

氮对合成灰铸铁组织和性能的影响

王谦谦¹, 孙玉福¹, 靳存文², 申晶洁¹

(1. 郑州大学材料科学与工程学院, 河南郑州 450002; 2. 河南省金太阳铸造有限公司, 河南新乡 453000)

摘要: 研究了氮对合成灰铸铁组织和性能的影响, 结果表明: 含氮量为0.005 5%~0.013%时, 试样的金相组织为A型石墨+细片状珠光体+少量铁素体。随着含氮量的增加, 片状石墨长度变短、宽度稍有增加, 弯曲程度加大, 石墨端部钝化, 对基体的割裂作用减弱; 细片状珠光体含量略有增加, 珠光体层片间距减小; 试样的抗拉强度和硬度逐渐增大, 当含氮量为0.012%时, 试样的抗拉强度和硬度达到最大值, 分别为395 MPa和HBW260。当铁液中含氮量 $\geq$ 0.011%时, 铸件表面下开始出现气孔缺陷。

关键词: 氮; 灰铸铁; 显微组织; 抗拉强度

中图分类号: TG143.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2015) 06-0512-05

Effect of Nitrogen on Microstructure and Properties of Gray Cast Iron

WANG Qian-qian¹, SUN Yu-fu¹, JIN Cun-wen², SHEN Jing-jie¹

(1. Material Science and Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, Henan, China;

2. Henan Golden Sun Foundry Company Limited, Xinxiang 453000, Henan, China)

Abstract: The effect of N on microstructure and properties of gray cast iron were studied in this paper. The results indicate that microstructure of the samples containing 0.005 5%-0.013% N was composed of A-type graphite, fine lamellar pearlite and a little ferrite. With the increase of N, the length of flake graphite descend, the width increased slightly, and graphite became more blunt, which reduced the adverse influence of graphite on the matrix; the fine lamellar pearlite content increased slightly, and the pearlite interlamellar spacing decreased. The tensile strength and hardness of samples increased gradually with the increase of N. The gray cast iron containing 0.012% N, both the tensile strength and hardness of the specimens reached their maximum values, which were 395 MPa and HBW 260 respectively. Pores began appearing under casting surface when N content exceeded 0.011%.

Key words: nitrogen; gray cast iron; microstructure; tensile strength

灰铸铁是一类来源广泛、生产成本低廉、具有独特综合工程性能的铸造合金, 作为国民经济中重要的基础材料, 灰铸铁因具有优良的铸造性能、切削加工性能、减摩与耐磨性能、减振性能、较为简单的生产方法以及能够铸造形状较为复杂的零件, 而被广泛的应用于机械制造、交通运输、冶金、石油化工、建筑和国防工业等部门^[1-2]。近年来, 随着科学技术的进步和国民经济的飞速发展, 铸铁产量逐年增加, 生铁资源紧缺, 优质生铁更是供不应求, 价格不断上涨; 相反, 我国的废钢供应十分充裕, 而且价格也相对较低廉, 面对日益严峻的市场形势, 国内外铸件生产企业开始采用合成铸铁工艺, 即利用废钢、配合适当铸铁回炉料, 通过炉内增碳和炉外孕育处理相结合生产合成铸铁^[3]。经过广大生产企业的实践和科研工作者的

大量研究表明, 合成灰铸铁中石墨细小、弯曲、钝化, 石墨分布密集、均匀、无方向性; 基体晶粒较小, 珠光体的层片状结构较细, 这些组织特点有利于提高灰铸铁铸件的力学性能^[4-6]。

目前, 国内外的高强度合成灰铸铁铸件主要是通过加入一定量的铬、铜、钼、镍、锡^[7-8]等合金元素来生产, 随着国内外钼铁和镍等合金价格的不断上涨, 按传统工艺来生产高强度灰铸铁势必会给生产企业带来成本压力, 制约产品在市场中的竞争力, 降低企业的经济效益。本试验以氮化锰铁为增氮剂, 在HT250的基础上研究微合金元素氮对合成灰铸铁组织及性能的影响, 在提高灰铸铁力学性能的基础上降低生产成本。

收稿日期: 2015-02-09收到初稿, 2015-03-09收到修订稿。

作者简介: 王谦谦 (1993-), 男, 硕士生, 从事铸铁的研究工作。E-mail: 1107598317@qq.com

通讯作者: 孙玉福, 男, 教授。E-mail: yufusun@zzu.edu.cn

1 试验过程及方法

本试验采用中频感应电炉进行熔炼，熔炼之前须将生铁、回炉料、合金材料等原材料进行烘干、除锈、除油等处理，确保带入炉内杂质最少；孕育剂为硅钙钡，其加入量为铁液质量的0.3%~0.4%，加入方式采用包底孕育+随流孕育复合工艺；铁液出炉温度为1 500~1 520 ℃，浇注温度为1 350~1 360 ℃，浇注Y型单铸试块，在Y型试块上截取金相试样，使用OLYMPUS BH-2金相显微镜和配套EDAX能谱分析的Philips-quanta-2000型扫描电子显微镜观察金相组织，使用SHT4605型万能拉伸试验机测量灰铸铁的抗拉强度，使用HB300布氏硬度计测量不同试样的布氏硬度。

2 结果与讨论

2.1 化学成分分析

采用日本岛津5500 II -OES型直读光谱仪测量增氮后的灰铸铁试样的化学成分见表1。

2.2 氮对灰铸铁组织的影响

2.2.1 氮对灰铸铁石墨组织的影响

图1是未经腐蚀的含氮灰铸铁试样的金相图片。根据国家标准GB/T 7216—2009《灰铸铁金相检验》对石墨形状和石墨长度进行评级，评定结果见表2。

表1 含氮灰铸铁试样的化学成分

Table 1 The chemical compositions of samples alloyed with N							$w_B/\%$
试样号	C	Si	Mn	P	S	N	
1	3.26	1.82	1.0	0.034	0.088	0.005 5	
2	3.22	1.83	1.09	0.032	0.085	0.007 1	
3	3.24	1.82	1.21	0.031	0.088	0.008 5	
4	3.21	1.83	1.24	0.035	0.087	0.011	
5	3.22	1.81	1.33	0.032	0.084	0.012	
6	3.24	1.83	1.36	0.034	0.088	0.013	

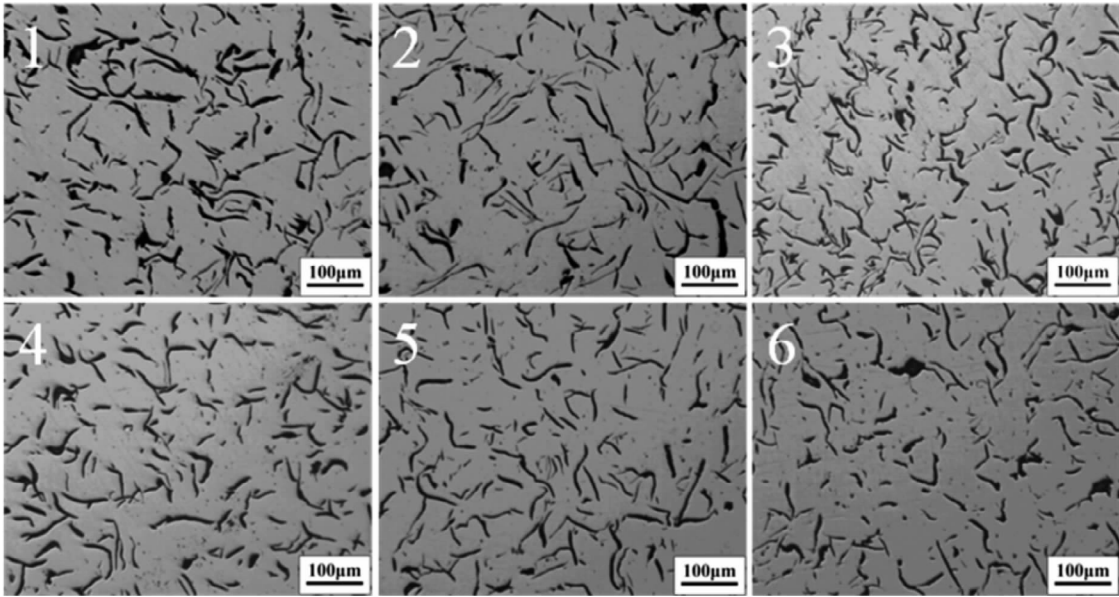


图1 含氮灰铸铁试样的石墨组织形貌（未腐蚀）

Fig. 1 The microstructure structure of samples alloyed with N before etched

表2 石墨形状和石墨长度评定结果

Table 2 the results of graphite evaluation						
试样编号	1	2	3	4	5	6
石墨形状	A型	A型	A型	A型	A型	A型
石墨长度	4级	4级	5级	5级	5级	5~6级

从图1中可以看出，含氮灰铸铁试样中的石墨类型为A型，呈无方向性均匀分布。随着含氮量的增加，试样中片状石墨长度变短、宽度稍有增加，弯曲程度增加，石墨端部钝化。在共晶转变过程中，铁液中的

氮原子不断吸附在石墨长大前沿，并固溶于石墨中；吸附在石墨表面的几个原子层厚度的氮阻碍了金属液中碳原子向石墨中扩散，从而阻碍了片状石墨的生长^[9]，使共晶转变形成的奥氏体中碳浓度提高，形成的石墨数量下降；固溶于石墨中的氮主要通过增加石墨内部结构的不完整性，使石墨晶体点阵产生畸变，造成片状石墨弯曲，石墨表面粗糙和石墨分枝增多。

2.2.2 氮对灰铸铁基体组织的影响

将金相试样在4%硝酸酒精溶液中进行浸蚀，在金

相显微镜下观察试样的金相组织，并采集金相组织照片，图2是含氮灰铸铁试样的金相组织图片。根据GB/T 7216—2009《灰铸铁金相检验》对含氮灰铸铁金相组织中珠光体数量和珠光体粗细等级进行评定，评定结果见表3。

从图2中可以看出，含氮灰铸铁试样的金相组织为片状石墨+珠光体+少量铁素体。组织中的片状石墨周

围相对较亮的组织为少量铁素体+粗片状珠光体，其他较暗区域的组织为细片状珠光体和索氏体型珠光体。随着含氮量的增加，试样基体组织中粗片状珠光体比例减少，珠光体层片状间距减小。

含氮灰铸铁试样在扫描电子显微镜下金相组织形貌如图3所示。

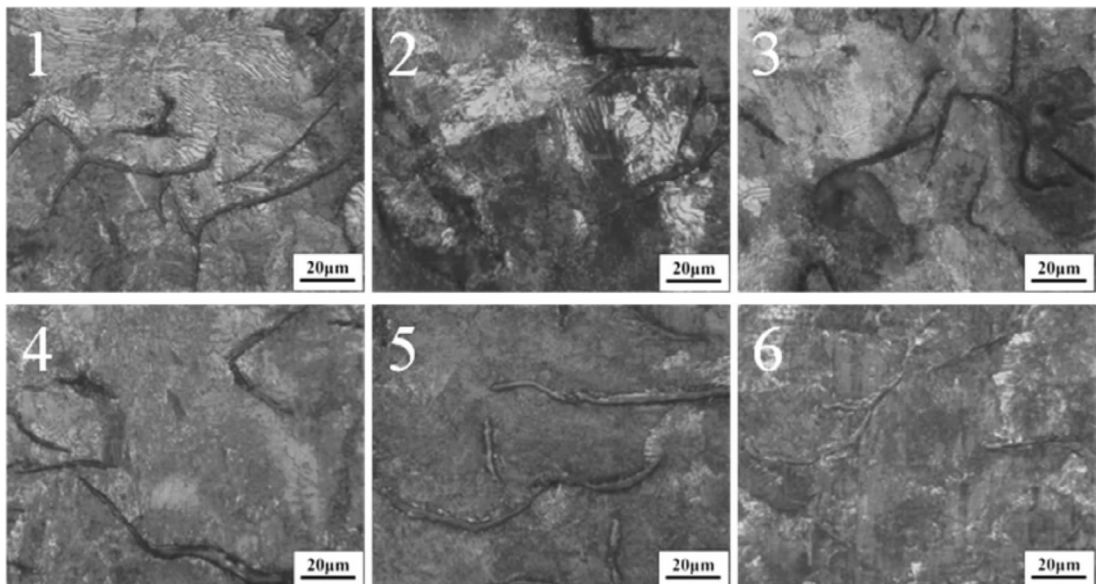


图2 含氮灰铸铁试样的金相组织（腐蚀后）
Fig. 2 The microstructure of samples alloyed with N after etched

表3 试样金相组织分析

Table 3 The analysis of samples microstructure

试样编号	1	2	3	4	5	6
珠光体数量/%	95~98	95~98	95~98	>98	>98	>98
珠光体粗细等级	片状	细片状	细片状+索氏体型	细片状+索氏体型	细片状+索氏体型	细片状+索氏体型

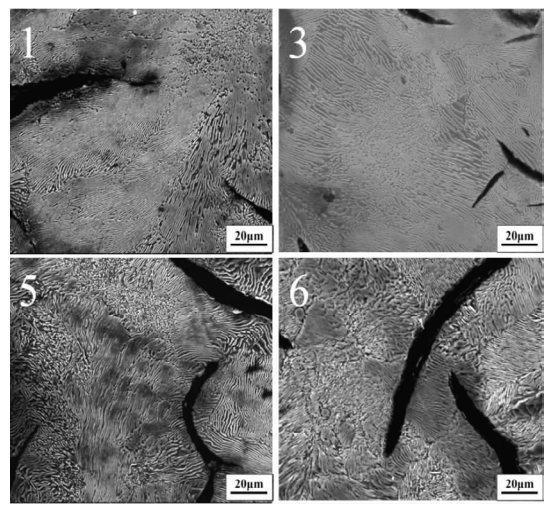


图3 含氮灰铸铁试样扫描电镜下的组织形貌
Fig. 3 The microstructure of samples at high magnification

图3为含氮灰铸铁试样在扫描电子显微镜高倍数下的金相组织，从图中可以看出，试样的基体组织为珠光体+极少量夹杂物。随着含氮量的增加，试样中珠光

体层片间距略有减小。氮是稳定并能细化珠光体的元素，含氮量在一定范围内可以有效抑制铁素体的形成。灰铸铁的共析转变温度与含氮量具有显著的线性关系，随着含氮量的增加，灰铸铁的共析转变开始温度及终了温度都降低，但共析转变终了温度下降幅度较大，致使共析转变温度区间增大，共析转变过冷度增加^[10-11]，从而稳定并细化珠光体，消除铁素体。

2.2.3 含氮灰铸铁基体组织中的元素分布

试样6局部区域中各元素在基体组织中的分布如图4所示。

从图4中可知，碳大部分以石墨形式存在，一部分形成渗碳体，还有一部分固溶于铁素体之中；硅均匀的固溶于基体之中；锰、硫一部分固溶于基体中，一部分形成MnS或（Mn，Fe）S颗粒，镶嵌在基体中；氮一部分固溶于石墨中，一部分固溶于金属基体之中，呈均匀分布。氮原子的原子半径（0.071 nm）小于碳（0.077 nm）和铁（0.125 nm）的原子半径，可以作为间隙原子固溶在铁素体和渗碳体中。

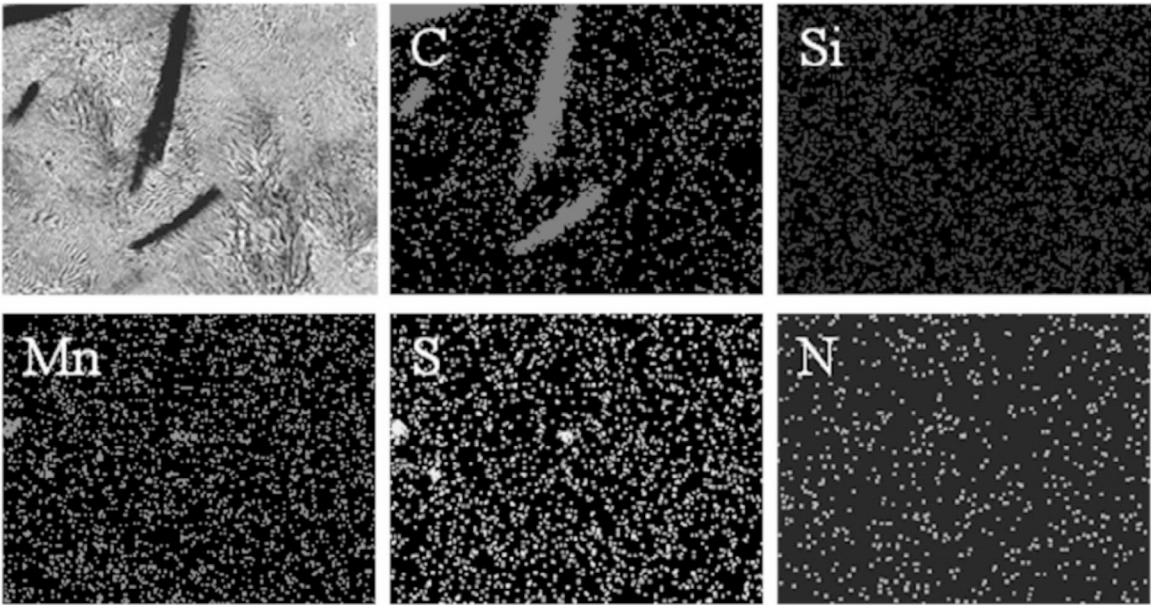


图4 试样6基体组织面扫描分析
Fig. 4 The EDS analysis of C, Si, Mn, S and N elements

2.3 氮对灰铸铁力学性能的影响

表4为不同含氮量的灰铸铁单铸试棒的抗拉强度和硬度值。从表4中可知，试样1的抗拉强度和硬度最小，分别为280 MPa和HBW229；试样5的抗拉强度和硬度最高，分别为395 MPa和HBW260。铸件1、2和3表面经机加工后未发现气孔缺陷，而铸件4、5和6表面经机加工后发现气孔缺陷。

图5为灰铸铁中含氮量与试样抗拉强度和硬度的关系曲线。从图5中可以看出，随着含氮量的增加，灰铸铁试样的抗拉强度和硬度逐渐增大，当含氮量为0.012%时，试样的抗拉强度和硬度达到最大值，分别为395 MPa和HBW260；随着含氮、锰量继续增加，试样的抗拉强度和硬度下降，当含氮量为0.013%时，试样的抗拉强度和硬度降低为383 MPa和HBW235。当含氮量≥0.011%时，铸件表面下开始出现气孔缺陷。

含氮量对灰铸铁的抗拉强度和硬度有较大影响，主要有以下几个方面原因：在共晶转变中，氮原子不断吸附在石墨长大前沿，并固溶于石墨中，阻碍片状石墨的生长，减小片状石墨的长宽比，增加石墨弯曲程度，钝化石墨端部，增加石墨分枝，细化石墨组织，从而减少石墨对基体的切割作用；氮可以降低灰铸铁共晶转变终了温度，增大共晶转变温度区间，增加共晶转变过冷度，细化共晶团；减小初生奥氏体二次臂间距，细化二次枝晶^[12]；氮是稳定珠光体元素，可以降低灰铸铁的共析转变终了温度，加大共析转变温度区间，增大共析转变过冷度，从而细化稳定珠光体；氮原子的原子半径（0.071 nm）小于碳（0.077 nm）和铁（0.125 nm）的原子半径，可以作为间隙原子固溶在铁素体和渗碳体中，使其产生晶格畸变，造成弹性

应力场，增大位错运动阻力，强化基体组织。综合以上因素，在灰铸铁中添加微量的氮可以显著提高灰铸铁的抗拉强度和硬度。

表4 含氮灰铸铁试样的抗拉强度和硬度
Table 4 The tensile strength and hardness of samples alloyed with N

试样 编号	抗拉强度 /MPa	硬度 HBW	备注
1	280	229	铸件表面加工后无缺陷
2	290	239	铸件表面加工后无缺陷
3	307	237	铸件表面加工后无缺陷
4	370	253	铸件表面加工后有微量气孔缺陷
5	395	260	铸件表面加工后有微量气孔缺陷
6	383	235	铸件表面加工后有明显气孔缺陷

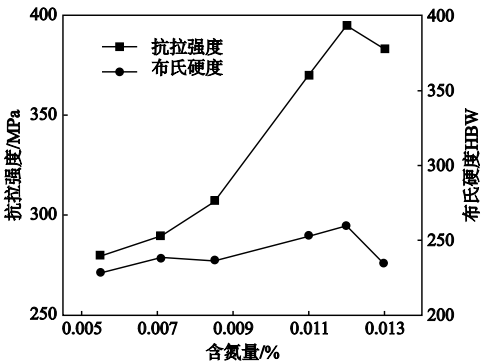


图5 含氮量与试样抗拉强度和硬度的关系曲线
Fig. 5 The relationship between N content and tensile strength, hardness

3 结论

(1) 含氮灰铸铁试样的金相组织由片状石墨、细片状珠光体和极少量夹杂物组成。

(2) 随着含氮量的增加, 含氮灰铸铁试样组织中片状石墨长度变短、宽度稍有增加, 弯曲程度加大, 石墨端部钝化, 石墨形态的改变减小了石墨对基体组织的割裂作用; 随着含氮量的增加, 细片状珠光体含量略有增加, 珠光体层片间距略有减小, 在一定范围内, 氮可以有效抑制铁素体的析出, 促进珠光体的形成。

(3) 随着含氮量的增加, 灰铸铁试样的抗拉强度和硬度逐渐增大, 当含氮量为0.012%时, 试样的抗拉强度和硬度达到最大值, 分别为395 MPa和HBW260; 当含氮量大于0.012%时, 试样的抗拉强度和硬度呈现下降趋势。

(4) 当铁液中含氮量 $\geq 0.011\%$ 时, 铸件表面下开始出现气孔缺陷。

参考文献:

- [1] 孙智, 倪宏听, 彭竹琴. 现代钢铁材料及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 辜祖勋. 对影响灰铸铁铸件质量的一些问题的探讨 [J]. 铸造, 2003, 5 (25): 356-360.
- [3] 洪利兵, 阳家丽. 用合成铸铁大量生产铸态铁素体球墨铸铁 [J]. 中国铸造装备与技术, 1999, (5): 51-52.
- [4] 李长龙, 赵忠魁, 王吉岱. 铸铁 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 9-14.
- [5] 司乃朝, 张芳芳, 姜金文. 合成铸铁工艺的试验研究 [J]. 铸造, 2006, 55 (8): 799-802.
- [6] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理 [M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 244-248.
- [7] 杨家群. 加微量锡生产高强度薄壁灰铸铁件 [J]. 铸造, 1992, 41 (6): 33-34.
- [8] 臧金平, 于赞, 杜春波, 等. Sn含量对灰铸铁件加工面硬度的影响 [J]. 铸造, 2009, 58 (3): 293-294.
- [9] 翟启杰, 胡汉起. 氮对灰铸铁中石墨组织的作用 [J]. 金属学报, 1992, 28 (10): B453-B456.
- [10] 李荣德, 杨景祥, 于海朋. 氮在灰铸铁凝固过程中的作用 [J]. 沈阳工业大学学报, 1989, 11 (3): 155-162.
- [11] 翟启杰, 胡汉起. 氮对灰铸铁平衡及非平衡相变温度的影响 [J]. 钢铁研究学报, 1991, 3 (3): 63-68.
- [12] 翟启杰, 胡汉起. 氮对灰铸铁初生奥氏体二次枝晶组织的影响 [J]. 北京科技大学学报, 1994, 16 (2): 127-130.

(编辑: 刘冬梅, ldm@foundryworld.com)

(选自《铸造》2015年第6期)