

使用维修

某核电应急柴油发电机组缸盖损坏事故原因分析

卢少林¹, 熊记伟¹, 袁梅坤², 韦汉辉³, 姜 焱¹, 李改莉¹, 刘龙堃¹

(1. 西安陕柴重工核应急装备有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 成都海光核电技术服务有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518120; 3. 陕西柴油机重工有限公司, 陕西 兴平 713105)

摘 要: 针对某核电站国产核级应急柴油发电机组在出厂试验期间, 出现柴油机缸盖损坏的严重事故, 通过对事故现场进行勘探, 并结合故障树分析的方法, 对可能引起该事故的因素进行排查。结果表明: 喷油器喷孔尺寸、喷孔角度及弹簧刚度不符合图纸要求是导致事故的根本原因。

关键词: 核应急柴油机组; 缸盖; 喷油器

中图分类号: TK424.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-4357(2019)05-0047-04

0 引言

核电厂应急柴油发电机组作为全厂应急安全电源与核安全直接相关, 其作用是当核电站的厂用工作电源和辅助电源都发生故障时提供应急电源, 确保机组安全停堆和防止关键设备损坏。在保护燃料元件不受损坏和保证核安全方面发挥着非常重要的作用。^[1]

某核应急柴油发电机组在磨合试验后期, 出现排气温度高现象。在对喷油器修复后复装, 进行加负荷试验时, A2 缸气阀、缸盖、活塞顶等出现损坏现象。

1 故障描述及试验数据分析

柴油机在进行加负荷试验时, 当运行到1 000 ($r \cdot \min^{-1}$)、5 958 kW 工况时, A2 缸高压油管处突然喷出油水混合物, 机旁紧急停车。打开 A2 缸缸盖罩壳, 发现排气摇臂气阀间隙调整螺钉头部断裂, 进气阀弹簧歪斜, 进气阀阀桥导杆弯曲。

1.1 故障勘验

对该故障的发生过程、现象进行确认, 并围绕可能的故障原因制定具体的拆检方案。

1.1.1 缸盖检查

拆下 A2 缸缸盖后发现: 缸盖燃烧面严重损坏, 喷油器被击伤, 进 1 和进 2 之间被击穿, 活塞顶面已经完全烧熔, 如图 1 所示。

进一步扩检发现: A2 缸两根进气阀断裂, 进气阀 1 和排气阀 2 阀杆弯曲; 进气阀 1 和排气阀 1 导套断裂, 如图 2 所示。

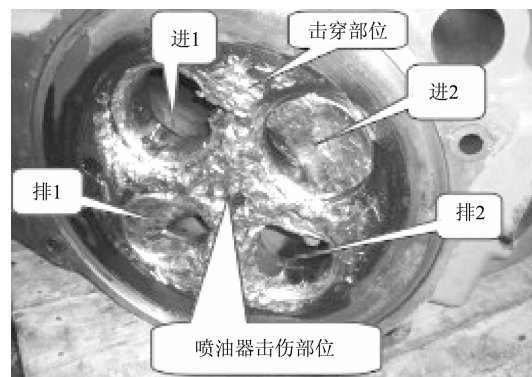


图1 A2 缸缸盖损坏后的情况



图2 A2 缸排气阀 1 和进气阀 2 弯曲

A3、B1 缸的排气阀 2 与导套也有熔着的痕迹。排气阀 2 导套孔 (爆压侧) 头部有明显积炭。各缸燃烧室内、喷油器喷嘴、阀杆及阀导套都存在积炭严重的现象。

收稿日期: 2018-10-15

作者简介: 卢少林(1987-), 男, 助理工程师, 主要研究方向为核电应急柴油发电机组的安装、调试及故障处理等, lushaolin@sx-dpse.com。

1.1.2 缸套检查

缸套拆下后发现：A3 和 B1 缸缸套内部均有很多不同深度的拉痕，如图 3 所示。同时，拆检时发现：A1、A3、A4、A5 缸缸套内表面锈蚀严重。



图3 A3 缸缸套内部有不同深度的拉痕

1.1.3 喷油器的检查

拆卸 A2 缸喷油器后发现：喷油器喷嘴、螺母损坏，喷油器连接管断裂，如图 4 所示。



图4 A2 缸喷油器严重损坏

1.1.4 异物检查

在 A、B 排增压器、进气腔、排气管内发现大量金属残留物，A2 缸缸套内也发现有金属残片，如图 5 所示。

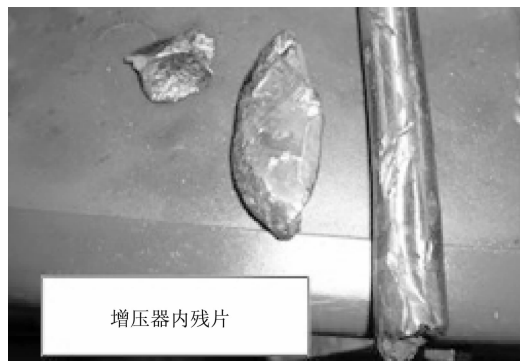


图5 增压器 A、B 两列均发现大量残片

1.2 数据分析

1.2.1 试验数据

喷油器修复前后机组运行试验数据见表 1。

表 1 喷油器修复前后机组运行试验数据

序号	参数	规定值	试验数据 (喷油器修复前后)	
		标况	修复前	修复后
1	额定功率/kW	5 958	5 958	5 958
2	最高燃烧压力/MPa	15.2 ± 0.2	14.7 ~ 15	14.9 ~ 15.1
3	平均有效压力/kPa	1 955	1 955 (计算值)	1 955 (计算值)
4	各缸出口平均排温/℃	448 ± 25	A 排 499 B 排 481	A 排 455 B 排 466
5	齿条格数/mm	25	27.5	25
6	进气压力/MPa	0.26	0.27	0.26
7	燃油消耗率/ (g · kW ⁻¹ · h ⁻¹)	205 ± 5	212.9	209.9

1.2.2 数据分析

通过以上数据对比可以得出：柴油机排气温度超出规定值 26 ℃，说明燃烧异常；柴油机齿条格数超出规定值 2.5 格，说明喷油规律异常；油耗超出规定值 3 (g · kW⁻¹ · h⁻¹)，结合喷油规律异常，说明过多的燃油喷入缸内^[2]；进气压力稍高，基本正常，因为排温高，进而增压器转速高，造成进气压力稍高^[3]。

2 故障排查与分析

2.1 建立故障树

结合勘验结果及数据分析，建立故障树，如图 6 所示。

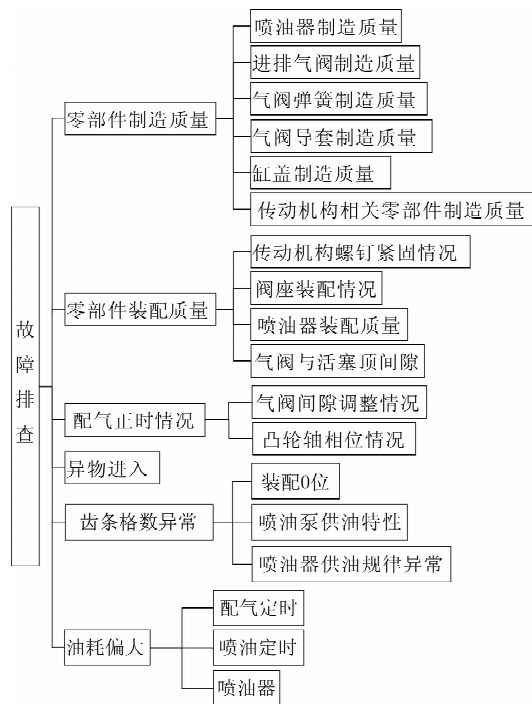


图6 故障树

2.2 故障排查

2.2.1 零部件制造质量

2.2.1.1 喷油器制造质量

(1) 喷油器性能

复查装机的18缸喷油器试验记录,启喷压力、雾化情况等均符合技术文件要求。

磨合试验完成后,拆检18缸喷油器,进行启喷压力、雾化情况标定试验,发现:起喷压力为30~32 MPa,低于图纸要求35 MPa^[4],雾化不良。说明喷油器质量不稳定。

进一步检查发现,喷油器弹簧刚度不符合图纸要求,更换18个喷油器弹簧,重新进行启喷压力试验,启喷压力符合图纸要求。装机运行3 h,再次检查启喷压力,符合图纸要求。

(2) 喷油器零部件几何尺寸

复查装机的18缸喷油器喷嘴喷孔尺寸及角度的检验记录,均满足图纸及技术文件要求。

对装机的18缸喷油器喷嘴喷孔尺寸、角度进行检查,喷孔尺寸、角度超差。

(3) 喷嘴着色探伤

对除A2缸外其余各缸喷油器喷嘴进行着色探伤,未见异常。

喷油器存在一定的雾化质量问题,不排除喷油器本身制造质量因素。

2.2.1.2 进排气阀制造质量

复查本台柴油机进排气阀检验记录,其尺寸、形位公差、材质等均符合图纸和技术文件要求。

复查进排气阀技术状态,其图纸和技术文件未发生变化;可以排除因进排气阀制造质量因素。

2.2.1.3 气阀弹簧制造质量

复查装机进排气阀弹簧的检验记录,其几何尺寸、刚度均满足图纸要求。

复检装机A1、A2、B3缸进排气阀弹簧,A2缸内弹簧长度尺寸变形较大,其余尺寸合格。可以排除进排气阀弹簧制造质量因素。

2.2.1.4 气阀导套

检查A2、A3、B1缸断裂的进、排气阀导套的化学成分,均符合图纸要求。

检验除A2缸外其余17缸进排气阀导套内孔尺寸及形位公差,均符合图纸要求。检查所有库存进排气阀导套的内、外圆的同轴度、内孔的直线度,均符合图纸要求。可以排除气阀导套制造质量因素。

2.2.1.5 缸盖制造质量

检查装机A3、B1、B9缸缸盖上的进排气阀导

套孔与阀座内孔的同轴度、平行度及与爆发面的垂直度,均符合图纸要求。

从装机的A3缸缸盖阀导套冷却水腔进行解剖检查,结果符合图纸要求。对B1缸缸盖进行流量试验,结果符合文件要求。可以排除缸盖制造质量因素。

2.2.1.6 传动机构相关零部件制造质量

(1) 挺杆

复查装机挺杆的检验记录,几何尺寸、形位公差及材料均符合图纸要求。

(2) 摇臂

检查装机A3、B1、B9缸摇臂座油孔与摇臂轴油孔及与缸盖对应油孔的贯通状况,均符合要求。检查装机所有摇臂总成安装紧固力矩,均符合技术文件要求。

(3) 阀桥

检查A1、B3缸排气阀阀桥安装情况,在缸盖上安装贴合良好,符合要求。

因此,可以排除传动机构相关零部件制造质量引起该问题的可能。

2.2.2 零部件装配质量

2.2.2.1 传动机构螺钉紧固情况

复查传动机构有关紧固螺钉的装配记录,紧固力矩均符合技术文件要求。

校验与传动机构有关的紧固螺钉的紧固力矩,符合技术文件要求。可以排除摇臂座螺钉紧固不当因素。

2.2.2.2 阀座装配情况

复查阀座的装配检验记录,均按照工艺要求,用工装安装到位。

检查装机A3、B1、B9缸缸盖上的进排气阀导套孔与阀座内孔的同轴度、平行度及与爆发面的垂直度,均符合图纸要求。可以排除阀座装配不当因素。

2.2.2.3 喷油器装配质量

复查喷油器装配检验记录,各缸喷油器压盖螺钉与喷嘴固定螺母拧紧力矩均符合图纸要求。

检查除A2缸外其余各缸喷油器压盖螺钉与喷嘴固定螺母拧紧力矩,均符合图纸要求。可以排除喷油器装配不当因素。

2.2.2.4 气阀与活塞顶间隙

该间隙理论要求为:进气阀4.7~5.2 mm,排气阀5.4~6.0 mm。

复装A3、B1缸,在活塞顶面压橡皮泥,盘车检查气阀与活塞顶最小间隙,实测值为:进气阀

4.8 ~ 5.0 mm, 排气阀 5.5 ~ 5.9 mm。

从理论计算结果及现场实际模拟结果来看, 气阀与活塞顶不可能发生干涉、碰撞。可排除气阀与活塞顶干涉因素。

2.2.3 配气正时

2.2.3.1 气阀间隙调整情况

复查装机进排气阀间隙的检验记录, 均符合技术文件要求。

检查除 A2 缸以外其余各缸气阀间隙, 均符合技术文件要求。可以排除气阀间隙调整不当因素。

2.2.3.2 凸轮轴相位情况

(1) 凸轮轴的凸轮型面

复查装机凸轮轴的凸轮型面检验记录, 符合图纸要求。

检查装机 A1 - A2 - A3 段及段凸轮轴的凸轮型面, 符合图纸要求。

(2) 气阀交叉点

复检进排气凸轮相位, 气阀交叉点位置符合图纸及技术文件要求。可以排除凸轮相位不当因素。

2.2.4 异物进入

对进气道、排气道、A2 缸内、A、B 排增压器内收集到的碎块进行材质分析, 表明: 碎块材料为进、排气阀及活塞顶材料, 未发现其它成分。可以排除外来异物进入的可能。

A3、B1 缸缸内未发现异物, 气阀也出现卡滞、弯曲现象。说明气阀弯曲不是由于异物进入引起卡滞所致。可以排除异物进入引起质量事故的可能。

2.2.5 齿条格数异常

2.2.5.1 装配 0 位

复查装配时的检验记录, 将齿条拉至 0 位, 分别检查 18 个缸喷油泵齿条, 均在 0 位。

2.2.5.2 喷油泵供油特性

复查喷油泵装配试验记录, 停油点、流量等符合技术文件要求。

2.2.5.3 喷油器供油规律异常

从机械部分排查结果看, 喷油器存在制造质量问题。由于喷油器启喷压力低、雾化质量差, 会引起喷油规律异常。引起齿条格数高的原因是喷油器弹簧刚度、喷嘴尺寸、角度不当。

2.2.6 油耗偏大

2.2.6.1 配气定时

从机械部分排查结果看, 本台柴油机的配气定时符合图纸及技术文件要求。

2.2.6.2 喷油定时

从机械部分排查结果看, 凸轮轴相位、喷油泵垫片等符合图纸及技术文件要求。

2.2.6.3 喷油器

从机械部分排查结果看, 喷油器存在制造质量问题。由于喷油器启喷压力低、雾化质量差、燃烧不良, 为保证发出相同的功率, 必须供给更多的燃油, 造成油耗大。

因此, 引起油耗偏大的原因是喷油器弹簧刚度、喷嘴尺寸、角度不当。

2.3 原因分析

2.3.1 齿条格数、油耗异常分析

由于本台柴油机喷油器喷孔尺寸、喷孔角度及弹簧刚度超差, 启喷压力降低, 雾化质量差, 供油规律异常, 过多的燃油喷入, 导致齿条格数比要求值大 2.5 mm。

2.3.2 排温高、积炭严重分析

尽管进气温度、压力均符合技术文件要求, 即进气量符合技术要求, 但由于过多的燃油喷入, 且启喷压力降低, 雾化较差, 导致空燃比异常, 燃烧不充分, 致使排气温度过高。

由于启喷压力降低, 雾化质量差, 造成燃烧不充分, 缸内及喷嘴积炭; 随着柴油机运行, 喷嘴积炭逐渐增多, 排温升高, 雾化进一步恶劣, 导致积炭更加严重。

排气温度过高, 使增压器转速上升, 从而导致进气压力增大。

2.3.3 气阀弯曲、断裂及气阀导套断裂分析

正常情况下, 柴油机工作时气阀在导套中运动, 阀盘与阀座贴合, 保证了进排气阀的运行轨迹。但本台柴油机由于喷油器制造质量问题, 造成燃烧不充分, 排温异常, 局部热负荷高, 阀杆与导套异常磨损, 积炭严重。过多的积炭在扫气过程中, 窜入气阀阀杆与导套间 (由于进气压力大于排气压力, 积炭不会进入进气阀与导套之间), 造成阀杆与导套间磨损, 由于阀杆与导套之间的间隙很小 (0.08 mm), 致使阀杆与导套干涉、粘接, 造成气阀弯曲, 进而引起气阀疲劳断裂^[5]。

从断口分析, 阀杆与导套间磨损也全部表现在排气阀与排气阀导套; 且排气阀为疲劳断裂, 进气阀为过载脆性断裂, 说明排气阀首先断裂, 随后在进气阀打开期间, 断裂的阀盘与活塞顶、进气阀发生碰撞, 进而引起进气阀断裂。也即 A2 缸排气阀首先断裂, 引起 A2 缸进气阀断裂。

(下转第 55 页)

的。在低速工况时,废气能量和增压器效率很低,小的气门升程、气门重叠角有利于提升进气能力和提升废气脉冲能量及增压器的响应性。在高速工况时,废气能量和增压器效率很高,大的气门升程、气门重叠角有利于改善扫气,进而提高进气质量,降低气缸温度,从而减少排放。

通过优化柴油机的气门升程和时面值,可有效提升柴油机低转速输出能力,改善低速合排冒黑烟和动力性差的问题。

无论是运输船或是捕捞渔船,为追求经济效益最大化(节省燃油),其柴油机常用工作转速一般设定较低(50%~60%额定转速),而高工作转速基本很少使用。而国内外柴油机产品的最佳油耗工况通常为约90%负载工况。对于非可变正时和非

可变气门升程的柴油机,确定合适的气门正时和升程是非常有必要的。

参考文献

- [1] 赵越. 车用国 V 柴油机低速扭矩性能的优化研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [2] 陈大荣. 船舶柴油机设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [3] 船用柴油机设计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [4] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [5] 张翠平, 王铁. 内燃机的排放与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

(上接第 50 页)

A3、B1 缸排气阀与导套之间也发生粘着, 气阀与活塞顶也发生了碰撞, 气阀弯曲, 但未发展到疲劳断裂。

A2 缸由于气阀弯曲、断裂, 使气阀导套受到外力作用, 导致气阀导套断裂。

2.3.4 活塞顶、喷油器喷嘴及缸盖损坏分析

排气阀弯曲、断裂发生后, 随着柴油机的运行, 断裂的阀盘部分打坏活塞顶、喷油器喷嘴及缸盖燃烧面。

2.3.5 缸内进水

复查柴油机在装配过程中水试记录, 符合要求。

该事故发生后, 由于 A2 缸缸盖被撞穿, 缸盖内冷却水进入缸内, A2 缸不工作; 随着扫气进程, 缸内积水进入 A 列排气总管。由于故障后停车及时, 运行时间很短, 积水只进入相邻的 A1、A3、A4、A5 缸, 造成这些缸套内表面锈蚀。

2.3.6 喷油器连接管断裂分析

气阀弯曲、断裂后, 随着柴油机的运行, 断裂的碎片在缸内自由运动, 致使喷油器受到外力冲

击, 最终导致喷油器压块螺栓扭曲变形、压块端面损伤、喷油器连接管断裂。

3 结论

综上分析, 引起该故障的主要原因是喷油器喷孔尺寸、喷孔角度及弹簧刚度不符合图纸要求。对此应引起足够重视, 采取合理措施加以解决。

参考文献

- [1] 广东核电培训中心. 900 MW 压水堆核电站系统与设备 [M]. 北京: 原子能出版社, 2009.
- [2] 蒙绪武. 柴油机排气温度过高的原因分析和解决措施 [J]. 船舶工程, 2003 (6): 37-38.
- [3] 李斌. 船舶柴油机 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2010: 156-177.
- [4] 陕西柴油机重工有限公司. PA6BSTC08.03 维修说明书 [R]. 2008.
- [5] 廖铁勇, 杨建新. 某轮主机排气阀损坏事故浅析 [J]. 天津航海, 2002 (1): 19-22.