

# 低镧镁硅铁蠕化剂的蠕化作用特性研究

徐锦锋<sup>1</sup>, 梁敬凡<sup>1</sup>, 邱汉泉<sup>2</sup>, 蒲震<sup>3</sup>, 孟卫如<sup>3</sup>

(1.西安理工大学材料科学与工程学院, 陕西西安 710048; 2.山东省机械设计研究院, 山东济南 250000;

3.陕西众友特种合金科技有限公司, 陕西西安 710116)

**摘要:** 采用自制低镧镁硅铁蠕化剂处理铁液, 探索了蠕化剂加入量对蠕墨铸铁微观组织和力学性能的作用规律。结果表明, 低镧镁硅铁蠕化剂具有较宽的适宜加入量范围, 当原铁液温度为1 460 ℃、含硫量在0.017%~0.018%时, 使用质量分数0.4%~0.9%的蠕化剂进行蠕化处理, 可获得蠕化率在50%~80%范围的蠕墨铸铁材质; 相应地, 蠕化元素与硫元素之间的平衡浓度(质量分数)分别为 $Mg_{残}=0.011\% \sim 0.018\%$ 、 $La_{残}=0.007\% \sim 0.009\%$ 和 $S_{残}=0.013\% \sim 0.015\%$ 。铸铁中由片状石墨向蠕虫状石墨发生转变所需的蠕化剂临界加入量范围很窄, 在0.35%~0.4%之间, 其上限对应的蠕化率达80%。当蠕化剂加入量大于0.4%时, 随着蠕化剂加入量增多, 蠕化率趋于减小, 球墨数量增多, 珠光体数量趋于上升, 蠕铁的抗拉强度、伸长率及硬度明显增大。

**关键词:** 蠕墨铸铁; 蠕化剂; 蠕化处理

**中图分类号:** TG143.49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2018) 09-0772-06

## Study on Characteristics of Vermiculation Effect of Low Lanthanum Content Magnesium Ferrosilicon Vermicularizing Agent

XU Jin-feng<sup>1</sup>, LIANG Jing-fan<sup>1</sup>, QIU Han-quan<sup>2</sup>, PU Zhen<sup>3</sup>, MENG Wei-ru<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

2. Shandong Machinery Design and Research Academy, Jinan 250031, Shandong, China;

3. Shaanxi Zhongyou Special Alloy Technology Co., Ltd., Xi'an 710116, Shaanxi, China)

**Abstract:** In this paper, molten iron was treated by using self-made low lanthanide content magnesium ferrosilicon vermicularizing agent, and the effects of the addition amount of the vermicularizing agent on the microstructure and mechanical properties of the vermicular graphite cast iron were researched. The results indicate that the proper addition amount range of the vermicularizing agent is wide. When the temperature of primary iron liquid is 1 460 ℃ and the sulphur content is 0.017%-0.018%, the vermicular graphite cast iron with a vermicularity of 50% -80% can be produced using 0.4% -0.9% (mass fraction) addition amount of the vermicularizing agent. Accordingly, the equilibrium concentrations among residual magnesium, lanthanum and sulphur in the vermicular graphite cast iron are 0.011% -0.018%, 0.007% -0.009% and 0.013% -0.015%, respectively. In addition, the critical addition amount of the vermicularizing agent which promotes the transformation from flake graphite to vermicular graphite in the cast iron is in a narrow range of 0.35% -0.4%. The vermicularity is up to 80% for the upper limit of this narrow range. When the addition amount of vermicularizing agent exceeds 0.4%, the vermicularity decreases with the increase of vermicularizing agent, while the number of nodular graphite, the quantity of pearlite and the mechanical properties of the alloy increase.

**Key words:** vermicular graphite cast iron; vermicularizing agent; vermiculation of graphite

蠕墨铸铁因其兼具灰铸铁与球墨铸铁的各项性能优点, 具有较高的力学性能、良好的铸造性能和抗振性能及较高的抗热疲劳性能等, 在发动机缸体与缸盖、排气歧管和玻璃模具等领域的应用日趋广泛<sup>[1-2]</sup>。这些优良综合性能的获得, 主要归功于蠕墨铸铁中石墨晶体的生长方式及生长形态的改变, 石墨沿基面和棱面交替生长分枝的结果, 便形成了形态介于片状石墨和球状石墨之间的石墨形态——蠕虫状石墨。蠕虫状石

墨铸铁(简称蠕铁)的获得途径是对原铁液进行有效的蠕化处理, 蠕化处理剂通常是具有脱氧脱硫功能的稀土系、镁系和镁钛系等合金。由于这些合金常常具有球化功能和反石墨化作用, 所以蠕墨铸铁冶金处理的难点在于, 蠕化剂加入量少, 难以达到理想的蠕化效果, 得到的是灰铸铁; 蠕化剂加入量多, 则球化程度加剧, 将得到球墨铸铁, 且碳化物数量较多<sup>[3-5]</sup>, 而且, 生产中常用的稀土合金蠕化剂, 稀土含量较高,

收稿日期: 2018-06-13收到初稿, 2018-07-20收到修订稿。

作者简介: 徐锦锋 (1963-), 男, 教授, 主要从事凝固技术与新材料研究。E-mail: jinfengxu@xaut.edu.cn

用以处理的铁液白口倾向较大,必须进行孕育处理,但孕育处理又凸显出“孕育促球”现象<sup>[9]</sup>。因此,现有蠕化剂的有效加入量范围窄,白口倾向大,导致蠕化率波动范围大,需要对蠕化处理工艺进行严格控制,难以进行批量稳定生产,这已成为制约蠕墨铸铁工程化应用的瓶颈。因此,亟待研发一种蠕化处理范围较宽的蠕化剂,以满足日益增长的蠕墨铸铁件的生产需要。

与普通混合稀土相比,纯镧稀土处理的铁液白口倾向和缩松倾向相对较小,允许的残留稀土量较高,是一种更加适宜的蠕化元素<sup>[7-9]</sup>。本工作拟采用低镧镁硅铁蠕化剂进行铁液蠕化处理,探索其蠕化作用特性及适宜加入量范围,研究蠕化剂加入量对合金蠕化率、基体组织和力学性能的影响规律,以期对蠕墨铸铁的批量稳定生产提供理论和实验依据。

## 1 试验方法

### 1.1 低镧镁硅铁蠕化剂的制备

试验用低镧镁硅铁蠕化剂在陕西众友特种合金科技有限公司冶炼而成。该蠕化剂主要由Mg、La、Si、Ca、Al和Fe六大元素组成,不含稀土铈,杂质元素含量小于0.02%,MgO含量小于0.5%,其中,镁元素和镧元素为蠕化元素,镁元素具有“自沸腾”能力,可避免蠕化不均匀,但因其球化能力强,含量不宜过高,需要与适量镧元素配合使用。该蠕化剂的化学成分列于表1,采用1 t中频感应炉熔炼,并用水冷金属型浇注成形,所得合金外观氧化程度轻,断口组织均匀、致密。

表1 蠕化剂化学成分

Mg	La	Si	Ca	Al	Fe
4.0~6.0	0.5~1.5	40~45	1.0~1.5	0.5~1.0	余量

### 1.2 蠕铁试样的制备

蠕墨铸铁的化学成分列于表2。采用50 kg中频感应炉熔炼铁液,原材料包括普通原生铁(Q10)、碳素废钢(Q235A)和回炉料以及石墨增碳剂、75#硅铁和85#锰铁等。铁液质量为30 kg。采用包底冲入法进行蠕化处理,具体做法是,将蠕化剂置于包底坑中,捣实,上面覆盖适量蠕铁铁豆。蠕化剂加入量分别为(质量分数, %): 0.2、0.3、0.35、0.38、0.4、0.6、0.9和1.1。蠕化处理温度为1 420~1 460 °C,浇注温度为1 310~1 320 °C。普通粘土砂造型,铸成 $\Phi 30$  mm $\times$ 300 mm的单铸试棒和Y型试块,Y型试块规格如图1所示。在距试棒端部40 mm处截取金相试样进行组织观察和分析,依据GB/T 26656—2011蠕墨铸铁金相检验标准,对照标准图谱,并借助专业图像分析软件Image Pro Plus6定量测定合金的蠕化率和基体中物相含量。从Y型试块

中截取拉伸试棒测试合金的力学性能。用炉前快速测温仪(热电偶)测定铁液的温度,用直读光谱仪测定原铁液的含硫量和蠕铁的化学成分,如表2所示,其中 $W_{VA}$ 为蠕化剂加入量。

表2 铁液化学成分

组别	$W_{VA}$	C	Si	Mn	P	S
1#	0.2	3.70	2.87	0.62	0.038	0.017
2#	0.3	3.51	2.25	0.53	0.031	0.016
3#	0.35	3.47	2.10	0.63	0.032	0.015
4#	0.38	3.43	2.34	0.63	0.032	0.015
5#	0.4	3.54	2.90	0.65	0.035	0.015
6#	0.6	3.65	2.77	0.62	0.037	0.014
7#	0.9	3.42	2.75	0.66	0.034	0.013
8#	1.1	3.31	3.26	0.65	0.035	0.013

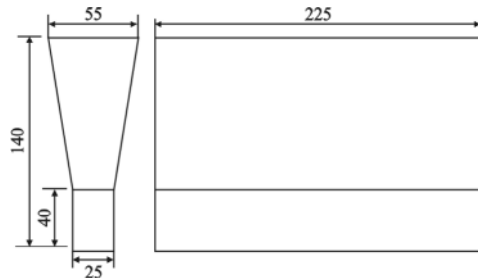


图1 Y型试块规格

Fig. 1 Specifications of the Y-type single cast specimen

## 2 结果与讨论

### 2.1 低镧镁硅铁蠕化剂的蠕化作用规律

当蠕化率 $\theta_v$ 大于50%时,蠕铁所独有的性能优势才得以体现。因此,我国现有蠕墨铸铁件标准规定,蠕化率大于50%的铸件谓之蠕墨铸铁件<sup>[10]</sup>。当采用低镧镁硅铁蠕化剂处理铁液时,不同蠕化剂的加入量 $W_{VA}$ 所对应的合金微观组织和力学性能列于表3。可以看出,随着蠕化剂加入量的增大,石墨形态依次经历了由片状石墨(Flake Graphite)→蠕虫状石墨(Vermicular Graphite)→球状石墨(Nodular Graphite)的转变。当 $W_{VA}=0.2\% \sim 0.35\%$ 时,石墨形态以片状石墨为特征;当 $W_{VA}=0.35\% \sim 0.4\%$ 时,石墨形态由片状石墨+蠕虫状石墨+球状石墨组成;当 $W_{VA}=0.4\% \sim 0.9\%$ 时,石墨形态由蠕虫状石墨+球状石墨组成;当 $W_{VA}=1.1\%$ 时,石墨形态为球状石墨。可见,当低镧镁硅铁蠕化剂加入量控制在0.4%~0.9%范围内时,可以获得蠕化率为50%~80%的蠕墨铸铁组织,基体中珠光体数量在30%~45%之间,所得蠕墨铸铁的抗拉强度高达385~463 MPa,伸长率在4.76%~9.29%范围,合金硬度在HBW167~196之间。并且,在合金中未发现自由渗碳体、莱氏体等硬质相。因此,对于常规工业铸铁,采用低镧镁硅铁蠕化剂,可以获得力学性能优良的蠕墨铸铁材质。

表3 定量金相及力学性能测试结果

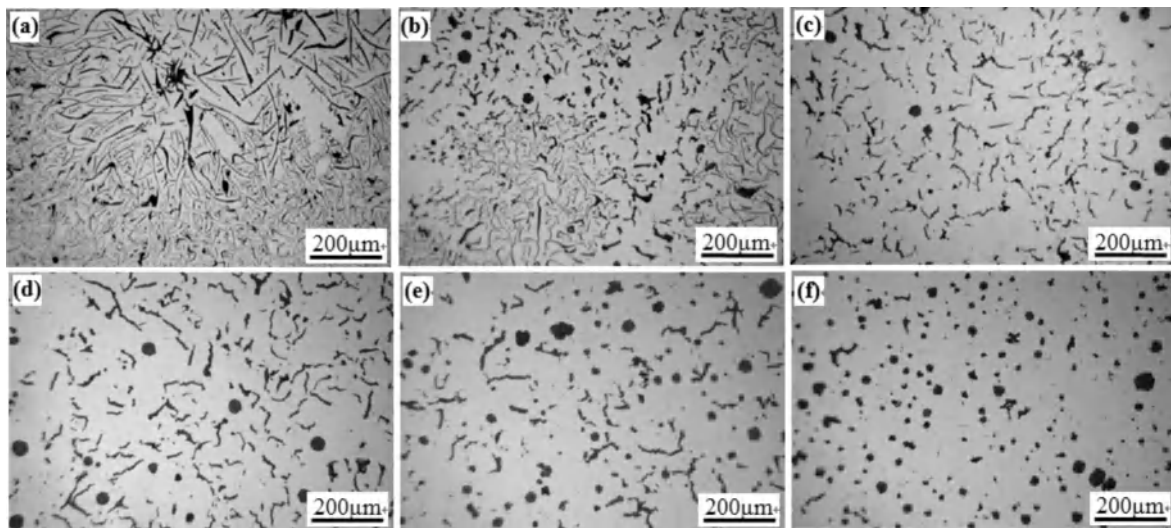
Table 3 Test results of quantitative metallography and mechanical properties of the experimental alloys

组号	$W_{VA}/\%$	金相组织		力学性能		
		石墨形态	基体组织	抗拉强度/MPa	伸长率 $\delta/\%$	硬度HBW
1	0.20	片状	10%珠光体+铁素体	77	2.14	123
2	0.30	片状	10%珠光体+铁素体	131	1.29	126
3	0.35	片状	20%珠光体+铁素体	129	1.43	124
4	0.38	50%蠕+45%片+5%球	30%珠光体+铁素体	169	1.57	156
5	0.40	80%蠕	30%珠光体+铁素体	385	4.76	167
6	0.60	75%蠕	40%珠光体+铁素体	388	5.24	179
7	0.90	50%蠕	45%珠光体+铁素体	463	9.29	196
8	1.10	5%蠕	40%珠光体+铁素体	495	19.05	196

## 2.2 片墨-蠕墨-球墨组织演变规律

图2为不同蠕化剂加入量对应的铸铁中石墨的生长形貌。图中可见,当蠕化剂加入量为0.35%时,石墨形态为片状石墨,而且以A型石墨为主,试样边缘还存在少量的D、E型石墨,石墨析出数量较多、长短与粗细不一、端部尖锐且呈无方向性分布,如图2a所示;待蠕化剂加入量增加至0.38%时,组织中出现了50%蠕墨+45%片墨+5%球墨的混合石墨,少量球状石墨与蠕墨伴生生长,存在于蠕墨群簇的交汇处,蠕墨形态细小,甚至呈短棒状,如图2b所示;当蠕化剂加入量达到0.4%时,石墨形态以弯曲状、均匀分布的蠕虫状石墨为特征,少量离散分布的石墨球点缀其间,蠕化率

达到80%,蠕墨头部圆钝,侧面不甚光滑,与 $W_{VA}=0.38\%$ 时的蠕墨相比,形态明显长大,如图2c所示;当蠕化剂加入量增至0.6%时,石墨形态仍以蠕虫状石墨为主要特征,石墨头部变得更加圆钝,长度、厚度均有所增长,但蠕墨数量有所下降,蠕化率降为75%,并且有少量球墨离散地分布于蠕墨间,球墨数量有所增加,如图2d所示;当蠕化剂加入量增大至0.9%时,蠕化率下降至50%左右,蠕墨形态变得短而厚,球状石墨的数量急剧增多,同时出现了尺寸较大的畸变石墨球,如图2e所示;当蠕化剂加入量进一步增大至1.1%时,形成几乎全部的球状石墨,蠕虫状石墨基本消失,球化率达90%以上,如图2f所示。



(a)  $W_{VA}=0.35\%$ ; (b)  $W_{VA}=0.38\%$ ; (c)  $W_{VA}=0.4\%$ ; (d)  $W_{VA}=0.6\%$ ; (e)  $W_{VA}=0.9\%$ ; (f)  $W_{VA}=1.1\%$

图2 不同蠕化剂加入量下铸铁中石墨的生长形貌

Fig. 2 Morphology of graphite in cast iron with different additions of vermicularizing agent

## 2.3 片墨/蠕墨临界转变点及适宜蠕化剂加入量

图3为铸铁蠕化率随蠕化剂加入量的变化。从图3可以看出,当蠕化剂加入量由0.35%增加至0.4%时,蠕化率由0(即全部片状石墨组织)“突变”至80%,亦即,石墨形态由片墨向蠕墨的转变发生在这一尤为狭窄的区间之内,故将 $W_{VA}=0.35\% \sim 0.4\%$ 称为“片墨-蠕墨临界转变范围”,其中 $W_{VA}=0.38\%$ 对应的“50%蠕墨

+45%片墨+5%球墨”混合组织为灰铁向蠕铁转变的临界转变组织,因此可将 $W_{VA}=0.38\%$ 可看做“临界转变点”。这预示着,在蠕铁生产中,应尽量避免采用离“临界转变点”过近的蠕化剂加入量,否则极易得到片状石墨铸铁。此外,从图3还可以看出,当蠕化剂加入量大于0.4%时,随着蠕化剂加入量的增加,蠕化率逐渐降低,而球化率则相反。由此可见,随蠕化剂加入

量的不断增加, 不仅存在一个片墨→蠕墨临界转变点, 而且还存在一个适宜的蠕化剂加入量范围, 在本试验条件下, 适宜的加入量范围为0.4%~0.9%。

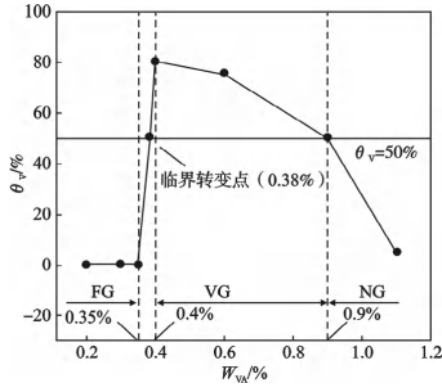
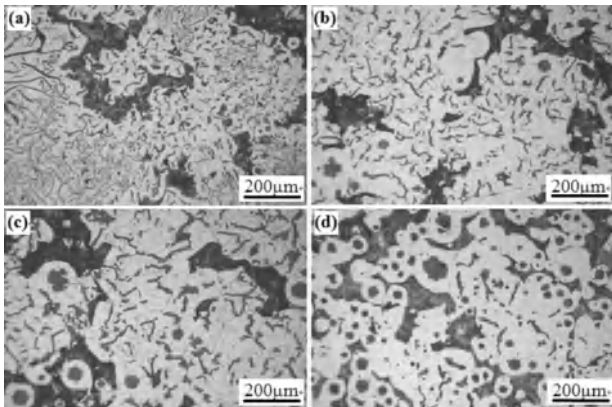


图3 铸铁蠕化率随蠕化剂加入量的变化

Fig. 3 Variation of vermicularity in cast iron with the addition amount of vermicularizing agent

### 2.4 蠕铁基体组织与蠕化剂加入量的相关性

图4为不同蠕化剂加入量对应的铸铁基体组织。由图中可以看出, 当蠕化剂加入量为0.38%时, 即在“临界转变点”时, 珠光体数量较少, 仅占基体组织的30%, 并且主要分布于蠕墨、球墨出现的区域; 当蠕化剂加入量增加至0.4%时, 珠光体数量变化不大, 在石墨周围形成了为数较多的铁素体; 当蠕化剂加入量增加至0.6%时, 珠光体数量增至40%, 并且, 距石墨球较近区域的珠光体数量明显高于其他区域; 当蠕化剂加入量进一步增大至0.9%时, 珠光体数量继续上升至45%, 而且主要分布于牛眼石墨周围。可见, 随蠕化剂加入量的增大, 珠光体数量呈现增多的趋势。由于蠕墨尺寸细小, 分枝较多, 便于碳原子的短程扩散, 因此珠光体主要分布于球墨/奥氏体共晶团外围及蠕墨共晶团边界处。



(a)  $W_{VA}=0.38\%$ ; (b)  $W_{VA}=0.4\%$ ;  
(c)  $W_{VA}=0.6\%$ ; (d)  $W_{VA}=0.9\%$

图4 不同蠕化剂加入量下铸铁的基体组织

Fig. 4 Matrix microstructure of cast iron with different additions of vermicularizing agent

### 2.5 S、Mg、La残量随蠕化剂加入量的变化

在蠕铁生产中, 原铁液的含硫量对蠕化处理效果有着显著的影响<sup>[1]</sup>。图5为不同蠕化剂加入量下铁液蠕化前后铸铁中硫含量的变化。可以看出, 蠕化处理前原铁液硫含量较低, 波动范围很小, 在0.017%~0.018%之间。经低镧镁硅铁蠕化剂处理后, 合金中的硫含量有所降低, 在0.013%~0.017%范围, 该含量范围包含了片墨和球墨铸铁, 其中, 蠕墨铸铁的 $S_{残}$ 量在0.013%~0.015%范围。这说明, 对蠕墨铸铁而言, 原铁液硫含量不宜过高, 以小于0.02%为宜, 否则, 不仅会消耗更多的蠕化剂, 增加生产成本, 还会降低蠕化率, 增大白口倾向。并且, 残硫量应控制在适当的水平, 推荐值在0.014%左右, 根据生产情况和材质要求可做适当的调整。

蠕化处理后, 合金中 $Mg_{残}$ 、 $La_{残}$ 量随蠕化剂加入量的变化如图6所示。从整体上看, 随着蠕化剂加入量增加, 合金中 $Mg_{残}$ 量和 $La_{残}$ 量也随之增大。可见, 当蠕化剂加入量在0.4%~0.9%范围时, 蠕铁中的残留镁量和残留镧量分别为0.011%~0.018%和0.007%~0.009%。相应地, 蠕铁的蠕化率在50%~85%范围, 试验获得的 $W_{Mg_{残}}/W_{S_{残}}=0.73 \sim 1.38$ ,  $W_{La_{残}}/W_{S_{残}}=0.47 \sim 0.69$ ,  $\Sigma W_{(Mg_{残}+La_{残})}/W_{S_{残}}=1.2 \sim 2.07$ 。

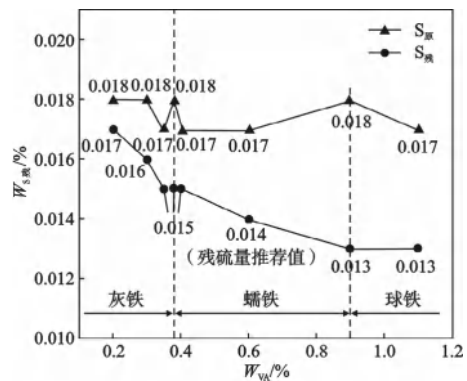


图5 不同蠕化剂加入量下铸铁蠕化前后硫含量的变化

Fig. 5 Variation of sulphur content in cast iron with different additions of vermicularizing agent before and after the vermicularizing treatment

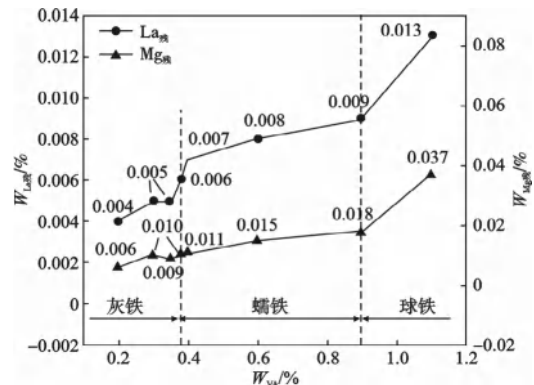


图6 蠕化剂加入量对铸铁中 $Mg_{残}$ 、 $La_{残}$ 量的影响

Fig. 6 Effect of the amount of vermicularizing agent on residual Mg and La contents in cast iron

## 2.6 蠕化剂加入量对蠕铁力学性能的影响

图7为蠕化剂加入量对蠕铁抗拉强度和伸长率的影响。由图可知,当蠕化剂加入量在“临界转变点”(W<sub>VA</sub>=0.38%)时,蠕化率较低,合金的伸长率仅1.57%,抗拉强度为169 MPa;而当蠕化剂加入量增加到0.4%时,蠕化率高达80%,蠕铁的抗拉强度剧增至385 MPa,伸长率也提升至4.76%。在临界转变点以上,随着蠕化剂加入量的增加,伴随着蠕化率的降低,球墨数量逐渐增多,蠕铁的抗拉强度和伸长率呈现缓慢升高的趋势。

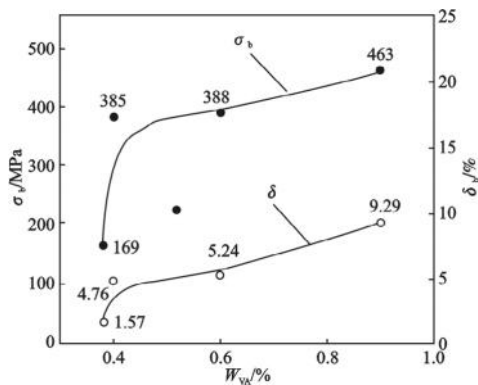


图7 蠕化剂加入量对蠕铁抗拉强度和伸长率的影响

Fig. 7 Effect of the amount of the vermicularizing agent on tensile strength and elongation of compacted graphite iron (CGI)

图8为蠕化剂加入量对蠕铁布氏硬度的影响。可见,蠕铁的布氏硬度值随着蠕化剂加入量的增大,逐渐呈现出上升的趋势。当蠕化剂加入量为0.38%时,硬度值为HBW156;当蠕化剂加入量增加至0.4%,硬度值小幅度提升至HBW167;在临界转变点之上,随着蠕化剂加入量由0.4%增加至0.9%,硬度值也随之逐渐提升至HBW196。这说明,蠕铁的硬度值与蠕化率关系不大,主要取决于基体组织。基体中珠光体数量的增多,使蠕铁硬度值增大。

图9为不同蠕化剂加入量下蠕铁的拉伸试棒断口形貌。由图可以看出,当蠕化剂加入量为0.38%时,断口显微形貌主要由位相不一、高低不同的解理面组成,且存在极少量的撕裂棱和韧窝,属于解理断裂。这是

由于显微组织中的石墨形态主要为片状,石墨边缘处应力集中很强烈,在较低的拉伸应力下沿石墨的边缘即可形成裂纹扩展,快速地进行脆性断裂,因而在断口处留下了河流花样、解理台阶、扇形解理面及少量珠光体层状解理面等解理断裂微观特征。此外,由于其中存在的韧性断口所占比例很小,因而伸长率很小。

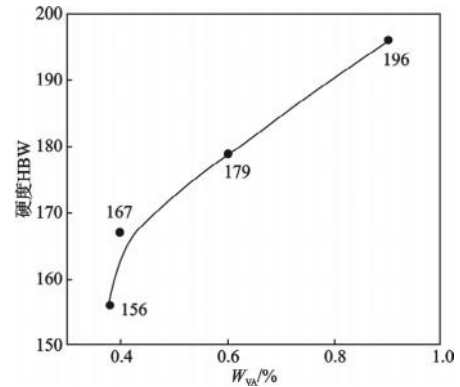
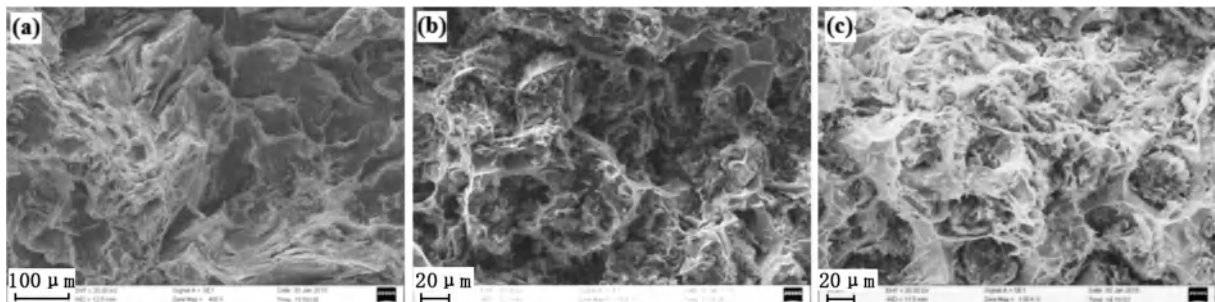


图8 蠕化剂加入量对蠕铁硬度的影响

Fig. 8 Effect of the amount of the vermicularizing agent on hardness of vermicular cast iron

当蠕化剂加入量为0.4%时,断裂主要发生在蠕虫状石墨聚集的区域,区域内密布大量形态小而浅的韧窝,在石墨与基体之间的界面存在大量明显的撕裂棱,此外还存在一定数量具有河流状花样的解理断裂断口,属于解理脆性断裂与韧性断裂的混合断裂机制。这说明蠕虫状石墨对基体依旧有一定程度的割裂作用,但远远小于片状石墨。当拉应力产生后,石墨与基体界面分离,产生了微裂纹,一方面部分基体被拉伸成韧窝状,形成撕裂棱,另一方面由于石墨的割裂作用,在裂纹扩展过程中由于应力集中超过了基体解理开裂需要的临界应力后,发生了解理断裂,留下解理台阶等解理断裂特征。此外,由于韧性断裂的出现,伸长率也有了较大幅度的提升。

当蠕化剂加入量为0.6%时,随着球状石墨的增多,在石墨聚集的区域,存在较多韧窝,周围出现了明显的撕裂棱。尤其是石墨球出现的地方,韧窝较深,分布较均匀而且形状较规则。在韧窝之间的区域还出现



(a) W<sub>VA</sub>=0.38%

(b) W<sub>VA</sub>=0.4%

(c) W<sub>VA</sub>=0.6%

图9 不同蠕化剂加入量下蠕铁试棒的拉伸断口

Fig. 9 Tensile fracture of vermicular cast iron with different additions of vermicularizing agent

了明显的解理台阶、河流花样及珠光体层状解理面等解理脆性断裂微观特征。其依然属于解理脆性断裂与韧性断裂的混合断裂机制。

综上所述,随着蠕化剂加入量的增加,拉伸断口形貌由解理断裂机制转变为解理脆性断裂与韧性断裂的混合断裂机制。蠕铁的拉伸断口形貌为:蠕墨聚集的区域内密布大量形态小而浅的韧窝,石墨与基体之间的界面存在大量明显的撕裂棱,基体区域具有明显解理台阶、河流花样等解理脆性断裂微观特征。

### 3 结论

(1) 低镧镁硅铁蠕化剂的适宜加入量范围较宽,当原铁液含硫量在0.017%~0.018%时,使用0.4%~0.9%的蠕化剂进行蠕化处理,可以获得蠕化率在50%~80%范围的蠕铁材质。

(2) 随着蠕化剂加入量的增加,铸铁中石墨形态经历片状石墨→蠕虫状石墨→球状石墨的转变,其中片状石墨向蠕虫状石墨的转变存在一个临界点,与之对应的蠕化剂加入量范围很窄,本试验条件下其值在0.35%~0.4%之间。

(3) 当蠕化剂加入量大于0.4%时,随着蠕化剂加入量的增多,铸铁蠕化率趋于减小,基体组织中珠光体数量趋于增多;同时,蠕铁的抗拉强度、伸长率及硬度明显增大。

#### 参考文献:

[1] Dawson S, Schroeder T. Practical applications for compacted graphite

iron [J]. Transactions of the American Foundry Society & the One Hundredth Annual Metalcasting Congress, 2004 (5): 1-9.

[2] Dawson Steve, SinterCast. Compacted graphite iron-A material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads [J]. China Foundry, 2009, 6 (3): 241-246.

[3] 张忠仇,李克锐,曾艺成.我国蠕墨铸铁的现状与展望[J].铸造,2012,61(11):1303-1307.

[4] Stefanescu D M. Compacted graphite iron [M]. ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Iron, Steel, and High Performance Alloys, 1990: 667-677.

[5] 黄惠松,盛达,曾大本,等.蠕墨铸铁[M].北京:清华大学出版社,1982.

[6] 邱汉泉.蠕墨铸铁及其生产技术[M].北京:化学工业出版社,2010.

[7] Shen Z, Tang Y, Jiang B, et al. The vermiculizing effects of individual rare earth elements La, Ce, Pr and Nd on graphite in cast iron [M]. New Frontiers in Rare Earth Science and Applications. 1985.

[8] Stefanescu D M, Voigt R C, Jr C R L. The importance of lanthanum/rare earth ratio in the production of compacted/vermicular graphite cast iron [J]. Transactions of the American Foundry Society, 1981, 89: 119-130.

[9] 盛达,王刚.用镧金属和镧硅铁合金制取蠕墨铸铁的研究[J].稀土,1992(3):16-19.

[10] 张伯明.铸造手册:铸铁[M].北京:机械工业出版社,2011.

[11] Riposan I, Chisamera M, Romania R, et al. Magnesium-sulfur relationships in ductile and compacted graphite cast irons as influenced by late sulfur additions [J]. AFS Transactions, 2003, 93 (1): 1-15.

(编辑:刘冬梅,ldm@foundryworld.com)

(选自《铸造》2018年第9期)