热处理后的力学性能  
Tab.4 Mechanical properties of ZG40MnCr with different boron added after heat-treatment

性能	1#	2#	3#	4#
硬度(HRC)	50.2	52.5	54.2	55.3
冲击功/(J)	25.8	23.6	24.6	22.7

2.4 硼对 ZG40MnCr 钢相对耐磨性的影响

从表 5 中看出,在相同的磨损条件下,3#试样(B 的质量分数为 0.0059%)与 1#试样(B 的质量分数为 0.0000%)相比,相对耐磨性提高了 21%.这是因为 3#试样硼的质量分数为 0.005 9%,晶内、晶界析出碳化物和未固溶的碳化物增多,由于碳化物的存在,在热处理过程中还能够作为奥氏体分解转变时新相的核心,抑制晶粒的长大,不仅提高了硬度,还有效改善了材料的冲击韧性,同时增强了抵抗磨粒磨损的能力.另外,基体中存在的弥散碳化物对材料的耐磨性也有一定的贡献,但由于析出的碳化物很少,因此作用不及硬度的影响大.

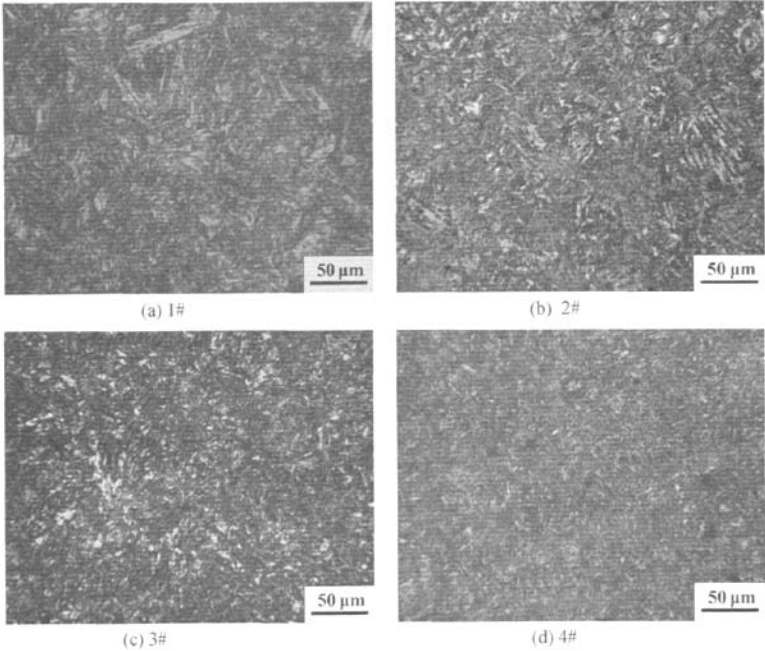


图 4 硼含量对微量合金化铸钢显微组织影响的图像照片

Fig.4 The image of boron concentration's effect on microstructure of mirco - alloying steel

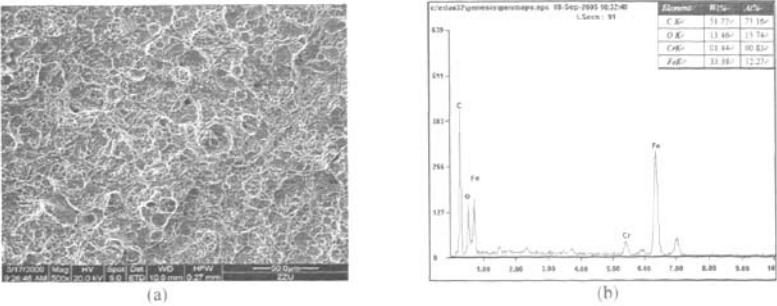


图 5 3#冲击断口试样的形貌及能谱分析

Fig.5 SEM impact fracture morphology normalized and Energy spectrum analysis of impact fracture of No.3 sample

表 5 不同含硼量的 ZG40MnCr 热处理后的耐磨性能  
Tab.5 Wear resistance of ZG40MnCr with different boron added after heat-treatment

性能	1#	2#	3#	4#
相对耐磨性	1.00	1.10	1.21	1.01

在低冲击磨料磨损条件下硼含量较高时可以提高耐磨性,这与硼的固溶强化有关.随着硼的固溶量的增加,引起晶格畸变增加,产生的  $\text{Fe}_3(\text{CB})$  的硬度增加<sup>[4]</sup>,从而硼碳化物的硬度升高.4#试样的相对耐磨性低于 3#试样的相对耐磨性,这是因为硬度和耐磨性之间不是简单的线性关系,随着含硼碳化物体积分数的增多对基体的割裂作用增强,材料的韧性有所下降,造成硬度和冲击韧性不能较好匹配,耐磨性有所降低.

### 3 结论

(1) ZG40MnCrB 的合理热处理工艺为:880 ℃ 淬火 + 300 ℃ 回火,组织为回火马氏体 + 少量碳化物 + 少量残余奥氏体.在 0 ~ 0.1% 范围内,

随着 B 含量的增加,组织趋于细化和均匀.

(2) B 的质量分数为 0.005 9% 的试样在经过 880 ℃ 淬火 + 300 ℃ 回火处理后,硬度达到 54.2 HRC,冲击功达到 24.6 J,具有较好的硬度和冲击功的配合.

(3) 经热处理后,B 的质量分数为 0.005 9% 的试样的相对耐磨性较好,比不含硼的试样的相对耐磨性提高了 21%.

### 参考文献:

- [1] 马捷. 低碳微合金化铸钢[J]. 铸造,1990(2): 13-21.
- [2] 宋绪丁,刘海明,符寒光,等. 硼含量对高硼铁合金组织和性能的影响[J]. 铸造,2008,57(5): 498-501.
- [3] 陈希杰. 高锰钢[M]. 北京:机械工业出版社,1989:100-105.
- [4] 梁义田,刘真. 合金元素在铸铁中的应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1992.

## Influence of B on Microstructure and Properties of ZG40MnCr

SUN Yu-fu, LIU Jin-qing, WANG Lu, ZHAO Jing-yu

(School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The influence of B addition on the microstructure, properties and wear resistance of ZG40MnCr was studied in this paper to solve the problem that the low alloy steel possesses favorable wearability yet lower hardenability at abrasive wear operating condition. The result showed that when adding 0.005 9% B and after quenching at 880 ℃ and tempering at 300 ℃, the better performance of ZG40MnCr can be obtained, the hardness and impact toughness reached 54.2 HRC and 24.6 J, the microstructure consisted of tempered martensite and residual austenite and trace amount of carbide, and the wear resistance improved 21% compared with the steel without B addition.

**Key words:** ZG40MnCr; B; microstructure; property; wear resistance