

基于油液分析的柴油机可靠性 试验磨损评价研究

盛晨兴¹, 严新平¹, 徐泰富²

(1 武汉理工大学 可靠性工程研究所, 湖北 武汉 430063;

2 中国船级社武汉分社 产品处, 湖北 武汉 430022)

摘要: 介绍了“EQD × × × × 型柴油机的 1 000h 混合负荷可靠性试验的试验方案. 在该型柴油机的可靠性试验中, 提出了开展柴油机磨损状态实时评价的概念, 将磨损评价作为描述柴油机可靠性的一部分内容. 在磨损评价时, 通过运用油液分析中的光谱、铁谱和 PQ 分析等手段并结合趋势图分析, 对该型柴油机试验阶段的磨损状态进行了识别. 油液分析表明: 在试验进行到 400 h 左右, 试验柴油机出现了严重磨损, 这一磨损评价结果与同一时段柴油机因阀座下沉引起气门间隙变小以及试验后柴油机拆检发现气门阀座磨损过大的实际情况相吻合. 研究试验证实, 磨损评价应成为分析柴油机可靠性的有机组成部分; 将多种油液分析手段集成运用, 可有效地描述柴油机可靠性试验过程中主要零部件的磨损状况, 为柴油机可靠性评定提供了新的手段.

关键词: 柴油机; 可靠性试验; 油液分析; 磨损评价

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2008)06-0556-06

可靠性试验是评定新型柴油机综合性能的重要手段. 试验过程中发生的摩擦磨损会引起机体振动、燃油泄露、缸体损伤等现象, 从而影响整机的性能, 为此, 研究磨损实时分析和评价手段对于柴油机可靠性分析具有重要的意义^[1-2].

停机拆检是柴油机可靠性试验中常用的磨损检测方法, 只能得到磨损结果而不能获得磨损过程中的实时变化. 油液分析技术是一种基于润滑油液分析的磨损工况实时监测与诊断技术, 基于被测机器油样的磨粒分析技术已经应用于机器磨损评价和故障分析^[3-4]. 由于工作环境的特殊性, 油液分析在柴油机上的磨损监测应用主要是磨合试验. 将铁谱、光谱等分析技术应用于柴油机台架试验的磨合评价中, 可以优化柴油机的磨合过程, 通过定量跟踪柴油机磨合过程中磨粒参数的变化趋势, 在提高磨合质量的同时也缩短了磨合时间^[5]; 将光谱、铁谱技术以及摩擦副表面的形貌测量结合在一起对柴油机的磨合过程进行综合分析, 科学地制定了柴油机磨合工艺规范, 设定了磨合过程负载、时间、转速等影响参数的最佳组合^[6-7]. 油液分析技术在柴油机的磨合

性能试验中的有效性为反映其综合性能的可靠性评价试验提供了思路^[8].

在可靠性试验中, 磨损不仅是一种动态性能指标, 同时与其他性能之间存在交互影响, 为此有必要建立基于油液分析的柴油机可靠性试验的磨损综合评价方法. 本文将光谱、铁谱和 PQ (Particle Quantifying) 分析等手段的集成油液分析技术运用到柴油机可靠性试验中, 分析其不同试验时段的磨损状况, 探讨柴油机可靠性试验的实时磨损评价的新途径.

1 柴油机可靠性试验

1.1 试验的目的与意义

新研发的柴油机通过可靠性试验, 可以暴露柴油机的薄弱环节, 找出故障的原因和掌握它的失效分布规律. 在现有的柴油机可靠性试验中, 一般都是用停机拆检的方法获得试验前后零部件的磨损状况, 但这种方法无法动态获得实时的磨损变化, 且试验时进行停机拆检即不方便也破坏了磨损过程的连续性. 利用油液分析技术, 通过对柴油机润滑油中磨

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50575167); 交通部博士基金资助项目 (200332581107).

收稿日期: 2007-12-27; 修回日期: 2008-09-16 联系人严新平, e-mail: xpyan@whut.edu.cn

作者简介: 严新平, 男, 1959年生, 博士, 教授, 博导, 目前主要从事设备诊断工程、摩擦学技术应用和运输安全等研究.

损微粒的成分、浓度和尺寸分布等特征的分析,可获得反映柴油机试验各阶段的实时磨损信息,从而有效解决可靠性试验过程中不停机拆检就对柴油机零部件的磨损状况进行动态分析与评价的问题。

1.2 试验参数及方案

柴油机型号为 EQD × × ×- × ×,主要试验参数为:额定功率/转速, 155 kW (210PS)/2 200 r · min⁻¹;最大扭矩/转速, ≥ 700 N · m/1 400 ~ 1 600 r · min⁻¹;低速扭矩/转速, ≥ 500 N · m/1 000 r · min⁻¹;低怠速转速, 800 ± 50 r · min⁻¹;机油牌号为 15W 40-CD。

根据柴油机可靠性台架试验的试验规范 GB/T19055-2003设计试验。在进行本试验之前,已经进行了柴油机整机磨合试验,并精密测量了曲轴轴颈/轴瓦、缸筒/活塞组、凸轮/挺杆、摇臂和气门/导管摩擦副的尺寸和间隙以及曲轴、凸轮轴止推间隙与齿隙以及气门/气门座接触带宽和气门下沉量等数据。试验参数:出水温度, 99 ± 5 ;燃油温度, 40 ± 2 ;中冷器出口温度: 50 ~ 55 ;进气阻力, ≤ 4.0 kPa;排气背压, ≤ 6.8 kPa;燃油, 0#普通柴油;试验时带空气滤清器,静态供油提前角 9 ± 1 °CA。

本机采用混合负荷试验,每种工况对应的转速和负载及持续时间见表 1,各工况转换在 1 min 内完

表 1 柴油机混合负荷试验规范

Table 1 The rule of alternating load reliability test			
No	Rotating speed	Load	t/min
1	Idle speed (n_i)	0	5
2	Maximal torque speed (n_m)	Full feed fuel	10
3	Maximal power speed (n_p)	Full feed fuel	40
4	Rating speed (n_r)	Full feed fuel	5

成。4个工况依次进行完为一个循环,每个循环历时为 60 min,试验共持续 1 000个循环。试验中定期采集油样,采样量为 100 ml,每隔 100 h测量气门间隙及气门下沉量,每隔 250 h更换机油及机油滤清器。与一般的运用油液分析技术对实际使用的柴油机进行状态检测与故障诊断要每隔几个月才取样一次相比,对柴油机可靠性试验进行磨损状态评价在油样的提取上有着更高的要求,在取样前,必须充分考虑试验柴油机是新机且在交变负荷中持续运转这种实际情况,合理安排试验过程中的取样位置以及更加紧密的取样时刻点。本试验是利用取样器从油底壳直接抽取油样,采样时刻点设计为:从新油加入柴油机后开始到 1 000 h试验完成,每隔 48 h采样一次,

因试验初始阶段磨损率较高,故在第 12 h、24 h两个时刻点分别采样一次,另外在有故障征兆时或换油之后(如第 250 h、500 h等)也取样 1次,实际试验中共采集油样 27个。

2 柴油机可靠性试验的磨损评价

本文采用光谱、铁谱及 PQ (Particle Quantifying) 3种油液分析手段对所采集的油液进行分析。通过光谱测试各主要元素含量变化分析柴油机主要摩擦副的磨损状况;通过直读铁谱的磨损程度指标给出磨损剧烈程度的判断,进一步给出磨损指标的趋势预测;采用 PQ 指标给出正常磨损磨粒的含量变化。根据 3种分析结果结合试验中定期检查的气门间隙与气门下沉量等参数的变化情况以及试验后的拆检结果,最后给出柴油机磨损状态的评价。

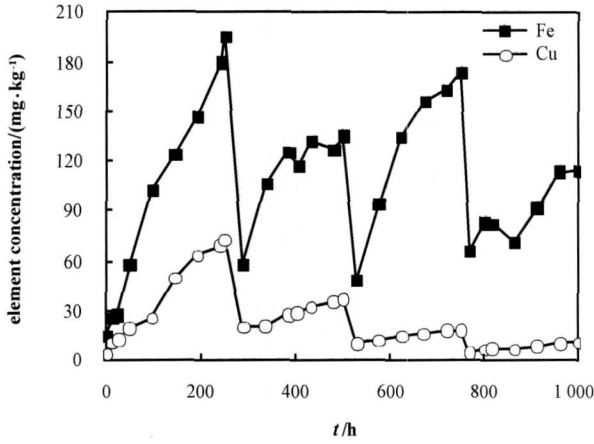
2.1 油液光谱分析

由试验柴油机主要摩擦副的表面材料可知,铁 (Fe)磨粒主要来自于缸套、活塞环、轴、轴瓦、齿轮等重要的摩擦副,铜 (Cu)、铅 (Pb)磨粒主要来自于曲轴瓦、连杆轴瓦及有关衬套,而铝 (Al)磨粒主要来自于柴油机的活塞。图 1 给出了铁 (Fe)、铜 (Cu)、铅 (Pb)、铝 (Al)等 4种柴油机主要磨粒元素的浓度变化曲线。从图 1可看出,在柴油机刚经过磨合和换油的初始阶段,4种主要元素的磨粒浓度值相差不大,并且随运行时间而递增,其中铁元素的增长速率最大。在可靠性试验进行到 300 ~ 500 h的过程中,铁元素浓度出现了几次没有规律的跳跃,特别是在 280 h左右、400 h左右和 500 h左右出现三次比较大的跳跃,这是柴油机运行出现不正常磨损的标志。400 h停机检查发现气门间隙明显变小,当时分析为阀座下沉引起(试验后柴油机拆检发现气门阀座的磨损很大),同时发现油底壳开裂而更换了油底壳并补充润滑油至规定上限。

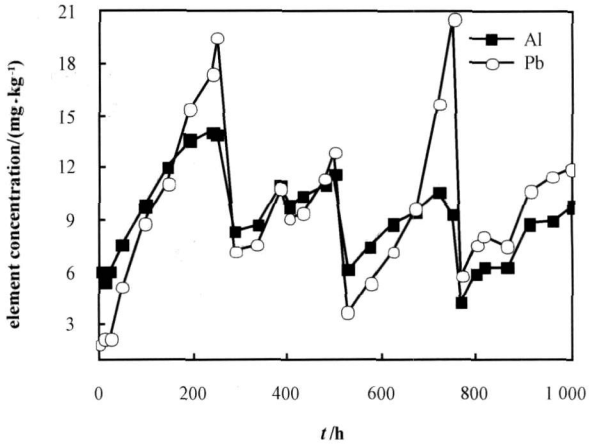
光谱数据分析结果表明,由于磨损率曲线并没有发生很大的跳跃,说明柴油机主要摩擦副如曲轴、缸套、活塞环、轴承、和气阀等磨损都比较正常。综合来看,反映柴油机主要摩擦副的金属元素铁、铜、铅和铝等在试验中的磨损浓度值变化总体比较缓慢,磨损率基本符合正常磨损率的浴盆曲线,所以在整个试验中柴油机零部件的磨损基本正常。

2.2 直读铁谱分析

直读铁谱分析提取的特征信息参数是大磨粒和小磨粒的覆盖面积比率, A_L 和 A_S ,简化表示为 L 和 S 。根据这些参数可以计算出磨粒严重度 $L-S$ 、磨粒严



(a) Concentration of Fe and Cu



(b) Concentration of Al and Pb

Fig 1 Variation of metal element content during diesel engine reliability test

图 1 柴油机可靠性试验中金属元素浓度变化

重度指数 I_s 、总磨损量 $L + S$ 等参数。

图 2 给出了试验周期内的 A_L 和 A_S 。由图 2 可以看出, A_L 和 A_S 在运行的前 48 h 增长很快, 但 A_S 的变化相对较为平缓。 A_L 在 48 h 时达到峰值, 在 404 h

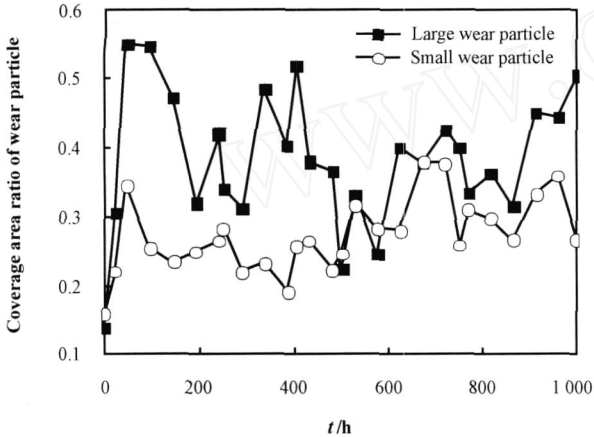


Fig 2 Coverage area ratio of large particle to small one

图 2 柴油机大磨粒与小磨粒覆盖面积比率趋势

和 1 000 h 时出现较大值, A_S 在 672 h 时达到峰值。

图 3 是柴油机的磨损严重度指数 (I_s) 趋势图, 由图 3 可以看出, 在 96 h 之前, I_s 呈线性增加趋势, 并在 96 h 时达到峰值, 并且在 404 h 和 1 000 h 时存在较大值, 在 576 h 时达到负的最大值。由于在正常摩擦磨损条件下, L 与 S 的数值比较接近。只是在异常激烈的磨损条件下, 才会出现 L 值大大超过 S 值的情况, 此时 I_s 值将很大, 而此柴油机在试验时间为 400 h 左右出现了气门间隙显著变小、气门阀座磨损剧烈的现象。

图 4 是柴油机总磨损量 ($L + S$) 和磨粒严重度 ($L - S$) 趋势图, 在整个试验中, 柴油机的总磨损量和

磨粒严重度的变化趋势基本一致。将两种趋势进行

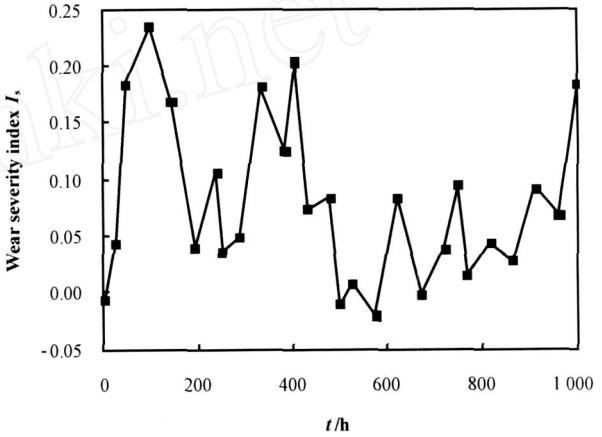


Fig 3 Severe wear index of diesel engine

图 3 柴油机的磨损严重度指数趋势图

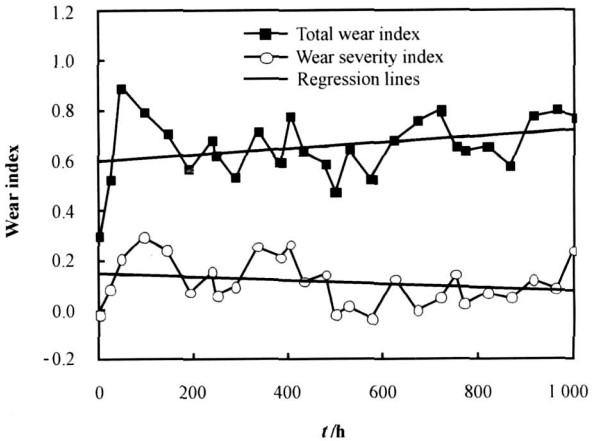


Fig 4 Total wear quantity and severe wear index

图 4 总磨损量和磨粒严重度趋势图

线性回归后可以看出, 总磨损量 ($L + S$) 的直线斜率很小, 说明柴油机的磨损非常轻微, 磨损量很小。磨

粒严重度 ($L-S$) 的直线斜率也很小,表明大微粒产生率很低,磨损很轻微.从两条回归直线的对比来看,是两条分叉的直线,表明磨损正常.

2 3 铁谱趋势分析

铁谱趋势分析中选用的定量参数是分析铁谱的大微粒覆盖面积百分数 A_L ,小微粒覆盖面积百分数 A_s 以及磨粒浓度 WPC .根据铁谱分析理论定义^[9]:
基线值: $\sum (WPC_i) / nWPC$;
警告线: $WPC + 2S$;

危险线: $WPC + 3S$;
式中: i 为样品编号, n 为样品总数, WPC 为 WPC 的平均值, s 为样本标准差用于作为样本方差的估计量.将 $EQD \times \times \times - \times \times$ 柴油机的铁谱趋势分析各磨损评价参数的计算结果与油液铁谱分析结果中的各取样点的 WPC 值进行对比,判断出各区域的磨损状态,结果见表 2 所示^[9].

2 4 PQ分析

PQ 指数是通过测量样品中铁磁性磨粒引起的

表 2 柴油机磨损状态级别评价

Table 2 Evaluation of grade of diesel engine wear condition					
t/h	Judging region	Wear condition	t/h	Judging region	Wear condition
0.5	safety	normal	480	safety	normal
12	safety	normal	500	safety	normal
24	safety	normal	528	safety	normal
48	monitoring	normal, a little higher particle concentration	576	safety	normal
96	monitoring	Normal	624	safety	normal
144	safety	Normal	672	monitoring	normal, a little higher particle concentration
192	safety	Normal	720	monitoring	normal, a little higher particle concentration
240	safety	Normal	768	safety	normal
250	safety	Normal	800	safety	normal
288	safety	Normal	816	safety	normal
336	safety	Normal	864	safety	Normal
384	safety	Normal	912	monitoring	normal, a little higher particle concentration
404	monitoring	normal, a little higher particle concentration	960	monitoring	normal, a little higher particle concentration
432	safety	Normal	1000	monitoring	normal, a little higher particle concentration

磁场的变化而获得 5 ~ 10 μm 粒度范围的铁屑含量的一种指标^[9].图 5 给出了试验周期内所采油样的

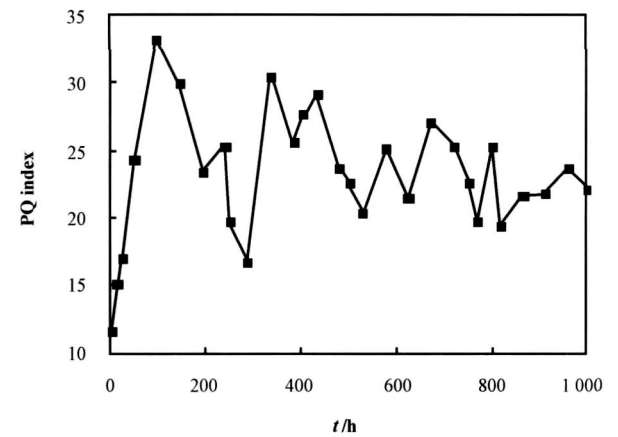


Fig 5 Variation of the oil PQ index
图 5 油液的 PQ 指数变化趋势

PQ 值变化情况.由图 5 可以看出,在整个可靠性试验过程中, PQ 指数变化不大,在 96 h 和 336 h 时达

到较大值,在 404 h 后,渐趋于平稳.在可靠性试验初期表现出磁性磨粒含量很大,可能是由于柴油机在磨合阶段的效果不很理想,但从整个稳定磨损阶段的情况看,磨损基本正常.

油液光谱分析对象主要是小磨粒的磨粒浓度,本试验中的柴油机已经进行了充分的磨合,换油后的磨损状况并未发生变化,光谱测量的磨粒浓度仍以相同的速率增大,这表明柴油机的磨损属于正常范围.铁谱分析所测定的磨粒浓度值的趋势图曲线表明在试验初期柴油机磨粒浓度较高,随后就进入稳定运行状态.铁谱技术主要反映的是采样时刻的磨粒浓度,一般不受换油影响,不同于光谱分析.

从以上分析可知,通过运用光谱、铁谱和 PQ 分析等油液分析技术,可以获得柴油机试验各阶段润滑油中磨损微粒的成分、浓度和尺寸分布等特征,结合趋势图分析间接获取试验过程中主要零部件磨损状态的评价信息,从而充分暴露试验柴油机在工艺设计、材料性能等方面的不足之处(比如本次试验

的气阀阀座过度下沉就是因为设计时所选的阀座材料的性能还没达到要求所引起)。但是由于柴油机的摩擦学系统非常复杂,同一种磨损微粒可来自多个部件(如 Fe 磨粒可来自于活塞环、轴、气门、齿轮等部件),油液分析所获得的磨损信息也只是一种间接信息,所以基于油液分析的磨损评价还必须与柴油机拆检后直接观察到的主要摩擦副表面的磨损状态相互验证,以进一步提高评价的真实性。

4 结论

a 以光谱分析、铁谱分析和 PQ 分析等为手段的集成油液分析技术能有效地反映柴油机可靠性试验中磨损状态的实时和动态变化。

b 基于油液分析的磨损评价应成为柴油机可靠性试验的评定方法。

参考文献:

- [1] V. Macian, B Tornos, P Omeda, *et al* Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis[J]. Tribology, 2003, 36: 771-776.
- [2] 田洪祥,严新平,朴甲哲. 12VE-230ZG型柴油机机油光谱监测研究[J]. 柴油机. 2002(1): 18-22.
Tian H X, Yan X P, Pu J Z. Research on oil spectrum monitoring of 12VE-230ZC diesel engine[J]. Diesel Engine, 2002 (1): 18-22.
- [3] 严新平. 油液监测技术的发展与思考[J]. 润滑与密封, 1999(7): 1-3.
Yan X P. The development and thinking of oil monitoring technique[J]. Lubrication Engineering, 1999(7): 1-3.
- [4] Shiwei Chen, Zhuguo Li, Qisheng Xu. Grey target theory based equipment condition monitoring and wear mode recognition[J]. Wear, 2005, 85: 1-12.
- [5] 李柱国,葛卫华,刘德建,等. L23/30系列柴油机磨合规范优化研究[J]. 铁道机车车辆, 2003, 23(11): 90-92.
Li Z G, Ge W H, Liu D J, *et al* Research on standard of optimizing type L23/30D diesel engines running-in Index[J]. Railway Locomotive & Car, 2003, 23(11): 90-92.
- [6] 孙礼春. CA61101Z-07Y型柴油机台架磨合技术的综合评价[D]. 大连:大连海事大学, 2003.
Sun Li-chun. Comprehensive assessment over technology in CA61101Z-07Y diesel engine running-in on the test bed[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2003.
- [7] 李柱国、尉世明、俞五全等. 基于油液监测的 D6114 柴油机磨合规范研究[J]. 内燃机工程, 2001(1), 66-69.
Li Z G, Wei SM, Yu W Q, *et al* Research on diesel engine running-in criterion based on oil monitoring techniques[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2001(1), 66-69.
- [8] 徐泰富. 基于油液分析的柴油机可靠性试验中的磨损评价研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.
Xu Tai-fu. Study of wear evaluation on diesel engine reliability test based on oil analysis[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [9] 杨其明. 油液监测分析现场实用技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.

The Study of Wear Evaluation in Reliability Test of Diesel Engine Based on Oil Analysis

SHENG Chen-xing¹, YAN Xin-ping¹, XU Tai-fu²

(1. Institute of Reliability Engineering, Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063, China;

2. China Classification Society Wuhan Branch, Hubei Wuhan 430022, China)

Abstract: The 1 000 h reliability test of an EQD diesel engine was investigated. The concept of in site wear evaluation was used in the reliability test of diesel engine and the wear evaluation was designed as one method of identifying the reliability of diesel engine. On the wear evaluation, the oil analysis approaches such as oil spectrum analysis, ferrography and PQ analysis, with trend graph analysis, were adopted to describe the wear condition of every stage of test. The oil analysis results showed that the test engine worked in the condition of severe wear in the testing period of 400 hours. The wear evaluating result was consistent with the fact that valve clearance diminished due to valve seat going down and severe wear appeared on the valve seat after the testing engine disassembled and checked-up. The wear evaluation was useful for the reliability test of diesel engine and the integrated oil analysis approaches could evaluate the wear condition of main components in the reliability test of diesel engine. Therefore, the oil analysis approach will be a new method for the reliability identification of diesel engine.

Key words: diesel engine, reliability test, oil analysis, wear evaluation

Author: YAN Xin-ping, male, born in 1959, Professor, e-mail: xpyan@whut.edu.cn