

# 突破蠕墨铸铁生产技术瓶颈的研究与实践

邱汉泉<sup>1</sup>, 翟志军<sup>2</sup>, 傅现强<sup>3</sup>, 文景宝<sup>4</sup>, 崔宏宝<sup>4</sup>, 徐锦锋<sup>5</sup>, 梁敬凡<sup>5</sup>, 孟卫茹<sup>6</sup>, 蒲震<sup>6</sup>

(1. 山东省机械设计研究院, 山东济南 250003; 2. 北京固安汉飞思科精密机械制造有限公司, 河北廊坊 065500;  
3. 山东华晨(稀土)有限公司, 山东济南 250215; 4. 山东淄博蠕墨铸铁股份有限公司, 山东淄博 256401;  
5. 西安理工大学材料科学与工程学院, 陕西西安 710048; 6. 陕西众友特种合金科技有限公司, 陕西西安 710116)

**摘要:** 研究了一种以镁为主要蠕化元素的新型镁-低稀土蠕化剂, 用它制取蠕铁件, 不需要孕育处理, 即使在直径为10 mm的试棒中也没有发现自由碳化物。在Y形试块的铸造中, 为获得蠕化率 > 80% 和 > 50% 的蠕铁, 其适宜的加入量上下限之差的范围分别为0.3% 和 0.55%。这么宽的“适宜范围”, 以人工控制来制取预定蠕化率的蠕铁不困难, 而且熔制工艺简单易行, 每吨蠕铁消耗的蠕化剂和孕育剂成本可降低62.2% ~ 67.4%, 稀土消耗可减少89% ~ 91%。

**关键词:** 蠕墨铸铁; 蠕化元素镁; 低稀土蠕化剂; 白口倾向; 孕育处理

我国的蠕墨铸铁, 无论是提出作为新型工程材料来研究和应用, 或是投入工业生产, 都比国外早得多<sup>[1-2]</sup>。半个多世纪以来, 我国蠕铁人坚持研究、实践和应用, 基本掌握了稳定蠕铁生产的关键技术, 取得了具有完全自主知识产权的全面、丰硕的成果<sup>[3-4]</sup>。然而, 其生产工艺中“适宜的蠕化剂加入量(残留量)范围狭窄”(以下简称“适宜范围”), 迄今仍是蠕铁稳定生产的技术瓶颈。近十年来, 笔者的研究与实践, 初步揭示了该“技术瓶颈”的根源所在及其解决办法。

## 1 稀土在蠕铁中作用的利与弊

### 1.1 有利作用

(1) 稀土在蠕铁中的最主要作用是改变石墨形状。当铁液中所含的稀土残留量达到某一临界点时, 片状石墨就会突然变成蠕虫状石墨, 使铸铁的力学性能突然提高而变成蠕铁, 如图1、图2所示。图1是采用含混合稀土RE=22%的稀土硅铁蠕化剂试验制成, 其曲线走向规律也适合于本研究的“镁-低稀土硅铁蠕化剂+不孕育”蠕化处理工艺。片墨和蠕墨之间只有极狭窄、极难控制的片状+蠕虫状+个别球状的混合石墨。若铁液中的稀土继续增加, 蠕虫状石墨就会逐渐减少, 而团絮状、球状逐渐增加, 甚至成为球铁。

然而, 当用镁和稀土分别作为球化剂生产球铁时, 稀土的球化能力明显不如镁, 故以往就认为, 稀土用于生产蠕铁是最佳蠕化元素; 而用镁作为蠕化元素制取蠕铁时, 文献[5]研究认为, 铁液中,  $Mg \leq 0.01\%$ , 则仍为灰铁;  $Mg$ 在0.01% ~ 0.018%时, 成为蠕铁,  $Mg$ 在0.025% ~ 0.04%时, 则成为球铁。故获得蠕铁的含镁量范围仅为 $\pm 0.004\%$ , 这在工业生产中是难以控制的。所以, 国外就出现了“Foot”合金蠕化剂(镁+微量稀土+微量钛), 但因蠕铁生产中钛的存在带来的一些弊端, 而导致最终这类蠕化剂难以被应用。近三十年, 国外以镁为蠕化元素的蠕铁生产在线控制系统(如Sinter cast和OCC装置)在我国一些厂家初步得到应用, 但因价格昂贵而难以普及推广。

图1中曲线1为原铁液含硫量0.022% ~ 0.026%; 曲线2为原铁液含硫量0.039% ~

作者简介:

邱汉泉(1937-), 男, 高级工程师, 从事蠕墨铸铁的研究。E-mail: 279952537@qq.com

中图分类号: TG143.49

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

10-1077-10

收稿日期:

2019-01-15 收到初稿,

2019-05-19 收到修订稿。

0.051%；曲线3为原铁液含硫量 0.081%~0.085%

(2) 变质作用。稀土元素化学活性极强，可以在长大的晶粒界面上选择性地吸附，阻碍晶粒的生长，使晶粒细化，还可改善非金属夹杂的形状和分布（如细化硫化物，使硫化物的形状变钝或变成团、球状，其分布也较均匀）。这些良好的作用都有利于提高铸铁的质量。

(3) 净化铁液作用，改善铸造性能。稀土在铁液中有很强的除气（如氧、氢、氮等）和脱硫作用，其脱氧能力比强脱氧剂Al、Mg、Ti等还强，微量稀土就能使氧脱到 $<1 \times 10^{-6}$ ；其脱硫能力也相当强，铈的脱硫能力居常用元素之首。稀土脱硫产物的熔点和密度均比钙、锰、镁等的硫化物高得多。其密度大多接近于铁液的密度，这些高熔点的小质点有的来不及上浮到渣面而残留在铁液中，当其晶格参数与石墨的晶格参数相同或相近时，它可能作为石墨形核的基底，起着一定的孕育作用。稀土元素在铁液中还能和氧、硫同时发生反应生成难溶的 $RE_2O_3S$ 型硫化物，可成为浮渣而被排除掉，因此，稀土是铁液的良好净化剂。

稀土还能与低熔点非铁金属（如砷、铅等）化合，生成熔点高、比重轻的微小的稀土化合物质点，当它们的熔点高于铁液温度时，能上浮成渣。正由于稀土上述的有利作用，所以能显著提高铁液流动性，减少偏析、热裂等铸件缺陷。此外，稀土对提高蠕铁的

的耐热、耐腐蚀性能也有良好的作用。

(4) 合金化作用。根据Hume-Rothery规则，如果溶剂与溶质原子的半径之差超过14%~15%，该种溶质在溶剂中的固溶度不会很大。铁原子半径为1.24埃，轻稀土为1.821~1.877埃，重稀土1.734~1.802埃，其差已超过50%，它使铸铁基体产生点阵畸变，由此产生的应力场将阻碍位错运动，从而使铸铁基体得到强化。如图3所示<sup>[4]</sup>。图3a为放大10万倍的未加稀土的普通孕育灰铸铁，其珠光体片层较平直光洁；图3b为放大10万倍的加稀土的蠕铁，其珠光体片层已变形强化；图

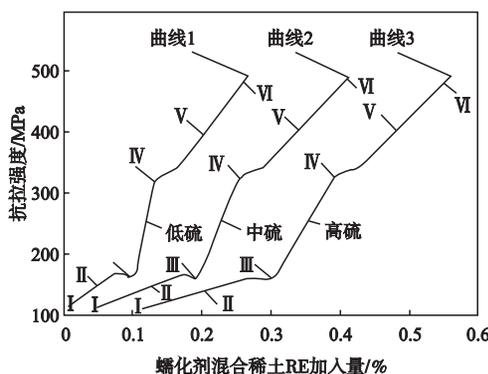


图1 蠕化剂加入量与铁液含硫量、蠕铁抗拉强度的关系示意图  
Fig. 1 Relationships between addition amount of vermicularizing agent and sulfur content in iron liquid and tensile strength of VG iron

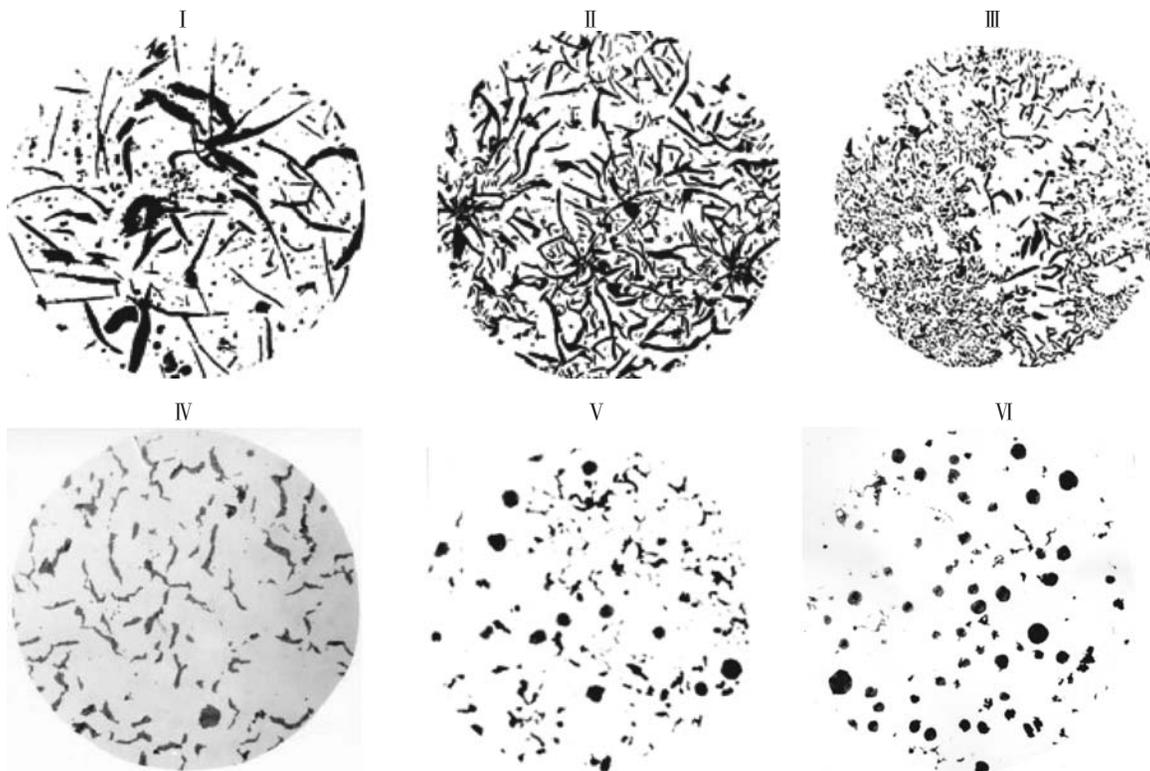


图2 高碳当量铁液中蠕化剂加入量由0逐渐增加时，石墨形态的变化（图中I~VI的石墨形态与图1中的I~VI相对应）  
Fig. 2 Change of graphite morphology with addition amount of vermicularizing agent in high-carbon equivalent iron liquid increasing from 0 gradually

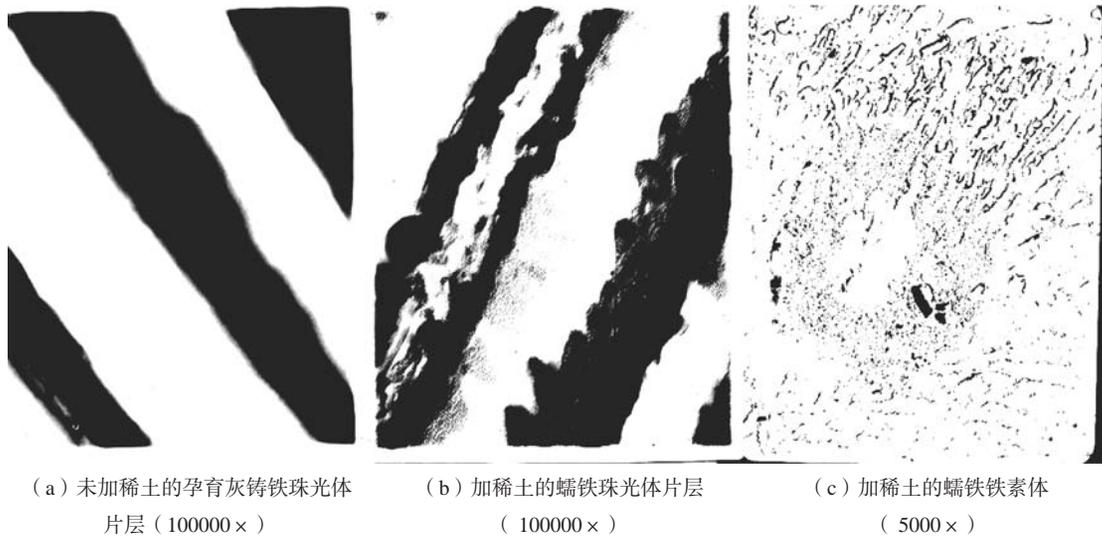


图3 铸铁基体的电子显微镜照片

Fig. 3 SEM images of cast iron matrix with different magnifications

3c为放大5千倍的加稀土的蠕铁，其铁素体上分布着许多超显微组织，细小点状物可能是稀土化合物硬质点。

众所周知，一般情况下，铁素体不如珠光体耐磨，因此机床导轨对普通孕育铸铁的铁素体量有严格的限制，但对于蠕铁，对铁素体量的限制却不那么严格。它被稀土强化后，其显微硬度甚至超过普通孕育铸铁中的珠光体显微硬度（表1）<sup>[4, 7]</sup>，所以蠕铁的耐磨性通常比高牌号灰铸铁高数倍。此外，稀土蠕铁中往往还出现一些钛、氮化合物硬质点，有利于耐磨性提高。

综上所述，稀土在蠕铁中的良好作用，加之当年全国大力推广稀土应用的社会环境，稀土作为蠕化剂的主要蠕化元素就成为人们的必然选择。

## 1.2 不利作用

### 1.2.1 稀土强烈阻碍石墨化

20世纪60年代中期有些国外文献报道，在铸铁中加稀土，其加入量少时，铸铁中的碳化物逐渐减少，稀土是促进石墨化的；稀土加入量继续增加时，铸铁中的碳化物逐渐增加，直至铸铁成为白口，铁液中的硫越高，铸铁断面颜色由白→灰→白的变化过程越向右移（图4）。因此，国外文献认为，稀土在铸铁共晶石墨化中的表现具有两面性<sup>[4]</sup>，实际上，这是错觉！当稀土加入少量时，它的石墨化作用并非它的本性，而是由于稀土在铁液中发生脱硫（氧等）反应，这样，不仅减少了稀土和硫（氧等）各自强烈阻碍石墨化的作用，同时稀土硫（氧）化合物在蠕铁共晶转变时，作为非自发晶核使石墨在它上面结晶，从而表现出促进

石墨化的作用（图4中，倒抛物线左半边；图5中若干曲线初始段的水平线）；当稀土加入量继续增加时，稀土与硫（氧等）的化学反应达到动平衡状态，铁液中的硫（氧等）不再降低。根据Hmuc-Rothery规则，稀土在铁液中的固溶度很小，过剩的稀土，强烈地阻碍石墨化，随着稀土加入量的增加，蠕铁白口倾向急剧加大（图5）<sup>[4]</sup>。

表1 铸铁显微硬度比较  
Table 1 Comparison of microhardness of cast iron matrix /HM

项目	稀土蠕铁		HT300孕育灰铁	
	测定值	平均值	测定值	平均值
铁素体	202 ~ 306	259	189 ~ 239	211
珠光体	258 ~ 364	315	221 ~ 272	249

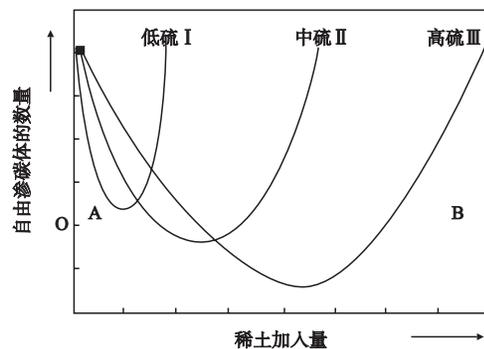


图4 低碳当量白口铸铁加稀土后，铸铁白口变化情况  
Fig. 4 Whitening variation after adding RE to white cast iron (原铁液为灰铸铁时，看不到白→灰的变化过程)

1.2.2 孕育处理对蠕铁的危害

为了解决蠕铁白口倾向问题，通常采用孕育处理工艺，在铸态就防止自由碳化物的产生，但它又给蠕铁带来严重的副作用。

(1) 出现“孕育促球”现象。众所周知，孕育处理对于球铁是必须的，它有许多好处，但对于蠕铁却是有害的，它急剧增加蠕铁中的球状石墨，降低蠕铁蠕化率(表2)<sup>[8]</sup>，从而增加了蠕化率的不稳定因素。例如，用镁蠕化处理的蠕铁，孕育前球化率为3%，加0.08%孕育剂后，球化率增加到21%，球化率增加了18%(图6)<sup>[5]</sup>；用稀土进行蠕化处理的Φ195 mm×250 mm试棒中，孕育前蠕化率为65%~75%，加0.6%的75硅铁孕育处理后，蠕化率为20%~30%，蠕化率降低了45%(图7)<sup>[7]</sup>。

(2) 使蠕化剂的“适宜范围”狭窄。蠕化处理的铁液一般是高碳成分，其稀土残留量在达到片墨→蠕墨突变的临界点之前，铸铁中一般不会有自由碳化物；一旦达到“临界点”，出现蠕墨，且蠕化率在90%以上，即便是经过孕育处理，在显微组织中也会往往会有少量的自由碳化物(大约1%~2%以下)。因此，蠕铁的基体组织经常有着铁素体+珠光体+自由碳化物三相共存的特点。这种少量的自由碳化物，依靠孕育处理是难以彻底消除的。

如果铁液蠕化处理不成功(石墨仍为片状)，材质就是低牌号灰铸铁，铸件就得报废。所以人们为了避免铸件报废，稀土蠕化剂的加入量往往是“宁过勿欠”，这样不仅导致自由碳化物的增加，也使球状石墨增加。为了防止出现自由碳化物，人们不得不在蠕化处理后再经孕育处理，导致“孕育促球”，蠕化剂“适宜范围”变狭窄。在图1中，每条曲线中V形和

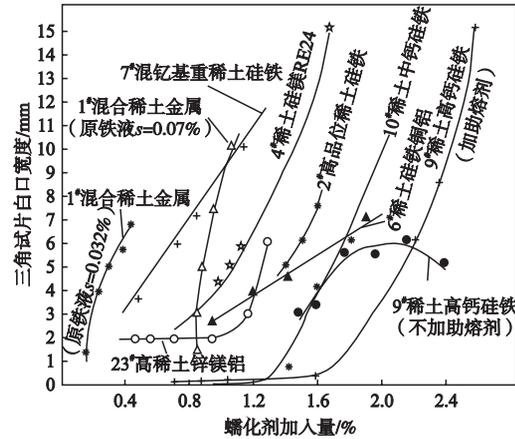
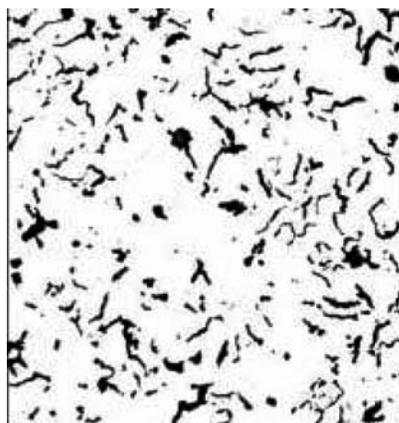


图5 蠕化剂加入量与三角试片白口宽度的关系  
Fig. 5 Relationship between addition amount of vermicularizing agent and white width on the fracture surface of triangular specimen

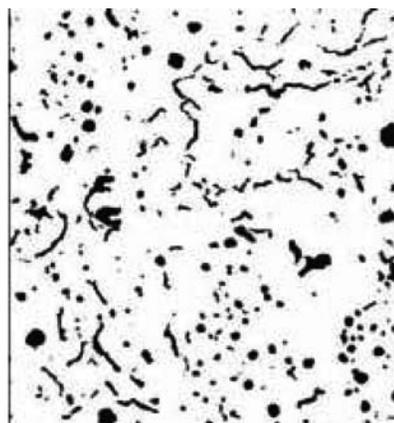
表2 孕育对蠕化率的影响  
Table 2 Influence of inoculation on VG rate

序号	硅铁孕育		
	加入量/%	终硅量/%	蠕化率/%
1	0.6	2.34	80~90
2	0.9	2.52	70~80
3	1.2	2.60	50~60
4	1.5	2.87	30~40
5	0.3	2.10	80~90
6	0.5	2.23	70~80
7	0.7	2.33	50~60
8	0.9	2.38	30~40

注：原铁液含硫量为0.074%；蠕化剂加入量为1.6%稀土硅铁合金+0.2%稀土镁硅铁合金；蠕化处理温度1450~1500℃。



(a) 孕育前球化率3%



(b) 加0.08%孕育剂后，球化率为21%

图6 用含镁蠕化处理的Φ25 mm试棒孕育前后的球化率变化

Fig. 6 Spheroidization rate changes in test rods with a diameter of 25 mm treated with magnesium:

(a) without inoculation, (b) with inoculation treatment

VI形石墨向左移,即,曲线中IV到VI的范围变狭窄,蠕化率降低。炉前操作者一不小心,铸铁就成为低牌号灰铸铁或是球状石墨过多的铸铁,这种“蠕铁”均为不合格。表2的试验结果表明,孕育剂加入量越多,“孕育促球”越甚。

为了解决这个问题,我国自1965年研制成功蠕铁并投入工业生产以来,蠕铁人付出了半个多世纪的努力,至今还没有获得令人满意的解决办法。国外通过多年的研究试验,成功地创制了“蠕铁生产过程在线控制装置”,其效果可靠、稳定、一致(如, Sinter cast和OCC装置),但由于其价格昂贵,我国蠕铁生产厂家难以普遍采用。

## 2 打通蠕铁生产技术瓶颈的构思与实践

由上述以及图6、图7可见,无论是稀土或是镁,作为铸铁中石墨的主要蠕化元素,其“适宜范围”狭窄并非它们的本性,而主要是孕育处理造成的后果。那么,可否不孕育?从图5的曲线来看,只要稀土为主的蠕化剂超过获得蠕墨的“临界点”,其白口倾向就急剧增大,如果不孕育,蠕铁中出现自由碳化物就很难避免。但是,图5中却找不到镁为主要蠕化元素的蠕化剂曲线,因为三角试片均未出现白口,因此在图5中无法示出,这表明镁导致铸铁的白口倾向很小。

### 2.1 “镁-低稀土硅铁新型蠕化剂”的构思

由于镁导致铸铁的白口倾向很小,可作为主要石墨蠕化元素而不需要孕育处理。它在蠕化剂中的含

量,以它在铁液中能“起爆”为限(4%~5%);若含镁量太高,将增大石墨的球化倾向而使“适宜范围”变狭窄。稀土在蠕化剂中的含量降低到低微的数量级(0.5%~1.5%),最大限度地避免其白口倾向,又保留稀土对蠕铁的有力作用。硅<45%,余量的铁。如果要生产合金蠕铁,其合金元素最好在熔炼炉内加入,以免可能产生孕育作用。

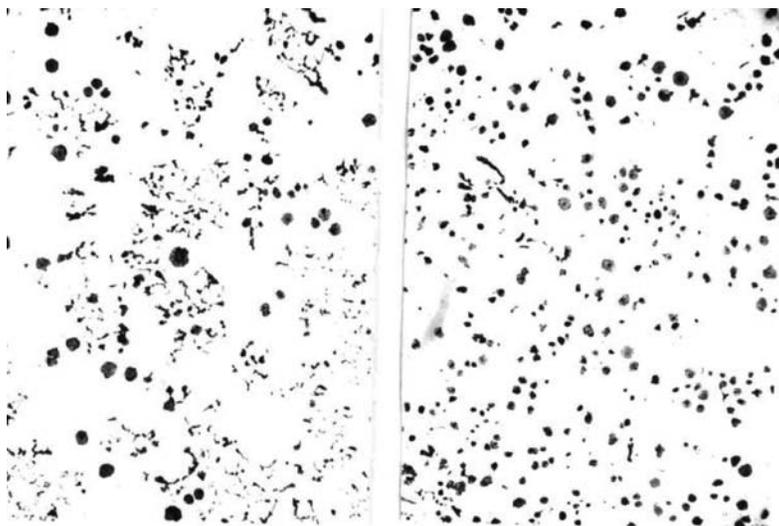
### 2.2 采用新型蠕化剂生产蠕铁的工艺实践

#### 2.2.1 比较含稀土较高的蠕化剂在蠕化处理后,孕育与否的状态

采用稀土硅铁+稀土镁合金包底引爆法进行蠕化处理,在生产条件下,用3 t中频电炉熔炼,试制机床床身,比较孕育与不孕育两种工艺对获得蠕墨的影响,其结果见表3。

表3中的蠕化剂,实际上仍是以稀土为主、镁为辅。序号1虽然蠕化剂加入量较2号高,但可能是第一包铁液温度和包温的影响,其蠕化元素的残留量为:稀土0.068%+镁0.009%,低于序号2。尽管如此,序号1经0.2% 75Si-Fe随流孕育后,主要壁厚为15~60 mm的床身本体,其石墨形状基本为团状+球状;而序号2、3、4,蠕化处理后不经孕育,不论是机床床身或是Y型试块,其残留蠕化元素稀土在0.041%~0.078%,镁在0.007%~0.013%,蠕化率均>80%(图8),残留蠕化元素的下限还不是临界点。因此,为获蠕墨的蠕化剂“适宜范围”还稍有空间。

在表3的试验中,出现了一种现象,序号1经孕育后,其三角试片和床身铸件出气小冒口的断口均为银



(a) 孕育处理前蠕化率65%~75% 30×

(b) 孕育处理后蠕化率20%~30% 30×

图7 在用稀土进行蠕化处理的 $\Phi 195\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 试棒中,加0.6%的75硅铁孕育处理前后蠕化率的变化

Fig. 7 VG rate changes in test rods with a diameter of 195 mm: (a) without inoculation, (b) inoculation with 0.6% 75 ferrosilicon

灰色，具有球铁断口特征；但序号2、3、4由于没有孕育，其炉前三角试片和床身铸件出气小冒口的断口均出现较大的白口，显然这是稀土为主要蠕化元素造成的。由于机床床身铸件毛坯重达1 t，冷却速度较慢，铸件本体安然无恙，经日本需方认可验收。

### 2.2.2 采用“镁-低稀土硅铁新型蠕化剂”进行蠕化处理的工艺

从上一节2.2.1的试验结果来看，即便以稀土为主的蠕化剂，只要不孕育，其蠕化剂“适宜范围”就比较宽，只是白口倾向较大，不利于铸造容易出现白

口的一般的中小蠕铁铸件。为此，设计了对蠕铁白口倾向比较小的以镁为主要石墨蠕化元素的蠕化剂——“镁-低稀土硅铁新型蠕化剂”，其化学成分如上述2.1所述。

在正常生产的10 t中频电炉中熔炼，出5 t铁液到中包，将蠕化剂置于蠕化处理小包的包底凹坑内，覆盖少许无污无锈的蠕铁屑或球铁屑，一次性出铁80 kg进行蠕化处理，检验合格后，浇注图10所示的五指状试样和Y型试块，其结果见表4。

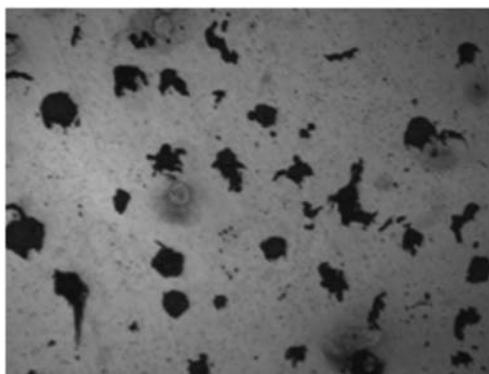
试验结果和数据分析如下。

表3 用稀土硅铁+稀土镁蠕化剂试制蠕铁机床床身结果

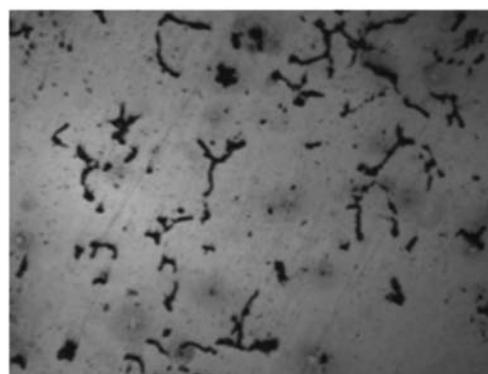
Table 3 Chemical composition and VG rate of VG iron machine tool beds with and without inoculation treatment

序号	蠕化剂加入量/%		孕育剂加入量/% (75Si-Fe)	石墨形态及 蠕化率/%	Y型试块化学成分/%				分析
	稀土硅铁	稀土镁硅铁			Si	S	Re	Mg	
1	0.9	0.30	浇注时随流孕育0.2	基本为团状+球状 >80	2.64	0.009	0.068	0.009	床身本体：2号蠕化元素残余量比1号高， 但2号不孕育、不“促球”，获高蠕化率
2	0.7	0.30			2.53	0.009	0.078	0.013	
3	0.5	0.20	不孕育	>90	2.30	0.015	0.062	0.009	Y型试块：3号蠕化元素残余量比4号高， 不孕育、不“促球”，均获高蠕化率
4	0.4	0.15			2.24	0.016	0.041	0.007	

注：①固安汉飞思科精密机械制造有限公司采用3 t中频炉熔炼，浇注毛重1 t的机床床身。②稀土硅铁含轻稀土30%，每吨15 500元；稀土镁硅铁合金含稀土4%~6%，含镁7%~9%，每吨10 500元。



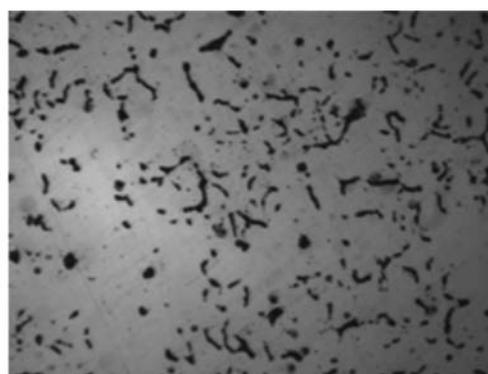
(a) H12Y0103号床身本体，主要壁厚15~60 mm



(b) H12Y0102号床身本体，主要壁厚15~60 mm



(c) H12Y0201号床身，Y形试块



(d) H121101号床身，Y形试块

图8 蠕化处理后的，孕育处理（左上角H12Y0103床身，经0.2% 75硅铁孕育）和不孕育所浇注的机床床身及其Y形试块的石墨形态。

Fig. 8 Graphite shapes in machine tool beds (a, b) and Y shaped samples (c, d) after vermicular treatment:

(a) inoculation treatment, (b, c, d) without inoculation

(1) 关于蠕化剂的“适宜加入量范围”。众所周知，炉前蠕化处理工艺影响因素甚多，实际试验结果与预计的结果往往不完全一致，这就需要根据现场实际情况、实践经验以及科学理论来判断数据的有效性。然而，在大生产的条件下，要做到试验结果与预计的结果完全一致是不现实的。

表4中，第一组，加蠕化剂0.4%，Y型试块中出现D+E+A型石墨，根据笔者几十年的蠕铁经验，这是接近获得蠕铁蠕化率 > 80% 的蠕化剂加入量下限的状态，若加入量增加到0.5%，则蠕化率将达到90%以上，故可确定其加入量下限为0.5%；第四组，蠕化剂加到1.0%，蠕化率为65%，距离蠕化率 > 50% 的要求，尚有15%的空间，根据经验判断，其蠕化剂加入量可增加到1.05%，将是蠕铁蠕化率 > 50% 的上限加入量。即，其“适宜加入量范围”是0.5% ~ 1.05%，

上、下限加入量之差为0.55%。这样，铁液采用镁-低稀土蠕化剂蠕化处理，不孕育，浇注标准Y型试块，其蠕化剂“适宜加入量范围”是：获得蠕化率 > 80% 的蠕铁，0.5% ~ 0.8%，上、下限差0.3%；获得蠕化率 > 50% 的蠕铁，0.5% ~ 1.05%，上、下限差0.55%。

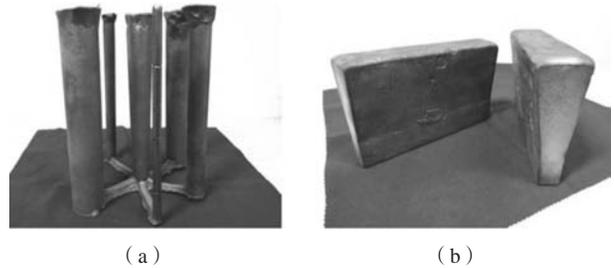


图9 五指状试棒和Y型试样毛坯  
Fig. 9 Five-finger test bar and Y shaped samples

表4 采用镁-低稀土硅铁蠕化剂蠕化处理蠕墨铸铁试验记录  
Table 4 Chemical composition, VG rate, microstructure and mechanical properties of vermicular graphite cast iron treated with Mg-low RE Si-Fe vermiculariser

组号	试棒直径/mm	化学成分/%						蠕化剂/%	蠕化率/%	基体组织	Y型试块					
		C	Si	Mn	P	S	Mg				RE	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度 HBW	蠕化率/%	基体组织
第一组	10								E+C	50%珠光体+铁素体						
	20							0.4临	E+C+A	30%珠光体+铁素体				D+E+A		
	30	3.64	2.62	0.69	0.033	0.011	0.011	0.004	界点微	D+C+A	20%珠光体+铁素体	136	0.60	125	临界点	
	40								欠量	A+C+D	20%珠光体+铁素体				微欠量	
	50									A+C+D+E	15%珠光体+铁素体					
第二组	10								50蠕	75%珠光体+铁素体						
	20								45蠕	65%珠光体+铁素体						
	30	3.57	2.53	0.70	0.033	0.012	0.014	0.006	0.6	80蠕	40%珠光体+铁素体	318	2.69	143	85	10%珠光体+铁素体
	40									80蠕	30%珠光体+铁素体					
	50									80蠕	25%珠光体+铁素体					
第三组	10								45蠕	85%珠光体+铁素体						
	20								75蠕	50%珠光体+铁素体						
	30	3.68	2.64	0.69	0.034	0.013	0.016	0.007	0.8	70蠕	30%珠光体+铁素体	354	3.35	151	85	15%珠光体+铁素体
	40									80蠕	30%珠光体+铁素体					
	50									85蠕	25%珠光体+铁素体					
第四组	10								10蠕	85%珠光体+铁素体						
	20								40蠕	60%珠光体+铁素体						
	30	3.73	2.53	0.69	0.034	0.014	0.023	0.008	1.00	55蠕	40%珠光体+铁素体	363	4.77	154	65	20%珠光体+铁素体
	40									55蠕	35%珠光体+铁素体					
	50									60蠕	35%珠光体+铁素体					
第五组	10								98蠕	90%珠光体+铁素体						
	20								5蠕	85%珠光体+铁素体						
	30	3.78	2.63	0.68	0.036	0.018	0.027	0.010	1.35	5蠕	75%珠光体+铁素体	461	12.5	163	15	20%珠光体+铁素体
	40									15蠕	45%珠光体+铁素体					
	50									15蠕	40%珠光体+铁素体					

这么宽的“适宜加入量范围”，在炉前以人工操作来获得预定蠕化率的蠕铁是不困难的。其技术关键是：蠕化剂配方科学合理；蠕化处理后，不进行孕育，以避免出现“孕育促球”；而不孕育处理的前提条件是，主要蠕化元素采用导致蠕铁白口倾向很小的镁，而稀土在蠕化剂中的含量，在考虑科学利用它的有利作用的情况下，应尽量减少。

(2) 以本研究设计的新型蠕化剂生产蠕铁，不进行孕育处理，在五指状试棒中，即便最小直径的10 mm试棒也未曾出现过自由碳化物。

(3) 蠕化处理工艺极为简单，将蠕化剂置于蠕化处理包的凹坑内，覆盖少许无污无锈的蠕铁屑或球铁屑，一次出铁完成蠕化处理，操作简便，易于推广。

(4) 用镁-低稀土硅铁蠕化剂，生产每吨蠕铁的炉前处理剂可降低成本67%，约为原费用的1/3；其中每吨蠕铁可节省80%的战略物资稀土。

### 2.2.3 采用“镁-低镧硅铁新型蠕化剂”进行蠕化处理

为了比较蠕化剂中低镧和低混合稀土对蠕铁力

学性能和金相组织的影响，蠕化剂中，用等量的纯镧代替混合稀土进行蠕化处理，其余技术参数和试验步骤与上述“2.2.2”小节相同。试验用的原铁液：采用30 kg中频感应电炉熔炼；蠕铁目标化学成分（质量分数，%）：C：3.6~3.8、Si<sub>总</sub>：2.4~2.6、Mn：0.5~0.8、S：0.017~0.018、P<0.07。蠕化剂化学成分（质量分数，%）：Mg：4.53、La：1.04、Si：42.1、Ca：1.35、Al：1.05、Fe：余量。比较表4和表5可见，尽管它们的熔炼条件差别较大，前者是蠕铁生产厂家10 t中频电炉的大生产环境，后者是30 kg小中频电炉的大学实验室环境（五组铁液不同炉熔炼），可能由于混合稀土和镧分别在这两种蠕化剂中的含量很少，其试验结果在力学性能和金相组织（图10）方面尚未显示出明显的差别，而镧的成本又较高，因此从目前来看，应用“镁-低镧硅铁蠕化剂”还不是很有必要。

表5 采用镁-低镧硅铁蠕化剂蠕化处理蠕墨铸铁试验记录  
Table 5 VG rate, microstructure and mechanical properties of vermicular graphite cast iron with Mg-low La Si-Fe vermiculariser treatment

组号	试棒直径 /mm	蠕化剂 加入量/%	石墨形态	基体组织	Y型试块力学性能		
					抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度HBW
1	30	0.35	片状	20%珠光体+铁素体	129	1.43	124
	30	0.38 正在临界点	图10	30%珠光体+铁素体	169	1.57	156
2	10	0.40	50%蠕虫状	50%珠光体+铁素体	385	4.76	167
	20		60%蠕虫状	35%珠光体+铁素体			
	30		80%蠕虫状	30%珠光体+铁素体			
	40		85%蠕虫状	30%珠光体+铁素体			
	50		85%蠕虫状	20%珠光体+铁素体			
3	10	0.60	50%蠕虫状	60%珠光体+铁素体	388	5.24	179
	20		60%蠕虫状	40%珠光体+铁素体			
	30		75%蠕虫状	40%珠光体+铁素体			
	40		75%蠕虫状	30%珠光体+铁素体			
	50		80%蠕虫状	25%珠光体+铁素体			
4	10	0.90	25%蠕虫状	75%珠光体+铁素体	463	9.29	196
	20		50%蠕虫状	60%珠光体+铁素体			
	30		50%蠕虫状	45%珠光体+铁素体			
	40		55%蠕虫状	35%珠光体+铁素体			
	50		55%蠕虫状	35%珠光体+铁素体			
5	10	1.10	98%蠕虫状	70%珠光体+铁素体	495	19.05	196
	20		5%蠕虫状	50%珠光体+铁素体			
	30		5%蠕虫状	40%珠光体+铁素体			
	40		10%蠕虫状	10%珠光体+铁素体			
	50		10%蠕虫状	10%珠光体+铁素体			

### 3 结论

(1) 为稳定获得预定蠕化率的蠕铁，其蠕化剂“适宜加入量范围”狭窄，一直是蠕铁稳定生产的技术瓶颈；其实它并非蠕化元素本性，而是“孕育促球”造成的后果；若不进行孕育处理，蠕铁在同等蠕化元素残留量的情况下，无论是稀土或镁，获得蠕墨的“适宜范围”就较宽，但以稀土为主要蠕化元素的蠕化剂，因其严重的白口倾向，蠕铁中就难免出现自由碳化物。故不得不进行孕育处理而导致“孕育促球”使“适宜加入量范围”狭窄。

(2) 镁导致蠕铁的白口倾向很小，在不孕育的情况下，甚至在10 mm的小试棒中也未曾出现过自由碳化物。采用本试验所设计的“镁-低稀土硅铁蠕化剂”进行蠕化处理的Y型试块，其蠕化率 > 80% 和 > 50% 的蠕化剂适宜加入量上下限之差的范围，大体分别为0.3% 和 > 0.55%；

这么宽的“适宜加入量范围”，在炉前以人工操作来获得预定蠕化率的蠕铁是不困难的。其技术关键是：“蠕化剂配方科学合理 + 蠕化处理后不进行孕育”，以避免出现“孕育促球”；而不孕育处理的前提条件是，主要蠕化元素采用导致蠕铁白口倾向很小的镁，而稀土在蠕化剂中的含量，在考虑科学利用它的有利作用的情况下，应尽量减少。

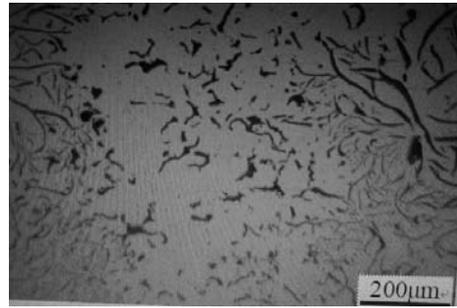


图10 用镁-低镧硅铁蠕化剂处理的蠕铁组织  
Fig. 10 Microstructure of vermicular graphite cast iron with Mg-low La Fe-Si vermiculariser treatment

(3) 采用本研究所设计的蠕化剂制取蠕铁，其炉前处理工艺极为简单，易于推广应用；若采取不用人工起闭包盖的“加盖蠕化处理铁液包”进行蠕化处理（我国专利号88216237），则不仅可减少镁的消耗，还可避免蠕化处理时，烟、光、尘对车间环境的污染。

(4) 蠕铁生产成本可大幅下降。与稀土为主要蠕化元素的蠕化剂比较，采用镁-低稀土 硅铁蠕化剂生产蠕铁的炉前处理剂成本可降低62.2% ~ 67.4%，其中可节省战略物资稀土89% ~ 91%（见表6）。

表6 新型“镁-低稀土硅铁蠕化剂”与原用蠕化剂成本概算对比  
Table 6 Cost comparison of new type Mg-low La Fe-Si vermiculariser and ordinary vermiculariser

剂类	化学元素	化学成分/%		蠕化剂成本/(元/t)		每吨蠕铁蠕化剂加入量/%	
		新型蠕化剂	原用蠕化剂	新型蠕化剂	原用蠕化剂	新型蠕化剂	原用蠕化剂
蠕化剂	稀土	1.0 ~ 1.5	11 ~ 14				
	镁	4.5 ~ 5.0	4 ~ 6			0.5 ~ 0.7	0.5 ~ 0.7
	硅	40 ~ 45	40 ~ 45	7 473.13	11 185		
	钙	—	2.5			每吨蠕铁蠕化剂加入量/%	
	铁	余量	余量			37.4 ~ 52.31	55.93 ~ 78.3
孕育剂	硅		65 ~ 68	孕育剂成本/(元/t)		每吨铁液孕育剂加入量/%	
	钡	无需孕育	0.8 ~ 1.6	新型蠕化剂	原用蠕化剂	新型蠕化剂	原用蠕化剂
	钙		4 ~ 6	无需孕育	7 500	无需孕育	0.8 (7 500 × 0.8% = 60)
每吨蠕铁炉前消耗处理剂成本				1. 采用新型“镁-低稀土硅铁”蠕化剂：37.4 ~ 52.31元/t； 2. 采用原用蠕化剂：115.93 ~ 138.3元/t。			
每吨蠕铁的炉前处理剂和稀土节约百分比				1. 采用“镁-低稀土硅铁蠕化剂+不孕育工艺”生产蠕铁，炉前处理剂成本可降低62.2% ~ 67.4%； 2. 新型“镁-低稀土硅铁蠕化剂”中的稀土用量比原用蠕化剂减少了89% ~ 91%。			

**参考文献:**

- [1] 田世江, 葛晨光. 咬定青山 笑傲风雨——访我国蠕墨铸铁事业的奠基者 [J]. 铸造, 2007 (12): 1332-1337.
- [2] STEFANSCU D M, LC R JR. 在蠕墨铸铁领域中的最新进展 [J]. Giesserei-Praxis, 1981 (5): 73-96.
- [3] QIU hanquan, CHEN Zhengde. The forty years of vermicular graphite cast iron development in China (Part I) [J]. China Foundry, 2007 (2): 91-98.
- [4] 邱汉泉. 蠕墨铸铁及其生产技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 69-70.
- [5] STEVE D. Process control for the production of compacted graphite iron [C] //the 106th AFS Castings Congress, Kinsas City, 2002.
- [6] 杜挺. 稀土元素在金属材料中的作用与机理 [J]. 中国有色金属学报, 1996 (2): 13-15.
- [7] 邱汉泉. 稀土高牌号灰铸铁 [C] //山东省铸造经验交流会, 1966.
- [8] 李美蓉. 孕育对蠕墨铸铁组织的影响 [J]. 安徽工学院学报, 1984 (4): 49-55.
- [9] 张忠仇. 用稀土硅铁生产大截面蠕铁件 [C] //全国稀土在铸铁中应用学术研讨会; 北京国际稀土学术会议论文集, 1982、1985.

---

## New Concept of Vermicular Graphite Cast Iron Production Technology and Its Practice

QIU Han-quan<sup>1</sup>, ZHAI Zhi-jun<sup>2</sup>, FU Xian-qiang<sup>3</sup>, WEN Jing-bao<sup>4</sup>, CUI Hong-bao<sup>4</sup>, XU Jin-feng<sup>5</sup>, LIANG jing-fan<sup>5</sup>, MENG Wei-ru<sup>6</sup>, PU Zhen<sup>6</sup>

( 1. Shandong Institute of Mechanical Design and Research, Jinan250003, Shandong, China; 2. Hanhe Machinery Co., Ltd., Langfang 065500, Hebei, China; 3. Shandong Hua Chen (Rare Earth) Co., Ltd., Jinan250215, Shandong, China; 4. Shandong Zibo Vermicular Cast Iron Co., Ltd., Zibo 256401, Shandong, China; 5. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 6. Shaanxi Zhongyou Special Alloy Technology Co., Ltd., Xi'an 710116, Shaanxi, China )

**Abstract:**

A new vermiculariser with magnesium and low rare-earth content was investigated to manufacture VG iron, without inoculation, even in 10 mm-diameter test bar, free carbide was not found. In Y-shaped specimens, in order to obtain VG iron with vermicular rate > 80% and > 50%, the suitable upper and lower limits of addition amount are 0.3% and 0.55%, respectively. It is not difficult to produce VG iron with predefined VG rate by manual control in such a wide "suitable range". As a result, the melting process was simplified, and the cost of vermicularisers and inoculant consumed per ton was reduced by 62.2%-67.4%, and rare earth by 89%-91%, respectively.

**Key words:**

vermicular graphite cast iron; vermicular element Mg; low RE vermicularisers; chilling tendency; inoculation