

238604

稀土应用论文汇编

鑄 铁 鑄 鋼 部 分

(内部资料 注意保存)

冶金工业部钢铁司

1965

主 編:	治 金 工 业 部 鋼 铁 司	北 京 猪 市 大 街 78 号
編 輯:	治 金 工 业 部 鋼 铁 編 輯 部	北 京 西 直 門 外 太 平 庄 13 号
发 行:	治 金 工 业 部 鋼 铁 編 輯 部	北 京 西 直 門 外 太 平 庄 13
印 刷:	北 京 新 华 印 刷 厂	北 京 阜 成 門 外 北 礼 士 路

1965 年 11 月出版

每册定价 1.00

稀土球墨鑄鐵在动力机械上的应用試驗

无錫柴油机厂 包鋼中央試驗室 上海內燃机研究所

近几年来我們对稀土球墨鑄鐵进行了一系列試驗室和工业性試驗，重点是提高稀土球墨鑄鐵的性能，减少稀土硅鐵的加入量；重复验证对消除鑄造缺陷的有利作用；对产品进行长時間的運轉試驗。经过一年的時間，基本上完成了上述工作。曲軸、缸套 1500 小时耐久試驗的結果，磨損值比部頒优等产品的质量指标还低。

試驗分别在試驗室和生产車間进行。采用稀土硅鐵球化剂成份： R_xO_y （稀土氧化物总量）24.99%；Si 38~40%；Ca 2~4%；Mn 1%；Al≤1%；Fe 25~29%。后孕育剂是 75%Fe-Si，60%Fe-Mn，Si-Ca（60%Si，26%Ca）和电解鋁錠。試驗所用生鐵成份见表 1。

試驗室內用 10 公斤单相粒炉熔化铁水，功率 25 瓩。每炉都用 0.3% 苏打預脫硫，使硫量与現場生产基本近似。

然后在炉內加入球化剂，攪勻，靜置 2 分钟出炉，澆注 25 毫米 Y 型試棒（图 1a）。脫硫和球化处理維持在 1400°C，澆注溫度 1350°C，以插入式鉑-鉑-鉑热电偶測溫。需孕育处理者在澆包内进行。拉力試棒尺寸 $\phi 10 \times 50$ ，冲击試样 $10 \times 10 \times 55$ 无缺口。

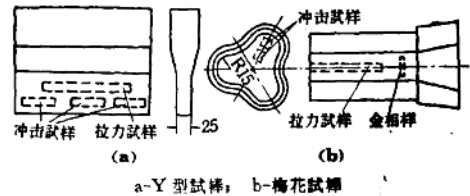


图 1 試样尺寸及試样取部位

表 1 試驗用原料成分 (%)

类 别	C	Si	Mn	P	S	Mg	附 注
本溪生鐵	3.8~3.9	1.3~1.4	0.25~0.35	0.065~0.07	0.06~0.07	—	試驗室用
本溪生鐵	3.8~4.1	1.25~1.6	0.3~0.6	≈0.08	≤0.04	—	車間用
回 炉 铁	3.5~3.6	2.4~2.9	0.6~0.7	≈0.08	≈0.02	0.06~0.07	車間用

注：試驗室試驗用炉料为 100% 本溪生鐵；車間試驗澆注試棒时因生产条件限制，炉料为 80% 本溪生鐵加 20% 回炉鐵鑄铁；澆注产品时則全部用本溪生鐵作炉料。

表 2 补加 1% 稀土硅鐵后的成份、組織和性能

试样号	处理后化学成份, %								鑄态金相組織					鑄态机械性能				
	C	Si	Mn	P	S	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	球化率, %	球墨大小, 号	珠光体 %	共晶 %	磷共晶 %	抗拉强度, 公斤/厘米 ²	延伸率, %	布氏硬度 HB	冲击韧性 公斤·米/厘米 ²	
F-224	3.48	3.04	0.76	0.061	0.004	0.22	0.023	0.11	6	2	45~50	余量	≤1	47.4	3.9	217	1.2~1.4	
F-436	3.50	2.98	0.76	0.067	0.004	0.15	痕	0.08	5	2~3	30~40	余量	0.5	47.3	3.6	192	0.9~1.4	
	3.26	3.72	0.61	0.061	0.007	0.21	0.026	0.11	4	3	25~35	余量	少量	55.1	5.9	223	0.7~0.9	
	3.50	3.24	0.73	0.064	0.005	0.25	0.033	0.12	5~6	3	20~30	余量	少量	52.6	3.6	207	1.1~1.6	
	3.32	3.44	0.71	0.064	0.006	0.21	0.036	0.039	5	3	不均 35~50	余量	微量	54.5	4.4	223	1.0~1.0	
F-118	3.37	3.74	0.73	0.070	0.003	0.23	0.034	0.12	4	3~2	35~40	余量	<0.5	54.5	5.8	207~212	1.0~1.4	
F-99	3.35	3.94	0.78	0.072	0.006	—	—	—	边4中6	3	20~30	余量	0.5	55.7	4.7	217	0.5~1.0	
F-100	3.35	3.68	0.75	0.072	0.006	—	—	—	边4中6	3	30~35	余量	0.5	49.8	2.1	212	0.5~0.6	
F-179	3.41	3.68	0.73	0.072	0.006	0.17	痕	0.11	6(5)	3	35~40	余量	少量	50.9	4.5	207~212	1.1~1.4	
F-130	3.34	3.86	0.75	0.078	0.007	0.21	痕	0.12	5~6	3	30	余量	少量	52.1	3.7	212	0.4~0.8	
F-181	3.34	3.94	0.73	0.078	0.005	—	—	—	6	3	20~30	余量	少量	49.8	2.4	217~223	0.6~0.7	
F-40	3.37	3.62	0.75	0.068	0.006	0.20	0.026	0.095	5+	3	—	—	—	55.3	5.3	—	2.2~1.0	

車間用 $\phi 700$ 毫米酸性冷風冲天爐熔化鐵水。出爐處理溫度 $1380\sim 1420^{\circ}\text{C}$ （光學高溫計讀數）。處理鐵水量一般為 $200\sim 300$ 公斤（只澆注試棒時）或 $1000\sim 1200$ 公斤（澆注產品時）。出鐵前在鐵水包底放置 0.3% 經熔融成塊狀的蘇打，于出鐵槽內加入稀土硅鐵，隨加入同時即行攪拌，然後扒渣，加冰晶石粉復蓋，澆注。濕模澆注梅花試棒（圖1b），拉力試樣尺寸為 $\phi 15\times 75$ ，沖擊試樣為 $10\times 10\times 55$ 無缺口。

稀土殘留量的分析是用草酸溶法，在大型光譜儀上測定，均以氧化物形式表示。金相評定標準以廠訂鑄鐵標準評定。

以下各表中在試驗室和車間試樣號前面分別冠以“M”和“F”以資區別。

一、試驗情況及結果

1962年前的多次試驗發現，單加稀土處理的稀土球墨鑄鐵主要缺點是球化不良，沖擊韌性不高和稀土硅鐵加入量過多（ 5% ）。針對上述情況，本試驗通過處理工藝的

改進和後孕育處理，添加微量孕育加強元素，以期改善球化和韌性。按過去加入量情況及本年度稀土硅鐵中稀土的含量，將稀土硅鐵加入量基數固定在 4% 左右。然後補加各種添加劑，期望借孕育的作用求得球化與性能的提高，並探求復蓋、脫硫稀渣劑，處理溫度及停留時間變化的影響。

（一）各種孕育添加劑的影響：

將稀土硅鐵加入量固定為 4% ，然後添加下列幾種後孕育劑，觀察對球化和性能的作用。

1. 1% 稀土硅鐵。

補加 1% 稀土硅鐵是希望借助增加球化劑量的同時，充分利用其中硅的孕育作用，達到提高球化改善沖擊韌性的效果。其結果見表2。

試驗發現補加後的關鍵問題是保證稀土硅鐵完全熔化和迅速澆注。操作正常，則球化較好，但球化率並未得到根本改善，因而沖擊韌性沒有什麼提高。石墨主要成為團絮和片，規則球不多。但機械性能還是比較穩定。隨球化率提高，抗拉強度、延伸率都有一些增加，硬度、沖擊韌性沒有大的變化。

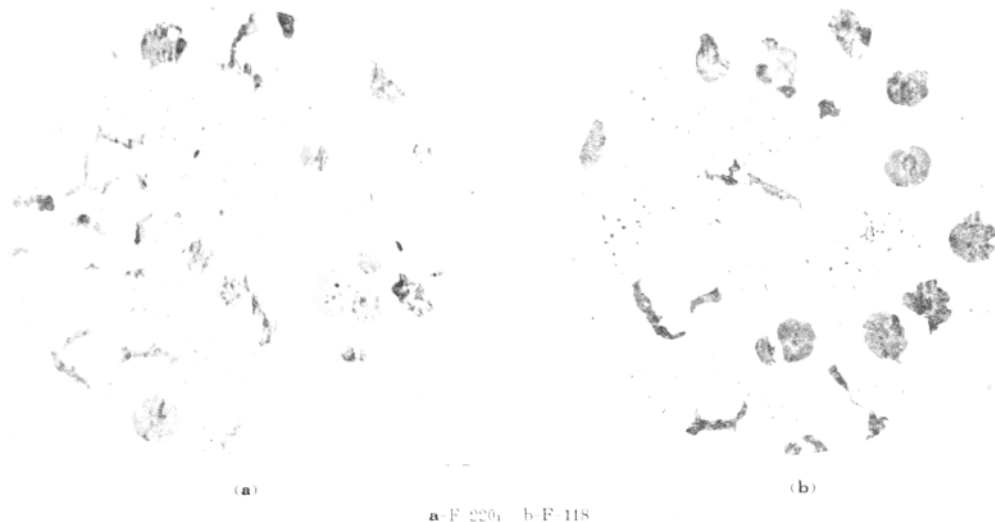


圖2 補加 1% 稀土硅鐵的石墨形狀， $\times 100$ 未浸蝕

圖2a、b所示照片為本方案的球化情況，圖中a為球化最劣情況，b為最佳情況。

2. 2% 稀土硅鐵。

補加稀土硅鐵，在工藝上比較困難，經常不能保證很好熔化，從表3所列結果看來，性能是比較穩定的。比較F-25和F-34（同一小包澆注），兩者成份相同，因補加稀土量過多，加劇了碳化物的穩定，又因帶入硅量較高，使

溶液碳過飽和，F-34由於冷卻較快（F-25試棒為干型，F-34試棒為濕型），出現了D型共晶片狀石墨（圖3），因而劇烈地惡化了機械性能。

補加 2% 稀土硅鐵後，由於帶入硅的作用，石墨還有一些細化，球化良好者石墨球較細（圖4），除F-34外，一般球化率提高，鐵素體增加，除硬度有些下降外，其它性能均相應提高。

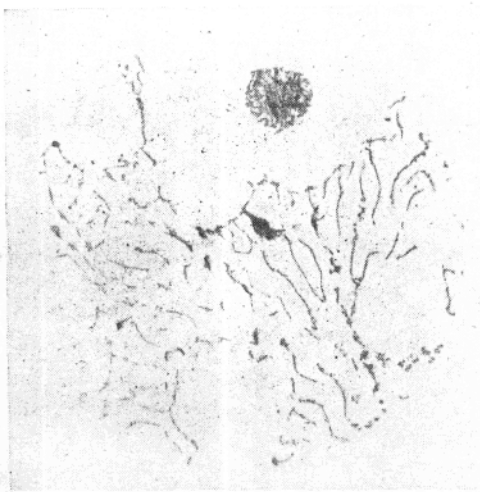


图3 D型共晶片状石墨, ×100 未浸蚀

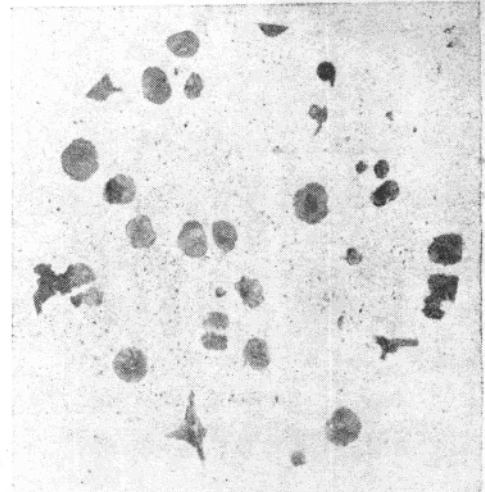


图4 F-63 的石墨, ×100 未浸蚀

表3 补加2%稀土硅铁后的成份、组织和性能*

试样号	处理后化学成份, %								铸态金相组织					铸态机械性能			
	C	Si	Mn	P	S	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	球化率, %	球墨大小, 号	珠光体, %	铁素体, %	磷共晶, %	抗拉强度, 公斤/厘米 ²	延伸率, %	布氏硬度, H _B	冲击韧性, 公斤·米/厘米 ²
F-63	3.37	3.94	0.71	0.050	0.006	0.20	0.025	0.091	4~	3~4	25~35	余量	微量	54.6	4.0	217	1.1~1.7
F-25	3.38	3.48	0.74	0.070	0.007	—	—	—	6	3	50~60	余量	微量	52.8	1.0	248	1.0
F-34	3.36	3.48	0.74	0.070	0.007	—	—	—	5	3	55~65	余量	微量	42.3	0.7	262	0.2
F-114	—	4.50	0.78	0.070	0.005	—	—	—	5~6	3	20~30	余量	少量	59.1	1.6	235	0.4
F-49	3.34	3.74	0.76	0.070	0.007	0.21	0.028	0.11	5	3	—	余量	少量	54.9	5.1	—	1.0

* 原铁水化学成份(%): C 3.70~3.99; Si 2.02~2.65; Mn 0.57~0.65; P 0.069~0.092; S 0.039~0.041.

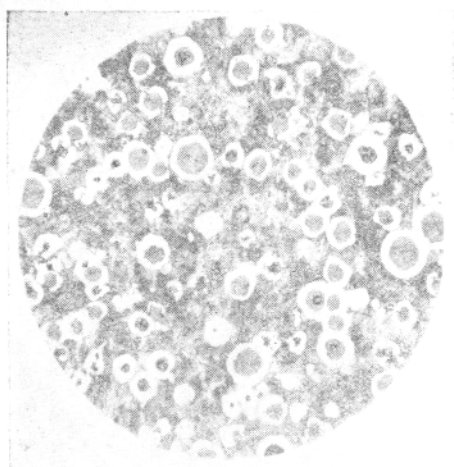
3. 硅铁(Fe-Si).

左右。表4列出了试验室和生产条件下的结果。

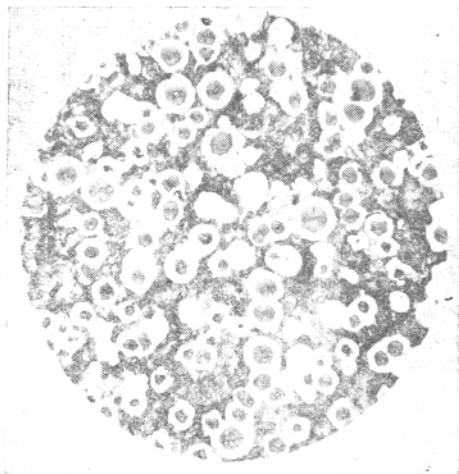
鉴于球化处理时, 稀土硅铁本身带入硅量已很高, 考虑到综合机械性能的需要, 后孕育硅量一般控制在0.4% 看来孕育Fe-Si在0.6%以下时可以得到比较好的综合性能。孕育Fe-Si增多, 石墨愈细, 但过多反而降低机

表4 补加Fe-Si后的成份、组织和性能

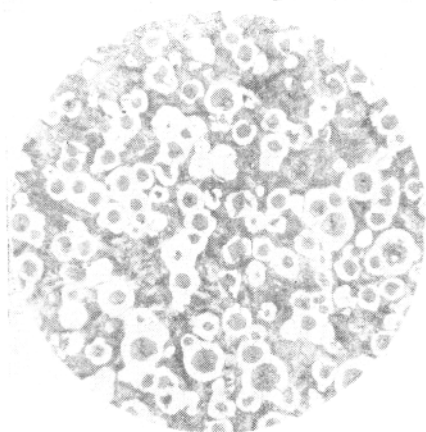
试样号	Fe-Si	处理后化学成份, %								铸态金相组织					铸态机械性能					
	加入量	C	Si	Mn	P	S	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	球化率 球墨大小号	珠光体, %	铁素体, %	磷共晶, %	抗拉强度, 公斤/毫米 ²	屈服强度, 公斤/毫米 ²	延伸率, %	布氏硬度 H _B	冲击韧性 公斤·米/厘米 ²		
	%																			
试 验 室																				
M-28	0.3	3.66	2.860	0.423	0.058	0.003	0.135	0.013	0.071	3~4	3	10	余量	<1	45.0	35.5	4.0	179	6.1~9.1	
M-1	0.3	3.71	2.668	0.72	0.054	0.006	0.129	0.011	0.068	3~4	3	30	余量	无	50.0	40.5	3.0	197	4.0~6.4	
M-2	0.6	3.59	3.084	0.77	0.054	0.005	0.155	0.014	0.079	4	3~4	20~30	余量	<1	49.0	41.5	5.0	187	5.8~8.0	
M-3	0.9	3.57	3.184	0.82	0.060	0.008	0.135	0.024	0.069	4	4	10	余量	<1	45.0	38.0	4.0	179~187	2.4~7.0	
车 间																				
F-79	0.2	3.36	3.68	0.64	0.067	0.008	0.19	0.023	0.10	6	4~5	10~20	余量	微量	48.9	—	2.1	201	0.9~1.8	
F-199	0.2	3.25	3.68	0.70	0.075	0.005	—	—	—	5	4	10~20	余量	<0.5	50.9	—	2.3	212	0.9~1.4	
F-70	0.4	3.28	3.80	0.64	0.064	0.007	0.18	0.017	0.11	2.5	4~5	10~20	余量	微量	47.8	—	1.4	201	1.6~2.3	
F-228	0.4	3.50	3.16	0.75	0.072	0.004	0.14	0.02	0.07	5	4	≈20	余量	<0.5	47.6	—	4.8	179~183	1.7~2.4	
F-67	0.5	3.32	3.94	0.71	0.064	0.006	0.20	0.022	0.093	6	4~5	10~20	余量	微量	47.8	—	1.4	201	1.4~2.3	
F-246	0.7	3.31	3.40	0.73	0.070	0.005	0.068	痕	0.033	6	5~4	10~20	余量	1~1.5	47.8	—	2.2	192	1.9~2.2	



(a)



(b)



(c)

a—Fe-Si 加入量 0.3%； b—Fe-Si 加入量 0.6%； c—Fe-Si 加入量 0.9%

图 5 $\phi 20$ 金相試棒的組織， $\times 115$ ，3%硝酸酒精溶液浸蝕

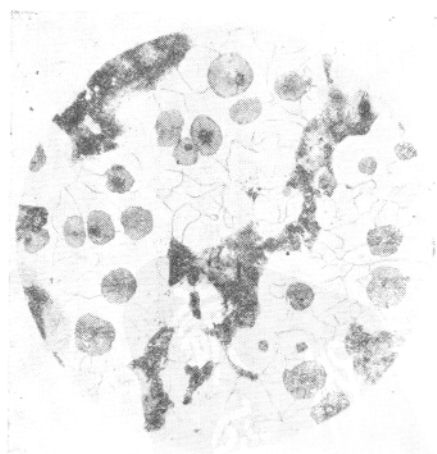


图 6 M-28 的金相組織， $\times 115$ ，3%硝酸酒精溶液浸蝕

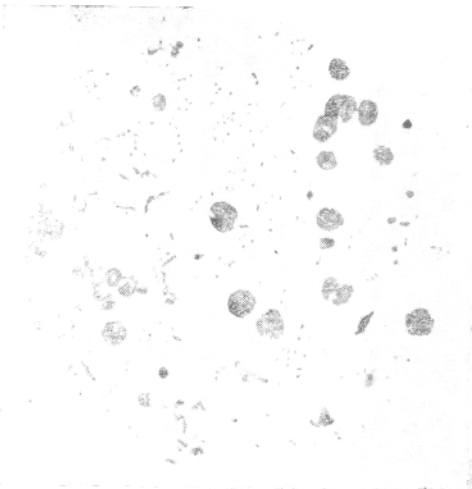


图 7 Fe-Si 孕育后在 F-199 梅花試棒上取样的石墨形状， $\times 100$ 未浸蝕(补加 0.2% Fe-Si)

械性能。图 5a~c 是在 $\phi 20$ 金相试样上的照片，說明后孕育 Fe-Si 量的作用。图 6 是在 25 毫米 Y 型试样棒上的金相照片（后孕育 Fe-Si 加入量 0.3%），說明孕育后的典型金相組織。

当试样尺寸加厚时，在局部地区球很集中，很規則，

很細，但另一些視野内又出現許多細团片石墨和开花状石墨（图 7）。基体組織中铁素体量增多，冲击韌性得到一定改善。由于原铁水 Si 高，看来在 Fe-Si 加入量为 0.4% 时得到較好的綜合性能。M-28 与其它各样相比，可以看出 Mn 量低对冲击韌性的改善作用。

表 5 补加 Fe-Si-Al 后的成份組織和性能*

試 样 号	孕育剂, %		处理后化学成份, %									鑄态金相組織					鑄态机械性能			
	Fe-Si	Al	C	Si	Mn	P	S	Al	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	球化率 %	球墨 大小 级	珠光体 %	铁素体 %	磷共 晶 %	抗拉强度, 公斤/毫米 ²	延伸率, %	布氏硬度 HB	冲击韌性 公斤·米/厘米 ²
試 驗 室																				
M-8	0.6	0.03	3.62	3.012	0.74	0.058	0.003	0.016	0.089	0.017	0.060	5	4	10	余量	<1	45.5	3.0	179	2.2-3.2-3.8
M-9	0.6	0.05	3.59	3.214	0.78	0.058	0.005	0.055	0.130	0.025	0.076	4~5	4~3	20	余量	<1	46.0	3.0	187	2.1-3.0-4.3
M-10	0.6	0.07	3.60	3.230	0.83	0.060	0.005	0.081	0.21	0.030	0.107	5	3	20	余量	<1	46.0	3.0	197	3.0-3.0-4.6
車 間																				
F-216	0.1	0.03	3.54	3.10	0.71	0.061	0.005	—	0.18	0.015	0.11	4~5	3~4	35~45	余量	少量	47.5	3.6	201~212	1.5~1.5
F-188	0.2	0.03	3.29	4.12	0.72	0.072	0.004	—	—	—	—	4~5	4~3	5~10	余量	少量	53.8	1.3	217	0.5~0.7
F-194	0.2	0.02	3.25	3.74	0.73	0.075	0.005	—	—	—	—	5	4	≈10	余量	少量	53.7	2.4	212	0.8~0.9
F-196	0.2	0.03	3.30	3.74	0.72	0.078	0.005	—	—	—	—	5	4	5~10	余量	少量	54.3	2.6	207	0.8~1.3
F-212	0.4	0.03	3.31	3.56	0.72	0.070	0.005	—	0.20	痕	0.10	4~5	4	5~10	余量	少量	46.9	3.7	187	1.1~1.6
F-229	0.4	0.03	3.53	3.24	0.75	0.070	0.004	—	0.14	痕	0.071	4	4	20~30	余量	≤1	48.7	3.4	201	1.3~1.3
F-231	0.4	0.03	3.48	3.10	0.74	0.061	0.004	—	0.13	0.01	0.07	4	4	20~30	余量	<0.5	46.0	3.0	183	1.0~1.4
F-221	0.6	0.1	3.50	3.24	0.73	0.064	0.005	—	0.19	0.027	0.10	5~6	4	5~10	余量	少量	49.2	3.9	187	0.8~1.3

* 原铁水化学成份(%): 試驗室——C 4.28~4.36, Si 1.353~1.48, Mn 0.61~0.74, P 0.064~0.068, S 0.042~0.050, 車間——C 3.73~3.92, Si 1.52~2.31, Mn 0.58~0.63, P 0.072~0.084, S 0.029~0.038。

** 因稀土硅铁帶入 Al，故殘留量比加入量高。

4. 硅铁—鋁(Fe-Si-Al)

試驗中单加 Fe-Si 时，看到石墨球被細化，且局部区域球化率提高；而单加鋁則发现石墨有些集束傾向。有人报道在 Fe-Si 中含有少量 Al 能提高 Si 的孕育效果，Al 对可鍛鑄铁中石墨球团聚表现了有利作用，促使以 Fe-Si-Al 联合孕育作了試驗，企图用 Al 的作用来团聚 Fe-Si 孕育带来的細团片状石墨，其結果見表 5。

金相檢驗仍发现有細团片石墨局部集中，但規則石墨球大大增多，而且細化，部份石墨有些爆开成为开花状石墨，球化效果有一定改善，一般在 4~5 級間。机械性能中冲击韌性比較稳定，且相应有所提高；但其它性能提高不多。

图 8 是 Si 量一定，Al 量增加时，性能的变化。在 0.07% Al 时綜合性能最高，这时 Fe-Si:Al $\approx$ 10。图 9 是固定 Al 量，Fe-Si 量变化的影响，从图看来，在 0.03% Al 和 0.3% Fe-Si 处綜合性能最好，也是 Fe-Si:Al $\approx$ 10 得到最好的結果。

图 10 是补加 0.6% Fe-Si 和 0.03% Al 的

照片(M-8)，图 11 是补加 0.4% Fe-Si 和 0.03% Al 处理的金相照片，因局部地区有細片状石墨而降低了綜合机械性能。

5. 硅铁—錳铁—鋁(Fe-Si-Mn-Al)

稀土球墨鑄铁用复合脫氧剂(SMZ)孕育效果很好，冶金反应中 Mn, Si, Al 联合順序脫氧具有肯定的优点，有

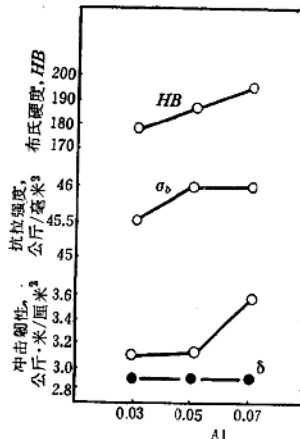


图 8 Fe-Si 加入量为 0.6 时，机械性能与 Al 加入量的关系

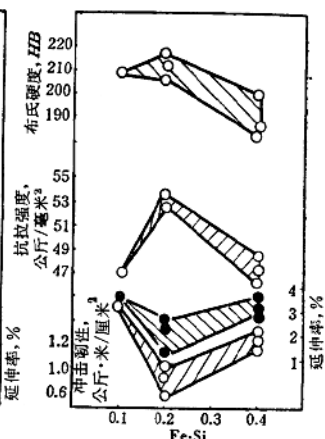


图 9 加 Al 量为 0.03% 时，机械性能与 Fe-Si 加入量的关系

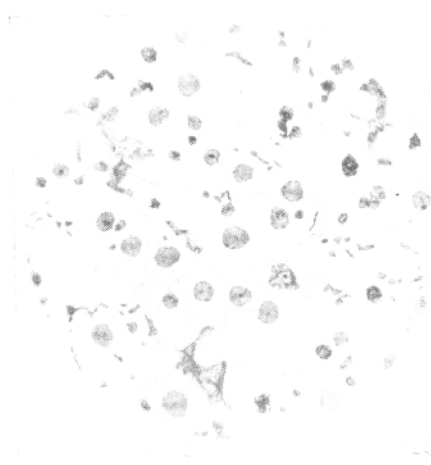


图 10 M-8 补加 0.6% Fe-Si 和 0.03% Al 的金相組織。
×116, 3% 硝酸酒精溶液浸蝕

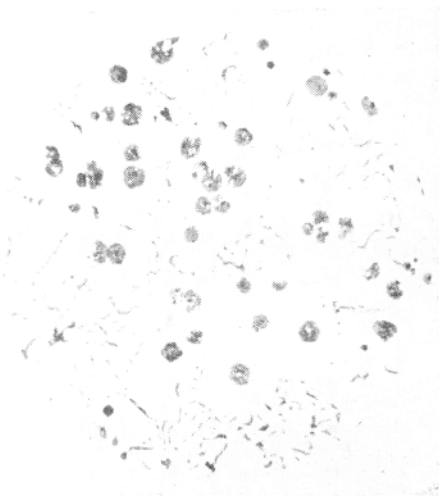


图 11 F-29 补加 0.4% Fe-Si 和 0.03% Al 局部地区的
石墨形状, ×100 未浸蝕

人认为少量 Mn 会加强孕育效果, 兼之考虑到厚壁铸件对中心冷却速度应当控制, 使与边缘差别不太大, 以便保证球化效果。在 Fe-Si 孕育的基础上加入少量 Mn 构成 Fe-Si—Fe-Mn—Al (硅铁—锰铁—铝) 复合孕育剂。其结果列在

表 6。

金相检查结果, 维持了对石墨球化的有利作用, 球化等级在 4~5+ 之間, 石墨球较圆, 细片状石墨减少到几乎没有(图 12), 综合机械性能也得到保证。

表 6 补加 Fe-Si—Fe-Mn—Al 后的成份、組織和性能*

試驗号	孕育剂, %			处理后化学成份, %									鑄态金相組織					鑄态机械性能				
	Fe-Si	Al	Fe-Mn	C	Si	Mn	P	S	Al	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	球化率 級	石墨 大小 号	珠光体 %	铁素 体 %	磷共 晶 %	抗拉 强度 公斤/毫米 ²	屈服 强度 公斤/毫米 ²	延伸 率 %	布氏 硬度 HB	冲击 公斤·厘米/厘米 ²
試 驗 室																						
M-26	0.3	0.03	0.04	3.60	2.96	0.73	0.056	0.003	0.015	0.195	0.022	0.085	4	3	30	余量	<1	47.5	33.0	2.5	207	2.7~3.0
M-27	0.3	0.03	0.04	3.68	2.74	1.225	0.058	0.004	0.023	0.128	0.018	0.072	4~5	3	60	余量	<1	53.5	—	2.0	229	0.6~0.9
車 間																						
F-241	0.3	0.011	0.03	3.52	3.17	0.73	0.067	0.004	—	0.12	痕	0.06	边4 中5~6	4~3	35~45	余量	1.0~ 1.5	47.1	—	2.4	207	1.0~1.1
F-248	0.3	0.01	0.03	3.43	2.84	1.00	0.060	0.007	—	0.11	痕	0.063	4~5+	3	60~70	余量	≈1	52.9	—	2.8	229~ 235	0.7~0.9

* 原铁水化学成份(%): 試驗室——C 4.29~4.42, Si 1.516~1.518, Mn 0.66~1.18, P 0.064~0.074, S 0.040~0.046; 車間——C 3.88~3.93, Si 1.43~1.55, Mn 0.61~0.88, P 0.073~0.078, S 0.048~0.049。

表 7 补加 Si-Ca 后的成份、組織和性能

試 樣 號	Si-Ca	處理後化學成份, %									鑄態金相組織					鑄態機械性能				
	加入量 %	C	Si	Mn	P	S	Ca	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	球化 率級	石墨 大小 號	珠光 體 %	鐵素 體 %	磷共 晶 %	抗拉 強度, 公斤/ 毫米 ²	屈服 強度, 公斤/ 毫米 ²	延伸 率 %	布氏 硬度 H _B	沖擊 韌性 公斤·米/ 厘米 ²
M-22	0.3	3.75	2.798	0.80	0.058	0.004	—	0.138	0.012	0.069	5~4	2	40~50	余量	<1	53.5	41.0	3.0	197	1.5~2.8
M-24	0.6	3.68	2.892	0.86	0.058	0.006	—	0.131	0.015	0.074	5~4	2	40~50	余量	<1	56.0	45.5	—	207	2.1~2.5
M-25	0.9	3.68	2.900	0.77	0.058	0.006	—	0.138	0.017	0.068	4	4	30	余量	<1	44.5*	—	—	197	1.4~3.4

* 試棒有缺陷

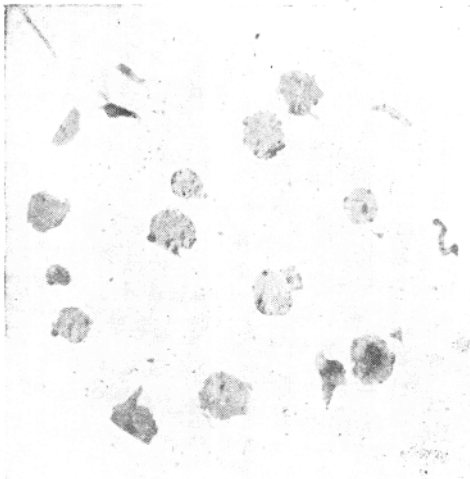


图 12 F-248 的石墨形状, $\times 100$ 未浸蝕

6. 硅-鈣 (Si-Ca)。

近年来国外大量研究了稀土-鈣球墨鑄鐵, 重要步驟是以 Si-Ca 进行后孕育, 认为 Si-Ca 是稀土球墨鑄鐵最好的孕育剂, 它利用硅-鈣的良好孕育 (生核, 墨化) 作用和脫氧能力来保证球化。由于条件限制, 只在試驗室內作了验证。结果如表 7。

金相檢驗发现石墨球化比較好, 加入量在 0.6% 以下綜合机械性能最好。但因 Si-Ca 熔点高, 加入过多則熔化不了。在国内冲天炉当前熔化水平下, 大量应用可能有些困难。应用电炉則是非常理想的 (国外处理溫度在 1450~1500°C)。

图 13 是加 Si-Ca 后的金相組織。图 14 是性能与 Si-Ca 加入量的关系。

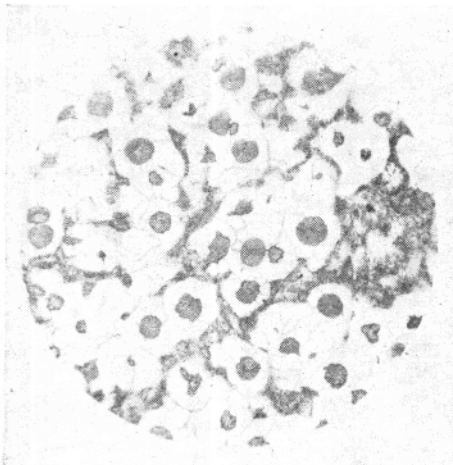


图 13 M-25 的金相組織, 加入 Si-Ca 0.9%, $\times 115$, 3% 硝酸酒精溶液浸蝕

(二) 操作工艺的影响:

1. 复盖及脫硫稀渣剂。

原铁水硫量高將过多消耗稀土硅鉄的数量, 从經濟观点和工艺操作上都是不希望的。稀土硅鉄处理铁水生成的渣很粘稠, 不利于往后添加剂与铁水的混勻和攪拌。試驗中选用 0.3% 苏打加入铁水包中, 基本上起到了去硫稀渣的作用。为了更好的稀渣曾加入过螢石, 但效果不佳。0.3% 苏打的脫硫效果大約是 20% 左右。由于稀土极易氧化, 采用保护性复盖剂对保证球化非常必要, 应用冰晶石

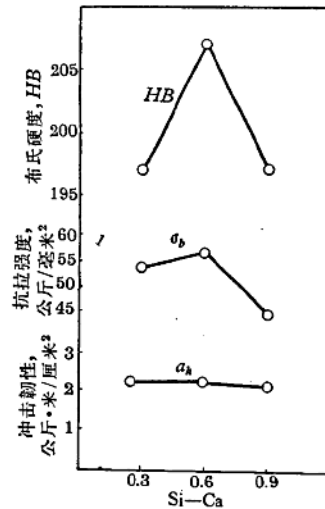


图 14 机械性能与 Si-Ca 加入量的关系

粉复盖能收到一定效果。表 8 是复盖与不复盖的稀土残留量。很明显, 复盖对减少稀土损失起到有利作用。表 8 同时也說明了苏打对稀土残留量的作用。

2. 处理溫度的影响。

为探求在当前国内冲天炉铁水溫度下是否可以运用稀土硅鉄来制作球墨鑄鐵的問題, 对不同溫度进行了处理, 其結果列在表 9。

从金相組織看来, 没有什么大的差别, 由图 15 可看

表 8 复盖冰晶石粉与不复盖的稀土残留量

复 盖 剂	稀渣剂	稀土硅鉄加入量 %	稀土残留量, %			
			ΣR_xO_y	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃
0.3% 冰晶石粉	苏打	4	0.30	0.20	痕	0.10
0.3% 冰晶石粉	螢石	4	0.27	0.18	痕	0.094
0.3% 冰晶石粉	—	4	0.23	—	—	—
—	苏打	4	0.158	0.013	0.013	0.042
—	—	4	0.14	—	—	—

表9 不同处理温度的成份、組織和性能*

試 样 号	稀 土 硅 铁 加 入 量, %	处 理 温 度	处理后化学成份, %								鑄态金相組織				鑄态机械性能					
			C	Si	Mn	P	S	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	球化率 %	球墨 大小 号	珠光体 %	铁素体 %	磷共 晶 %	抗拉 强度, 公斤/厘米 ²	屈服 强度, 公斤/厘米 ²	延伸 率 %	布氏 硬度 HB	冲击 韧性, 公 斤·厘米/ 厘米 ²
M-30	4	1350°C	3.77	2.840	0.78	0.057	0.007	0.125	0.016	0.052	5	2	50	余量	<1	55.5	42.5	4.0	197	1.8~2.5
M-11	4	1404°C	3.73	2.730	0.80	0.054	0.003	0.19	0.036	0.098	6	2	50~40	余量	<1	53.0	44.0	4.0	197	2.0~2.9
M-23	4	1450°C	3.70	2.812	0.82	0.060	0.007	0.14	0.024	0.081	6	2	50	余量	<1	70.0	—	—	207	1.1~1.4
M-29	4	1500°C	3.70	2.836	0.71	0.053	0.003	0.200	0.021	0.087	6	2	60	余量	<1	52.0	44.0	1.5	207~229	1.2~2.0

*原铁水化学成份 (%): C 4.15~4.66, Si 1.372~1.446, S 0.044~0.050.

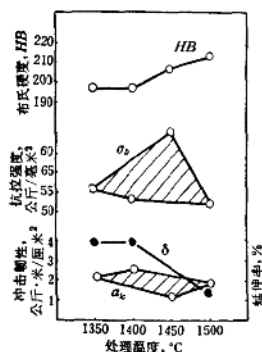


图15 稀土加入量为4%时,机械性能与处理温度的关系

到温度增高,硬度提高,韧性、塑性下降,说明高温加剧了稀土对碳化物的稳定作用,基体组织中珠光体量增加,只要保证稀土硅铁完全熔化,在1400°C左右即可得到最

理想的综合机械性能。

3. 停留时间的影响。

国外报导处理后停留对稀土损失有不利影响,而保证一定的稀土残留量又是得到球墨鑄鐵的关键。为给生产上留出足够的操作时间,就必须提高稀土硅铁的加入量。表10是在1400°C不扒渣等温停留时,成份和球化的变化。

4. 疲劳试验。

疲劳强度的高低很大程度上决定了耐久使用性能好坏。为了给产品试车提供一些初步数据,按不同孕育方案选用10支梅花试样进行了纯弯曲疲劳试验。试样为φ9.48毫米标准疲劳试样,经磨削加工到光洁度▽▽▽8,其鑄态性能、金相組織及疲劳强度见表11。

从表中数据看来,疲劳强度占抗拉强度的52%~57%左右,说明充分利用了材料的性能。

表10 处理后不同停留时间的成份

炉号	稀土硅铁加入量, %	取 样 时 间 分	温 度 °C	化 学 成 份, %								球 化 率 级
				C	Si	Mn	P	S	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	
M-19	4	0	1405	4.45	1.340	0.62	0.068	0.048	—	—	—	—
		1	1405	3.51	3.464	0.86	0.052	0.006	0.246	0.040	0.102	5
		2		3.83	2.712	0.75	0.056	0.008	0.148	0.018	0.066	4
		4		3.78	2.588	0.77	0.057	0.010	0.103	0.013	0.054	4
		6		—	2.542	0.75	0.053	0.008	0.100	0.010	0.042	5
		9	1392	3.85	2.508	0.77	0.053	0.007	0.078	0.008	0.041	5
		13	1392	3.87	2.544	0.74	0.052	0.008	0.074	0.006	0.036	5
		17	1392	3.62	2.512	0.74	0.056	0.009	0.095	0.005	0.032	6
		21		3.77	2.500	0.75	0.056	0.009	0.060	0.004	0.031	5
M-20	4	0	1403	4.31	1.370	0.64	0.068	0.045	—	—	—	—
		2	1403	3.74	3.016	0.82	0.053	0.007	0.210	0.025	0.091	3~4
		3		3.56	3.096	0.84	0.052	0.004	0.210	0.028	0.082	4
		4		3.67	3.044	0.82	0.056	0.004	0.200	0.023	0.083	4~5
		6		3.67	3.043	0.82	0.051	0.004	0.190	0.024	0.076	5
		8	1385	3.63	3.068	0.83	0.052	0.004	0.191	0.023	0.076	5
		11	1395	3.67	3.032	0.83	0.053	0.006	0.145	0.019	0.063	5
		15	1394	3.70	3.048	0.82	0.051	0.006	0.135	0.014	0.049	6
		19		3.63	3.996	0.82	0.056	0.006	0.100	0.013	0.044	6

表 11 疲勞試驗試樣的成份、組織和性能

組別	試樣編號	稀土 硅 加入 量, %	孕育劑加入量, %			處理後化學成份, %							
			Fe-Si	Al	Fe-Mn	C	Si	Mn	P	S	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃
I	264,269	4	—	0.03~0.1	—	3.40~3.42	3.46~3.55	0.65~0.67	0.073~0.076	<0.005	0.14~0.18	0.01~0.03	0.037~0.10
	265,270												
II	271,272	4	0.15~0.4	0.03	0.03	3.39~3.47	3.40~3.58	0.68~0.69	0.070~0.073	<0.005	0.16~0.17	0.02~0.03	0.037~0.10
	267												
III	266,273	4	—	—	—	3.39~3.41	3.46~3.52	0.68~0.69	0.070~0.079	<0.005	0.14~0.17	0.02~0.03	0.037~0.10
	268												

組別	試樣狀態	金 相 組 織						機 械 性 能					
		球化率 級	球墨大小 號	珠光體 %	鐵素體 %	磷共晶 %	碳化物 %	疲勞強度 公斤/毫米 ²	抗拉強度 公斤/毫米 ²	延伸率 %	布氏硬度 H _B	沖 擊 韌 性 公斤·米/厘米 ²	
I	鑄 態	6	3	≈20	余量	<0.5	微量	24.3	48.0~4.90	3.2~4.0	201~197	1.0~1.5	
	熱處理	6~5	3	30~40	余量	<0.5	—	26.0	—	—	—	—	
II	鑄 態	6	3~4	5~10	余量	<0.5	—	26.3	48.0~4.90	3.2~4.0	197	1.0~1.5	
	熱處理	6	3	40~50	余量	<0.5	—	28.5	—	—	—	—	
III	鑄 態	5	2~3	10~20	余量	0.5	微量	26.0	48.0~49.0	3.2~4.0	197	1.0~1.5	
	熱處理	5~6	3	30~35	余量	0.5	—	27.6	—	—	—	—	

鑄鐵獲得更高的機械性能。

二、几点討論

(一) 关于孕育处理的作用:

球墨鑄鐵的制作包括两个步骤:即球化处理和孕育处理。前者是指往铁水内加入鎂、鉍等球化剂;后者是指往铁水中加入 Fe-Si、Si-Ca 等孕育剂。过去人們的注意力多偏重于球化处理,将孕育处理看作是仅仅为了消除白口缺陷而进行的附加过程,因而有人称它作“墨化”处理。然而从近几年来国内外不少研究者的論述看来,这种将孕育处理的作用简单理解为“墨化”作用的想法是不够全面的。試驗証明,这一过程不仅起到消除碳化物的作用(即石墨化作用),而且还有更重要的作用——創造較多的球墨結晶核心,使球墨細化,并且变得更圆,分布更均匀,从而使

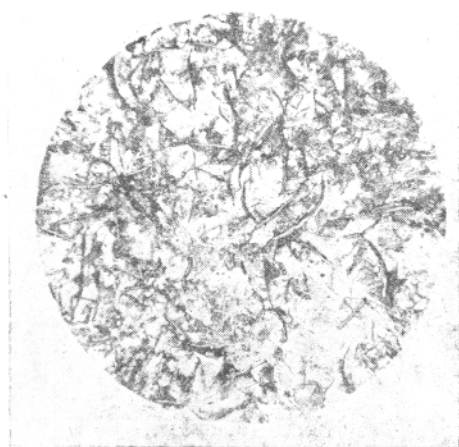
用鎂处理铁水时,由于鎂的球化作用較强,因此一般不必过多地依賴后孕育来改善球化;但用稀土处理时,由于稀土的球化作用較弱,因而通过后孕育处理进一步改善球化就显得很必要了。从前述各表所列化学成份看来,稀土球墨鑄鐵的球墨不圆,冲击值不高并不完全是稀土殘留量在起主导作用。鉴于这种原因,本試驗对后孕育处理給予了极大的注意。

1. 孕育的效果。

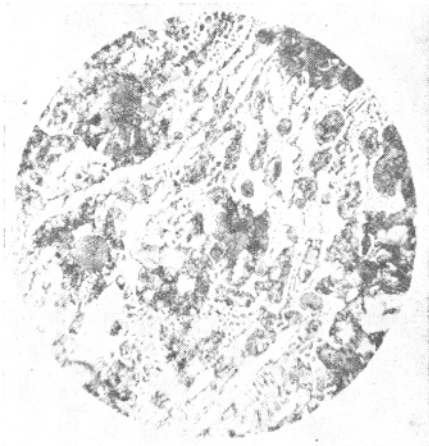
为說明孕育的作用,用混合稀土金属(含R_xO₂99%)来处理低硅铁水。因受石墨坩堝的限制,难于控制含碳量,其碳当量(C+1/3Si)%为4.827。选取低硅量是为了得到碳化物和少量石墨,观察后孕育的作用。其处理情况和結果見表 12。相应金相組織見图 16 a~e。

表 12 混合稀土金属处理加 Fe-Si 孕育的結果

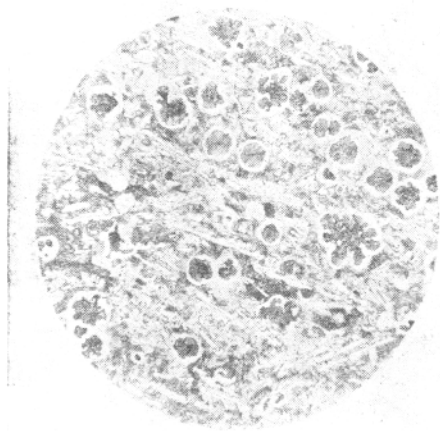
序号	混合稀土 金属加入 量, %	孕育剂加 入量 Fe- Si, %	处理 溫度 °C	加入剂加 入的时间 分	分 学 成 份, %								組 織
					C	Si	Mn	P	S	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	
1	—	—	1400	—	4.39	1.312	0.59	0.062	0.051	—	—	—	图16a
2	0.6	—	1400	0	4.19	1.276	0.61	0.058	0.009	0.190	0.016	0.046	图16b
3	—	0.8	1400	1	4.13	1.900	0.63	0.057	0.009	0.093	0.008	0.020	图16c
4	—	0.6	1400	4	4.04	2.240	0.62	0.065	0.007	0.079	0.006	0.018	图16d
5	—	0.4	1400	6	3.84	2.444	0.62	0.066	0.008	0.062	0.005	0.018	图16e



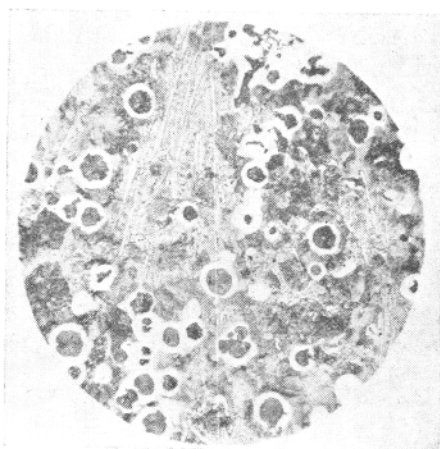
(a)



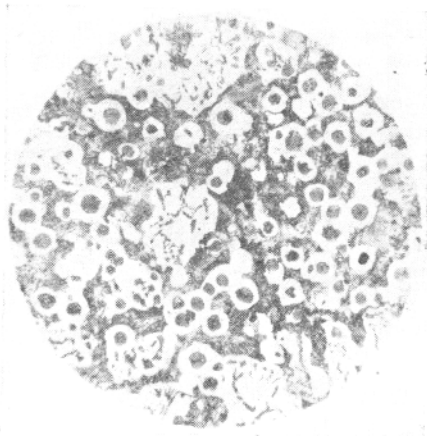
(b)



(c)



(d)



(e)

- a-未处理前的組織;
- b-加入 0.6% 混合稀土金属后的組織;
- c-加入 0.8% Fe-Si 的組織;
- d-两次加入总量 1.4% Fe-Si 的組織;
- e-三次加入总量 1.8% Fe-Si 的組織

图 16 不同孕育 Fe-Si 量的金相組織, $\times 115.3\%$
硝酸酒精溶液浸蝕

由圖 16a~e 看來, 後孕育的效果是明顯的。圖 16a, 是未經處理的原鐵水, 有着細片狀石墨組織。圖 16b 是加入 0.6% 混合稀土金屬處理後的組織。由於硅低, 即使處理後碳當量為 4.615, 仍然有大量碳化物和萊氏體, 這證明稀土有極強的碳化物穩定作用。這時生成的石墨比較粗大, 形狀不規則, 大多數是開花狀石墨, 圓球狀石墨不多。圖 16c 是加入 0.8% Fe-Si 孕育後的組織, 由於後孕育創造了較多的石墨核心, 結果使石墨數量增加, 形狀更趨於規則, 並且萊氏體和自由碳化物也減少了。圖 16d 是這種作用的強化, 孕育劑增加, 核心加多, 但這時因鐵水中稀土含量已逐漸減少, 保證石墨成為球狀的一定殘留稀土量已嫌不足, 所以在個別地方出現了團片狀石墨, 繼續孕育時, 這種作用更為明顯, 如圖 16e 所示。

以上試驗表明, 由於稀土有強烈的碳化物穩定作用, 因而後孕育對於稀土球墨鑄鐵更顯得重要。此外, 根據 C. R. Loper 及 R. W. Heine 最近的研究, 球狀石墨核心是在共晶轉變溫度範圍以上的溫度析出、長大的, 因而借助後孕育的方法, 在較高溫度時, 提供較多的核心, 保證石墨-奧氏體團更快的析出和長大, 也是促成石墨球化率提高的條件。

用稀土硅鐵處理球墨鑄鐵, 在球化處理時已帶入大量的硅, 通常不經後孕育也不會產生碳化物。但是石墨形狀仍不夠圓, 而且對鑄件壁厚的敏感性較大, 在壁厚較大部分的金相組織中, 球狀石墨較少, 往往夾有大部分團片狀石墨。其原因, 一方面由於壁厚處冷卻較慢, 自發核心較少; 另一方面是由於稀土有強烈的碳化物穩定作用, 抵消了隨同稀土硅鐵帶入鐵水中硅份的生核作用, 這樣, 在有利於球墨-奧氏體團生成的高溫區內就缺乏足夠的核心。當往後溫度降低, 熔液中 C、Si 過飽和繼續產生新的核心時, 已利於團絮、團片狀石墨的成長了。因此用稀土硅鐵處理鐵水時, 為了獲得球化良好的組織, 也需要進行後孕育。此時如果考慮到稀土硅鐵中的硅也有一定的孕育作用, 這種後孕育處理, 實質上已是二次孕育處理了。

2. 各種孕育劑的比較。

從試驗結果看來, 試棒和薄壁件以 4% 稀土硅鐵處理鐵水後, 以 Fe-Si 為基本組元的 Fe-Si-Fe-Mn-Al 和 Fe-Si-Al 是最好的孕育劑。國外資料證明 Ca-Si 是稀土球鐵的優良孕育劑, 由於生產條件限制, 其效果未能進行驗證。單加 Fe-Si 不太容易消除相應產生的細團片石墨, 對球化、性能都是不利的。補加 1%、2% 稀土硅鐵則使處理時間延長, 實質上和一次加入 5%、6% 稀土硅鐵一樣, 又因溫度限制, 過多補加是不適宜的。

3. 孕育劑的組成。

本試驗中以 Fe-Si 作為孕育劑的主要組元, 並以 Mn、Al、Ca 等作輔助元素按適當比例配合, 取得了良好的效果。值得注意的是 Al、Mn、Ca 都是脫氧元素; Mn、Ca 對硫有很高的亲和力; Al、Ca 是石墨化加強劑, Mn 是碳化物穩定劑。試驗中 Al、Ca, 在所用的範圍內 (當 Fe-Si < 0.60%) 對基體都有硬化作用, 即一方面加強石墨化, 一方面又硬化基體。

孕育劑中各組元的配比对孕育效果和機械性能也有很大影響, 澆注曲軸的 Fe-Si-Fe-Mn-Al 孕育劑其配比为 Fe-Si (75%) : Fe-Mn (60%) : Al (電解鋁) = 0.4 : 0.05 : 0.01, 球化為 4 級, 中心部位少數地區為 5~6 級, 團片、團絮較多。而用 Fe-Si (75%) : Fe-Mn (60%) : Al (電解鋁) = 0.4 : 0.05 : 0.045 的配比, 球化率為 4 級, 但相應引起大量石墨漂浮。兩者的碳當量, 處理前分別為 4.42 和 4.32, 處理後為 4.58 和 4.38。雖有差別, 但球化差別並不大。自 Fe-Si-Al 孕育劑看來, 也是要根据另件壁厚不同和要求的綜合機械性能來選取 Fe-Si 和 Al 的比例。兩者在 Fe-Si : Al = 6~20 之間, 對球化都有好的作用。但以在 10 左右球化和綜合機械性能綜合效果最佳。至於 Mn, 由於其碳化物穩定作用只可作孕育加強劑, 不能在絕對量上過於增多。

總之, 孕育劑的組成應當以 Fe-Si 為主, 加入少量石墨化加強劑 (Al、Ca 等) 或少量碳化物穩定劑 (如 Mn 等), 都會很好的增強孕育作用。文獻資料也相應說明了這點。至於其中的机理尚待今後進行研究。

4. 適宜的孕育條件。

球化處理後, 停留時間過長, 球化元素會大量消失, 溫度會下降, 這時再進行孕育處理, 則會導致球化變壞。圖 16a~e 的照片就是一個例子。在生產條件下球化處理後不同時間孕育, 因球化元素含量不同, 其孕育結果差別很大, 甚至引起球化率變壞。

孕育效果的好壞, 在很大程度上還取決於孕育工藝恰當與否。對稀土球墨鑄鐵來說, 合宜的孕育處理條件是:

(1) 有足夠保證石墨球化的球化元素殘留量, 對稀土球墨鑄鐵來說主要是 CeO_2 的殘留量;

(2) 孕育劑在較高的溫度下加入鐵液, 保證孕育劑的生核作用發生在適於球狀石墨生核和長大的溫度區間, 通常是共晶停歇以上的高溫區;

(3) 孕育劑應在球化處理後加入;

(4) 孕育處理後應盡快澆注。

總的說來, 稀土球墨鑄鐵經後孕育處理, 是改善球化從而提高性能的重要措施。今後使用的稀土硅鐵, 其稀土含量會逐漸增高, 相應帶入的硅量則逐漸減少, 這樣, 後

孕育更成为必不可少的工艺措施了。

(二) 关于石墨的形状:

铁水經稀土硅鉄处理后, 石墨形状发生改变, 引起很多类型的石墨出現。在本試驗中發現的有球状、团絮、团片(或称片状、蠕虫状)、开花(爆开状)、D型共晶石墨等几种类型。

1. 各种石墨的结构特点。

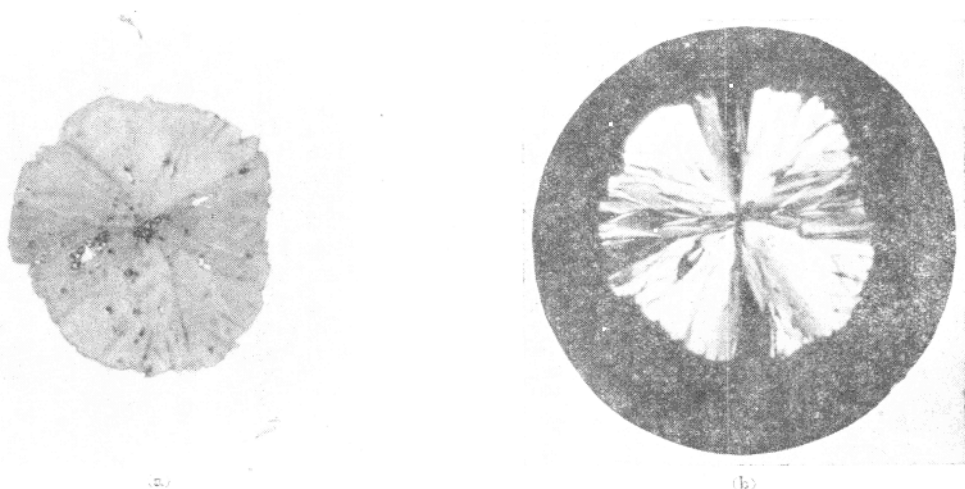
(1) 球状石墨: 稀土球墨鑄鐵的石墨一般不够圆, 經孕育处理后, 局部地区变得非常規則, 从金相檢驗看来和鎂鑄鐵石墨球完全一样, 中心是一个多面体的核心, 碳以細小的石墨晶体沿核心的方位堆积而成。由于温度下降, 石墨球外层结构較內层结构为細。图 17a、b 为石墨球的照片及偏光照片, 可以看出石墨的放射状組織。图 18a 是石

墨球核心部分的电子显微鏡照片, 表明其中部核心形状为多边形, 图上也看到石墨堆集的方位和核心方向是一致的。图 18b 是核心和第一层沉积石墨交界处的照片。

(2) 团絮状石墨: 在稀土球墨鑄鐵中普遍存在, 和球状石墨是同一类型, 主要是石墨外层有許多分枝, 这种分枝的结构, 按其成因讲与团片相同, 因此将在下节团片石墨的討論中叙述。至于本体則与球状石墨有一样的生长机构, 这里就不多談了。

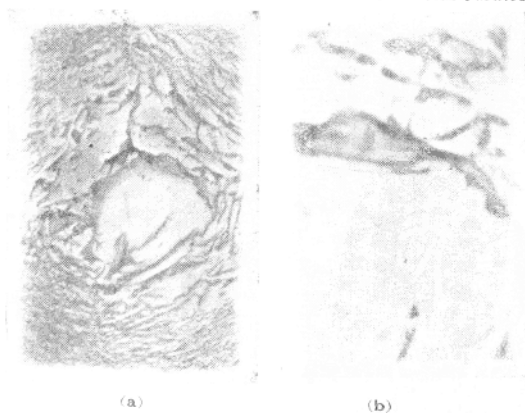
(3) 团片状石墨:

图 19a 所示的石墨便是稀土球墨鑄鐵中出現的团片状石墨。經孕育处理后不但其尺寸可以变化, 还往往会在局部地区聚集到一起, 成为一块堆集区, 且完全不含球状石墨。未經孕育处理的稀土球墨鑄鐵, 其团片状石墨也比



a-在正常光下的石墨球, b-在正交偏光下的偏光位置, 0°

图 17 石墨球的偏光结构, $\times 800$, 未浸蝕



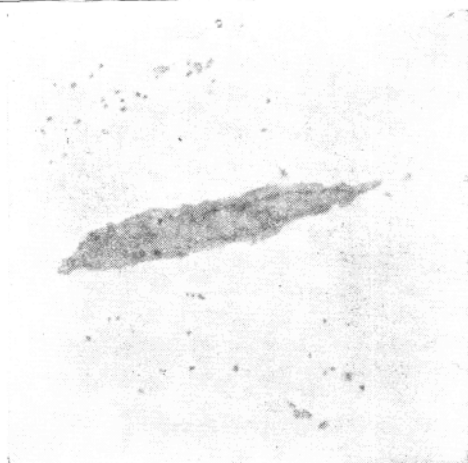
a-石墨球的多边形核心, $\times 12000$, b-石墨球的核心和第一层堆集的石墨晶体, $\times 4000$

图 18 石墨球核心的电子显微鏡照片

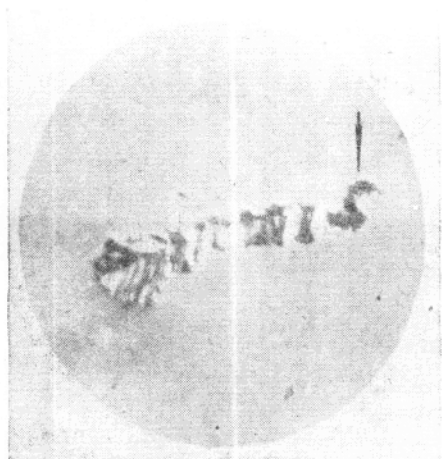
較粗大, 金相組織分布和团絮、球状相混。从图 19b、c 的偏光照片看来, 团片石墨大部分具有放射状組織, 在偏振光下呈现出各向异性, 但箭头所示部分, 偏光性能沒有变化、与图 20b、c 的片状石墨的偏光照片沒有区别。故可以說它們具有同一种偏光性能。这在一定程度上也反映其结构的同一性。图 21a、b 分别是片状石墨和团片状石墨箭头所示部份的电子显微鏡照片。看出这种石墨的堆积方位是沿着一条中心綫的。这条白色的綫是电子显微鏡复膜样片的裂开綫, 也正代表石墨的突起部位, 这和片状石墨结构的电子显微鏡照片(图 20)相似, 其中的白色綫, 也相应是片状石墨的凸起方位綫。从图 20 和 21 很相似看来, 可以說, 团片状石墨最初按球状机构生长, 在长大过程中可能是受到某些外界因素作用, 使得石墨又按片状的生长方法而长大, 从而在生



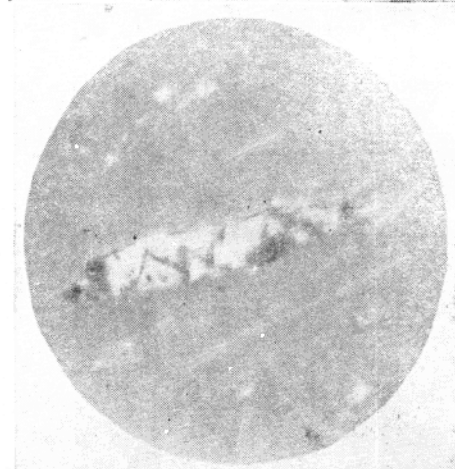
(a)



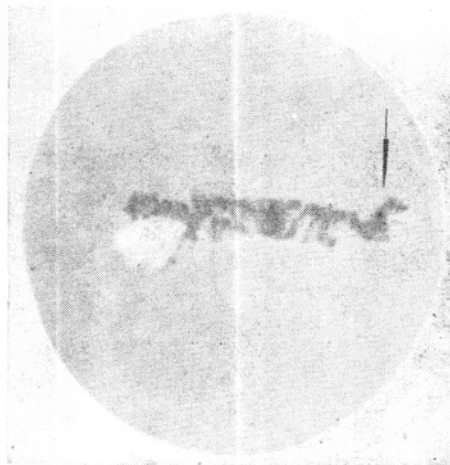
(a)



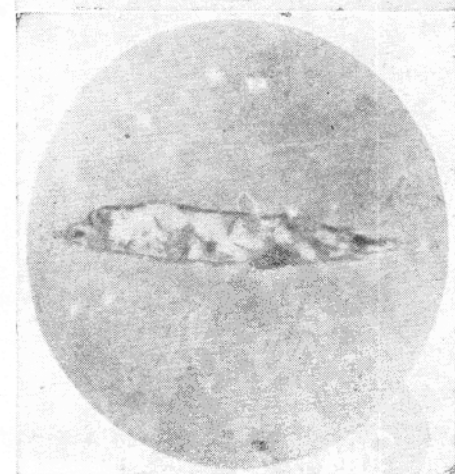
(b)



(b)



(c)



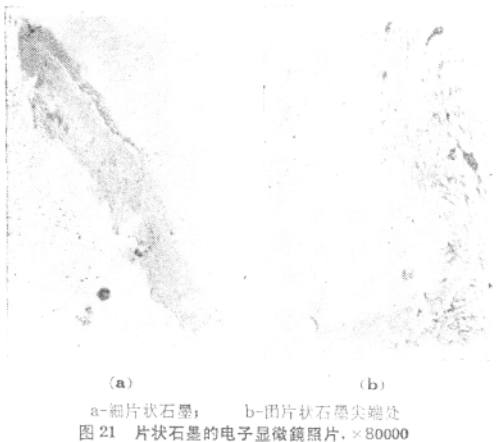
(c)

a-正常光下的片狀石墨；
b-正交偏光下的強光位置 90° ；
c-正交偏光下的消光位置 180°

图 19 片狀石墨的偏光照片， $\times 800$ ，未浸蝕

a-正常光下的片狀石墨；
b-正交偏光下的強光位置 90° ；
c-正交偏光下的消光位置 180°

图 20 片狀石墨的偏光照片， $\times 800$ ，未浸蝕



成的石墨中具有球狀和片狀的綜合結構。

(4) 开花狀石墨:

这类石墨的名称和闊片狀石墨一样,还没有统一的說法,有的叫爆開狀石墨 (Exploded Graphite), 也有人称梅花狀、星狀石墨, 其原因是它有許多种变态形状。在混合稀土金属处理铁水后或稀土硅铁处理后停留時間加长时会看到星狀石墨 (图 16c), 在 4% 稀土硅铁加入后, 再补加 1% 稀土硅铁或带有少量 Al 的孕育剂得到梅花狀石墨 (图 22)。

許多資料闡明开花狀石墨实际上是球狀石墨沒有发展完全的結果, 它的外形基本上还維持球狀。用电子显微鏡檢驗 (图 23) 看到石墨的中心仍是一个多边形的质点作为核心, 石墨按其边的方位相繼堆聚, 在两个方位交界处有的地区出現破裂, 石墨即不按原来方位生长, 导致一部分奥氏体基体被包入石墨内部, 破坏处石墨由于与液态接触就优先向外生长, 但其它部分仍維持一定方位, 这样便生

成既有球形輪廓, 而形状又不規則, 且还夾有大量基体的开花狀石墨。

(5) 关于球狀、团絮、闊片、开花狀石墨的成因:

团絮、闊片、开花狀石墨都是球化不理想的石墨形状, 他們和球化近似的次序可以大致按开花狀、团絮、闊片来排列。根据近年来一些研究者的工作认为它們都是在共晶转变溫区以上高溫区产生的球墨核心, 在奥氏体圈包围下生长时, 由于外在因素 (如球化剂的殘留量, 冷却速度, 处理后停留時間过长以及内部能量、成份起伏) 的影响, 使球墨-奥氏体的外层奥氏体圈破裂, 造成石墨部分与液体接触而生成的。由破裂时期、程度的差异使得后来石墨形状和球狀具有不同的相似性, 根据这些理由可以設想, 这几种石墨按图 24 的机构生长。

关于在漂浮区发现的开花狀石墨, 主要是一些石墨化强化剂促使奥氏体-球墨共晶团中的石墨很快长大, 因此重較液体輕而上浮, 这时, 如果外围奥氏体圈破裂, 即生成开花狀石墨。至于奥氏体圈破裂的原因可作如下的推测: 球墨-奥氏体团中石墨的长大包括 C 原子穿过奥氏体圈往石墨核心沉积, 以及奥氏体圈内层的 Fe 原子往外迁移两个过程, 由于 C 原子的扩散速度远比 Fe 原子高, 因而 Fe 原子的扩散速度即成为球墨长大过程的控制环节。但是当石墨化因素很强烈 (如碳当量过高, 加入强烈的墨化剂, 鑄件壁厚很大, 冷却很緩慢) 时, 由于 Fe 原子来不及往外迁移的結果, C 原子流即可冲破奥氏体圈使石墨很快往缺口处长大, 一部分奥氏体圈殘块則被裹入石墨内部, 形成图 24 的形状。因此, 要防止这种石墨的出現应避免过高的碳当量和使用数量过多的墨化作用过于强烈的墨化剂 (如 Al), 或者在使用强墨化剂时, 应同时加入少量碳化物稳定剂 (如 Mn), 抑制其石墨化作用。

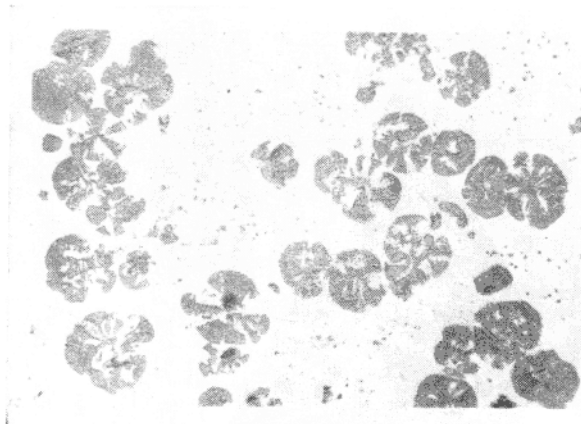


图 22 开花狀石墨 (梅花狀), $\times 100$, 未浸蝕



图 23 开花狀石墨的电子显微鏡照片 (一部分), $\times 12000$

稀土处理铁水，呈现开花状、团絮和团片状石墨的情况比較常見，在一些正常組織中也会碰到，这可能是稀土球化剂对于維持球墨外奥氏体圈的完整性，使奥氏体析出后不再破裂和溶解的作用有关。稀土的球化能力不如鎂，可能也是因其对球墨外奥氏体圈的稳定作用較鎂弱的結果。

(6) D型共晶石墨：

如图 25 所示，这种在共晶結晶溫度范围生成的石墨，在曲軸頂部中心石墨浮漂区及稀土硅鉄加入量 $>6\%$ 时的梅花試棒上发现。其生成原因，按一般观点是由于过冷而造成，从发现它的两个部位（加入 6% 稀土硅鉄的快冷試棒 F-34 和經 Fe-Si-Fe-Mn-Al 孕育曲軸的法兰中心）都是由于稀土的碳化物稳定作用而間接引起，不是稀土有 D 型石墨的生核能力，因为在其它加稀土的試棒中并没有看到这种石墨。

在用 Fe-Si-Fe-Mn-Al 处理的曲軸中，Al 量为 0.045% 的一組，由于强烈的石墨化作用造成石墨漂浮，同时本身碳当量为 4.39 仅仅稍微过共晶，在溫度下降时球墨-奥氏体共晶团长大，但这时，当鑄件顶部厚大部分最后凝固时期，孕育作用已經消失，稀土的碳化物稳定作用起着减少石墨核心的作用，原有球墨-奥氏体团迅速长大，奥氏体生长得更快，继而长出很多枝晶，当接近共晶終了溫度，造成剩余液体碳的过饱和，使得石墨在奥氏体枝晶間大量生核，这时的溫度已不利于其它类型石墨的生长，就形成晶間片状石墨或随共晶凝固生成 D 型共晶石墨。这种在枝晶間生成的 D 型共晶石墨，大大降低材料的机械性能。如表 3 的 F-34 試棒机械性能很低，就是 D 型石墨所引起。因此，在生产中应选择合宜的孕育剂比例和冷却速度来避免产生这种石墨。

2. 稀土殘留量与石墨球化的关系。

从統計数据看来，要保证 120 毫米以下断面达到比較好的球化，应使殘留量 $\Sigma R_2O_2 \geq 0.18\%$ ， $CeO_2 \geq 0.12\%$ ， $Ce \geq 0.1\%$ 。企图过份增加稀土硅鉄加入量以提高稀土殘留量来改善球化，不一定能得到预期效果。同时由于加入量过多，稀土元素强烈的碳化物稳定作用，使得薄断面易于产生碳化物，厚断面則易于产生 D 型共晶石墨，反而使性能降低。加入量过多在經濟上和工艺操作上都是不合理的。理想的是减少工艺操作上稀土的各种損失，使稀土在鉄中分布均匀，尽量减少球化剂加入量，而求得最佳的球化效果和机械性能。

3. 改善石墨球化率的方向。

用稀土处理的鉄水由于稀土的强烈碳化物稳定作用，与鎂鑄鉄相比，在共晶停歇溫度以上的高温区产生的核心較少，因此后孕处理就成为非常必要了。其次，根据組織

上石墨球分布不均匀的特点，也招致性能不稳定，所以均匀地分布稀土元素也是一个重要措施。再者，为保证球墨-奥氏体团正常生长，不在冷却过程中使外层奥氏体遭到破裂或溶解而导致出現各种不規則石墨，或使孕育作用消失而产生有利于片状石墨的生长条件，就必须保证稳定的奥氏体圈和必要的冷却速度。鉴于稀土球墨鑄鉄中經常出現开花、团絮、团片状石墨，且对断面敏感性还是比較大，这项措施就显得更为重要。根据以上几点，可以提出改进球化的下述方向：

(1) 在共晶停歇溫度以上提供比較多的球墨核心，如加入 Fe-Si 等孕育剂；

(2) 针对稀土的强烈碳化物稳定作用，在有利于石墨球生长的溫度适当加强石墨从液相中析出的能力。在孕育剂中加入少量石墨化加强剂（如 Al 等）；

(3) 保证較快的冷却速度，促进球墨-奥氏体团的均匀成长，保持奥氏体圈的完整；

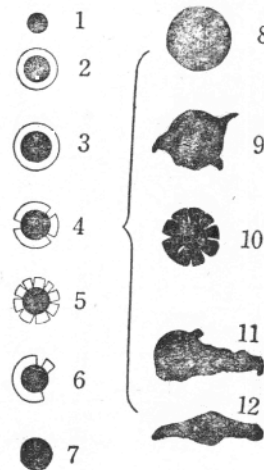
(4) 比較高的处理溫度，均匀分布稀土，对稀土硅鉄來說最好在 $1400^\circ C$ 左右；

(5) 减少稀土在处理停留时的氧化等損失，采用复盖剂或加入保护稀土不被氧化的元素（如 Al, Ca 等）。

(三) 机械性能：

1. 抗拉强度。

稀土球墨鑄鉄的抗拉强度与鎂鑄鉄相比，同样球化率



1-在液体内产生的核心；2-核心生成后即在奥氏体圈包围内长大；3-奥氏体圈保持完整；4-奥氏体圈局部破裂；5-奥氏体圈大部分破裂；6-奥氏体圈局部溶解；7-奥氏体圈全部溶解；8-长大成为規則球墨；9-长大成为团絮状石墨；10-长大成为开花状石墨；11-长大成为团片状石墨；12-长大成为片状石墨

图 24 石墨生成的示意图