

# 硅锶复合孕育对含硼灰铸铁组织和性能的影响

何奖爱<sup>1</sup>, 赵培林<sup>1</sup>, 辛启斌<sup>1</sup>, 刘素兰<sup>1</sup>, 周艳欣<sup>2</sup>, 潘恩宝<sup>1</sup>, 张庆峰<sup>1</sup>, 王玉玮<sup>1</sup>

(1. 东北大学材料与冶金学院, 辽宁沈阳 110004; 2. 锦州经济技术开发区六陆实业股份有限公司, 辽宁锦州 121001)

**摘要:** 用不同配比 Si-Sr 与 Si-Fe 复合孕育剂对含硼灰铸铁孕育处理, 研究了 Si-Sr 复合孕育剂对其金相组织、力学性能及冶金质量指标的影响。结果表明: 随 Si-Sr 孕育剂量的增加, 含硼灰铸铁的抗拉强度、硬度随之递增。在 Si-Sr 含量为 0.12% 时抗拉强度达到峰值,  $\sigma_b = 325$  MPa; 在 Si-Sr 含量为 0.18% 时硬度达到峰值, HB = 273。此时, 石墨主要为 A 型分布, 共晶团细化, 硼碳化物呈小块状, 均匀分布在珠光体上, 珠光体 > 95%。当 Si-Sr 含量为 0.12% 时, 含硼灰铸铁的成熟度 RG = 1.13, 品质系数  $Q_i = 1.10$ , 各项冶金质量指标达到最优。

**关键词:** 含硼灰铸铁; 复合孕育剂; 力学性能; 金相组织; 冶金质量指标

**中图分类号:** TG251 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2005) 02-0164-04

## Effect of Silicon-Strontium Compound Inoculants on Boron Gray Cast Iron

HE Jiang-ai, ZHAO Pei-lin, XIN Qi-bin, LIU Su-lan, ZHOU Yan-xin, PAN En-bao, ZHANG Qing-feng, WANG Yu-wei

(1. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China;

2. Liulu Industrial Co., Ltd. of Jinzhou Economic & Technology Development Zone, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

**Abstract:** The Si-Sr and Si-Fe compound inoculants with different contents are used to treat the boron cast iron. With the addition of Si-Sr and Si-Fe, it is mainly studied the influence of the boron cast iron on its microstructure, mechanical properties and metallurgical quality index. Results show that the tensile strength and hardness increase gradually with increasing content of Si-Sr. When the ratio of Si-Sr is 0.12%, the maximum tensile strength is 325 MPa. Another the maximum data from hardness is 273 when the ratio of Si-Sr is 0.18%. Following the results, the shape of the graphite is A type and spread evenly. The finer eutectic cell is also obtained. The small block boron-carbide spreaded evenly in the pearlite is observed. The ratio of pearlite is more than 95%. When the ratio of Si-Sr is 0.12%, the RG is 1.13 and the  $Q_i$  is 1.10. These show that the quality of the boron cast iron is optimum.

**Keywords:** boron gray cast iron; compound inoculants; mechanical properties; microstructure; metallurgical quality index

含硼灰铸铁是高强度耐磨灰铸铁的一种, 用于生产汽缸套、活塞环、机床床身等对耐磨性要求较高的铸件, 其耐磨性能较普通灰铸铁和其它铸铁高。因此, 含硼灰铸铁近年已经随着硼资源的大力开发和利用得到了很快的发展。目前广泛采用的孕育处理与合金化的联合应用, 也大大提高了含硼灰铸铁的强度<sup>[1]</sup>。

孕育处理是得到高强度灰铸铁的必要措施, 可改善其基体组织和石墨形态、细化珠光体、促进石墨化以及增加共晶团数量等。目前, 常用的孕育剂有 75SiFe、Si-Sr、Si-Ba、C-Si、稀土等<sup>[2]</sup>, 其孕育效果各有侧重。孕育的同时添加一定量的合金元素, 如 Cu、Cr、B、Mn、Mo 等也可以提高铸铁的性能<sup>[3]</sup>。

本文着重研究了 Si-Sr 与 75SiFe 复合孕育剂对用含硼生铁生产的含硼灰铸铁的组织 and 性能的影响, 以

期能够满足生产高强度薄壁发动机缸套的要求。

### 1 试验方法及试验条件

将按比例配用的原材料放入石墨坩锅内, 用 15 kW 中频感应电炉熔化并过热至  $1420 \pm 10$  后出炉。采用插入式快速热电偶测量温度。孕育处理采用的是不同配比的 Si-Sr 和 75Si-Fe 复合孕育剂, 破碎粒度为 1~3 mm, 总加入量为铁液的 0.6%。各炉次硅锶合金的加入量分别为 (%): 0、0.06、0.12、0.18、0.24、0.36, 余量为硅铁。试验用料的化学成分见表 1。

采用包底孕育, 从孕育处理至浇注控制在 8 min 以内, 浇注温度 1330 。

抗拉试棒毛坯尺寸为 30 mm × 300 mm, 加工后尺寸为 25 mm × 25 mm。金相和硬度试样从抗

基金项目: 国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合资助 (530374024); 辽宁省科技厅资助项目 (2002221007)。

收稿日期: 2004-07-13 收到初稿, 2004-09-29 收到修订稿。

作者简介: 何奖爱 (1947-), 男, 湖南岳阳人, 教授, 主要从事耐磨材料及液态金属复合成形工艺研究。电话: 024-8368449

拉试棒上截取具有代表性的部分。用 Leica MPS 30 金相扫描系统观察金相组织。

表 1 试验用料各元素的质量分数

试验用料	C	Si	Mn	P	S	B	Cr	Sr	Ca	Al	Fe
含硼灰铸铁	3.27	2.00	1.16	0.02	0.03	0.081	0.3	-	-	-	余
含硼生铁	3.70	3.01	0.30	0.014	0.045	0.404	-	-	-	-	余
硅锶合金	-	75.12	-	-	-	-	-	0.855	0.1	0.36	余
硅铁合金	-	75	-	-	-	-	-	-	-	-	余

## 2 试验结果及分析

### 2.1 不同配比的复合孕育剂对力学性能的影响

#### 2.1.1 复合孕育剂对抗拉强度和硬度的影响

表 2 为不同配比的 Si-Sr、Si-Fe 复合孕育剂对含硼灰铸铁孕育处理后的抗拉强度和硬度的影响。

表 2 Si-Sr、Si-Fe 复合孕育剂对抗拉强度及硬度的影响

硅锶合金含量 (%)	0	0.06	0.12	0.18	0.24	0.36
抗拉强度/MPa	280	292	325	302	308	305
硬度值 HB	231	238	253	273	265	253

由表 2 看出，抗拉强度随 Si-Sr 含量的增加而先后增后减，最后基本趋于平稳。Si-Sr 含量为 0.12%，Si-Fe 含量为 0.48% 时抗拉强度最高达 325 MPa。当 Si-Sr 含量达到 0.18% 以后，抗拉强度的变化渐趋稳定。由表 2 可见，当 Si-Sr 含量小于 0.18% 时，硬度随着 Si-Sr 的增加逐渐升高；Si-Sr 含量为 0.18% 时，硬度最高达 HB273；随后，硬度逐渐下降。

#### 2.1.2 铸铁冶金质量指标比较

铸铁冶金质量决定了灰铸铁的力学性能。将灰铸铁的共晶度 ( $Sc$ )、成熟度 (RG)、相对强度 (RZ)、硬化度 (HG)、品质系数 ( $Qi$ ) 等质量指标作为分析和比较的参数。同一成分的铁液经过不同的处理，便能获得不同性能的铸铁。根据衡量灰铸铁质量指标的参数公式<sup>[4]</sup>，计算得出不同配比复合孕育剂孕育处理后的含硼灰铸铁质量指标见表 3。

对于灰铸铁来说，成熟度 RG 可在 0.5~1.5 内波

动，在 1.15~1.30 之间最好。品质系数  $Qi$  应该在 0.7~1.5 之间波动，最好控制在大于 1 的范围内<sup>[4]</sup>。由表 3 可以看出，含硼灰铸铁的成熟度和品质系数分别在 0.96~1.13 和 0.82~1.10。当 Si-Sr 含量为 0.12% 时，各项指标优良，成熟度  $RG=1.13$ ，品质系数  $Qi=1.10$ ，表明其孕育效果良好。

表 3 含硼灰铸铁孕育后的各项冶金质量指标

硅锶含量 (%)	0	0.06	0.12	0.18	0.24	0.36
成熟度 RG	1.08	1.00	1.13	0.97	0.96	1.00
相对强度 RZ	1.07	0.92	0.95	0.73	0.84	0.88
硬化度 HG	1.00	1.05	1.11	1.19	1.09	1.08
相对硬度 RH	0.96	1.05	1.03	1.20	1.11	1.08
品质系数 $Qi$	1.08	0.95	1.09	0.82	0.88	0.92

### 2.2 不同配比复合孕育剂对组织的影响

#### 2.2.1 Si-Sr、Si-Fe 复合孕育剂对石墨的影响

金相观察表明，未孕育的含硼灰铸铁的石墨形态主要是 E 型分布，片状、点状石墨呈枝晶状、方向性分布；经含量为 0.6% Si-Fe 孕育后，石墨以 A 型片状分布为主，同时有少量 E 型石墨，方向性不很明显，且大部分细化，有少量石墨比较集中，石墨数量有所增加。当加入 0.12% Si-Sr 时，石墨形态基本为 A 型分布，比加入 0.6% Si-Fe 后片状石墨细小且分布更为均匀。比较上述三种情况，Si-Sr 含量为 0.12% 时，石墨分布较前两种情况更为均匀，很少出现枝晶状石墨，显示其良好的孕育效果。总体看，随 Si-Sr 孕育剂含量的增加，石墨长度变化不大，基本上在 7~11  $\mu m$ 。图 1 为含硼灰铸铁孕育前后的石墨组织的金相照片。

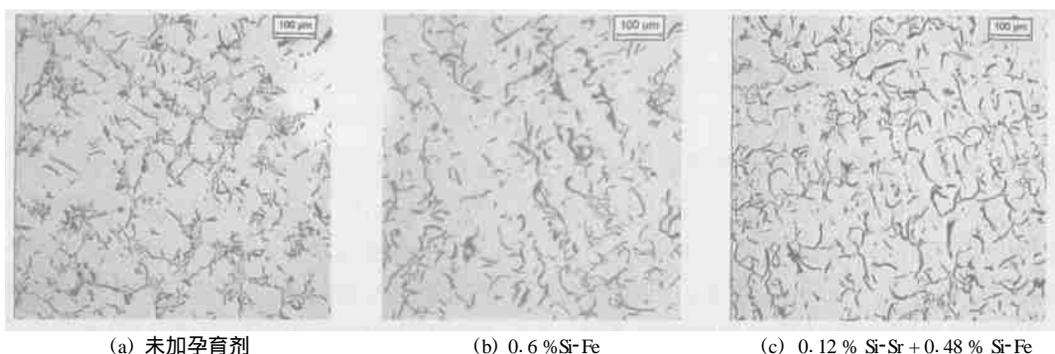


图 1 Si-Sr、Si-Fe 复合孕育剂对石墨的影响

Fig. 1 The effects of Si-Sr and Si-Fe compound inoculants on the graphite

### 2.2.2 Si-Sr、Si-Fe 复合孕育剂对共晶团的影响

图 2 为 Si-Sr、Si-Fe 复合孕育剂对共晶团的影响。由图可见，单加 Si-Fe 孕育剂时共晶团数比未孕育的有明显的增加；而加入 Si-Sr 孕育剂后，共晶团数有

所增加。随着 Si-Sr 孕育剂的增加，共晶团数也随之增加。在金相显微镜下，按 GB/T 7216—1987 标准测定，上述 4 种情况下，共晶团数 (个/cm<sup>2</sup>) 分别为 280、340、440、600。

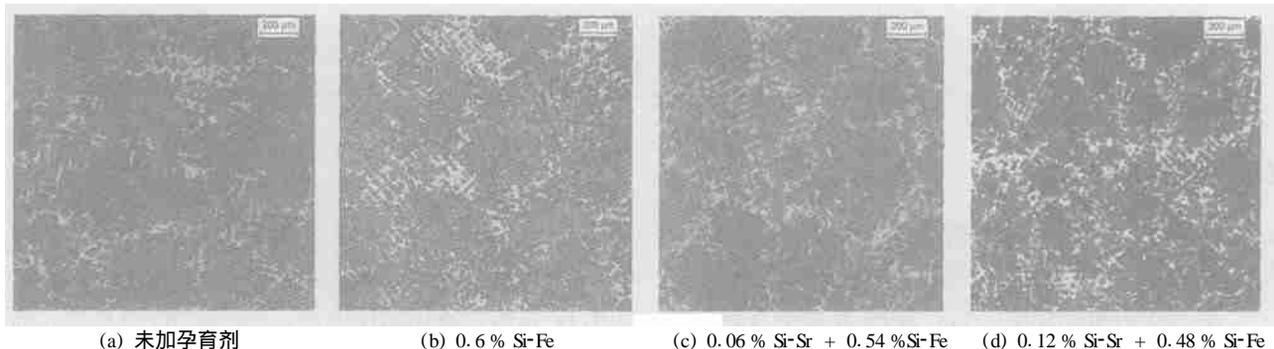


图 2 Si-Sr、Si-Fe 复合孕育剂对共晶团的影响

Fig. 2 The effects of Si-Sr and Si-Fe compound inoculants on eutectic cell

### 2.2.3 Si-Sr、Si-Fe 孕育剂对珠光体和碳化物的影响

图 3 为 Si-Sr、Si-Fe 不同含量复合孕育剂对珠光体及碳化物的影响。通过对图 3 中金相组织观察表明，未经孕育处理的含硼灰铸铁，碳化物数量占 10% 左右，而且分布不均匀，多种形态的碳化物共存，如连续网格状、断续网格状、马蹄状、小块状、大块状等。其中连续网格状数量居多，断续网格状次之，大块状也较多，马蹄型与小块状较少。经孕育处理后的碳化物组织尺寸明显减小，而且分布也比未孕育的均匀。加入 0.6% Si-Fe 孕育后，封闭的网格状碳化物消失，碳化物形态主要变为断续网格状、平行长条状；另外，小块状、马蹄状碳化物明显增多，其中马蹄状碳化物占碳化物总量的 67% 左右。加入含量为

0.06% Si-Sr 与 0.54% Si-Fe 后，碳化物总量要比单加 0.6% Si-Fe 的总量少，小块状碳化物增加，达到碳化物总量的 70% 左右，马蹄状碳化物明显减少，存在少量的大块状碳化物，约占碳化物总量的 5%。加入 0.12% Si-Sr 与 0.48% Si-Fe 复合孕育剂后，硼碳化物主要是以小块状孤立存在，均匀分布在基体上，仅存在少量的大块状碳化物，其总量少于 8%。

孕育后珠光体片间距减小，珠光体数量明显增多。未孕育、单一 Si-Fe 孕育、0.06% Si-Sr 及 0.12% Si-Sr 孕育的珠光体数量分别为：85%、90%、95%、95%。Si-Sr 孕育有利于含硼灰铸铁中珠光体数量的增加，从而提高其抗拉强度与硬度。

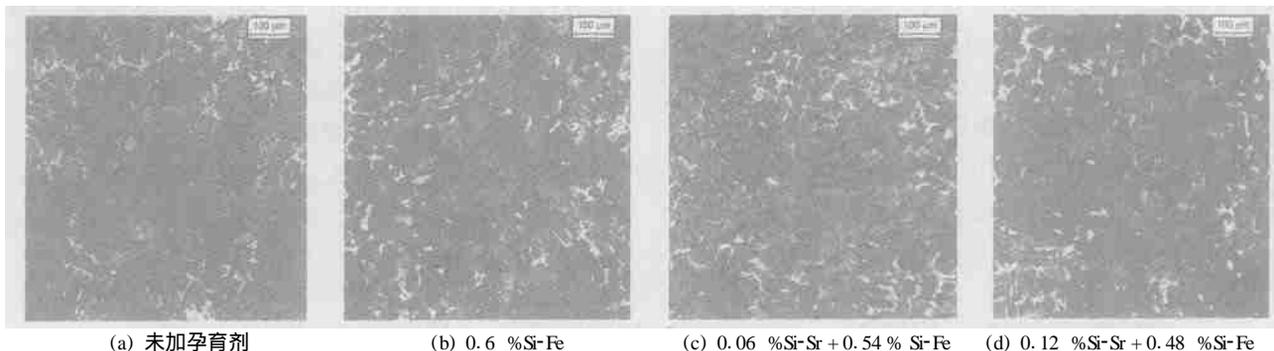


图 3 Si-Sr、Si-Fe 复合孕育剂对珠光体及碳化物的影响

Fig. 3 The effects of Si-Sr and Si-Fe compound inoculants on the pearlite and boron carbide

### 2.3 B、Cr、Sr 等合金元素对含硼灰铸铁的影响

铸铁中珠光体及碳化物对其性能影响很大，而合金元素通过对组织的影响间接影响到铸铁的宏观力学性能。含硼灰铸铁中的 B、Cr 及 Si-Sr 孕育剂中的 Sr 等元素的作用明显，对含硼灰铸铁的性能影响很大。

硼元素有激冷倾向，在普通灰铸铁中加入万分之几的硼后，组织中有部分的铁碳化合物共晶组织出

现。这种组织与快冷或加入铬等白口化元素出现的麻口组织相比较，石墨和碳化物非常细小，并且均匀分布，界面敏感性小，其碳化物呈白亮块状，数量和硬度随硼加入量的增加而提高<sup>[5]</sup>。硼铸铁凝固时，硼在奥氏体中的固溶度最大只有 0.018%，因此晶间的残留液体中富集硼元素，当富集到一定程度后，析出硼碳化物。有人对含 0.07%B、0.25%B 的硼铸铁样品

进行 X 射线衍射分析，结果表明由于 B 元素的加入，碳化物由  $Fe_3C$  转变为  $Fe_3C$ 、 $Fe_3(C, B)$ 、 $Fe_{23}(C, B)_6$  三种结构共存<sup>[6]</sup>。当硼铸铁孕育不良时，初生晶核的数量很少，尤其是初晶奥氏体的核心数量过少，从而造成析出的硼碳化物粗大不均，使整个组织不均匀；当孕育合适，产生了大量的外来初晶晶粒，尤其是使初晶奥氏体的核心数量增加，晶核细化，使奥氏体枝晶间产生的  $Fe_3(C, B)$ 、 $Fe_{23}(C, B)_6$  共晶碳化物也随之细化。随着硼的固溶量增加，晶格畸变增加， $Fe_3(C, B)$ 、 $Fe_{23}(C, B)_6$  的硬度也就增加。大量的硼碳化物的增加，从而使含硼灰铸铁的硬度增加<sup>[7]</sup>。

Cr 是促进碳化物形成元素。共晶凝固时，优先凝聚于碳化物，从而使碳化物的硬度增高<sup>[8]</sup>，间接影响到含硼灰铸铁的硬度。其次，它起到增加组织中奥氏体枝晶的作用。同时 Cr 也是一种反偏析元素和一种反石墨化元素，靠减少碳在铁液中的活度，限制石墨析出而增加组织中的枝晶数量<sup>[9]</sup>。

Sr 与 B 之间会有相互作用<sup>[10-12]</sup>。当 Sr 与 B 的含量适中时，会促进枝晶的生长，优化铸铁组织；反之，Si-Sr 加入不足，Sr 的孕育效果不明显；Sr 与 B 的含量增加，则 Sr 与 B 发生反应，产生“互毒化”作用<sup>[13]</sup>，影响到灰铸铁的性能，使其性能下降，孕育效果降低。本次试验所用的含硼灰铸铁 B 元素含量为 0.081%，Si-Sr 加入量为 0.06%~0.36%。孕育剂中随着 Sr 含量的增加，性能呈现先升后降的规律。因此，Si-Sr 孕育剂加入要控制好数量，以免 Sr 与 B 之间产生“互毒化”作用，影响孕育效果。

上述元素对含硼灰铸铁的作用机理不同，对其影响作用的大小也不一样。

### 3 结论

(1) 含硼灰铸铁用 Si-Sr、Si-Fe 复合孕育剂处理后，石墨由 E 型分布转变为 A 型分布；当 Si-Sr 含量为 0.12% 时，共晶团为 600 个/cm<sup>2</sup>。

(2) 随着 Si-Sr 含量的增加，珠光体数量逐渐增加，碳化物数量随之减少。碳化物形态由连续网格状、断续网格状变为以小块状、块状为主。当 Si-Sr 的含量为 0.12% 时，珠光体数量为 95%。

(3) Si-Fe、Si-Sr 复合孕育剂处理含硼灰铸铁时，成熟度为 0.96~1.13，品质系数为 0.82~1.10。当复合孕育剂中 Si-Sr 的含量为 0.12% 时，各项冶金质量性能指标优良。

(4) 随着 Si-Sr 含量的增加，抗拉强度逐渐增加，当 Si-Sr 的含量为 0.12% 时，抗拉强度最高， $\sigma_b = 330$  MPa；随着 Si-Sr 含量增加，硬度增大，Si-Sr 含量达到 0.18% 时，硬度最高，HB = 273。

### 参考文献：

- [1] 中国机械工程学会铸造分会编. 铸造手册 (第一卷) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 1-2
- [2] 王春祺. 铸铁孕育理论与实践 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1991. 90-92
- [3] 曾大本. 灰铸铁研究与生产的最新进展及展望 [J]. 现代铸铁, 1999, (1): 5-6
- [4] 陆文华, 李隆胜, 黄良余. 铸造合金及熔炼 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 42-43, 140-183
- [5] 梁义田, 刘真, 袁森. 合金元素在铸铁中的应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 96
- [6] 李长发. 用含硼生铁作加硼剂研究硼抗磨铸铁的组织结构与性能 [D]. 沈阳: 东北大学, 1995. 76
- [7] 何奖爱, 刘越, 王玉玮, 等. 硼系耐磨铸铁的发展及应用 [J]. 内燃机配件, 1996, (4): 8-9
- [8] 冈平本 (日). 耐磨白口铸铁 [J]. 铸锻造与热处理, 1983, (2): 1-8
- [9] 高岩, 曾效舒, 魏华玉. 利用余热生产金属型薄壁铁素体球铸件的研究 [J]. 铸造技术, 1999, (2): 50-53
- [10] Kulunk B, Zulian D J. Applications for the strontium treatment of wrought and die cast Al [J]. JOM, 1996, 48 (10): 60-63
- [11] Mahmoud H F, Toshiro K. Mechanical properties of modified and non-modified eutectic Al2Si alloys [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1994, 44 (1): 28-34
- [12] Yilmaz F, Atasoy O A, Elliott R. Growth structures in aluminium-silicon alloys ( ) the influence of strontium [J]. Journal of Crystal Growth, 1992, 118 (3-4): 377-384
- [13] 廖恒成. 铸造 Al-Si 合金中 Sr 与 B 的交互作用 [J]. 中国有色金属学报, 2003, (13): 353-356

(编辑: 张允华, zyh@foundryworld.com)

## 招 聘 启 事

韩国永东工业 (株)

### 职位要求：

1. 学历：大学专科以上
2. 专业：金属铸造
3. 年龄：35 岁以上
4. 其他：负责本公司新产品的开发及质量管理，具有金属铸造的专门知识和公司管理能力，可长驻山西。

### 联系方式：

621 - 801

10 - 5, Jukok-Ro, Jinyeong-Eup, Gimhae-Si, Gyeongnam, KOREA

电话：+82 - 55 - 342 - 5001~2

传真：+82 - 55 - 342 - 5186

网站：www.yongdongind.com