

使用与维修

关于 12V PA6-280 型柴油机连杆瓦故障分析及改进措施

张旭峰, 王金亭, 仇立兵, 沈 彪

(上海船用柴油机研究所, 上海 200090)

摘 要: 针对某船的 12V PA6-280 型柴油机在使用过程中出现的连杆瓦碎裂、活塞拉缸、活塞顶群分离、曲轴出现裂纹等故障, 在分析故障发生前柴油机使用和保养情况的基础上, 对可能引起故障的原因进行了逐一排查。排查结果表明: 轴瓦减磨层钢背存在微裂纹, 且连杆瓦瓦背与连杆大端孔贴合不紧密, 在使用过程中产生微动磨损和疲劳破坏, 最终导致瓦背断裂。据此提出了相关维修保养建议。

关键词: 柴油机; 连杆; 曲轴; 拉缸; 裂纹

中图分类号: TK423.3; TK428 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-4357(2021)04-0054-04

Fault Analysis and Improvement Measures of the Connecting Rod Bush on a 12V PA6-280 Diesel Engine

Zhang Xufeng, Wang Jinting, Qiu Libing, Shen Biao

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: Aiming at the failure of a 12V PA6-280 marine diesel engine, including broken connecting rod bush, piston scuffing, separation of piston crown unit, crankshaft crack, etc., based on the analysis of the use and maintenance condition of the diesel engine before failure, the possible causes of the failure were investigated one by one. The investigation results show that there were micro-cracks on the steel back of the wear reducing layer of the bearing bush, and the back of the connecting rod bush didn't fit tightly with the big end hole of the connecting rod, resulting in fretting wear and fatigue damage during operation, which eventually led to the fracture of the back of the bearing bush. Based on this, the relevant maintenance suggestions are put forward.

Key words: diesel engine; connecting rod; crankshaft; scuffing; crack

0 引言

PA6-280 为一款中高速船用推进柴油机, 现广泛应用于国内外各类船舶。某船两台 12PA6-280 柴油机为 1991 年出厂, 最近一次等级修理是 2017 年起至 2018 年 3 月在修理厂进行的中修。2018 年 3 月结束修理, 交付使用。2019 年 5 月 22 日, 其中一台柴油机(右主机)发生连杆瓦碎裂、活塞拉缸、活塞顶群分离、曲轴出现裂纹等故障, 本文通

过系统排查的方法对故障进行排查, 定位故障原因, 并给出相应的改进措施。

1 故障情况描述

1.1 故障过程及现象

2019 年 5 月 22 日 17 时 25 分, 右主机从进二(680 r/min)加速至进三(820 r/min), 在接近 820 r/min 时, 主机振动、噪声加剧, 随即发生巨响, 主机外侧防爆门弹开, 有蓝色浓烟冒出。操作人员紧

急停车，开启主机备用电动滑油、齿轮箱滑油预供泵、备用电动淡水泵和备用海水泵，并进行点动盘车（此时并无卡滞现象），直至主机逐渐冷却。

1.2 检查文件和维修检查记录

检查文件和维修检查记录主要包括：（1）右主机履历簿；（2）两台推进主机中修时的修理方案；（3）PA6-280 型柴油机修理相关标准；（4）右主机修理过程中的检验、测量记录；（5）右主机修理过程中更换件的清单和合格证；（6）滑油油样化验报告，故障前后各一份；（7）故障发生时刻右主机热工参数记录；（8）中修结束后的试航记录（主机相关记录）；（9）PA6 柴油机的连杆、连杆螺栓及连杆瓦的图纸和技术要求；（10）生产厂连杆组件的部装工艺要求。

2 故障原因分析

2.1 初步勘验

经过初步拆检发现：

（1）右主机 B1 缸活塞顶群分离，四根顶群连接螺栓断裂，活塞侧壁严重划伤，缸套内壁严重划伤并有金属粘连。

（2）右主机 B1 缸连杆大端上下轴瓦颠倒，上轴瓦局部碎裂。

（3）右主机第一档曲柄销位置出现龟裂性裂纹缺陷，长度约 1/4 周长，深约 0.3 ~ 4 mm，已无修磨余量（中修后测量周长为 209.985 mm，新曲轴为 210 mm；根据 PA6-280 型柴油机修理相关标准的规定，曲柄销修理磨损极限为 $\Phi 207.81$ mm）

初步拆检零部件如图 1 所示。

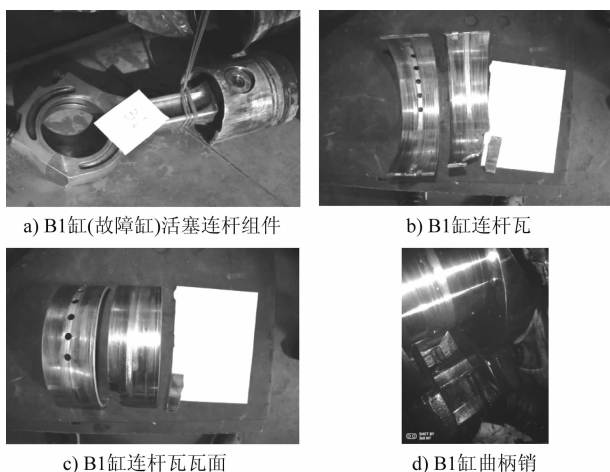


图 1 拆检零部件

2.2 故障前右主机使用和保养情况

截至故障发生时，右主机累计运行 25 289 h，自 2018 年 3 月中修出厂后累计运行时间 3 094 h。

两台推进主机在最后一次中修前累计运行时间分别为 21 786 h（左机）和 22 091 h（右机），距上次中修间隔时间分别为 16 410 h 和 16 370 h，距上次小修间隔时间分别为 6 321 h 和 6 351 h。根据专利方规定，按照 PA6-280 型柴油机修理相关标准中的“中修”级别进行修理。

查阅修理厂 2016 年编写的关于该船中修的修理技术方案、修理质量证明书——系泊试验航行分册及 PA6-280 型柴油机修理相关标准，两台推进主机修理范围和项目符合标准要求。试航中两台推进主机最大工况达到 936 r/min，约 82% 负荷，各项热工参数均在正常范围内，可满足该船的使用要求。

2.3 故障原因排查

针对故障现象及右主机运行情况，初步分析认为：柴油机振动加大、噪声加剧为活塞拉缸及活塞顶裙螺栓拉断所致；随即发出的巨响为外侧防爆门弹开的声响；曲轴箱内冒出蓝烟和防爆门弹开是由于拉缸导致活塞环与缸套密封不严，吸气行程机油吸入气缸后燃烧，在做功和压缩行程废气和空气排入油底壳，导致曲轴箱压力过大，防爆门弹开，冒出蓝烟。可以初步判断故障是由 B1 缸活塞严重拉缸造成。为最终查明活塞拉缸原因，建立了故障树（图 2），进行进一步排查。

2.3.1 活塞与缸套间温度过高

（1）故障发生时，主机正从 680 r/min 加速至 820 r/min，约 70% 负荷，可排除因整机热负荷过大导致故障的可能。

（2）对 A2、B2、A6、B6 缸活塞连杆组件进行拆检，并且查阅该机所使用批次的缸套的验收记录：缸套内表面的精度和光洁度以及形状（锥度和椭圆度）均在标准要求范围内，因此可排除因缸套内表面的精度、光洁度和形状超差引起故障的可能。

（3）右主机在故障前正常运行时间较长，且对故障缸（B1）缸套与活塞的检查显示：拉缸的磨痕并无明显偏差，各方向磨痕均严重，可基本排除活塞安装偏移导致故障的可能。

（4）检查右主机运行记录中的最高燃烧压力记录，如表 1；并抽检 A3、B3、A4、B4、A5、B5 缸中最高燃烧压力最高与最高燃烧压力最低缸的活塞连杆组件。结果各缸最高燃烧压力均不超标，且满足各缸最高燃烧压力与平均值之差 ≤ 0.5 MPa 的要求，且此次最高燃烧压力测量后至故障发生前，单缸温度等相关指标未发生明显变化，因此可以排

除由于最高燃烧压力过大导致故障的可能。

表 1 最高燃烧压力记录

气缸号	最高燃烧压力/MPa	气缸号	最高燃烧压力/MPa
A1	10.5	B1	10.8
A2	10.5	B2	10.5
A3	10.9	B3	11.0
A4	11.1	B4	10.6
A5	11.5	B5	10.5
A6	10.8	B6	11.0

注：测量日期：2019 年 4 月 4 日；主机转速 800 r/min。

(5) 查看故障前右主机运行数据，滑油进机压力在正常范围内；对滑油进行取样分析，滑油品

质满足柴油机使用要求。

(6) 检查活塞冷却滑油道。初步拆检发现：连杆大端上下轴瓦颠倒，翻转后的连杆瓦遮蔽了曲轴销至活塞冷却油和活塞销润滑油的通道，即此时活塞顶无冷却滑油。当活塞顶过热膨胀，膨胀量大于活塞顶与缸套间的间隙后，会导致活塞顶与缸套发生剧烈摩擦，进而发生拉缸；过大的摩擦力导致活塞顶裙连接螺栓在拉缸过程中一次性过载断裂。因此可推断连杆瓦失效是导致活塞严重拉缸的原因^[1]。

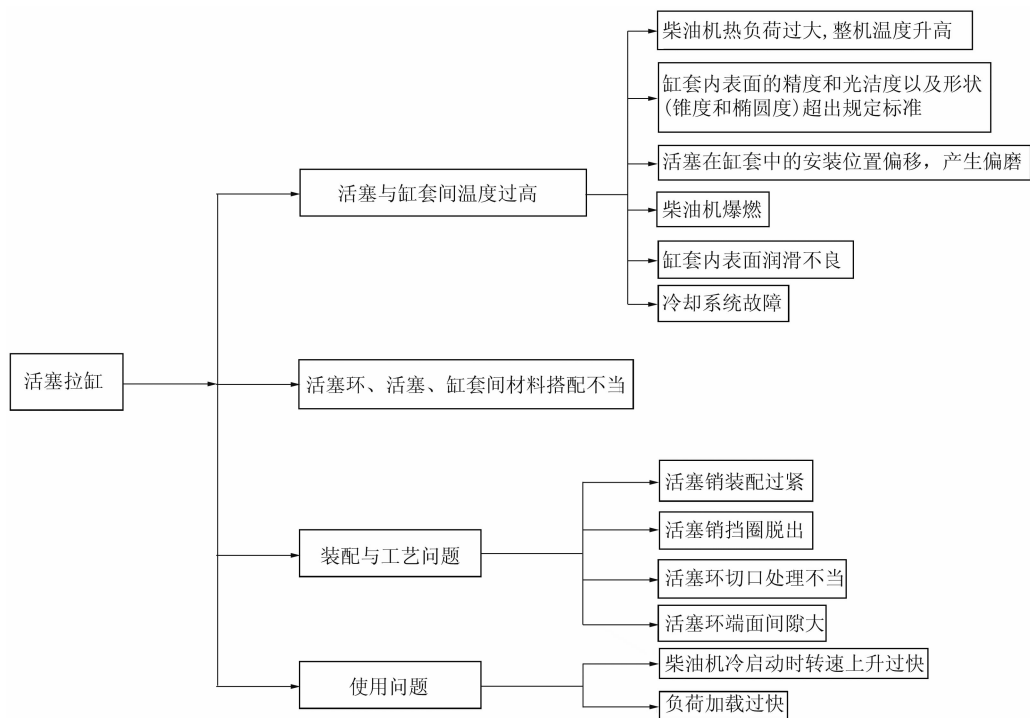


图 2 故障树

2.3.2 活塞环、活塞、缸套间材料搭配不当

查看右主机所使用的活塞环、活塞、缸套的批次号，修理更换的活塞环、活塞、缸套材料均符合该机型使用要求。

2.3.3 装配工艺与使用问题

检查故障缸的活塞连杆组件，活塞销状态正常；抽检非故障缸及备件，活塞环切口合理，间隙良好，毛刺及外圆表面粗糙度符合技术要求^[2]。

查阅故障前数据，故障发生时右主机已热机并良好运行，并不存在冷启动转速上升过快或负荷加载过快的情况。

2.4 进一步拆检与分析

为了进一步查明故障原因，针对连杆瓦失效导致故障的可能，对柴油机其他缸和故障件做进一步

拆检。

2.4.1 拆检情况

(1) 对各缸连杆大端孔进行目检，孔内均有喷丸工序后留下的麻点痕迹。B1 缸为故障缸，在连杆大端孔内有轴瓦翻转时留下的痕迹，相邻的 A1 缸连杆大端端面上也有摩擦痕迹，其他缸均正常。

(2) 各连杆瓦瓦面跑合情况良好，仅在 11 点~1 点方向（对应缸压最大的位置）有轻微的磨损，各连杆瓦背状态良好。

(3) 抽检 7 个缸的连杆瓦贴合度时，发现 5 个缸贴合度不足 80%。

(4) 对活塞顶螺栓的断口进行失效分析。宏观分析发现：断裂位置位于螺栓杆部，该处存在明显塑性变形，断面有碰伤迹象，断口可见剪切唇。

微观分析发现：断口损伤严重，不过未损伤的区域呈韧窝形貌特征。断口宏观、微观形貌如图 3 所示。从以上分析可知，活塞顶连接螺栓是在受到较大外力下被一次性拉断。

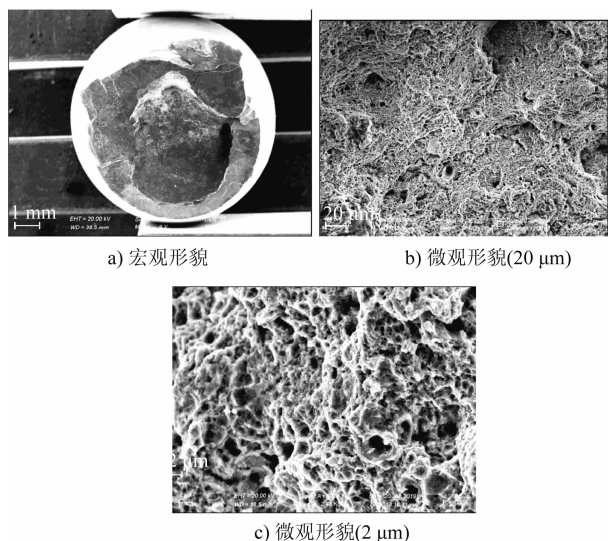


图 3 连接螺栓断口宏观、微观形貌

(5) 对 A1 缸连杆瓦及两个连杆瓦备件进行黏着力试验。镀层能谱及金相检验结果显示：轴瓦内侧镀层表面无脱落及开裂现象；轴瓦镀层与钢背结合良好，镀层间结合良好。

(6) 对 B1 缸故障位置的连杆瓦进行断口微观分析，发现：上轴瓦断口存在较大磨损区，在未磨损区存在疲劳辉纹；下轴瓦裂纹源位于轴瓦内表面铜合金上，内表面铜合金断口存在疲劳辉纹，相邻断口存在疲劳辉纹，如图 4 所示。

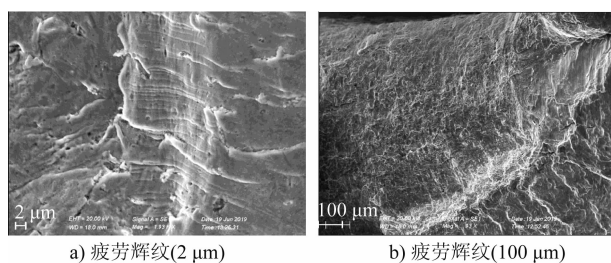


图 4 轴瓦断口处的疲劳辉纹

2.4.2 故障分析

(1) 连杆瓦失效导致连杆瓦与曲轴销表面发生剧烈摩擦；当瓦面摩擦力大于连杆瓦瓦背与连杆大端孔之间的摩擦力后，致连杆瓦在连杆大端孔中翻转；翻转后的连杆瓦遮蔽了曲轴销至活塞冷却油和活塞销润滑油的通道，活塞顶处无滑油冷却，导致活塞顶过热膨胀；当膨胀量大于活塞顶与缸套间的间隙后，活塞顶与缸套发生剧烈摩擦，进而导致拉缸；过大的摩擦力致使活塞顶裙连接螺栓一次性过载断裂。

(2) 而连杆瓦失效的原因是轴瓦减摩层底部钢背处存在微裂纹，且连杆瓦瓦背与连杆大端孔未紧密贴合，存在空隙；右主机工作时连杆瓦不断振动，产生微动磨损和疲劳损坏，并随着运行时间的推移不断扩展，直至瓦背发生断裂。

3 结论

综合分析，本次故障的根本原因系 B1 缸连杆瓦失效。而 PA6-280 型柴油机修理相关标准中未对连杆大端不带轴瓦时的孔径、连杆瓦与连杆大端孔的贴合度提出着色检查的要求。基于上述故障分析，建议 PA6 主机进厂维修保养时增加上述检验工序，以避免类似故障发生。

参考文献

- [1] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京：机械工业出版社，2005.
- [2] 陕西柴油机有限公司，PA6 系列柴油机维修手册 [R]. 2008.