



# 低碳铸铁增碳技术

甘宅平<sup>1</sup>, 金 焱<sup>2</sup>, 毕学工<sup>2</sup>, 喻淑仁<sup>2</sup>

(1. 武钢轧辊公司, 湖北武汉 430083; 2. 武汉科技大学冶金工程系, 湖北武汉 430081)

**摘要:** 介绍了增碳剂在铁液中溶解的机理和目前主要采用的投入法和喷粉法增碳工艺。影响增碳剂吸收率的因素有增碳剂粒度和加入量、铁液温度、搅拌时间以及铁液化学成分。增碳后可使铸铁组织改善、性能明显提高。目前国内, 对在反射炉内溶化铸铁时炉内无法增碳, 包内增碳又有温降、收得率要求高的困难等问题, 有待研究解决。

**关键词:** 增碳工艺; 增碳剂; 吸收率; 铸铁

**中图分类号:** TG250.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2003) 03-0157-04

## Technology of Recarburization Process in Melting Cast Iron

GAN Zhai-ping<sup>1</sup>, JIN Yan<sup>2</sup>, BI Xue-gong<sup>2</sup>, YU Shu-ren<sup>2</sup>

(1. Roll Company LTD. of WISCO, Wuhan Iron and Steel (Group) Corp., Wuhan 430083, Hubei, China;

2. Metallurgical Engineering Department, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

**Abstract:** The mechanism of solution of recarbonizer into cast iron melt is discussed. It is introduced that two kinds of recarburization processes include throwing-in process and powder-injection process. The factors influencing absorption of recarbonizer is analyzed, which included particle size, addition amount of particle, temperature of hot metal, stirring of hot metal, and composition of hot metal. After recarburization process the structure of cast iron is improved and property of cast iron is obviously improved too. Now in our country, there is not yet proper measures of recarburizing in reverberator process, and there are difficulties of temperature-drop and yielding-rating in recarburizing in hot metal ladle, and it should be studied.

**Keywords:** recarburization process; recarbonizer; absorption; cast iron

在铸铁熔炼过程中, 铁液熔炼、保温时间较长, 过热温度高, 碳的烧损较大, 使铁液中碳量降低。这需要采用适宜的增碳措施。另外, 大量利用废钢熔炼铸铁既降低成本又提高铸件性能, 但增碳处理必不可少。因此, 低碳铸铁增碳工艺的研究越来越受到重视。

迄今, 国内外对铁液增碳工艺的研究报导较少。实际增碳过程中, 增碳效果较差且不稳定、不易控制。因此, 对各种增碳工艺进行比较、对影响增碳效果的各种因素进行研究具有现实意义。此外, 采用反射炉的铸造工厂目前通过一般方法在炉内加增碳剂增碳和在炉后铁液包中喷粉增碳还不合适, 对于反射炉工艺如何增碳, 是今后需要研究的问题。

### 1 铁液增碳机理

巴西 Sao Paulo 大学对含碳物质在铁碳溶液中溶解速度进行了试验研究<sup>[1]</sup>, 研究了 1623~1923K 时各种含碳物质在铁碳溶液中的溶解速度及相互作用。光学纯石墨和工业焦炭被压制成圆柱体浸没在铁碳溶液中并加以旋转, 含碳粒子的溶解速度遵守公式 (1)。

$$j = k_t \cdot (C_s - C_b) \quad (1)$$

式中  $j$  ——碳溶解时的传质通量

$C_s, C_b$  ——碳的饱和浓度和主体浓度

$k_t$  ——总溶解系数,  $1/k_t = 1/k_m + 1/k_b$

$k_m$  ——固体粒子表面液体边界层的碳传质系数

$k_b$  ——界面反应常数

试验数据表明, 溶解速度受到固体粒子表面液体边界层的碳传质的控制, 即  $k_b$  可以忽略,  $k_t$  遵守式 (2)。

$$k_t = 0.19 \cdot \left( \frac{g \cdot \Delta \rho \cdot \rho_s}{\mu} \right)^{1/3} \cdot D_c^{2/3} \quad (2)$$

式中  $g$  ——重力加速度

$\Delta \rho$  ——浮力因子,  $\Delta \rho = (\rho - \rho_s) / \rho$

$\rho$  ——溶液体积密度

$\rho_s$  ——含碳饱和熔体密度

$D_c$  ——铁碳熔体中碳的扩散系数

$\mu$  ——熔体粘度

用焦炭和煤颗粒所得的结果与用石墨所得的结果对比, 发现其样品中的杂质和孔隙度影响到溶解速度。焦炭的  $k_t$  值随溶解时间的延长而下降。用电子显微镜观察了部分溶解的焦炭样品, 发现在样品表面

收稿日期: 2002-12-16 收到初稿, 2002-12-23 收到修订稿。

作者简介: 甘宅平 (1963-), 男, 河南罗山县人, 高级工程师, 主要从事铸造工艺研究。电话: 027-86899692

形成了一层很薄的粘性灰层,这是影响其溶解性能的主要原因。

金属熔池成分的影响。当熔池含硫较高时,碳的溶解速度由传质和界面反应共同控制。

含碳粒子加入方法的影响。当煤粒子直接加到铁液表面时,收得率为 77%,而煤粒子喷入铁液中时收得率为 59%。这是因为煤粒子喷入铁液内时,煤的挥发份脱除反应使得煤粒子表面形成气膜,阻止了碳的溶解。

## 2 增碳工艺

目前,国内外采用的增碳工艺主要有喷粉法和投入法。其中前者适合在铁液包内增碳,增碳速度快;后者适合在感应炉内增碳,收得率较高,效果稳定,使用广泛。

### 2.1 喷粉法增碳

前苏联的试验发现<sup>[2]</sup>,随铁液碳含量增加,增碳剂收得率下降。当铁液原始碳含量为 2% 时,向铁液包中喷吹增碳剂,增碳剂的消耗量与生铁中含碳量的变化呈线性关系。当碳含量大于 3.5% 时,增碳率下降;当铁液含碳量由 2% 增加到 4% 时,需喷入 40kg/t 焦炭粉,增碳剂的收得率为 50%;含碳量从 4.16% 增加到 4.5% 时,需喷入焦炭粉 15.2kg/t,此时收得率仅为 22%。

攀枝花钢铁公司由于工艺要求只能在铁液包中增碳,所以选用能在较短时间内增碳的喷粉法<sup>[3]</sup>,试验选用了焦炭粉,喷入量为 40kg/t,预期能使铁液含碳量由 2% 增加到 4%。增碳过程曲线表明,随着铁液碳含量逐渐升高,曲线的斜率减小,即碳的利用率下降。由于烤包等情况不同,增碳过程的温降波动在 180~270℃,增碳前温度高于 1600℃,增碳后的铁液温度平均为 1299℃。喷焦炭粉增碳时,一般采用氮气作载体,但在工业生产条件下用压缩空气作载体更为方便。试验表明,当粉末浓度为 10kg/m<sup>3</sup> 时,用氮气和压缩空气作载体的脱硫效果无显著差别。压缩空气中配入过量炭粉吹入高温熔池中,碳在高温下与压缩空气中的氧燃烧生成一氧化碳,化学反应热可以补偿部分温降,且炉气也呈还原气氛,利于改善增碳效果。

### 2.2 投入法增碳

许多工厂都进行过投入法增碳试验,这种方法非常适于在感应炉中熔炼铸铁时使用。各工厂的增碳工艺略有不同。

四川柴油机厂进行增碳试验中<sup>[4]</sup>所用的增碳剂为碳精棒碎块(粒度 < 40mm)、碳化硅粉、焦炭粉等。加入量是铁液量的 0.1%~0.5%,增碳时间 20min~1h。该工艺在炉料配比计算时,应使铁液中

碳含量高于规格要求的 0.05%。在生产中的观察表明,当炉料熔清扒渣后,铁液呈暗红色,表面常有一层氧化膜。加入增碳剂后,铁液表面烟气增多,氧化膜逐渐消失。显然,在工频炉铁液中加入增碳剂有以下几种作用:①部分碳燃烧形成还原气氛,对铁液起覆盖和保护作用;②固体碳在工频炉强烈搅拌下溶解到铁液中,与铁液中 [O] 反应形成 CO 气泡,则可脱除铁液中的 [O] 和 [N];③弥补高温下碳的烧损。

齐齐哈尔第一机床厂的增碳试验是在 1.5t 感应炉上进行的<sup>[5]</sup>。试验时,先熔化部分铁液或用上一炉剩余的部分铁液。当铁液达到 1440℃~1460℃ 时开始试验,先一次加入所有的增碳剂,然后加入剩余炉料,使增碳剂全部压入铁液中,同时还应保证一定的熔化、吸收时间,使增碳剂不出现漂浮。增碳剂的粒度对碳的吸收也有影响,其粒度最好为: < 10mm (100kg 炉)、< 15mm (500kg 炉)、< 20mm (1.5t 炉)、< 30mm (20t 炉)。用这种方法加入增碳剂收得率高,碳的吸收也稳定。类石墨的收得率为 40%~50%;石墨电极 80%~90%;焦炭粒为 25%~35%。

## 3 影响增碳效果的因素

### 3.1 增碳剂粒度对吸收率的影响

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。例如,在 1.0kg 高频感应炉中,粒度 0.5~0.8mm 的增碳剂溶解速度很快,在没来得及氧化损耗前大部分已溶解于铁液中,只有少部分损耗掉,因此吸收率高。在 60kg 感应炉中,炉膛的直径和容量较大,增碳剂粒度 0.5~0.8mm,相对炉膛的直径和容量太小,损耗速度很快,吸收率低;而粒度 1.6~3.2mm 相对于炉膛直径和容量来说,增碳剂溶解速度较快,损耗速度较慢,溶解占据主导作用,吸收率高<sup>[6]</sup>。因此,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。

### 3.2 增碳剂加入量对吸收率的影响

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<sup>[6]</sup>:

$$[C\%] = 1.3 + 0.0257T - 0.31[Si\%] - 0.33[P\%] - 0.45[S\%] + 0.028[Mn\%] (T \text{ 为铁液温度})$$
。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。

### 3.3 饱和浓度一定, 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 有如下的反应<sup>[7]</sup>:  $[\text{Si}] + 2[\text{O}] = \text{SiO}_{2(\text{s})}$ ,  $[\text{C}] + [\text{O}] = \text{CO}_{(\text{g})}$ ,  $\text{SiO}_{2(\text{s})} + 2[\text{C}] = [\text{Si}] + 2\text{CO}_{(\text{g})}$ 。

$$\Delta G_{\text{T}}^0 = 549359 - 309.45 T \quad (3)$$

$$\lg \frac{[\text{Si}]}{[\text{C}]^2} = -\frac{27486}{T} + 15.47 \quad (4)$$

平衡温度  $T$  随目标 C、Si 含量不同而变化, 如式 (4) 所示。依式 (4) 可以计算出平衡温度。当铁液成分 (%) 为: 2.9~3.1C、1.0~1.2Si 时, 平衡温度为 1380℃ 左右。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  $\text{CO}_2$ 。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。但由于在实验室和生产过程中, 铁液温度总会受到诸多因素的影响, 所以, 实际增碳温度在计算出的平衡温度上加减 10℃ 左右波动。

### 3.4 铁液搅拌对增碳剂吸收率的影响

在增碳剂未完全溶解前, 搅拌时间长, 吸收率高。搅拌有利于碳的溶解和扩散, 减少增碳剂浮在表面被烧损。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。

### 3.5 铁液化学成分对增碳剂吸收率的影响

在宜昌船舶柴油机厂进行的增碳试验表明<sup>[6]</sup>, 初始碳量每增加 0.1%, 增碳剂吸收率大约降低 1%~2%; 硅量每增加 0.1%, 增碳剂吸收率大约降低 3%~4%; 硫量每增加 0.01%, 增碳剂吸收率大约降低 1%~2%; 锰量每增加 0.1%, 增碳剂吸收率大约提高 2%~3%。由此可见, 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, 在实际生产过程中, 应先增锰, 再增碳, 最后增硅。

## 4 增碳工艺对铸铁组织和性能的影响

### 4.1 增碳工艺对铸铁组织的影响

经过用增碳剂增碳处理后的铸铁, 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, 其遗传作用大为削弱, 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 1 和图 2<sup>[7]</sup>。

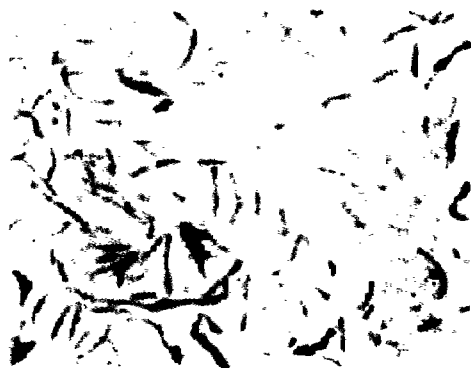


图 1 未增碳试样的石墨组织

Fig.1 The graphite structure of a sample without recarburization



图 2 增碳试样的石墨组织

Fig.2 The graphite structure of a sample after recarburization

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, 使得铸铁中含有的氮量较高, 铸铁中氮通过改变铸铁组织中的石墨结构阻止铁素体形成, 促进珠光体形成。随着铸铁中氮含量的增加, 还可形成氮化物, 如硼和氮化合形成氮化硼。氮化硼作为石墨结晶核心的基底, 为石墨创造了良好的形核成长条件, 石墨片变得短厚, 端部圆钝。因此, 灰铸铁中较高的含氮量不仅可以稳定基体中的珠光体, 而且能改善石墨端部状态<sup>[8]</sup>。

### 4.2 增碳工艺对铸铁白口倾向的影响

由于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, 补偿了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。因此, 增碳处理后, 铸铁白口倾向减小。

### 4.3 增碳工艺对铸铁强度的影响

一般认为, 提高铸铁的强度性能有两条途径, 首先是改变石墨的数量、大小、分布及形状; 其次是改

变基体组织特性。由上述分析可知,增碳处理后,改善了石墨大小、分布和形貌,珠光体量明显增多且变细,铸铁强度提高。

#### 4.4 增碳工艺对铸铁硬度和断面敏感性的影响

在宜昌船舶柴油机厂进行的增碳试验证实<sup>[8]</sup>,经过增碳后的阶梯试块各断面的硬度值都要高于未增碳处理的阶梯试块,且厚断面处硬度比薄断面处增加较多;经增碳处理后的阶梯试块断面最大硬度差值比未增碳处理的阶梯试块小,即经过增碳处理后的阶梯试块断面敏感性低。

### 5 反射炉内增碳工艺分析

在一些轧辊厂,用反射炉来熔化废旧轧辊,铸造生产新轧辊。由于反射炉炉膛面积大,熔池浅,炉内为氧化气氛,使铁液大量脱碳,熔清后往往得到的是低碳铁液,故必须采用增碳工艺。在氧化气氛下,在炉内采用增碳剂增碳,若随炉料加入增碳剂,势必造成增碳剂在原料熔化时大量氧化,收得率降低且不稳定。如果铁液熔池形成后加入增碳剂,由于熔池浅,会造成增碳剂在铁液液面漂浮,收得率同样很低。显然,用普通方法无法在反射炉内增碳。

如果采用喷粉法增碳,则只能在反射炉出铁后,在铁液包中增碳。如上所述,目前所用的喷粉法,会造成铁液温度下降过大,使后续铸造工艺很难正常进行。因此,采用反射炉的铸造工厂如何增碳,是需要研究的问题。

### 6 结论

(1) 铁液中碳的溶解速度主要受固体粒子表面液体边界层传质过程的控制, [S] 高时,溶解速度受到传质和界面反应的控制。

(2) 目前,国内外主要采用的增碳工艺有喷粉法和投入法,其中喷粉法增碳速度快,适用于铁液包中增碳,而投入法吸收率高,效果稳定,较多应用于感应炉。

(3) 影响增碳剂吸收率的因素有增碳剂粒度、增碳剂加入量、增碳温度、铁液搅拌时间和铁液的化学成分。采用增碳工艺后会改善铸铁的组织 and 性能。

#### 参考文献:

- [1] Marcelo B. Mourao. Experimental investigation of dissolution rates of carbonaceous materials in liquid iron-carbon melts [J]. Metallurgical Transactions B, 1993, 24B (8): 629~637.
- [2] 华西连柯 M Φ. 喷粉冶金理论与实践 (M). 北京: 冶金工业出版社, 1983
- [3] 蔡休刚, 等. 低碳含钒铁液增碳脱硫处理 [J]. 钢铁, 1990, (7): 22~26
- [4] 刘增林, 等. 工频炉铁液增碳预处理工艺 [J]. 铸造, 1997, (1): 58~59
- [5] 朱维明, 等. 工频炉熔炼铸铁的增碳技术 [J]. 机械工程师, 1995, (5): 36~37
- [6] 严青松, 等. 感应炉熔炼铸铁增碳工艺研究 [J]. 现代铸铁, 1999, (3): 28~32
- [7] 王家藩, 姚本翔. 用低温增碳工艺在感应炉熔炼可锻铸铁 [J]. 铸造, 1990, (1): 27~29
- [8] 严青松, 等. 感应炉熔炼增碳工艺对铸铁组织和性能影响的研究 [J]. 现代铸铁, 2000, (2): 17~20

(编辑: 田世江, tianshj@foundryworld.com)

## 鳞片石墨

我矿位于河南省南阳市内乡县北部伏牛山南麓,交通便利,石墨矿藏丰富,是我国优质鳞片石墨矿之一。随着国内外工业迅速发展,石墨的用途越来越广,用量越来越大,在国内市场上受到冶金、铸造、钢铁、电气、电池、化学等工业方面的好评。石墨的主要用途:铸造、铸造涂料、模润滑、炼钢、石墨坩埚、制作铅笔、轻工业作磨光剂耐火材料、复写纸作耐腐蚀材料,配制各种石墨炼钢保护渣。

总之,石墨是一种特殊的非金属材料,已在冶金、机械、化工、电器、轻纺、铸造、电池、电极等工业部门获得广泛使用。另外,本矿产品保质、保量、包退、包换,希望广大用户在使用过程中多提宝贵意见,也希望贵单位来电来函联系。

另外,本矿生产各种型号柔性石墨(也叫膨化石墨、倍数石墨、酸化石墨)。

本矿主要产品有:鳞片石墨、柔性石墨

主要生产的保温材料有:钢包铁包覆盖剂、铸钢覆盖剂、中间包、脱硫剂、增碳剂、引流砂、炼钢保护渣、膨胀珍珠岩等各种保温材料。

质量和信誉是我矿的生命。我们的信念是生产出一流的产品,提供一流服务。

### 河南省内乡县板场石墨一矿

地址:河南省内乡县板场乡 邮编:474366 业务经理:张保华 手机:13703415233  
电话:0377-5173218、5173079 传真:0377-5173079