

# 干式缸体炉前蠕化处理工艺及其力学性能

吴和保<sup>1</sup>,张亚平<sup>1</sup>,夏志全<sup>2</sup>,蔡安克<sup>3</sup>,樊自田<sup>4</sup>,董选普<sup>4</sup>

(1. 武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205;

2. 武汉钢铁公司钢铁研究院,湖北 武汉 430083;

3. 中国一拖集团有限公司工艺材料研究所,湖北 洛阳 471003;

4. 华中科技大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430056)

**摘要:**为了满足“东方红100”系列柴油机蠕墨铸铁缸体生产的技术要求,通过采用自行研制的新型蠕化剂和蠕化工艺,炉铁液浇注阶梯试样和Y型试样,分别测定蠕墨铸铁的机械性能和石墨形态,分析了不同工艺条件下蠕墨铸铁的蠕化处理效果、化学成分与机械性能之间的关系。研究表明,当蠕化剂加入量在1.0%~1.6%时,残余镁的质量分数为0.018%~0.025%,残余稀土的质量分数为0.035%~0.069%,蠕化率能达到50%~80%;蠕虫状石墨分布均匀,抗拉强度达到了380~420 MPa,铸造性能优良,为柴油发动机缸体稳定生产奠定了理论基础。

**关键词:**蠕化剂;石墨形态;蠕墨铸铁;缸体;柴油发动机

**中图分类号:** TG113

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2014.02.008

## 0 引言

在我国基础设施建设和物流行业快速发展的大背景下,大功率载重车、工程机械和农业机械保有量不断增加,发动机气缸体与气缸盖的工作温度越来越高,传统灰铸铁HT250合金材料已不能满足大功率柴油机的性能要求,发动机工作可靠性、合金材料的抗拉强度、疲劳强度、耐热性能和抗高温蠕变性很难保证,开发高强度、高耐热性、高抗蠕变性的合金铸铁成为开发大功率柴油发动机的必备条件<sup>[1-2]</sup>。

蠕墨铸铁是一种珠光体基体组织上均匀分布着蠕虫状石墨的铸铁合金材料,具有强度高,传热系数高,抗高温蠕变性能好和良好铸造工艺性能,对于改进大功率柴油发动机使用性能具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。但是,蠕墨铸铁生产过程中蠕化处理工艺不易控制,蠕化处理不足会形成粗大的片状石墨,蠕化处理过量则形成球状石墨,使铸件凝固时产生大量的缩孔缩松缺陷,导热性能和抗高温蠕变性能恶化<sup>[5-7]</sup>。本文在实验研究的基础上,结合中国一拖集团有限公司“东方红100”系列柴油发动机缸体的结构特点,采用自制新型蠕化剂对铁液

进行冲入法蠕化处理,并浇注“东方红100”系列柴油发动机缸体铸件,探索蠕化处理工艺与石墨形态、力学性能之间的相互关系,为大功率柴油发动机缸体蠕墨铸铁合金材料的应用奠定良好的技术基础。

## 1 实验方案

### 1.1 铁液化学成分的确

根据新型蠕化剂的性能特点和“东方红100”系列柴油机缸体的结构特点,化学成分设计需要充分考虑到铁液凝固过程的收缩特点和性能要求,既要避免白口倾向,又要减少石墨粗大带来的性能降低的风险。浇注缸体铸件的原铁液的基本化学成分的质量分数为:3.80%~4.20% C, 1.70%~1.85% Si,  $\leq 0.5\%$  Mn,  $\leq 0.06\%$  P, 0.07% S。同时为了强化基体组织,合金中加入0.5% Cu,从而获得足够多的细小珠光体组织和较高的抗拉强度。

### 1.2 蠕化剂的选用

根据现有实验条件,本实验在中国一拖集团有限公司的工艺材料研究所进行的,蠕化剂采用课题组研制的新型蠕化剂,该化学成分如表1所示。

收稿日期:2013-11-21

作者简介:吴和保(1963-),男,湖北麻城人,教授,博士。研究方向:金属凝固理论及其数值模拟、金属表面处理与防护、液态金属精确成型、金属雾化制粉、材料自动化检测与控制。

表 1 新型蠕化剂的主要成分

Table 1 The main composition of new vermicular agent %

蠕化剂	主要成分的质量分数						
	Re	Mg	Ca	Cu	Zn	Cr	Si
Rut-1	15~24	2~6	3~6	2~6	2~6	1~2	少量

### 1.3 铁液熔炼方法和蠕化处理工艺

实验采用 500 kg 中频感应电炉熔炼,原铁液化学成分按照设计成分配料.熔化出炉温度控制在 1 500~1 550 °C,冲入法处理,蠕化处理温度为 1 460~1 500 °C 之间,浇注温度控制在 1 380~1 420 °C.浇注前,浇注三角试片判断蠕化效果,合格铁液分别浇注阶梯试样、Y 型试样和“东方红 100”缸体.Y 型试样测定机械性能、阶梯试样和缸体解剖后检测蠕墨铸铁的断面敏感性和石墨形态.

## 2 实验结果及分析

### 2.1 残余 Mg 和残余 Re 的质量分数对蠕化效果的影响

根据蠕墨铸铁炉前处理工艺,残余 Mg 的质量分数和残余 Re 的质量分数是关系到蠕化效果和石墨形态的关键参数,本实验对每炉次浇注的

Y 型试样、阶梯试样和缸体进行化学分析和显微组织的检测,探索蠕化处理后的残余 Mg 和残余 Re 的质量分数与蠕墨铸铁的蠕化率、石墨形态、力学性能之间的相互关系.

表 2 列举了本次实验中的 8 组典型实验数据,当蠕化剂的加入量为 0.5%~2.0%,检测得到的残余 Mg 和残余 Re 的质量分数分别为:0.008%~0.032%、0.029%~0.127%.石墨形态分析的结果显示,随着蠕化剂加入量的增加,残余 Mg 和残余 Re 都有一定程度的增加,但残余 Mg 的质量分数相对较少,而稀土残余量普遍较高,其主要原因是 Mg 元素较为活泼,大量 Mg 与铁液中的氧、硫等元素反应而进入炉渣.Mg、Re 的增加使铸铁合金的石墨形态逐步由片状石墨转变成蠕虫状石墨.当蠕墨铸铁的残余 Mg 的质量分数在 0.015%~0.025% 之间,残余 Re 的质量分数在 0.031%~0.098% 之间时,都可以获得比较好的蠕化效果,过低就得不到蠕虫状石墨,并且可能出现片状石墨;过高就会使蠕化率降低,从而出现大量球状石墨.从中不难看出,形成蠕虫状石墨的关键元素是 Mg,而 Re 对蠕虫状石墨的影响相对较小,形成蠕虫状石墨的 Re 含量范围较宽.

表 2 蠕墨铸铁的化学成分及对石墨形态的影响

Table 2 The test results of chemical composition of compacted cast iron

实验 编号	蠕化剂加入量 体积分数/%	主要化学成分的质量分数/%						蠕虫状石墨 数量/%
		C	Si	Mn	S	Mg	Re	
1	0.5	3.82	1.87	0.43	0.066	0.008	0.019	0
2	0.8	3.87	1.92	0.51	0.059	0.12	0.031	45
3	1.0	3.92	1.97	0.41	0.056	0.015	0.035	75
4	1.2	3.85	2.09	0.37	0.068	0.020	0.038	85
5	1.4	3.77	2.11	0.30	0.071	0.018	0.043	85
6	1.6	3.97	1.95	0.45	0.061	0.019	0.063	80
7	1.8	3.78	2.23	0.42	0.063	0.025	0.098	55
8	2.0	3.71	2.38	0.35	0.069	0.032	0.127	35

### 2.2 不同壁厚铸件蠕化率及机械性能受到蠕化剂加入量的影响分析

在实验过程中,每炉铁液都浇注 Y 型试样和阶梯试样,分别测定蠕墨铸铁的布氏硬度、抗拉强度和石墨形态,图 1 是采用蠕墨铸铁浇注的“东方红 100”缸体铸件结构及其石墨组织和布氏硬度取样点示意图,检测结果如表 3 所示.

实验的结果表明,当蠕化剂的加入量控制在 0.8%~1.8% 之间时,无论是壁厚比较薄(8 mm)处还是壁厚比较厚的地方(40 mm)都能获得较好的蠕化效果,蠕化率均可以达到 50% 以上,抗拉强度都可以在 284~419 MPa 之间,充分说明所研制

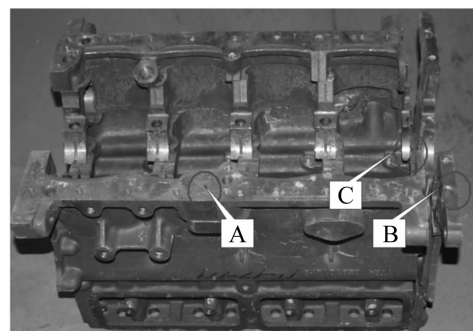


图 1 柴油发动机缸体微观组织分析出样示意图

Fig. 1 The sampling schematic diagram analysis of diesel engine cylinder microstructure

注:A 处壁厚 45 mm;B 处壁厚 20 mm;C 处壁厚 8 mm

表 3 蠕墨铸铁的石墨形态和力学性能

Table 3 Graphite morphology and mechanical properties of CGI iron

实验 编号	蠕化剂加入量的 体积分数/%	不同壁厚处缸体的石墨形态			力学性能	
		40 mm	20 mm	8 mm	$\delta_b$ /MPa	HBS
1	0.5	片状	片状	片状	169	158
2	0.8	蠕 45	蠕 85	蠕 75	284	187
3	1.0	蠕 85	蠕 85	蠕 75	369	158
4	1.2	蠕 85	蠕 85	蠕 75	384	187
5	1.4	蠕 80	蠕 75	蠕 55	397	193
6	1.6	蠕 75	蠕 65	蠕 55	405	179
7	1.8	蠕 35	蠕 15	蠕 10	459	183
8	2.0	蠕 25	蠕 10	蠕 5	527	180

的新型蠕化剂具有较稳定的蠕化处理效果,断面敏感性较低,能满足形状复杂缸体蠕墨铸铁的质量要求.但是,当蠕化剂加入量不足时,石墨形态则为粗大的片状石墨,抗拉强度只有 169 MPa,远低于普通灰铸铁的抗拉强度.这主要是因为蠕墨铸铁炉前处理时,加入了大量的蠕化剂,使合金的含碳量和含硅量大大高于灰铸铁,而形成粗大的片状石墨,割裂了基体组织,从而使抗拉强度明显下降.同时,当蠕化剂加入量达到 2.0%以上时,蠕化率下降明显,球状石墨增加,抗拉强度显著增加,形成了球墨铸铁合金材料.虽然增加蠕化剂加入量能提高抗拉强度,但是,由于球墨铸铁凝固时为体积凝固,容易形成大量的微观缩孔,达不到缸体类铸件的质量要求,也会降低合金材料的导热性能和抗高温蠕变性能,难以满足大功率柴油发动机工作性能的要求<sup>[8-11]</sup>.因此,为了使铸铁合金干式柴油机缸体具有良好的力学性能、物理性能及工艺性能,蠕化剂加入量的最佳范围为 1.0%~1.6%.

### 3 结 语

a. 缸体蠕墨铸铁炉前处理时,随着蠕化剂加入量的增加,镁和稀土的残余量也随之增加,其中影响蠕化效果的关键元素是残余 Mg 的质量分数,应控制在 0.018%~0.025%之间.

b. 稀土元素 Re 的残余量的控制范围相对 Mg 的残余量要宽一些,一般在 0.035%~0.069%,而且对于原铁液硫含量较高时,适当增加稀土 Re 的含量有利于蠕墨铸铁性能的稳定.

c. 根据缸体结构特征研制的新型蠕化剂蠕化处理效果稳定可靠,当蠕化剂的加入量在 1.0%~1.6%时可以稳定得到 50%~80%蠕化率的蠕墨铸铁,且壁厚敏感性较小,蠕化剂的加入范围

较宽.

d. 采用蠕墨铸铁生产柴油机缸体铸件需严格控制铁液的化学成分,碳、硅的质量分数分别应控制在 3.70%~3.90%C,2.20%~2.40%Si 之间,以确保获得良好蠕化效果的同时,铸件也具有较好的充型性能.

### 致 谢

本研究是在中国一拖集团有限公司工艺材料研究所完成实验和数据采集,并在华中科技大学材料科学与工程学院完成数据分析计算,在此表示衷心的感谢!

### 参考文献:

- [1] 杨永录,赵志康,朱玉乐,等.蠕墨铸铁缸体试验研究[J].现代铸铁,2006(1):66-68.  
YANG Yong-lu,ZHAO Zhi-kang,ZHU Yu-le,et al. Development of vermicular iron cylinder block[J]. Modern Cast Iron,2006(1):66-68. (in Chinese)
- [2] Guesser W,Schroeder T,Dawson S. Production experience with compacted graphite iron automotive components[J]. AFS Transactions,2001(71): 1211-1216.
- [3] Dawson S,Schroeder T. Practical applications for compacted graphite iron[J]. AFS Transactions,2004(47):129-127.
- [4] 陈位铭,金胜灿.蠕墨铸铁 CA6110 柴油机缸体的试验研究[J].铸造技术,2006,27(4):341-343.  
CHEN Wei-ming,JIN Sheng-can. Experimental study on compacted graphite iron CA6110 diesel engine cylinder block[J]. Foundry Technology,2006,27(4): 341-343. (in Chinese)
- [5] Geier G F, Bauer W, McKay B J P. Schumacher Microstructure transition from lamellar to compacted graphite using different modification agents[J]. Materials Science and Engineering A,2005(413-414):

- 339-345.
- [6] 邱汉泉,陈正德. 中国蠕墨铸铁 40 年(二)[J]. 中国铸造技术及装备,2006(2):2-7.
- QIU Han-quan, CHEN Zheng-de. The 40 years of vermicular graphite cast Iron in China [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2006(2):2-7. (in Chinese)
- [7] 李炳华,杜欣. 蠕墨铸铁在柴油机部件上的应用[J]. 现代铸铁. 2007(3):68-71.
- LI Bing-hua, DU Xin. The application of vermicular iron in diesel engine parts[J]. Modern Cast Iron, 2007(3):68-71. (in Chinese)
- [8] 吴和保,李晓薇,龙玉阳,等. 人工神经网络快速预测蠕墨铸铁的性能[J]. 武汉工程大学学报. 2013, 35(10):63-67.
- WU He-bao, LI Xiao-wei, LONG Yu-yang et al. Fast prediction of vermicular graphite cast iron property based on back propagation neural network[J]. Wuhan Institute of Technology, 2013, 35(10): 63-67. (in Chinese)
- [9] 刘文曾,郭亚辉,蔡安克,等. 缸体用蠕墨铸铁生产工艺的研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2009(6):37-39.
- LIU Wen-zeng, GUO Ya-hui, CAI An-ke, et al. A study of vermicular graphite cast Iron technology to produce cylinder block[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2009(6):37-39. (in Chinese)
- [10] 蔡安克,吴和保,范随长,等. 新型蠕化剂加入量对柴油发动机缸体材料蠕墨铸铁的组织与性能的影响[J]. 中国机械工程, 2010(7):868-871.
- CAI An-ke, Wu He-bao, FAN Sui-chang, et al. Effect of new vermicular agent on macrostructure and properties of compacted graphite iron for diesel engine cylinder block[J]. China Mechanical Engineering, 2010(7):868-871. (in Chinese)
- [11] 吴和保,柯超,竺东杰,等. 实时温度测控系统在材料浓缩提取技术上的应用[J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(1):63-68.
- WU He-bao, KE Chao, ZHU Dong-jie, et al. Temperature control system in material concentrated extraction technology of application[J]. Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(1): 63-68. (in Chinese)

## Furnace front vermicularizing treating process and mechanical properties of dry-type cylinder block

WU He-bao<sup>1</sup>, ZHANG Ya-ping<sup>1</sup>, XIA Zhi-quan<sup>2</sup>, CAI An-ke<sup>3</sup>, FAN Zi-tian<sup>4</sup>, DONG Xuan-pu<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Wuhan Iron and Steel Corporation Steel Research Institute, Wuhan 430083, China;

3. Technology and Material Research Institute of Yi-Tuo Group Co., Ltd., Luoyang 471003, China;

4. College of Materials Science and Engineering of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430056, China)

**Abstract:** To meet the technical requirement of the production of diesel engine cylinder block "Dongfanghong 100" series, a series experiments were conducted by self-made vermicular agent and new vermicularizing treating process. The step samples and Y-block were poured for mechanical properties test and the graphite morphology observation. The relations between vermicularizing effect, chemical composition and mechanical properties were analyzed in different process. The results indicate that 50%—80% vermicular graphite with 0.018%—0.025% magnesium and 0.035%—0.069% rare-earth element remains can be obtained by crushing 1.0%—1.6% self-made vermicular agent; then even distribution of compacted graphite, 380—420 MPa tensile strength and excellent casting performance also can be achieved in this method, which provides theoretical principle to the successful production of compacted graphite iron.

**Key words:** vermicular agent; graphite morphology; compacted graphite iron; cylinder block; diesel engine

本文编辑:陈小平