

在铁与铁球的学看处理

毛主席语录

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

灰铸铁和球墨铸铁的孕育处理

——内 容——

(一) 孕育处理在铸铁生产中的作用.....	(1)
(二) 国内外灰铸铁和球墨铸铁孕育剂的种类和特点	(2)
(三) 影响孕育效果的因素 (加入时间和加入方法、 铁水化学成分及特性、孕育剂的准备和孕育处 理的操作)	(5)
(四) 关于 石墨化孕育的机理.....	(13)
附: 参考 资料.....	(15)

灰铸铁和球墨铸铁的孕育处理

铸铁作为一种结构材料，在各种机器中占有很大的重量比。在许多情况下，铸铁件的性能在很大程度上关系到机器的效能、耐用性、重量和体积。随着我国机械工业的迅速发展，对铸铁的性能提出了越来越高的要求。我国铸造行业的广大工人、干部、技术人员，在鼓足干劲、力争上游，多快好省地建设社会主义的总路线的指引下，在提高灰铸铁和球墨铸铁的性能方面做了许多工作，得到了可喜的成绩。孕育处理是提高铸铁性能的最有效的工艺手段之一，充分利用和发挥孕育处理的潜在可能，对迅速发展铸铁生产具有重要意义。本文试就近年来国内外在铸铁孕育处理的实践和理论方面的发展情况作一介绍，仅供参考。

（一）孕育处理在铸铁生产中的作用

所谓铸铁的孕育处理，一般是指往铁水中加入少量的被称为孕育剂的特定物质，以影响铸铁结晶凝固过程中晶核的形成和晶粒的生长条件，达到改善结晶组织和提高性能的目的。孕育剂的孕育作用一般有二个鲜明的特点：一是所加入的孕育剂的量很少，一般只占铁水重量的千分之几，甚至万分之几以下，而其作用则十分显著，远远超过这些元素的合金化作用，并且在性质上和合金化作用完全不同；另一个特点是，各种孕育剂的孕育作用，在不同程度上都随加入铁水后时间的延续而逐渐减退，即所谓有“孕育衰退”现象。

在灰铸铁生产中，碳当量较低的，如不经处理将形成白口或麻口的铁水，经过石墨化孕育处理以后，能形成细的石墨共晶团，石墨片呈无规则均匀分布，且尺寸较小，金属基体大部为珠光体，这种铸铁具有较高的强度和耐磨性，达到HT25—47以上牌号的要求。这种孕育铸铁的断面上，组织和性能比较均匀，表面和薄壁处不会形成白口、麻口及晶间分布的石墨，在较高强度的同时，兼有良好的切削加工性能。

在球墨铸铁生产中，铁水的处理一般分为石墨球化处理（加入球化剂）和石墨化孕育处理（加入石墨化孕育剂）两步。球化处理按其本质来说，也属于孕育处理的范畴，但通常把球化处理作为一种特殊的处理过程来讨论。因此在谈到球墨铸铁的孕育处理时，一般是指在球化处理以后进行的石墨化孕育处理（也称后孕育）。铁水在经过石墨球化处理以后，如果不经石墨化孕育处理而直接浇注铸件，则在结晶凝固过程中不能形成大量的球状石墨核心，最后形成的组织中，会出现大量游离渗碳体，石墨球的数量少，平均尺寸偏大，尺寸不均匀，形状不圆整。大量的游离渗碳体需要长时间的石墨化退火才能消除，而一次石墨的形态和尺寸却是任何热处理方法所无法改变的。良好的石墨化孕育处理能促使形成大量球墨核心，消除球墨铸铁铸态组织中的游离渗碳体，细化石墨球，使石墨的圆整度改善，尺寸趋于均匀。石墨形态和尺寸的改善，对于常规机械性能，疲劳强度和负温下的韧性均有重要的影响。有的试验指出〔19〕，以直径25毫米的圆试棒

样为例，当单位面积内的石墨球数达到80个/毫米²以上时，便不会形成游离渗碳体，而当石墨球数达到88个/毫米²以上时，即可避免蠕虫状石墨的形成。

由于球墨铸铁中石墨球数的增多必然伴随着球状石墨的细化、圆整化和均匀化，以及游离渗碳体的消除，从而导至机械性能的改善，因而常以石墨球数（个/毫米²）作为判断孕育效果的一个主要指标。

（二）国内外灰铸铁和球墨铸铁孕育剂的种类和特点

国内各厂在灰铸铁及球墨铸铁生产中使用最普通的石墨化孕育剂是含硅量为75%的硅铁。此外尚有硅钙（Si—62.5%；Ca—32.0%；Al—1.10%）和以硅铁为主，掺入其它元素组成的复合孕育剂；75硅铁——铝，75硅铁——铝——77锰铁等。硅铁的来源较广，溶入铁水还比较方便，孕育效果尚可，因此使用最普遍。一些试验表明，在往铁水包中加入的条件下，纯硅和不含钙、铝的硅铁对于灰铸铁没有孕育作用。一般认为，作为孕育剂使用的硅铁应含有大于0.5—1.5%的钙和大于0.5—1.5%的铝。硅钙的孕育作用较75硅铁强，但其价格较贵，且熔点较高，铁水温度低于1370°—1400℃时使用效果不好。硅钙作为孕育剂的另外一个缺点是产生较多的渣子，在处理时还会放出较多的烟雾，所以使用不如75硅铁普遍。铝的石墨化作用强烈，且熔点低，加入量祇需很少（<0.05—0.06%）。但是铝会促使铁水表面形成氧化皱皮，还会和型砂中的水分作用（在潮模浇注时）而析出氢，造成铸件中的针孔。故铝的加入量应尽量低。锰本身没有石墨化孕育作用，且属于阻碍石墨化的元素，但试验表明，当锰铁与硅铁、铝等一起加入铁水时，却有增强孕育作用和延长孕育有效时间的作用。

国外在灰铸铁和球墨铸铁生产中使用最多的石墨化孕育剂也仍然是75硅铁、85硅铁和硅钙等。近年来发展了一批含钙、钛、锆、钡、锶、铈等元素的孕育剂，几种典型的成分见表1。

表1 国外石墨化孕育剂典型化学成份 [11]

类 别	化 学 成 份 %	Si	Ca	Al	其 它 元 素
75 SiFe	76.5	≥ 0.5 ≥ 1.5	1.3		
85 SiFe	85.0	≥ 0.5 ≥ 1.5	1.3		
CaSi	62.5	32.0	1.1		
Ca/Si	57.5	14.0	1.0		
Ca/Si/Ti	52.5	6.0	1.1		Ti10
Si/Mn/Zr	62.5	3.5	1.0		Mn6.Zr6
Si/Mn/Zr/Ba	62.5	2.1	1.0		Mn6.Zr6.Ba2.5
Si/Mn/Ca/Ba	62.5	2.1	1.25		Mn10.Ba5
Si/Ca/Ba	75—78	0.6—0.8			Ba1—2 [19]
Si/Sr	77.5	—	≤ 0.5		Sr1.0
Ce/Si	38.0	0.50	0.50		Ce10其它R.E3.0
放热SiFe	61.0	0.50	1.10		NaNO ₃ 10.0,Mg2.50

※ 表中各种孕育剂之化学成分中余数均为Fe。

表1中除标准的75 SiFe、85 SiFe、CaSi外的其它孕育剂，其共同的特点是孕育作用比较强烈，加入量可减少至75 SiFe加入量的 $1/2$ 至 $1/4$ 。由于加入量少，因此铁水降温少，铁水成分的变化也较一般75 SiFe处理时为小。每一种孕育剂又各具不同的特点，因此可在不同条件下选用不同的孕育剂以获得较好的孕育效果。

含钙14%的Ca/Si孕育剂，比起标准的含钙32.0%的硅钙来，有下述优点：①比重较大，易浸入铁水，因此虽然含钙量低，但具有和Ca32.0%的硅钙同等的效力；②由于含钙量较低，铸件中产生夹渣、气孔的危险减小，处理时的烟雾也减少。

Ca/Si/Ti孕育剂对在壁厚小于25毫米的铸件中避免白口和促使形成均匀分布的片状石墨特别有效，处理时不冒烟，在铁水含氮量较高时（灰铸铁中 $>0.005\%$ ），钛还会和氮形成细微的高熔点氮化物，从而避免铸件中的气孔。

含有锆、钡的孕育剂有很强的孕育作用，钡的作用尤为强烈。钡作为孕育剂的另一个特点是在铁水温度高达 1480°C 以上时，仍有很好的孕育作用，而钙的孕育作用只是在 $1370^{\circ}\text{C}\sim 1430^{\circ}\text{C}$ 的范围内发挥较好。

Si/Mn/Ca/Ba孕育剂中含有较多的锰（10%）和钡（5%），锰量的增加改善了孕育剂在铁水中的溶解速度，而钡量的增加进一步提高了防止孕育衰退的能力。这种孕育剂作为球墨铸铁生产中的石墨化孕育剂，和一般的硅铁比，具有下列优点：①加入0.3%的Si/Mn/Ca/Ba，其孕育作用相当于加入1.0%的硅铁；②孕育后铁水的增硅量为使用硅铁时的四分之一。据介绍〔19〕，含钡1—2%的Si/Ca/Ba，对球墨铸铁也有很好的孕育作用。试验结果指出：在经含钡1.85%的Si/Mg/Ba中间合金进行球化处理和含钡1—2%的Si/Ca/Ba进行石墨化孕育处理的球墨铸铁试块（ $\Phi 25$ 毫米）中，石墨球数达到250个/毫米²。

Si/Sr孕育剂的孕育能力比一般75硅铁强1.5至2.5倍，在达到同样孕育效果的条件下，Si/Sr孕育剂的加入量可相应减少1.5至2.5倍。据一些试验表明，Si/Sr的孕育作用只有在不含钙或极少含钙（ $<0.5\%$ ）的情况下才能发挥。由于Si/Sr极少含钙，同时加入量又少，带入铁水的铝也很少，所以不会在铸件中引起气孔和夹渣缺陷。对于薄壁的灰铸铁或球墨铸铁件尤为见效。Si/Sr孕育剂的另一个特点是能很快地溶入铁水。铁水温度在 1315°C 时，尚能很好溶于铁水。含Sr的孕育剂在有效地消除白口倾向的同时，不会像某些孕育剂那样增大铸件厚壁处的缩松倾向。

在往亚共晶铁水中加入少量稀土元素（铈、镧等）时，具有明显的石墨化孕育作用。据介绍，加入表1中所列的Ce/Si孕育剂0.05—0.10%时，即能有效地消除白口。Ce/Si孕育剂在消除白口的同时并不显著地细化共晶团和增大缩松倾向。Ce/Si孕育剂的另一个特点是能保持较长的孕育有效时间。资料〔21〕介绍了加入少量稀土金属对灰铸铁组织和性能影响的试验数据。在不进行处理将形成白口或表面白口组织的铁水中，如加入0.01至0.1%的铈等稀土元素，则凝固后将得到珠光体基体加片状石墨的组织，游离渗碳体消失，片状石墨的端部钝化。加入量过少，石墨化孕育作用不明显，加入量超过0.1%时，白口倾向重新加强，这时出现个别团状石墨。镧

这个元素和其它稀土元素不完全一样；加入0.001%的镧（La）时，白口倾向即显著减小；而增加加入量重新引起白口倾向加大的这个数量界线则比其它稀土元素为高。铈等稀土金属的少量加入（<0.1%），对过共晶成分铁水无孕育作用，而当加入量增至0.2%以上时，与出现部分球状石墨的同时形成一部分游离渗碳体。对于含硅低于0.8%的原铁水，少量的铈等元素无显著孕育作用，而镧则能在更低的硅含量（如0.56%Si）的铁水中有效地减小白口倾向。资料〔22〕介绍，在生产24—44牌号的薄壁灰铁铸件时，用加入0.07—0.1%的含稀土孕育剂（化学成分为：稀土总量30—32%，其中Y4%，Ce10%；Si43—45%；Fe17—19%；Ca1—2%；Al3—5%）解决了用75SiFe所未曾解决的消除表面白口的问题，同时还减少了因缩松而报废的情况。资料〔23〕介绍了含有稀土金属的复合孕育剂对铁水的脱气作用。可以认为，在亚共晶成分的铁水中，特别是在生产牌号较高的薄壁铸件或金属型铸件时，采用含稀土的复合孕育剂，能有效地消除白口，改善切削加工性能，提高强度和韧性，并能减少气孔和缩松缺陷。至于这类复合孕育剂的最适宜的加入量，则应根据铸件冷却速度，原铁水成分，孕育剂成分，浇注工艺等具体条件来确定。

表1中最后一栏是含有2.5%镁的放热硅铁。这种孕育剂的特点是能迅速地溶于温度低至1230℃的铁水中，在小的端包中加入0.05—0.10%，能有效地防止孕育衰退。这种含镁的孕育剂还可以在球墨铸铁浇注过程中作为补偿镁量降低的添加剂用。

上面讨论的都是石墨化孕育剂。在灰铸铁生产中的另一种情况是：需要通过对碳当量较高的原铁水的炉前或浇包处理（加入少量某种元素）来提高铸铁的强度和耐磨性，这种原铁水如不经处理，则只能获得较低的强度和硬度。加入少量的锡（0.05—0.10%），铈（0.03—0.06%）等元素可以有效地起到这样的作用。国内有一些工厂采用这种工艺。洛阳东方红拖拉机厂铸铁分厂在浇注气缸盖时加入少量铈，该厂有色修铸分厂用加铈的铸铁生产多种耐磨件。安阳锻压设备厂曾采用在出铁槽上加锡——0.05%，使铁水牌号提高一至二个级别。加入上述数量的锡、铈时，能有效地稳定珠光体，提高强度和硬度，并使组织和性能趋于均匀。少量的锡和铈对铸铁凝固时的石墨化过程并无显著的阻碍作用，故并不明显增大铁水的白口倾向，只是在铸铁的重结晶过程中，阻碍石墨化过程的发展，因而有利于形成珠光体基体组织。因此，从本质上来说，它们不属于孕育剂的范畴。但因为加入量较小（<0.1%），而作用较显著，和一般的孕育处理有某些相似之处，因而有时也有条件地被认为是属于孕育剂。

国内从60年代中期开始，发展了在高碳当量（多为过共晶成份）铁水中加入1%至2%稀土硅铁合金（包头704厂1#）来获得高强度耐磨灰铸铁的方法，称为稀土高强度铸铁。稀土元素在这种铸铁中的作用是使铁水脱硫、除气、使石墨大多呈蠕虫状析出，少量呈团球状析出，因而其抗拉强度极限能达到40—50公斤/毫米²以上，即超过灰铸铁件最高牌号HT40—68的要求。这种处理方法可以在炉料中不使用废钢的情况下浇注高强度耐磨的铸铁件，是我国铸造工人的一个创举。山东省机械设计研究院、济南材料试验机厂、济南第二机床厂、武汉重型机床厂、山东工学院等单位在这方面已进行了不少工作〔5.6〕。我省安阳锻压设备厂、郑州工学院等单位也进行过生产试验〔7〕。

近年来国外也开始注意稀土高强度铸铁的研究和生产〔20〕。根据石墨形态的特点,这种铸铁被称为蠕虫状石墨铸铁。

(三) 影响孕育效果的因素

同样一种孕育剂,在不同时间,用不同方法,加入到不同成分和特点的铁水中去时,其孕育作用会有很大的差别。

1〕、加入时间和加入方法

前面已经提到过,各种孕育剂的孕育作用,在不同程度上都随加入铁水后时间的延续而逐渐减退,即所谓有“孕育衰退”现象。在灰铸铁中,这表现为白口倾向的逐渐增大,单位体积内石墨共晶团数逐渐减少,最后恢复到原铁水的状况。在球墨铸铁中,孕育衰退表现为单位体积内球墨数的减少,游离渗碳体的数量逐渐增多,同时石墨球的平均尺寸变大。尺寸的不均匀性也增大,石墨的形态变得愈来愈不紧凑,出现较多的聚集分布的厚片状或蠕虫状石墨。这种现象已为国内外的许多实验室试验和生产经验所证实〔9·16〕。有的实验证明〔16〕,随着孕育时间的延长,石墨形态逐渐变得远离球状,然而只要保证有不低于0.03%的镁量,再次进行石墨化孕育处理,球状石墨就可以失而复得。由此可见,在许多情况下,球化衰退不是由于残留镁量不足,而是孕育作用消失的结果。

近年来,对于各类孕育剂的孕育效果和衰退现象进行了不少的试验。图1是某一组试验的结果〔19〕。在该项试验中,原铁水经1.8%的Ni/Mg合金(含Mg10—12%)进行球化处理,然后加入0.67%的不同种类的孕育剂,在1380—1400℃经过不同时间(2分到20分)的保温后,浇注 $\phi 25$ 毫米的卧浇试棒。所采用的孕育剂为硅铁75SiFe和98SiFe, MBa (Si75~78%, Ca0.6~0.8%, Ba1~2%), MCe2 (Si66.3%, Ca0.1%, Ce配比2.2%, 稀土总配比4.4%)。由于注意到铁水在孕育后的保温过程中,球化剂元素镁的残留量会逐渐减少,而球墨铸铁中的石墨球数既和孕育剂及其衰退速度有关,又和镁残留量有关(镁残留量的减少引起石墨球数的下降),故这组试验中将各类孕育剂的孕育效果在同一个镁残留量数值下进行比较,图1上的横座标不简单地是孕育后的时间,而是残留镁量(它是时间的函数)。这样可以避免在不同炉次的试验中,虽然孕育后保温时间相同,但镁残留量不同所引起的判断孕育剂孕育效果的误差。从试验结果可见,在孕育剂加入后两分钟(Mg残0.078—0.112%)所浇试样中,用不同孕育剂所获得的石墨球数(个/毫米²)为:

MBa——202;

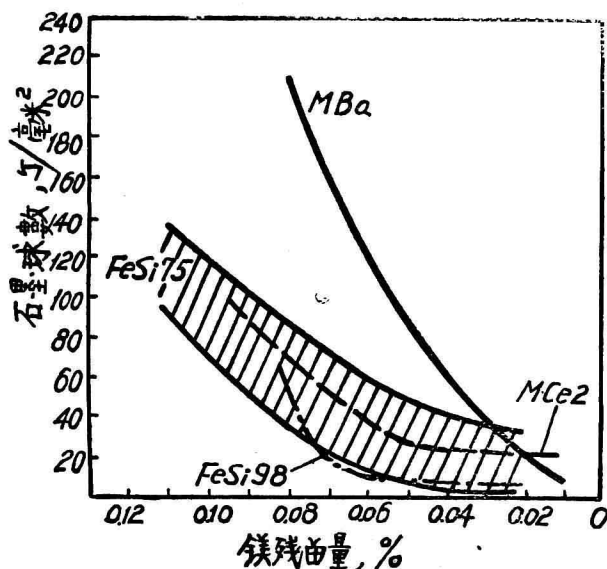
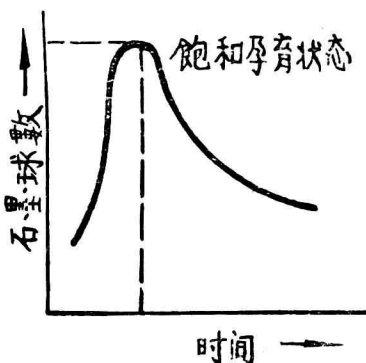


图1、不同孕育剂的孕育效果及其衰退〔19〕

75SiFe——135/96; M Ce2——92/89; 98SiFe——73。即 MBa 的孕育效果最好, 98SiFe 最差, 75SiFe 和 M Ce2 居中。但 MBa 的衰退速度稍高于 75SiFe 和 M Ce2。在孕育后保温 10 分钟左右浇注的试样中 Mg 残 $\sim 0.04\%$), 用 MBa 孕育所获得的石墨球数为 ~ 60 个/毫米², 而用 75SiFe 孕育所获得的石墨球数最多为 40 个/毫米²。

另一些试验〔26〕对比了普通铸造硅铁和含锶硅铁的孕育效果, 结果表明: 含锶硅铁在加入铁水后较短的时间内, 其孕育效果比普通铸造硅铁强烈得多, 但含锶硅铁衰退较铸造硅铁快, 15 分钟以后, 两者的孕育效果趋于接近。

有人认为, 孕育剂加入铁水后几十秒至一、二分钟内, 孕育效果达到最高值, 出现所谓“饱和孕育”状态, 随后迅速衰退。图 2 即示意地说明这种情况。



饱和孕育状态示意

为了充分利用孕育剂的孕育能力, 以较小的孕育量获得较大的孕育效果, 有人将孕育剂加入铸型浇注系统中, 进行型腔孕育试验, 表 2 为一组试验结果〔15〕。

表 2、 球墨铸铁型腔孕育试验结果〔15〕

炉 次	铸件编号	型 腔 孕 育 (加入 Si 0.1%)	浇注温度 °C	从球化 处理到 浇注时 间(秒)	石墨球数, 个/毫米 ² (ϕ 19 毫米圆柱)
I	1	—	1420	140	白口
	2	Si		150	101
	3	SiFe		160	100
	4	Sr - SiFe		170	98
II	5	—	1380	420	白口
	6	Si		430	188
	7	SiFe		435	170
	8	Sr - SiFe		440	188
III	9	—	1350	695	白口
	10	Si		705	201
	11	SiFe		725	183
	12	Sr - SiFe		730	220
VI	13	—	1320	1100	白口
	14	Si		1110	206
	15	SiFe		1115	253
	16	Sr - SiFe		1120	251

从表 2 的试验结果可见, 当孕育剂加入时间极其接近铸件凝固时间时, 无论金属硅、普通铸造硅铁和含锶硅铁均显示了强烈的孕育作用。在孕育硅量仅为 0.1% 的情况下, 通过型腔孕育, 在所有试样中消除了游离渗碳体, 石墨球数达 100~250 个/毫米²。

由于上述情况, 在球墨铸铁生产的历史上, 曾经有过一段从不够重视石墨化孕育处

理到逐渐重视石墨化孕育处理的过程，而在孕育剂加入方法上，则从炉前的一次大剂量孕育，发展到球化处理后的包内的多次孕育，再发展到利用“饱和孕育状态”的各种铁水浇注流和型内孕育方法，下面加以简单的介绍。

属于炉前和包内的孕育方法有：①出铁槽冲入法，即在球化处理后补加热铁水时，将硅铁撒在出铁槽上，由铁水带入包内；②将孕育剂放在球化处理好，经过扒渣的铁水面上，用工具将孕育剂搅拌入铁水深部；③包内钟罩压入；④转包时，将孕育剂放在小包底部，由铁水冲入。上述几种孕育方法的共同缺点是：孕育剂的加入离开铸件的凝固有相当长的时间，即使在转包孕育的方法中，仍不能利用“饱和孕育”状态来获得最大的孕育效果。因此，孕育剂的加入量必须相当大。如在球墨铸铁生产中，炉前和包内孕育必须采用大剂量，硅铁的加入量一般须达0.6—1.0%以上。即使如此，孕育效果往往还不够理想，同一包铁水前后所浇铸件的组织和性能差别仍很大，不能稳定的消除铸态的游离渗碳体（薄壁铸件更难做到）也不能保证厚大断面中的石墨球化良好。包内孕育的球墨铸铁中，石墨球的尺寸不够细小，尺寸的均匀性和球墨的圆整度也不够好。另外，大剂量孕育意味着较大的增硅量（0.4—0.7%以上），这与终硅量的控制往往发生矛盾。

为了实现以较小的孕育量获得较大的孕育效果，改善球墨铸铁的机械性能，发展了浇口杯，铁水浇注流和型内的孕育方法，具体的实施方法有多种：

①浇口杯孕育：（图3——a、b）

将孕育剂于开始浇注前置于带拔塞的定量浇口杯底部，铁水充满定量浇口杯后，拔塞浇注；或将孕育剂撒在充满定量浇口杯的铁水流上，浇口杯中充满本箱铸件所需铁水量后，拔塞浇注。

②浇注流孕育法：（图3——c、d）

将细粒状孕育剂通过漏斗等简单的给料器徐徐撒在铁水包嘴部的浇注流上；或者将孕育剂在浇注过程中撒在始终充满的浇口杯中。

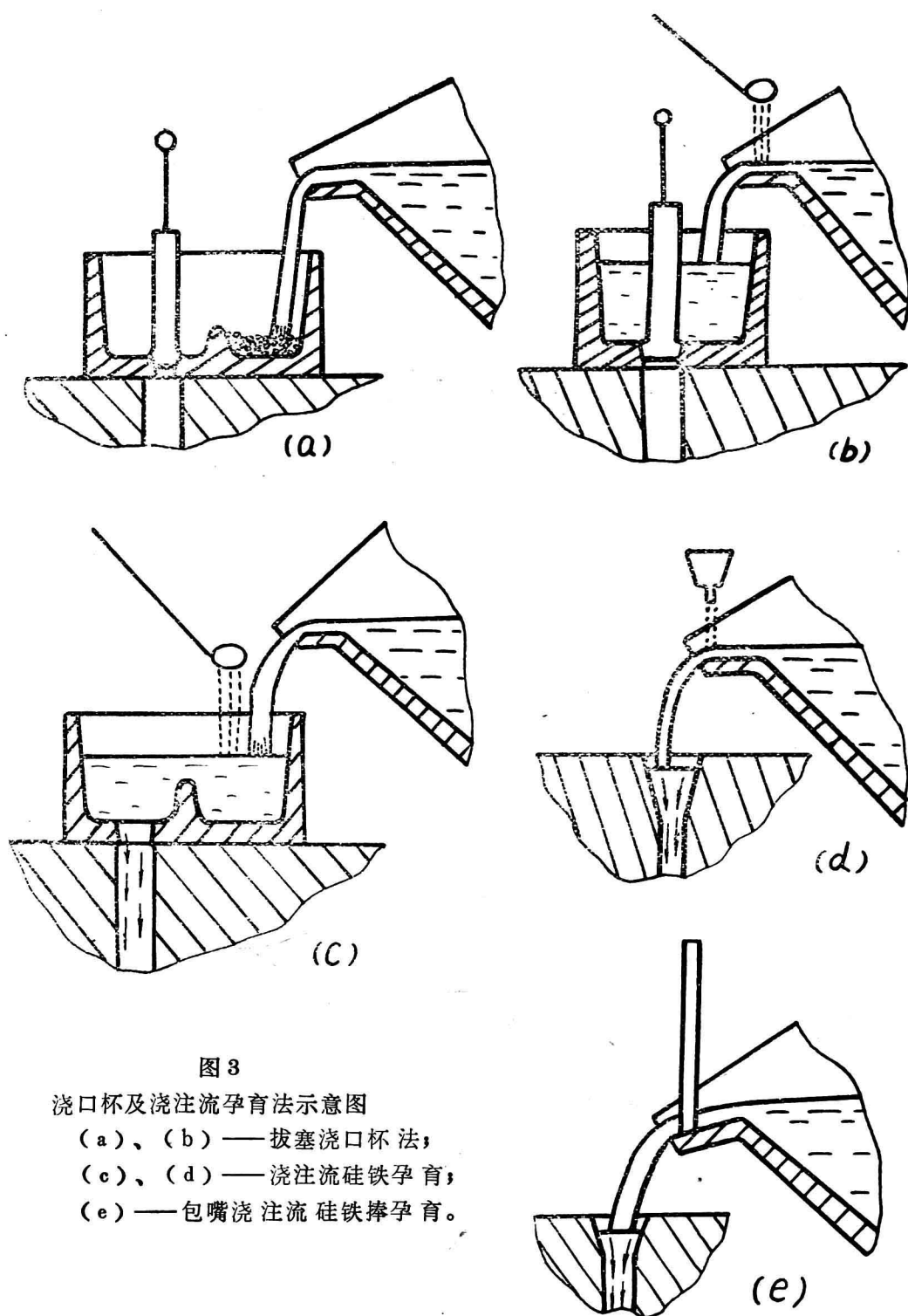


图 3

浇口杯及浇注流孕育法示意图

- (a)、(b) —— 拔塞浇口杯法；
 (c)、(d) —— 浇注流硅铁孕育；
 (e) —— 包嘴浇注流硅铁棒孕育。

③型内孕育法

这种方法是将孕育剂于浇注前置于铸型内浇注系统中，让铁水在流经浇注系统的过程中，将孕育剂熔化，并带入铸件型腔内。具体方法又有多种，如将块状或附加有粘结剂的团状孕育剂置于直浇口或浇口杯中的滤网泥芯之前。滤网泥芯起节流作用，并防止未熔化的大颗粒孕育剂进入型腔。孕育剂的块度应和铁水浇注温度和流动速度、浇注时间相适应，以保证均匀地熔于全部铁水中。另一种是将细粒孕育剂放在直浇口底部，由铁水冲入熔化。近年来在国外球墨铸铁生产中，一种称为“型内处理”的工艺得到了应用，这种方法是将球化和孕育剂放置在砂型内浇注系统某一部位的反应室中，铁水进入反应室时，球化和孕育剂开始反应和熔于铁水中，反应于浇注停止前结束。我国一些生产单位也正在试验型内处理工艺，并取得了初步成功〔24〕。

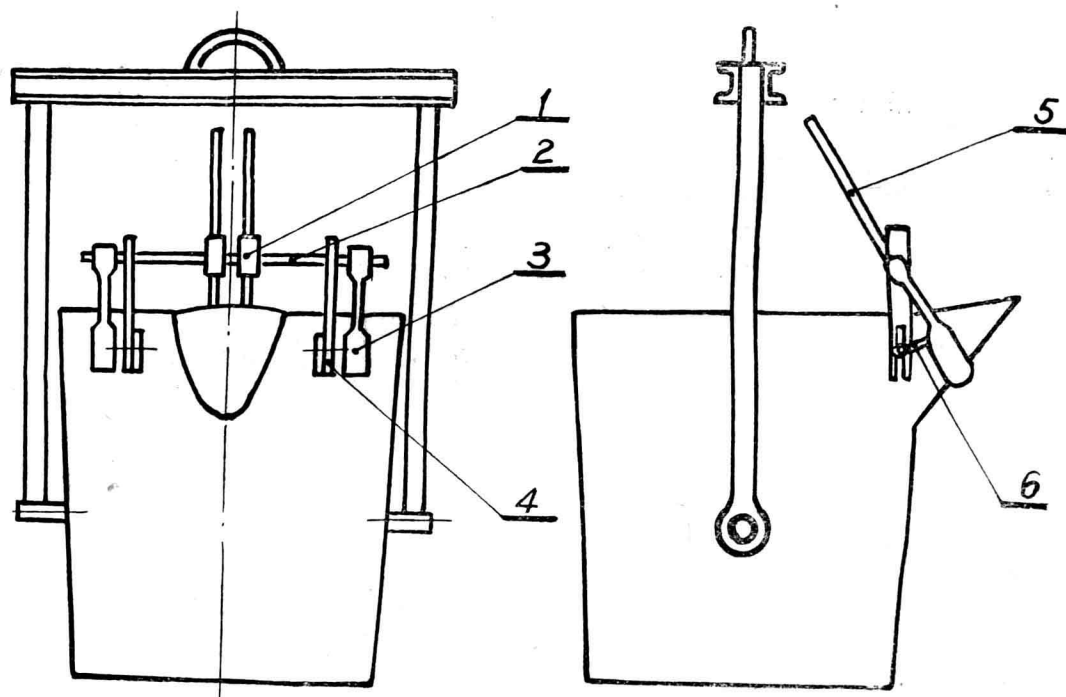
上述各种浇口杯，浇注流和型内孕育的工艺，大大缩短了孕育剂加入到铁水凝固的停置时间，因而有可能用较小的孕育量获得一般包内大剂量孕育所不可能获得的孕育效果。但是浇注流和型内孕育法也有其缺点，据介绍〔9.15〕，型内孕育对铁水的浇注温度和浇注速度很为敏感，孕育剂在整个浇注过程中的熔化速度不容易均匀，孕育效果不容易稳定，在同一铸件中有时一部分处于“过孕育”状态，形成石墨偏聚，断口有黑斑，而另一部分则处于“孕育不足”的状态。在型内和浇注流孕育时，有时还会出现硅的偏析现象，在一些较难接受腐蚀的白硬亮点周围，往往有缩松和小石墨球的聚集。拔塞浇口杯孕育法能较容易地做到使孕育剂均匀分布于铁水中，避免未化清的孕育剂颗粒进入型腔，但是增加了制作和使用定量浇口杯的工作量。另外，从充分利用“饱和孕育状态”的角度，这一方法不及型内或浇注流孕育理想。为了解决上述问题，近年来还发展了浇包嘴铁水流硅铁棒孕育的方法〔13〕，称为瞬时浇包孕育，这种孕育方法按本质也属于浇注流孕育法，为叙述方便起见，下面单独地加以介绍。

④瞬时浇包孕育（浇包嘴铁水流硅铁棒孕育法。图3—e）。

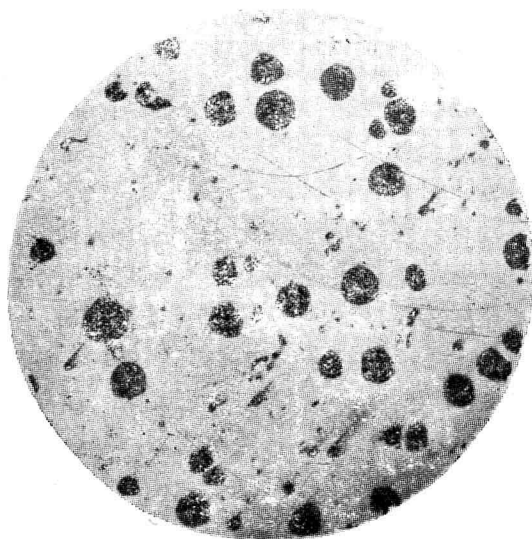
孕育用的硅铁棒由均匀混合的75硅铁粒和少量经稀释的水玻璃制成，上述混合料装入薄铁皮（~0.05毫米）或铜皮（~0.1毫米）制成的管内，墩实、烘干后即成孕育用硅铁棒。将硅铁棒安装在浇包嘴部的夹持机构中，使棒的下端部落于包嘴上，在整个浇注过程中为铁水流所冲刷、溶化，硅铁棒在自重作用下，随着端部的溶化而缓慢下落。图4是开封汽车发动机厂在浇注解放牌汽车发动机曲轴时所使用的硅铁棒夹持机构示意图。根据开封汽车发动机厂的试验结果〔10〕，在同时使用二根 $\phi 20$ 毫米铜皮硅铁棒，浇注温度为 $1360^{\circ} - 1300^{\circ}\text{C}$ ，铁水浇注的重量速度为5公斤/秒，每箱（两根曲轴，铁水量130公斤）浇注时间为26秒左右的条件下，孕育量为0.06—0.12%（75SiFe）孕育量在此范围内波动时，均得到了较理想的孕育效果，消除了铸态的游离渗碳体，石墨球显著细化（曲轴本体占多数石墨球尺寸为30—50 μ ），均匀化，圆整度改善，弥散和消除了磷共晶；机械性能得到提高。除此以外，还简化了炉前操作（铁水改为一次出完，炉前、包内不再进行孕育），方便了配料和终硅量的控制。浇包嘴铁水流硅铁棒孕育的工艺增加了一项制作硅铁棒的工作，但在合理组织下，这项工作是可以高效率地进行的。和其它铁水流孕育及型内孕育方法相比，瞬时浇包孕育较能避免孕育不均，硅偏析

等缺陷，提供较为理想和稳定的孕育效果。

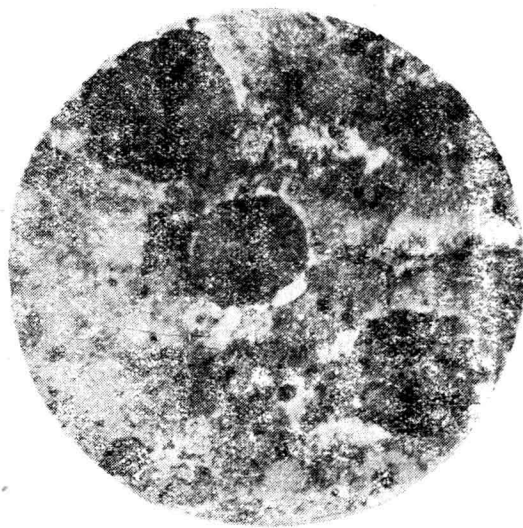
图 5 为开封汽车发动机厂采用一般两次孕育和瞬时浇包孕育所获得的石墨形态及金相组织对比。



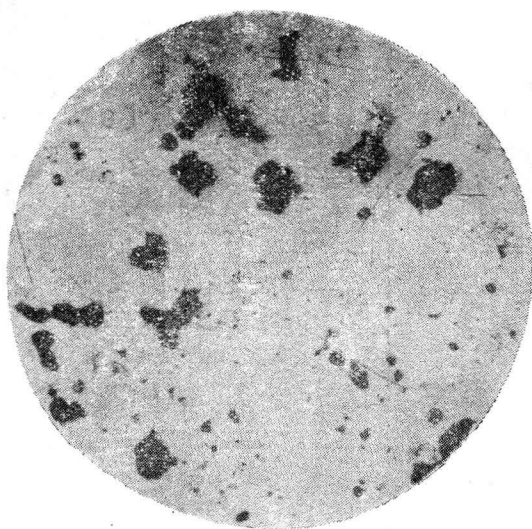
1. 硅铁棒导向管、2. 可转动横梁、3. 偏重锤、
4. 可调支架、5. 硅铁棒、6. 限位销、图 4. 硅铁棒夹持器示意图



a. 瞬时浇包孕育 未浸蚀 100×
(曲轴本体)



b. 瞬时浇包孕育 硝酸酒精溶液浸蚀 250×
(曲轴本体)



c.一般两次孕育 未浸蚀 100×
($\phi 60$ 卧浇试样)



d.一般两次孕育 硝酸酒精溶液浸蚀250×
($\phi 60$ 卧浇试样)

图5.两种孕育方法所获得的石墨形态及金相组织之对比(铸态)

在选择孕育方法时,可根据本车间的生产特点和各种方法的优缺点,综合的加以考虑,采取在具体条件下最为有效和方便,稳定的孕育工艺。

表3是国内几个工厂在球铁生产中使用浇口杯及浇注流孕育工艺的简况。有试验表明,该项孕育工艺用于灰铸铁生产,也能显著改善孕育效果,提高铸铁性能〔14〕。

表 3

国内几个工厂球墨铸铁孕育方法简介

生产单位	孕育方法	孕育量%	备 注
中国人民解放军 3 4 0 2 厂	瞬时浇包孕育 (硅铁棒)	0.07—0.12	铸件为解放牌 汽车后桥壳体〔1〕
开封汽车发动机厂	瞬时浇包孕育 (硅铁棒)	0.06—0.12	解放牌汽车 曲轴〔10〕
湖北内燃机配件厂	包嘴浇注流 撒硅铁粉	0.10—0.15	190柴油机曲轴〔8〕
湖 北 沙 市 内燃机配件厂	同 上	同 上	290柴油机曲轴〔3〕
西安柴油机厂	拔塞定量浇 口杯(硅铁粒)	0.12	179.295型 柴油机曲轴、凸轮轴〔4〕
开封地区柴油机厂	浇注流撒硅铁粉	0.02	作为第三次孕育〔2〕 1 9 5 柴油机曲轴
常州柴油机厂	同 上		
沈阳齿轮厂	拔塞定量浇口杯 (硅铁粒)		
重庆望江机器厂	球铁型内处理	0.8%球化剂 (Si/Mg/RE) 等量75SiFe 孕育剂	后壁及轮鼓〔24〕
新疆第一农机厂	型内孕育	每箱砂型直 浇口底部加入 2—4 克的 0.5毫米75SiFe	作为第三次孕育〔25〕 韧性铸态球铁件

(2) 铁水的化学成分和特性

同样一种孕育剂,在不同化学成份和特性的铁水中,会呈现不同的孕育效果。有一些试验表明〔15〕,铁水的含硫量低于0.04%时,普通硅铁以及硅钡等对灰铸铁的孕育效果就很小。然而当铁水或孕育剂中含有一定量的钙、镁、铈等元素时,即使硫量很低,上述孕育剂仍能发挥很好的孕育能力。如在球化处理以后的铁水中,硫量都低于0.02—0.04%,但同时有镁、铈等元素存在,故硅铁等仍是有效的孕育剂。另外还发现,铁水的含硫量对硅钙的孕育作用影响不大。还有一些试验表明〔19〕,稀土元素铈等,当加入量在一定限度以下,对普通亚共晶铁水和纯镁或Ni/Mg处理的球墨铸铁有石墨化孕育作用,但是对经过Si/Mg或Si/Mg/Ce球化处理的铁水,却没有孕育作用。

在灰铸铁生产的实践中还熟知这样的事实:一般的石墨化孕育剂对共晶和过共晶成分的铁水,实际上没有孕育作用。铁水的共晶度越低,石墨化孕育处理的效果也就越明显。但上述情况是对普通铁水而言,对于经过用镁、铈等进行球化处理的铁水来说,则不存在上述的规律。这是因为球化处理后的铁水中,有镁、铈等元素存在,铁水的白口倾向很大,虽然其化学成分往往是属于共晶或过共晶,但这种铸铁的结晶过程和结晶特性已大大不同于一般铸铁。

铁水化学成分对孕育效果的影响比较复杂,这方面还须要进一步作系统和深入的研究。

在生产实践中还发现,铁水的熔炼条件对铁水接受孕育处理的能力以及孕育衰退的特性,都有一定的影响。前面曾提到铁水的“饱和孕育状态”和铁水浇注流孕育、型内孕育对增强孕育效果的明显作用。但是在某些个别情况下,发现铁水似乎很难接受孕育处理;或者发现孕育衰退现象不显著,铁水浇注流和型内孕育并不能显示特殊的孕育效果〔14〕。因为这些现象未能从常规的化学分析中找到原因,故推测是不同的熔炼条件造成不同的结晶特性所致。

3] 孕育剂的准备和孕育处理的操作

除了孕育剂本身的孕育能力、加入方法和时间,铁水的化学成分和特性能影响到铸铁的孕育效果外,从实际生产的角度看,孕育剂的准备和孕育处理的操作也是不能忽略的因素。

①孕育剂必须保持干燥,已经破碎的细粒孕育剂具有很大的‘表面积/体积’比率,暴露在大气中时表面易吸附水分,并逐渐氧化。孕育剂元素在氧化后会丧失孕育作用,表面氧化的孕育剂颗粒在加入铁水后不易熔化,且造成多量的渣子。由孕育剂带进铁水的水分还会加剧铸件中形成气孔的倾向。故已经破碎的孕育剂必须保存在密封的容器中,使用前最好经过低温烘烤。

②粒度必须适当。粒度过大的孕育剂不易顺利地溶入铁水。过细的粉末孕育剂在加入铁水前易氧化和飞逸。在采用浇口杯孕育时,硅铁的粒度一般应在1—3毫米之间,在采用浇注流孕育时,硅铁的粒度应在0.5—2.0毫米之间。在使用硅铁棒瞬浇包孕育时,制作硅铁棒所用的硅铁的粒度和加入水玻璃的数量对棒的溶化速度有相当的影响,采用过多的细粉状硅铁和加入过多的水玻璃容易造成棒端溶化速度显著下降。在采用各种浇注流孕育工艺时,还应注意根据铁水的浇注温度、铸件的大小、浇注速度等条件来选择最为合适的孕育剂粒度。

③铁水必须清洁无渣。孕育剂颗粒和渣子接触时,一方面被渣子裹住,不易溶入铁水,另一方面,渣子中的氧化物为孕育剂元素所还原,使孕育剂失效,故铁水必须清洁无渣。

(四) 关于石墨化孕育的机理

由于在铸铁生产中孕育处理工艺的发展,人们对于孕育过程的实质也进行了逐步深入的研究和探讨,然而到目前为止,还没有一种理论可以圆满、透彻地说明各种孕育剂的作用机理,并回答生产实践中所提出的许多问题。下面就现有的一些试验研究结果,对石墨化孕育的机理问题作一个简略的介绍。

铸铁石墨化孕育过程的主要表征如:石墨化倾向的提高,白口倾向的被遏制、过冷度的减小,共晶团的细化,孕育作用随时间延续而衰退等,使人们认为:各种石墨化孕育剂的作用是在于通过不同途径增加了铸铁结晶过程中的石墨晶核。

硅铁的孕育作用在早些时候曾从理论上推测为在铁水中形成微观富硅区域,由于硅量的提高使液态铁碳合金中碳的溶解度急剧下降从而造成了在富硅区石墨晶核析出的条件。

进一步的试验研究使人们认为,包括硅铁在内的各种石墨化孕育剂,在铁水中形成氧化物、硫化物、氮化物、碳化物或其它更复杂的化合物,这些化合物质点起了石墨晶核的作用。具体到每一种孕育剂元素在铁水中通过形成何种化合物而提供了石墨晶核,则在许多研究中提出了各式各样的看法。如认为,硅的孕育作用是由于形成 CSi 〔17〕或 SiO_2 、钙则形成 CaC_2 等〔18〕。这些化合物中有许多在铁水中是不平衡的相,其稳定性受各种复杂的动力学条件的影响,因此不同程度也都存在“孕育衰退”的倾向,但不同孕育剂其衰退的速度则会有较大的差异。如硅的孕育衰退极快,所以金属硅和不含钙、铝的硅铁在包内孕育时没有孕育作用,而在浇注流及型内孕育时则有孕育作用。还有一些试验研究〔12〕,认为孕育剂元素所形成的硫化物在石墨晶核的形成中起很大作用,电子显微镜分析证实了锶、铈、钙、铝等的硫化物大致分布在灰铸铁的石墨共晶团的中心部位,在各种元素孕育作用的强弱和其硫化物在化学热力学上的稳定性之间,也发现了相应的联系。

近年来,使用了扫描电子显微镜、电子探针、电子衍射等现代研究手段,对铸铁中石墨进行了较为细致的观察和分析,这些研究结果有助于进一步认识石墨成核和石墨化孕育过程的实质。资料〔26〕介绍,在用 Si/Mg/Fe 中间合金进行球化处理,然后用硅铁进行孕育处理的球墨铸铁中,许多石墨球的中心部位都有直径约 1μ ,厚约 0.3μ 的夹杂物。这些夹杂物核心均为双层结构。其最中心部分为复合硫化物 $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{S}$,直径约 0.05μ ;外层则为 $(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Ti})$ 氧化物。在经含 Sr 硅铁孕育的试样中,硫化物核心中还含有 SSr ,故为 $(\text{Sr}, \text{Ca}, \text{Mg})\text{S}$,外层仍为 $(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Ti})$ 氧化物。在硫化物中心和外层氧化物之间,以及氧化物和在其上成核的石墨之间,均存在一定的晶面和晶向的对应关系:

(110) 硫化物// (111) 氧化物
 $[1\bar{1}0]$ 硫化物// $[2\bar{1}\bar{1}]$ 氧化物
 $(00,1)$ 石 墨// (111) 氧化物
 $[10,0]$ 石 墨// $[1\bar{1}0]$ 氧化物

由此,球状石墨多相地在 $(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Ti})$ 氧化物夹杂上成核,而氧化物本身是在 $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{S}$ 上成核的。因而,球状石墨的整个成核过程由三个相继的步骤组成,即:
 (1) $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{S}$ 成核; (2) $(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Si}, \text{Ti})$ 氧化物在 $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{S}$ 之上成核;
 (3) 石墨在氧化物外层上成核。

进一步的分析可认为:球状石墨在氧化物外层上成核以后,由于碳原子的沉积,使得邻近熔体中的碳浓度下降。这时如果不是由于局部的硅富集而继续维持一个足够的碳过饱和度,则球墨将不能顺利长大。这些生长受阻的晶核悬浮在熔体之中,随着温度的下降,熔体中残存的硫的过饱和度逐渐增大,这会引引起硫在球墨/熔体界面上的吸附,从而进一步限制了球墨在径向的生长,并造成了石墨以非球状方式发展的倾向。因此,虽然硫参加了球状石墨的成核过程,但熔体中的残存硫量仍然对球墨的生长起破坏作用。

在资料〔27〕介绍的研究工作中,证实了在铸铁熔体和块状孕育硅铁接触的情况下,熔体内存在着从铸铁基本成分到硅铁成分的硅浓度梯度。在含硅15—20%以上的区