

柴油机曲轴油封密封失效机理分析及改进

徐统伟,于涵,刘佳,贾德民

潍柴动力股份有限公司,山东 潍坊 261061

摘要:为降低柴油机曲轴油封密封失效故障率,统计分析某平台柴油机曲轴油封的市场故障数据,利用鱼骨图从人、机器、材料、方法、环境、测量 6 方面分析油封密封失效漏油的可能原因,通过不同供应商油封可靠性台架对比试验和油封一致性考核台架试验验证失效根本原因;在此基础上提出改进措施并进行改进后的市场跟踪验证。结果表明:水泥搅拌机用油封的故障率最高,后油封的故障率显著高于前油封;故障油封的主要失效模式包括主唇线故障、偏磨和毛毡起毛;油封随动性与胶料致密度不足、生产装配工艺缺陷、端盖及齿轮轴端面未涂胶、组合式油封可装配性差是密封失效的根本原因。采取优化油封参数、注射硫化工艺、在端盖和齿轮轴头端涂胶、改进装配工艺等改进措施后,油封市场故障率明显降低。

关键词:柴油机;油封;密封失效;耐久试验;改进措施

中图分类号:TK423.31

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)03-0043-07

引用格式:徐统伟,于涵,刘佳,等.柴油机曲轴油封密封失效机理分析及改进[J].内燃机与动力装置,2025,42(3):43-49.

XU Tongwei, YU Han, LIU Jia, et al. Analysis on the sealing failure of a diesel engine crankshaft oil seal and its improvement[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(3): 43-49.

0 引言

“三漏”问题(漏油、漏水、漏气)^[1-2]是柴油机密封设计过程中的重要研究课题。油封是一种常见的旋转轴密封装置,可实现动态和静态条件下的可靠密封,广泛应用于发动机、变速箱、液压系统等设备。曲轴油封是密封系统的关键功能部件,其性能直接影响柴油机的可靠性和使用寿命^[3]。油封密封失效将导致润滑油泄漏,进而引发一系列连锁反应:运动部件异常磨损、润滑油品质劣化、故障率显著上升,严重影响用户体验^[4]。油封密封失效导致的柴油机漏油问题始终位居市场投诉前列。严重的漏油故障不仅加速柴油机性能衰退,还可能造成整机损坏,给企业带来高昂的维修成本和品牌声誉损失。

随着新材料、新技术的快速发展,曲轴油封的种类日益丰富,相关结构设计不断优化。但针对不同工况实际应用适配性的系统性研究相对少见。因此,深入分析曲轴油封市场故障案例具有重要价值:1)开发设计者可基于售后质量表现识别油封的关键特性,优化迭代设计,降低技术风险;2)基于实际工况的故障分析能够为油封设计提供精准的优化方向;3)企业通过故障模式库建设减少质量损失,提高运营效率和市场竞争力。本文中通过统计某平台柴油机曲轴油封市场故障数据,分析密封失效原因,提出改进措施,为曲轴油封优化设计提供参考。

1 油封密封原理

以聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene, PTFE)曲轴油封为例,其主要结构有密封唇、防尘唇和骨架,如

收稿日期:2025-03-21

基金项目:泰山产业领军人才工程资助项目(高热效率柴油机关键技术研究)

第一作者简介:徐统伟(1990—),男,山东泰安人,工学硕士,工程师,主要研究方向为液压与电控,E-mail:xtwlcu@sina.com。

图 1 所示。密封唇采用 PTFE 材料,主要功能是在曲轴运转过程中贴合曲轴表面,阻止曲轴箱内的润滑油泄漏;多数油封的密封唇接触面设计与曲轴旋转方向相反的微型螺旋槽,当曲轴旋转时,这些微型槽产生泵送效应将泄漏的润滑油沿轴向推回密封腔。防尘唇阻挡外界的杂质,防止杂质进入油封内部损伤密封唇。金属骨架支撑油封,通常采用低碳钢或不锈钢,通过精密过盈配合固定在发动机壳体安装孔内,确保曲轴油封在工作过程中不会脱离^[5-6]。

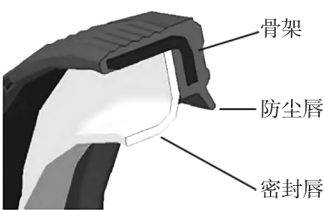


图 1 曲轴油封结构

按安装位置,油封可分为前油封和后油封。前油封安装在发动机前端,即皮带轮/正时皮带侧;后油封安装在发动机后端,即飞轮/变速箱连接处。

2 油封故障统计分析

市场调研发现,某两年生产的各机型曲轴油封密封失效漏油故障统计如表 1 所示。由表 1 可知:所有类型油封的市场故障率均高于目标故障率,其中,WP5 机型前油封、WP12(四气门)机型后油封的市场故障率较高,分别为 1.15%、0.94%。

表 1 曲轴油封市场故障率

油封类型	后油封	后油封	后油封	后油封	后油封	前油封	前油封
发动机型号	WP10	WP12(四气门)	WD12	WP5	WP7	WP5	WP7
市场故障率/%	0.21	0.94	0.13	0.70	0.36	1.15	0.73
目标故障率/%	0.15	0.66	0.09	0.49	0.25	0.87	0.51

各种车型 WP10 发动机曲轴油封的市场故障率统计如表 2 所示。由表 2 可知:按不同车型分析,水泥搅拌车、卡车用油封的市场故障率较高,分别为 85.54%、12.39%。

表 2 不同车型用油封的市场故障率

车型	水泥搅拌车	卡车	牵引车	自卸车	公路其他运输车	客车
故障率/%	85.54	12.39	0.69	0.69	0.52	0.17

统计前、后油封的市场故障率,发现件号分别为 61500010037、612600170052 的前、后油封的市场故障率分别为 0.69%、99.31%,后油封故障率远高于前油封。

在油封维修更换过程中,由于采用破坏式拆卸方式,导致金属骨架发生不可逆的塑性变形,无法进行故障再现。但是通过对故障件唇口的分析,发现存在偏磨、主唇撕裂、毛毡起毛等问题^[7-9],故障现象如图 2 所示。



图 2 油封故障现象

件号为 610800010037 的前油封和件号为 610800010027 的后油封的相关信息和市场表现分别如表 3、4 所示。由表 3、4 可知:前油封的主要失效模式为主唇线故障和毛毡起毛,后油封的主要失效模式为主唇线故障和偏磨。

表 3 前油封(件号 610800010037)相关信息和市场表现统计					
发动机型号	发动机编号	供应商代码	行驶里程/km	油封外观	占比/%
WX7	1011F002694	1579	168 650	主唇油面刀纹	33
WX7	1012F002950	1579	100 000	主唇油面发毛	
WX5	2014E000769	1579	10 926	毛毡起毛	33
WX7	1011F002685	1579	8 282	毛毡起毛	
WX7	1011F002689	1579	47 160	偏磨	17
WX5	2014D000622	1579	11 839	正常	17

表 4 后油封(件号 610800010027)相关信息和市场表现统计					
发动机型号	发动机编号	供应商代码	行驶里程/km	油封外观	占比/%
WX7	1012H800569	1579	48 413	主唇线缺损	60
WX7	1013D001830	1579	557	主唇线缺损	
WX5	2014D000326	1579	10	主唇线缺损	
WX5	2013S001169	1579	54 260	正常	20
WX7	1011F002693	1579	155 026	偏磨	20

3 失效原因分析

3.1 鱼骨图分析

利用鱼骨图从人、机器、材料、方法、环境、测量 6 个方面分析油封生产过程中可能导致油封密封失效漏油的因素,如图 3 所示。进一步进行深入排查,确定了 5 个最可能导致密封失效的原因,如表 5 所示。

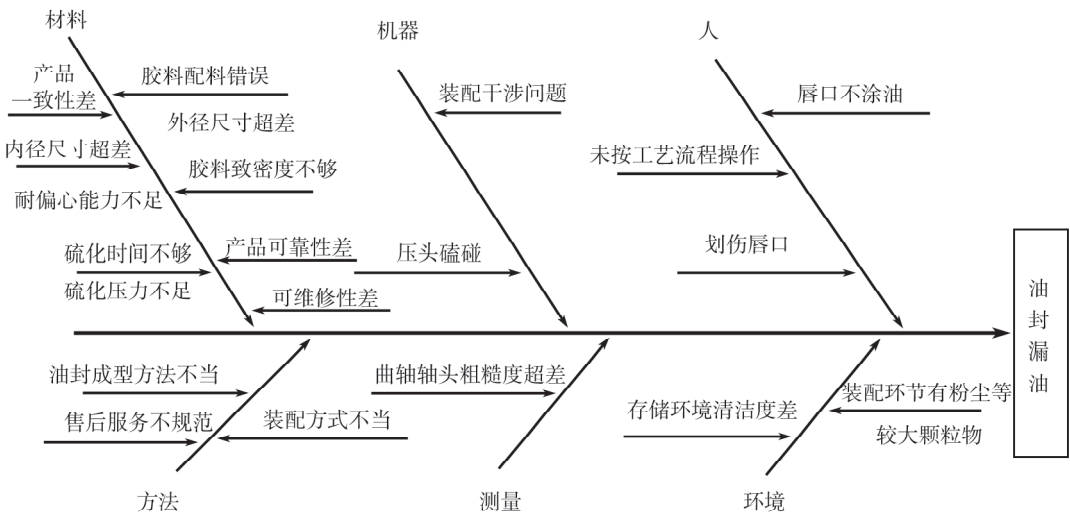


图 3 油封漏油问题鱼骨图

表 5 油封密封失效漏油可能原因

序号	可能原因	重要度	序号	可能原因	重要度
1	耐偏心能力不足	重要	4	可装配性、维修性差	重要
2	装配不当(唇口涂油、工装、工艺)	重要	5	售后服务不规范	重要
3	胶料致密度不够	重要			

3.2 试验验证

通过试验识别和验证油封密封失效漏油的根本原因。试验分为不同供应商油封可靠性对比试验和油封一致性考核试验。

3.2.1 不同供应商油封可靠性对比试验

不同供应商提供的相同规格的油封在胶料配方、腰部结构尺寸(高度和厚度)、唇口关键尺寸等方面存在差异,因此,有必要对不同供应商油封进行台架密封性能对比试验,以评估其密封性能^[10]。选择三家供应商的 6 种油封进行试验,各油封参数及主唇径向力检测结果如表 6 所示。

表 6 试验油封参数及主唇径向力检测结果

供应商	油封编号	主唇接触宽度/mm	主唇过盈量/mm	主唇径向力最大阈值/N	主唇径向力检测结果/N
RFX	1#	112.38	2.62	16.334	15.126
	2#	112.31	2.69	16.589	15.321
HLW	1#	112.52	2.48	21.184	19.620
	2#	112.62	2.38	19.935	18.454
TKS	1#	112.49	2.51	15.952	14.783
	2#	112.64	2.36	16.213	14.957

第一轮不同供应商油封可靠性试验条件如表 7 所示。选取各供应商的 1#油封按表 7 所示条件进行 5 d 运行试验,如果油封不漏油,将油封安装偏心量增大 0.05 mm,继续试验 2 d,直到油封漏油。第一轮试验结果如表 8 所示。由表 8 可知:RFX 公司油封轴向窜动为 0.20 mm,安装偏心量为 0.50 mm,密封性能最好。

表 7 第一轮不同件号和不同供应商油封可靠性试验条件

润滑油型号	润滑油温度/℃	润滑油液位	轴转速/(r·min ⁻¹)	轴表面粗糙度 Ra/μm
15W-40	135	轴中心线	3 000	0.8
轴跳动/mm	轴 HRC 硬度	轴直径/mm	油封安装偏心量/mm	腔内最大压力/MPa
0.15	≥45	115	0.20	0.03

表 8 第一轮不同件号和不同供应商油封可靠性试验结果

供应商名称	轴向窜动/mm	窜动频率/Hz	安装偏心量/mm	结果
TKS	0.15	3	0.35	泄漏
HLW	0.15	3	0.35	甩油
RFX	0.20	3	0.50	甩油

第二轮不同件号和不同供应商油封可靠性试验条件如表 9 所示。

表 9 第二轮不同件号和不同供应商油封可靠性试验条件

轴直径/mm	轴跳动/mm	轴 HRC 硬度	轴转速/(r·min ⁻¹)	轴表面粗糙度 Ra/μm	油封安装偏心量/mm
115	0.15	≥45	3 000	0.8	0.20

取各供应商的 2#油封按表 9 要求装配,在不加润滑油的状态下干磨 10 min,观察唇口橡胶的磨损情况并测量油封唇口的磨损宽度;然后把油封重新装上台架,加入 15W-40 润滑油进行运行试验,测试油封的密封性能。试验运行 5 d 后如果油封不漏油,将油封安装偏心量增大 0.05 mm,继续试验 2 d,直到油封漏油。干磨试验 10 min 后,油封唇口磨损情况如图 4 所示。第二轮试验结果如表 10 所示。

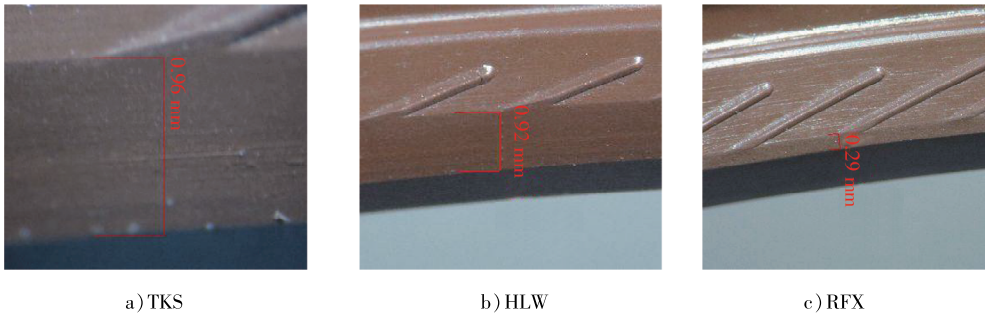


图 4 不同供应商油封唇口磨损情况

由图 4 可知:干磨 10 min 后,TKS 的 2#油封唇口磨损严重,磨损面呈毛面状,磨损宽度为 0.96 mm;HLW 的 2#油封唇口出现磨损,磨损面呈毛面状,磨损宽度为 0.92 mm;RFX 的 2#油封唇口磨损较轻,磨损面保持光面状态,磨损宽度为 0.29 mm。

由表 10 可知:干磨后加入润滑油继续密封性能试验,3 min 后 TKS 的 2#油封出现泄漏,30 min 后 HLW 的 2#油封出现泄漏;RFX 的 2#油封历经 20 h 试验未发生泄漏。

表 10 第二轮不同供应商油封可靠性试验结果

供应商名称	试验时间/min	泄漏情况
TKS	3	泄漏
HLW	30	泄漏
RFX	1 200	未泄漏

不同供应商的油封产品在结构设计、材料配方及加工工艺上存在显著差异,这些差异直接影响油封的密封性能和使用寿命。在实际工程应用中,产品故障率与采购成本是两大关键考量因素,选用时应综合考虑。

3.2.2 油封一致性考核试验

油封一致性考核试验验证的影响密封性能的因素、试验内容及试验结果如表 11 所示。

表 11 油封一致性试验内容及试验结果

序号	影响因素	试验内容	试验结果及结论
1	油封随动性、胶料致密度	密封性能试验、胶料可靠性试验	油封随动性与胶料致密度对油封密封性能影响较大
2	生产装配工艺	后驱力输出轴油封装配工艺对密封性能的影响对比	油封唇口涂油、压装方式对油封密封性能影响显著
3	涂胶工艺	后驱力输出轴中间齿轮端盖和曲轴齿轮端涂胶对油封密封性能的影响对比	涂胶对油封密封性能影响较大,可产生漏油假象。在中间齿轮端盖与曲轴齿轮端涂胶可避免该现象
4	组合式油封可装配性	售后维修用单骨架油封替代组合式油封试验	需对曲轴齿轮技术参数进行优化,并进行售后市场验证
5	材料可靠性	第四代 PTFE 油封 1 000 h 耐久试验	未发生泄漏

3.3 密封失效根本原因

根据上述分析,确定油封随动性与胶料致密度不足、耐偏心能力不足、生产装配工艺缺陷、后驱力机型端盖及齿轮轴端面未涂胶、组合式油封可装配性和可维修性差是油封密封失效的根本原因。

4 改进措施与效果

4.1 改进措施

对于油封的耐偏心能力不足和随动性差的问题,优化油封参数,通过增加外唇口过盈量增强对轴偏心及沟槽变形的补偿能力,通过增大腰部高度、减小腰部厚度改善油封的随动性;针对胶料致密度不足问题,采用注射硫化工艺,增加胶料致密度;针对油封漏油假象,在中间齿轮端盖、曲轴齿轮轴端涂胶;针对生产装配工艺缺陷,采用压机设备将后驱力输出轴压装到盖板,装配时在唇口处涂润滑油;针对售后服务不规范问题,要求服务站在更换后油封报单时增加曲轴轴头编号照片;针对不同供应商油封性能差异问题,完善供应商准入评估机制,实施质量动态跟踪;对油封失效问题进行全面复盘,更新相关文件,包括控制计划、技术规范、检验文件、作业指导书、服务手册、流程制度等^[11-12]。

4.2 市场验证

实施改进措施后进行市场跟踪验证。结果表明:WP12 机型油封售后 15 个月故障率、WP5 机型油封售后 12 个月故障率、WX7 机型油封售后 12 个月故障率均接近于 0,低于目标故障率,改进措施切实可行有效。

5 结论

针对某型号柴油机曲轴油封密封失效漏油问题,统计油封漏油的售后市场故障情况,对油封失效模式进行分析,找出漏油的可能原因,针对性地设计验证试验,锁定失效根本原因后制订改进措施,并对改进后油封进行市场跟踪验证。

1) 水泥搅拌车用油封的故障率最高,且后油封的故障率显著高于前油封;故障油封的主要失效模式包括主唇线故障、偏磨和毛毡起毛。

2) 油封随动性与胶料致密度不足、生产装配工艺缺陷、端盖及齿轮轴端面未涂胶、组合式油封可装配性差是密封失效的根本原因。针对这些问题,采取优化油封参数、注射硫化工艺、在端盖和齿轮轴头端涂胶、改进装配工艺等措施,并对售后服务进行规范。

3) 实施改进措施后,市场跟踪验证结果显示,不同机型油封的市场故障率明显降低,改进措施有效,为企业节约了维修成本。

参考文献:

- [1] 许金海,石建科,龚飞,等.商用车三漏问题的研究[J].汽车科技,2023(5):65-69.
- [2] 桑红玉.柴油机“三漏”常见故障分析与排除[J].农机使用与维修,2017(4):50.
- [3] 王晓东,姚建明,刘金桥.某发动机曲轴油封漏油问题分析及设计优化[J].汽车实用技术,2023,48(10):115-118.
- [4] 许应祥.曲轴后油封主唇口安装缺陷问题解决办法研究[J].中国科技期刊数据库·科研,2015(5):159-160.
- [5] 闻邦春.机械设计手册[M].北京:机械工业出版社,2010:177-181.
- [6] 尚星宇,郑国世,李玉松,等.双支点柔性截面结构的发动机曲轴油封研究及应用[J].内燃机与配件,2021(1):7-8.
- [7] 李建国.油封结构优化设计:旋转运动油封密封机理的有限元分析[D].北京:北京化工大学,2007.
- [8] 王静,马洋洋,周中华.基于正交试验的曲轴油封结构参数研究[J].橡胶工业,2021,68(2):91-97.
- [9] 马洋洋.曲轴油封密封性能分析及影响参数研究[D].重庆:重庆理工大学,2020.
- [10] 柴油机设计手册编辑委员会.柴油机设计手册:中册[M].北京:中国农业机械出版社,1984.
- [11] 刘令勋,刘英贵.动态密封设计技术[M].北京:中国标准出版社,1993:15-18.

[12] 付平,常德功. 密封设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2011.

Analysis on the sealing failure of a diesel engine crankshaft oil seal and its improvement

XU Tongwei, YU Han, LIU Jia, JIA Demin

Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: To reduce the seal failure rate of diesel engine crankshaft oil seals, market failure data of a certain platform's diesel engine crankshaft oil seals is statistically analyzed. Using fishbone diagrams, possible causes of oil seal failure and leakage are analyzed from six aspects: human, machine, material, method, environment, and measurement. The root cause of failure is verified through comparative tests of oil seal reliability from different suppliers and oil seal consistency assessment bench tests. On this basis, the improvement measures to reduce the sealing failure rate are proposed and tracked in the market. The results show that the failure rate of oil seals for cement mixer trucks is the highest, and the failure rate of the rear oil seal is significantly higher than that of the front oil seal. The main failure modes of faulty oil seals include main lip line failure, eccentric wear, and felt fuzzing. The main reasons for seal failure are the insufficient followability of the oil seal and the inadequate density of the rubber material, defective production assembly process, uncoated end caps and gear shaft end faces, and poor assembly performance of combination oil seals. The oil seal parameters are optimized, as well as the injection vulcanization process, gluing on end caps and gear shaft heads, and assembly processes. After improvement, the failure rate of the oil seal market has significantly decreased.

Keywords: diesel engine; oil seal; seal failure; durability test; improvement measure

(责任编辑:臧发业)

.....
(上接第34页)

coasting, the fuel injection quality and economic influencing factors of the automatic transmission neutral slip control process are analyzed. The neutral slip control strategy is optimized based on the time-based moving average window method and verified by combining road test spectrum analysis. The results show that the fuel consumption mass is fixed when the vehicle enters and leaves the idle condition, and the total fuel consumption mass during neutral coasting is related to the number of times when it enters and exits neutral coasting control and the duration of a single coasting. Reducing the frequency of entering and exiting neutral coasting control, minimizing short duration neutral coasting, and retaining longer duration neutral coasting can improve vehicle fuel economy. For the road test, the optimized neutral sliding control strategy is adopted to reduce the gas consumption per 100 km from 31.950 kg to 31.728 kg, saving 0.222 kg in gas consumption per 100 km.

Keywords: automatic transmission; neutral coasting; economy; control strategy

(责任编辑:胡晓燕)