

应用技术

# 原铁液硅含量对厚大断面球墨铸铁件石墨形态与力学性能的影响

黎振华<sup>1</sup>, 李言祥<sup>2</sup>, 周 荣<sup>1</sup>, 蒋业华<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650093; 2. 清华大学机械工程系, 北京 100084)

**摘要:** 为研究原铁液硅含量对厚大断面球墨铸铁件凝固组织石墨形态和力学性能的影响, 使用高精度热模拟系统, 考察了不同硅含量的原铁液经过相同球化孕育工艺处理后在相同凝固条件下获得的厚大断面球墨铸铁件试样的凝固组织石墨形态和力学性能。结果表明, 球化孕育工艺相同时, 随着原铁液硅含量提高, 厚大断面球墨铸铁件石墨形态恶化, 力学性能下降。当钇基重稀土球化剂和含Ba孕育剂加入量分别为1.8%和0.4%时, 原铁液硅含量控制在1.2%以内, 有利于防止厚大断面球墨铸铁件石墨畸变, 提高铸件力学性能。

**关键词:** 厚大断面球墨铸铁件; 石墨形态; 力学性能; 硅; 原铁液

**中图分类号:** TG143.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2007) 05-0513-03

## Effect of Si in Base Iron on Graphite Morphology and Mechanical Properties of Heavy Section Ductile Iron

LI Zhen-hua<sup>1</sup>, LI Yan-xiang<sup>2</sup>, ZHOU Rong<sup>1</sup>, JIANG Ye-hua<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical & Electric Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming, 650093, Yunnan, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to identify effect of Si in base iron on graphite morphology and mechanical properties of heavy section ductile iron, it was investigated that the graphite morphology and mechanical properties of the heavy section ductile iron samples contained different Si amount in base iron. The melts of the samples were all treated and inoculated under same process, and solidified under the same condition in a high precision thermal simulation system. Results of experiments indicated that the degenerate graphite increased and the mechanical properties of heavy section ductile iron decreased as the amount of Si in base iron increased. The results also show that it is necessary to restrict Si of base iron within 1.2% in order to control graphite degeneration and improve mechanical properties, when the base iron melt is treated with 1.8% nodularizer contained Y and 0.4% inoculant contained Ba.

**Key words:** heavy section ductile iron; graphite morphology mechanical property; Si; base iron

球墨铸铁成本低廉, 综合力学性能优良, 20世纪40年代研究成功以来发展极为迅速, 产量成为衡量一个国家铸造综合水平的重要标志之一<sup>[1]</sup>。近20年来, 世界球铁产量以每年3%~5%的速度递增, 2004年35个主要铸件生产国的球铁件总产量达到18 706 424 t<sup>[2]</sup>。我国1993球墨铸铁件产量仅为126万t<sup>[3]</sup>, 2003年增加到363万t<sup>[4]</sup>, 2004年更增长到560万t<sup>[2]</sup>, 年均增长超过10%。球铁产量的快速增长除了与其在汽车零件、铸管等领域大量使用有关外, 砂型铸造条件下壁厚超过100 mm的厚大断面球墨铸铁件日益广泛应用也是其中重要的原因。但厚大断面球墨铸铁件热节模数大、凝固时间长, 易产生石墨

畸变等组织缺陷, 导致力学性能尤其是伸长率低下<sup>[5-10]</sup>, 需制定极为严格的生产工艺才有可能获得合格铸件。稳定生产厚大断面球墨铸铁件的能力是衡量铸造企业生产工艺水平高低和国家铸造技术发达与否的标志<sup>[5-6]</sup>, 相关研究长期以来受到国内外研究者重视。

作为球墨铸铁的基本元素之一, 硅促进石墨化和铁素体形成, 同时能固溶强化铁素体<sup>[7]</sup>。球墨铸铁的终硅量取决于原铁液硅含量及球化和孕育时带入的硅量。大量研究表明, 终硅量过高易导致厚大断面球墨铸铁件石墨漂浮和石墨畸变, 通常应将终硅含量控制在2.0%~2.2%以下<sup>[8-11]</sup>。但是, 生产中由于原材料、熔炼

收稿日期: 2006-12-15。

作者简介: 黎振华 (1976-), 男, 湖南东安人, 博士, 讲师, 主要从事厚大断面球墨铸铁件质量控制、熔体状态表征与评估、耐磨材料等方面的研究。E-mail: lzhkust@sina.com

设备和熔炼工艺的局限,原铁液成分波动较大,往往通过改变孕育剂的加入量来控制终硅含量,已有研究中也多通过改变孕育剂加入量来考察终硅含量对厚大断面球墨铸铁件中石墨形态的影响,其本质考察的是孕育量的影响,有关原铁液硅含量影响的研究未见相关报道。而过量孕育会导致石墨形态恶化,其实质与原铁液Si含量对石墨形态的影响存在本质区别。近年来,生铁等原材料价格迅速上涨,市场竞争加剧;另一方面,厚大断面球墨铸铁件应用领域不断扩大,性能要求逐步提高。是否可适当提高原铁液硅含量,以充分利用含硅量较高、价格低廉的普通生铁和回炉料;是否可以利用Si固溶强化铁素体的作用,通过提高原铁液Si含量来提高厚大断面球墨铸铁件的力学性能,这些问题日益受到人们的关注。为此,需进一步考察原铁液硅含量对厚大断面球墨铸铁件中石墨形态和力

学性能的影响。

## 1 试验方法

### 1.1 不同硅含量原铁液的获得及其球化孕育处理

取冲天炉熔炼获得的、成分( $w_B$ ,%)为3.78~3.88C, 1.05~1.15Si的原铁液,添加一定量的75SiFe粉(硅含量72.5%),充分搅拌溶解后,置于 $Al_2O_3$ 坩埚、在1450℃的硅钼棒电阻加热炉中保温30 min,以改变原铁液硅含量。然后使用含( $w_B$ ,%)3.8Y、42.0 Si、8.0 Mg、余为Fe的重稀土球化剂和主要成分为( $w_B$ ,%)71.3 Si、2.13 Ba、余为Fe的孕育剂,进行球化孕育处理,4种不同硅含量的原铁液的球化剂和孕育剂的加入量均分别为1.8%和0.4%。获得的4种不同硅含量的原铁液及其球化孕育处理后的铁液成分的光谱分析结果如表1所示。

表1 不同硅含量的原铁液及球化孕育处理后的铁液的化学成分

Table 1 Chemical composition of ductile iron melt with different Si content in base iron												$w_B$ (%)
试样	原铁液					处理后铁液						
	C	Si	Mn	P	S	C	Si	Mn	P	S	Mg	RE
Si1	3.82	1.09	0.27	0.033	0.061	3.71	1.93	0.23	0.033	0.034	0.069	0.023
Si2	3.84	1.21	0.27	0.035	0.078	3.72	2.13	0.27	0.034	0.026	0.069	0.019
Si3	3.86	1.43	0.29	0.041	0.076	3.75	2.35	0.30	0.041	0.024	0.072	0.025
Si4	3.82	1.70	0.30	0.035	0.075	3.71	2.60	0.31	0.033	0.023	0.074	0.021

### 1.2 厚大断面球墨铸铁件凝固试样的制备

为方便准确考察各种因素对厚大断面球墨铸铁件凝固过程及凝固组织和性能的影响,作者在前期工作中,结合计算机温度反馈控制技术与铸件温度场数值模拟结果,控制试样凝固潜热释放速度和凝固时间,用 $\Phi 80\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 小试样实现了任意尺寸厚大断面球墨铸铁件凝固过程与凝固组织的准确热模拟<sup>[12-13]</sup>,并开发了高精度热模拟系统。利用这一系统,可以获得上述4种不同铁液的6 h凝固试样,从而系统考察凝固条件相同时,不同原铁液硅含量对厚大断面球墨铸铁件凝固组织石墨形态和力学性能的影响。试样石墨形态分析和力学性能测试依据GB1348-88《中华人民共和国国家标准/球墨铸铁件》<sup>[14]</sup>进行。

## 2 试验结果与分析

4种铁液的6 h凝固试样中石墨形态如图1所示。利用文献<sup>[15]</sup>开发的定量金相分析系统对试样的石墨形态进行定量金相分析后,可以获得原铁液硅含量对厚大断面球墨铸铁件石墨形态的影响规律(如图2所示)。不同硅含量的原铁液球化孕育处理后获得的铁液的6 h凝固试样的力学性能,如图3所示。

### 2.1 原铁液硅含量对厚大断面球墨铸铁件石墨形态的影响

从图1、图2可见,随着原铁液硅含量的提高,石墨面积率增加而球化率下降,这表明原铁液硅含量提高后,促进石墨析出但恶化石墨形态,不利于控制石

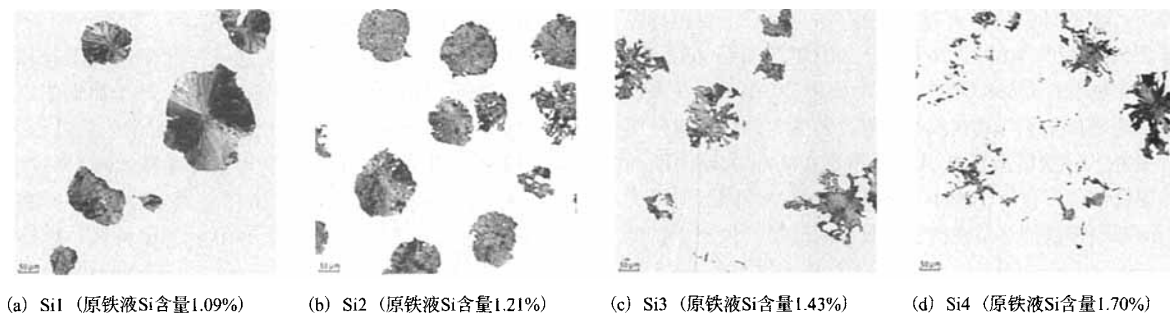


图1 原铁液硅含量对厚大断面球墨铸铁件石墨形态的影响

Fig. 1 Effect of Si on graphite morphology of heavy section ductile iron

墨畸变。原铁液硅含量超1.43%后,石墨形态明显恶化,石墨开花严重。故对厚大断面球墨铸铁件而言,原铁液硅含量应控制在较低水平,以利控制石墨畸变。

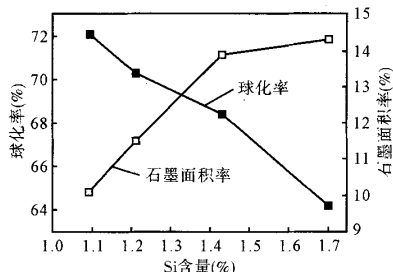
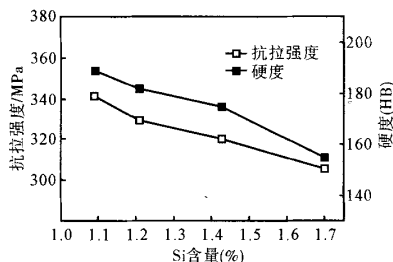
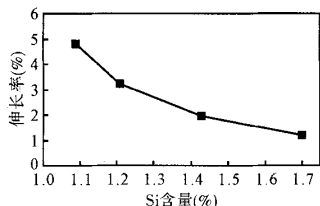


图2 原铁液硅含量对厚大断面球墨铸铁件凝固组织球化率和石墨面积率的影响

Fig. 2 Effect of Si in base iron on nodularity and graphite area ratio of heavy section ductile iron



(a) 对强度影响



(b) 对韧性影响

图3 原铁液硅含量对厚大断面球墨铸铁件力学性能的影响

Fig. 3 Effect of Si in base iron on mechanical properties of heavy section ductile iron

## 2.2 原铁液硅含量对铸件力学性能的影响

由图3可见,随原铁液硅含量提高,6 h凝固试样抗拉强度、硬度、伸长率等显著下降,与石墨形态变化规律一致,而硅固溶强化铁素体的作用并体现出来。原因是,一方面,硅增加恶化石墨形态,导致伸长率和强度大大下降,而另一方面,硅促进石墨析出和铁素体形成,减少铁素体基体固溶的碳量,降低基体强度和硬度。故提高原铁液硅含量不但不能提高厚大断面球墨铸铁力学性能,反而会恶化力学性能。

## 2.3 厚大断面球墨铸铁件中原铁液硅含量的控制

已有研究结果确认,孕育过量使厚大断面球墨铸铁件终硅量过高时,不利于控制石墨畸变和提高力学性能<sup>[8-11]</sup>。而上述试验则进一步表明,在孕育球化工艺相同时,原铁液中硅量提高导致的厚大断面球墨铸铁件终硅量增加,也导致石墨形态恶化,力学性能下降。

故厚大断面球墨铸铁件生产时,原铁液硅含量须从严格控制,不能用硅含量过高的生铁或过多使用回炉料。在用加入量1.8%的钇基重稀土球化剂和0.4%的含Ba孕育剂施球化孕育处理时,使原铁液硅含量在1.2%以内,利于防止铸铁件石墨畸变,提高铸件力学性能。

## 3 结论

(1) 球化孕育工艺相同时,原铁液硅含量提高引起的终硅量增加,会促进石墨析出、引起石墨形态恶化,抗拉强度、硬度、伸长率等力学性能指标下降。

(2) 厚大断面球墨铸铁件生产时,配料、熔炼工艺必须从严控制,不能过多使用回炉料或者硅含量过高的生铁,原铁液硅含量不能超过一定范围。

(3) 球化孕育处理、加入1.8%钇基重稀土球化剂和0.4%含Ba孕育剂时,原铁液硅含量控制在1.2%以内,有利于防止厚大断面球墨铸铁件石墨畸变,提高铸件力学性能。

**致谢:**感谢宁波日月铸造有限公司资助和陈剑均、周春艳等对试验工作的帮助。

## 参考文献:

- [1] 廖良. 中国铸造市场的气候与机遇[J]. 铸造技术, 2002 (1): 5-10.
- [2] 39<sup>th</sup> Census of world casting production-2004 [J]. Modern Casting, 2005 (12): 27-29.
- [3] 唐玉林, 苏仕方. 融入世界的我国铸件市场[J]. 铸造, 2002, 51 (5): 262-267.
- [4] 38<sup>th</sup> Census of world casting production-2003 [J]. Modern Casting, 2004 (12): 25-27.
- [5] 周继扬. 西德的160吨大球铁件[J]. 球铁, 1984 (4): 52-55.
- [6] 孙文山, 梁维中, 刘军, 等. 大型厚壁球铁件生产现状及展望[J]. 现代铸铁, 1999 (3): 5-11.
- [7] 中国机械工业学会铸造专业学会编. 铸造手册 (第一卷, 铸铁) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [8] HOONER H W Jr. A Literature Survey on degenerate graphite in heavy section ductile iron [J]. AFS Transactions, 1986, 94: 601-608.
- [9] NAKAMURA S. As-cast heavy section ferritic spheroidal graphite cast iron. AFS Transactions, 1989, 97: 539-544.
- [10] JAVAID A, LOPER C R Jr. Production of heavy-section ductile cast iron. AFS Transactions, 1995, 103: 135-150.
- [11] 丁霖涛, 丁刃锋, 柴树繁, 等. 大型厚壁球墨铸铁件的质量控制[J]. 铸造, 1997, 46 (1): 27-30.
- [12] LI Z H, LI Y X, GENG H Y, et al. Study on thermal simulation of solidification in heavy section ductile iron. Journal of Materials Science & Technology [J]. 2003, 19 (SI): 122-124.
- [13] 黎振华. 厚大断面球墨铸铁件凝固过程热模拟与石墨畸变预测研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [14] 中华人民共和国国家标准局. GB1348-88 中华人民共和国国家标准—球墨铸铁件[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [15] 陈祥, 宋晋生, 李言祥. Neophot32大型光学显微镜的数字化、定量化改造[J]. 实验技术与管理, 2002, 19 (3): 7-10.