

球 墨 鑄 鐵
產品質量的控制

蔣 凡 編 著

目 录

緒言	3
第一章 鑄鉄成分不适当所形成的缺陷及其預防	7
第一节 球化不良	7
第二节 韌性太低	50
第二章 鑄件凝固过程中出現的缺陷及其預防	67
第三节 縮孔及縮松	67
第四节 裂紋	96
第五节 冷隔	112
第三章 非金屬夹杂物引起的缺陷及其預防	116
第六节 黑点	116
第七节 針孔	127
第四章 鑄件热处理时常出現的缺陷及其預防	137
第八节 回火脆性	137
第九节 变形及裂紋	146
第十节 硬度不合格	149
附录	160
主要参考文献	163

緒 言

普通灰口鑄鐵中所含的石墨呈片狀，若在液態時加入少量的鎂、鈾或其合金作球化劑，並以硅鐵作墨化劑，則在鑄態時的石墨形態即改變成球狀。這種球狀石墨的鑄鐵，人們簡稱它為球墨鑄鐵。因其主要用鎂作球化劑，故又稱為鎂鑄鐵 (Магниевый чугун)；由於它的性能遠超過灰口鑄鐵、孕育鑄鐵，甚至合金鑄鐵，故也有人把它稱為超強度鑄鐵 (Сверхпрочный чугун)、高強度鑄鐵 (Высокопрочный чугун)，或者柔韌鑄鐵 (Ductile cast iron)。球墨鑄鐵的發現及其發展，是現代鑄工學上新興起來的一項尖端技術。

球墨鑄鐵與可鍛鑄鐵相比，其強度，特別是彈性極限較高，而對成分的要求不如可鍛鑄鐵那樣嚴格，可以鑄造厚件，也不需要經過冗長時間的熱處理。球墨鑄鐵與白口鑄鐵相比，除強度和韌性大為優越外，其硬度經表面感應淬火後可達到 $H_s \geq 600$ 。球墨鑄鐵與鋼相比，除延伸率、沖擊值和彈性模數稍低外，其他性能都相近；屈服點甚至還高。球墨鑄鐵對缺口的敏感性及其耐磨性和吸震性都比鋼為優。此外，球墨鑄鐵比鑄鋼有較好的鑄造性能，如熔點、流動性和直線收縮率都接近灰口鑄鐵，可以鑄成薄件或形狀複雜的零件；從組織生產球墨鑄鐵的角度來說，比生產鑄鋼優點多。製造球墨鑄鐵所需的設備簡單，基本建設投資甚少，不需要耐高熱的砂模，更不像鍛鋼那樣要有複雜的鍛壓設備，故製造成本低。我國一般工廠的成本比較是：

灰口鑄鐵:球墨鑄鐵:鑄鋼 = 7:9:13。

表 1 是苏联的生产成本的比較情况[1]:

表 1

名 称	灰口鑄鐵	孕育鑄鐵	球墨鑄鐵	鍛 鋼	可鍛鑄鐵	鑄 鋼
成本 %	100	110	130	185	226	252

球墨鑄鐵代替鑄鋼制造某些产品的成本比較見表 2:

表 2

零 件 名 称	价 值 (卢布)		成 本 降 低 %
	鑄 鋼	球 墨 鑄 鐵	
导向装置叶片	8150	3991	51
活塞	15800	9584	40
十字接头	8140	4948	40

以俄罗斯柴油机工厂所制造的船舶发动机曲軸为例, 球墨鑄鐵代替鍛鋼的經濟效果如表 3:

表 3

經 济 指 标	毛坯重量(吨)	淨重(吨)	机械加工劳动量 (額定小时)	价值(卢布)
鍛鋼曲軸	6.3	1.9	1000	41029
球墨鑄鐵曲軸	2.1	1.7	220	11740

由于球墨鑄鐵具有上述許多优点, 故可以在一切国民經济建設部門得到最优先最广泛的应用, 可以在我国大中小型企業(包括人民公社)做到遍地开花。这是因为球墨鑄鐵不仅适用于小零件小机器, 也适用于大零件和重型机器; 不仅适用于普通机器的制造, 而且也适用于高速高压高溫下工作机

器的制造。在某些重要产品的应用方面，我国已用球墨鑄鐵代替鋼制成了大型冶金軋輥、鋼錠模、15000千瓦水輪機主軸、高压閥門、高速運轉的汽輪機主軸、叶輪和水輪發電機轉子、要求严格的內燃機曲軸和凸輪軸等。据文献[25]报道：国外已用球墨鑄鐵制成了48.8吨重的压力机橫梁、60吨重的鉄砧台和120吨重的汽錘座。因此可以这样毫不夸大地說：球墨鑄鐵应当是而且也必然是实现[以鑄代鍛，以鉄代鋼]的“主力軍”。它对于我国目前全民办机械工业和多快好省地建設社会主义有着重大的經濟意义和政治意义。

是不是球墨鑄鐵在推广生产和普遍应用上就沒有一点問題呢？由于球墨鑄鐵是一种新型鑄鐵，就带来了一些新的理論和工艺問題。世界各国生产球墨鑄鐵的历史都很年青，生产中有些問題还没有得到彻底解决。比較突出的問題是，处理后球化尚不十分稳定。然而这并不能完全归咎于技术上的困难无法解决，而有时是属于控制不严格或操作上注意不够所造成。其次，球墨鑄鐵也有某些不利的鑄造特性，如体积收縮率大，故縮孔、縮松比較严重；鉄水凝固过程中的初期膨脹和形成的內应力都大，因而易产生裂紋。另外，还有某些因素，往往同时起着有利和有害的双重影响，如加鎂有球化、脫硫和除气等作用；另一方面，鎂所生成的 MgS 、 MgO 等熔渣，又会成为夹杂、黑点和針孔等疵病的主要来源。又如球墨鑄鐵鉄液的表面張力較大，使鑄件表面光洁度优于鑄鉄和灰口鑄鉄；而另一方面，却易促成发生冷隔。再如热处理本可改善球墨鑄鐵的质量，但如不注意加热制度，反而会使之出現回火脆性或其他缺陷。由于上述种种原因，有些生产球墨鑄鐵的工厂廢品率較高，因此或多或少地使某些人对提

高球墨鑄鐵产品的质量喪失信心，个别工厂甚至采取“因噎廢食”的态度而停止生产；也有些工厂不願将球墨鑄鐵积极应用于新产品上。

球墨鑄鐵的廢品率較高，并不是不可以避免和克服的。事实証明，只要思想上政治挂帅，重視产品质量；在工艺上积累更多的生产經驗，細致地分析和追究产生廢品的原因，相应地采取有效的措施加以預防，譬如对鑄件品质有密切关系的几个主要因素：金屬原材料的特性，鉄水的化学成分，球墨剂的加入量和加入方法，澆注的溫度和速度，热处理的溫度规范，以及鑄型的設計和制造等掌握和控制得好些，則可把廢品率减少到最低的限度。如上海矿山机器厂的廢品率仅为1.86~2.7%。显然，随着工艺上的日臻完善，和操作上愈加稳定，还会出现更理想的結果。

关于影响球墨鑄鐵产品质量常見的一些缺陷，为了叙述方便起見，按照其形成的来源，作者把它們分为如下四类：

第一类：鑄鐵成分不适当所形成的缺陷。如球化不良，韌性太低；

第二类：鑄件凝固过程中所出現的缺陷，如縮孔縮松，裂紋，冷隔；

第三类：非金屬夹杂物所引起的缺陷，如黑点，針孔；

第四类：鑄件热处理时所出現的缺陷，如同火脆性，异形及裂紋，硬度不合格。

以上缺陷，如果既已出現在球墨鑄鐵鑄件中，輕則降低产品的性能，重則使鑄件无法补救而報廢。

本书將詳細地分析以上几类缺陷的形成原因及其如何从工艺技术上采取措施加以預防，以保証球墨鑄鐵产品的质量。

第一章 鑄鐵成分不适当所形成的缺陷 及其預防

第一节 球化不良

球墨鑄鐵在开始試制，甚至恒定生产时，都可能出現球化不良的現象。它与配料、熔化、出鉄、加鎂、加硅鉄以及澆注等作业都有直接或間接的关系。其中最基本的关键是，球化处理不穩定，因而使鑄鐵中的余留鎂量不足。

通常用球化率来表示石墨球化的效果。当球化剂加入份量不足或鎂的損失較大时，則球化率降低，即鑄鐵組織中石墨不会全部呈球状，而出現部分团絮状石墨（如图 1）或部分片状石墨（如图 2）；球化率更低时，就会得到全部团絮状、

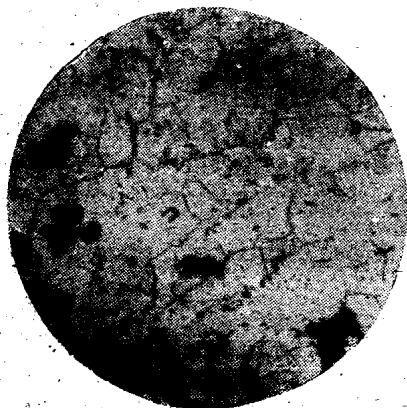


图 1 团絮状石墨，铁素体
基体：135X，已腐蝕。



图 2 棉屑状及片状石墨：
135X，未腐蝕。

表 4

等 級	等級代号	球 化 率 %
1 級	球90	90~100%球状石墨, 少量团絮状石墨, 无片状石墨
2 級	球80	80~90%球状石墨, 可有10~20%团絮状石墨, 无片状石墨
3 級	球70	70~80%球状石墨, 可有20~30%团絮状石墨, 无片状石墨
4 級	球60	60~70%球状石墨, 可有5%片状石墨
5 級	球50	50~60%球状石墨, 可有10%片状石墨
6 級	球<50	少于50%球状石墨, 多于20%片状石墨

棉屑状及片状石墨。

石墨的球化程度, 一般分为六級, 如表 4 所示。

图 3 相当于球化率 1 級, 而图 1 相当于球化率 5 級。

当球墨鑄鉄中出現团絮状及棉屑状石墨时, 其机械性能下降情况, 如表 5 所示:

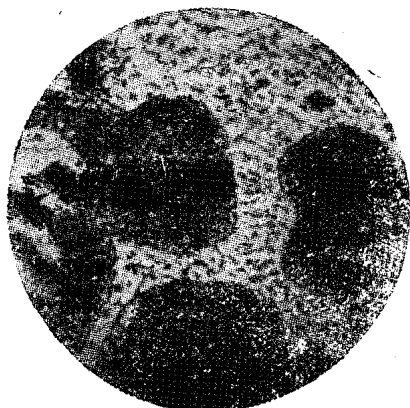


图 3 球状石墨, 珠光体基体: 135X, 已腐蝕。

表 5

球 化 情 况	机 械 性 能		备 注
	σ_s	δ %	
球化良好	45~51	18~25	經退火后, 基体为100%鉄素体
大部分球化, 夹有团絮状	38~45	8~10	經退火后, 基体为100%鉄素体
全部团絮状及棉屑状	27~37	1~3	經退火后, 基体为100%鉄素体

得到細微石墨片的球墨鑄鐵，鑄態基體是珠光體時，其機械性能類似孕育鑄鐵。

鑄鐵中出現厚片狀石墨時，隨着數量的增多，沖擊值會顯著的下降。圖4是退火後基體均為100%鐵素體時的比較情況。

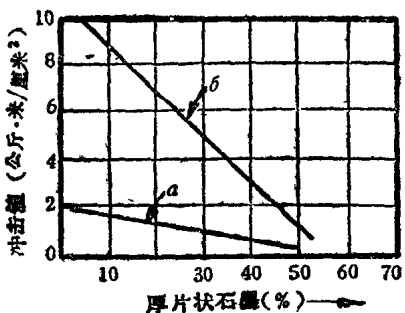


圖4 含厚片狀石墨對球墨鑄鐵沖擊值的影響：
a—為有缺口；b—為無缺口。

顯然，如果獲得幾乎全部厚片狀石墨時，其各種機械性能就與普通灰口鑄鐵無何差別了。

除上述球化率影響球墨鑄鐵的機械性能以外，石墨球的外形和球墨的大小也有關係：

石墨球外形圓正、較圓正、不圓正以及不成球狀，其機械性能依次降低；並且各類形態的石墨彼此間的分布與數量上的不同，也有不同的影響。

一般來說：鑄鐵中余留鎂量愈多，則石墨球愈圓；但鎂量再多，則出現白口而使石墨球數量減少，甚至沒有石墨球出現。

石墨球的大小，則決定於產生時構成石墨核心數量的多少，以及碳元素擴散動能的大小，而這些因素又與冷卻條件及含碳量多少等有關。根據石墨球直徑的大小，可分為五級（見表6）。

圖5相當於球墨大小4號。

在同一鑄件的截面上，有時可以發現幾種不同等級的球墨。如鑄件中心的球墨比鑄件表層的球墨要大，這是由於型

表 6

等 級	等 級 代 号	石 墨 球 平 均 直 徑 (毫 米)
1 号	球 徑 9	0.08~0.1
2 号	球 徑 7	0.06~0.08
3 号	球 徑 5	0.04~0.06
4 号	球 徑 3	0.02~0.04
5 号	球 徑 1	<0.02

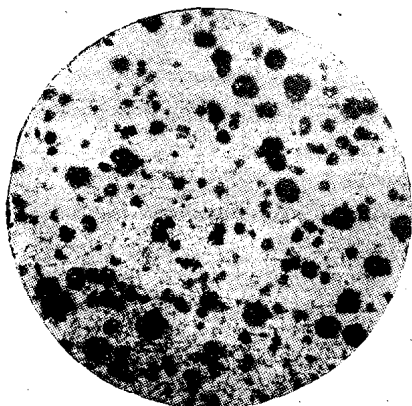


图 5 球状石墨，铁素体基体；100×，已腐蚀。

外散热速度不一样所致。因为冷却速度越慢，则析出的石墨球越大。因此铸件壁厚，中心部分的石墨球尺寸就越大；同理可以解释，用砂型（特别是干型）浇注后的铸件，其石墨球比用金属型浇注的为大。

此外，当铁水中含碳量高时，析出石墨球容易，则铸铁的石墨球大些，数量多些。

显然，石墨球越大，铸铁的性能有所降低。为了希望获得球径较小的球墨铸铁，有些工厂在熔化时，往冲天炉内加入废钢以降低碳量。下表是斯多脱司的实验数据：

应该指出：加废钢会增加成本，并给熔化方面增加困难。

表 7

炉 料 (%)			铁水含碳量 (%)	碳量增减情况 (%)
铸 铁	钢	含碳量		
100	0	3.36	3.32	-1
80	20	3.26	3.26	+22
60	40	2.03	3.19	+57
40	60	1.44	2.48	+77

帶有前爐的沖天爐所熔制的鐵水含碳量也較低，因鐵水在爐缸中不停留，故吸碳作用小。

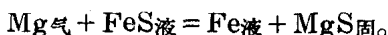
以下我們詳細地討論如何穩定球化，預防球化不良（主要指球化率）所應採取的措施。總的來說，它包括兩個方面，即準確地控制加鎂量與防止干擾性雜質對球化的影響。

一 準確地控制加鎂量以穩定球化結果

這是最基本的也是主要的一方面。然而鎂在鐵水內加入量的多少，由下列一系列的因數來決定：

1 原鐵水中的含硫量的影響

鎂加入鐵水後，首先發生下述反應：



待鐵水中的硫降低到 0.03 % 以下，鎂才能起球化作用。

按照理論上的計算，去硫 0.1 %，需要消耗的鎂量為：

$$\frac{24.32}{32.06} \times 0.1 = 0.076\%$$

故在球化處理時，去硫所消耗的鎂量，可用公式表示：

$$\text{Mg}_{\text{去硫}} = 0.76(S_1 - S_2),$$

式中 S_1 ——原鐵水中含硫量；

S_2 ——鑄鐵中余留的硫量。

普通鑄鐵內的含硫量在 0.08~0.15 % 之間，因此需要用於去硫的鎂為 0.06~0.1 %。根據國內外的實際經驗，為了使碳素（游離的）完全成為球狀石墨，鑄鐵中鎂的余留量應保持在 0.04~0.1 %，因此在理論上要求加入的鎂量為 0.1~0.2 %，而實際上由於其他種種原因（以後討論）導致鎂的損耗，而降低鎂的吸收率，所以一般情況下，要加入 0.3~

0.4% Mg 或更多一些。

假定球墨鑄鐵中余留含鎂量为 0.04%，余留含硫量为 0.02%，鎂的吸收率用 A 来表示，則加鎂量可用下式求出：

$$\text{Mg 加入量} = \frac{0.04 + 0.76(S_1 - 0.02)}{A}$$

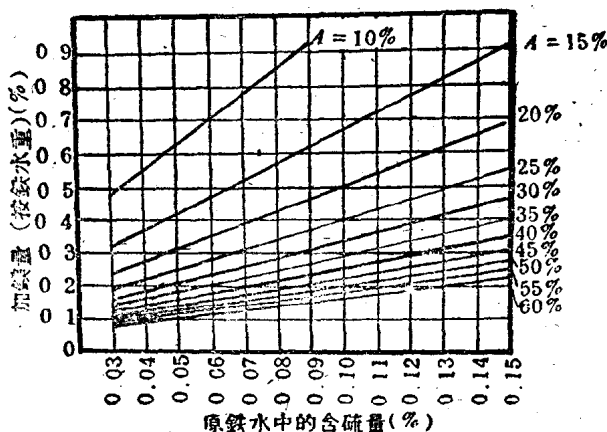


图 6 根据原鉄水含硫量，和鎂的吸收率决定加鎂量的示意图。

或者利用图 6，根据原鉄水含硫量和鎂的吸收率，直接查出所需要的加鎂量。

根据 Г. И. 克列茨金和 Л. Я. 奥才林娜的研究指出：无论实验或计算的数据都一致证明，原鉄水的含硫量和加鎂量对鑄鉄中石墨形状的影响有如图 7 所示。

图中假定鎂的吸收率为 25%，鎂在鑄鉄中余留量为 0.04%。

由图可以看出：要获得全部球状石墨，随着原鉄水中含硫量的增高，加鎂量必需相应地增多。而且经验证明：当硫分太高时，即使加入较多量的鎂，也不能得到全部球状石墨。

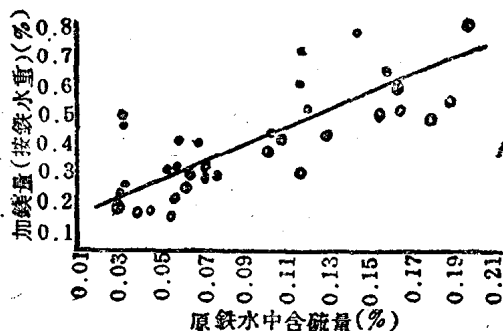


图7 原鉄水含硫量和加鎂量对球墨鑄鉄組織的影响:

●—球状石墨; ◐—細片状石墨; ○—片状石墨。

由此看来，应该尽可能降低原鉄水的含硫量，就能有把握預料余留在鑄鉄中的鎂量，能恰如其分地使石墨球化。这不仅可避免因含硫量过高而出現球化不良的缺陷，并且也可有效地节约用鎂量。

去硫的措施，通常从以下两方面着手：

1 炉内去硫 用普通酸性冲天炉熔化时，可增加熔剂用量到40~50%的焦重；也可配入一部分碳化鈣（电石）或燒結成块的碳酸鈉（苏打），但酸性炉内去硫效果仍是不理想的。

在大量生产球墨鑄鉄的車間里，最好采用碱性炉衬的冲天炉以获得低硫鉄水。根据生产的經驗：当炉渣碱度为2~2.5时，鉄水含硫量在0.03%左右。

如在風口附近把电石粉或石灰粉吹入炉膛，因为此处温度較高，所以脫硫效率也高。

减少鉄水中的硫，采用含硫量低的焦炭和生鉄，对酸性、碱性炉都是有利的。然而在大量发展土法炼鉄和炼焦的今天，我們不能对原材料的含硫量要求过分严格。

在缺乏碱性耐火材料的地区，可用炭素捣固炉衬（国外有用碳砖的），其主要成分为焦炭粉及焦油等。洛阳拖拉机厂采用水套炉衬，还可减少耐火材料的使用量，该厂试验用的熔化设备为三节炉：第一节炉缸用70%焦炭粉、30%粘土的混合料，加入适量的水、打结；第二节是水套，钢板内壳只挂一层10毫米厚的保护层，其成分也系上述混合料；第三节炉身砌普通粘土砖就可。根据试验证明，去硫效果较好。

2 炉外去硫 当铁水温度高时，可用炉前脱硫处理。常用的办法是在铁水中加入碳酸钠，加入量为铁水重的0.3~0.6%，所生成之渣侵蚀性大，且流动性太高，刮除困难，故同时宜加入少量石灰，使渣稍变厚，便于刮除。

若加入0.3~0.4%碳酸钠和0.3%石灰石粉，且事先预热到200~300℃，除硫效果可达50%左右。加石灰石粉的作用，除容易除渣外，且因其分解时发生大量二氧化碳气体，使铁水猛烈搅动，故对脱硫有利。

列宁格勒工学院铸造教研室提出的办法是：把熔融的 Na_2CO_3 被浇到一个特制的石墨管或陶瓷管中，管的下端是开着的（如图8），上端用石棉填塞住，将此管缓慢地放入盛有铁水的包子里中。此时 Na_2CO_3

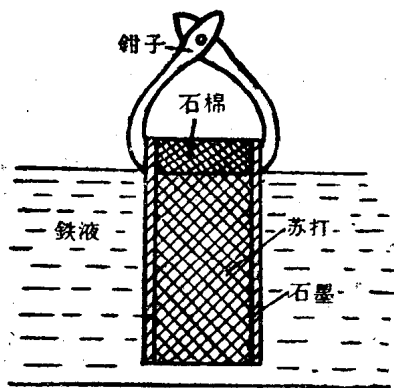
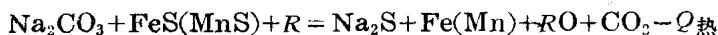


图8 装在石墨管中的苏打被送入铁液中去的的情况。

就一步一步地与管中上升的铁液相作用，由于生成的熔渣和

鉄液能強烈的混和，同時蘇打是逐漸發生作用的，故這一方法保證脫硫程度達50~60%。

蘇打脫硫的反應是這樣的：



其中脫氧劑 (R) 是依靠鉄液中碳或硅來進行。

湘潭縫紉機廠的辦法是：把碳酸鈉事先在 800~900°C 的坩堝內熔化，將此液態蘇打用定量勺送入鉄水包內，隨後沖入鉄水，使原鉄水含硫量由 0.21~0.26% 下降到 0.08~0.12%，去硫效果達 60% 左右。該廠熔化蘇打的裝置也比較簡單，如圖 9 所示。

所用燃料除碎焦炭外，也可使用無煙煤或煙煤。

經熔化後的液態蘇打，其去硫效率提高的原因是：

A. 液體蘇打在瞬間內即被鉄水稀釋開，與鉄水互相均勻混合，它有機會同鉄水內硫充分接觸並化合；如果用蘇打粉，當鉄水沖入時，一部分就會漂浮到鉄水面上夾在渣內，起不到去硫作用。

B. 液體蘇打比固體蘇打吸收鉄水的熱量少。顯然，鉄水溫度越高，去硫作用越大。對球墨鑄鉄來說，不因加去硫劑而過分降低鉄水溫度是很重要的。

除上述常用的碳酸鈉外，也有使用螢石作爐外去硫劑的。其加入量為 0.5~1.0%，可使普通鐘罩壓鎂法的投鎂量減為 0.2%；若用混合劑，無論對去硫清渣，都相當有效。例

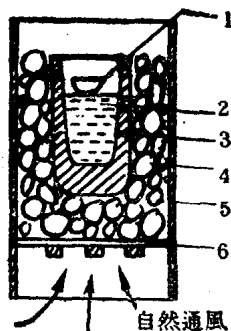


圖 9 蘇打熔化裝置圖：

- 1—定量勺；2—液體蘇打；
- 3—生鉄坩堝；4—碎焦炭；
- 5—廢油筒；6—爐條。

如用螢石25%、石灰石50%及碳酸鈉25%的混合劑，去硫效果可達50~70%；或用螢石50%、石灰石25%及食鹽25%的混合劑，其加入量可為加鎂量的一半，清渣作用良好。

去硫劑的加入方法：有將粒狀或塊狀的去硫劑投入前爐內；有將去硫劑放在鐵水包底，然後沖鐵水；或隨鐵水一起沖入包內；或用鐘罩壓入鐵水中。下面着重介紹一下近年出現的一種新的加入法——噴射處理法。

噴射處理是用乾燥的氮氣（或二氧化碳）為攜帶氣流，把細粒的碳化鈣用專門的噴射機構噴入鐵液內，其裝置如圖10所示。

由於碳化鈣的熔點比鐵水溫度高得多，要使細粒碳化物和鐵水發生反應，就必需使兩者

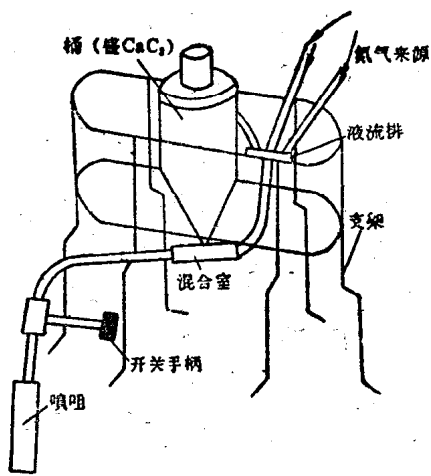


圖10 噴射 CaC_2 裝置示意圖。

充分接觸，故應將碳化鈣和氣體混合物引到金屬液面以下。

據蘇聯報道：在前爐中吹五分鐘 CaC_2 ，其耗用量為100克硫吹入1公斤 CaC_2 ，使鐵液內硫降到0.02%。

國內有許多單位在進行這項試驗，去硫效果可達70~80%，對酸性沖天爐鐵水可降低其含硫量到0.03~0.05%。

用碳化鈣處理法的主要效果，是可以減少鐵水中含硫量到相當低的數值；其次，用碳化鈣處理過的鐵水製成球墨鑄鐵，形成滲碳體的傾向也減少。

噴射法的缺点，是鉄水溫度損失較多（50~100°C）；有时設備不灵活，噴咀有堵塞現象。

此外，也可用壓縮空气噴射石灰粉。

綜上所述：去硫效率的高低，除了和去硫剂种类及鉄水溫度条件有关外；还决定于去硫剂和鉄水的接触情况。混合愈均匀，時間愈长，則去硫效率愈高。根据此一原理，目前在生产中有所謂混合去硫法：即把过量的去硫剂冲入第一包鉄水內，然后把它倒在盛有未处理的第二包鉄水內进行混和，鉄水經第二包底部的出鉄口流到第三包去，再进行球化处理。这样去硫效果可达70~90%。

当車間里有碱性、酸性两种冲天炉同时熔化时，只須將碱性炉的鉄水，不經扒渣，直接傾入盛有酸性炉鉄水的鉄水包內，这样也可以使后者达到去硫的目的。

此外，还应指出一点：用碱性耐火材料作为鉄水包的內衬，对鉄水也有一部分去硫作用。

2 碳和硅的总孕育作用

大家知道，C、Si 是促进石墨化的基本元素，Mn 是阻碍石墨化的元素；因此在 Mn 量一定的情况下，随着 C、Si 含量的增加，加鎂量必須增多，否則將不能保証球化。

依王遵明教授的估計：球墨鑄鉄中鎂的加入量和总孕育作用的定性关系如图 11 所示。

显然，如不經球化及墨化处理，当原鉄水含硅量少时，鑄态是白口；硅量稍多，鑄鉄呈白口夹石墨片；硅量更多，呈細灰口；硅量最多时，鑄鉄是粗灰口。

第二类情况是原鉄水硅量不太高，經球化处理，倘不