

使用维修

某型大功率柴油机缸套异常磨损分析

孙志宏, 赵建平, 窦振寰, 王江坤, 高向花

(陕西柴油机重工有限公司, 陕西 兴平 713105)

摘要: 针对某型大功率柴油机缸套异常磨损故障, 结合该型柴油机工作及结构特点, 对可能引起缸套异常磨损的因素, 如零部件制造质量、装配质量、试验条件、清洁度等进行逐一排查, 并进行综合分析。结果表明: 该型机缸套异常磨损系上述因素综合作用导致。在此基础上提出了针对性改进措施, 并取得了较好效果。

关键词: 大功率柴油机; 缸套; 磨损

中图分类号: TK423.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-4357(2020)01-0056-05

Analysis on Abnormal Wear of the Cylinder Liners of a Type of Large Power Diesel Engines

Sun Zhihong, Zhao Jianping, Dou Zhenhuan, Wang Jiangkun, Gao Xianghua

(Shaanxi Diesel Heavy Industry Co., Ltd., Shaanxi Xingping 713105)

Abstract: Aiming at abnormal wear of the cylinder liners of a type of large power diesel engines, combined with the working and structural characteristics of this type of diesel engines, the factors that may cause abnormal wear of cylinder liners, such as quality problems of parts manufacturing, the assembly quality, test conditions, cleanliness were investigated one by one. Comprehensive analysis was carried out and it showed that abnormal wear of the cylinder liners was caused by combined function of the above mentioned factors. The improvement measures were put forward based on the research, and achieved good results.

Key words: large power diesel engine; cylinder liner; wear

0 引言

某型大功率柴油机系 20 世纪 90 年代从德国引进, 为 V 型 20 缸双涡轮增压柴油机, 涡轮增压器布置在 V 型夹角内。该机应用于多国海军的主力作战舰艇以及核电应急发电机组。该型柴油机属于高速柴油机, 具有体积小、功率重量比大的特点。由于转速高、结构紧凑, 在高工况运行时, 气缸内的工作条件相对其它机型更为恶劣, 发生缸套异常磨损的概率较高, 对柴油机造成的直接和间接伤害较大。

1 故障描述

2017 年至今, 共有 11 台该型大功率柴油机在

台架试验过程中发生缸套异常磨损故障。从故障情况看: 活塞裙无明显异常; 主要为缸套与活塞环磨损, 缸套与活塞顶磨损。

1.1 缸套与活塞环磨损

11 台缸套异常磨损柴油机中, 5 台 (12-4#、15-3XF、17-1#、17-4#、17-6#) 缸套磨损部位对应的活塞环发生了异常磨损, 如图 1~图 2 所示。

1.2 缸套与活塞顶磨损

11 台缸套异常磨损柴油机中, 6 台 (17-5#、17-6#、17-7#、17-8#、18-1#、18-2#) 缸套磨损部位对应的活塞顶发生了异常磨损。磨损部位在活塞顶部第一道环槽上部 3 mm 宽外圆表面; 活塞顶磨损部位对应方向的活塞裙开档处均有磕碰痕迹; 活

收稿日期: 2019-01-21; 修回日期: 2019-03-20

作者简介: 孙志宏(1970—), 高级工程师, 主要研究方向为柴油机技术管理、研发及设计改进, 940759086@qq.com。

塞裙部开档相应一侧存在运行干涉痕迹。如图 3 ~ 图 4 所示。

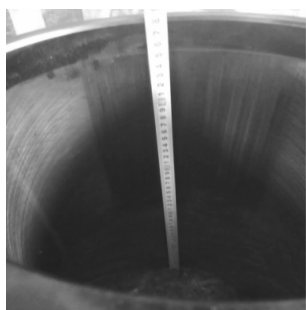


图 1 M562017004#柴油机 B6 缸缸套



图 2 M562017004#柴油机 B6 活塞

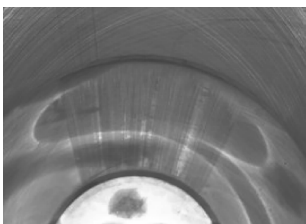


图 3 M562017005#柴油机 A5 缸缸套



图 4 M562017005#柴油机 A5 缸活塞顶

1.3 缸套异常磨损分布情况

缸套异常磨损部位主要分布在活塞销方向，除 17-6#的 B3 缸和 18-2#的 A8 缸的自由端和输出端方向均异常磨损外，其余缸套只偏向自由端或输出端某一侧，如图 5 所示。

2 缸套异常磨损可能因素

该型柴油机活塞连杆机构如图 6 所示。活塞与缸套由顶环、两道气环和油环密封。活塞环、活塞顶、活塞裙与缸套构成了重要的摩擦副，其润滑方

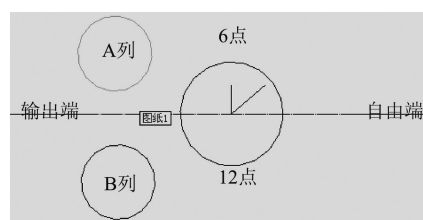


图 5 缸套磨损部位示意图

式为飞溅润滑，通过活塞环向上泵油并通过油环将滑油刮回油底壳。来自活塞冷却油道的滑油从活塞裙底部进入活塞顶进行冷却，降低活塞顶的热负荷和热变形。活塞往复运动过程中，在垂直于曲轴方向与缸套存在侧推力作用。

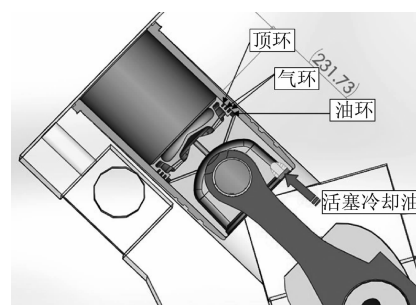


图 6 某型大功率柴油机活塞连杆结构示意图

从故障现象看，故障可能与连杆、活塞裙发生干涉，或缸套与活塞的配合以及试验油水温度等试验条件有关。根据缸套异常磨损可能原因，建立如图 7 所示的故障树，并进行逐一排查。

3 缸套异常磨损原因排查

3.1 零部件质量

(1) 活塞环。该型柴油机所使用的活塞环一直为专利方进口件。检测故障缸及库存的顶环、气环和油环型线，均符合技术要求。检测故障缸及库存的活塞环镀铬层深度，均符合技术要求。

(2) 活塞。自 2000 年该型柴油机国产化以来，17-8#柴油机其活塞的技术状态一直未发生变化。但 17-8#柴油机活塞顶型线有所改变。除活塞顶型线外，其余与专利方技术状态一致。活塞材料使用专利方认可的中德对照材料。

检查故障缸活塞顶环槽高度和宽度、活塞顶裙同轴度，未发现异常。同时，针对 17-8#柴油机，解剖了发生异常磨损的 A5 缸活塞顶，检查其化学成分、材料金相组织和机械性能，均符合相关技术文件规定。

根据专利方的意见：活塞顶第一道环槽上部 3 mm 应为椭圆。而国产活塞第一道环槽上部 3 mm 宽为柱面；上部型线为变椭圆结构，长轴为垂直于

活塞销方向，短轴为活塞销方向。活塞销方向 3 mm 宽的柱面与变椭圆型线交界处存在小台阶。如图 8 活塞顶间隙示意图所示，活塞顶与缸套最小配合间隙也在此区域，与活塞顶磨损部位一致。从 17-8# 开始，根据专利方意见，将活塞顶第一道环

槽上部 3 mm 宽加工为椭圆，并消除台阶。此后 17-8#、13-1# 和 13-2# 再未出现异常磨损；但 18-1# 和 18-2# 仍有缸套异常磨损情况。说明活塞顶第一道环槽上部 3 mm 宽加工为圆柱是缸套异常磨损的可能因素之一。

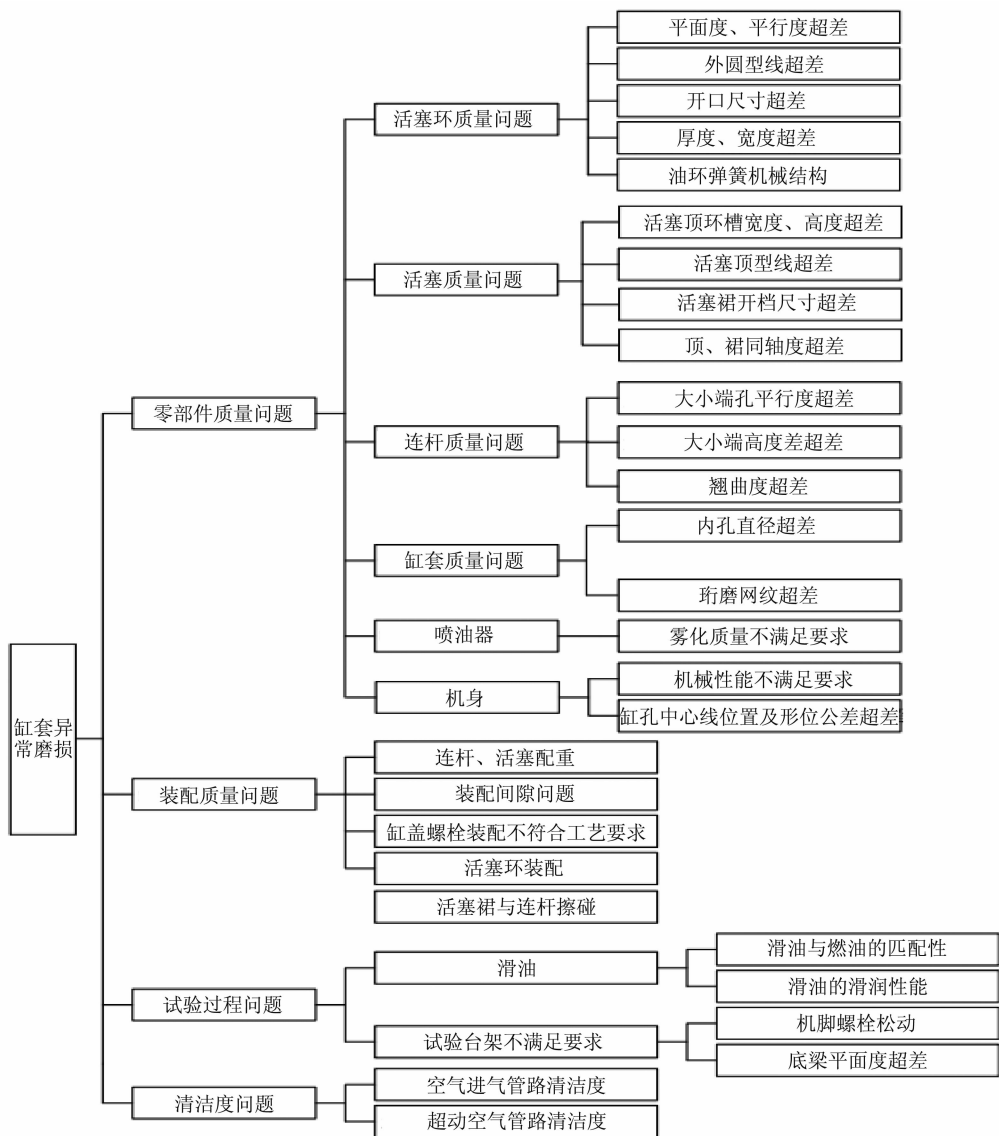


图 7 故障树

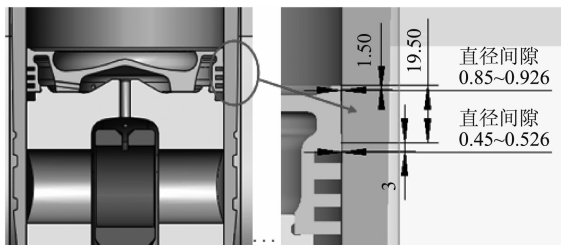


图 8 活塞顶间隙示意图

(3) 连杆。检查故障缸连杆的大小端孔平行度、大小端孔高度差和连杆翘曲度，均符合图纸要求。

(4) 缸套。检查磨损缸套未磨损部位的内径，均符合图纸要求，抽检库存三个新缸套的珩磨网纹，未发现异常。

(5) 机身。①机械性能。该型柴油机机身按照专利方图纸和技术文件执行。中国对应材料为 QT500-7；机身铸件试样要求：延伸率 $\geq 7.0\%$ ，抗拉强度 500 N/mm^2 ，硬度 $160 \sim 240 \text{ HBW}$ 。而专利方对机身铸件试样的延伸率要求为 $\geq 3.0\%$ 。从统计结果看：延伸率 $\geq 7.5\%$ 的机身，出现缸套异常磨损现象的概率较大。从对 2017 年至今新装柴油机缸盖安装面硬度的统计结果来看：机身硬度低于

210 HBW 的柴油机出现缸套异常磨损的概率较大。
②缸孔尺寸及形位公差。复查了 17-1#至 18-2#机身缸孔直径和圆度,均满足图纸要求。机身缸孔垂直度、上下缸孔同轴度等形位公差由机床加工精度保证,而经检测机床精度满足机身加工要求。

(6) 喷油器雾化质量。前期故障排查结果:缸套异常磨损的喷油器起喷压力和雾化质量符合技术要求。

3.2 相关零部件装配质量

(1) 缸套与活塞顶配合间隙。统计了 2017 年至今柴油机缸套与活塞顶装配间隙,未发现缸套异常磨损与配合间隙有明显对应关系。

(2) 机身缸孔与缸套配合间隙。统计了 17-5#机至 18-2#机发生异常磨损的缸套的上缸孔配合间隙,均为过盈配合,与未发生缸套异常磨损的 18-3#相比,过盈量趋势一致。

(3) 活塞环装配。未发现活塞环装反情况。

(4) 活塞、连杆配重。根据统计结果,连杆及活塞连杆组重量分布较均匀,向技术要求的中间值靠拢。

(5) 缸盖螺栓拧紧均匀性。经复查,缸盖螺栓的拧紧顺序及力矩均符合技术要求。

(6) 活塞裙与连杆擦碰。经理论计算与工装检查,活塞裙与连杆小端不存在干涉可能。

3.3 试验条件检查

(1) 滑油与燃油匹配性。该型柴油机使用 CD30、CD40 滑油及-10#军用柴油。复查发生缸套异常磨损的柴油机的油水分析报告,其滑油 TBN 值满足技术要求。

(2) 滑油润滑性能。复查入厂滑油的检验报告,结果显示润滑性能满足技术要求。

(3) 地脚螺栓。检查过程中发现:地脚螺栓均未做扳紧标记。

(4) 试验台架导轨。检查中发现:若柴油机上、下台架的交替时间较短,通常不会再次调整导轨的平行度、平面度。

3.4 清洁度

在排查过程中发现:该型柴油机起动空气管路未安装有效的过滤装置,存在异物进入气缸的风险。

4 故障原因分析

4.1 缸套与活塞顶磨损

柴油机正常运转时,活塞在缸内做往复运动,只有活塞环与缸套接触。在活塞环机械性能及缸套

均未发现异常的情况下,活塞顶与缸套磨损最可能的原因为活塞与缸套之间的配合间隙过小。根据上述排查情况,导致活塞与缸套配合间隙过小的原因主要有以下三方面。

(1) 装配间隙

装配间隙包括:活塞与缸套间隙以及缸套与机身缸孔的配合间隙。该型柴油机缸套与机身缸孔为过渡配合,实物状态基本都呈过盈配合状态。由于机身缸孔圆周方向为不对称结构,在过盈情况下缸套受力后存在椭圆形变。分析认为,工作过程中燃烧压力的作用会加剧缸套的椭圆形变,使活塞与缸套在活塞销方向的配合间隙更小。这与专利方活塞顶型线在活塞销方向为椭圆短轴的设计相一致。

正常情况下,活塞顶与缸套为间隙配合。如果活塞与缸套配合间隙偏小,且缸套与机身缸孔过盈量偏大,则在工作过程中,随着负荷增加,活塞与缸套在活塞销方向的配合间隙变小甚至发生接触,导致活塞顶在活塞销方向与缸套发生异常磨损。

(2) 机身机械性能

该型柴油机机身薄壁铸件,对机身的机械性能要求极高,尤其是延伸率和硬度,反映了机身的刚度。专利方技术文件规定机身延伸率 $\geq 3\%$,而国产化以来按 QT500-7 执行,延伸率要求 $\geq 7\%$ 。延伸率增大会导致硬度相应下降,导致机身刚度降低。当缸套与机身缸孔处于相同的过盈量情况下,缸套椭圆形变将增大,导致活塞与缸套间隙均发生变化,最终引发缸套异常磨损。

(3) 台架

柴油机在高速运转过程中,若台架地脚螺栓松动,其振动频率及振动瞬时方向都会受到极大影响。活塞在缸内会出现不规则的偏离原始运动轨迹的现象,从而导致缸套异常磨损。

4.2 缸套与活塞环异常磨损

在活塞环机械性能、缸套以及活塞顶冷却均未发现异常的情况下,缸套仅与活塞环发生磨损,只可能是润滑不良所致。根据排查结果,可能造成活塞环与缸套润滑不良的因素,除了缸套配合间隙、机身机械性能外,还与清洁度以及滑油润滑性能有关。

(1) 清洁度

清洁度问题一直是缸套异常磨损的一个不可排除的因素。异物进入气缸后,破坏了附着在缸壁上的连续油膜,导致活塞环与缸套间发生破坏性摩擦。由于活塞环的转动和活塞往复运动,磨损被进一步扩大,从而导致大范围的缸套与活塞环异常磨

损现象。

在排查过程中发现：起动空气进气管路未安装有效的过滤装置，故清洁度问题是导致缸套异常磨损的可能一个因素。

(2) 滑油润滑性能

在柴油机运行初期，摩擦副各间隙，尤其是活塞与缸套间隙，相对于柴油机运行至中、后期时的摩擦副各间隙，明显更小。因此，在滑油压力有保证的前提下，流动性好的滑油更加适合运行初期的柴油机使用。在间隙较小的情况下，流动性好的滑油能够更加迅速、有效地建立起润滑效果更好的油膜。在活塞高速运动时，该油膜不容易出现间断，从而减小了因润滑不良而发生缸套异常磨损的可能性。因此，在柴油机运行初期，CD30 滑油要比 CD40 滑油更加适用。

5 改进措施

基于对以上引发故障的可能因素的分析，提出

(上接第 55 页)

结合机械部分排查结果，喷油器存在制造质量问题。由于喷油器起喷压力低、雾化质量差，燃烧不良，导致排温及油耗偏高。

3.2.2 零部件装配质量

复查缸盖垫片厚度及喷油器调整垫片厚度，均符合图纸要求。

3.2.3 配气正时排查

从机械部分排查结果看，配气正时符合图纸和技术文件要求。

综合试验数据排查结果：喷油器质量问题是导致排温及油耗过高的主要因素。

4 故障原因分析

根据排查结果：喷油器喷孔尺寸、喷孔角度及弹簧刚度不符合图纸要求，造成起喷压力低，燃油雾化质量差，过多燃油喷入缸内，致使排温高、供油齿条格数偏大、油耗高、积炭严重。过多的积炭

以下改进措施：

(1) 在满足产品图纸要求下，内控活塞顶外圆尺寸，增大活塞顶与缸套的配合间隙；

(2) 在起动空气管路上增加空气过滤装置，保证进入缸内气体的清洁度；

(3) 针对台架底梁的地脚螺栓，要求在螺栓扳紧后做刻线标记，定期检查刻线的对齐情况；

(4) 柴油机台架就位前检查台架导轨平行度和平面度，台架两导轨的平行度控制在 0.20 mm/全长以内；

(5) 参照专利方技术标准，降低延伸率要求，在满足技术要求的前提下，提高机身缸盖座面的硬度至 210 HBW 以上；

(6) 磨合与交货试验均使用 CD30 滑油。

实施上述改进措施后，后续多台柴油机均未出现缸套异常磨损故障。

在扫气过程中窜入排气阀阀杆与导套间（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；且由于阀杆与导套之间的间隙很小（0.08 mm），致使阀杆与导套发生干涉、粘接，导致排气阀弯曲，进而引起排气阀疲劳断裂。从断口分析看，阀杆与导套间的磨损也全部发生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，排气阀断裂后，阀盘在气缸内自由运动，导致 A2 缸活塞顶、缸盖燃烧面、进气阀、喷油器喷嘴、喷油器连接管等零部件损坏。

5 结论

综上所述，导致 PA6B 柴油机进排气阀断裂的原因为喷油器制造存在质量问题。排气阀断裂后引起 A2 缸活塞顶、缸盖燃烧面等零部件损坏。更换合格的喷油器及相关损坏的零部件后，故障消除。