合成铸铁的研究及应用

王顺安，邹荣剑

（重庆大江信达铸锻有限公司，重庆 401321）

摘要：由于合成铸铁废钢加入量大，增碳技术成为其生产的关键技术。本文着重从探讨增碳原理、成分、合成铸铁熔炼工艺进行探讨，并对合成铸铁机械性能和金相组织等进行了介绍。

关键词：合成铸铁；增碳剂；机械性能；金相组织

近年来，随着铸铁的不断发展，生铁资源日益紧缺，优质生铁更是供不应求，价格日趋上涨。面对日益严峻的形势，一部分铸铁件生产厂家应用电炉生产合成铸铁技术，提高产品质量，降低成本，提高企业效益。在合成铸铁技术不断发展过程中，废钢加入量越来越大，从最初的 30%，现已增加到 80%。由于电炉熔炼合成铸铁废钢加入量的增大，其增碳技术是保证熔炼质量，改善铸铁组织和性能的关键。本文就电炉熔炼合成铸铁增碳原理，熔炼工艺进行了探讨，并介绍了合成铸铁的金相组织和性能。

1 增碳的原理

合成铸铁熔炼过程中，由于废钢加入量大，铁液 C 含量低，必须采用增碳剂增碳。增碳剂中以单质形式存在的碳，熔化温度为 3727℃，在铁液温度下不能熔化，因此，增碳剂中的碳主要通过溶解和扩散两种方式溶于铁液。当铁液的含碳量在 2.1%时，石墨增碳剂中的石墨可直接在铁液中溶解直溶[1]。而非石墨增碳的直溶现象基本不存在，只是随着时间的推移，碳在铁液中逐渐的扩散溶解。对于电炉熔炼合成铸铁的增碳，采用晶体石墨增碳的增碳速度显著高于非石墨增碳剂。

电炉熔炼铸铁采用增碳剂进行增碳，其碳在铁液中扩散溶解，国外某大学就这个问题对含碳物质在铁碳溶液中溶解进行了试验研究。试验把温度处在 1623～1923K 之间的各种含碳物质作为研究对象，研究它们在铁液中的溶解及相互作用。含碳物质的溶解遵守公式如下：

$$j = K \bullet (C - Cb)$$

式中：j ——表示碳溶解时的传质通量；

C ——表碳的饱和浓度；

Cb ——表示碳的主体浓度；

K ——表示总溶解系数，$\frac{1}{K} = \frac{1}{Ku} + \frac{1}{Kp}$；

Ku ——表示固体粒子表面液体边界层的碳传质系数；

Kp ——表示界面反应常数。

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。用焦炭和煤颗粒所得的结果与用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颗粒一类的增碳剂。用电子显微镜观察了部分溶解的焦炭和煤颗粒样品，发现在样品表面形成了一层很薄的粘性灰层，这是影响其在铁液中扩散溶解性能的主要原因。

2 影响增碳剂吸收率的主要因素

2.1 增碳剂粒度的影响

使用增碳剂的增碳过程包括溶解扩散过程和氧化损耗过程。增碳剂的粒度大小不同，溶解扩散速度和氧化损耗速度也就不同，而增碳剂吸收率的高低就取决于增碳剂溶解扩散速度和氧化损耗速度的综合作

用：在一般情况下，增碳剂颗粒小，溶解速度快，损耗速度大；增碳剂颗粒大，溶解速度慢，损耗速度小。增碳剂粒度大小的选择与炉膛直径和容量有关，一般情况下，炉膛的直径和容量大，增碳剂的粒度要大一些；反之，增碳剂的粒度要小一些。对于 1t 以下电炉熔炼晶体石墨粒度要求 0.5～2.5mm；1t～3t 电炉熔炼晶体石墨粒度要求 2.5～5mm；3t～10t 电炉熔炼晶体石墨粒度要求 5.0～20mm；覆盖在浇包中晶体石墨粒度要求 0.5～1mm。

2.2 增碳剂加入量的影响

在一定的温度和化学成分相同的条件下，铁液中碳的饱和浓度一定。铸铁中碳的溶解极限为([C%]=1.3+0.0257T－0.31[Si%]－0.33[P%]－0.45[S%]+0.028[Mn%](T 为铁液温度)。在一定饱和度下，增碳剂加入量越多，溶解扩散所需时间就越长，相应损耗量就越大，吸收率就会降低。

2.3 温度对增碳剂吸收率的影响

从动力学和热力学的观点分析，铁液的氧化性与 C-Si-O 系的平衡温度有关，即铁液中的 O 与 C、Si 会发生反应。而平衡温度随目标 C、Si 含量不同而发生变化，铁液在平衡温度以上时，优先发生碳的氧化，C 和 O 生成 CO 和 CO_2。这样，铁液中的碳氧化损耗增加。因此，在平衡温度以上时，增碳剂吸收率降低。当增碳温度在平衡温度以下时，由于温度较低，碳的饱和溶解度降低，同时碳的溶解扩散速度下降，因而收得率也较低。因此，增碳温度在平衡温度时，增碳剂吸收率最高。

2.4 铁液搅拌对增碳剂吸收率的影响

搅拌有利于碳的溶解和扩散， 减少增碳剂浮在铁液表面被烧损。在增碳剂未完全溶解前， 搅拌时间长，吸收率高。搅拌还可以减少增碳保温时间， 使生产周期缩短，避免铁液中合金元素烧损。但搅拌时间过长，不仅对炉子的使用寿命有很大影响，而且在增碳剂溶解后，搅拌会加剧铁液中碳的损耗。因此，适宜的铁液搅拌时间应以保证增碳剂完全溶解为适宜。

2.5 铁液化学成分对增碳剂吸收率的影响

当铁液中初始碳含量高时，在一定的溶解极限下，增碳剂的吸收速度慢，吸收量少，烧损相对较多，增碳剂吸收率低。当铁液初始碳含量较低时，情况相反。另外，铁液中硅和硫阻碍碳的吸收，降低增碳剂的吸收率。而锰元素有助于碳的吸收，提高增碳剂吸收率。就影响程度而言，硅最大，锰次之，碳、硫影响较小。因此，实际生产过程中，应先增锰，再增碳，后增硅。

3 增碳剂的分类

铸铁常用的增碳剂是一种碳质材料，主要成分是碳。碳质材料是要有石墨和无定形碳。石墨为六方层片状结晶（如图 1 所示），石墨晶体中的碳原子是层状排列的，在同层原子之间是以共价键结合，其结合力较强；而层与层之间则是以极性键结合，其结合力较弱。因此，石墨极易分层剥离，强度极低。由于石墨晶体具有这样的结构特点，因此在铁液中长大时就容易长成片状结构[2]。石墨可分为天然石墨和人造石墨两类，都是铸造行业中广泛应用的材料[3]。无定形碳也是六方层片状结晶，与石墨不同之处在于六角形配列不完整，层间距离略大（如图 2 所示）。

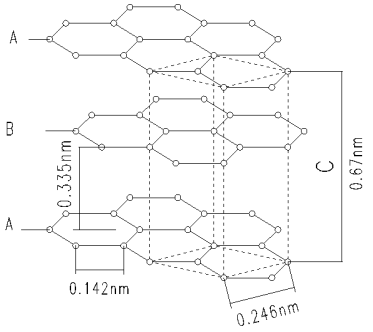

图 1 石墨的晶体结构

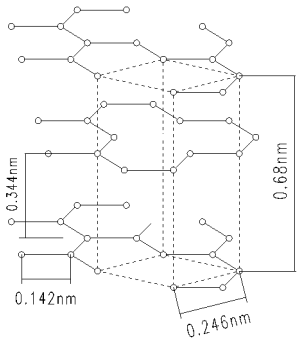

图 2 无定形碳的晶体结构

依据增碳剂中碳的晶体结构，增碳剂可分为非晶体态或晶体态。根据碳在增碳剂中的存在形态，分为石墨增碳剂和非石墨增碳剂。石墨增碳剂主要有废石墨电极、石墨电极边角料及碎屑、天然石墨压粒、微晶石墨等；此外，碳化硅（SiC）具有和石墨相似的六方结构也被列为石墨增碳剂的一种特殊形态。非石墨增碳剂主要有沥青焦、煅烧石油焦、焦炭压粒、煅烧无烟煤等。铸铁常用的增碳剂主要以晶体态的石墨增碳剂为主，其主要化学成分见表 1。

表 1 常用增碳剂的主要化学成分

增碳剂类别	化 学 成 分（%）				
	固定碳	灰分	硫	挥发物	水份
微晶石墨	95	0.64	0.10	1	1.5
碎石墨电极	99.9	0.20	0.010	0.099	
石墨粉压粒	97.5	0.30	0.07	2.20	
电煅煤增碳剂	98.4	0.22	0.85	0.05	0.25
沥青焦增碳剂	99.7	0.04	0.01	0.22	

4 合成铸铁的熔炼工艺

4.1 配料及加料顺序

感应电炉熔炼合成铸铁的炉料配比主要是回炉料+工业碳素废钢+增碳剂，再配以适量的合金（常见配比见表 2）。回炉料配量以本单位回炉料多少而定，一般情况下不超过 40%为宜。电炉熔炼合成铸铁时，由于废钢和石墨增碳剂的加入量增大，为确保增碳效果，增碳剂分两次加入，第一次将 60%的增碳剂以袋装的形式加在炉底的炉料垫层上；第二次将剩下的 40%的增碳剂在加废钢的过程中加入，使增碳剂以提高增碳剂的吸收率。加料顺序一般为炉底先加入回炉料，随后加入工业碳素废钢，合金材料硅铁、锰铁等均在炉料全部熔化打完第一次渣后加入。

表 2 炉料配比

项目	配比（%）				
	废钢	回炉料	生铁	增碳剂	其余合金
传统铸铁配比	30～50	30～40	10～40	1.8～2.0	适量
合成铸铁配比	40～80	20～60	10～40	2.5～2.8	适量

4.2 增碳剂的使用方法

4.2.1 炉内投入法

晶体石墨增碳剂在感应电炉熔炼中使用时，依据工艺要求不同而具体使用方法也不尽相同。在中频电炉熔炼中使用增碳剂，可按配比或碳当量要求随料加入电炉中下部位，回收率可达 95%以上； 铁液熔清后，如果碳量不足需要调整碳成分时，应先打净炉中熔渣，再加增碳剂，通过铁液升温，电磁搅拌或人工搅拌使碳溶解吸收，回收率可在 90%以上[1]。如果采用低温增碳工艺，即炉料只熔化一部分，熔化的铁液温度较低的情况下，全部增碳剂一次性加入铁液中，同时用固体炉料将其压入铁液中不让其露出铁液表面。这种方法增碳剂的回率可达到 85～90%。

若使用 5 吨以上的电炉，原料单一稳定，推荐使用分散加入法。根据含碳量的要求按配料比，将增碳剂与金属炉料随各批料一同加入电炉中下部位。增碳剂在熔化时不要打渣，否则易裹在废渣里，影响碳的吸收；集中加入法则适用于 3 吨左右中频原料单一稳定感应电炉。铁水熔化后，调整碳分，可以加在铁水表面，通过电炉熔炼时铁水的涡流搅拌或人工搅拌使晶体石墨增碳剂溶解吸收。

4.2.2 炉外增碳

出铁时增碳剂，将 100～300 目的石墨增碳剂放到包内，或从出铁槽随流冲入，出完铁液后应充分搅拌，尽可能使碳溶解吸收。碳的吸收率在 50%左右。

5 合成铸铁的金相组织和性能

经过增碳剂增碳处理后的铸铁，由于使用大量的增碳剂增碳，在铁液中生成了大量弥散分布的非均质结晶核心，降低了铁液的过冷度，促使生成以 A 型石墨为主的石墨组织。同时，由于生铁用量少或不用生铁，生铁的遗传作用大为削弱，因此使 A 型石墨片分枝发达不易长大，使得石墨短小且均匀（见图 3）。不同种类的废钢都含有一定量的氮，由于废钢加入，以及使用氮气作为喷粉法的载体，使得铸铁中有的氮量较高，铸铁中氮通过改变铸铁组织中的石墨结构铸铁素体形成，促进珠光体形成（见图 4）。

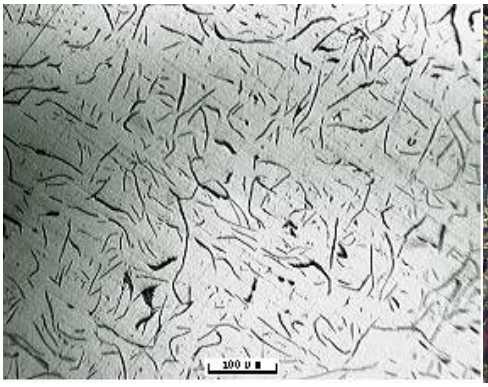

图 3 合成铸铁石墨形态

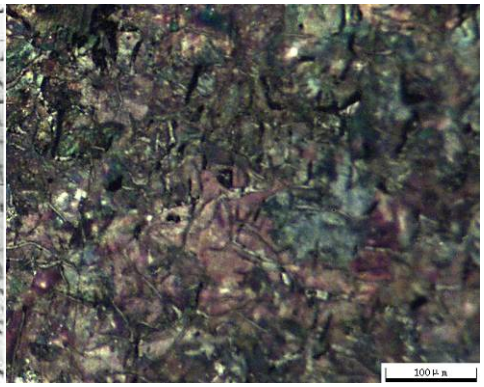

图 4 合成铸铁珠光体组织

生铁中有许多粗大的过共晶石墨，这种粗大的石墨具有遗传性，熔炼过程中很难被消除，削弱了铁液在凝固过程中石墨化析出的膨胀作用，增大了铁液凝固过程中的收缩倾向[4]。在普通灰铸铁的生产中，由于加入大量的生铁，在铸铁的金相组织中常会出现大块状石墨，而且石墨长度较长（见图 5）；珠光体数量相对合成铸铁而言也有所减少（见图 6）。由于合成铸铁使用废钢+晶体石墨增碳的工艺，晶体石墨增碳剂的原子呈 C_6的六角晶格几层堆积的状态存在[5]，C 原子的扩散速度较快，加快了增碳速度，提高了铁液的石墨化能力，使铁液的收缩性反而变小，减小了铸件产生缩松的倾向。从金相分析结果可以看出，合成铸铁的石墨基本是全是 A 型石墨，并且石墨变得短粗，较好的改善了铸件的性能。

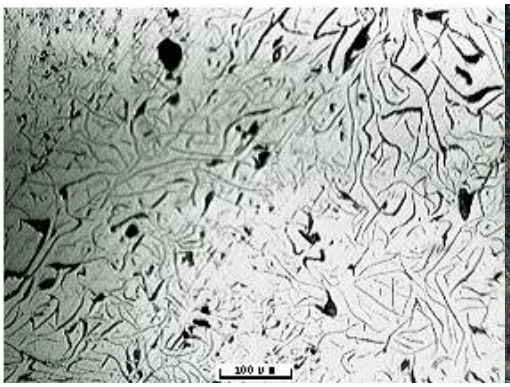

图 5　普通灰铸铁石墨形态

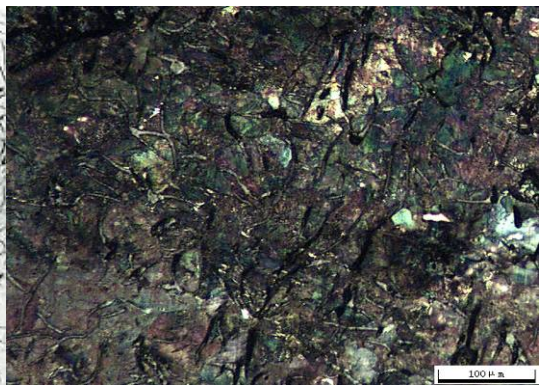

图 6　普通灰铸铁珠光体组织

使用晶体石墨增碳剂增碳处理使铁液中的石墨晶核数量明显增多，改善了石墨形核、生长条件，石墨化较完全，补偿电炉熔炼时石墨晶核减少或钝化所带来的影响，游离渗碳体减少，白口深度小。不难看出，经增碳剂增碳处理后，铸铁白口倾向减小。在碳当量相同的情况下，合成铸铁的抗拉强度比普通灰铸铁高 15～30MPa，硬度提高 10HB 左右；而且，其铸件本体硬度更加均匀。实际生产中普通灰铸铁和合成铸铁的机械性能对比情况如下（见表 3）。

表 3　普通灰铸铁和合成铸铁的机械性能对比情况

项目	合成铸铁			普通灰铸铁		
	抗拉强度 σ_b（MPa）	硬度 HB	本体硬度 HB	抗拉强度 σ_b（MPa）	硬度 HB	本体硬度 HB
1	289	213	200	256	195	185
2	275	217	211	250	204	201
3	285	223	206	263	201	200
4	279	221	205	270	207	205
5	290	215	210	259	199	190
6	287	219	205	264	210	203
7	281	222	208	260	212	204
8	283	216	208	270	213	210
9	291	220	210	280	220	211
10	279	218	210	254	205	197

注：表 3 的数据是在同样的生产条件下，在化学成分为：C：3.10～3.50%；Si：1.70～2.40%；Mn：0.40～1.00%；S：0.08～0.15%；P≤0.10%。采用感应电炉熔炼时所测得的数据。

结果表明，电炉熔炼铸铁，增加废钢用量，使用增碳剂增碳，减少或取消生铁，用合成铸铁的方案生产铸铁件，不仅可提高铸铁件的硬度，而且还可改善铸铁件本体硬度的均匀性[5]，改善铸件的切削性能。

6 结束语

（1）电炉熔炼合成铸铁的增碳，采用晶体石墨增碳的增碳速度显著高于非石墨增碳剂的增碳速度。

（2）不同的熔炼方式，应采用不同的增碳方式，选择合适的增碳剂。

（3）合成铸铁采用晶体石墨增碳剂进行增碳，可作为先共晶晶核和共晶石墨晶核，在铸铁凝固过程中促进石墨形核，可获得细片状 A 形石墨，并且石墨变得短粗，较好的改善了铸件的切削性。

（4）使用晶体石墨增碳剂增碳的铁液，白口倾向减小，抗拉强度比普通灰铸铁高 15～30MPa，硬度提高 10HB 左右。

参考文献：

[1] 邓宏运，曹瑜强等，采用电炉合成铸铁技术提高铸造厂效益[J]，世界铸造报，2009，(5)：17～19.

[2] 中国机械工程学会铸造分会，铸造手册第一卷·铸铁[M]，北京：机械工业出版社，2002.2：13.

[3] 李传栻，铸铁和铸钢中的碳[J]，现代铸铁，2009，(4)：61～67.

[4] 逄伟，HT300 高强度缸体缸盖材料熔炼技术研究[J]，现代铸铁，2007，(6)：13～18.

[5] 星山康洋，林尤栋，三宅秀和等，增碳铸铁熔液的特性与凝固行为[J]，铸造技术，2007，(7)：895～898.