

船用发动机气缸盖渗水原因分析及改进

朱明军¹,倪朝杰^{2*},李兵²

1. 海军装备部驻上海地区第十一军事代表室,上海 200129; 2. 沪东重机有限公司,上海 200129

摘要:为解决气缸盖在船用发动机台架试验中出现的渗水问题,采用宏观分析、无损探伤、力学性能测试、化学成分分析、扫描电子显微镜形貌分析、能谱分析和金相分析等系统理化检验手段,分析气缸盖渗水原因,并提出改进措施。结果表明:气缸盖内部存在球化渣缺陷,在发动机台架试验的循环高温、交变应力作用下,部分密集球化渣缺陷相互连接形成贯穿气缸盖壁的通道,是导致船用发动机气缸盖渗水的主要原因;通过改进气缸盖铸造工艺,在成品检验过程中增加气密性试验,可以有效防范气缸盖渗水风险。

关键词:气缸盖;球化渣;理化检验;力学性能分析

中图分类号:TK423

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)05-0055-08

引用格式:朱明军,倪朝杰,李兵.船用发动机气缸盖渗水原因分析及改进[J].内燃机与动力装置,2025,42(5):55-62.

ZHU Mingjun, NI Chaojie, LI Bing. Analysis of water seepage causes in the cylinder cover of a marine engine and its improvement[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(5):55-62.

0 引言

船用发动机是船舶的核心动力装置,其运行可靠性直接决定船舶的航行安全与作业效率。气缸盖是发动机的关键核心部件之一,具有密封燃烧腔、传导热量以及为气门机构提供安装支撑等重要功能^[1]。在发动机工作过程中,气缸盖长期处于高温、高压以及交变载荷的工况下,其结构完整性与密封性面临严峻考验^[2]。一旦气缸盖出现渗漏问题,不仅导致发动机冷却系统效率下降、动力输出衰减,严重时还可能引发部件烧损,甚至导致发动机停机,给船舶运行带来安全隐患及经济损失^[3]。

本文中针对发动机台架试验过程中出现的气缸盖渗水故障,采用宏观观察、无损探伤、力学性能测试、化学成分分析等方法开展失效分析,并提出改进措施,为气缸盖及同类零部件的质量控制与缺陷防治提供参考。

1 故障现象

某发动机气缸盖的材料为球墨铸铁,材料牌号为QT400-15A,具有良好的强度、韧性与铸造性能,广泛应用于承受中等载荷的动力机械零部件。该气缸盖在出厂前的尺寸检验、外观检查、水密性试验等常规检验合格后,被装配至发动机整机开展台架试验,试验运行80 h后,发现气缸盖部位存在渗水现象。为明确渗水位置与初步原因,立即停止试验并对发动机进行拆解检查,同时对拆解后的气缸盖重新进行水密性测试。测试结果显示,渗水位置集中在气缸盖的进气阀腔区域,具体位置如图1所示。为精准定位失效根源,制定有效的整改措施,需对该渗水气缸盖开展全面、系统的理化检验和分析。

收稿日期:2025-08-23

第一作者简介:朱明军(1977—),男,陕西咸阳人,高级工程师,主要研究方向为船舶动力、材料及核动力,E-mail:282359159@qq.com。

* 通信作者简介:倪朝杰(1983—),男,江苏建湖人,工程师,主要研究方向为船舶动力,E-mail:13795379869@126.com。

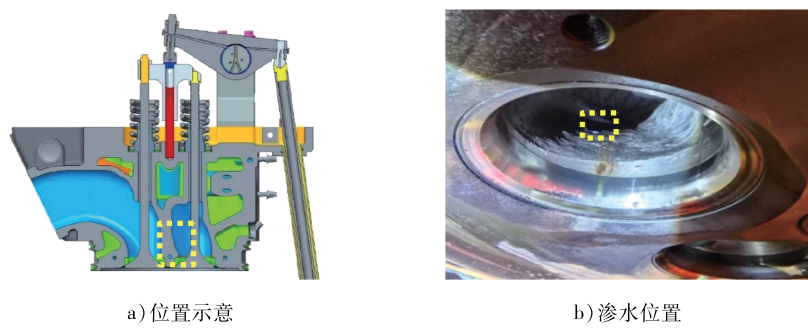


图 1 气缸盖渗水位置示意及具体位置

2 理化检验

2.1 宏观分析与取样

宏观分析是失效分析的首要环节,其核心目的是通过直接观察零部件的外观、剖面形态等宏观特征,初步判断缺陷的位置、分布、形态及严重程度,为后续微观分析和深入检测提供指导^[4]。

由于气缸盖结构复杂,为避免取样过程对缺陷区域造成破坏,对气缸盖进行切割,切割路径如图 2 所示。切割完成后,对获取的剖面进行初步清理,观察标记位置,发现渗漏位置附近存在疑似孔洞类缺陷,缸盖剖面宏观形貌如图 3 所示。为获取更精准的检测样本,对标记处的疑似缺陷区域进行二次切割取样。试样经清洗后对缺陷位置进行重新标记,剖件渗漏位置如图 4 所示。该试样将用于后续的检测试验。

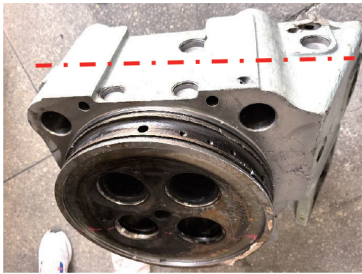


图 2 缸盖切割路径示意图

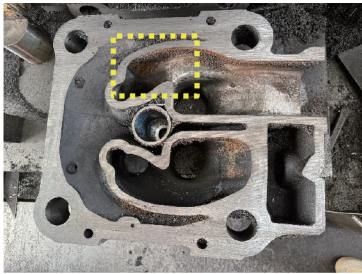


图 3 缸盖剖面渗漏位置宏观形貌

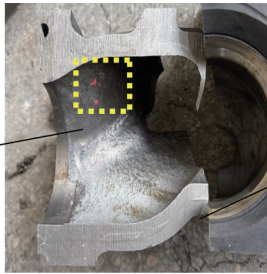


图 4 剖件渗漏位置示意图

2.2 无损探伤检测

着色渗透探伤是一种常用的表面探伤方法,其原理是利用液体的毛细作用,使渗透剂渗入被测工件表面的微小缺陷(如裂纹、孔洞等)中,然后通过去除多余渗透剂、施加显像剂,使缺陷内的渗透剂被吸附至被测表面并形成清晰可见的缺陷显示^[5]。该方法操作简便、成本较低,且对表面开口缺陷的检测灵敏度高,广泛应用于金属零部件的表面缺陷检测^[6]。

根据图 4 中的渗漏位置,分别对气道面与水道面分别进行着色渗透探伤,结果如图 5 所示。由图 5 可知:气道面可见数个呈圆形或椭圆形的孔洞缺陷,水道面同样可见多处孔洞缺陷,部分缺陷呈连续分布状态。

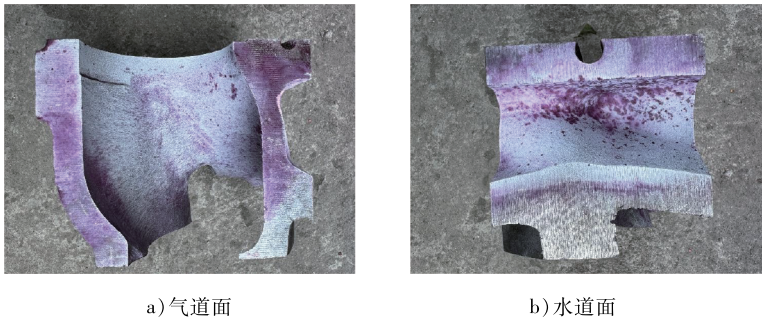


图 5 气道面和水道面着色渗透探伤结果

根据上述探伤结果可知:气缸盖的气道面与水道面均存在表面开口缺陷,且这些缺陷可能与内部缺陷相连通。为明确缺陷在气缸盖内部的延伸情况(如是否存在内部孔洞、是否形成贯穿通道等),需采用计算机断层扫描(computed tomography,CT)成像检测技术。CT成像检测基于 x 射线的穿透性与衰减特性,通过对被检测对象进行多角度扫描,获取大量投影数据,再经计算机重建处理,生成物体内部的三维断层图像^[7]。该技术能够清晰显示材料内部缺陷的位置、形态、尺寸及分布情况,空间分辨率可达微米级,是目前检测复杂零部件内部缺陷最有效的技术手段之一^[8]。

进一步截取渗水孔洞点密集处的检测物,宏观形貌如图6所示,CT成像结果如图7所示。由图6、7可知:材料内部存在一条贯穿气缸盖壁的通道状缺陷。经测量,该通道位于距离检测物切割面10.97 mm处,通道两端分别与气道面和水道面的孔洞缺陷相连通,具体位置如图8所示。该检测结果证实了气缸盖内部存在贯穿性缺陷,这是导致渗水问题的关键结构因素。



图6 剖件切割宏观形貌图

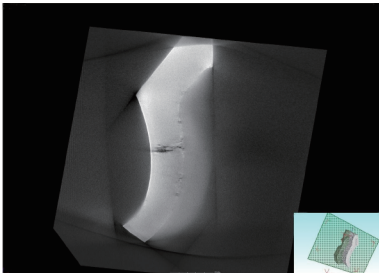


图7 剖件 CT 成像图

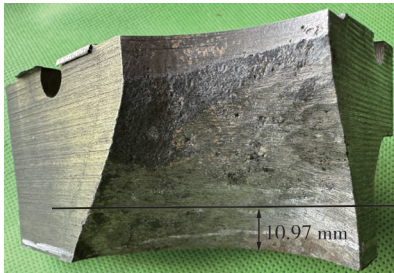


图8 剖件裂纹位置示意图

2.3 力学性能测试

力学性能是衡量材料能否满足使用要求的重要指标,气缸盖在工作过程中需承受较大的拉伸应力、弯曲应力及交变应力,因此其抗拉强度、屈服强度、伸长率及硬度等力学性能参数应符合设计要求。为验证气缸盖材料的力学性能,对其开展拉伸试验和布氏硬度试验进行力学性能测试。

对气缸盖本体取样,气缸盖材料力学性能测试结果如表1所示。由表1可知:该材料的力学性能参数均满足技术要求,气缸盖材质的力学性能良好,不存在因材料强度或韧性不足导致的失效问题^[9]。

表1 气缸盖力学性能测试结果

项目	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 A /%	HBW 硬度
实测	422	279	23.0	147,149,147
技术要求	≥ 390	≥ 250	≥ 14.0	135~185

2.4 化学成分分析

化学成分决定金属材料的组织与性能,若材料中磷、硫等有害元素含量过高,可能导致材料出现缩孔、疏松、夹杂等铸造缺陷或性能劣化^[10]。开展气缸盖材料化学成分分析,检测气缸盖材料的化学组成是否符合 QT400-15A 球墨铸铁的标准要求^[11]。

从气缸盖本体取样,测量材料中磷、硫的质量分数分别为 0.014%、0.007%,符合 QT400-15A 球墨铸铁的技术要求,气缸盖材质的化学成分合格,不存在因元素含量超标或不足导致的材料质量问题。

2.5 扫描电子显微镜形貌分析与能谱分析

扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)形貌分析与 x 射线能谱(energy dispersive spectroscopy, EDS)分析是相辅相成的微观分析技术。SEM 利用高能电子束与样品表面相互作用产生的二次电子、背散射电子等信号,生成样品表面的高分辨率形貌图像,能够清晰显示样品表面的微观结构、缺陷形态及异物附着情况^[12];EDS 通过检测电子束激发样品产生的特征 x 射线,对样品表面微小区域的元素组成进行定性与定量分析。二者结合使用,可有效确定缺陷区域的微观形貌特征及异物的化学组

成,为判断缺陷成因提供关键依据。

将气缸盖裂纹处的检测物置于扫描电镜内进行观察,SEM 观察结果如图 9 所示。由图 9 可知:气道面存在较多不规则形状的孔洞缺陷,部分孔洞内部填充灰白色异物。为明确异物的化学组成,对异物填充区域进行 EDS 分析,结果如图 10 所示。由图 10 可知:裂纹处材料中含有明显的镁、铝、硅、氧元素特征峰。分析剖件气道面元素及其质量分数如表 2 所示。结合球墨铸铁铸造工艺可知:在球墨铸铁生产过程中,通常会加入镁合金作为球化剂,加入硅铁作为孕育剂,若铸造过程控制不当,球化剂、孕育剂与炉渣的反应产物可能形成球化渣。球化渣的主要成分通常为氧化镁、氧化铝、二氧化硅等氧化物,与本次 EDS 分析检测到的含量较高的镁、铝、硅、氧元素特征相符,因此可判定孔洞内的异物为气缸盖铸造时形成的球化渣。

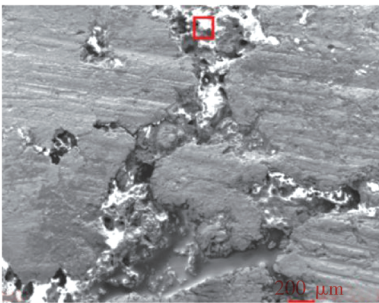


图 9 剖件气道面 SEM 形貌图

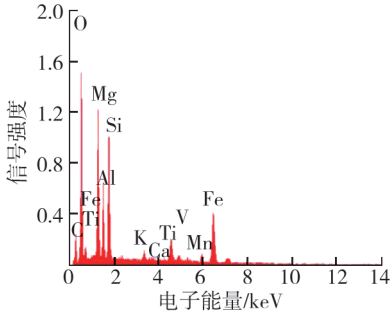


图 10 剖件气道面能谱分析图

表 2 剖件气道面元素及其质量分数 单位:%

$w(\text{C})$	$w(\text{O})$	$w(\text{Mg})$	$w(\text{Al})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{K})$	$w(\text{Ca})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{V})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Fe})$
1.40	12.14	21.67	10.46	18.23	1.87	0.76	5.97	1.06	2.23	24.21

采用与气道面相同的样品制备方法和测试条件,对检测物的水道面进行 SEM 形貌分析和 EDS 能谱分析,SEM 观察结果如图 11 所示,异物填充区域的 EDS 分析结果如图 12 所示,各元素的质量分数检测结果如表 3 所示。由图 11、12 和表 3 可知:水道面也存在多处孔洞缺陷,孔洞形态与气道面类似,且异物填充更明显;能谱图中可检测到高含量的镁、铝、硅、氧元素,同时还新增了钙、铈元素的特征峰。尽管水道面异物的元素组成与气道面略有差异,但主要成分一致,符合球化渣的成分特征,因此可判定水道面孔洞内的异物同样为气缸盖铸造时形成的球化渣。

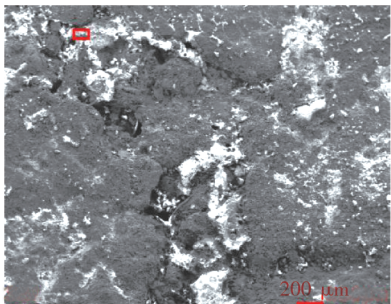


图 11 剖件水道面 SEM 形貌图

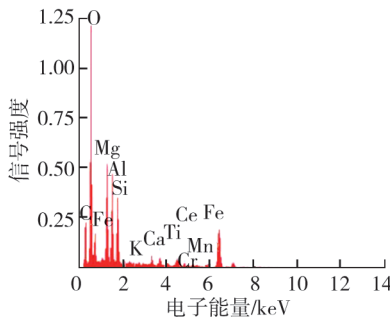


图 12 剖件水道面能谱分析图

表 3 剖件水道面元素及其质量分数 单位:%

$w(\text{C})$	$w(\text{O})$	$w(\text{Mg})$	$w(\text{Al})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{K})$	$w(\text{Ca})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{Ce})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Fe})$
3.06	15.20	18.75	17.23	13.22	1.93	1.90	2.28	2.56	0.33	0.60	22.93

2.6 金相分析

金相分析是研究金属材料内部组织与缺陷的重要手段,通过对材料微观组织的观察与分析,可了解材料的凝固过程、相变情况及内部缺陷(如夹杂、气孔、裂纹等)的形态与分布,进而揭示材料性能与失效之间的内在联系。本次金相分析主要包括抛光态组织观察、侵蚀态组织观察及逐层磨抛分析,旨在深入研究气缸盖内部的组织特征、球化渣缺陷的分布规律及贯穿通道的形成过程。

截取通道处的剖面金相试样,部件切割示意图如图 13 所示。经镶嵌、磨抛后置于金相显微镜下观察,试样内部存在较多不规则形状的黑色缺陷,这些缺陷即为球化渣夹杂,部分球化渣呈独立分布,部分则相互连接形成长条状或网状结构,如图 14 所示。放大观察,可清晰观察到气道面表面区域以及缺陷周边区域的石墨形态,如图 15 所示。正常球墨铸铁的石墨应呈球状或类球状,而该区域的石墨多呈片状或蠕虫状,表明此处存在球化不良现象。球化不良可能是由于球化渣的存在阻碍了石墨的球化生长,或局部区域球化剂含量不足导致的^[13]。

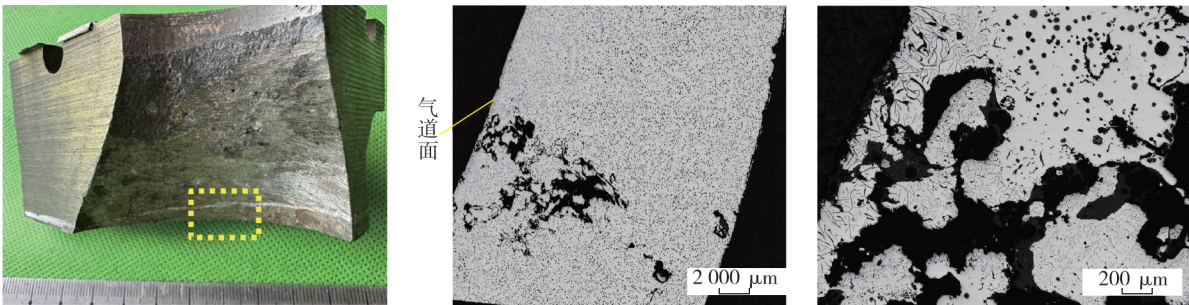


图 13 剖件切割示意图 图 14 剖件金相形貌图 图 15 剖件金相形貌放大图

将金相检测物置于扫描电镜内进行观察,缺陷内部可见异物填充,SEM 形貌如图 16 所示。对缺陷内异物进行 EDS 能谱分析,可检测到较高含量的镁、铝、硅、钙、钡、铈元素,如图 17 所示,各元素质量分数如表 4 所示,结合图 16、17 和表 4,可认为球化渣是在铸造过程中形成的。

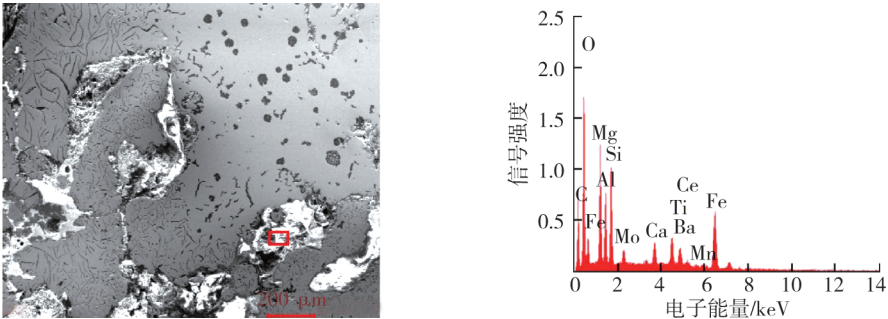


图 16 剖件 SEM 形貌图 图 17 剖件能谱分析图

表 4 剖件元素及其质量分数											单位: %
$w(\text{C})$	$w(\text{O})$	$w(\text{Mg})$	$w(\text{Al})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{Ca})$	$w(\text{Ba})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{Ce})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Fe})$
2.54	8.91	16.61	10.08	12.30	0.91	3.80	12.25	3.50	6.44	0.50	22.17

为研究球化渣缺陷在气缸盖壁厚方向的分布及贯穿通道的形成过程,对金相试样进行逐层磨抛分析。逐层磨抛位置示意及不同磨抛位置的金相形貌如图 18 所示。由图 18 可知:在试样的上层区域,球化渣缺陷主要呈分散的点状分布;随着磨抛深度的增加,进入中层区域后,分散的球化渣缺陷逐渐相互连接,形成短条状或树枝状的连通结构;当磨抛至下层区域时,这些连通结构进一步扩展,最终形成一条贯穿整个气缸盖壁的通道。该分析结果清晰地展示了球化渣缺陷从分散状态逐步发展为贯穿通道的过程,

为揭示气缸盖渗水的内在机理提供了直接的微观证据。

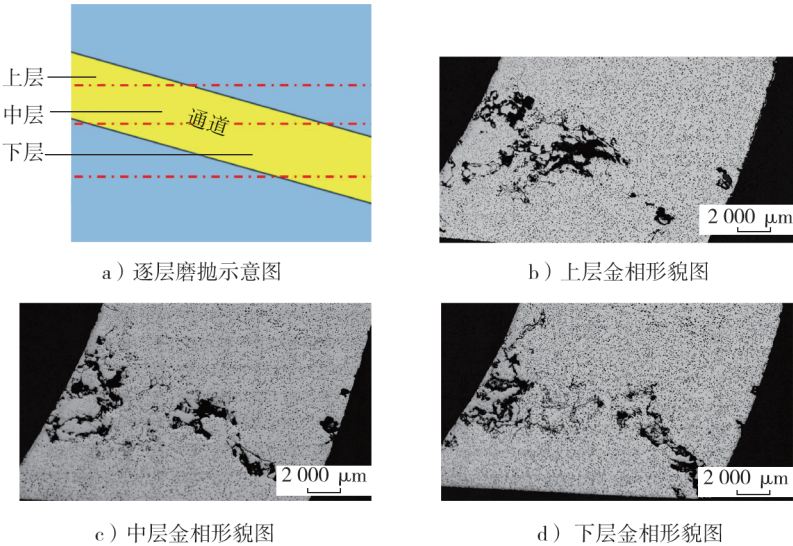


图 18 逐层磨抛位置示意及不同磨抛阶段的金相形貌

剖面金相检测物经化学试剂侵蚀后进行观察,显微组织为铁素体和少量珠光体,观察结果如图 19 所示。通过图像分析软件定量分析,可知珠光体质量分数约为 10%,符合气缸盖技术要求^[14](珠光体质量分数小于 15%)。

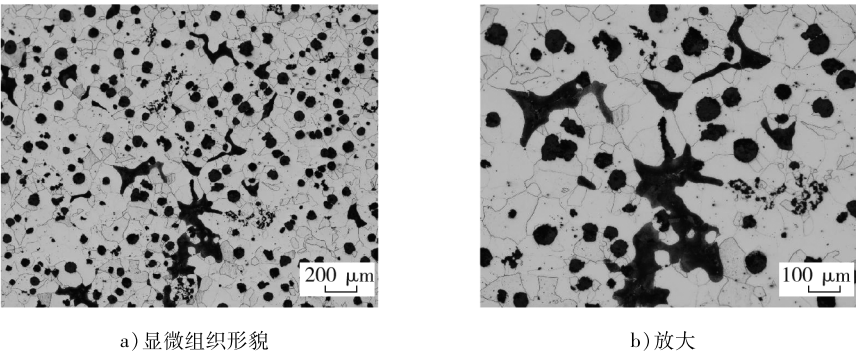


图 19 显微组织形貌及其放大图

3 渗水原因及改进

3.1 原因分析

为进一步明确球化渣缺陷的产生原因,对该气缸盖铸造过程进行了追溯调查。根据调查结果得知:气缸盖(铸件)浇注过程中,由于浇包未对准浇口池底部中心,浇包中的铁液冲刷在浇口池池壁上,铁液的强烈冲刷使浇口池内的铁液产生剧烈紊流,导致铁液及其球化夹渣物从浇口池飞溅至冒口并进入铸件底部(即本次检测发现的气道阀腔区域),最终残留在铸件内部形成球化渣缺陷。浇注过程示意图如图 20 所示^[15]。

在气缸盖的加工与出厂检验阶段,尽管球化渣缺陷已存在于铸件内部,但此时缺陷多呈分散状态或仅形成局部连通的小区域,尚未形成贯穿整个气缸盖壁通道。因此,气缸盖水密性试验未发现渗水现象,导致该缺陷未能被及时识别。当气缸盖装配至发动机并进行台架试验时,其工作环境发生显著变化:一方面,发动机工作过程中缸内燃烧产生的高温使气缸盖温度存在周期性波动,导致气缸盖基体与内部的球化渣缺陷因热膨胀系数差异而产生热应力^[16];另一方面,发动机的循环工作过程使气缸盖承受周期

性的气体压力载荷,进一步加剧了缺陷区域的应力集中^[17]。在热应力与交变压力的共同作用下,球化渣缺陷周边的基体材料逐渐产生微裂纹,这些微裂纹不断扩展并相互连接,最终使原本分散的球化渣缺陷形成一条贯穿气缸盖壁的通道。当通道形成后,气缸盖冷却系统中的冷却水便通过该通道从水道渗漏至气道,导致发动机在台架试验运行至80 h出现气缸盖渗水现象。

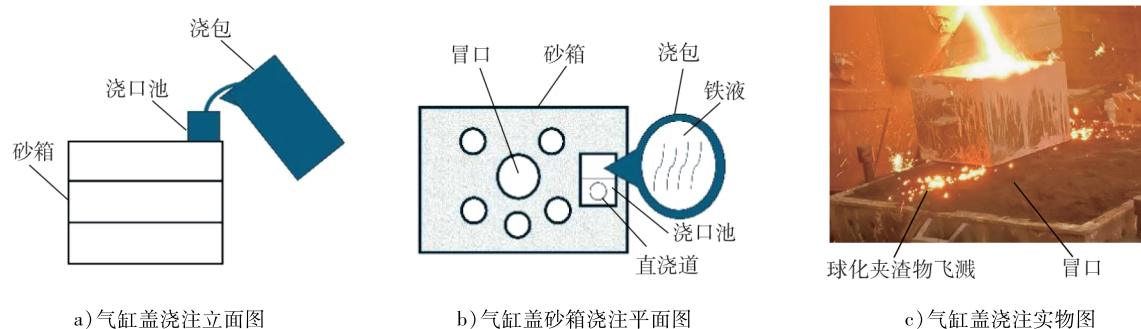


图20 气缸盖砂箱浇注过程

3.2 改进措施及验证

针对上述气缸盖渗水问题的根源,为从根本上防止类似问题的再次发生,应从优化铸造工艺、设计浇包定位工装与完善成品检验三方面制定改进措施。

3.2.1 优化气缸盖铸造工艺

修订气缸盖铸造作业标准,明确要求在砂箱冒口上覆盖硅酸铝纤维板。硅酸铝纤维板具有良好的隔热性能和耐高温性能,在浇注过程中覆盖于冒口表面,可有效阻挡铁液飞溅物从冒口进入铸件内部。

3.2.2 设计浇包定位工装

设计浇包定位工装,该工装采用钢结构框架,主要由定位底座、导向杆与限位块组成,定位底座与浇注平台通过螺栓固定,导向杆与浇包的耳轴配合,确保浇包在浇注过程中只能沿固定方向移动,限位块用于精确控制浇包的浇注位置,使浇包出口中心与浇口池底部中心的同轴度保持一致^[18]。修订气缸盖铸造作业标准,将使用专用工装对浇包进行定位纳入作业流程,并明确规定操作人员在浇注前必须检查工装状态,确认合格后方可进行浇注操作。

3.2.3 完善成品检验

在现有水密性试验的基础上,增加气密性试验要求。相比水密性试验,气密性试验对微小贯穿通道的检测灵敏度更高,能够有效识别水密性试验中难以发现的微小缺陷。

3.2.4 措施验证

为验证改进措施的有效性,按优化后的工艺要求重新组织生产2件该型气缸盖,对其中1件气缸盖毛坯完工后进行解剖验证,在与原渗水气缸盖相同剖切面位置开展着色渗透探伤,检测结果符合要求;另1件气缸盖加工为成品后进行气密性试验,气缸盖未发生渗水故障,试验结果合格。上述验证结果表明,改进措施有效。

4 结论

1) 该气缸盖材质(QT400-15A)的化学成分与力学性能均符合相关技术要求,不存在因材料本身质量问题导致的失效,排除了材料化学成分超标、力学性能不足等因素对气缸盖渗水的影响。

2) 气缸盖内部存在明显的球化渣缺陷,这些缺陷在气缸盖铸造过程中形成。球化渣缺陷在发动机台架试验的循环高温、交变压力作用下,逐渐扩展并相互连接,最终形成贯穿气缸盖壁的通道。

3) 贯穿通道的形成是导致气缸盖渗水的直接原因,通道连接冷却水道与进气管道,使冷却系统中的冷却水通过通道从水道泄漏至气道,表现为发动机台架试验过程中发生渗水现象。

4) 本次研究提出的改进措施可有效减少球化渣缺陷的产生,提高成品缺陷检出率,为气缸盖及同类球墨铸铁零部件的质量控制与缺陷防治提供了切实可行的技术方案。

参考文献:

- [1] 吴波,王增全,左正兴,等.基于试验载荷谱的气缸盖失效机理仿真分析[J].汽车工程,2018,40(2):234-238.
- [2] 丁建民.柴油机关键部件热负荷影响因素分析[D].济南:山东大学,2021.
- [3] 侯桐宇.基于深度学习的船用柴油机故障诊断和预测研究[D].天津:天津理工大学,2024.
- [4] 王荣.机械装备的失效分析(续前)第8讲:失效诊断与预防技术(3)[J].理化检验(物理分册),2018,54(4):244-255.
- [5] 林水泉,胡勤,覃爱淞,等.浅谈着色渗透探伤技术[J].广东化工,2017,44(1):24-25.
- [6] 李晓莉.着色渗透探伤技术[C]//技师·传承.北京:中国铁道出版社,2011:77.
- [7] 杨富强,杨瑶,李志翔,等.x射线工业CT成像过程复杂伪影抑制方法综述[J].自动化学报,2023,49(4):687-704.
- [8] 李俊江,叶青,彭亚辉,等.几个值得研究的工业CT技术问题[C]//第十六届中国体视学与图像分析学术会议论文集:交叉、融合、创新.海口:中国体视学学会,2019:293-294.
- [9] 闫昭.不同球化处理方式对球墨铸铁冶金质量的影响[D].西安:西安理工大学,2022.
- [10] 李郴.金属材料加工工艺对冶金机械性能的影响研究[J].冶金与材料,2025,45(6):1-3.
- [11] 全国铸造标准化技术委员会.球墨铸铁金相检验 GB/T 9441—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [12] 崔霞,欧阳德来,叶志国.灰口铸铁缸体渗漏原因分析[J].失效分析与预防,2010,5(4):239-242.
- [13] 马敬仲.再谈提高原铁液质量的关键技术(1)[J].现代铸铁,2017,37(6):23-28.
- [14] 王泽华,张欣,郭道成.GB/T 9441—2021《球墨铸铁金相检验》标准解读[J].铸造,2023,72(3):333-341.
- [15] 刘鹏,甄立军,王章明,等.球墨铸铁铸件铸造技术研究进展[J].中国铸造装备与技术,2017(4):1-6.
- [16] 王建荣,宋岩.高韧性球墨铸铁气缸盖缺陷分析和解决方法[J].中国铸造装备与技术,2021,56(5):25-27.
- [17] 陈丹,桑玮玮,吴令宪,等.球墨铸铁热疲劳裂纹萌生和扩展行为研究[J].铸造技术,2018,39(2):428-432.
- [18] 朱家洲,杭恩照,吴林林,等.一种保证板式工件平行度、同轴度定位工装的设计研究[J].中国设备工程,2018(22):198-199.

Analysis of water seepage causes in the cylinder cover of a marine engine and its improvement

ZHU Mingjun¹, NI Chaojie^{2*}, LI Bing²

1. The 11th Military Representative Office of the Naval Equipment Department in Shanghai, Shanghai 200129, China;

2. Hudong Heavy Machinery Co., Ltd., Shanghai 200129, China

Abstract: To solve the problem of water seepage in the cylinder cover during the bench test of a marine engine, systematic physical and chemical inspection methods including macroscopic analysis, non-destructive testing, mechanical property testing, chemical composition analysis, SEM morphology analysis, EDS energy spectrum analysis, and metallographic analysis are adopted to analyze the causes of water seepage, the improvement measures are proposed. The results show that the presence of nodular slag defects inside the cylinder cover is the main cause of water seepage in the marine engine cylinder cover. Under the cyclic operating conditions of the engine bench test, some dense nodular slag defects form channels penetrating the cylinder head wall. By improving the casting process of the cylinder cover and adding air tightness test in the finished product inspection process, the risk of water seepage in the cylinder cover can be effectively prevented.

Keywords: cylinder cover; nodular slag; physical and chemical inspection; mechanical property analysis

(责任编辑:刘丽君)