

合成铸铁工艺的试验研究

司乃潮¹, 张芳芳¹, 姜金文²

(1. 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 上海柴油机股份有限公司铸造分公司, 上海 200432)

摘要: 在中频感应电炉上进行合成铸铁的试验, 以50%废钢+50%新生铁的炉料配比, 用鳞片状石墨充分浸润的增碳工艺, 抗拉强度普遍提高10~20 MPa, 壁厚敏感性(不同截面硬度差) ΔHB_{mm} 降低10~20 HB, 三角试片白口宽度在1~3 mm。合成铸铁、复合孕育再辅之以低合金化的试验铸铁(Cu: 0.35%~0.45%, Cr: 0.15%~0.25%), 与普通铸铁相比, 抗拉强度明显高一个牌号, 并且机械性能波动范围不大。

关键词: 合成铸铁; 废钢; 增碳; 复合孕育剂

中图分类号: TG251.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2006) 08-0799-04

Productive Experimental Study of Synthetic Cast Iron Process

SI Nai-chao¹, ZHANG Fang-fang¹, JIANG Jin-wen²

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 2. Foundry Branch of Shanghai Diesel Engine Co., Ltd., Shanghai 200432, China)

Abstract: Fifty percent scrap steel and fifty percent pig iron infiltrated by flaky graphite were melted in a medium frequency induction furnace for producing synthetic cast iron. The experimental results show that the tensile strength increases by 10–20 MPa and the hardness difference of different sections ΔHB decreases by 10–20 HB. The chill width of triangular sample ranges from 1mm to 3mm. With compound inoculants and low alloying elements (0.35%–0.45% Cu, 0.15%–0.25% Cr), the tensile strength of synthetic cast iron increases by a grade compared with that of common cast iron, and only a tiny fluctuation appears in mechanical property.

Key words: synthetic cast iron; scrap steel; recarburization; compound inoculants

近年来, 由于工业发达国家的废钢价格远低于新生铁, 于是不用新生铁, 只用废钢和回炉铁在炉内增碳的合成铸铁的冶炼技术应运而生^[1]。使用大量废钢充分浸润增碳并配合适当孕育处理生产的合成铸铁与在相同条件下生产的普通灰铸铁相比具有以下特点: 石墨尺寸缩短1~2级, 凹钝头石墨增多并且A型分布, 95%的基体为珠光体, 共晶团小1~2级, 抗拉强度提高1~2级, 白口倾向和壁厚敏感性显著降低, 综合性能稳定^[2-3]。国外生产的铸态铁素体球墨铸铁, 往往对化学成分要求很严格^[4-5], 特别要求低锰、低钛, 以及硫、磷和其它微量元素的含量都很低, 用普通生铁为主要原料来生产, 化学成分很难达到要求。因此用合成铸铁直接生产这种铸态铁素体球墨铸铁件, 不仅成本低, 而且化学成分能够满足要求, 并可以获得稳定的、更好的力学性能。为此, 我们先用合成铸铁的方法生产综合性能良好的灰铸铁, 从而找出生产合成铸铁工艺的最佳规律, 也为生产高强度、高韧性的铸态铁素体球铁打下良好的基础。同时在试验的过程中,

对不同的孕育剂进行了大量的试验, 以满足合成铸铁的生产需要。

1 试验方法及内容

试验中, 采用250 kg酸性炉衬中频感应炉熔炼, 熔炼工艺为: 废钢+新生铁+增碳剂熔化后, 加入硅铁+锰铁+铬铁, 当温度达到1 480~1 500 °C时保温出炉, 浇包内熔化电解铜, 然后加入孕育剂(试验用孕育剂品种及化学成份见表1), 孕育剂加入量为0.4%, 采用随流孕育方法。随后分别浇注(此时温度1 400~1 420 °C)三角试片、阶梯试块(阶梯厚度分别为6、12、25、40 mm)、机械性能试棒($\Phi 30$ mm \times 300 mm)以及Cat主轴承盖, 都是采用湿砂型铸造方法。

试验铁液化学成份的控制(质量分数, 下同): 3.2%~3.4% C, 1.8%~2.2% Si, 0.6%~1.0% Mn, 0.15%~0.25% Cr, 0.3%~0.5% Cu, $\leq 0.10\%$ P, $\geq 0.12\%$ S, 3.9%~4.10% CE。

试验用的孕育剂颗粒在1~3 mm, 使用前用烘包

收稿日期: 2005-09-29收到初稿, 2006-02-24收到修订稿。

作者简介: 司乃潮(1955-), 男, 浙江杭州人, 教授, 博士生导师, 主要从事铸造合金及金属功能材料的教学和研究工作。电话: 0511-8780194

E-mail: snc@ujs.edu.cn

炉烘干。

表1 试验用孕育剂品种及化学成分

序号	名称	化学成分							
		Si	Ca	C	Re	Ba	Sr	Al	Fe
1	75SiFe	71	-	-	-	-	-	0.8~1.6	其余
2	Si-Sr	65.2	1.1	-	-	6.28	2.47	-	其余
3	Si-Ba	73.64	1.47	-	2.26	-	-	-	其余
4	C-Si	58.4	1.42	17.6	-	-	-	-	其余
5	ReCaBa	64.85	2.2	-	3.75	4.87	-	<1.2	其余

2 试验结果及分析

2.1 确定增碳剂的吸收率

HT250的含碳量3.3%，炉料配比为50%废钢+50%生铁，通过炉料计算，铁液含碳量2.21%，差值需通过增碳剂弥补。增碳剂为磷片状石墨，碳大于98%，硫小于0.05%，水分小于1.5%。增碳剂的加入采用在电炉炉底加入。首先，按增碳剂吸收率90%进行配料，经化学成份测定含碳量3.12%，由此可知增碳剂吸收率达不到90%；然后，按增碳剂的吸收率85%进行配料，经化学成份测定含碳量3.16%，还是偏低；最后，按增碳

剂的吸收率80%进行配料，经化学成份测定含量为3.19%，基本满足期望要求。因此，在其它熔炼条件相同前提下，增碳剂吸收率按80%进行配料。

2.2 不同比例的废钢与相关各类孕育剂的对比试验

由于本试验研究，基本结合在生产实践中进行，为了试验方便并且不影响生产产量，我们主要穿插于Cat主轴承盖生产中。Cat主轴承盖材料1E18（基本等同于HT250），其化学成分：3.1%~3.5% C，1.8%~2.2% Si，0.6%~1.0% Mn，<0.1% P，<0.1% S，0.8%~1.2% Cu。因此，试验化学成分按1E18控制，再添加0.15%~0.25% Cr。原1E18材料的炉料配比：新生铁40%~60%，回炉铁30%~50%，废钢1%~20%。而此次试验材料配比为：新生铁50%~70%，废钢30%~50%；原1E18材料孕育剂仅采用75SiFe，而此次试验材料孕育剂分别为75SiFe、Si-Sr、Si-Ba、C-Si和Re-Ca-Ba，孕育量都是0.4%，加料顺序和其它试验条件同前所述，表2是废钢加入量为30%、40%、50%三种比例与不同孕育剂的试验结果和阶梯试块最大硬度差数据。

根据表2，我们绘制不同比例废钢与抗拉强度的关系图1和不同比例废钢与壁厚敏感性的关系图2，以及加入废钢量不同的综合性能表3。

表2 不同比例废钢与相关各孕育剂的试验结果及阶梯试块各断面硬度差

编号	配料比	化学成分 (%)		CE (%)	孕育剂类型	白口宽 / mm	抗拉强度 / MPa	硬度 HB	RG	HG	QI	各断面硬度HB				$\Delta\text{HB}_{\text{max}}$
		C	Si									40	25	12	6	
011	30%废钢+70%生铁	3.38	2.05	4.06	75SiFe	2.40	265	229	1.06	1.09	0.97	215	227	233	274	59
021	30%废钢+70%生铁	3.36	2.04	4.04	SiSr	3.00	295	229	1.16	1.08	1.07	219	225	231	279	60
031	30%废钢+70%生铁	3.19	2.12	4.00	SiBa	1.50	280	219	1.15	1.06	1.09	216	226	239	269	53
041	30%废钢+70%生铁	3.36	1.96	4.01	C-Si	2.50	255	211	0.99	0.99	1.00	219	219	240	272	53
051	30%废钢+70%生铁	3.38	1.99	4.04	Re-CaBa	1.80	270	222	1.07	1.05	1.01	221	223	240	285	64
012	40%废钢+60%生铁	3.44	1.87	4.06	75SiFe	2.30	280	229	1.13	1.10	1.03	226	230	242	288	62
022	40%废钢+60%生铁	3.19	2.01	3.96	SiSr	1.70	315	252	1.16	1.15	1.01	237	237	254	285	55
032	40%废钢+60%生铁	3.19	1.96	3.89	SiBa	1.80	295	232	1.00	1.01	1.00	240	243	263	292	52
042	40%废钢+60%生铁	3.32	1.95	3.97	C-Si	2.00	265	222	0.99	1.02	0.97	231	233	246	275	44
052	40%废钢+60%生铁	3.16	2.01	3.93	Re-CaBa	3.00	310	229	1.12	1.03	1.08	241	244	257	300	59
013	50%废钢+50%生铁	3.38	1.99	4.04	75SiFe	3.10	335	229	1.32	1.09	1.22	240	240	243	278	38
023	50%废钢+50%生铁	3.16	2.00	3.93	SiSr	1.60	340	258	1.22	1.16	1.05	245	245	260	278	33
033	50%废钢+50%生铁	3.16	2.18	3.99	SiBa	1.70	295	250	1.11	1.17	1.16	242	241	253	280	38
043	50%废钢+50%生铁	3.44	1.99	4.10	C-Si	2.00	295	229	1.23	1.12	1.10	252	252	261	294	42
053	50%废钢+50%生铁	3.32	2.21	4.06	Re-CaBa	1.80	290	237	1.15	1.12	1.03	252	253	264	305	53

注：表中 Sc 为共晶度， $\text{Sc}=\text{C}/(4.26-0.31\text{Si}-0.27\text{P})$ ；RG为灰铸铁的成熟度， $\text{RG}=\sigma_{\text{f}}/(981-785\text{Sc})$ ，HG为灰铸铁的硬化度， $\text{HG}=\text{HB}/(530-344\text{Sc})$ ；QI为灰铸铁的品质系数， $\text{QI}=\text{RG}/\text{HG}$ ；因6 mm的壁厚太薄，上柴公司材料研究所对6 mm断面处用直径 $\Phi 2.5$ mm的钢球测定布氏硬度，其它三个断面处用直径 $\Phi 5$ mm的钢球测定布氏硬度。

2.3 试验结果分析

(1) 由表2和图1可以发现：随着废钢加入量的增加（比例由30%到40%再到50%），75SiFe、SiSr、C-Si和SiBa进行孕育的铸铁，其抗拉强度均有比较明显的提高。

尽管Re-CaBa进行孕育的铸铁在40%废钢时强度最大，这可能与052试棒的碳当量（CE为3.93）相对较低有关，但其50%废钢时的强度也相当高。并且由表4可以明显地看出，每增加10%废钢其抗拉强度可提高20 MPa。

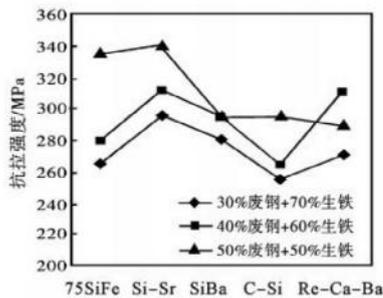


图1 不同比例废钢与抗拉强度关系图

Fig. 1 Tensile strength vs. scrap steel with different proportions

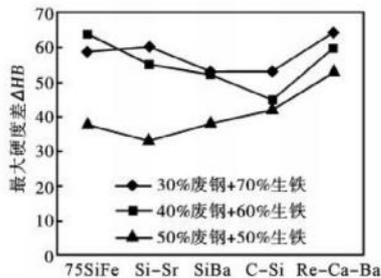


图2 阶梯试块各断面硬度

Fig. 2 Hardness data of step sample's sections

表3 加入废钢量不同的综合性能

Table 3 Combination properties with different amounts of scrap steel

配料比	CE (%)	抗拉强度 /MPa	试棒硬度 (HB)	白口宽 /mm	阶梯试块 ΔHB _{max}
30%废钢+70%生铁	4.03	273	222	2.24	57
40%废钢+60%生铁	3.95	293	232	2.06	54
50%废钢+50%生铁	3.11	311	240	2.05	41

注：各类数据均是五种孕育剂孕育的铸铁的平均值。

(2) 由表2阶梯试块各断面硬度差和图2可以找出这样的规律：随着废钢加入量的增加，不同孕育剂孕育的铸铁其阶梯试块的壁厚最大硬度差在废钢30%时普遍呈最大，40%时已显下降趋势，而当废钢量达到50%时，其各断面最大硬度差明显趋小。

(3) 由表2观察其三角试块的白口宽度，各类孕育剂孕育的铸铁普遍都比较小，基本满足上柴公司工艺规范中的白口宽度允许在1~3 mm的技术要求。

(4) 从成熟度、硬化度和品质系数来看：成熟度、硬化度均在0.99~1.22之间，说明它们的孕育效果均比较明显；综合性能品质系数也基本在0.97~1.22之间，说明经过合成铸铁孕育处理，以及加入1%左右的铜后，总体的机械切削性能比较好。

(5) 从图1和图2来看，不同的孕育剂对铸铁的性能有不一样的影响，对抗拉强度而言由大到小依次为SiSr、Re-CaBa、SiBa、75SiFe、C-Si；从壁厚敏感性来看，SiSr、SiBa、75SiFe减小壁厚敏感性较强，Re-CaBa和C-Si也能减小不同壁厚的硬度偏差；减小白口能力，除75SiFe较差外，其它四种孕育剂相对都比

较强。

(6) 废钢增量和增碳工艺，其机械性能普遍有较大的提高，白口倾向和壁厚敏感性显著降低，综合性能稳定，有利于铸件向薄壁轻型化发展，因此对上柴公司而言，采用50%废钢+50%新生铁的工艺是切实可行的。

3 废钢增量和增碳工艺对性能和组织影响的机制分析

3.1 对初生奥氏体和石墨的影响

在灰铸铁中，奥氏体的枝晶起着象钢筋混凝土中的钢筋和复合材料中的“纤维”相似的作用。奥氏体枝晶的增多，间距的缩小，以及枝晶的细化，增强了奥氏体立体网络结构的连续性和坚固性。就如在钢筋混凝土中增加了主钢筋和辅助钢筋的数量和大小，因此可以提高灰铸铁的强度，而且初生奥氏体的形态和分布，直接影响到共晶团和石墨形态的分布。从表5可以看出，随着废钢量增加，奥氏体枝晶数量增多，强度提高。

对合成铸铁的研究表明^[2]，原铁液的熔炼条件和原材料决定了它的石墨化能力。增碳工艺后在原铁液中存在大量的高碳微区和低碳微区。高碳微区主要由于用磷片状石墨增碳后，在高温状态下仍存在高熔点的石墨，从而造成了大量弥散分布的石墨结晶核心，减小了铁液的过冷，促使生成以A型石墨为主的石墨组织。而低碳微区主要由于废钢的加入量，废钢的碳含量极低，无论如何扩散，始终存在着一定的浓度起伏，低碳微区使铁水具有很强的形成初生奥氏体的能力，低碳微区愈多，奥氏体枝晶愈发达，晶粒愈细小均匀，溶于后来生成的共晶奥氏体形成致密的三维网络。在随后冷却过程中，由奥氏体转变成珠光体，也很细小。这样形成A型细小均匀分布石墨组织和细片状珠光体，既提高了铸铁的强度，同时又改善了切削性能。

3.2 对共晶团数量的影响

从表4不难发现，不同废钢加入量对共晶团数量也具有一定的影响。灰铸铁的共晶团数决定于共晶转变时的成核及成长条件。冷却速度及过冷度越大，非均质晶核愈多，生长速度愈慢，则形成的共晶团数愈多。增加废钢加入量和增碳工艺使得非均质形核量增多，则形成的共晶团数也相应较多。

3.3 性能特点

废钢量增加到炉料比例50%后，抗拉强度提高10~20 MPa，改善了力学性能；珠光体含量高，断面敏感性小，切削性能改善；可以获得含磷量低的铁液，减少磷量对缸体、缸盖等薄壁高强度的缩松和渗漏缺陷；改善了由于长期使用同一生铁而产生的炉料遗传性所导致的材质恶化^[9]。

表4 不同废钢量配比的金相组织比较

Table 4 Microstructures with different amounts of scrap steel

炉料配比	石墨形状	石墨长度 $\times 10^{-2}$ / mm	基体组织	磷共晶	碳化物	初生奥氏体	共晶团
30%废钢 +70%生铁	片状A型石墨, 分布相对 均匀, 石墨稍粗大	石墨长度12~25, 4级	片状珠光体>98%, 片间距 较小, 片状珠光体较细小	<1%	<1%	初生奥氏体形态 及分布不明显, 但显一定方向性	3~4级
40%废钢 +60%生铁	片状A型石墨, 分布均匀, 无明显方向性	石墨长度10~20, 4级	片状珠光体>98%, 片间距 较小, 极细珠光体和细珠光 体相互交错	<1%	<1%	初生奥氏体形态 及分布不明显	3~4级
50%废钢 +50%生铁	片状A型石墨, 分布均匀, 无明显方向性, 细小且具 有秃钝的特点	石墨长度10~20, 4级, 并有相当数 量的5级	片状珠光体>98%, 片间距 较小, 较多的极细珠光体	<1%	<1%	存在一次主枝晶, 但二次枝晶量多 且比较细	2~3级

4 结论

(1) 在中频感应电炉上进行合成铸铁的试验, 在保证熔化成份均匀、出铁温度 $\geq 1480\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前提下, 以50%废钢+50%新生铁的炉料配比, 用鳞片状石墨充分浸润的增碳工艺, 抗拉强度普遍提高10~20 MPa(与30%废钢+70%生铁相比), 壁厚敏感性(不同截面硬度差) $\Delta\text{HB}_{\text{max}}$ 降低10~20 HB, 三角试片白口宽度在1~3 mm之间。

(2) 合成铸铁、复合孕育再辅之以低合金化的试验铸铁(0.35%~0.45% Cu, 0.15%~0.25% Cr), 与普通铸铁(HT250)相比抗拉强度明显提高一个牌号(强度提高40~50 MPa), 并且性能波动范围不大。要达到HT250以上的力学性能, 试验铸铁的CE可以控制在

3.9~4.1范围内, 力学性能稳定。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王春祺. 铸铁孕育理论与实践 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1991: 165-166.
- [3] 崔恒宣. 合金铸铁生产工艺 [J]. 现代铸铁, 2000 (3): 47-49.
- [4] GRAHAM P S. Principles of manufacturing ductile iron gears [J]. AFS Trans, 1995, 46: 437-445.
- [5] 俞卫全. 高韧性合成球墨铸铁的生产 [J]. 现代铸铁, 2005, 25 (4): 34-35.
- [6] 夏伯才, 钱翰城. 高碳当量灰铸铁成分的遗传优化 [J]. 铸造, 2003, 52 (12): 1153-1156.

(编辑: 曲学良, qxl@foundryworld.com)

(选自《铸造》2006年第8期)