

结构与可靠性

柴油机凸轮副接触疲劳失效分析

陈祎博, 屠丹红, 宋雅丽

(中船动力研究院有限公司, 上海 200120)

摘 要: 针对某型船用柴油机配气凸轮机构凸轮副接触疲劳失效, 从生产、加工质量着手, 采用化学成分及机械性能分析、硬度检测、电镜扫描等手段排查材料是否存在缺陷; 基于设计仿真分析凸轮滚轮的接触应力以及影响因素。结果表明: 挺柱体导向块间隙过大, 改变了凸轮与滚轮的接触状态, 使其接触应力超过材料的疲劳极限是导致凸轮副疲劳失效的根本原因。

关键词: 凸轮副; 疲劳失效; 接触应力; 挺柱

中图分类号: TK423.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)04-0026-04

Contact Fatigue Failure Analysis on the Cam-Pair of a Diesel Engine

Chen Yibo, Tu Danhong, Song Yali

(China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200120)

Abstract: Aiming at the contact fatigue failure of the cam-pair of a diesel engine's valve cam mechanism, focusing on its processing quality, inspections were carried out with the analysis of chemical composition and mechanical performance, hardness measurement, and electron microscope scanning to judge if the material has flaws. Simulation analysis was carried out to study the contract stress of the cam and the roller and its influence factors. The results showed that the guide block of the tappet had excessive clearance, which changed the contact status of the cam and the roller, thus made its contact stress go beyond the fatigue limitation of this material, which was the main reason for fatigue failure of cam-pair.

Key words: cam-pair; fatigue failure; contact stress; tappet

0 引 言

配气机构是发动机的重要组成部分, 其设计的优劣直接影响发动机的动力性、经济性和可靠性。凸轮与滚轮作为配气机构的一对敏感摩擦副, 随着发动机强化指标的不断提高, 其工作条件愈发苛刻, 导致摩擦副表面易发生磨损, 进而影响整个配气机构的工作精度^[1]。本文针对某型船用柴油机凸轮与滚轮异常磨损情况进行研究。通过质量检测与仿真分析相结合的手段, 查找凸轮发生磨损的原因并提出解决与预防措施, 以提高该型柴油机的使用寿命。

该型柴油机配气机构采用四气阀结构, 双进双排, 下置式凸轮轴布置, 如图 1 所示。分段式凸轮

轴由发动机曲轴通过正时齿轮驱动, 使滚轮式挺柱上下运动, 从而带动推杆、摇臂以及阀桥打开气阀。气阀上设有转阀机构, 气阀弹簧采用内、外双簧结构。该型柴油机在交付后多船多批次出现了排气凸轮异常磨损现象, 且发动机运行时间大都在 4 000 h 以内。

1 宏观分析

凸轮轴磨损现象表征为: 排气凸轮工作表面上升段起始区域出现不同程度的麻点、龟裂, 较严重的甚至出现凸轮表层金属剥落的现象, 如图 2 所示。从磨损的宏观特性看, 麻点、龟裂仅出现在凸轮上升段起始区域, 滚轮体与凸轮其他工作表面未见明显异常, 且凸轮非滚压区域也未见裂纹产生。表明

收稿日期: 2018-08-28

作者简介: 陈祎博(1990-), 女, 助理工程师, 主要研究方向为柴油机结构与性能分析, cyb@cspi.net.cn。

该问题是由于滚轮滚压产生的接触疲劳损伤，油膜破坏后进一步发生粘着磨损，导致表层金属剥落。

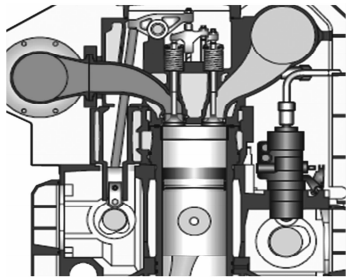


图 1 发动机配气机构示意图

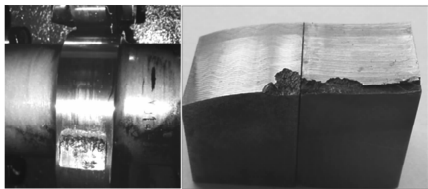


图 2 排气凸轮损伤表象

2 微观检测

在调查搜集多船柴油机使用情况后，基本排除

了船员操作不当，以及油品、油压等问题引起磨损的可能性。随后，在磨损的凸轮轴段中挑选柴油机运行时间较短、磨损情况最严重的一根作为试样，进行质量检验。该凸轮轴材料为 50CrMo4，材料化学成分以及机械性能均满足技术要求，如表 1、表 2 所示。凸轮表面做淬硬处理，经检测硬度为 HV710（HRC60.6），合格。但根据硬度梯度分布（图 3）：有效硬化层深度为 4.6 mm，比技术要求的 5 + 3 mm 略低。电镜从左到右扫描 11.8 mm 宽凸轮工作面最表层裂纹形貌，发现：在滚轮碾压过的 9 mm 的凸轮工作面上就产生了大小不一 9 条裂纹，但均属于浅表性裂纹，最大深度为 0.49 mm，如图 4 所示。凸轮工作面最外侧有 2.8 mm 宽不受滚轮碾压，也未发现任何形式的裂纹产生，表明裂纹是由于滚轮滚压导致。凸轮轴淬硬层组织为回火马氏体，但含有极少量的残余奥氏体和带状痕迹。未淬硬层组织为回火索氏体 + 回火屈氏体 + 带状铁素体，金相组织基本合格。检查凸轮轴工作面所有裂纹两侧金相组织，未发现脱碳、氧化等异常现象，与其它区域无区别，如图 5 所示^[2]。

表 1 凸轮轴材料化学成分

	C	Mn	Mo	Cr	P	S	H	Si
要求	0.50 ~ 0.54	0.5 ~ 0.8	0.15 ~ 0.3	0.9 ~ 1.2	≤0.035	≤0.01	≤2.0 × 10 ⁻⁶	≤0.4
实测	0.53	0.66	0.18	1.05	0.026	0.008	- -	0.274

表 2 凸轮轴材料机械性能

	抗拉强度 $\sigma_b / (N \cdot mm^{-2})$	屈服强度 $\sigma_s / (N \cdot mm^{-2})$	延伸率 δ_5	冲击吸功 A_v / J
技术要求	850 ~ 1 000	≥650	≥13%	≥30
测试结果	945	725	16%	35、35、34

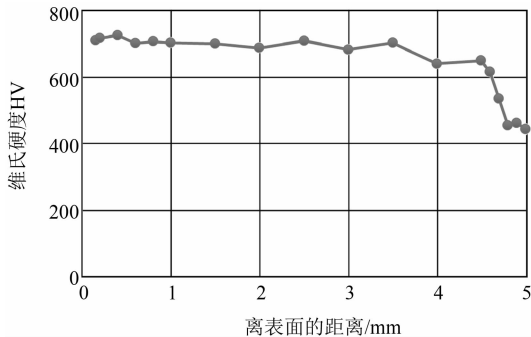


图 3 凸轮硬度梯度分布

以上各项检测结果表明：凸轮材料质量基本符合要求，可排除由于材料缺陷引起磨损。但仍须进一步加强凸轮轴质量控制，细化晶粒，消除带状组织存在，并确保硬度及淬硬层深度。凸轮工作面裂纹均属于浅表性裂纹，分析认为是由滚轮滚压导致

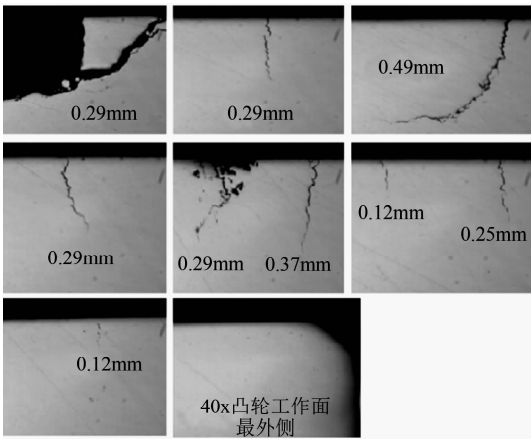


图 4 凸轮疲劳裂纹深度

的接触疲劳。下面重点分析该凸轮工作区域发生接触疲劳的原因。

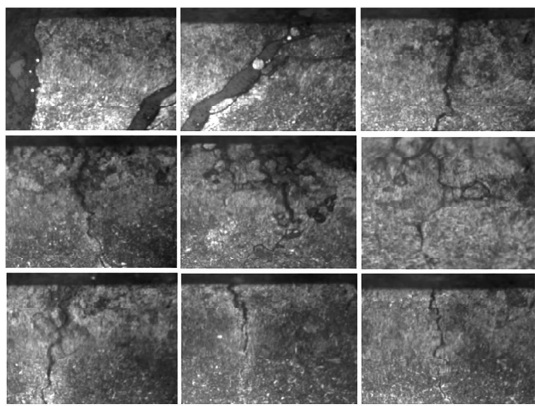


图5 裂纹位置组织形貌

3 仿真分析

借助 AVL – Excite Timing Drive 性能仿真软件搭建该发动机配气机构阀系模型,如图6所示。仿真得到凸轮与滚轮的赫兹接触应力,并分析气阀间隙、转速等因素对赫兹接触应力的影响。仿真模型将配气机构简化成多质量刚度系统,输入各组件的部分结构参数、当量质量、刚度、阻尼以及外载荷等参数,如表3所示^[3]。

表3 主要输入参数表

名称	数值
凸轮基圆半径/mm	42
滚轮半径/mm	22
滚轮接触宽度/mm	21.6
凸轮型线/mm	按图纸输入
摇臂比	106.5/85
气阀间隙/mm	冷态0.6 热态0.35
气阀面气体作用力/N	气缸压力与歧管管道压力合成
各部件当量质量/kg	Pro – E 计算输入
各部件相对阻尼	经验输入
各部件刚度/($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	有限元计算输入

仿真得到凸轮滚轮运动的升程、速度和加速度如图7所示。凸轮最大升程为19.2 mm,滚轮向上运动的最大速度为1 933.8 ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$),反向最大速度为-1 090.9 ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$),均在凸轮型线设计的脱开转速范围内。气阀要求“快开瞬关”,因此凸轮上升缓冲段的加速度设计较大,下降段的相对较小。

仿真重点关注凸轮与滚轮之间的接触应力,如图8所示。一个工作循环内,凸轮承压范围为 $122^\circ \sim 435^\circ$ 曲轴转角(凸轮转角 $61^\circ \sim 217.5^\circ$)。凸轮进入到上升段,受力陡升,气阀关闭后压力瞬降。凸轮上升缓冲段加速度设计较大,在气阀弹簧力、惯性力以及缸内压力的作用下,该凸轮段与滚

轮的接触应力较大,最大应力值达1 250 MPa;凸轮主工作段接触应力值在600 MPa左右。整个工作范围内,凸轮与滚轮接触力始终大于零,表明凸轮和滚轮未发生脱开现象。

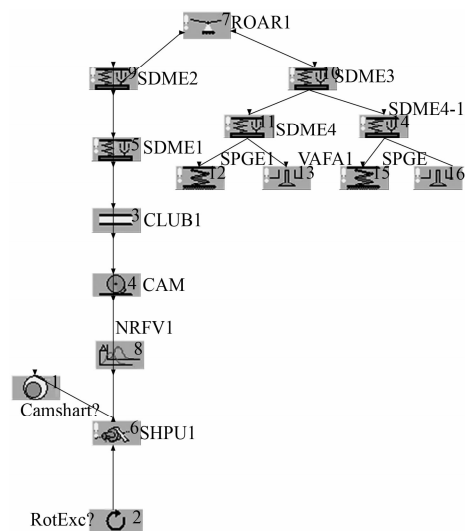


图6 阀系仿真模型

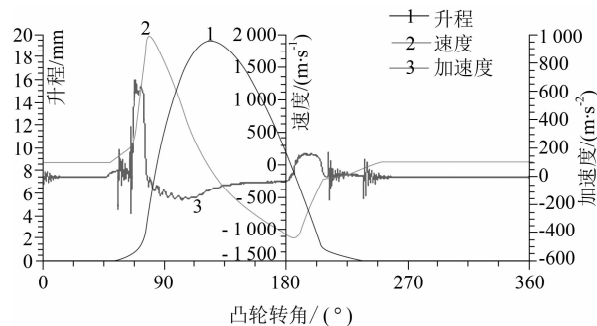


图7 凸轮从动件的升程、速度和加速度

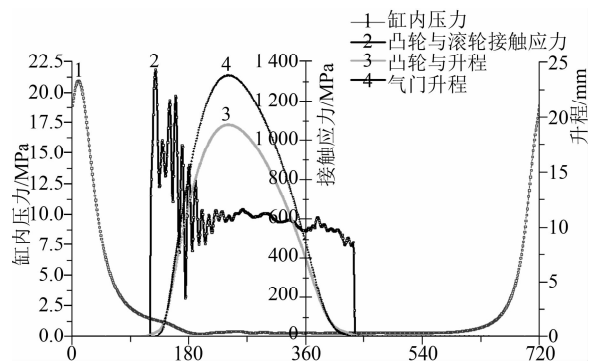


图8 凸轮与滚轮的接触应力

为进一步分析凸轮早期疲劳原因,通过仿真得到气阀间隙以及转速对凸轮与滚轮接触应力的影响,如图9、图10所示。由图9可知:随着气阀间隙的增大,凸轮有效工作包角变小,但主工作段接触应力变化不大。气阀间隙越小,上升缓冲段的

峰值应力越大。气阀间隙为 0.1 mm 时, 该段峰值应力达到 1 330 MPa。如果气阀间隙设置过小, 气缸内压力会通过机构给凸轮基圆段附加一定的接触应力, 从而降低凸轮寿命。柴油机转速越高, 配气机构惯性力越大, 必然会使凸轮受力增大, 同时也会导致应力波动加剧, 也会影响凸轮的寿命。

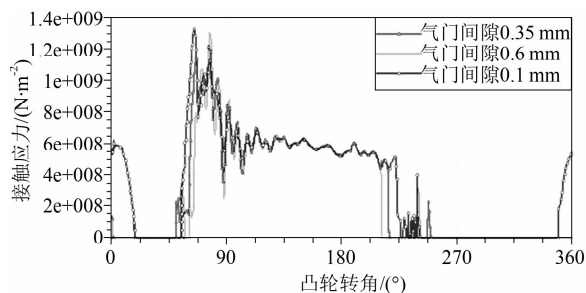


图9 气阀间隙对凸轮滚轮接触应力的影响

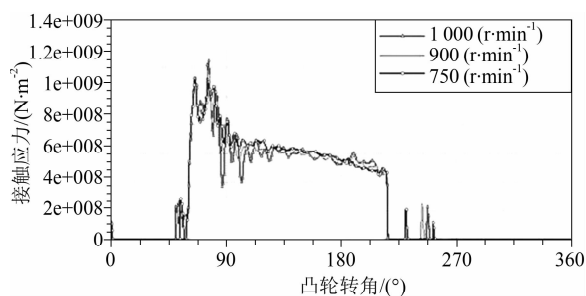


图10 转速对凸轮滚轮接触应力的影响

同时注意到: 凸轮疲劳均现于排气凸轮, 而进气凸轮未见损伤, 因此作为对比参考, 仿真进一步得到该机型进气凸轮与滚轮接触应力, 如图 11 所示。进气凸轮工作段受力较均匀, 应力均值在 600 MPa 左右, 与排气凸轮主工作段应力值相当。最大接触应力也出现在凸轮上升缓冲段, 但应力峰值比排气凸轮要小很多, 最大应力值仅为 750 MPa。

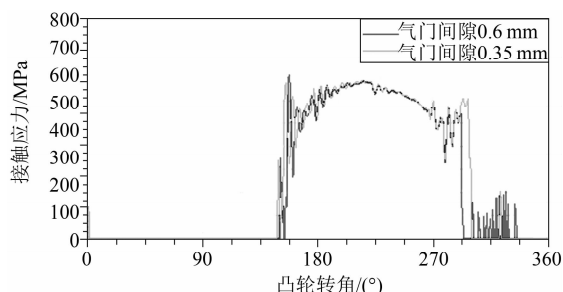


图11 进气凸轮与滚轮的接触应力

通过以上的阀系仿真可以得出如下结论: 排气凸轮损坏位置是一个工作循环内凸轮受力最大的区域, 该段凸轮受力较大是导致凸轮疲劳损伤的根本原因。排气凸轮型线上升缓冲段加速度设计较大, 是该凸轮段受力较大的直接原因。柴油机额定工况下, 排气凸

轮与滚轮最大接触应力为 1 250 MPa, 而进气凸轮的应力峰值仅为 750 MPa, 所以进气凸轮未见损伤。因此, 不当的气阀间隙会造成凸轮受力增加; 同时柴油机转速增大也会降低凸轮的使用寿命。

基于以往设计经验, 凸轮与滚轮在 1 250 MPa 的最大接触应力下, 50CrMo4 凸轮轴 4 000 h 内发生失效的概率接近于零, 基本可以排除因为强度设计不足而引起的凸轮表面失效。

4 凸轮疲劳失效原因

凸轮与滚轮依靠滚动接触传递动力, 凸轮表面承受循环压应力。正常情况下, 由于凸轮与滚轮的硬度均较高, 有较好的抗粘着磨损能力; 且凸轮与滚轮接触要求呈线带接触, 滚轮在凸轮上滚动, 受力均匀, 不易发生异常磨损故障。但在实际生产中, 由于零部件加工缺陷或者安装不当, 导致滚轮中心线与凸轮桃尖中心线出现一定角度的倾斜或旋转, 使得凸轮与滚轮的接触变为“点”接触, 导致凸轮与滚轮接触应力成倍增加, 甚至出现滚轮卡滞现象。而凸轮桃尖设计“外硬内软”, 这时往往会从接触应力高的区域出现剥落^[4]。该柴油机凸轮表面失效现象表征为点蚀和金属剥落, 因此可判断由于实际使用过程中凸轮与滚轮接触应力过大, 超过材料的疲劳极限。

排查凸轮、滚轮、滚轮销以及挺柱体等相关零部件的加工, 复测气阀间隙, 凸轮轴轴承间隙、挺柱体导向块间隙 (图 12 所示), 气阀弹簧预紧力设置等, 发现: 挺柱体导向块间隙均存在超差现象。

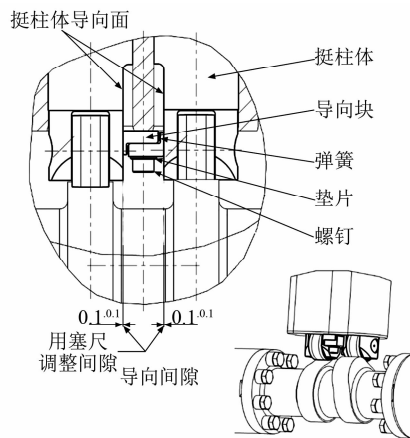


图12 挺柱体导向机构示意

通过收紧该间隙公差设置 (0.1 mm → 0.05 mm), 增加挺柱体导向块间隙百检要求; 同时进一步加强凸轮轴材料以及热处理质量控制, 后续 2 年中, 排气凸轮早期疲劳现象没有再次发生。

(下转第 34 页)

5 结 论

本文对大功率 V 型柴油机主轴承座进行了强度分析, 得出各工况下主轴承座的应力和疲劳情况, 并对主轴承座的强度及主轴承孔的变形情况进行了评价。对 V 型机主轴承座结构强度的分析及发动机设计有一定的指导意义。

参考文献

[1] 杨万里, 许敏, 邓晓龙, 等. 发动机主轴承座结构强度

分析研究 [J]. 内燃机工程, 2007, 28 (1): 31-34.

[2] 石磊, 张华兵, 李丽婷, 等. 某船用柴油机机体主轴承壁的有限元分析和结构优化 [J]. 柴油机, 2016, 38 (6): 20-25.

[3] 束永平, 周博, 覃韬. 螺栓预紧力下柴油机主轴承孔及主轴承瓦的变形研究 [J]. 机械设计与制造, 2016 (9): 247-249.

[4] 王磊, 廖日东. 内燃机主轴承承载特性研究 [J]. 车用发动机, 2013 (5): 61-66.

(上接第 29 页)

至此完成了该问题的跟踪分析, 可将排气凸轮疲劳原因锁定为: 挺柱体导向块间隙过大, 挺柱体上下运动过程中发生倾斜, 改变了凸轮与滚轮的接触状态, 导致接触应力超过了材料的疲劳极限, 从而发生疲劳失效。

5 结 论

综上分析, 可将凸轮副表面接触疲劳失效分析的方向总结如下: (1) 凸轮及从动件质量问题。检查原材料的偏析、带状组织及夹杂等, 重点关注凸轮及从动件的表面粗糙度、硬度及淬硬层深度是否合格等。(2) 实际使用中是否存在过大的接触应力。仿真评估凸轮型线设计是否合理, 重点排查

影响凸轮及从动件接触状态的零部件加工及配合间隙设置是否符合设计要求。

参考文献

[1] 刘小林. 发动机凸轮异常磨损问题研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014.

[2] 张栋. 失效分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

[3] 闫军朝, 李洪昌, 胡建平, 等. 柴油机配气机构运动学与动力学分析 [J]. 车辆与动力工程研究, 2016, 32 (2): 148-151.

[4] 王亦军, 程迪. 机车柴油机凸轮表面损伤成因分析及改进措施 [J]. 铁道技术监督, 2008, 36 (6): 22-24.