

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2012.03.019

磨粒对不同服役阶段润滑油的摩擦学性能影响^{*}

张冠楠¹, 王晓丽¹, 尹艳丽¹, 陈江¹, 赵一起²

(1. 装甲兵工程学院 再制造技术重点试验室, 北京 100072; 2. 中国人民解放军 66916 部队, 河北 高碑店, 074000)

摘 要: 利用铁谱分析仪和扫描电镜对 4 个不同服役阶段润滑油中的磨粒含量(质量分数)、大小和形貌进行分析;用 SRV 摩擦磨损试验机对 4 个服役油样与新油进行摩擦学性能对比。结果表明:在不同服役阶段,磨粒的含量随着润滑油服役时间的增长而增大,粒径大小关系为异常磨损期>磨合磨损期>正常磨损期。与新油相比,4 个油样的摩擦因数曲线有不同程度的波动,减摩性能下降明显,且减摩系数下降的幅度与所含磨粒粒径大小相关;磨粒使润滑油的抗磨性能下降,与新油的磨斑直径相比,4 个油样的增幅分别达到 20.0%、25.7%、45.7%、71.4%,且磨粒的粒径、含量与摩擦表面损伤程度成正相关,粒径主要影响磨痕宽度,含量主要影响磨痕密度。

关键词: 铁谱分析; 服役润滑油; 粒径; 摩擦磨损

中图分类号: TE992.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)03-0098-06

Tribological Properties of Lubricant for Different Periods Effected by Wear Particles

ZHANG Guan-nan¹, WANG Xiao-li¹, YIN Yan-li¹, CHEN Jiang¹, ZHAO Yi-qi²

(1. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072; 2. The PLA 66916 Troops, Gaobeidian 074000, Hebei)

Abstract: The content, size and morphology of wear debris in four lubricants for different periods were analyzed by ferrograph analyzer and scanning electron microscopy (SEM). Compared with new oil, the tribological performances of the four lubricants were investigated by SRV. The results show that the content of wear debris is generally proportional to the working time. The granularity of wear particles was biggest in the abnormal wear period, medium in running-in wear period and smallest in normal wear period. The friction coefficient curves of four oil samples were more wavy than that of the new oil, while the anti-friction performance was reduced obviously. The decrease of friction coefficient is relative with the granularity of wear particles. The wear debris reduces the anti-wear performance of lubricants down. The wear scar diameters of four oil samples were increased by 20.0%, 25.7%, 45.7%, 71.4% higher than that of the new oil, respectively. The granularity and content is positively correlated with the damage level of friction surface on equipment, while the granularity affects the width of wear scar and the content affects the density.

Key words: ferrography; served lubricating oil; wear debris; friction and wear

0 引 言

摩擦磨损是设备失效的主要原因之一。2006 年我国因摩擦、磨损导致的损失约高达 9500 亿元,而应用摩擦学知识和研究成果至少可

节约 3270 元^[1]。机械设备摩擦副磨损状态的发展与其磨损产物即磨损颗粒的尺寸和数量变化相对应^[2],而磨粒形貌能有效反映油液服役设备的摩擦副表面详细的磨损状态信息^[3]。目前,利用磨粒分析润滑油的污染程度并推测设备磨损

收稿日期: 2012-03-20; **修回日期:** 2012-05-23; **基金项目:** * 国家“973”计划(2011CB013405);国家自然科学基金(50904072,51005243)
作者简介: 张冠楠(1989—),男(汉),河南南阳人,硕士生; **研究方向:** 润滑油失效分析与快速检测

网络出版日期: 2012-06-04 08:31; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120604.0831.002.html>

引文格式: 张冠楠, 王晓丽, 尹艳丽, 等. 磨粒对不同服役阶段润滑油的摩擦学性能影响 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(3): 98-103.

状态已得到了广泛的应用^[4],对润滑油监测及设备故障诊断都有很大帮助。铁谱分析技术就是一种较常用的油液磨粒分析手段,对润滑磨损故障诊断的机制有着较强解释性,尤其在预防早期、突发性故障领域有较大的优势^[5-6]。

随着服役时间的推移,润滑油将依次经历磨合磨损期、正常磨损期以及异常磨损期^[7],此过程中常因各类杂质的混入或摩擦化学反应等,导致润滑性能下降,不能满足使用要求,变为废润滑油^[8]。磨粒杂质是一种较为常见的污染物。事实上,废润滑油中变质成分仅是少部分,其润滑能力却远不如新油,可见磨粒对润滑油的摩擦学性能有着较大影响。文中利用铁谱技术对润滑油进行磨粒分析,通过摩擦磨损试验进行润滑油的摩擦学性能评价,考察其减摩抗磨性能,寻找磨粒对润滑油摩擦学性能影响的规律。

1 试验部分

油样取自某重型车辆柴油发动机所用牌号为CC50的4个润滑油样,服役时长为100、250、400、550 h,记为1、2、3、4号;另取一份同牌号新润滑油作为对比,记为0号。试验前先将4个油样和四氯乙烯溶剂按1:9的体积比进行稀释。用FTP-X2型分析式铁谱仪对配制好的4个油样进行铁谱试验,获得4个铁谱片;用OLYMPUS

光学显微镜对制得的铁谱片进行光学显微分析;利用Nova Nano SEM 450/650型扫描电子显微镜进一步观察磨粒表面的形貌。

采用德国OPTIMOL的SRV4型摩擦磨损试验机对4个油样和新油进行试验,根据摩擦因数判断油样的减摩性能;通过考察试样上的磨痕形貌和钢球的磨斑直径来评价润滑油样的抗磨性能。所用上试样钢球的材料为GCr15,下试样则为45钢。试验开始前,将钢球与试样分别在石油醚中用超声波清洗5 min。试验条件参数为:预加载荷10 N,载荷50 N;频率为10 Hz,行程1 mm;温度50 ℃;时间30 min;点接触,往复运动。试验结束后,将试样在石油醚中用超声波清洗20 min,用扫描电子显微镜观察磨痕表面形貌。

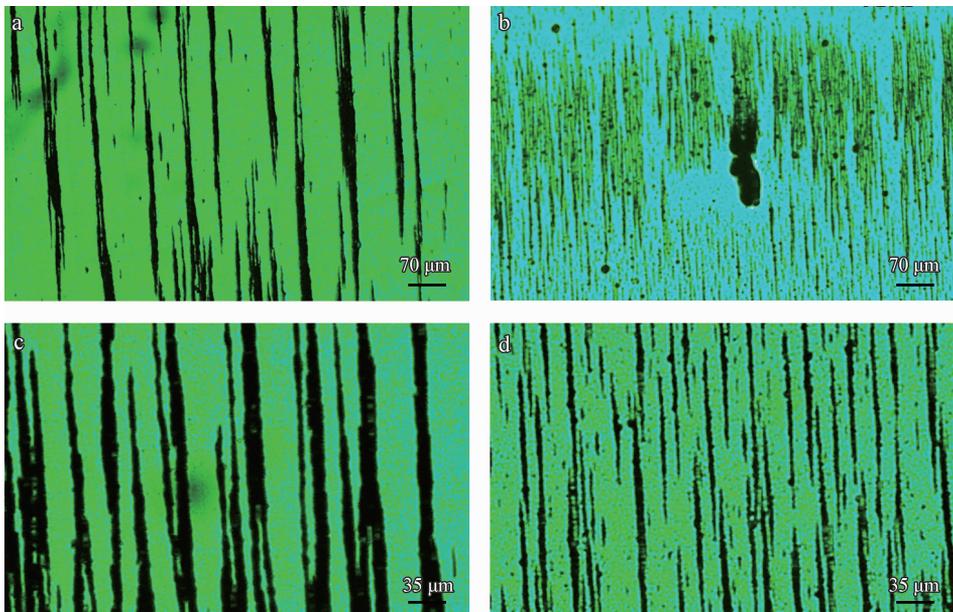
2 结果及分析

2.1 铁谱片的光学显微镜分析

利用铁谱仪附带的光学显微镜对铁谱片分别在单色绿光和单色白光下观察。

2.1.1 铁谱片在单色绿光下观察

对比图1(a)(c)可见,两铁谱片同一位置(入口处)观察,2号油样的铁谱线较1号密集,并且有少量离散分布的杂质,而两个油样的牌号又相同,表明2号油磨粒含量较大;从铁谱片中部区域磨粒沉积链均匀、细长的特点(见图1(d))可见,



(a) Sample 3 (b) A friction polymer in sample 3 (c) Sample 4 (d) The middle of the ferrogram of sample 4

图1 绿色背景光下铁谱片的显微照片

Fig. 1 Optical micrographs of the ferrogram under green light

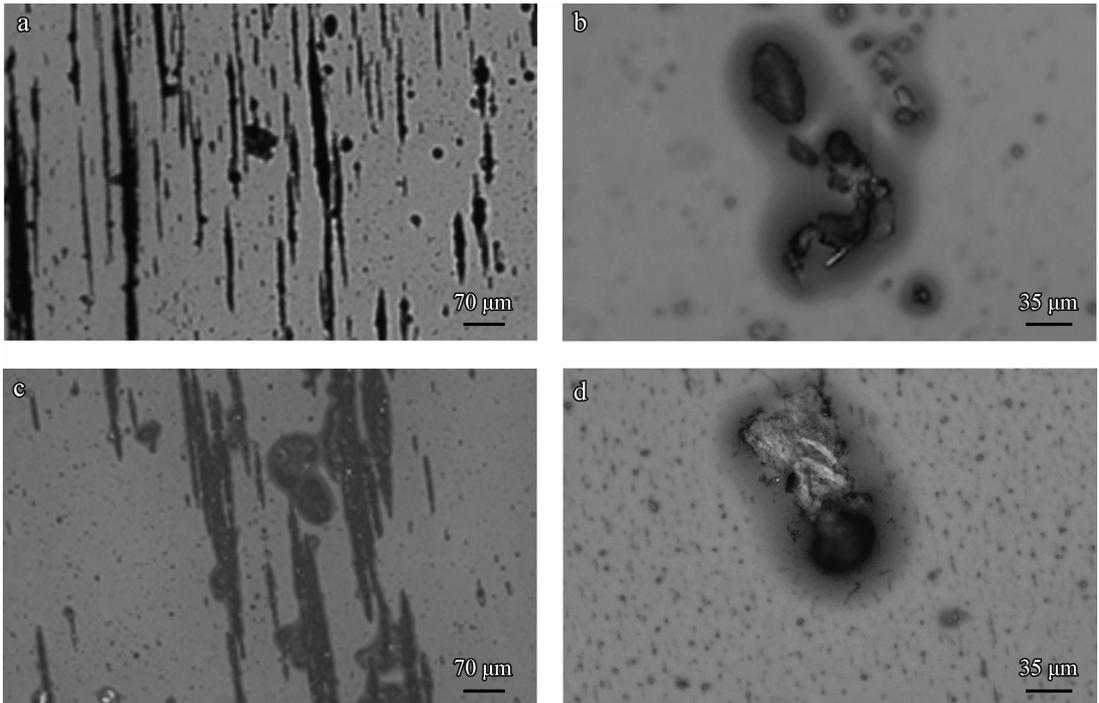
设备磨损状态较好,故推测2号润滑油样处于正常磨损阶段。图1(a)显示沉积链呈条状细长形,主要磨粒的粒度约为 $10\sim 15\ \mu\text{m}$,浓度也比较低。此外,1号油样中(见图1(b))可明显观察到一个团状的杂物,推测可能是铁的黑色氧化物和少量水的聚合物或者是外界进入油液中的灰尘等杂质团粒。任何黑色金属氧化物(主要是 Fe_3O_4),都可以作为异常磨损信号^[9]。黑色团粒的出现说明装备零部件发生了异常磨损或润滑油系统受到粉尘或水的污染。在润滑油服役的早期,虽然摩擦磨损量较少,但可能存在少量异常磨损,故1号属油样典型的磨合磨损期。

分析表明,1号油样磨粒含量少,但也有少量异常磨损产物出现,所服役的设备可能正处于磨合磨损时期;2号油样可能处于正常磨损期,但具体形貌仍需进一步研究。

2.1.2 铁谱片在单色白光下观察

根据试验检测,观察磨粒形貌及颜色在单色白色下观察效果更好。由图2(a)可知,3号油样沉积链粗大、浓密,属典型异常磨损期的大磨粒视场,存在若干层状颗粒(黏着磨损产物)及较多的球状颗粒(疲劳磨损产物),两种颗粒同时出现通常标志着设备摩擦副出现了疲劳裂纹。随着

服役时间的推移,润滑油黏度增加,黏着磨损的擦痕会越深和越宽,表面耐磨性降低^[10],设备磨损加剧。据观察,层状颗粒多大于 $15\sim 20\ \mu\text{m}$,预示着摩擦副表面已经发生了严重黏着磨损^[11],继续下去很可能导致设备故障。图2(b)中显示有黄色、银色金属磨屑存在,表明设备磨损产生的磨屑中有可能含有铜、铝元素或其它化合物,说明设备中含铜、含铝机件磨损较为严重,应加以修复;若为 Fe_2O_3 则说明摩擦过程中氧化严重。图2(c)显示4号油样中沉积链粗大、不均匀,有较多的片状磨屑杂质,尺寸达到 $20\ \mu\text{m}$ 左右,其表面已成草黄回火色,加上有黑色 Fe_3O_4 磨粒聚合物存在,说明设备摩擦副在工作时常伴有摩擦过热,研究表明温度是影响摩擦剧烈程度的一个重要因素,摩擦过热、温度升高会加快摩擦速率,会导致摩擦加剧^[12]。图2(d)显示4号油样中存在白色游离铁系疲劳剥落磨块,尺寸达 $30\sim 50\ \mu\text{m}$,还黏着有少量黑褐色油泥。油泥是一种棕黑色稀泥状物质,一般分散在润滑油中,对机件有一定危害:易产生亚硫酸侵蚀缸壁,造成起动磨损,消耗添加剂以及引起油液污染等^[13]。白色游离铁系疲劳剥落磨块和油泥的出现说明摩擦副润滑不良,设备磨损较严重。



(a) Sample 1 (b) A typical wear debris in sample 1 (c) Sample 2 (d) A typical wear debris in sample 2

图2 单色白光下铁谱片的显微照片

Fig. 2 Optical micrographs of the ferrogram under white light

分析说明,3、4号油样属于异常磨损期的典型油样,磨粒含量较大,异常磨损产物众多。

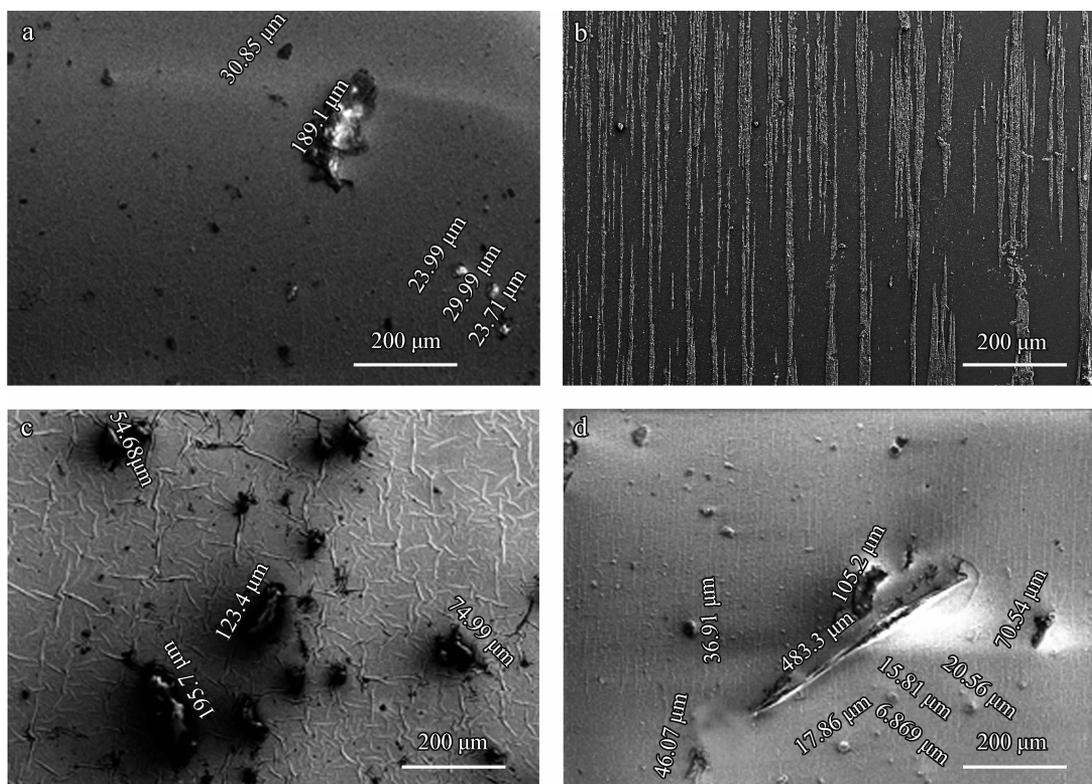
2.2 铁谱片的扫描显微镜分析

对4个油样铁谱片中的磨粒分布情况扫描电子显微镜观察,结果如图3中所示。

1号油样为磨合磨损期磨粒视场(图3(a)),大部分磨粒尺寸分布较一致,约20~30 μm,离散磨粒浓度较低,且存在一块约200 μm的油泥块,说明磨合磨损期确实有少量异常磨损产物。图3(b)是铁谱片上入口区附近的沉积链形貌,2号油样沉积链均匀密集,沿磁力线方向均匀分布,从右至左,粒径尺寸逐次递减。视场中并无

明显异常大磨粒,符合典型的正常磨损期磨粒视场分布^[14]。在相同倍数下,2号油样中离散磨粒的粒径远小于其余三者,磨粒均为正常磨损产物,不会对设备造成严重摩擦磨损,设备正处于较好的工作状态。由图3(c)(d)可以看出,处于异常磨损期3号和4号油样,所含异常磨粒浓度高且尺寸较大,大多数可达几十乃至数百微米,且有明显黑色黏着物,初步判定该团粒为磨屑杂质与少量油泥的团聚物。

上述分析说明,在润滑油的不同服役阶段,所含主要磨粒的粒径大小关系为异常磨损期>磨合磨损期>正常磨损期。



(a) Debris in sample 1 (b) Debris in sample 2 (c) Debris in sample 3 (d) Debris in sample 4

图3 4个油样的铁谱片中磨粒的SEM照片

Fig. 3 SEM micrographies of wear debris of the four lubricants on ferrograms

2.3 摩擦磨损试验

SRV试验主要考察4个油样的摩擦学性能,并与同牌号新油进行对比,利用摩擦因数表征油样的减摩性能,并通过考察试样的磨痕形貌和钢球磨斑直径来评价润滑油样的抗磨性能衰变程度。

2.3.1 润滑油的减摩性能

图4为4个油样及新油的动态摩擦因数曲

线。对比新油,4个油样的摩擦因数均有不同幅度的增大,1号油样的摩擦因数曲线相对波动较小,基本较为稳定;2号油样的摩擦因数曲线略有起伏,最为平稳,稳定在0.14左右,无明显增大趋势,展示出了较好的摩擦磨损特性和良好的润滑性能。3、4号油样的摩擦因数在0.16左右,远远高于新油;与新油的摩擦因数曲线较为平稳相比,波动较大,曲线平稳性较差,且有逐渐增长的

趋势,表明油样的摩擦学性能已经急剧变差,润滑作用受到严重破坏,这正是润滑油服役的后期——异常磨损阶段油液的性能特点。因此,4个油样减摩性能与各自所处的磨损阶段是相对应的,当含有不同磨粒时有着不同润滑性能,相对于新油时各油样减摩性能的下降程度关系为:异常磨损期>磨合磨损期>正常磨损期,这说明润滑油的减摩性能与所含的磨粒杂质情况确有较大关系,可粗略地认为主要磨粒粒度越大则其减摩性能越差,表现为油液的摩擦因数剧烈增大,但具体的对应关系还需进一步深入研究。

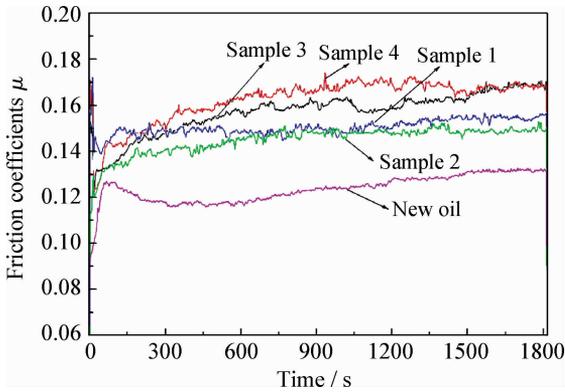
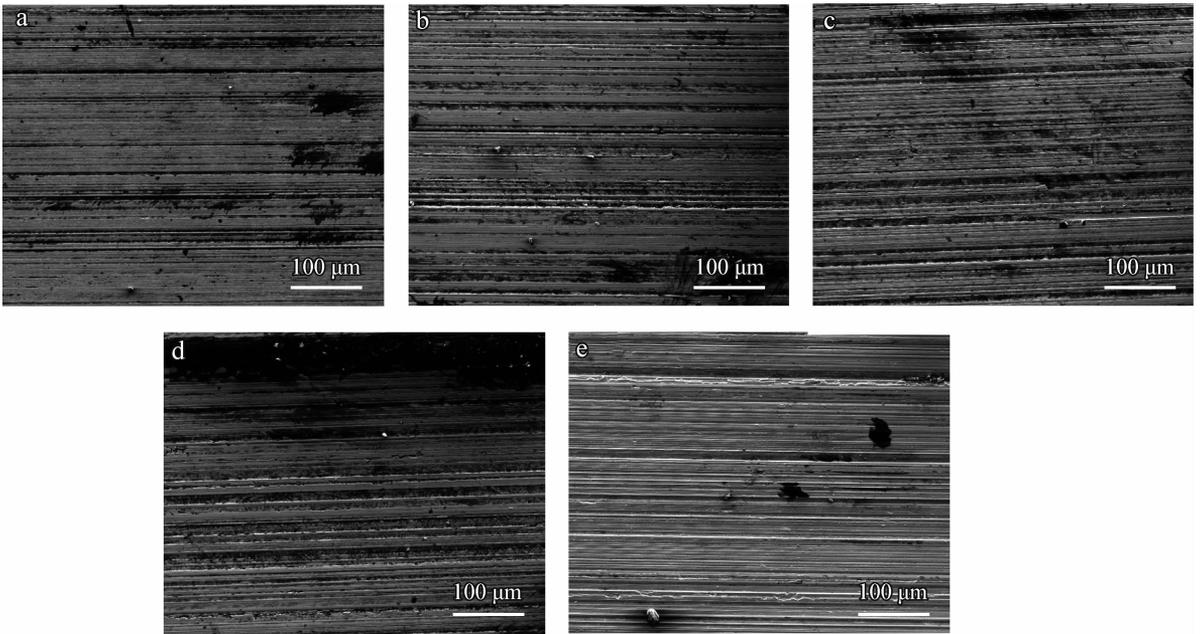


图4 不同油样润滑下的摩擦因数

Fig. 4 Friction coefficients of new oil and four lubricants

2.3.2 润滑油的抗磨性能

由于接触面的硬度对摩擦的大小和磨损表面有着显著影响^[15],因此选用较软的下试样来观察磨损形貌。图5所示为不同润滑条件下试样磨痕形貌照片。如图所示,5(a)(b)所示磨痕中犁沟和划痕较5(c)(d)浅且窄,损伤的程度也相对较轻,这是因为1、2号油样中所含的异常磨粒数量较少,尺寸也较小。与新油的磨痕形貌相比(见图5(e)),3、4号油样中表面磨痕形貌磨损相对严重,有相当数量较深的犁沟和较宽的划痕,另有一定团聚物出现(见图5(c)(d))。说明在磨损状态下,钢球与下试样之间发生了严重的磨损,主要由于3、4号润滑油中大量磨粒在一定程度上破坏了润滑油膜,摩擦副进入了边界润滑状态,磨损程度加剧。由于钢球硬度大于试样,故而试样磨痕中形成了大量犁沟和划痕,而犁沟的深度、划痕的宽度则与磨粒硬度较高(诸如 Fe_3O_4 磨粒等)、粒径较大(较大的异常磨粒)相关。对比新油,4种润滑油所形成的磨痕中在犁沟或划痕的底部沉积有少量的黑色团聚物,可能是摩擦过程中某些小颗粒的接触点产生了较高温度导致磨屑被氧化成黑色 Fe_3O_4 ,加上油样中存在的积碳、漆膜等污染物就形成了团聚物,该类物质的存在无疑会加剧摩擦磨损。此外,观察5(e)



(a) Sample 1 (b) Sample 2 (c) Sample 3 (d) Sample 4 (e) Sample 0

图5 不同油样润滑条件下试样磨痕形貌的 SEM 照片

Fig. 5 SEM of the worn surface lubricated by different oil samples

的大部分划痕及5(a)、(b)的部分划痕处,可发现剥落破损,说明在磨损的过程中还存在黏着磨损情况,有研究表明油浴摩擦时则主要为黏着磨损和腐蚀磨损^[16],解释了上述破损点的出现。由于磨粒的存在会抑制黏着倾向,而3、4号油样中的磨粒含量要远大于1、2号以及0号新油样,这也是3、4号油样中未观察到剥落破损处的原因之一。

图6显示了不同油样的磨斑直径值,相比新油的0.35 mm,1、2、3、4号油样分别为0.42、0.44、0.51、0.60 mm,增幅达到20.0%、25.7%、45.7%、71.4%。这说明随着服役时间的增加,润滑油的抗磨性能下降明显,已难以满足使用要求。

总之,润滑油中磨粒的存在使得油液的抗磨性能下降,而且磨粒的粒径、含量与造成磨擦表面损伤的程度成正相关。其中,磨粒的粒径主要影响磨痕的宽度,含量主要影响磨痕的密度。

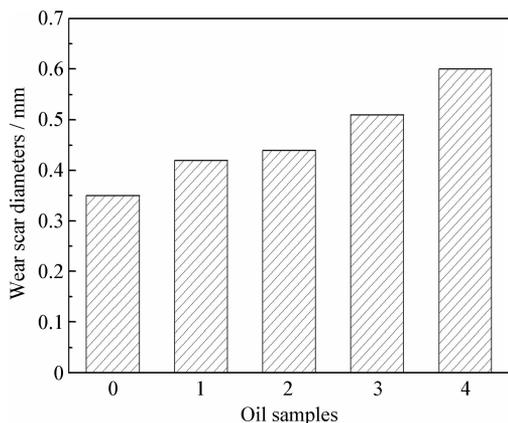


图6 不同润滑油样的磨斑直径值

Fig. 6 Wear scar diameters of different oil samples

3 结论

(1) 在润滑油的不同服役阶段,所含主要磨粒含量、尺寸及形貌各有特点,其中粒径大小关系为异常磨损期>磨合磨损期>正常磨损期。

(2) 润滑油所含的磨粒杂质使油液减摩性能下降明显。与新油相比,4个油样摩擦因数曲线均有不同程度波动,且润滑油所处服役阶段不同,磨粒对油液减摩性能影响程度不同。

(3) 润滑油中磨粒的大量存在使得油液的抗磨性能下降,相比新油的磨斑直径值为0.35 mm,1、2、3、4号油样分别为0.42、0.44、0.51、

0.60 mm,增幅达到20.0%、25.7%、45.7%、71.4%。磨粒的粒径、含量与造成磨擦表面损伤的程度成正相关。其中,磨粒的粒径主要影响磨痕的宽度,含量主要影响磨痕的密度。

参考文献

- [1] 张嗣伟. 我国摩擦学工业应用的节能潜力巨大 [J]. 中国表面工程, 2008, 21(2): 49-52.
- [2] 罗俊,何立明,陈超. 铁谱技术及其发动机监控中的应用 [J]. 航空维修与工程, 2007(3): 36-38.
- [3] Unchung Cho, John A. Tichy. Quantitative correlation of wear debris morphology: grouping and classification [J]. Tribology International, 2000, 33: 461-467.
- [4] Timothy N, Mark S. Analytical ferrography applied to driveline fluid analysis [J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2009, 1(1): 1480-1490.
- [5] Xiao H L. The development of ferrography in China—some personal reflections [J]. Tribology International, 2005, 38: 904-907.
- [6] Roylance B J. Ferrography—then and now [J]. Tribology International, 2005, 38: 857-862.
- [7] 张学丽,樊瑜瑾,翁家庆,等. 利用铁谱技术分析某柴油机的摩擦聚合物 [J]. 机械管理开发, 2008, 23(1): 53-56.
- [8] 王晓丽,徐滨士,许一,等. 装备润滑油失效分析与再生研究 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(2): 73-78.
- [9] 孙占红,佟风华,林有志. 铁谱分析技术在履带车辆检测中的应用 [J]. 农业与技术, 2009, 129(3): 185-187.
- [10] 温诗铸. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [11] 杨俊杰,陆思聪,周亚斌. 油液监测技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [12] Yuan C Q, Peng Z, Zhou X C, et al. Effects of temperature on sliding wear process under contaminated lubricant test conditions [J]. Wear, 2004, 257: 812-822.
- [13] 毛美娟,朱子新,王峰. 机械装备油液监控技术与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [14] 杨其明. 磨粒分析——磨粒图谱与铁谱技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [15] Le'sniewski T, Krawiec S. The effect of ball hardness on four-ball wear test results [J]. Wear, 2008, 264: 662-670.
- [16] Jia B B, Li T S, Liu X J, et al. Tribological behaviors of several polymer-polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions [J]. Wear, 2007, 262: 1353-1359.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎21号

100072

Tel: (010)6671 8540

E-mail: zhangguannan1989@sina.com