DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.07.004

硅铁和稀土复合孕育对高碳灰铁组织与性能的影响

许荣福[1],李常厚[1],孙向成[2],时月亚[1],姜文韬[1]
(1.山东建筑大学 材料科学与工程学院,山东 济南 250101;2.烟台南山学院,山东 龙口 265706)

摘　要:以高碳灰铸铁为研究对象,研究硅铁和稀土的复合孕育对其组织与力学性能的影响。实验结果表明:在硅铁加入量不变的情况下,随着稀土加入量的增加,片状石墨形貌发生变化甚至出现球化现象;当稀土加入量为1.2%时,石墨开始蠕化,基体中开始出现莱氏体和珠光体;当稀土加入量为1.4%时,石墨开始球化,基体中珠光体含量减少、莱氏体数量增多;当稀土加入量达到2.0%时,球化率继续升高,基体中大量出现莱氏体;随着稀土加入量的增加,所得的高碳灰铸铁的力学性能呈增加的趋势,当稀土加入量超过1.0%时,其力学性能增加明显,抗拉强度超过450 MPa。

关键词:高碳灰铸铁;复合孕育;稀土;力学性能

中图分类号:TG251　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)07-0612-04

Effects of Ferrosilicon and Rare Earth Compound Inoculation on the Microstructure and Properties of High Carbon Gray Iron

XU Rongfu[1], LI Changhou[1], SUN Xiangcheng[2], SHI Yueya[1], JIANG Wentao[1]
(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China; 2. Yantai Nanshan University, Longkou 265706, China)

Abstract: The effect of the compound inoculation of ferrosilicon and rare earth on the microstructure and mechanical properties of high carbon gray cast iron was studied. The results show that the morphology of flake graphite changed and even spheroidized with the increase of the amount of rare earth when the amount of ferrosilicon is unchanged. When the rare earth content is 1.2%, the graphite began to vermicularize, and leustenite and pearlite began to appear in the matrix. When the amount of rare earth is 1.4%, the graphite began to spheroidize, the pearlite content in the matrix decreased, and the amount of lestenitic increased. When the amount of rare earth is up to 2.0%, the spheroidization rate continued to increase, and a large number of leitenitic bodies appeared in the matrix. With the increase of rare earth content, the mechanical properties of high carbon gray cast iron show an overall increasing trend. When the rare earth content exceeds 1.0%, the mechanical properties of high carbon gray cast iron increase significantly, and the tensile strength exceeds 450 MPa.

Key words: high CE gray iron; complex inoculation; rare earth; mechanical property

灰铸铁是生产中重要的结构材料并获得广泛应用[1-3]。高碳灰铸铁一般是指含碳量在3.6%以上的一类铸铁,此类铸铁具有良好的铸造性能和减磨性能[4]。当前,广大科技工作者对铸铁的凝固过程、变质处理以及合金元素对灰铸铁组织和性能的影响进行了大量系统地研究[5-8],这些研究所用灰铸铁成分的碳含量在3.6%以下,对于高碳灰铸铁的研究较少;与普通灰铸铁件相比,高碳灰铸铁件由于含碳量高,因此具有良好的导热性能和润滑作用[9]。随着铸造生产技术的不断发展,高碳灰铸铁的应用将会越来越广泛,但高碳灰铸铁的强度较低,严重地阻碍了它的应用。因此,本文以高碳灰铸铁为研究对象,研究硅铁和稀土的复合孕育处理对高碳灰铸铁的组织和性能的影响,以期为控制高碳灰铸铁性能提供一定的思路和途径。

1　实验材料与方法

1.1　实验用材料及设备

原生铁、回炉料、废钢、硅铁、锰铁、增碳剂、稀土等,表1是实验所用原材料的化学成分;100 kg中频感应电炉;直径250 mm落地砂轮机;P-1型台式抛光机(抛光布、抛光粉);XIP-6A型金相显微镜;HBRV-1型电子布氏硬度计(压球为钢球,直径为

收稿日期:2020-04-22
基金项目:山东建筑大学博士基金(XNBS1430)
作者简介:许荣福(1984-),山东临朐人,博士,讲师.研究方向:铸造清洁化生产及合金材料.电话:0531-86367286,E-mail:xrf168@163.com

表 1 实验所用原材料的化学成分 w(%)
Tab.1 the chemical composition of the raw material used in the experiment

炉料名称	C	Si	Mn	Cr	S	P
原生铁	4.30	1.9	0.90	-	<0.05	<0.05
废钢	0.20	0.3	0.30	-	<0.02	<0.02
回炉料	3.32	1.9	0.85	0.025	<0.05	<0.05
锰铁	-	-	70.00	-	-	-
硅铁	-	72.0	-	-	-	-

ϕ10)；WEW-300B 液压式万能试验机；Foundry-MA 光谱仪。

1.2 实验方法

本文所研究的高碳灰铸铁化学成分符合高碳、低磷、低硫的原则，设计的化学成分如表 2。

表 2 高碳灰铸铁化学成分 w(%)
Tab.2 The chemical composition of high carbon gray cast iron

C	Si	Mn	P	S
3.6	1.8	0.5	0.05~0.10	<0.1

实验过程中，经过计算所确定的炉料配比为：回炉料 20%、废钢 65%、原生铁 15%，增碳剂加入量为 2.6%，硅铁补加量 1.03%。实验采用 100 kg 中频感应电炉进行熔炼，出炉温度控制在 1 500 ℃，采用冲入法进行孕育处理。孕育处理过程中，孕育剂硅铁的加入量为 0.4%，稀土加入量在 0~2.0%范围内变化。以稀土的名义加入量为标准分组，本文共设计了 8 组实验，具体分组如表 3。

表 3 实验过程中实验分组情况
Tab.3 The experimental grouping in the experiment

稀土名义加入量	0	0.5%	1.0%	1.2%	1.4%	1.6%	1.8%	2.0%
试样组号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#

实验中铁料熔清并经清渣处理后再进行浇注；在浇注前，先进行烫包，然后向浇包中加入实验前称量好的稀土及孕育剂，再将铁水由中频炉倒至浇包内，用废钢柱进行搅拌，随后分别浇注光谱试样、三角试片和拉力试棒等试样。本文的拉伸实验按照 EN10002-1 的执行标准进行；所使用的布氏硬度计压头直径是 5 mm，保持 2 s 的加载时间；试样的金相按照正常的操作规程进行制备，但必须保证试样在抛光后的基体无划痕，石墨不被污染和脱落；腐蚀剂为 4%的硝酸酒精溶液。

2 实验结果及讨论

2.1 硅铁和稀土的复合孕育对高碳灰铸铁石墨组织的影响

本实验利用直读光谱仪对所制备的 8 组试样进行化学成分检测，测试结果如表 4。

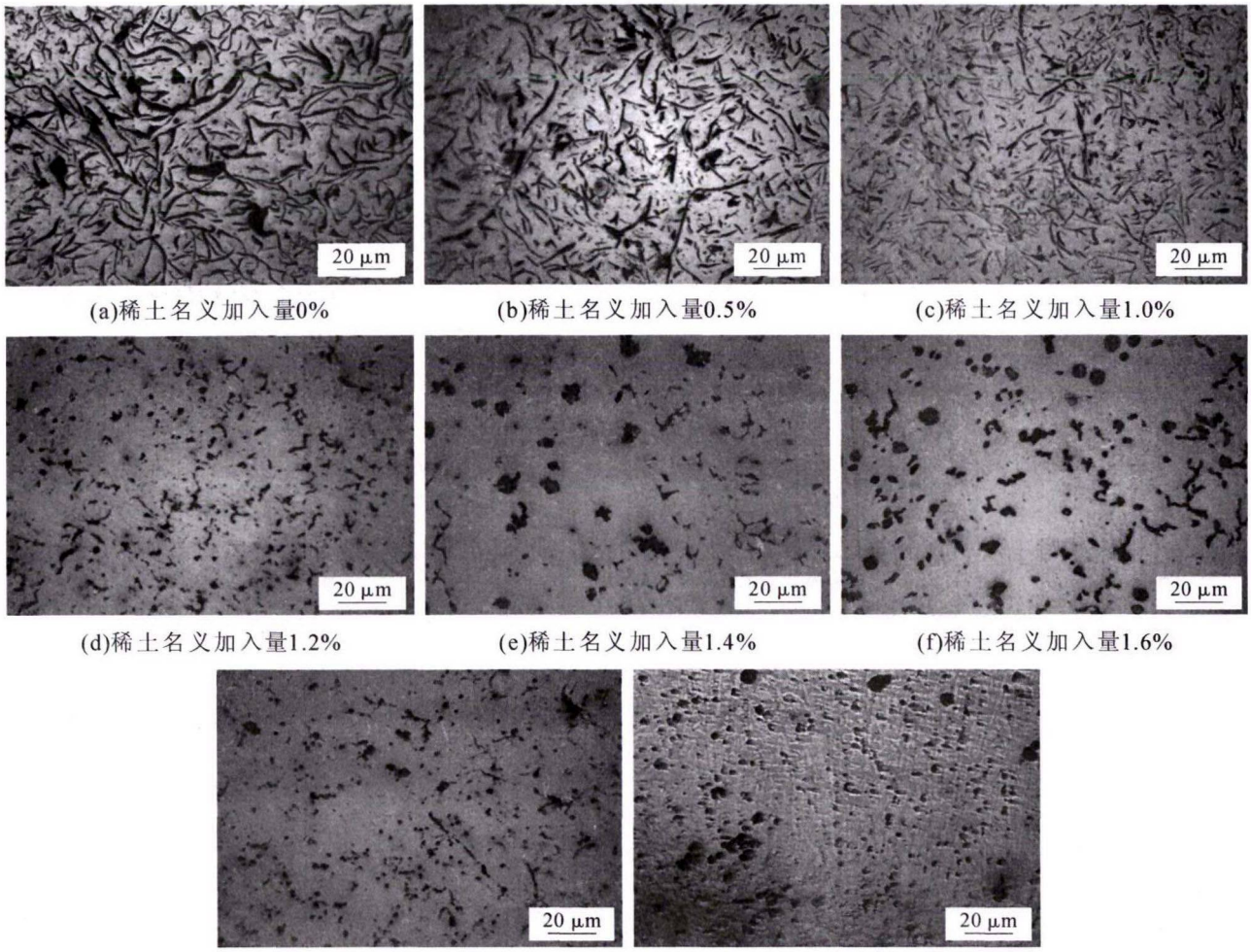
由表 4 的成分看出：所浇注试样的化学成分中五大元素的含量基本符合实验的设计要求；与其他组相比，组 1 未加稀土变质，但其化学成分中仍检测出痕量残留镁及 La 元素，这是光谱仪所显示的背景值，不是真实含量。在其他各组的化学成分中残留镁、Ce 及 La 元素的含量是实际含量。

为研究稀土和硅铁复合孕育处理对高碳灰铸铁石墨组织形态的影响规律，本实验将所获得 8 组试样分别进行金相试样制备，并在光学显微镜先进行观察，如图 1。

由图 1 看出，在硅铁孕育量不变的情况下，随着稀土加入量的增加，片状石墨的长度、数量在减少；当稀土名义加入量达到 1.2%时，石墨形态由片状变成蠕虫状，蠕化率达 30%；当稀土加入量达到 1.6%时，球化率继续增加，球径有增大倾向；当稀土加入量达到 2.0%时，石墨球的球径减小。稀土加入量在 1.2%以下，由于加入稀土的量较少，试样组织中石墨基本为片状石墨；而随着稀土加入量的增加，石墨形貌由片状转变成蠕虫状，且随着稀土加入量继续增加，试样组织中的石墨开始出现球状石墨，球状石墨出现与试样中残留镁含量偏高有直接的关系（如表 4 所示）。由此可见，稀土和硅铁的复合孕育处理可以改变组织中石墨的形态，在本实验针对硅铁和稀土复合孕育的研究中，从石墨的形态看，稀土的加

表 4 实验中各个试样的化学成分 w(%)
Tab.4 The chemical composition of each sample in the experiment

试样组号	Fe	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ce	La	Cr	Mo
1#	94.1	3.39	1.51	0.662	0.036 4	0.049 6	0.001 5	0.002 4	<0.000 5	-	-
2#	93.9	3.23	1.75	0.669	0.039 9	0.071 6	0.010 4	0.004 8	<0.006 7	0.123	0.008 8
3#	93.7	3.16	1.94	0.657	0.039 5	0.057 6	0.013 1	0.094 3	0.013 6	0.122	0.009 6
4#	93.4	3.24	2.12	0.680	0.038 8	0.038 7	0.017 8	>0.1	0.021 9	0.124	0.011 6
5#	93.1	3.27	2.39	0.691	0.039 5	0.033 2	0.025 0	>0.1	0.017 6	0.122	0.015 9
6#	93.5	3.24	2.06	0.670	0.039 6	0.042 5	0.014 0	0.074 5	0.012 0	0.125	0.009 2
7#	93.8	3.19	1.85	0.667	0.040 5	0.039 0	0.015 8	0.076 0	0.010 9	0.125	0.008 9
8#	92.9	3.21	2.65	0.671	0.040 2	0.031 6	0.035 1	0.021 0	>0.025 0	0.119	0.009 9



(a)稀土名义加入量0%　(b)稀土名义加入量0.5%　(c)稀土名义加入量1.0%

(d)稀土名义加入量1.2%　(e)稀土名义加入量1.4%　(f)稀土名义加入量1.6%

(g)稀土名义加入量1.8%　(h)稀土名义加入量2.0%

图 1 不同稀土加入量的高碳灰铸铁试样的石墨形貌

Fig.1 Graphite morphology of high CE gray cast iron samples with different rare earth content

入量应该控制在 1.2%以下为宜。

2.2 硅铁和稀土的复合孕育对高碳灰铸铁基体组织的影响

为研究稀土和硅铁复合孕育处理对试样基体组织的影响规律，本实验将所制备的 8 组金相试样制备，经 4%的硝酸酒精腐蚀，然后经光学显微镜进行基体组织观察，结果如图 2。

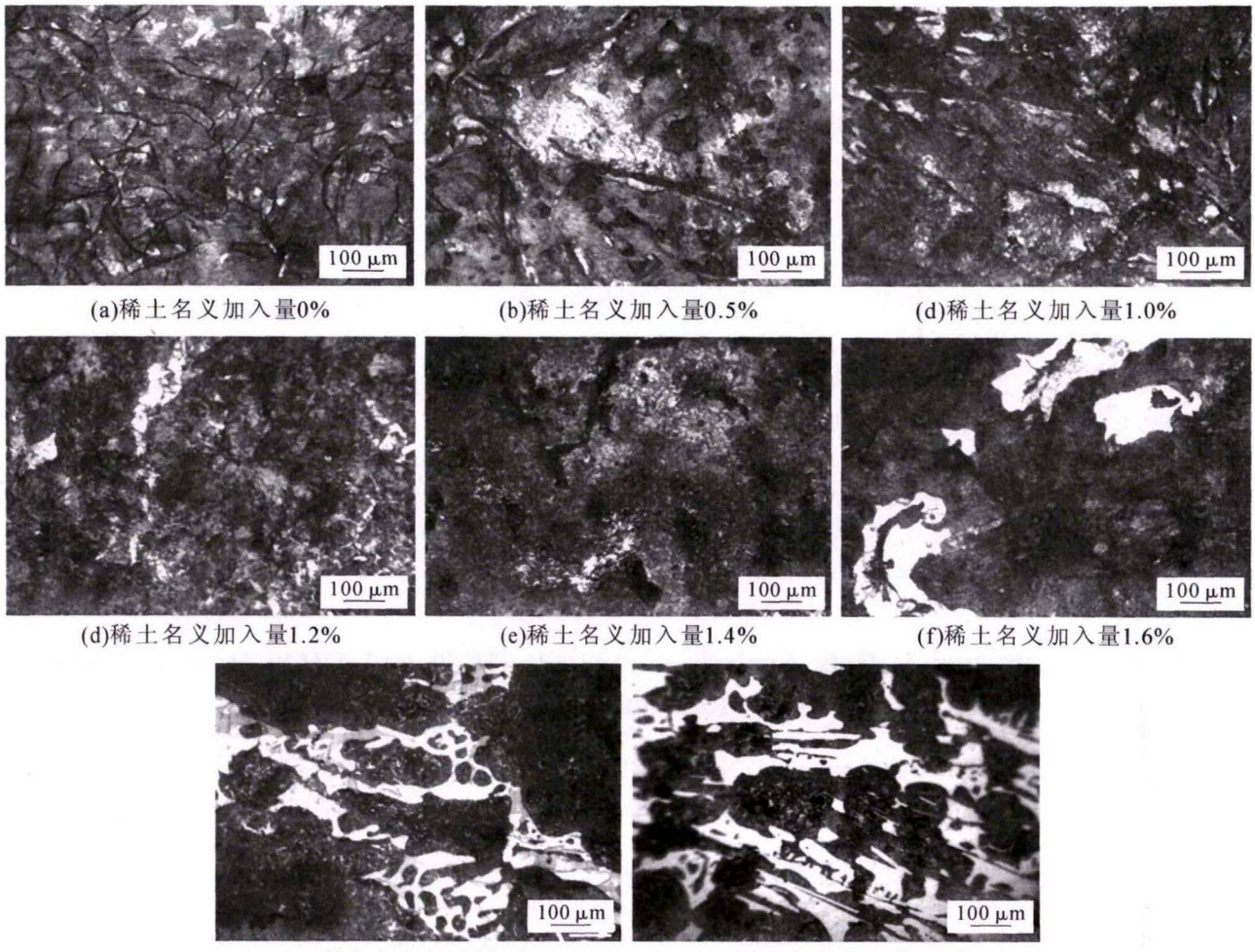
2.3 硅铁和稀土的复合孕育对高碳灰铸铁力学性能的影响

图 3 所示的硅铁和稀土复合孕育处理试样的抗拉强度和硬度的变化规律。

由图 3 看出，所获得试样的抗拉强度均超过 200 MPa，当稀土名义加入量在 1.0%以下时，铸铁试样的抗拉强度基本上是稳定的，在 200~230 MPa 变化；但当稀土名义加入量超过 1.2%时，高碳铸铁的抗拉强度有明显增大的趋势，抗拉强度值超过 450 MPa，这与稀土加入后石墨片变短，变粗，增加基体中珠光体的数量并且固溶于基体组织中增加了强度有密切关系，从而使得抗拉强度有明显的升高趋势。高碳铸铁试样的布氏硬度值均超过 150 HBW，稀土名义加入量在 0~1.0%间变化时，所获得高碳铸铁试样的布氏硬度值稳定在 150~170 HBW；但稀土名义加入量超过 1.0%时，高碳铸铁的布氏硬度值开始明显升高，当稀土名义加入量为 2.0%时所得高碳铸铁的布氏硬度高达 288 HBW。在硅铁和稀土复合孕育的过程中，从高碳灰铸铁的力学性能来看，稀土的加入量应该控制在 1.0%以下为宜。总之，综合高碳灰铸铁的石墨形态、基体组织及力学性能数据，对于高碳灰铸铁来说，在本实验针对硅铁和稀土复合孕育的研究中，稀土的加入量应控制在 1.0%以下为宜。

3 结论

高碳铸铁在硅铁孕育处理基础上，随着稀土加入量的增加，铸铁组织中石墨形态由片状石墨向蠕虫状、球状石墨转变；当稀土加入量为 1.2%时，片状石墨开始蠕化，基体组织中出现莱氏体和珠光体，力学性能有明显升高的趋势；当稀土加入量为 1.4%



(a)稀土名义加入量0%　(b)稀土名义加入量0.5%　(d)稀土名义加入量1.0%

(d)稀土名义加入量1.2%　(e)稀土名义加入量1.4%　(f)稀土名义加入量1.6%

(g)稀土名义加入量1.8%　(h)稀土名义加入量2.0%

图 2 不同稀土加入量的试棒试样的基体组织形貌

Fig.2 The matrix morphology of the test specimens with different rare earth contents

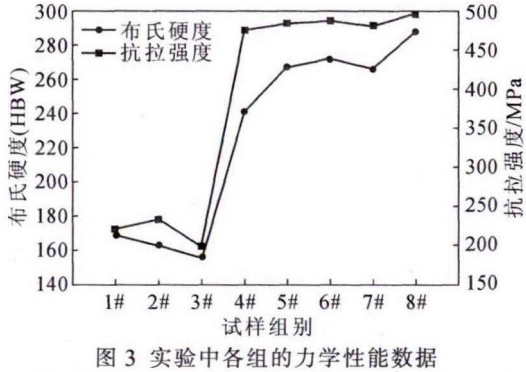


图 3 实验中各组的力学性能数据

Fig.3 Mechanical properties of each group in the experiment

时，石墨开始球化，基体组织中珠光体含量减少并出现较多的莱氏体；当稀土加入量为 2.0%时，球状石墨数量增多，珠光体大部转化为莱氏体，力学性能最高。对于高碳灰铸铁，在硅铁孕育处理的基础上，随着稀土的加入不仅可以改变石墨形态和基体组织，而且增加高碳灰铸铁的抗拉强度等力学性能，可以看出适量的硅铁和稀土的复合孕育对增强高碳灰铸铁的力学性能有利，综合来看，在硅铁和稀土复合孕育的过程中，稀土加入量应控制在 1.0%以下。

参考文献：

[1] 张小雪. 高碳合金制动盘材质的研制 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.

[2] 初福民，祖昕晖. 稀土合金变质对高碳当量灰铸铁结晶过程及工艺性能的影响 [J]. 铸造技术, 2010, 31(8): 1057-61.

[3] 祖昕晖. 稀土合金变质对高碳当量灰铸铁组织与性能的影响 [D]. 济南:山东建筑大学, 2010.

[4] 冯晨辉. 高碳低硅含铌灰铸铁在制动盘中的应用[D]. 济南:山东大学, 2016.

[5] Upadhyay S, Saxena K K. Effect of Cu and Mo addition on mechanical properties and mi crostructure of grey cast iron: An overview [J]. Materials Today: Proceedings, 2020,

[6] Ding X, Li X, Huang H, et al. Effect of Mo addition on as-cast microstructures and properties of grey cast irons [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 718(483-91).

[7] Beniwal G, Saxena K K. Effect of niobium addition in grey cast iron: A short review [J]. Materials Today: Proceedings, 2020,

[8] Xue W, Li Y. Pretreatments of gray cast iron with different inoculants [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 689(408-15.

[9] 郑志伟, 陈荣发, 赵玉宝, 等. 高碳当量合金铸铁制动盘的研究 [J]. 铸造, 2016, 65(5): 470-2.