● 工艺技术 Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.09.008

合成铸铁熔炼过程中增碳剂与碳化硅的最佳配伍

池震宇,池 炎
(郑州新达冶金技术有限公司,河南 郑州 450000)

摘 要:合成铸铁熔炼,增碳剂与碳化硅除了调整碳量,并在铁液中生成大量弥散分布的非均质结晶核心,特别是碳化硅的成核效果和伴生功能,强化铁液的孕育预处理,对改善基本组织和石墨形态提高铸件综合性能,具有重要意义。

关键词:增碳剂;碳化硅;碳当量;预处理

中图分类号:TG251 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)09-0915-07

Optimum Compatibility of Carburizer and Silicon Carbide in the Melting Process of Synthetic Cast Iron

CHI Zhenyu, CHI Yan
(Zhengzhou Xinda Metallurgical Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450006, China)

Abstract: Synthetic cast iron smelting, carbonizing agent and silicon carbide not only adjust the amount of carbon, but also a large number of dispersed and distributed heterogeneous crystalline cores are formed in the molten iron. In particular, the nucleation effect and associated function of silicon carbide, strengthening the inoculation pretreatment of molten iron. It is of great significance to improve the basic structure and graphite morphology of casting.

Key words: carburizer; silicon carbide. carbon equivalent; pretreatment

感应电炉具有自由控制铁液温度和电磁搅拌作用,为添加增碳剂的合成铸铁熔炼提供良好的条件,促进合成铸铁在铸造领域的应用。国内从 20 世纪 90 年代开始,越来越多的铸造企业推广应用合成铸铁熔炼工艺,发展的态势良好。进一步推广合成铸铁熔炼技术,加大废钢比,采用优质增碳剂配合碳化硅的增碳技术和强化孕育预处理等措施,改善铸件基体组织和石墨形态达到提高铸件综合性能,降低生产成本,促使合成铸铁熔炼的普及和应用。

1 合成铸铁熔炼特点与力学性能

合成铸铁是不用或少用(少于 10%)生铁,以废钢回炉料加增碳剂的方法调节碳量,通过感应电炉获取优质铁液的方法。感应电炉具有温度调整和增碳吸收率高的功能,能使铁液的熔化、增碳、精炼在很宽的范围内调整。在废钢比增加时,可以增加碳当量,使废钢比增加不受技术上的限制。因此提高废钢比的简单工艺措施,成为合成铸铁提高力学性能,改善铸件综合性能的有效措施。

正确的熔炼方法,并使用大量增碳剂的合成铸铁比普通铸铁的力学性能更好。有关资料介绍,合成铸铁比普通铸铁的抗拉强度增加 30~60 MPa,硬度降低 10 HB[1]。合成铸铁的抗拉强度随废钢加入量增加而提高,其提高幅度随共晶度的提高而变小。当共晶度达 0.95,废钢从 25%增加到 62%时,抗拉强度提高不大,图 1[2]为采用 1.5 t 无芯工频感应电炉熔炼时,不同共晶度下合成铸铁抗拉强度与废钢加入量的关系。从图中看到高牌号灰铸铁更宜采用合成

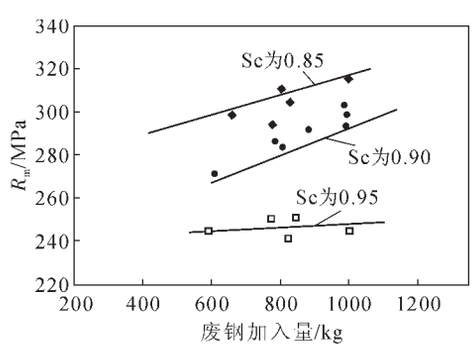


图 1 不同共晶度下合成铸铁抗拉强度与废钢加入量关系
Fig.1 The relationship between tensile strength of synthetic cast iron and the amount of scrap added under different eutectic degree

收稿日期:2018-11-12

作者简介:池震宇(1943-),浙江台州人,高工.主要从事硅碳系材料脱氧剂,增碳剂,提温计等研究和应用.
电话:13603844278,E-mail:1914637758@qq.com

铸铁。图 2[2]示出了合成铸铁的硬度随废钢加入量的增加其硬度的提高幅度不大，当废钢加入量<50%时，合成铸铁的硬度稍有提高，当废钢的加入量>50%时，随其量递增，则硬度呈略有下降的趋势，但仍保持在 HB200 左右。

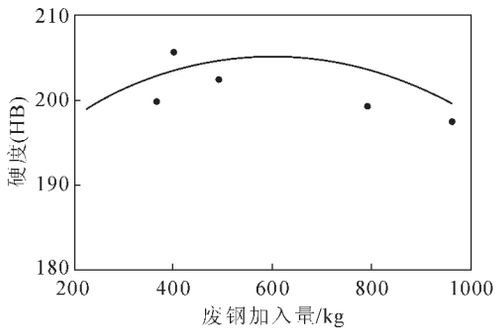


图 2 废钢加入量的增加对不同共晶度的合成铸铁的硬度影响

Fig.2 The hardness of synthetic cast iron with different eutectic degree was affected by the increase of scrap amount

合成铸铁力学性能提高的原因。

(1)合成铸铁使用大量废钢，一般废钢含氮 76~120×10^{-6}，因合成铸铁需要较多的增碳剂增碳，如使用含氮量较高的非晶体增碳剂(如煅烧石油焦增碳剂)，由于增碳剂中的氮向铁液中转移，致使铁液中的氮含量增高。如使用低硫低氮的石墨化增碳剂和合理的熔炼工艺，合成铸铁的氮含量少于 100×10^{-6} 其力学性能优于大量加入生铁的普通铸铁。

(2)大量废钢的加入，熔炼的合成铸铁消除了生铁中的有害元素和遗传性的影响，并且在增碳过程中，尤其在平衡温度以上增碳时，由于 C 的氧化和 SiO_2 还原，使铁液沸腾杂质上浮、净化铁液。

(3)大量优质增碳剂的加入使铁液中非异质预存晶核大量增加，改善石墨形核生长条件，增强石墨化能力，对灰铸铁而言使共晶团细化并分布均匀，石墨呈 A 型，避免出现 B 型及 E、D 型石墨，且使石墨片变小、变短。对球铁而言，使石墨球数显著增加，石墨球形更好，铁素体量增加[1]。合成铸铁的力学性能取决于增碳剂的质量，增碳工艺和熔炼操作。

2 高增碳率是获取优质铁液的主要条件

采用废钢+增碳剂+合金的工艺路线，熔炼合成铸铁能最大程度实现高的增碳率，高的铸铁石墨化程度，高的铁液纯净度，高的熔炼水平的铸造工艺。

在高碳当量下，如何提高强度，前提是铁液具有高的增碳率，只有高的增碳率才能充分石墨化，高的增碳率决定于活性碳含量。只有高活性碳含量的铁液，在凝固过程中才能进行石墨化。电炉熔炼如果新生铁用的多，新生铁中的粗大石墨在感应炉熔炼的工况下(1 550 ℃ 10 min)是不能溶解充分的，它是以游离石墨形态存在，这种没能充分溶解的碳就不能参与石墨化，在凝固过程中被保留下来，就称之为石墨的遗传性[4]。

感应电炉条件下，炉料中的新生铁带来的碳和采用废钢+增碳剂所达到的碳，虽然含量相同，但特性不一样。用全废钢增碳工艺熔炼的铁液与成分相同的，经冲天炉或冲天炉+感应炉双联熔炼的铁液浇注试样，在相同的浇注参数下，铁液的白口倾向、铁液收缩倾向、截面硬度的差异、石墨形态、力学性能均显示全废钢感应炉熔炼的铁液更好[4]。冲天炉熔炼 HT200 铁液的成分，如果感应炉全废钢增碳工艺，已达到 HT300 的水平，熔炼水平提高两个档次。当感应电炉全废钢增碳工艺碳含量降到 3.1%~3.2%，灰铸铁的性能可达到 HT350 水平。表 1 是国内外机床铸件碳当量对比[4]。

表1 国内外机床铸件碳当量对比

Tab.1 Comparison of machine tool casting carbon equivalent in China and abroad

牌号	碳当量均值(%)	
	国外	国内
HT250	3.95	3.75
HT300	3.82	3.55
HT350	3.76	3.45

国外感应电炉熔炼采用废钢+增碳剂工艺，新生铁加入量低于 10%，以前国内做 HT300 以上铸件是在大幅度降低碳当量及合金化的条件下达到的。此时铁液的缩孔增加、疏松增加、应力增加、加工性能变差，截面性能差异大。现在用全废钢增碳工艺熔炼铸铁，可以在高碳当量下获得高的强度。如果用这样的高纯度，高石墨化基础的铁液做球墨铸铁，石墨球数从未使用增碳剂的 42 个 /mm^2 增加到 200 个 /mm^2，这对改善球墨铸铁厚大断面石墨形态变差“断面效应”好处不言而喻。碳作为自发形核核心有个好处，它不自溶，是长效结晶核心，不像孕育剂，作为外来形核核心，会自溶、衰退。这对有低温冲击功能要求的球墨铸铁有很大好处，提高低温冲击值，且无须热处理，更不需要合金化[4]。这是其他熔炼工艺无法论比拟的。

3 增碳剂的品质和增碳效果

感应电炉熔炼时，加入到炉内或铁液包中，能提高铁液中的碳量，并能降低铁液中的氧含量，还能提高金属和铸件的力学性能的黑色或灰色的颗粒或块状的焦碳后续物称为增碳剂。增碳剂中以单质形式

存在的碳，熔点为 3 550 ℃，沸点为 4 194 ℃，3 500 ℃开始升华。各种碳材料基本都不具备活性，在高温下有很强的反应能力，在有氧的条件下加热，无定形碳在 350 ℃以上会发生氧化反应，石墨则在 450 ℃以上发生氧化反应。

在铁液的温度下，碳是不能熔化的，增碳剂中的碳主要通过溶解和扩散两种方式溶于铁液。当铁液含碳在 2.1%时，石墨化增碳剂中的石墨直接在铁液中溶解——直溶[3]。而非石墨增碳剂的直溶现象基本不存在，只是随着时间推移，碳在铁液中逐渐的扩散溶解。这使石墨化增碳剂的增碳速度明显高于非石墨增碳剂。国外某大学曾对各种增碳剂在铁液中溶解进行试验研究，试验表明，碳在铁液中的溶解受到固体粒子表面液体边界层的碳传质的控制。用焦炭和煤粒所得结果与石墨所得的结果对比，发现石墨增碳剂在铁液中的扩散溶解速度明显快于焦炭和煤粒一类样品，发现在样品表面形成一层很薄的粘性灰层，这是影响其在铁液中扩散和溶解性能的主要原因[4]。表 2 用常用增碳剂及成分。

增碳剂的固定碳含量和含碳量的含义，固定碳值是根据样品的水分、挥发分、灰分、硫分计算出的。而含碳量直接用碳硫测定仪便可获得。片面从增碳剂的固定碳含量和其他物质断定是否优质是不可取的。不少小型铸造厂购买增碳剂时，只注意增碳剂的价格和增碳剂的固定碳、灰分、挥发分等，往往忽视了一个重要元素——氮的含量的参数。通常氮以 3 种形态存在于铸铁中：①是以液态和固态在铸铁中；②是与铁液中的某种元素形成氮化物，如氮化硼；③是从铁液析出，以单质气体的形式存在，当含氮量超过临界点 (一般认为约 140×10^{-6}) 时，就会使铸件产生氮气孔。氮在铸铁中的作用具有两面性，有关资料介绍：氮含量每增加 10×10^{-6}，灰铸铁抗拉强度可提高 5~7 MPa，同时硬度可增加 3~4 HBW。通常认为铁液含氮量＜100×10^{-6}，则可稳定珠光体，使片状石墨变短变粗，端部钝化。在厚壁灰铁中出现紧实状石墨，故能有效的提高抗拉强度。若含氮量超过 140×10^{-6}，灰铸铁铁液则易在厚壁部分产生缩松缺陷。因此，合成铸铁应选择含氮量低的优质增碳剂或石墨电极碎作增碳剂。由于增碳剂中的氮含量缺乏简便而准确的方法，经验告诉我们，经 2 000 ℃以上高温石墨化处理的增碳剂，硫和氮的含量大幅降低，只要是硫含量在 0.05%的石墨化增碳剂相应的氮含量也低。

为进一步理解不同品种增碳剂的品质和冶金效果，将以石油焦为原料生产的两种增碳剂作以比较，见表 3。

表中可见石墨化增碳剂的增碳效果优于煅烧石油焦增碳剂。即便是晶体石墨增碳剂，石墨化增碳剂与石墨电极碎的增碳效果与吸收率不甚相同。多孔的“松糕”结构的晶状石墨化增碳剂的比表面积大，

表 2 常用增碳剂及其化学成分

Tab.2 Common carburizing agent and its chemical composition

晶体	增碳剂	固定碳(%)	灰分(%)	挥发分(%)	S(%)	$N\times10^{-6}$	$H\times10^{-6}$
结晶态石墨晶体	石墨化增碳剂(石墨电极碎块)	98.5	0.4	0.1	0.05	300	150
	天然微晶石墨	60~80		1~2			
	鳞片石墨(中碳)	85~90	13	0.5~1.5			
非晶态非石墨晶体	煅烧石油焦增碳剂	98.5	0.4	0.3~0.5	0.3~1.5	6 000	1 500
	煅烧无烟煤增碳剂	90	2.5	3.5	0.3		
	冶金焦增碳剂	85	10	1	0.5~1.0		
	沥青焦增碳剂	97	0.5	0.5	0.4	7 000	2 000
冶金碳化硅		30			0.07	300	150

表 3 石油焦为原料的增碳剂的特性比照

Tab.3 Comparison of properties of carburizer with petroleum coke as raw materials

石墨化增碳剂←	石油焦	→煅烧石油焦增碳剂
石墨化炉 2 200~2 600 ℃←	热加工方式	→煅烧炉 1 200 ℃
结晶态←	碳晶体结构	→非晶态
C98.5% S0.05% $N300\times10^{-6}$←	C.S.N	→C98.5%、S0.6%、$N6000\times10^{-6}$
C 2.1%直溶←	溶入铁液方式	→扩散溶解
高←	增碳速度	→一般
好←	增碳效果	→一般
好←	提温效果	→一般
6000 元 /t←	参考价格	4 000 元 /t

有更大的表面浸润于铁液，加快C的溶解和扩散，故其增碳效果和吸收率比致密的石墨电极碎屑高5%~15%[1]，所以增碳剂的空隙率对增碳效果和增碳吸收率至关重要，同样道理，煅烧石油焦增碳剂的增碳效果和吸收率优于煅煤增碳剂。

4 碳化硅的特性和铸铁冶金效果

碳化硅是碳原子与硅原子以共价健结合的非金属化合物，分子式为SiC，具有与石墨相似的六方晶体结构，可以列为石墨化增碳剂的特殊形态。碳化硅冶炼炉和石墨化炉都是属于同类型的电阻炉，它们工作原理见表4。

表4 碳化硅与石墨化炉发明者工作原理
Tab.4 Working principle of silicon carbide and graphitization furnace

名称	碳化硅	石墨化增碳剂
	碳化硅冶炼炉←卧式间歇电阻炉→石墨化炉	
发明者	1893年美国工程师艾奇逊发明	1895年美国工程师艾奇逊发明
工作原理	专用的石墨炉芯配置在电极之间的导电通路，在大电流通过炉芯时，将电能转变成热能，加热包围在炉芯周围的石英砂和石油焦的混合物，在2 000~2 600 ℃高温下，通过气相反应转化成碳化硅的晶体	以碳素(石油焦)及其制品坯和电阻料构成的炉芯作发热体、大电流通过炉芯时，将电能转化为热能，加热碳素或其制品坯，在2 200~2 600 ℃的非氧化气氛下，完成石墨化过程，转化为石墨

4.1 冶金碳化硅的工艺特性

碳化硅冶炼的间歇电阻炉的温度呈中心高，向外逐渐降低的趋势。图3是碳化硅冶炼炉温度及含量分布趋势。碳化硅的晶粒显示出由内粗外细的晶体结构，即中心部位于碳化硅晶体具有一定方向的链式结构，是晶体在放射式键的方向上联结，还有些键紧根生长在一起，形成致密的晶体结构，尺寸达数毫米，SiC含量97%以上属α-SiC晶型是磨料级碳化硅，做磨具和耐火材料的原料。离炉芯愈远，随着温度下降，碳化硅的晶体排列无一定规则，是多孔疏松的微晶结构，晶体尺寸在数微米是β-SiC晶型SiC含量在90%以下的二级、三级碳化硅称冶金碳化硅，是炼钢的脱氧剂、提温剂或作铸造的孕育剂和预处理剂。

4.2 碳化硅的冶金性能

4.2.1 碳化硅的溶解特性

在正常的大气压下，碳化硅是不溶解的，在2 780 ℃直接分解成气态硅。碳化硅能在铁液中逐渐溶解，因为碳化硅在空气中氧化，在其颗粒表面生成一层SiO_2膜，保护它不再氧化，故1 400 ℃还稳定少变化。碳化硅在金属氧化物的反应温度：FeO 1 300 ℃、MnO 1 360 ℃、CaO 1 000 ℃、MgO 1 000 ℃。在铁液和熔渣中的碱性金属氧化物和碳化硅表面的SiO_2膜反应，形成低熔点化合物，碳化硅表面形成的SiO_2被破坏，碳化硅继续被氧化，部分分解成Si和C进入铁液。

4.2.2 碳化硅的脱氧性能

碳化硅有关反应的自由能变化值均为零。碳化硅与铁液中或熔渣中的氧相互反应，放出大量的热，反应式为[6]：

铁液 $3[FeO]+SiC=3[Fe]+SiO_2+CO$

$\Delta G^{\circ}=607.354-91.57\ T$

熔渣 $(FeO)+SiC=[Fe]+Si+CO$

$\Delta G^{\circ}=261.001-52.88\ T$

由于按下列反应，渣中的氧化铁由5%~15%降到0.5%或更低，如此巨烈的炉渣，液态金属及炉衬的反应特性，提高了S在渣中的分配系数，从0.5%~2.5%到4.0~17.5，从而降低金属中的S量到0.035%~0.045%。同时减少渣的数量。除Si外，还降低铁液中气体的含量，因为从式中看出，CO释放可带出其他气体[6]。

4.2.3 碳化硅的氧化气氛下的耐高温特性

在碳化硅表面形成的SiO_2膜，对抵抗氧化具有特殊意义，根据它所固有的抗氧化性，碳化硅无论抵制冲天炉中氧化炉气，还是电炉中溶解时，都经得起空气的侵蚀。它能承受铁液温度不稳定造成的

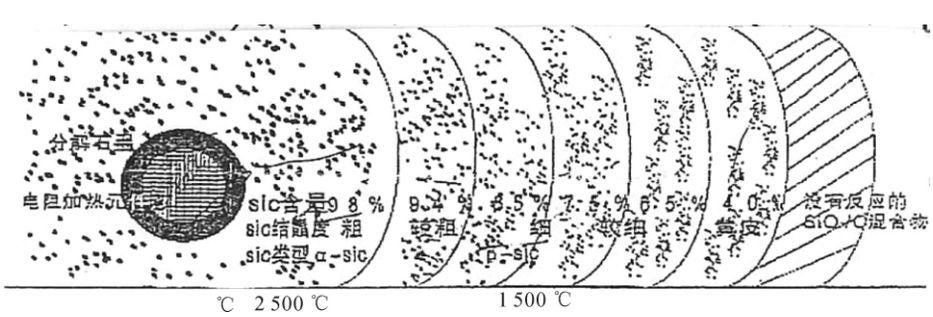


图3 电阻炉冶炼碳化硅含量分部趋势图

Fig.3 Distribution trend chart of SiC content in resistance furnace smelting

不良影响，无论温度高或偏低，都能达到良好的冶金效果。

4.3　碳化硅的铸铁冶金特性

4.3.1　碳化硅的预处理作用

合成铸铁熔炼过程，为改变铁液的结晶条件，常加入携带 Si 载体材料（如硅铁等），为改变铁液的结晶条件、铁液状态和化学成分，以获取优质铁液所作的条件准备，称之为预处理。表 5 是硅铁与碳化硅在铁液中的溶解特性。

表 5 硅铁与碳化硅的溶解特性

Tab.5 Dissolution properties of ferrosilicon and silicon carbide

Si 载体	硅铁	碳化硅
溶解特性	1 210 ℃起溶化到铁液中 不含碳 石墨晶体只由一个核心构成，核心中的碳只能从铁液中来在铁液中溶解速度快、浓度差、消失时间快。	在空气中不溶化，在铁液碱性金属氧化物中能逐渐溶解，较长的时间后所生石墨才能形成 含 30%的碳 石墨晶体核心多，凝固时碳过饱和区域作为核心起作用，形成石墨的数量多，形成的时间以及寿命都长。更能承受铁液不稳定造成的不良影响。 碳化硅颗粒表层的 SiO_2 膜的阻碍，影响石墨的生成时间和停留时间，使石墨析出时间延长，使碳化硅起到了保证长效孕育功能。

由于最终的目的不同，预处理的内容有所区别，对灰铁而言，共晶团细化而分布均匀，石墨呈 A 型，并使石墨变小、变短；对球铁而言，使石墨球数增加，石墨球型更好，铁素体增加。预处理的效果的参数是：石墨形态共晶平衡温度的过冷度，共晶体晶粒度，在所有的情况下，随着饱和度增加，石墨共晶晶粒度提高，共晶过冷度减少[6]。

碳化硅的预孕育能力有一种新评价，文献指出：含 SiC82%与 88%的所呈现的结果，不是含高 SiC 量的碳化硅表现出的强烈的生核效果，而是最低的那部分碳化硅在起作用[6]，图 4 是 SiC 种类和预处理结果之间的关系。对 SiO_2 膜层延迟溶解过程的方法是将 SiC 加入少量碱性物质，形成低熔的碱性硅酸，观察碳化硅溶解过程。人为的对 SiC98%进行氧化处理，溶解速度明显降低到与 SiC84%接近，证明 SiO_2 膜对 SiC 颗粒溶解动力学起重要影响，可以说 SiC 起到长效孕育的 Si 源作用[6]。

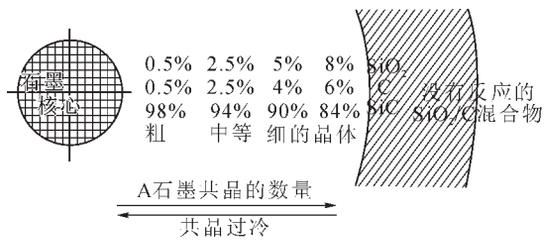


图 4 SiC 种类和预处理效果之间的关系（棒横截面）

Fig.4 Relationship between SiC species and pretreatment effect (cross section)

4.3.2　碳化硅的孕育作用

合成铸铁铁液中，石墨的析出，石墨形核，主要依靠非异质晶核作为铁液中大量的石墨生核剂，一般都是通过孕育来扩大非异质形核范围，碳化硅加入到铁液中逐渐熔融到铁液中发生下列反应。

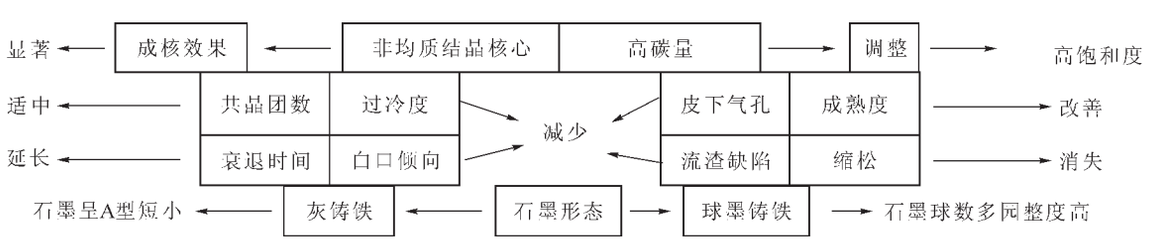
SiC+Fe=FeSi+C(非平衡石墨)

式中 SiC 里的 Si 和 Si 结合，余下的 C 就是非平衡石墨，作为石墨析出的核心。非平衡石墨铁液中的 C 元素不均匀分布，局部 C 元素过高，微区出现“碳峰”，析出的石墨就称为非平衡石墨。这种新生石墨有很高的活性，很容易吸收铁液中的碳，孕育效果极其优越。由此可见碳化硅就是这样一种硅基生核剂。熔炼时加入碳化硅对灰铁来说，由于非平衡石墨的预孕育作用，可以提高共晶团大量形成和生长的温度，有利于形成 A 型石墨，还可以以晶核数量增多，使片状石墨细小，提高石墨化程度，减少白口倾向，从而提高铸件力学性能。对于球墨铸铁而言，结晶核心增多，石墨球数随之增加，球化率得以提高。碳化硅作铸铁合金的添加剂除了增碳功能外，它产生的特殊伴生功能，对改善提高铸铁质量具有特殊意义。表 6 是碳化硅的孕育作用与伴生功能，文献指出 sic 是最好的脱氧剂，改善铸件质量，降低铸件不合格率，减少废品的一种方便、实用、经济、简单的技术措施[6]。

4.3.3　碳化硅提高硅石炉衬的感应电炉的使用寿命

表 6 碳化硅的孕育作用与伴生功能

Tab.6 Inoculation and associated functions of silicon carbide



碳化硅的脱氧作用，降低 FeO 和 MnO 在渣中的含量。耐火材料系统中的 FeO 都会生成低熔点的两相化合物，是渣中对炉衬最有侵蚀性的组分，在炉衬为硅石的条件下，FeO 会与 SiO_2 生成熔点 1 170 ℃，并常常成为黑色薄膜出现在炉壁上的铁揽石。因此减少渣中 FeO 含量，可以使炉衬的寿命提高 10%~100%。

5 增碳剂与碳化硅在合成铸铁熔炼中的应用

5.1 应用实例

(1)某铸造厂采用感应电炉生产 HT250 铸件，前期由于形核率低，白口倾向和相对过冷度大、铸件缩松，皮下气孔等缺陷较多，A 型石墨含量仅 60%~70%，加工性能不稳定，废品率达 10%以上，2014 年采用碳化硅取代部分增碳剂和硅铁进行增硅和预处理，取得较好的冶金效果，表 7 是炉料配比与力学性能。

金相试块从铸件本体取样，将原工艺未加碳化硅和试验加碳化硅工艺的石墨形态见图 5，图 6。从金相照片可以看出，经过碳化硅孕育处理的试样，其石墨组织以 A 型为主，呈小片状，且分布均匀，石墨大小为 4 级，基体中珠光体量明显增加，且细小，铁

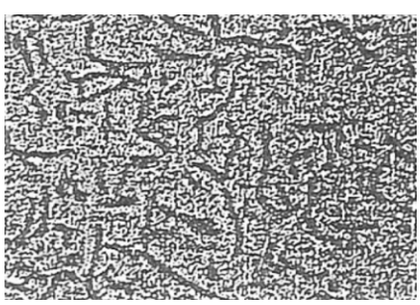


图 5 未加 sic 试样石墨形态 或 (未加 sic 试样)
Fig.5 Without SiC sample

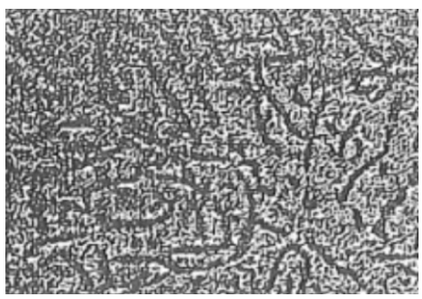


图 6 加 sic 试样石墨形态 或 (加 sic 试样)
Fig.6 Add SiC sample

素体量减少。没用碳化硅孕育处理的试样，其 A 型石墨呈粗长片状具分布不均匀，有局部过冷现象，石墨大小为 2 级周围存在少量 E 型石墨，基体组织中珠光体量较少且粗大，铁素体量较多。

(2)文献[1]介绍合成灰铸铁与普通灰铸铁力学性能和质量指标的比照见表 8。

从表 8 可以看到合成灰铸铁与普通灰铸铁相比抗拉强度增加 25 MPa，硬度降低 9 HB，这与灰铸铁的 CE 以及废钢加入量增加有关。合成灰铸铁的硬度当废钢加入量少于 50%时随废钢量增加硬度稍有提高，废钢加入量越过 50%时随废钢增加硬度呈下降趋势[2]。

(3)根据碳化硅的溶解特性，颗粒碳化硅作孕育剂是无法全部溶解。笔者曾用碳化硅微粉制作 1~5 mm 小球作孕育剂，在某铸造厂的出口配套的高压电瓷避雷器法兰，材质 QT450-10 的球墨铸件代替硅铁作孕育剂试验，铸件抗拉强度 σ_b608 MPa，比硅铁孕育剂 σ_b540 MPa，提高 12%。

5.2 熔炼工艺

5.2.1 增碳剂与碳化硅的选择

一般情况下废钢加入量少时，为了降低铁液熔炼成本，可选用非晶态的煅烧石油焦增碳剂+碳化硅，废钢加入量大时选用晶体的石墨化增碳剂+碳

表 7 HT250 铸件炉料配比力学性能
Tab.7 Mechanical properties of HT250 casting ratio of furnace charge

工艺	炉料 /kg			合金增碳剂 /kg				抗拉强度 σ_b/MPa	硬度(HB)
	生铁	废钢	回炉铁	硅铁	锰铁	增碳剂	碳化硅		
原工艺	150	350	500	7	8	14		246	206
加 SiC 工艺	100	500	400	5	4	12	8	268	215

表 8 合成灰铸铁与普通灰铸铁力学性能和质量指标对比
Tab.8 Comparison of mechanical properties and quality indexes between synthetic gray cast iron and traditional gray cast iron

	w(C)(%)	*w*(Si)(%)	CE(%)	抗拉强度 /MPa	硬度(HB)	成熟度	硬化度	品质系数
合成铸铁	3.3	2.17	4.02	260.7	197	1.04	0.94	1.11
普通铸铁	3.31	2.16	4.03	236.2	206	0.94	0.98	0.96

注：①合成铸铁炉料配比：0.8 打包废钢 >40%、废电极石墨 2%~5%、碳化硅 2%~5%、回炉料、铁合金，性能为 40 炉次平均值。②普通铸铁炉料配比：生铁 40%~50%、回炉料 40%、圆钢料 10%~20%、铁合金，性能为 42 炉次的平均值。

化硅，除了调节碳量外，使溶解的碳作为大量非均质结晶核心，提高铁液的成核能力。

不要采用煤质增碳剂，含碳量低，碳原子无序杂乱排列、组织缀密，空隙率低，质地光滑坚硬，杂质多，溶解速度与吸收率低。而漂浮在铁液表面，未吸收部分常挂在炉壁或夹杂在铁液中，形成夹渣、孔洞或气孔。

5.2.2 增碳剂与碳化硅的加入方式

由于废钢的加入量不同，其调整碳量也不甚相同，通常增碳剂用量 2%~3%，至于碳化硅的加入量，李传栻在《用感应电炉熔炼灰铸铁时的一些冶金特点》一文提出：随炉加入增碳剂最好配有一定比例（40%~55%）的冶金碳化硅；生产质量要求高的铸件、应在出铁前炉内加入冶金碳化硅，进行预处理。文献[8]指出，国外的灰铁和蠕铁铸造厂常常都有在炉料中配入一定数量的 SiC，通常的加入量是：灰铁 10~15 g/t，蠕铁 5~10 g/t。合成铸铁熔炼中增碳剂和碳化硅加入量可参考以上数值，根据熔炼的实际工况确定加入量，建议用量 0.8~1.5 g/t。

增碳剂和碳化硅的加入方式目前较多的是随炉料分批加入，使增碳剂和碳化硅在 1 150~1 370 ℃的铁液温度下浸润、扩散、溶解。具体的是先在炉底加入一定量的回炉料(或剩余的铁液)→废钢→增碳剂碳化硅(随废钢分批加入)→回炉料→铁合金。为了铁液达到要求的碳量，可保留 10%左右的增碳剂，铁液熔清后，打净炉中熔渣，再加增碳剂，通过铁液升温，电磁搅拌，使碳溶解吸收。出铁前加入碳化硅，铁液升温到 1 550 ℃有利于溶解吸收。除增碳剂与碳化硅品质外，加入方法、加入量、粒度、铁液温度、化学成分、铁液搅拌等工艺因素对铁液的增碳效率，孕育预处理效果有明显的影响。在生产条件下，往往是诸多因素同时起作用，难以对各种因素的影响作准确的判断和界定，只有通过试验数据的分析和论证的基础确认。

5.2.3 其他注意事项与建议

(1)铁液在大量增碳后，含氮量会显著增加，但要在接近平衡温度加合金后静置后再出炉，可使氮含量下降恢复到原水平。

(2)碳化硅的选购应采用碳化硅厂冶炼的含量 SiC76%~90%黑色或绿色玻璃状的颗粒碳化硅。碳素厂、电石厂、金属硅等厂的付产品碳化硅杂质大不稳定，可能会有些有害元素影响铸件质量，应慎重选用。铝电解槽的废旧碳化硅砖含铝量高，可能会引起皮下气孔增多，生产球铁时铁液中的铝会引起球墨畸变。

(3)对球铁在镁球化剂加入量相同情况下，使用碳化硅预处理，镁的最终收得率较高。如果铸件镁残留量大致相同，球化剂加入量可以减少 10%。

(4)铁液 C 3.6%后增碳困难。碳过高时降 C 0.1%，100 kg 铁液加 2~3 kg 废钢。

(5)增碳剂和碳化硅加入小型感应炉，最好采用牛皮纸袋或塑料袋包装投入感应炉中心，减少炉壁粘附损失。

6 结语

合成铸铁熔炼获得优质铁液，取决于增碳剂的品质，高的增碳率，合理的增碳工艺和熔炼操作技术水平。增碳剂与碳化硅除了调整碳量外，并在铁液中生成大量弥散分布的非异质结晶核心。特别是碳化硅的成核效果及其伴生功能强化铁液的孕育预处理，对改善铁液的基本组织和石墨形态，提高铸件的综合性能具有十分重大的意义。增碳剂与碳化硅是合成铸铁熔炼的最佳搭挡。

参考文献：

[1] 金永锡. 推广合成铸铁应用的若干工艺技术问题[J]. 现代铸铁，2009(5)：15-19.

[2] 柯缘，吴家立. 在感应电炉中合成铸铁的制得及应用[J]. 铸造，1986，35(8)：11-17.

[3] 王顺安，邹荣剑. 合成铸铁的生产和应用[J]. 铸造技术，2010，31(8)：1090-1093.

[4] 朱永敏，朱星火. 全废钢增碳工艺是感应炉熔炼铸铁的唯一优势工艺.

[5] 杨群收，田永富. 合成铸铁的熔炼及增碳剂的应用 [J]. 铸造技术，2017，38(11)：46-49.

[6] 周继扬. SiC 的冶金品性及其在铸造领域中的应用. 铸造工业.

[7] 张文和，丁俊. 铸铁的 SiC 孕育预处理 [J]. 铸造，2009，58(3)：279-281.

[8] 李传栻. 灰铸铁感应炉熔炼的一些冶金特点 [J]. 金属加工热加工，2009(3)：21-23.

[9] 中国机械工程学会铸造分会铸造手册铸铁[M]. 北京：机械工业出版社.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2019 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号：52–64　国外发行号：M855　国内定价：18 元/本　海外定价：18 美元/本