

船舶发电柴油机缸套裂纹故障分析与预防

叶晓华, 王福秋

(青岛远洋船员职业学院职业教育学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 针对一次船舶发电柴油机发生的缸套裂纹故障, 基于导致缸套裂纹的影响因素, 结合该船发电柴油机运行情况, 对本次缸套裂纹故障进行分析, 并从维护与管理的角度提出了船舶发电柴油机缸套裂纹的预防对策。

关键词: 船舶发电柴油机; 缸套裂纹; 机械负荷; 热负荷; 液击

中图分类号: U664

文献标识码: A

0 引言

船舶发电柴油机缸套在工作过程中, 外表面与冷却水接触, 内表面与高温、高压燃气接触, 同时还对活塞的往复运动起导向作用。因此, 缸套工作过程中容易受到所接触介质的腐蚀, 并且受力极其复杂, 工作条件非常恶劣, 是发电柴油机最容易发生故障的部件之一。裂纹属于缸套的严重故障。一旦发生裂纹故障往往造成严重后果, 威胁船舶航行安全, 增加设备维护费用。^[1]

1 故障案例

某远洋散货船, 发电机为四冲程柴油机, 型号为 YANMAR-6EY18ALW, 额定转速 900RPM, 额定功率 750KW。某日上午约 9 点钟, 2 号发电柴油机运行过程中突然发生异响并停车, 致使全船停电。轮机部人员迅速到达现场对 2 号发电柴油机进行检查, 发现废气涡轮增压器压气机端有大量冷却水溢出。检查人员立即关闭 2 号发电柴油机冷却水进、出口阀及暖缸阀以减少冷却水外溢。打开该机进气总管和曲轴箱进一步检查, 发现进气总管内有大量的冷却水, 油底壳油位上涨明显。

对 2 号发电柴油机进行吊缸, 发现: 6 号缸缸套有纵向贯穿裂纹, 裂纹很长, 约有冷却水腔长度的 2/3 (见图 1); 缸套底部左右两侧均有

一块区域因敲击而缺失; 活塞仅顶部残存, 底部完全破碎 (见图 2); 缸盖进、排气阀阀杆弯曲变形, 阀座周围均有变形; 连杆发生弯曲变形 (见图 3), 该缸曲柄销出现拉伤痕迹 (见图 4)。



图 1 NO.6 缸套裂纹

Fig.1 NO.6 cylinder liner crack



图 2 NO.6 缸活塞破碎

Fig.2 NO.6 cylinder piston crushing

收稿日期: 2021—05—20

作者简介: 叶晓华 (1978—), 男, 硕士, 讲师

基金项目: 山东省职业教育名师工作室 (何法明工作室) 资助



图 3 NO.6 缸连杆变形

Fig.3 NO.6 cylinder deformation of connecting rod

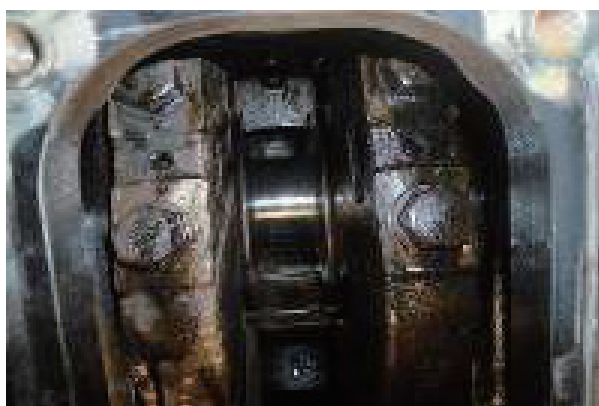


图 4 NO.6 缸曲轴轻微麻点

Fig.4 NO.6 cylinder crankshaft slightly numb

2 事故分析与故障处理

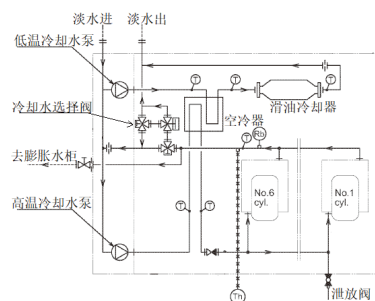


图 5 发电柴油机冷却水系统

Fig.5 Generator diesel engine cooling water system

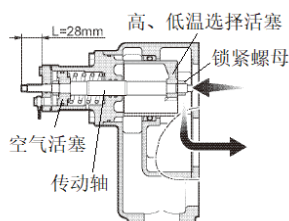


图 6 冷却水选择阀高温状态

Fig.6 Cooling water selection valve high temperature state

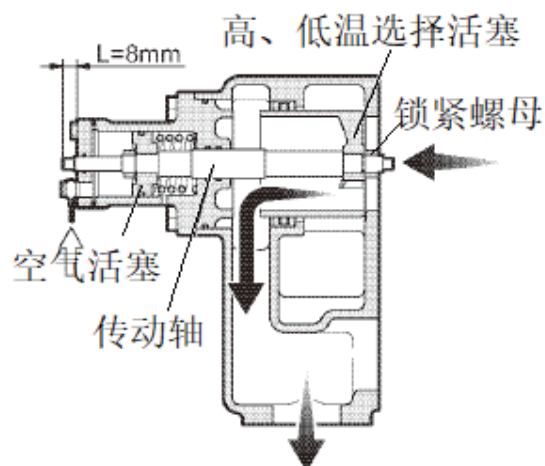


图 7 冷却水选择阀低温状态

Fig.7 Cooling water selection valve low temperature state

该轮发电柴油机冷却水系统如图 5 所示，采用高、低温冷却水系统。低温冷却水泵的冷却水用于冷却滑油冷却器和部分空冷器，高温冷却水泵的冷却水用于冷却缸套、缸盖和部分空冷器。其中，高温水系统除了设有普通调温阀外，还设有冷却水选择阀，以实现高温水的两级控制。

当发电机负荷低于 75% 额定负荷时，冷却水选择阀状态如图 6 所示。空气活塞未通入空气，阀不动作（此时阀传动轴测量杆伸出 $L=28\text{mm}$ ），流经该阀的高温冷却水重新流回高温冷却水泵入口，从而使高温冷却水设定为 $85 \pm 4^\circ\text{C}$ 。低负荷时冷却水高温运行可以有效避免低温腐蚀。而当发电机负荷高于 75% 额定负荷时，冷却水选择阀状态如图 7 所示。空气活塞通入空气，阀动作（此时阀传动轴测量杆伸出 $L=8\text{mm}$ ），流经该阀的高温冷却水流回低温淡水出口，从而使高温冷却水设定为 $60 \pm 4^\circ\text{C}$ 。高负荷时冷却水低温运行可以有效减少热负荷。



图 8 冷却水选择阀锁紧螺母丢失（圈定处）

Fig.8 Cooling water selection valve lock nut is missing (at ring)



图 9 冷却水选择阀锁紧螺母换新（圈定处）

Fig.9 Cooling water selection valve lock nut replacement
(at ring)

故障发生后，检查人员对冷却水选择阀进行了拆解，发现该阀的锁紧螺母丢失（见图 8）。当发电机高负荷工作时，该阀的高、低温控制活塞会被推至最右位（见图 7）。锁紧螺母如果丢失，则该活塞无法返回左位。这样高温冷却水只能在低温模式下工作。发电机低负荷时，同时高温冷却水又在低温模式下运行，将进一步导致缸套水温降低，大约保持在 44℃ 左右，长期未得到修复。虽然冷却水温度低，冷却效果好，但缸套内外温差会变大，热应力也随之增大，同时温度低还易引起低温腐蚀。在冷却水低温产生的较大热应力及其它负荷和应力的共同作用下，缸套产生了裂纹。裂纹的产生导致缸套水漏入气缸，活塞往复运动产生液击，从而造成了本次严重的机损事故。

调查还发现 2 号发电机滑油已运转一万多小时，未进行更换。滑油碱值低、粘度高、脏污等都会对缸套、活塞及轴瓦的润滑和冷却产生一定影响，容易引起缸套拉缸、曲轴和轴瓦腐蚀、磨损等故障。同时发电柴油机工作过程中随时会有大功率设备的启停，负荷变化大，缸套需承受较大的机械负荷和热负荷。总之，高温冷却水长期保持低温运行是导致本次故障的主要原因，滑油品质差和负荷变化大是次要原因。

故障发生后对 2 号发电机修理如下：进行了吊缸检查，更换了损坏的缸套和活塞；曲轴的麻点用油石和帆布进行了打磨修复，测量了曲轴拐挡差；更换了滑油；对冷却水选择阀重新加装了止动垫片和锁紧螺母（见图 9）。修复后，对 2 号发电柴油机进行试车检查，并车后使发电柴油机在不同负荷下运转，结果冷却水温度均在设定的范围内，压缩压力、爆压等参数均在正常范围。

3 柴油机缸套裂纹预防对策

3.1 缸套裂纹常见原因分析

缸套在高温高压下工作，受力复杂，容易引发裂纹故障，其主要原因分析如下：

3.1.1 穴蚀的影响

柴油机缸套通常为湿式缸套，外表面与冷却水接触，缸套局部受冷却水的作用容易产生蜂窝状针形孔。这种现象即为穴蚀现象。穴蚀如果进一步发展，小孔会扩大、变深，甚至产生贯穿孔和裂纹。穴蚀的形成非常复杂，包括化学腐蚀、电化学腐蚀、空泡腐蚀、冲刷腐蚀，以及各种腐蚀形式的相互作用。其中空泡腐蚀和电化学腐蚀是穴蚀的主要形式。^[2]

空泡腐蚀的主要原因是振动。筒形活塞在往复运动时会产生侧推力，在侧推力改变方向时活塞敲击缸套，使缸套产生横向高频振动，冷却水产生瞬间的高压和低压。冷却水在局部压力低至该温度下饱和压力时，迅速汽化形成汽泡。当压力骤然升高时，汽泡被压破而迅速溶解，周围冷却水迅速填充过来，造成局部冲击并产生高压和高温，致使缸套外壁因金属疲劳而剥落，逐渐产生针孔状小孔。而电化学腐蚀是由于发生原电池反应致使金属被氧化造成的。发电柴油机缸套的材料为铸铁，成分复杂，同时冷却水里溶有氧气和盐分，当冷却水处理不当时容易产生电化学腐蚀。如果电化学腐蚀与空泡腐蚀同时发生，互相促进，则腐蚀更快。

3.1.2 机械负荷的影响

机械负荷越大则产生的机械应力越大，容易引起裂纹。缸套承受的机械负荷主要是由气体力引起的。^[3] 柴油机工作过程中会产生周期性变化的气体力，变化频率取决于转速。气体力产生的机械应力属高频应力。既定缸套高频应力最大值取决于最大爆压。气体力在缸套触火面产生的切向拉应力和径向压应力均最大，而在冷却水侧产生的切向拉应力和径向压应力均最小，因而当爆压太高时，缸套触火面材料会因应力超过材料的屈服极限而产生裂纹。

3.1.3 热负荷的影响

柴油机缸套热负荷是指其所承受的温度、热流密度和热应力的强烈程度。柴油机工作过程中，循环喷油量越大，燃烧越剧烈，燃烧室部件热负荷越大，排气温度也越高，因此通常用排气温度

来直观衡量燃烧室部件热负荷的大小。热负荷产生的应力分为稳定热应力和脉冲热应力。

3.1.3.1 稳定热应力

工作过程中,缸套内壁受燃气的作用,温度较高,材料周向膨胀大;外壁因冷却水的作用,温度较低,材料周向膨胀小。由于温差的存在,缸套内外膨胀不一致,材料相互制约无法自由膨胀,致使内壁受压力,外壁受拉力。温差越大热应力越大,缸套内壁在高温和压应力的共同持久的作用下会产生蠕变。这种由于缸套温度不一致、材料的膨胀也不一致并相互制约产生的应力即为稳定热应力。^[4]

3.1.3.2 脉冲热应力

缸套所承受的脉冲热应力包括高频热应力和低频热应力。柴油机工作过程中燃烧室内气体温度周期性变化,缸套的内表面温度也随之周期性波动,从而在缸套内表面产生高频热应力。虽然高频热应力不大,且仅涉及缸套内表面很薄的一层,但也会引起材料的疲劳破坏,在缸套内表面薄层内产生网状裂纹。当柴油机运转时,缸套内壁在稳定热应力作用下产生较大压应力。压应力和高温的持久作用导致材料产生蠕变。停止运转时由于蠕变的存在,缸套会承受较大拉应力。柴油机每启停一次,缸套则承受一次压应力与拉应力的交替变化。这个与工作时间无关,只与启停次数有关的交变应力为低频热应力。^[5]低频热应力会引起材料的疲劳破坏(即热疲劳),是缸套产生裂纹的重要原因。

3.1.4 燃油燃烧状况与缸套润滑状况的影响

燃油燃烧不良会造成排温升高、燃烧室部件热负荷增加,还会引起滑油的蒸发、变质、结焦。滑油品质不佳,会导致润滑不良和气缸结碳。燃油燃烧不良和缸套润滑不佳都易引发缸套磨损、拉缸和裂纹。海事机构对商船海上事故和污染事故的统计发现,80%以上的事故是人为过失造成的。发电柴油机缸套水长期低温运行,未引起轮机员的重视,是引发本次机损事故的重要原因。正确地使用、维护设备,加强日常管理,减少人为过失是避免缸套裂纹的主要手段,而 PMS 和设备说明书是科学管理的重要依据。

3.2 预防对策

3.2.1 按要求及时、正确地进行吊缸检修

吊缸时,需严格按照说明书要求使用液压工

具上紧缸头螺栓,并在上紧过程中不断观察各个液压拉伸器的拉升距离,保证缸套受力的均匀。对缸套和活塞进行测量,保证缸套和活塞的配合间隙在允许值范围内,以减少缸套的振动。活塞环需及时换新。活塞环技术状态不佳,易引起密封不良、燃烧不良、燃气泄漏。尤其是燃气泄漏会引起气缸热负荷增加、脏污滑油,造成缸套拉缸和裂纹。

3.2.2 避免气缸超负荷运转

发电柴油机工作过程中负载波动是不可避免的,因而气缸的负荷也随之变化。气缸负荷包括热负荷和机械负荷,气缸排温高表示热负荷高,爆压高表示机械负荷高。日常管理中注意观察各缸的排温,及时测取各缸爆压,注意保持各缸负荷的均匀性。如出现个别缸排温或爆压异常,应对该缸进行检查,查明原因,及时进行调整,避免出现气缸超负荷运转的情况。

3.2.3 日常需加强对冷却、燃油、润滑等系统的监控与管理

(1) 冷却系统:冷却水温度应保持合适的范围以减少热负荷、热应力,避免低温腐蚀;及时化验冷却水,根据化验结果进行投药处理,保证冷却水的各项指标合适,以避免腐蚀缸套和产生沉积物影响缸套换热;柴油机启动后,缸套内外温差较大,约需 5 分钟才能稳定,因而启动后不要急于并电运行。^[6-7](2) 燃油系统:燃油保存时尽量避免混油以防变质;加强分油,以减少杂质;保持合适的燃油进机温度使燃油粘度在合理的范围,以减少高压油泵柱塞偶件和喷油器针阀偶件的磨损;及时检查维修高压油泵、更换喷油器喷油嘴,清洁增压器、调整气阀间隙、检查喷油定时,以保证燃油雾化燃烧质量。(3) 润滑系统:吊缸完成后,通常需要更换滑油;柴油机每运转十天,滑油通常需经分油机分油三天,以保证清洁;按要求时间间隔采取滑油油样进行化验,根据化验结果正确处理滑油。

4 结束语

缸套裂纹故障的原因很多,包括设计、制造、安装、维护管理等各个方面。其中,维护管理属于人为因素,尤为重要。科学有效的维护管理,可有效减少缸套裂纹故障的发生,延长缸套使用寿命,保证航行安全。(下转第 52 页)

enterprises, actively promote the development of the "zero-carbon" shipping industry, and create a green shipping blueprint; in the field of marine ecological carbon sinks, adhere to the concept of focusing on protection and supporting technology development to achieve negative emissions, Take a green, low-carbon and high-quality development path, seize the commanding heights of technology, strive to achieve peak carbon dioxide emissions by 2030 and carbon neutrality by 2060, actively fulfill its promises, and demonstrate the image of a responsible big country.

Keywords: green shipping; low carbon emission reduction; carbon neutrality; measure

(上接 27 页)

参考文献:

- [1] 彭陈. 船舶柴油机缸套裂纹分析与预防措施[J]. 广州航海学院学报, 2016, 24(3):10-12.
- [2] 周明顺, 崔向东, 毛宏雨. 船舶柴油机[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2019.
- [3] 张长涇. 某轮主机缸套频繁发生裂纹损坏的原因分析[J]. 天津航海, 2012, (1):8-10.
- [4] 张敬国, 崔可润, 龚齐清, 陈雁荡, 肖金生, 朱国伟. 船舶柴油机气缸套裂纹的研究[J]. 武汉交通科技大学学报, 2000, 24(2):155-159.
- [5] 李宝玉. 老龄船主机缸套裂纹原因和管理[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(S1):88-90.
- [6] 辛悦. 析某主机缸套损坏系列事故技术原因和技术管理原因[J]. 航海技术, 2013, (5): 54-56.
- [7] 杨永利. 某副机油头冷却水套故障停车实例[J]. 航海技术, 2020, (6):85-87.

Crack Fault Case of Marine Generator Diesel Engine Cylinder Liner

YE Xiao—hua, WANG Fu—qiu

(Vocational Education School, Qingdao Ocean Shipping Mariners College, Qingdao 266071, China)

Abstract: Aiming at crack fault of Marine generator diesel engine cylinder liner, the common causes of failure are analyzed from the aspects of cavitation erosion, mechanical load, thermal load, combustion quality and lubricating oil quality. Combined with the operation of the ship's generator diesel engine, the cylinder liner crack fault was analyzed. From the point of view of maintenance and management, this paper puts forward the preventive measures for crack fault of Marine generator diesel engine cylinder liner.

Keywords: marine generator diesel engine; cylinder liner crack; mechanical load; thermal load; liquid shock