

再生柴油机润滑油使用周期理化指标的衰变特性

胡志远¹, 黄文明², 陈 争¹, 楼狄明¹

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 上海巴士第一公共交通有限公司, 上海 200433)

摘要: 为验证再生润滑油的使用性能, 以通过膜蒸馏技术制备的再生 15W-40 润滑油为研究对象, 开展了再生润滑油使用周期内理化指标的衰变特性研究, 分析了再生润滑油使用过程中的黏度、酸值、碱值、水分含量、不溶物含量、元素含量等指标的衰变过程。结果表明, 在规定的使用周期内, 除酸值增加值之外, 再生润滑油的黏度变化率、碱值降低率、水分含量、不溶物含量、Fe、Al、Cu 等磨损元素和 Si 等污染物元素含量满足 GB/T 7607—2010 中规定的换油限值要求, 再生润滑油的抗氧化能力相对较差, 污染度相对较高。建议再生润滑油的生产过程中应特别注意提高其抗氧化能力, 并降低污染度。

关键词: 再生润滑油; 理化指标; 衰变; 使用周期

中图分类号: TE992.4

文献标志码: A

Decay Characteristics of the Physical and Chemical Indexes of a Regenerated Diesel Engine Lubricating Oil during Its Service Period

HU Zhiyuan¹, HUANG Wenming², CHEN Zheng¹, LOU Diming¹

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Ba-shi First Public Transport Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: To verify the using feasibility of regenerated lubricating oil, a regeneration 15w-40 lubricating oil for bus diesel engine generating from used 15w-40 lubricating oil with membrane distillation was used as the research object, the decay of the physical and chemical indexes i. e. viscosity, acid value, alkali value, water content, insoluble matter and etc. were studied during the lubricating oil service period. The result showed that during the prescribed service period, along with the service time, the viscosity change rate, alkali value reduction ratio of base value, the water and insoluble matter content, as well as the Fe, Al, Cu and Si elements content were lower than the limit value from GB/T 7607—2010 which

indicate when the oil should be changed except for the increase amount of acid value. The antioxidant capacity and contamination level of regenerative lubricating oil were relatively poor compare with that of original 15w-40 lubricating oil. Therefore, we should pay particular attention to improve the antioxidant capacity and to reduce contamination level during the production of regenerative lubricating oil.

Key words: regeneration lubricating oil; physical and chemical indexes; decay; service period

柴油机的动力性、经济性、可靠性等与润滑油有着密切的关系^[1]。在柴油机润滑油使用过程中, 随着使用时间变长, 高温及空气的氧化作用、从摩擦部件上磨损的金属杂质、各种原因进入润滑油的水分等导致润滑油理化指标衰变。当润滑油理化指标衰变达到一定程度后必须更换, 否则加速发动机零件磨损, 最终导致发动机故障。因此, 研究润滑油使用过程的理化指标衰变规律具有重要的现实意义。

再生润滑油是把更换后的废旧润滑油通过物理或化学方法进行处理, 得到基础油, 再通过调配得到满足质量要求的润滑油的方式^[2], 可实现润滑油的再生利用。从环境保护、资源使用和经济性角度来看, 都是有利的^[3]。目前, 国内外学者关于再生润滑油的研究主要集中在废旧润滑油再生工艺^[4-6]、废旧润滑油及再生润滑油理化指标分析^[7-8]、再生润滑油摩擦学性能^[9-13]等方面, 关于再生润滑油使用过程理化性能衰变的研究未见报道。

以某公交车柴油机用 15W-40 润滑油为研究对象, 对柴油公交车使用再生润滑油运行过程中理化性能的衰变进行试验研究, 系统研究再生润滑油使用过程中的黏度、酸值、碱值、不溶物、污染度、添加剂元素、磨损元素、污染元素含量等衰变规律, 为再

收稿日期: 2016-09-04

基金项目: 上海市科委科技攻关计划(14231201502)

第一作者: 胡志远(1970—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为汽车能源技术、汽车低排放设计技术。

E-mail: huzhiyuan@tongji.edu.cn

生润滑油的推广使用提供参考依据。

1 试验方案

试验润滑油为:某品牌 15W-40 润滑油,以及该

润滑油使用后通过膜蒸馏技术再生得到基础油并再进一步调配得到的再生 15W-40 润滑油。原、再生润滑油的理化指标如表 1 所示。可见,再生润滑油满足 GB11122—2006 中黏度等级 15W-40 柴油机润滑油的黏温性能、抗氧化性能等要求。

表 1 润滑油的理化指标

Tab.1 Physical and chemical indexes of lubricating oil					
项目	单位	测量方法	原润滑油	再生润滑油	GB11122—2006
运动黏度(100 ℃)	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	ASTM D445	14.45	13.74	12.5~16.3
高温高剪切黏度(150 ℃)	$\text{mPa} \cdot \text{s}$	SH/T 0751	4.08	3.94	≥ 3.7
低温启动黏度(-20 ℃)	$\text{mPa} \cdot \text{s}$	ASTM D5293	5 848	5 522	$\leq 7\ 000$
倾点	℃	GB/T 3535	-27	-30	$\leq -25\text{ ℃}$
碱值(以 KOH 计)	$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	SH/T 0251	9.23	7.89	
水分(体积分数)	%	GB/T 260	痕迹	痕迹	痕迹
机械杂质(质量分数)	%	GB/T 511	无	无	≤ 0.01
蒸发损失(质量分数)	%	ASTM D6417	9.7	9.8	≤ 18
开口闪点	℃	GB/T 3536	236	227	≥ 215
泡沫性(24.0 ℃)	$\text{ml} \cdot \text{ml}^{-1}$	GB/T 12579	0/0	0/0	$\leq 10/0$
泡沫性(93.5 ℃)	$\text{ml} \cdot \text{ml}^{-1}$	GB/T 12579	10/0	10/0	$\leq 20/0$
泡沫性(后 24.0 ℃)	$\text{ml} \cdot \text{ml}^{-1}$	GB/T 12579	0/0	0/0	$\leq 10/0$

注:“泡沫性”对应对应的“/”前表示泡沫倾向,其后表示泡沫稳定性。

选择上海巴士第一公共交通有限公司同批投入使用的 2 辆 577 路公交车为试验车辆,其中,一辆公交车使用再生润滑油,另一辆公交车使用原润滑油。公交车运行过程中,每隔 1 个月进行 1 次润滑油采样,共采样 3 个月。根据《柴油机油换油指标:GB/T 7607—2010》在用润滑油的理化指标检测项目规定,跟踪润滑油使用过程中的黏度、碱值、酸值、不溶物、水分、铁、铝、铜、硅含量等指标。表 2 为润滑油再生前后的主要理化指标。

表 2 润滑油再生前后的主要理化指标

Tab.2 Main physical and chemical indexes of wasted and regenerative lubricating oil				
项目	单位	再生前	再生后	
运动黏度(100℃)	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	13.03	13.74	
碱值(以 KOH 计)	$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	8.16	7.89	
酸值(以 KOH 计)	$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	4.39	2.78	
不溶物(质量分数)	%	0.09	0.12	
水分(体积分数)	%	0.076	痕迹	
颗粒度	$\text{个} \cdot (100\text{ml})^{-1}$	3 540 067	126 009	

2 结果分析及讨论

2.1 黏度指标

运动黏度指流体的动力黏度与同温度下该流体的密度之比。润滑油的运动黏度是发动机正常润滑的基本保证,黏度过大导致其流动性变差、润滑性降低;黏度过低导致润滑油膜变薄,承载能力下降。在润滑油使用过程中,一方面,窜入到曲轴箱中的燃油

以及燃烧产物使润滑油被稀释,导致黏度下降;另一方面,润滑油被氧化以及摩擦部件上磨损的金属杂质进入等导致润滑油的运动黏度增大。图 1 为 3 个月使用周期内原润滑油、再生润滑油的 100 ℃运动黏度及运动黏度变化率,其中使用时间为零表示是新润滑油。由图 1 可见,随着润滑油使用时间的增加,原润滑油 100 ℃运动黏度呈降低趋势,再生润滑油 100 ℃运动黏度呈增大趋势。在 3 个月使用周期内,原、再生润滑油 100 ℃运动黏度变化率分别为 -9.8% 和 8.9%,其绝对值未超出 GB/T 7607—2010 中规定的 20% 的换油指标限值,满足使用要求。

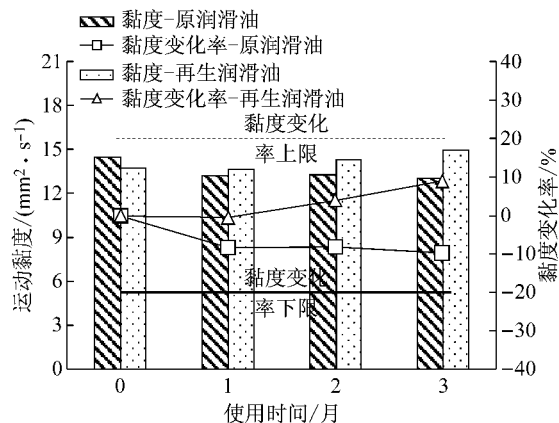


图 1 原、再生润滑油的运动黏度及变化率

Fig.1 Viscosity and its change rate of original and regenerated lubricating oil with service time

2.2 氧化程度指标

润滑油的酸值表示润滑油产品中酸性成分的含

量,主要用于监测润滑油中某些功能添加剂的消耗情况及油品的老化程度. 润滑油被氧化程度越高,酸值越大. 由图 2 可见,随着使用时间的增加,原、再生润滑油的酸值均增加. 这是因为,在润滑油使用过程中,一方面,燃油燃烧的 NO_x 等进入油底壳,生成酸性物质,导致润滑油的酸值增加;另一方面,润滑油在使用过程中在高温、有氧的环境中被氧化产生了酸性物质,也导致酸值增加. 在 3 个月使用周期内,原润滑油的酸值增值分别为:0.93、1.25 和 $1.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,再生润滑油的酸值增值分别为 1.46、3.20 和 $4.56 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 与原润滑油比较,再生润滑油使用过程中酸值增加较快,说明再生润滑油的抗氧化性能较差. 根据 GB/T 7607—2010 规定的 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的酸值换油限值,再生润滑油使用 1 个月即达到换油限值. 这可能与再生润滑油中抗氧化添加剂的含量以及成分有关,因此,在再生润滑油的生产过程中,应特别注意抗氧化添加剂的使用,提高其抗氧化能力.

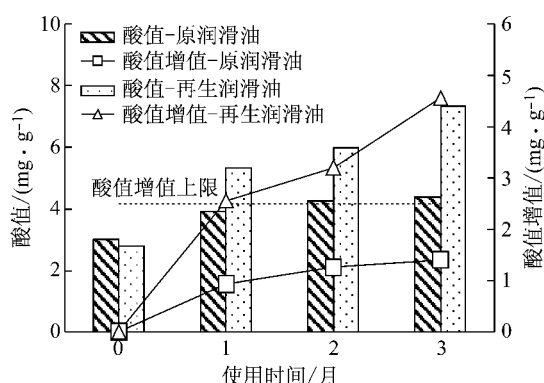


图 2 原、再生润滑油酸值

Fig. 2 Increase amount of acid of original and regenerated lubricating oil with service time

润滑油的碱值表示润滑油产品中碱性成分的含量,碱值降低率是润滑油的另一个重要换油指标. 由图 3 可见,随着使用时间的增加,原、再生润滑油的碱值降低. 在 3 个月使用周期内,原润滑油的碱值降低率分别为 0.98%、7.48%和 11.59%,再生润滑油的碱值降低率分别为 4.56%、25.6%和 42.84%. 与原润滑油比较,再生润滑油的碱值降低率相对较大. 原、再生润滑油的碱值降低率均满足 GB/T 7607—2010 中规定的 50%的换油限值要求.

2.3 水分

润滑油中水分含量变化与多种因素有关,如防冻液稀释、冷却液管道泄漏等. 由图 4 可见,随着使用时间的增加,原、再生润滑油的水分呈先增大然后基本保持不变的变化趋势. 原、再生润滑油的水分基

本相当,满足 GB/T 7607—2010 中规定 0.2%的换油限值要求.

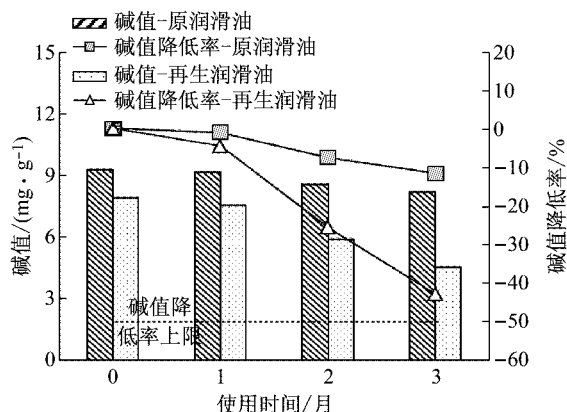


图 3 原、再生润滑油的碱值及其降低率

Fig. 3 Base value reduction value and its ratio of original and regenerated lubricating oil along with service time

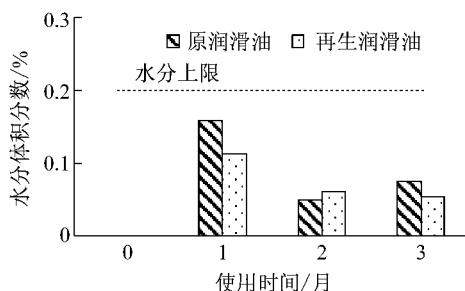


图 4 原、再生润滑油的水分体积分数

Fig. 4 Water content of original and regenerated lubricating oil along with service time

2.4 不溶物

不溶物主要反应润滑油中杂质、金属磨屑质量分数的变化,同时表征了润滑油被污染的程度. 由图 5 可见,随着使用时间的增加,原、再生润滑油的不溶物质量分数增大,但远低于 GB/T 7607—2010 中规定的 2.0%换油限值. 与原润滑油比较,再生润滑油使用过程中不溶物质量分数增加相对较快,表明再生润滑油的抗污染能力相对较差.

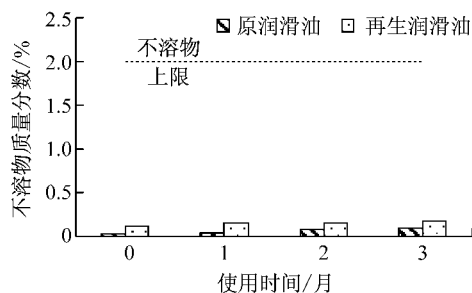


图 5 原、再生润滑油的不溶物

Fig. 5 Insoluble matter content of original and regenerated lubricating oil along with service time

ISO 污染度主要以大于 $5\ \mu\text{m}$ 和 $15\ \mu\text{m}$ 两个粒径段的颗粒数量为基础,同时兼顾小颗粒和大颗粒对系统的磨损,可客观反映油液中颗粒污染度的变化情况. ISO 污染度等级越大,则油品颗粒污染程度

越高. 由表 3 可见,随着使用时间的增加,原、再生润滑油的污染程度变大. 与原润滑油比较,再生润滑油的污染度等级高于新润滑油,从另一个方面说明再生润滑油的抗污染能力略差.

表 3 原、再生润滑油污染度

Tab.3 Pollutant degree of original and regenerated lubricating oil with service time

润滑油	使用时间/月	颗粒数/(个·(100 ml) ⁻¹)						ISO 等级	
		≥1.0 μm	≥2.0 μm	≥5.0 μm	≥15.0 μm	≥25.0 μm	≥50.0 μm		≥100.0 μm
原	0	13 788	9 009	934	12	3	0	0	10/4
	1	349 090	233 163	19 845	396	1	0	0	15/9
	2	2 225 298	1 805 432	174 092	980	20	0	0	18/10
	3	1 786 984	1 426 542	325 648	893	0	0	0	19/10
再生	0	65 534	49 723	10 655	88	9	0	0	14/7
	1	1 211 963	1 032 876	257 900	560	1	0	0	19/10
	2	2 698 724	2 158 763	743 092	1 254	30	0	0	20/11
	3	1 863 820	1 567 733	890 395	1 025	1	0	0	20/11

注:ISO 污染度等级以“n/m”表示,n 和 m 分别表示 $5\ \mu\text{m}$ 和 $15\ \mu\text{m}$ 颗粒污染度等级.

2.5 元素含量

润滑油中的元素按用途以及来源可分为磨损元素、污染元素和添加剂元素 3 类. 其中,磨损元素包括 Fe、Al、Cu、Pb、Cr、Sn 等,通过发动机零部件磨损进入到润滑油中;污染元素主要有 Si、Na 等,经各种

途径进入到润滑油中;添加剂元素主要包括 Zn、P、Mg、Ca、Mo、B 等,是润滑油中本身包含的添加剂元素. 在润滑油使用过程中,Fe、Al、Cu、Si 是 GB/T 7607—2010 中规定的换油限制指标. 表 4 为 3 个月使用周期内原、再生润滑油的元素质量分数.

表 4 原、再生润滑油的元素质量分数

Tab.4 Elements content of original and regenerated lubricating oil along with service time (mg·kg⁻¹)

润滑油	使用时间/月	磨损元素						污染元素		添加剂元素					
		Fe	Al	Cu	Pb	Cr	Sn	Si	Na	Zn	P	Mg	Ca	Mo	B
原	0	<1	<1	<1	<1	<1	<1	2	<1	1 512	1 356	1 193	1 218	50	8
	1	5	<1	<1	<1	<1	<1	4	<1	1 458	1 250	1 040	1 111	49	5
	2	8	2	<1	2	<1	<1	5	<1	1 387	1 212	968	1 035	43	2
	3	12	2	1	2	<1	<1	8	2	1 313	1 190	945	998	43	1
再生	0	<1	<1	<1	<1	<1	<1	5	<1	1 444	1 224	1 039	1 144	48	4
	1	21	<1	<1	<1	<1	<1	6	1	1 400	1 197	957	1 034	46	1
	2	28	4	2	7	1	<1	5	1	1 376	1 183	930	1 028	42	<1
	3	47	5	4	11	2	2	9	1	1 287	1 035	918	956	41	<1

2.5.1 磨损元素

由表 4 可见,随着使用时间的增加,原、再生润滑油中 Fe、Al、Cu、Pb 等磨损元素增加,再生润滑油中 Cr 也增加. 这是因为,Fe 是发动机曲轴、连杆、缸套等重要零件的组成元素,Cr 是发动机曲轴、连杆等的合金元素,Al 是发动机活塞等零件的组成元素,Cu、Pb 是发动机轴瓦的组成元素. 在发动机工作过程中,由于相对运动零件的摩擦,导致润滑油中 Fe、Al、Cu 等磨损元素增加. 与原润滑油比较,再生润滑油中 Fe、Al 等磨损元素增加相对较多. 在 3 个月使用过程中,原、再生润滑油的 Fe、Al、Cu 元素增加量均未超出 GB/T 7607—2010 规定的 150、30 和 $50\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的换油限值,说明再生润滑油的抗磨性能满足使用要求.

2.5.2 污染元素

由表 4 可见,随着使用时间的增加,原、再生润滑油中 Si、Na 等污染元素均有一定程度的增加,原、再生润滑油 Si 等污染元素增加的幅度相当. 这是因为,润滑油在使用过程中,空气中尘埃通过进气管进入燃烧室,与气缸套表面的润滑油膜接触,进入到润滑油中,导致润滑油 Si 等元素增加. 与原润滑油比较,公交车在运行过程中,再生润滑油中 Si、Na 等污染元素增加量与原润滑油相当,这从另一方面说明了原、再生润滑油使用条件的一致性,基本消除了原、再生润滑油使用过程中理化指标结果的偶然性,保证了原、再生润滑油理化指标衰变分析结果的可比性. GB/T 7607—2010 规定的 Si 元素换油限值为 $30\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,使用 3 个月,原、再生润滑油使用周

期 Si 元素分别为 8 和 9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 满足使用要求。

2.5.3 添加剂元素

由表 4 可见, 随着使用时间的增加, 原、再生润滑油中 Zn、P、Mg、Ca、Mo、B 等添加剂元素均有不同程度的降低。这是因为, 在润滑油使用过程中, 一方面, 少量润滑油窜入燃烧室参加燃烧, 导致润滑油的消耗; 另一方面, 在发动机工作过程中, 少量未燃燃油以及燃烧生成的水分窜入曲轴箱导致润滑油的稀释。二者综合作用导致润滑油中 Zn、P、Mo 等添加剂元素降低。

3 结论

(1) 在润滑油使用过程中, 再生润滑油的黏度变化率、碱值降低率、水分含量、不溶物含量等指标满足 GB/T 7607—2010 中规定的换油限值要求, 酸值增加值超出 GB/T 7607—2010 规定的换油限值, 再生润滑油的抗氧化能力相对较差。

(2) 在润滑油使用过程中, 原、再生润滑油的 Fe、Al、Cu 等磨损元素及 Si 等污染物元素含量低于 GB/T 7607—2010 中规定的换油限值要求, 再生润滑油的磨损元素相对较多。

(3) 再生润滑油基本满足使用要求, 在其生产过程中应特别注意添加抗氧化添加剂, 提高其抗氧化能力。

参考文献:

- [1] 王碧玲, 包春江, 杨志伊. 汽车发动机润滑油劣化规律的试验研究[J]. 润滑与密封, 2006, 31(3): 95.
WANG Biling, BAO Chunjiang, YANG Zhiyi. Experiment study on deterioration law of engine lubricating oil[J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(3): 95.
- [2] 安军信, 周惠娟, 王会东. 我国废润滑油再生行业的现状及发展前景[J]. 精细与专用化学品, 2010, 18(1): 1.
AN Junxin, ZHOU Huijuan, WANG Huidong. Current situation and development prospects of waste lubricating oil recycling industry in China[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2010, 18(1): 1.
- [3] 吕涯, 杨洁, 王林. 再生润滑油着色物质的研究[J]. 石油学报(石油加工), 2016, 32(1): 132.
LU Ya, YANG Jie, WANG Lin. Study on coloring substances of refined lubricating oil[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2016, 32(1): 132.
- [4] 李艳红, 吴戒骄, 将国权, 等. 废润滑油再生技术的研究进展[J]. 石油化工, 2016, 45(2): 244.
LI Yanhong, WU Jiejiao, JIANG Guoquan, et al. Progresses in regeneration technologies of used lube oils[J]. Petrochemical Technology, 2016, 45(2): 244.
- [5] 刘娇. 铁路内燃机废弃润滑油再生工艺研究[J]. 中国新技术新产品, 2016(4): 59.
LIU Jiao. Research on regeneration technique of wasted lubricating oil from railway engine[J]. China New Technologies and Products, 2016(4): 59.
- [6] 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): 70.
WANG Xiaoli, XU Binshi, XU Yi, et al. Research on failure and regeneration of equipment lubricating oil[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(2): 70.
- [7] 孙伟, 陈文华, 刘大学, 等. 汽车废润滑油预处理前后理化指标变化规律研究[J]. 浙江交通职业技术学院学报, 2011, 12(3): 36.
SUN Wei, CHEN Wenhua, LIU Daxue, et al. Study on the change regularity of physical and chemical indicators of used engine oil before and after treatment[J]. Journal of Zhejiang Institute of Communications, 2011, 12(3): 36.
- [8] 刘建芳, 顾卡丽, 刘晶晶, 等. 废发动机润滑油的分析与添加剂方法再生可行性研究[J]. 润滑与密封, 2010, 35(8): 79.
LIU Jianfang, GU Kali, LIU Jingjing, et al. Analysis and feasibility study on additives recycling of waste engine oil[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(8): 79.
- [9] 陈江, 王晓丽, 许一, 等. 再生润滑油理化性能分析与摩擦学性能评价[J]. 中国表面工程, 2011, 24(6): 73.
CHEN Jiang, WANG Xiaoli, XU Yi, et al. Analysis of physical and chemical performances and evaluation of tribological properties of the reclaimed oil[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(6): 73.
- [10] 陈江, 徐滨士, 王晓丽, 等. 废润滑油/再生润滑油的摩擦学性能[J]. 润滑与密封, 2012, 37(1): 6.
CHEN Jiang, XU Binshi, WANG Xiaoli, et al. Tribological properties of waste and regenerative lubricating oil[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(1): 6.
- [11] 陈江, 王晓丽, 徐滨士, 等. 再生柴油发动机润滑油的摩擦学性能[J]. 材料保护, 2012, 45(4): 27.
CHEN Jiang, WANG Xiaoli, XU Binshi, et al. Regeneration and tribological properties of waste lubricating oil for diesel engine[J]. Journal of Materials Protection, 2012, 45(4): 27.
- [12] LIU Jianfang, GU Kali, DUAN Haitao, et al. Tribological and economic evaluation of recycled mineral lubricating oils[J]. Science China(Technological Sciences), 2013, 56(12): 2964.
- [13] 刘建芳, 段海涛, 顾卡丽. 再生润滑油在不同条件下的摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2015, 40(6): 81.
LIU Jianfang, DUAN Haitao, GU Kali. Regeneration and tribological performance evaluation of waste lubricating oils[J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(6): 81.