

大功率内燃机车柴油机缸套材料及铸造工艺的研究

杨志刚, 肖恭林, 穆彦青, 张忠腾, 喻光远

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 大功率内燃机缸套作为发动机核心部件之一, 其性能直接影响着整机的使用。详细分析了化学成分、孕育剂种类和孕育处理方式对合金铸铁材料微观组织和力学性能的影响, 并借用MAGMA凝固数值模拟、中空型芯设计等方法对某缸套的铸造工艺进行了分析和优化。通过试验研究, 有效控制了合金铸铁材料的石墨形态和石墨长度, 解决了缩松、气孔质量问题, 最终生产出质量符合要求的铸件。

关键词: 内燃机缸套; 铸造工艺; 合金铸铁

某缸套应用于某大功率交流传动内燃机车, 作为发动机核心部件之一, 又是发动机中承受高温、高压工况比较恶劣的部件, 其性能直接影响着整机的大修周期与功率稳定, 因此优质铸件的研制至关重要。缸套材质为合金铸铁, 按照ASTM标准, 要求本体 $R_m \geq 280$ MPa, 本体硬度HBW 220~250, 基体组织珠光体 $\geq 90\%$, A型石墨, 石墨长度为4~5级。该缸套毛坯重量为180 kg, 壁厚差较大, 而铸件机加工后需要进行全表面磁粉探伤、关键部位射线探伤和车削剥层检验, 铸件内部不允许有缩松、缩孔和夹渣等铸造缺陷, 其结构如图1所示。

综上, 满足厚、薄壁位置基体组织的均匀性, 满足范围较窄的硬度要求, 确保厚大部位的石墨形态及石墨等级, 解决厚大水腔型芯的发气问题, 保证厚大部位组织的致密性, 是成功研制某缸套的难点。

1 材料制备工艺研究

1.1 化学成分

在铸铁熔炼中, 决定铸铁材质性能的关键点之一是碳的石墨形态与数量, 在以片状石墨为主的合金铸铁中, 微量元素的作用也尤为重要^[1]。本文研究的这种缸套局部位壁厚较大, 冷却条件相对较差, 而合金的铸铁金相组织、力学性能均受冷却条件的影响, 因此在成分选择时需综合考虑。

C、Si含量是影响灰铸铁性能和显微组织的主要元素。C、Si的增加, 促进石墨析出, 促使石墨片变粗、数量增多, 强度和硬度下降, 在成分设计时均取下限; Mo能使C曲线右移, 并使C曲线形成2个“鼻尖”的作用, 冷却的过程中容易获得贝氏体, Cr易使石墨钝化, 形成蝌蚪状石墨, 故在合金元素的选择上对Mo、Cr取下限; Mn、Cu对石墨形态的影响较小, 均为促进珠光体元素, 为确保力学性能, 均取上限。

在电炉熔炼合金铸铁时, S的作用在合金铸铁的生产中容易被人们忽视, 这是不正确的。S对合金铸铁的凝固呈现双重作用, 一方面, 硫与Mn、Sr、Ba等迅速形成硫化物, 为共晶石墨的成核提供基地, 增加共晶团数量; 另一方面, 硫作为表面活性元素, 富集在结晶前沿, 会抑制共晶团的生长, 增加共晶过冷度, 白口倾向增大。将含硫量控制在0.06%~0.12%, 可以增强孕育效果, 改善石墨形态, 对提高灰铸铁强度是有利的, 同时, 又能改善铸铁的机加工性能。主要化学成分的选择如表1所示。

作者简介:

杨志刚(1987-), 男, 技术主管, 研究方向为铸造材料与工艺。E-mail: yangzhigang1.qs@crrecgc.cc

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)07-0755-05

收稿日期:

2019-02-22 收到初稿,

2019-04-22 收到修稿。

1.2 孕育处理

孕育处理是高强度灰铸铁生产的重要环节。孕育的主要目的是：促进石墨化，减少白口倾向，改善断面均匀性，控制石墨形态，减少过冷石墨，获得细小的A型石墨^[2]，增加共晶团数，改善力学和其他性能^[3]。

由于孕育可显著提高共晶团数，有些工厂为了提高灰铸铁强度，认为孕育剂加入量越多越好，有的达到0.8%~1.2%。实际上这是一个错误的认识，经过大量实践验证，孕育剂加入量控制在0.5%左右为宜。

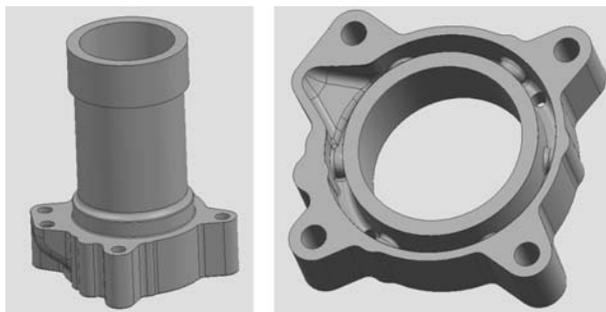
1.2.1 孕育方式的选择

孕育处理对高牌号合金铸铁的铸造品质极为重要。本文这种缸套常规的孕育方法为0.2%包底孕育+0.4%冲入孕育，即包底先放置0.2%的孕育剂后从熔炼炉出4/5铁液，充分搅拌后出剩余1/5铁液，冲入0.4%的孕育剂，但该缸套采用常规孕育处理时厚大部位孕育衰退现象明显，石墨形态差。265缸套壁厚较大处冷却条件差，易形成粗大石墨，故采取强化孕育则是确保A型石墨的必要措施。强化孕育措施为0.4%倒包随流孕育+0.1%浇注随流孕育，即出铁后迅速倒包随流冲入0.4%的孕育剂，浇注时随流0.1%的孕育剂。强化孕育与常规孕育方式相比，有以下不同：①增加随流孕育，即在浇注铸件时将孕育剂加入到金属液流中，最大限度地缩短孕育后的停留时间，从而避免浇包孕育中防止浇包孕育衰退的问题；②常规孕育直接从熔炼炉中出铁液，孕育温度较高，而倒包随流孕育结束之后可以直接进行浇注，孕育温度更加接近浇注温度，可减小包内衰退；③常规的搅拌方式很难达到随流孕育的均匀性；④批量生产时，倒包随流孕育至开始浇注的时间一般要比常规孕育节省2分钟左右，作用结果是延后孕育时间，减缓了孕育衰退。

1.2.2 孕育剂的选择

一般来说，各种孕育剂都有各自的优缺点，如果将各种孕育剂按照一定的比例进行混合，充分发挥各种孕育剂的作用，这样对灰铁的孕育效果会更好。在孕育剂选择时，我公司分别对五种不同的孕育剂进行了试验分析，孕育总量均为0.5%，试验孕育剂的种类与成分如表2所示，试验孕育剂处理后试样的金相照片如图2所示。

从孕育效果来看，其中75SiFe的处理后的试样石墨形态相对较差，石墨等级仅为3级，Si-Sr孕育剂处理的试样石墨形态几乎全部为A型石墨，石墨等级为4级，孕育效果最好；另外在试验过程中发现一个规律，凡是用Ba含量较高的孕育剂处理后的试样，组织中总会出现一些团块状石墨，有关资料认为是孕育剂中的Ba导致^[4]。



(a) 某缸套毛坯示意图 (b) 某缸套水腔部位剖视图

图1 某缸套三维结构示意图

Fig. 1 Three dimensional structure diagrams of casting

表1 缸套铸件化学成分

Table 1 Chemical composition requirements of the casting

C	Si	Mn	Mo	Cu	Cr	S	P	w_B /%
2.8~3.5	1.6~2.5	0.4~0.9	0.2~0.7	0.3~1.0	≤0.4	0.08~0.09	≤0.08	

表2 试验用孕育剂成分

Table 2 Composition of compound inoculants

孕育剂	Si	Al	Ca	Sr	Mn	Ba	Cr	Zr	RE	Fe	w_B /%
75SiFe	75									其余	
Si-Ba	72.41	1.39	1.45			2.54				其余	
Ca-Ba	64	1.24	1.45			10.5				其余	
RE-Ca-B	42.18	1.47	1.27		9.07	5.45	4.31		5.76	其余	
Si-Sr	74.5	0.34	0.066	0.96						其余	
Si-Mn-Zr	62.6	1.06	1.22		3.43	0.56		3.59			

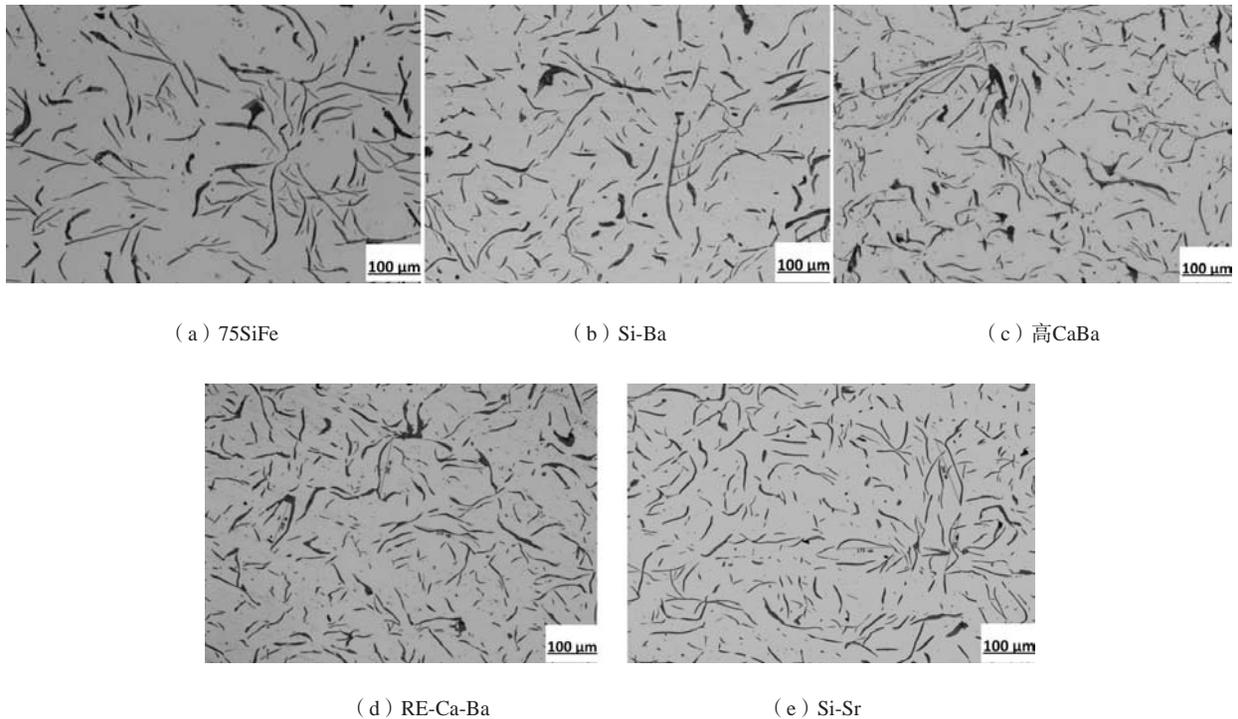


图2 不同孕育剂种类条件下的某缸套金相(石墨)图片
Fig. 2 Metallographs of the castings inoculated with different inoculants

由试验结果可以得出, Sr为最有效的促进孕育元素。据有关资料显示Sr与Ca、Ba等元素有冲突^[5], 故Si-Sr孕育剂不适合与含Ba的孕育剂搭配使用。然而含Mn的孕育剂在国内外普遍采用, 因为Mn可以降低孕育剂熔点, 使其在低温中可快速溶解, 另外又是促进珠光体元素。因此, 缸套最终选择了Si-Sr孕育剂作为倒包随流孕育剂, Si-Mn-Zr孕育剂作为浇注随流孕育剂。

2 铸造工艺研究

2.1 铸造工艺设计

2.1.1 浇冒口设计

缸套为圆筒类零件, 止口法兰和水套端壁厚大, 而中间筒体部位壁厚较薄, 热节分布凌乱。若热节处直接放置冷铁, 则激冷部位会在产生白口的同时形成过冷石墨, 因此只有通过合理的浇冒口设计来确保铸件组织的致密性。

为尽可能实现顺序凝固, 决定采用顶雨淋浇注工艺, 止口法兰端朝上, 热节处辅以发热冒口进行补缩。开放-封闭式浇注系统, 各组元横截面积之比约为 $F_{内}:F_{横}:F_{直}=1.5:2:1$, 横浇道为截面积最大, 而直浇道处截面积相对较小, 这样既有较好的挡渣效果, 又可减小铁液对铸型的冲刷, 另外顶雨淋浇注利于顺序凝固、除气、除渣等, 具体工艺如图3所示。

2.1.2 水腔型芯设计

缸套铸件的造型方式为呖喃树脂手工造型, 但

是该缸套水腔结构较大, 水腔内部与外部仅个别成形孔相通, 另外水腔为该缸套的关键区域之一, 内表面均为非加工面, 对水腔型芯质量有着较高的要求, 故水腔型芯采用覆膜砂制作, 配箱时水腔型芯通过7个 $\Phi 12$ mm的成形孔处型芯芯头与底型粘固定位, 水腔型芯结构如下图4所示。

2.2 造型工艺的优化

2.2.1 原工艺存在的问题

(1) 铸件气孔。原因为水腔覆膜砂型芯厚^[6], 型芯产生的气体无法排出铸型。

(2) 水腔型芯漂浮。水腔型芯与底型通过7个 $\Phi 12$ mm成形孔型芯头粘结, 浇注时无法承受较大的铁液浮力, 同时高温降低型芯强度, $\Phi 12$ mm成形孔型芯极易断裂。

(3) 水腔端厚大处存在显微疏松, 无法通过磁粉探伤。

2.2.2 工艺改进

(1) 重新设计了水套芯结构, 分1#芯、2#芯制作, 二者组合后使用, 组合后型芯中间形成空腔; 7个 $\Phi 12$ mm成形孔处增设铁管芯骨; 原 $\Phi 30$ mm成形孔芯头处增加了辅助定位。

(2) 原铸件止口法兰端朝上的顶雨淋工艺更改为水腔端朝上的顶注式, 根据现有工装对浇注系统做了相应调整, 浇道各单元截面积比例、总和均未发生改

变。铸件水腔端原4个 $\Phi 45$ mm机加工孔改为铸造成形孔；水腔端厚大处设置了4个10/13K发热冒口。

2.2.3 改进创新点

(1) 法兰端朝上，浇注时水腔芯悬挂于上型，原粘结处的抗拉力转化为型芯整体的抗压力，铁管芯骨增加了型芯强度，可以防止高温断裂，另外受上型限制，水腔芯无法偏移。 $\Phi 30$ mm成形孔处增设芯头级辅助定位，进一步巩固了水套型芯的定位的准确性、可靠性。

(2) 水腔型芯空腔结构设计，减小了型芯发气总量，浇注时型芯产生的气体可以通过芯骨排出铸型，避免了气孔的产生^[7]。

(3) 高牌号合金铸铁收缩率大，厚大部位易产生

缩孔、缩松。改进后在铸件水腔端厚大处设置了4个发热冒口，止口法兰设置了2个侧边冒口，使得热节处得到有效补缩，解决了水腔端显微疏松问题，改进后工艺的凝固模拟结果如图5所示。

2.3 检测结果

试制的铸件，加工验证结果表明，缸套无明显铸造缺陷。全表面磁粉探伤结果也未发现不符合要求的磁痕，关键部位射线探伤满足等级要求。剥层检验结果也显示，剥层区域无肉眼可见缺陷。铸件本体及随炉试棒热处理后的各项指标均达到技术要求（见表3），实现了该缸套的批量生产。

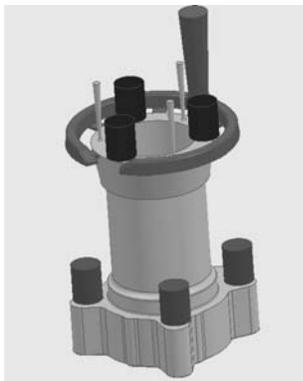


图3 缸套的浇冒口系统

Fig. 3 The gating and feeding system

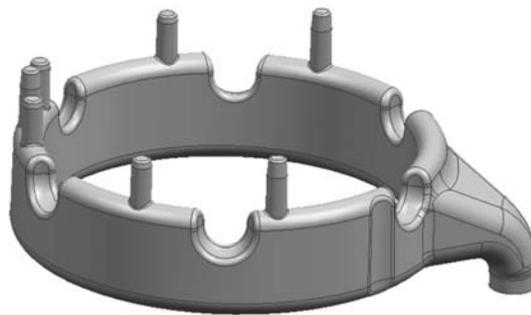
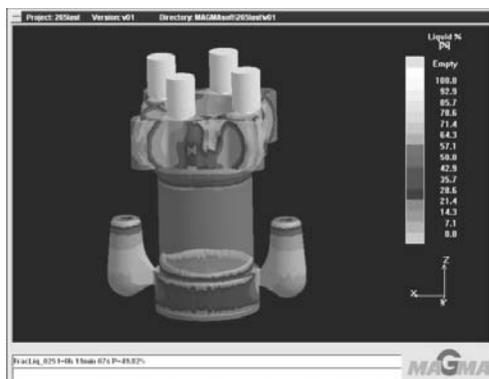
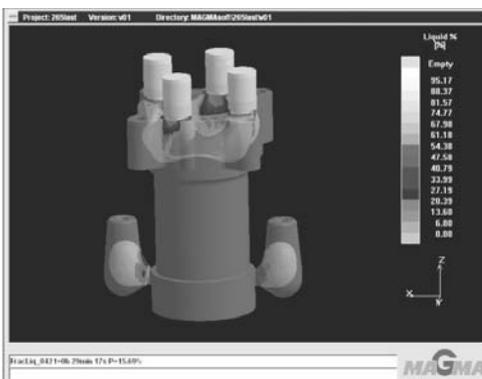


图4 水腔型芯结构

Fig. 4 The structure of sand core



(a) 凝固50%



(b) 凝固80%

图5 优化的铸造工艺凝固过程模拟截图

Fig. 5 Solidification process simulation of optimized cast process

表3 缸套本体及随炉试棒组织和性能检测结果

Table 3 Structure and performance test results of cylinder liner and test rod

试样	抗拉强度/MPa	石墨类型	石墨长度	基体组织	硬度HBW
铸件	346	A型	4级	95%珠光体	249
随炉试棒	382	A型	4级	98%珠光体	229

3 结论

(1) 通过化学成分的合理设计及孕育处理的对比试验, 解决了厚大部位因冷却条件差而导致的石墨粗大、石墨长度超标等问题, 各部位的力学性能均满足要求。

(2) 通过浇注方式及型芯结构的改进, 解决了水腔型芯漂浮及厚大型芯排气困难问题; 通过浇冒口的改进解决了缸套厚大部位显微疏松问题。

(3) 铸件通过了全表面磁粉探伤、射线探伤检测及车削剥层验证, 本体及随炉试棒的各性能指标均达到技术要求, 按ASTM标准, 基体中珠光体 $\geq 95\%$, A型石墨 $\geq 95\%$, 石墨等级为4级, 实现了批量生产。

参考文献:

- [1] 王泽明. 合金铸铁气缸套的铸造工艺 [J]. 内燃机配件, 2012 (6): 30-32.
- [2] 洪晓光, 杨力. 国家标准《灰铸铁金相检验》解读 [J]. 铸造, 2013 (6): 573-575.
- [3] 蒋智慧, 杨明华, 杨永金, 等. 瞬时随流孕育工艺的研究与应用 [J]. 现代铸铁, 2005 (6): 1-5.
- [4] 金钟信. 铸铁的孕育及其有效元素 [J]. 现代铸铁, 2002 (4): 27-30.
- [5] 邹荣剑, 韩亚伟. 高钡孕育剂在生产厚大灰铸铁件中的应用 [J]. 铸造, 2013 (6): 573-575.
- [6] 蔡安克, 程俊伟, 龚出群, 等. 厚壁铸铁件裂隙状气孔的成因分析与解决措施 [J]. 铸造, 2013 (6): 557-565.
- [7] 纪汉成, 汤叶卫. 浅谈砂型铸造排气系统的设计 [J]. 铸造, 2017 (3): 263-268.

Material and Casting Process of Cylinder Liner for High Power Diesel Engine

YANG Zhi-gang, XIAO Gong-lin, MU Yan-qing, ZHANG Zhong-teng, YU Guang-yuan
(CRRC Qishuyan Locomotive & Rolling Stock Technology Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

As one of the core components of the engine, the performance of the cylinder liner for high-power internal combustion engine directly affects the use of the whole engine. In this paper, the effects of chemical composition, inoculant type and inoculation treatment on the microstructure and mechanical properties of alloy cast iron cylinder liner were analyzed in detail, and the casting process was optimized by means of MAGMA solidification numerical simulation software and hollow core design method. The graphite morphology and graphite length of alloy cast iron were effectively controlled, and the shrinkage and porosity defects were eliminated. Finally, the casting with satisfactory quality was produced.

Key words:

diesel engine cylinder liner; casting process; alloy cast iron