

# 一种高强度蠕铁缸体的试制

吴豪琼<sup>1</sup>, 张智源<sup>2</sup>

(1. 河南工学院机械工程学院, 河南新乡 453000; 2. 河南工学院材料科学与工程学院, 河南新乡 453000)

**摘要:** 通过蠕铁材料试验, 找到了蠕化剂和合金的合理加入范围, 保证蠕化率可以在85%左右, 抗拉强度达到RT450。采用快速铸造的方式开展蠕铁缸体的试制, 经解剖分析, 蠕铁缸体本体的蠕化率在80%~90%, 抗拉强度大于450 MPa。

**关键词:** 蠕铁缸体; 蠕化率; 力学性能; RT450

随着国内发动机排放标准的提高以及大功率发动机的需求, 传统灰铸铁缸体已经不能满足使用要求。蠕墨铸铁同灰铁相比, 其石墨长度较短而厚, 端部较圆, 长厚比在10以下且表面粗糙, 较圆的端部能抑制裂纹的发生和扩展, 粗糙的表面能限制石墨的脱离, 抗拉强度提高至少70%, 弹性模量提高35%, 而疲劳强度提高近一倍。同时蠕墨铸铁发动机可以减轻发动机的重量10%~15%, 最多可达29.4%<sup>[1-2]</sup>。因此蠕墨铸铁因其优良的力学性能、耐热疲劳性能, 将成为发动机缸体材料的一个重要选择2。

目前, 缸体类铸件仍然绝大部分沿用高强灰铸铁材质, 随着灰铁牌号的提高, 产品存在许多问题, 如渗漏、性能不稳定、成本增加等。国外早在20世纪70年代就把蠕墨铸铁用于制造发动机, 福特、欧宝、宝马、克莱斯勒等著名汽车厂商都将蠕墨铸铁缸体在汽车发动机上应用<sup>[3]</sup>, 国内一汽、重汽等主机厂都已经开始大批量生产蠕铁缸体, 并在发动机上得到很好的应用。据报道, 一汽从2020年开始每年提供20多万件蠕铁缸体。

本文主要针对某非道路柴油机开展材料试验, 旨在找到在一定S含量条件下, 能够达到缸体蠕化率的蠕化剂加入量, 以及合适的合金加入量, 从而达到缸体的力学性能需求, 同时采取快速铸造的方式在缸体上进行试制。

## 1 材料试验

### 1.1 试验条件及试验方案

试验采用500 kg中频感应电炉熔炼, 冲入法蠕化处理工艺, 蠕化剂为自制, 具体成分见表1。蠕化包的容量约70~80 kg, 为了提高吸收率, 保证蠕化效果, 每包处理铁液约60 kg, 一炉处理9包。试验通过检测蠕化率、珠光体含量、力学性能和成分等, 对一定S含量条件下蠕化剂的适宜加入范围进行研究。

表1 蠕化剂的成分  
Table 1 Composition of vermicular agent

	Mg	RE	Ca	Si	MgO
	2	17.2	4.2	43.2	0.8

#### 作者简介:

吴豪琼(1986-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事特种加工工作。E-mail: 491192291@qq.com

中图分类号: TG253

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)10-1285-04

#### 基金项目:

河南省科技攻关项目(212102210367, 222102220026); 河南省高校重点科研项目计划(22B460004)。

#### 收稿日期:

2022-03-17 收到初稿,  
2022-05-19 收到修订稿。

炉料按照表2称重。试验时每包浇注Y型试块（Y型试块按照国标GB/T26655—2011制作）2块、成分样1块、快速金相样2块（首末各一块）。为了保证试验的成功率，前三包蠕化剂分别按预定的低、中、高三种加入量加入，处理完后检查浇注的 $\Phi 12$  mm圆柱试样蠕化率，发现其蠕化率太低（几乎呈球铁状），为了保证较高的蠕化率，将蠕化剂的加入量适当减少，第四包到第六包蠕化剂按0.7%（0.42 kg）加入，第七包到第九包蠕化剂按0.6%（0.36 kg）加入。试验方案如表3所示。实际炉前加入量及浇注温度等试验数据如表4所示。

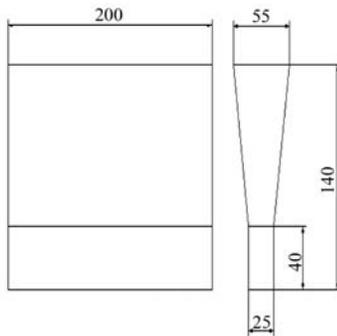


图1 Y-shaped型试块  
Fig. 1 Y-shaped test block

表2 炉料配比  
Table 2 Charge ratio

炉料	加入量/kg
废钢	50
生铁Z14	450

表3 试验方案  
Table 3 Experimental scheme

包次	蠕化剂/%	Cu/%	Sn/%	孕育剂/%
1	0.8	0.5	0.04	0.6
2	1.0	0.5	0.06	0.6
3	1.2	0.5	0.09	0.6
4	0.7	0.7	0.04	0.6
5	0.7	0.7	0.06	0.6
6	0.7	0.7	0.09	0.6
7	0.6	0.9	0.04	0.6
8	0.6	0.9	0.06	0.6
9	0.6	0.9	0.09	0.6

## 1.2 试验结果与分析

试验结束后首先检查了各包所浇的圆柱试样的宏观断口特征，发现第1~3、5、6包断口特征与球铁相似，其余包次圆柱试样的宏观断口为蠕铁断口特征，

表4 试验数据  
Table 4 Experimental data

项目	包次								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
出铁量/kg	62	62	59	68	62	64	60	59	67
蠕化剂量/kg	0.48	0.6	0.72	0.42	0.42	0.42	0.36	0.36	0.36
蠕化剂量比例/%	0.77	0.97	1.22	0.62	0.68	0.66	0.6	0.61	0.54
孕育剂量/kg	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
Cu/kg	0.3	0.3	0.3	0.42	0.42	0.42	0.54	0.54	0.54
Sn/kg	0.024	0.036	0.054	0.024	0.036	0.054	0.024	0.036	0.054
Y型试块编号	1-1	2-1	3-1	4-1	5-1	6-1	7-1	8-1	9-1
	1-2	2-2	3-2	4-2	5-2	6-2	7-2	8-2	9-2

故选择性地对第4、7、8、9包的力学性能、金相和成分进行检测，其全部检测结果如表5所示，金相照片如图2所示。

(1) 由图2所示，在含硫量一定的情况下，随着蠕化剂加入量的减少，蠕化率有所增加，当蠕化剂加入量为0.54%时（第9包），其蠕化率太高（95%），有出现片状石墨倾向（图2d）；随着蠕化剂量的增加，当蠕化剂加入量为0.62%时，蠕化率达到85%，蠕化效果良好（如图2a）。国标GB/T26655—2011中明确提出，蠕墨铸铁应在其二维抛光平面上至少有80%的蠕虫状石墨，故可以得到初步结论：当硫含量在0.03%左右时，蠕化剂的合理加入范围应在0.55%~0.65%。

(2) Sn的作用可看作为Cu的10倍，则Cu、Sn综合含量最低包次（第4包和第7包）的珠光体含量及硬度仍然较高，试验结果表明Cu、Sn综合含量

表5 化学成分及力学性能  
Table 5 Chemical composition and mechanical properties

项目	包次								
	4	7	8	9					
化学成分/%	C	3.66							
	Si	1.31							
	Mn	0.32							
	S	0.028							
	Mg	0.009	0.009	0.008	0.007				
	RE	0.070	0.076	0.073	0.063				
	Cu	0.61	0.87	0.89	0.81				
	Sn	0.033	0.031	0.047	0.063				
	Cu+10Sn	0.94	1.18	1.36	1.44				
	力学性能	$R_m$ /MPa	540	530	475	483	461	522	361
$R_{0.2}$ /MPa		415	418	332	336	448	448	无	无
A/%		2.7	1.1	1.3	1.6	0.4	1.4	无	0.6
硬度HB		228	229	239	237	238	234	207	214

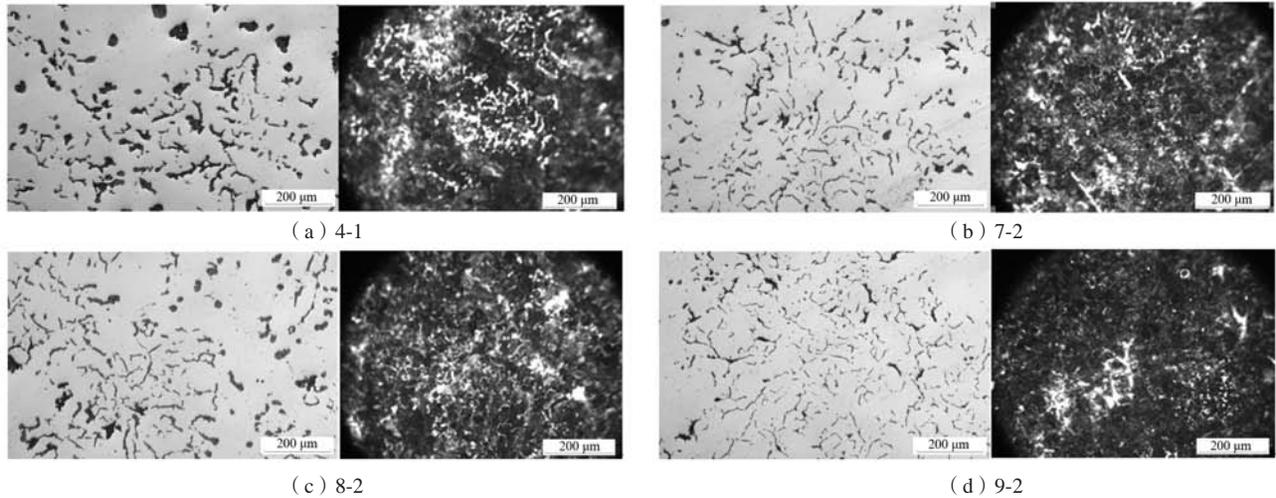


图2 金相组织

Fig. 2 Metallographic structure

(Cu+10Sn) 还应该降低, 即低于0.94%。

## 2 缸体制制

### 2.1 熔炼工艺的选择

根据材料试验结果, 制定了蠕铁缸体用化学成分, 见表6所示。出铁时采用500 kg球化包, 在包内依次加入0.6%的蠕化剂和0.6%的孕育剂(75硅铁), 并在上面覆盖一定量的铁屑。出铁温度控制在1 480~1 510 ℃, 浇注温度控制在1 380~1 420 ℃。

### 2.2 铸造工艺设计

蠕铁缸体的铸造工艺性与灰铁相近<sup>[4]</sup>, 故采用与灰铁缸体一样的平浇方案, 铸造工艺设计如图3所示。为了降低试制费用, 缩短试制周期, 采用3D打印技术开展蠕铁缸体的试制<sup>[5]</sup>, 将缸体的砂型分为以下几个部

分: 上盖板1块、侧板4块、下底板1块、缸筒芯4个、油道芯1个、水套芯1个、挺杆室芯1个。分型后的装配效果如图4所示。

### 2.3 缸体浇注与分析

缸体按照所设计铸造工艺进行砂型3D打印后, 用石墨涂料进行刷涂、烘干, 并进行装配、围箱, 按照熔炼工艺进行铁液的熔炼、炉前处理后, 进行浇注。待铸件冷却后, 对其进行解剖(图5), 未发现铸造缺陷。在缸体的轴瓦和缸筒处分别取样, 按照GB/T26655—2011, 制成 $d_0=10$  mm的标准试样, 对其金相和力学性能进行检测, 检测结果见表7和图7。

缸体本体力学性能满足RT450的要求, 且本体的蠕化率达到了80%以上, 完全可以满足高强度发动机缸体的需求。

表6 蠕铁缸体化学成分

Table 6 Chemical composition of vermicular iron cylinder

 $w_B / \%$ 

C	Si	Mn	S	P	Cu	Sn
3.6~3.9	2.1~2.4	≤0.5	0.03 ± 0.005	≤0.03	0.6~0.8	0.03~0.05

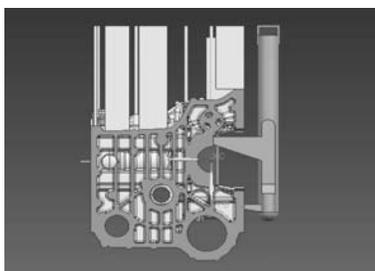


图3 铸造工艺

Fig. 3 Casting process

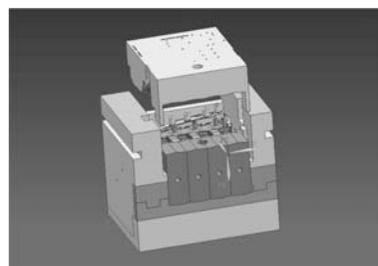


图4 装配效果图

Fig. 4 Assembly effect drawing

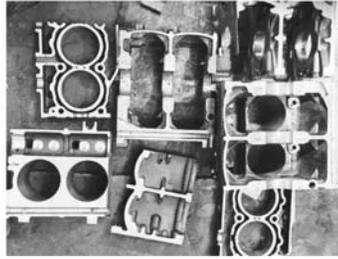


图5 缸体剖面  
Fig. 5 Cylinder section

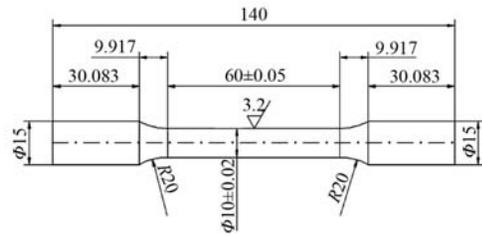
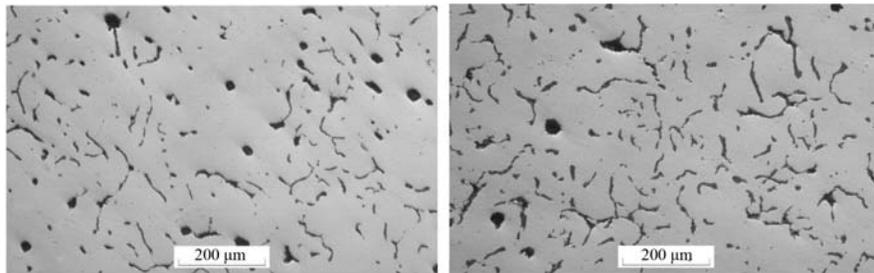


图6 本体试样  
Fig. 6 Body sample



(a) 缸筒蠕化率 (80%) (b) 轴瓦蠕化率 (90%)

图7 缸体本体蠕化率

Fig. 7 Vermicular rate of cylinder body

表7 缸体本体力学性能

Table 7 Mechanical properties of cylinder body

取样位置	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
轴瓦	487	388	1.1
缸筒	509	402	1.9

### 3 结束语

试制蠕铁缸体时,当硫含量在0.03%左右时,蠕化剂的合理加入范围应在0.55%~0.65%,缸体抗拉强度可以达到450 MPa,缸体的厚大部位法兰的蠕化率可以达到90%,较薄部位缸筒的蠕化率可以达到80%。缸体试制的成功为蠕铁缸体批量生产提供了一定的技术支持。

#### 参考文献:

- [1] 金晓春,刘金城,史蒂夫·道森.蠕墨铸铁发动机的优势及最新进展[C]//2013中国铸造活动周,济南,2013.
- [2] 史蒂夫·道森.蠕墨铸铁—现代发动机设计的材料[C]//中国铸造协会汽车铸件分会2012年会暨汽车轻量化铸造技术研讨会,烟台,2012.
- [3] 张伯明.蠕墨铸铁的最新发展[J].铸造,2014,53(5):341-344.
- [4] 徐掌印,姜银举.铸态高韧性蠕铁的研制[J].热加工工艺,2008(3):136-137.
- [5] 唐昆贵,李栋.3D打印技术在中速柴油机蠕墨铸铁缸盖上的应用[J].铸造,2015,64(12):1264-1266.

## Trial Production of a High Strength Vermicular Iron Cylinder

WU Hao-qiong<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-yuan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453000, Henan, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453000, Henan, China)

#### Abstract:

Through the test of vermicular iron material, this paper finds out the reasonable addition range of vermicular agent and alloy to ensure that the vermicular rate can be about 85% and the mechanical properties can reach RT450. The trial production of vermicular iron cylinder body is carried out by rapid casting. Through section analysis, the vermicular rate of vermicular iron cylinder body is 80% - 90% and the mechanical properties are more than 450 MPa.

#### Key words:

vermicular iron; vermicular rate; mechanical properties; RT450