

再生润滑油理化性能分析与摩擦学性能评价 *

陈 江, 王晓丽, 许 一, 徐滨士, 张冠楠

(装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072)

摘 要: 采用以絮凝分离工艺为主的技术对重载车辆用废 CD 10W-40 润滑油进行再生处理。对再生润滑油的透光率、黏度、污染度、腐蚀性等理化性能指标进行了测定, 采用四球摩擦磨损试验机及扫描电子显微镜对其摩擦学性能进行了评价, 并与废润滑油、新润滑油作对比分析。结果表明: 再生润滑油的外观为棕黄色, 透光率可达 89.9%, 接近新润滑油的 96.7%, 100 ℃ 运动黏度增至 14.16 mm²/s, 污染度和腐蚀性明显降低; 最大无卡咬负荷 P_B 值提高到 618 N, 摩擦因数及磨斑直径与新润滑油基本接近, 再生润滑油的减摩抗磨性能得到了显著改善。使用含有氨基结构的有机絮凝剂达到了较好的再生效果。

关键词: 废润滑油; 再生; 理化性能; 摩擦学性能

中图分类号: TE992.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)06-0073-05

Analysis of Physical and Chemical Performances and Evaluation of Tribological Properties of the Reclaimed Oil

CHEN Jiang, WANG Xiao-li, XU Yi, XU Bin-shi, ZHANG Guan-nan

(Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: The CD 10W-40 waste lubricating oil from a heavy vehicle engine was regenerated by mainly using the mainly flocculation-separation process. With related testing instruments, transmittances were measured. The physics and chemistry performances of the reclaimed lubricating oil such as viscosity, dustiness and corrosiveness were analyzed, which compared with the waste oil and the new oil. The tribological properties of different oils were investigated. The results showed that the reclaimed oil presents the tan-yellow color, transmittance can reach 89.9%, approach 96.7% of the new lubricating oil. 100 ℃ kinematic viscosity increases to 14.16 mm²/s. pollution and corrosivity obviously decrease. P_B value of the reclaimed oil increases to 618N, the friction coefficient and the wear scar diameter approaches to that of the new oil. The performance of reclaimed oil is close to the level of new oil. The flocculating agent can reach favorable effect.

Key words: waste lubricating oil; regeneration; physical and chemical performances; tribological properties

0 引 言

润滑油在服役过程中常因污染物侵入和自身氧化而变质, 主要表现为颜色变深、酸值上升、伴有刺激性气味^[1], 导致其性能下降, 不能满足使用要求而被更换下来, 成为废润滑油^[2]。2008 年施行的《国家危险废物名录》明确将废润滑油列入第 8 类, 属于“HW08 废润滑油”^[3]。实际上, 废润滑油中变质成分仅占少部分, 经过适当的再生工艺处理除去外来污染物及变质成分,

具有较高使用价值。对废润滑油再生处理, 不仅能缓解能源短缺的压力, 实现石油资源利用最大化, 而且能减少环境污染, 符合可持续发展要求^[4]。

我国废润滑油再生多数仍是沿用传统的酸-白土工艺, 但该工艺产生的酸渣难以处理、严重污染环境, 而国外无酸再生工艺通常是经沉降、丙烷脱杂或溶剂精制后再进行加氢精制, 仅适合于大规模的再生装置、反应条件较为苛刻^[5]。目前我国特别是部队废润滑油油源分散, 集中回收成本较高、难度较大, 废润滑油絮凝分离再生工艺^[6-10]以其高效率、低成本、少污染及适合于中小规模再生等优点成为了研究的热点。而对废润

收稿日期: 2011-07-09; 修回日期: 2011-11-07

基金项目: * 国家自然科学基金 (50735006; 50805146; 50904072; 51005243)

作者简介: 陈 江(1987—), 男(汉), 浙江金华人, 硕士生。

滑油再生过程中油品性能的评价一般仅限于常规的理化性能分析,如何更全面、准确地评价再生润滑油的性能也是废润滑油再生研究的重点。文中采用以絮凝分离工艺为主的技术对废润滑油再生处理取得了一定效果,在测定分析不同油品主要理化性能指标的基础上,评价了不同油品的摩擦学性能,为判断再生效果、评价油品质量提供了依据。

1 试验部分

1.1 试验油品

试验所用废油为从某重载车辆柴油发动机上更换下来的废 CD 10W-40 润滑油(waste oil, WO)。采用自主研发的以絮凝分离工艺为主的废润滑油再生技术,筛选出一种具有氨基结构(NH_2 或 $-\text{NH}-$)的高效有机絮凝剂(相对分子量为 102~190),用烧杯取出 200 mL 的废润滑油并将其置于恒温 50 $^{\circ}\text{C}$ 的加热套中,边搅拌边向废油中慢慢滴入 4 mL 的絮凝剂,搅拌时间为 5 min;而后将加热套温度升高至 70 $^{\circ}\text{C}$ 并将油液静置沉降 2 h,废润滑油中的杂质有明显的絮凝成团和沉降现象;再经过硅藻土无机膜净化处理后得到再生润滑油(reclaimed oil, RO)。新油为 CD 10W-40 新润滑油(new oil, NO)。

1.2 理化指标测定

采用 722N 可见分光光度计(上海精密科学仪器有限公司)检测不同波长下油品的透光率,以石油醚为参比(100%),1 cm 长比色槽,同时油品用石油醚稀释相同倍数。

采用 SYD-265C 石油产品运动黏度试验器(上海昌吉地质仪器有限公司)按照 GB/T 265 测定 100 $^{\circ}\text{C}$ 时的运动黏度;采用 DCA 型颗粒计数器(ENTEK 公司)按照 NAS1638 测定污染度等级;采用 SYD-5096A 铜片腐蚀试验器(上海昌吉地质仪器有限公司)按照 GB/T 5096 测定腐蚀性。

1.3 摩擦学性能评价

采用 MM-10W 多功能摩擦磨损试验机(济南宏试金试验仪器有限公司),按照 GB 3142 评价不同油品的承载能力并考察其减摩抗磨性能。试验主要参数为:转速 600 r/min,载荷变化,时间 30 min,室温。

试验结束后采用精度为 0.01 mm 的光学显微镜(上海光学仪器有限公司)测量钢球的磨斑直径(WSD)评价润滑油的抗磨性能,所测直径为 3 个钢球磨斑直径的平均值。将试验后的钢球在石油醚中用超声清洗 5 min 后,采用 Quanta 200 扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, FEI 公司)分析钢球磨斑表面形貌。

2 试验结果与分析

2.1 理化性能分析

2.1.1 油品颜色及透光率

图 1 示出了不同油品实物照片。可以看出,废油 WO 颜色浓黑,再生油 RO 呈棕黄色,接近新油 NO 的深黄色,再生油的颜色有了极大的改善。

图 2 示出了在石油醚稀释剂:油为 20:1(体积比)的条件下油品在不同波长下的透光率。透光率可粗略表征废润滑油再生的效果^[11]。废油 WO 透光率的最大值仅为 0.5%,而再生油 RO

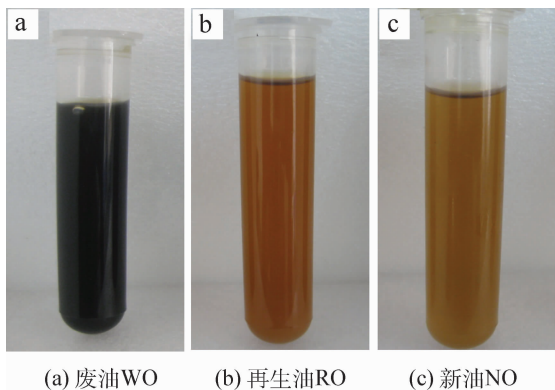


图 1 不同油品的实物照片

Fig. 1 Photographs of the different oils

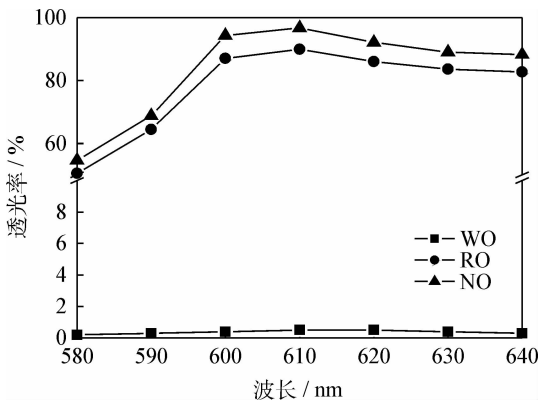


图 2 不同油品的透光率

Fig. 2 Transmittances of the different oils

和新油 NO 的变化趋势基本一致,在波长为 610 nm 时透光率最大,RO 为 89.9 %,接近 NO 的 96.7 %。RO 的透光性较废油 WO 有了极大地改善,说明 WO 中的污染物已经基本去除。

表 1 列出了废油 WO、再生油 RO 和新油 NO 的运动黏度(100 ℃)、污染度和铜片腐蚀测定结果。

表 1 不同油品的理化性能					
Table 1 Physical and chemical performances of the oils					
项目	废油 WO	再生油 RO	新油 NO	质量 指标	试验 方法
运动黏度/ (mm ² · s ⁻¹)	11.71	14.16	14.72	12.5~ 16.3	GB/T 265
污染度 等级	12	10	9		NAS 1638
铜片腐蚀 分级	1b	无	无		GB/T 5096

2.1.2 黏度

在正常工作条件下,影响润滑油流动性的主要因素是黏度。润滑主要是靠润滑油在摩擦副之间形成的油膜将金属表面隔开而实现的,而黏度将直接影响摩擦副间油膜的厚度^[12]。

一般情况下,黏度越大,油膜越厚,但容易损失越多的动能;黏度太小则不足以保持流体润滑所需的油膜厚度^[13]。废油 WO 的黏度大幅度下降,势必影响重载车辆发动机的润滑需求,形成油膜较薄,金属表面容易直接接触,加剧摩擦磨损,其黏度下降的原因可能是部分添加剂的降解、轻质燃油的稀释等;而再生油 RO 的黏度得到了恢复,升高至 14.16 mm²/s,达到了 12.5~16.3 mm²/s 的质量指标。

2.1.3 污染度

WO、RO、NO 的污染度等级分别为 12、10、9,研究表明,油液中小于 5 μm 的颗粒一般与正常磨损机制及润滑油的物理化学性能有关,而 5~15 μm 尺寸段与部件运动间隙相当,易引起剧烈的磨损^[14]。

表 2 节选于 NAS1638 等级标准,由表可知,废油 WO 在 5~15 μm 尺寸段的颗粒数达到了 1 024 000,远大于再生油 RO 的 256 000 和新油 NO 的 128 000,其主要原因是 WO 中存在的清净分散剂等添加剂将多数污染物分散在了油液中。而絮凝过程除去了 WO 中大量的颗粒物,使

其颗粒数降低。

表 2 NAS1638 等级标准(100 mL 中的颗粒数)^[15]
Table 2 Standards of NAS1638(the number of granules in 100 mL oil)^[15]

污染度 等级	颗粒度尺寸范围/μm				
	5~15	15~25	25~50	50~100	>100
9	128 000	22 800	4 050	720	128
10	256 000	45 600	8 100	1 440	256
12	1 024 000	182 400	32 400	5 760	1 024

2.1.4 腐蚀性

铜片腐蚀试验表明废油 WO 的腐蚀分级为 1b,具有轻度腐蚀性,润滑油中烃类本身对金属没有腐蚀作用,腐蚀性物质的主要来源是润滑油中含有的有机酸或工作过程中氧化后产生的酸性物质和混入的水分等^[16]。这些物质可与金属接触发生化学或者摩擦化学作用。而再生油 RO 和新油 NO 都没有腐蚀性,说明再生过程中已经基本将 WO 中的这些腐蚀性物质去除。

以上结果表明,经过再生工艺处理的再生油 RO 在上述主要理化性能指标上已经有了明显的改善,接近新润滑油水平,达到了同级别油的质量指标。初步分析,主要原因是优选的具有氨基结构的有机絮凝剂分散性较好,不仅具有双电层压缩、沉淀物网捕和吸附架桥等一般絮凝剂的作用^[17],而且其氨基基团中氮原子的孤对电子因受废润滑油中氧化物的氧原子吸引而降低电子云密度,使与氮原子连接的氢原子活泼起来而形成氢键,从而使废润滑油中的氧化物钝化^[18],积碳、漆膜和油泥等杂质被缠绕包裹起来,聚集成团,从而能在油中沉降使杂质和油得到较好分离。

2.2 摩擦学性能评价

摩擦学性能是发动机润滑油重要的性能指标之一,主要包括抗极压性能(最大无卡咬负荷 P_B)、减摩性能(摩擦因数)和抗磨性能(磨斑直径)。

2.2.1 抗极压性能

表 3 示出了不同油样的承载能力(最大无卡咬负荷)。可以看出,再生油 RO 的 P_B 值达到 618 N,比废润滑油提高了 34.1%,油膜的承载能力得到提高。

表 3 不同油样的承载能力

Table 3 P_B values of the different oils

油样	废油 WO	再生油 RO	新油 NO
最大无卡咬负荷 P_B/N	461	618	726

2.2.2 减摩抗磨性能

图 3 为转速 600 r/min,不同载荷条件下,不同油品润滑下的平均摩擦因数。可以看出,废油 WO 润滑下的摩擦因数较大,其减摩性能较差;与 WO 相比,再生油 RO 和新油 NO 润滑下的摩擦因数明显变小。当载荷分别为 196 N、392 N、588 N 时,RO 润滑下的摩擦因数较 WO 分别减小了 11.9%、2.1%、10.7%,但较 NO 有一定差距。当载荷为 784 N 时,WO 润滑下摩擦副出现了卡咬现象,表明其承载能力不高,而 RO 润滑下的摩擦因数较 NO 还略低。

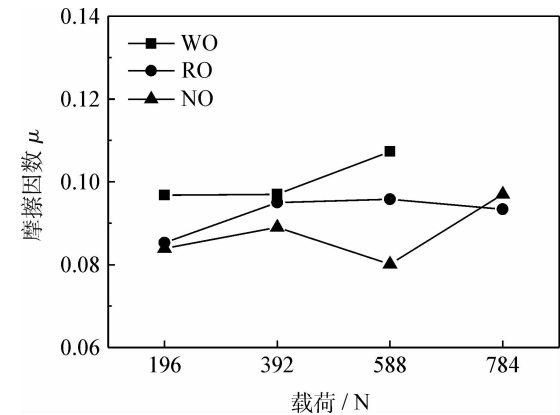


图 3 不同载荷条件下的平均摩擦因数

Fig. 3 Average friction coefficient of the different oils under diversity loads

图 4 示出了转速为 600 r/min,不同载荷条件下不同油品润滑下的磨斑直径。可以看出,随着载荷的增加,不同油品润滑下的磨斑直径都有变大的趋势,WO 润滑下增幅最大。而 RO 润滑下钢球的磨斑直径与 NO 较为接近,抗磨性能得到了较大程度恢复。当载荷 196 N、392 N、588 N 时,RO 润滑下的磨斑直径较 WO 分别减小了 18.6%、16.3%、14.4%,较 NO 略大,说明 RO 的抗磨性能得到了明显改善。

图 5 更为直观地示出了载荷为 784 N,转速为 600 r/min 条件下,3 种油品摩擦因数随时间变化曲线。WO 润滑下的摩擦因数较大,在试验运行 550 s 左右时,摩擦因数发生跳动,润滑油膜

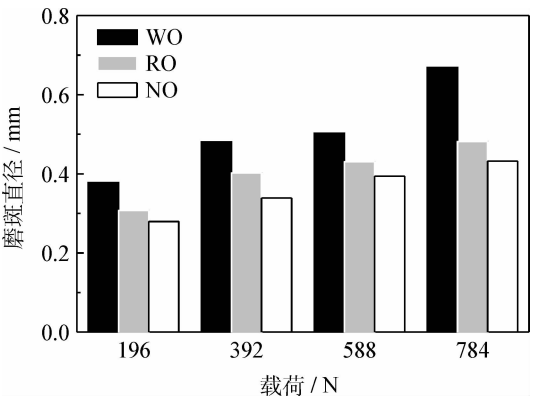


图 4 不同载荷条件下的磨斑直径值

Fig. 4 Wear scar diameter under applied loads

开始失效。经过磨合期后,RO 润滑下的摩擦因数较 NO 要低,其平均摩擦因数比 NO 润滑下的降低了 3.9%,说明再生润滑油的减摩性能有了显著的改善,达到甚至优于新润滑油的水平。

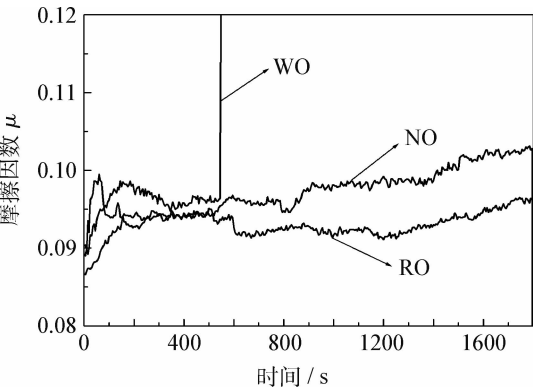


图 5 不同油品润滑下的摩擦因数曲线

Fig. 5 Friction coefficient of the different oils

图 6 示出了不同润滑油润滑下的钢球磨斑形貌 SEM 照片(载荷 784 N,转速 600 r/min,时间 30 min)。

可以看出,NO 润滑下的钢球磨损表面比较平滑,犁沟较浅,划痕较窄,擦伤迹象比较轻微。WO 润滑下的钢球磨损表面分布着大量较深的犁沟和较宽的划痕,其形状已经发生了明显的改变,发生了偏磨损,油膜不完整,磨损表面存在明显的磨粒磨损和黏着磨损迹象,表明 WO 的润滑能力较弱。RO 润滑下磨损表面较为平整光滑且犁沟较浅,擦伤明显减轻,基本接近新润滑油的水平。这与图 4 显示的抗磨效果基本一致。

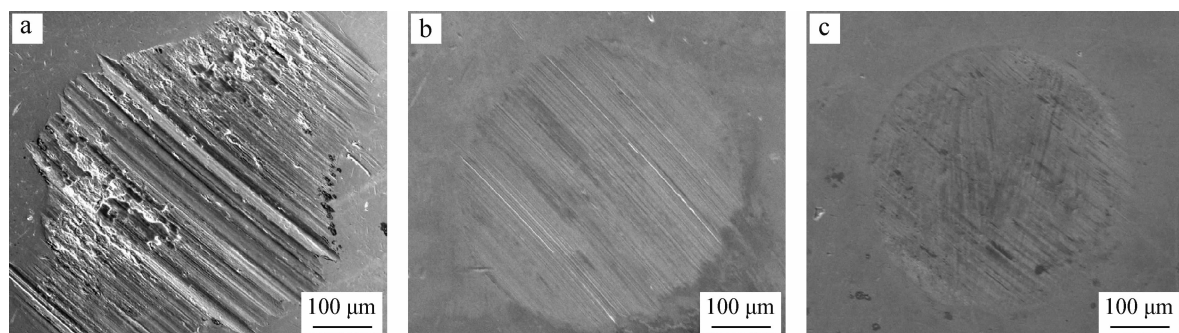


图 6 不同润滑条件下钢球磨斑形貌的 SEM 照片 (a)废油 WO (b)再生油 RO (c)新油 NO

Fig. 6 SEM images of the worn surfaces lubricated by different oil

3 结 论

(1) 再生润滑油的主要理化性能指标得到明显改善,接近新润滑油的水平。再生润滑油外观为棕黄色,透光率可达 89.9%,接近新润滑油的 96.7%,100 ℃运动黏度增至 14.16 mm²/s,污染度和腐蚀性明显降低。

(2) 再生润滑油的抗极压性能和减摩抗磨性能得到较大改善,接近新润滑油水平。再生润滑油的最大无卡咬负荷 P_B 值提高到 618 N,比废润滑油润滑下提高了 34.1%;当载荷分别为 196 N、392 N、588 N 时,再生润滑油润滑下的摩擦因数较废润滑油分别减小了 11.9%、2.1%、10.7%,载荷为 784 N 时,再生润滑油润滑下的摩擦因数较新润滑油还略低;再生润滑油润滑下的磨斑直径与新润滑油润滑下基本接近。

(3) 具有氨基结构的有机絮凝剂达到了良好的废润滑油再生效果。

参考文献

- [1] 周松锐,尹英遂,王媛媛,等. 短程蒸馏技术在废润滑油再生工艺中的应用 [J]. 化工进展, 2006, 25(11): 1371-1374.
- [2] Elbashir N O, Zahrani S M, Mutalib M I, et al. A method of predicting effective solvent extraction parameters for recycling of used lubricating oils [J]. Chemical Engineering and Processing, 2002, 41: 765-769.
- [3] 戴钧樑. 废润滑油再生(第四版) [M]. 北京: 中国石化出版社, 2009.
- [4] 徐先盛. 我国废润滑油再生工艺及发展策略探讨 [J]. 润滑油, 1993(3): 20-23.
- [5] 李西昌,金智勇,黄荣华. 絮凝法再生 ND5 柴油机

油 [J]. 北方交通大学学报, 1990, 14(4): 45-53.

- [6] 丁福臣. 萃取-絮凝法再生废润滑油的研究 [J]. 北京石油化工学院学报, 1995, 3(2): 44-48.
- [7] 张晞. 润滑油综合净化与废油再生技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1997: 129.
- [8] 张圣领,刘宏文,赵旭光. 废润滑油絮凝-吸附再生工艺的研究 [J]. 化学世界, 2002, 10: 527-529.
- [9] 古昌红,单振秀,黄艳玲. 再生润滑油吸附除臭的实验研究 [J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(5): 18-20.
- [10] 李璐,郭大光,莫娅南. 废润滑油再生工艺的研究 [J]. 辽宁石油化工大学学报, 2008, 28(4): 20-23.
- [11] 徐高扬,陆明. 船用废润滑油的再生 [J]. 中国资源综合利用, 2003(9): 14-16.
- [12] 董俊修. 润滑原理及润滑油 [M]. 北京: 烃加工出版社, 1987.
- [13] 李久盛,郝利峰,徐小红,等. 表面修饰纳米硼酸钙的制备及摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(3): 29-32.
- [14] 高虹亮,杨宏,萧汉梁. 油液污染度分析在船用舵桨装置状态监测中的应用 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(3): 175-177.
- [15] 张志强,于达仁. 流体污染检测中清洁度等级评判标准的应用研究 [J]. 中国机械工程, 2002, 13(1): 50-53.
- [16] 谢学兵,陈国需,孙霞,等. 润滑油纳米 TiO₂ 添加剂的摩擦自修复及其性能研究 [J]. 中国表面工程, 2008, 21(2): 36-39.
- [17] 徐晓军. 化学絮凝剂作用原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [18] 张贤明,焦昭杰,李川,等. 废润滑油絮凝脱色试验研究 [J]. 环境污染与防治, 2007, 29(11): 809-811.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号

100072

Tel: (010) 6671 8540

E-mail: plachenjiang@163.com