

大型发动机缸套的组织与性能改善措施

郭敏, 王敏刚, 李飞, 宫显辉, 卫蓉

(陕西柴油机重工有限公司, 陕西兴平 713105)

摘要: 对缸套进行了逐层解剖和组织金相分析, 得出了导致缸套本体抗拉强度偏低的原因, 即缸套本体存在宏观偏析缺陷, 组织中有B型、D型石墨和粗大磷共晶及白斑。探讨了白斑及异常组织形成机理, 并通过调整化学成分, 适当提高碳当量, 采用硅锰锆型高效瞬时孕育剂及新型涂料, 浇注前预热模套、浇注主槽并适当提高浇注温度, 充型完后强化水冷等措施, 消除了白斑及异常组织, 使缸套材质力学性能合格率从60%提高至98%。

关键词: 缸套; 离心铸造; 过冷石墨; 磷共晶

柴油机是船舶动力的心脏, 缸套是心脏瓣膜-燃烧室的核心关键零部件。随着新型船舶柴油机高强度、高功率密度、低排放要求的发展, 缸套承受的机械负荷和热负荷越来越大, 对其抗拉强度、硬度、致密性、耐磨性等指标提出了更高要求, 缸套质量直接影响柴油机的可靠性和寿命。我公司缸套采用离心铸造方式生产, 但由于离心力的作用及不均匀冷却速率的影响, 缸套经常存在“花斑”宏观组织偏析和石墨形态、基体等微观组织异常问题, 导致抗拉强度不合格。

1 技术要求及生产工艺

1.1 技术要求

某型船舶用柴油机缸套为高磷铸铁, 其缸套净重800 kg, 化学成分要求如表1所示。本体抗拉强度 ≥ 310 MPa, 布氏硬度250~310。金相组织: A型石墨, 尺寸4~6级。珠光体基体, 铁素体 $\leq 5\%$, 渗碳体 $\leq 3\%$, 磷共晶网状随机分布, 不允许B型石墨存在。

1.2 原工艺生产方法

设计缸套毛坯轮廓尺寸: 550 mm \times 900 mm, 如图1所示, 毛重约1 000 kg, 外圆加工余量约8 mm, 内壁加工余量25 mm。端头切环进行化学成分、力学性能、金相组织检测, 见图1。合金铸铁模套, 内壁挂砂层厚约5 mm, 槽式侧浇式浇注系统, 浇注槽采用白色醇基涂料进行涂刷, 出铁液时冲入孕育采用0.3% 75FeSi, 浇注温度: 1 300~1 320 $^{\circ}\text{C}$ 。从炉前孕育至浇注完毕时间控制在15 min以内。

离心机模套转速浇注时控制在550~600 r/min, 浇注结束后将转速提高至750~800 r/min, 同时开冷却水冷却, 水流速度0.5~0.8 kg/s, 冷却至缸套毛坯内壁为暗红色脱模。

2 存在问题

缸套本体抗拉强度约有60%为260~310 MPa, 不能达到技术要求, 由此产生大量的废品, 给工厂带来了严重的损失。为此我们对不合格缸套进行本体解剖, 进行各项分析检测, 发现存在以下问题。

2.1 宏观偏析

缸套经精加工后内壁存在白斑现象, 白斑宏观下一般为月牙状或条虫状, 如图2

作者简介:

郭敏(1974-), 男, 研究员级高工, 主要从事大型柴油机、风力发电设备关键铸件工艺设计及质量控制研究。E-mail: gm_xp@163.com

中图分类号: TG113.26⁺1
文献标识码: B
文章编号: 1001-4977(2021)01-0086-04

收稿日期:

2020-06-15 收到初稿,
2020-08-26 收到修订稿。

表1 某型缸套要求的化学成分
Table 1 Chemical composition requirements of cylinder liner

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	w _B /%
3.0~3.2	1.5~2.0	0.5~0.7	0.4~0.6	≤0.1	0.2~0.3	0.2~0.3	0.4~0.6	

所示。白斑一般较硬，因为加工过程中白斑往往有让刀现象发生，形成一道凸起条带。有时也会出现白斑（图3）与正常区域有离层甚至剥落现象^[1]。经对白斑形态分析，白斑区域与正常组织区域存在孔洞及白色夹渣物。说明与以往产生白斑的原因相似，即铁液在充型过程中浇注槽注铁口下部会凝结铁豆，当铁豆逐渐长大其自重超过它与浇注槽底的粘结力时，就会脱落掉入型腔^[1]，掉落的铁豆表层会沾有浇注槽底的涂料杂物，当与型腔内的铁液接触后就会产生夹渣及未充分融和的孔洞，夹渣和孔洞的产生就会严重影响缸套的力学性能。

2.2 微观组织

技术文件要求石墨形态为A型，长度4~6级，不允许出现B型和D型石墨等，但在实际生产中却出现了一定量的B型和D型石墨，如图4、图5所示。此外还出现了粗大的三元磷共晶-碳化物复合组织，如图6所示。这些石墨形态及磷共晶组织严重恶化力学性能。

3 原因分析

3.1 白斑问题

白斑形成的主要原因是在浇注过程中，随着温

度下降，铁液会在浇注孔底部周围凝结，当凝结的铁豆自重超过它与浇注槽底的粘结力时就会脱落掉入型腔，并对其周围的铁液产生激冷，被激冷的铁液会在铁豆周围析出一层初析奥氏体枝晶，同时P、S、C会被排挤出初析奥氏体枝晶层，当温度继续下降至750℃左右时，奥氏体枝晶层开始转变为珠光体^[1]。如图7所示，白斑组织为纯珠光体组织无石墨和磷共晶，由于铁豆表面粗糙不平，掉入液态型腔会卷入空气在铁豆与激冷层间形成孔隙亦或当表面粗糙的铁豆掉入液态型腔对周围铁液迅速激冷使铁液无法完全浸润铁豆表层而产生了孔隙。而白色夹渣物很可能是与铁豆粘连

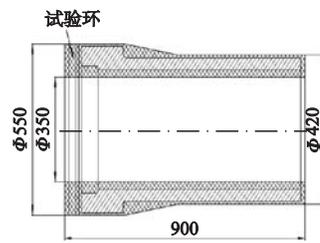


图1 某型缸套毛坯轮廓图
Fig. 1 Outline of cylinder liner blank

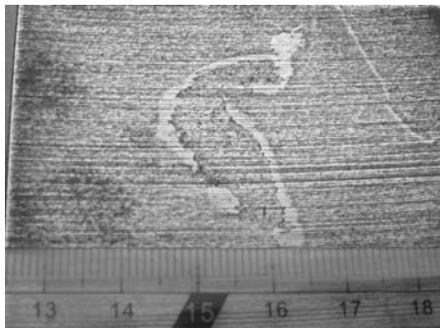


图2 缸套宏观白斑
Fig. 2 Cylinder liner speckle



图3 花斑与正常组织及其接触面缺陷
Fig. 3 Speckle and normal tissue and their contact surface defects

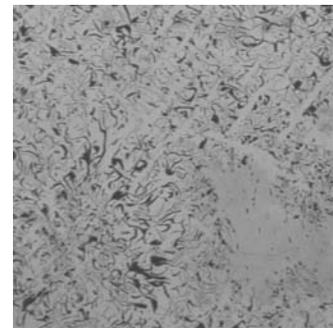


图4 缸套B型石墨形态
Fig. 4 B-type graphite morphology in cylinder liner

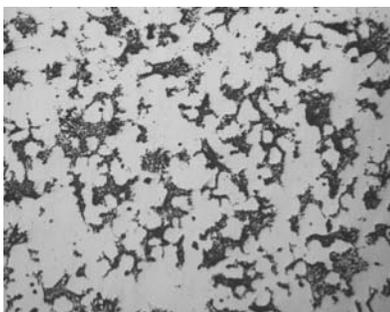


图5 缸套D型石墨形态
Fig. 5 D-type graphite morphology in cylinder liner

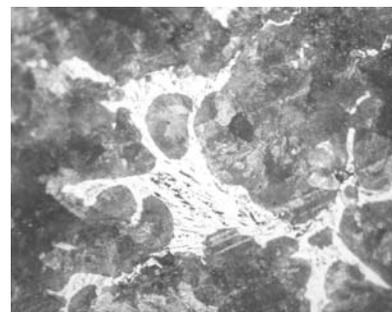


图6 三元磷共晶-碳化物复合组织
Fig. 6 Ternary phosphorous eutectic - carbide composite structure

的浇注槽底的涂刷物, 由于条件有限未能对此白色夹渣物进行分析, 经对如图8所示白斑A区和正常组织B区进行能谱分析, 区域A如图9所示, 其中C、P、S含量都很低。图10为正常组织及能谱分析, 进一步验证了白斑形成理论的正确性。该层状珠光体与正常组织间存在夹渣及孔洞等缺陷会严重影响缸套的力学性能, 甚至在加工时就会产生脱落现象。前期为了防止浇注槽底粘连铁豆, 将底漏式浇注系统改为侧浇式, 白斑缺陷有了一定的改善, 但没根本杜绝浇注槽底粘连聚集铁豆并掉落的问题, 究其原因除了和浇注系统的设计有关外, 主要还和涂料及浇注温度有关。

3.2 石墨形态

由于型腔是铸铁模套, 铁液刚进入时产生激冷使铁液过冷, 过冷的铁液析出细小的过冷石墨。随着铁液的不间断注入, 铁液温度不断上升, 在细小石墨外层石墨长成较粗大的菊花状, 而D型石墨是铁一直处于过冷状态, 产生细小卷曲的晶间片状石墨。解决这两类石墨首先防止铁液过冷, 除了防止模套过度激冷外, 还应调整碳当量及加强铁液的孕育。

3.3 三元磷共晶 - 碳化物复合组织

缸套为高磷铸铁, 且磷极易偏析, 三元磷共晶-碳化物复合组织, 即: 亚稳定系三元磷共晶, 这种磷共晶组织较二元及三元磷共晶脆, 而且严重影响抗拉强度。提高铁液的石墨化能力, 防止过冷, 适当降低冷却速度, 是防止此类磷共晶组织出现的主要措施。另一方面细化共晶团组织, 可获得细小均布的磷共晶组织。

3.4 磷共晶粗大

共晶凝固阶段当冷却速度缓慢时, 就加剧了磷的偏析, 并使共晶团粗大, 最终导致磷共晶粗大。

4 采取的措施

4.1 采用新型涂料

该型涂料为石墨型-水玻璃基涂料, 与铁液粘连度小, 基本不浸, 而且该涂料强度高于以往的醇基及石墨型水基涂料。

4.2 化学成分调整

为了减少过冷石墨, 消除三元磷共晶-碳化物复合组织, 就要适当提高铁液的石墨化能力, 并降低铁液的过冷度, 故要适当地提高碳当量和降低过冷化元素, 调整如表2所示。

4.3 细化共晶团组织

采用硅锰锆孕育剂进行瞬时孕育, 充型完毕后加强水冷, 水流量提高至0.8~1 kg/s。



图7 白斑显微组织 (500×)

Fig. 7 White spot microstructure

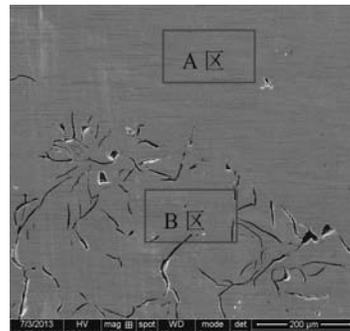


图8 白斑和正常组织区域

Fig. 8 White spot and normal microstructure

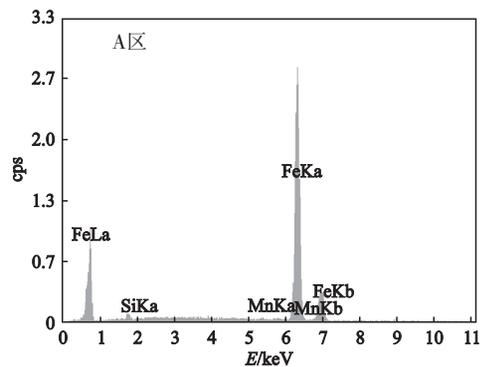


图9 白斑区域的能谱分析图

Fig. 9 The energy spectrum analysis diagram of white spot area

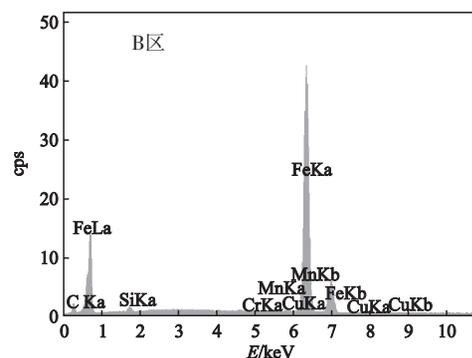


图10 正常区域的能谱分析图

Fig. 10 The energy spectrum analysis diagram of normal area

表2 调整后的化学成分
Table 2 Chemical composition after adjustment

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	$w_B/\%$
3.05 ~ 3.2	1.75 ~ 1.85	0.6 ~ 0.7	0.4 ~ 0.5	0.06 ~ 0.08	0.2 ~ 0.25	0.2 ~ 0.3	0.5 ~ 0.6	

4.4 工装及浇注温度的工艺改进

浇注前对模套、浇注槽进行彻底烘干并预热处理, 临近浇注保证模套、浇注系统的温度在200 ℃以上。浇注温度: 1 310~1 330 ℃。

5 效果验证

经调整后生成的该型缸套材质性能稳定, 合格率高达98%, 如表3所示为调整后的材质力学性能, 金相组织良好, 如图11所示。

6 结束语

分析研究发现, 影响缸套材质性能的主要因素是缸套存在的花斑宏观偏析、不良石墨形态和不良磷共晶组织。通过采用新型石墨型-水玻璃基涂料, 调整化学成分使碳硅量提高, 降低过冷化元素磷、铬含量, 采用硅锰锆孕育剂进行瞬时孕育降低铁液过冷度, 对工装模套浇注系统进行预热, 适当地提高浇注温度等措施, 使缸套材质性能合格率稳定提高至98%。

参考文献:

- [1] 王敏刚, 赵世雄. 消除离心铸造船用柴油机缸套白斑云斑缺陷的对策 [J]. 中国铸造装备与技术, 2011 (1): 36-38.

表3 工艺调整后的力学性能
Table 3 Mechanical properties of cylinder liner after chemical composition and technics adjustment

编号	抗拉强度 R_m /MPa	硬度HBW
1	349	272
2	331	269
3	335	253
4	358	268

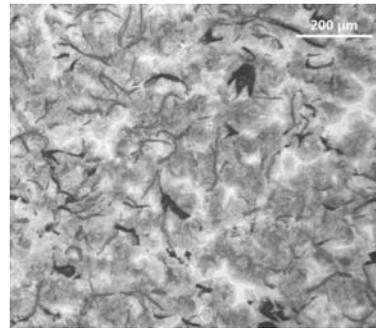


图11 工艺调整后的缸套本体金相组织

Fig. 11 Metallographic structure of cylinder liner after chemical composition and technics adjustment

Improvement Measures of Micorstructure and Properties of Large Engine Cylinder Liner

GUO Min, WANG Min-gang, LI Fei, GONG Xian-hui, WEI Rong
(Shaanxi Diesel Engine Heavy Industry Co., Ltd., Xingping 713105, Shaanxi, China)

Abstract:

By dissecting the cylinder liner layer by layer and analyzing its microstructure, it was concluded that the reason for the cylinder liner having low tensile strength is that the cylinder liner has the macro segregation defect and there exist B-type, D-type graphite, coarse phosphorus eutectic and white spot in the microstructure. The formation mechanism of white spot and abnormal structure was analyzed. By adjusting chemical composition, increasing carbon equivalent properly, adopting silicon-manganese-zirconium type high-efficiency instantaneous inoculant and new coating, preheating mold sleeve and gating system before pouring, properly increasing pouring temperature, strengthening water cooling after filling, etc., white spots and abnormal structure were eliminated, and the qualified rate of mechanical properties of cylinder liner was increased from 60% to 98%.

Key words:

cylinder liner; centrifugal casting; undercooled graphite; phosphorus eutectic