

文章编号 1004-924X(2015)09-2452-07

## 含微水绝缘油表面张力的中红外光谱检测

陈 彬,武宏阳,张贤明,刘 阁\*

(重庆工商大学 废油资源化技术与装备教育部工程研究中心,重庆 400067)

**摘要:** 为了有效监控绝缘油的运行状态,采用定量分析方法探讨了微量水分对绝缘油表面张力的影响规律。通过配制不同微水含量的绝缘油样,对每组油样进行表面张力测试,然后对油样进行红外光谱扫描,获取了油样中水分在特征波数处(1 640,3 400,3 450,3 615  $\text{cm}^{-1}$ )的吸光度值。分析了油液中 2,6-二叔丁基对甲酚(T501)等添加剂对油样表面张力变化规律的影响。结果表明:油样中水分含量与水分特征吸光度值之间有良好的相关性(相关系数分别为 0.964 1, 0.984 8,0.984 5,0.944 0),油样表面张力和 1 640,3 400,3 450,3 615,3 650  $\text{cm}^{-1}$  波数处油样吸光度值的变化亦均呈现良好的正相关性。建立了油样表面张力与特征波数处油样吸光度值的多元线性回归模型,拟合精度为 0.992 8;根据模型得到的表面张力计算值与实际测量值误差为  $-0.07\sim 0.06\%$ ,吻合性较好。文中的实验可为含微水绝缘油的表面张力检测提供理论支撑。

**关 键 词:** 中红外光谱;绝缘油;表面张力;微量水分;定量测量

**中图分类号:** O657.33 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152309.2452

## Detection on interfacial tension of insulating oil with trace water based on mid-infrared spectroscopy

CHEN Bin, WU Hong-yang, ZHANG Xian-ming, LIU Ge\*

(*Engineering Research Centre for Waste Oil Recovery Technology and Equipment of the Ministry of Education, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: lycy9945@163.com*

**Abstract:** To monitor the operating status of insulating oil effectively, the affecting law of trace water on the interfacial tension of insulating oil was investigated by a quantitative method. By making up a series of oil samples with different trace water contents, the interfacial tension of every group of oil sample was measured and its mid-infrared spectrum was scanned. Then, the absorbance values of oil samples at the characteristic wave number of water molecules (1 640  $\text{cm}^{-1}$ , 3 400  $\text{cm}^{-1}$ , 3 450  $\text{cm}^{-1}$ , 3 615  $\text{cm}^{-1}$ ) were obtained and the influence of the 2,6-Di-tert.-butyl-p-cresol (T501), a kind of additive in oil samples, on the interfacial tension was analyzed. The results show that the trace water contents in oil samples are dependent on water characteristic absorbance values, which can be up to

**收稿日期:** 2015-02-13; **修订日期:** 2015-03-19.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No. 51375516);教育部平台科技资助项目(No. fykf201503);重庆基础与前沿研究资助项目(No. cstc2014jcyjA90015, No. cstc2013jcyjA90021);重庆市教育科学技术研究资助项目(No. KJ130710);重庆市应用技术研究开发重点资助项目(No. cstc2014yykfB90002);重庆市教委科技重点资助项目(No. KJZH14210)

0.964 1, 0.984 8, 0.984 5 and 0.944 0. Moreover, there is a good positive correlation between the trace water contents in oil samples and the changes of absorbance values of oil samples at  $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ ,  $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ ,  $3\ 450\ \text{cm}^{-1}$ ,  $3\ 615\ \text{cm}^{-1}$ ,  $3\ 650\ \text{cm}^{-1}$ . According to these data, a multiple linear regression model with the goodness fit of 0.992 8 was constructed. The error between calculated values and measured values of the interfacial tension varies from  $-0.07\%$  to  $0.06\%$ , shows a good coincidence. This research supports the measurement of interfacial tension for insulating oil in theory.

**Key words:** mid-infrared spectrum; insulating oil; interfacial tension; trace water; quantitative measurement

## 1 引言

绝缘油的油液流动性会直接影响仪器的循环冷却效果<sup>[1]</sup>,它在受到水分污染后,油液的理化性能也会发生一系列变化<sup>[2-3]</sup>。其中表面张力是表征油液流动性能<sup>[4-5]</sup>的重要指标,因此研究不同微量水分与油液混合后形成的油水分散系的表面张力变化,对于开展油液表面张力检测具有重要意义。

常用的液体表面张力测试方法有毛细管上升法、du Noüy 环法、Wilhelmy 盘法、旋滴法、悬滴法、滴体积法、最大气泡压力法、震荡射流法、毛细管波法等<sup>[6]</sup>。上述测试方法有其各自的优缺点,尤其对于均相液体测试,这些经典测试方法对表面张力的测试已非常成熟,而对于乳化液、不同微量水分油液等非均相液体的表面张力测试则需要进一步开展研究。

为了提高绝缘油在实际使用中的性能和寿命,其生产过程中通常会加入一些抗氧化剂、金属钝化剂、防锈剂、抑制剂、降凝降黏剂、分散剂等添加剂。其中金属钝化剂、防锈剂、分散剂属于表面活性剂,可与其它油溶性或水溶性添加剂成分发生复合作用,以增强添加剂的作用效果<sup>[7]</sup>。如绝缘油液添加剂 T501(主要成份为 2,6-二叔丁基对甲酚)就是一种抗氧化型添加剂,通常用来提高变压器绝缘油的抗氧化特性,从分子结构式可以看出, T501 属于酚类添加剂<sup>[8-9]</sup>。然而表面活性剂等极性物质会一定程度上降低油液的表面能,从而使得油液的表面张力降低<sup>[10]</sup>。当混入微量水分后,微量水分会与表面活性剂或其他油液添加剂等极性物质发生吸附作用,如 2,6-二叔丁基对甲酚结构中的酚羟基可能与水分子中的羟基形成氢键,因此水分含量的增加会弱化 T501 与油液中表面活性剂的结合作用,从而一定程度上减弱

油液中极性物质对油液表面能的作用,使油液表面张力发生变化,所以有必要从理论上深入探讨这种影响。

红外光谱法是一种快速无损的油液检测方法,目前广泛应用于油液的成分分析及油质检测等研究中。刘婕等<sup>[11]</sup>采用红外光谱法精确测定了航空润滑油中 T501 的含量,该研究表明添加剂 T501 结构式中含有的酚羟基在红外波数为  $3\ 650\ \text{cm}^{-1}$  处有特征吸收峰<sup>[12]</sup>。本文通过红外光谱法对加入不同微量水分后的绝缘油液进行了红外光谱扫描,获取油液中 2,6-二叔丁基对甲酚的红外吸光度值,研究了微量水分含量变化对油液中 2,6-二叔丁基对甲酚的红外吸光度的影响规律,并进一步探讨微量水分对绝缘油表面张力的影响机理,从而为油液中水分含量的在线监测提供技术支撑。

## 2 实验仪器及方法

### 2.1 实验仪器

实验采用 KQ-400KDB 型高功率数控超声波振荡器(昆山苏美超声仪器有限公司生产,超声功率为 400 W,超声频率为 40 kHz)对不同微水含量的油水分散系进行预处理;采用 IRAffinity-1 傅里叶变换红外光谱仪(日本岛津)分析不同微水含量的油样的中红外光谱,其波数为  $7\ 800\sim 350\ \text{cm}^{-1}$ 、分辨率可选  $0.5, 1, 2, 4, 8, 16\ \text{cm}^{-1}$ ;采用 Q200 型全自动表面张力仪(上海方瑞仪器有限公司)进行不同微水含量的油样的表面张力测试,测试张力为  $0\sim 400\ \text{mN/m}$ ,测量精度为  $0.01\ \text{mN/m}$ 。

### 2.2 实验方法

首先配制油样。取 100 mL 的 25# 变压器油盛入 250 mL 锥形瓶中,用 5, 10, 50  $\mu\text{L}$  微量注射器向其中注入蒸馏水,配制成 11 组不同梯度含水量

的油样(原始 25 号变压器的油含水量为  $10 \mu\text{L}/\text{L}$ , 以  $100 \mu\text{L}/\text{L}$  为梯度配制含水量为  $100 \sim 1000 \mu\text{L}/\text{L}$  的 11 组油样)。为保证油样与水分能够形成均匀稳定的油水分散系,对所有油样进行 8 h 超声波震荡。

然后对不同微水含量的油样进行红外光谱数据采集,分别测试油样在特定波数处水的红外吸光度数据。采用 KBr 固定厚度液体池采集光谱数据,液体池的垫片厚度选为  $100 \mu\text{m}$ ,扫描范围设置为  $4700 \sim 350 \text{ cm}^{-1}$ ,分辨率为  $2 \text{ cm}^{-1}$ ,扫描次数为 45。平均 45 次扫描结果得到扫描光谱图像数据。

实验测试油样的表面张力。根据 GB/T5549 (ISO304-1985)用拉起膜法测定表面张力,采用 Q200 型全自动表面张力仪分别测试 11 组不同微水含量的油样在  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时的气-液界面的表面张力。

最后建立表面张力与红外吸光度之间的多元回归模型。用 Matlab 对不同微水含量油样的表面张力实测结果和油样在  $1640, 3400, 3450, 3615, 3650 \text{ cm}^{-1}$  波数处的吸光度数据进行基于多元线性拟合法的回归建模,得到油样表面张力与 5 个特征波数处红外吸光度之间的回归模型。

### 3 实验数据分析与结果

#### 3.1 不同微水含量绝缘油的表面张力测试

对经过 8 h 超声波震荡处理的 11 组油样分

别进行表面张力值测定,得到不同微水含量油样的表面张力随水分含量变化的数据如表 1 所示。表面张力随油液中微水含量的变化曲线如图 1 所示。由图可知,随着油液中微水含量的增加,油液的表面张力呈现逐渐升高然后趋向平稳的趋势。从含水量为  $10 \mu\text{L}/\text{L}$  到  $200 \mu\text{L}/\text{L}$  时,油液的表面张力快速升高,升高幅度为  $0.25 \text{ mN}/\text{m}$ ,说明加入水分后油液的表面张力比不加水时有了有一定程度的升高;当含水量超过  $200 \mu\text{L}/\text{L}$  之后,随着油液中水分含量的增加,油液的表面张力趋于平稳,在水分含量为  $200 \sim 1000 \mu\text{L}/\text{L}$  时,油液表面张力的升高幅度只有  $0.11 \text{ mN}/\text{m}$ 。

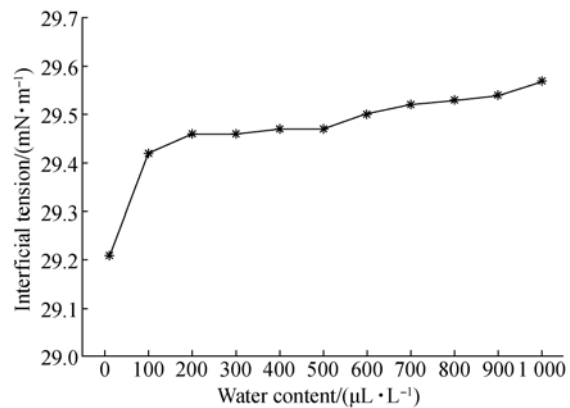


图 1 绝缘油表面张力随微水含量的变化曲线

Fig. 1 Water content as a function of interfacial tension of insulating oil

表 1 微水含量对绝缘油表面张力的影响

Tab. 1 Impact of water content on interfacial tension of insulating oil

Trace water $c/(\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$	10	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Interfacial tension/ $(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	29.21	29.42	29.46	29.46	29.47	29.47	29.50	29.52	29.53	29.54	29.57

油液中加入微量水分后,油液中的表面活性剂等极性物质会与水分结合,减弱了油液中极性物质对其表面能的作用,使得油液的表面张力有了微量的“恢复性”提高,从而表现出油液加入水分后表面张力比原始油样高。

但随着微量水分含量的增加,油液的表面张力趋于平稳,这是因为油液中所加入的表面活性剂等极性物质添加剂含量较少,通常在  $0.01\% \sim 0.5\%$  左右<sup>[13]</sup>。因此,油液中极性物质添加剂与水分的结合能力相对较小,并且随着油液中水分含量的继

续增加,这种能力趋于饱和,此时油液的表面能便不再继续提高,油液的表面张力也趋向于稳定。

#### 3.2 不同微水含量油样的中红外光谱

对 11 组不同微水梯度油样进行红外光谱扫描,获得各油样的红外光谱( $4700 \sim 350 \text{ cm}^{-1}$ )如图 2 所示。将部分波段进行放大以显示各个油样在特征吸收波数处的红外光谱,如图 2 中 a, b, c, d, e 所示。

经过红外光谱法扫描可以获得各油样在特定红外波数处的吸光度值。其中,液体水分子对中红外光谱吸收活性较强的波段主要有<sup>[14]</sup>: (1) 变

角振动  $\nu_1 = 1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ ; (2) 对称伸缩振动  $\nu_2 = 3\ 450\ \text{cm}^{-1}$ ; (3) 反对称伸缩振动  $\nu_3 = 3\ 615\ \text{cm}^{-1}$ ; 除此之外, 由于水分子之间存在很强

的氢键, 能够形成缔合水, 使得反对称伸缩振动和对称伸缩振动重叠在一起, 形成宽谱带, 这个宽谱带的中心位置在  $\nu = 3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 。

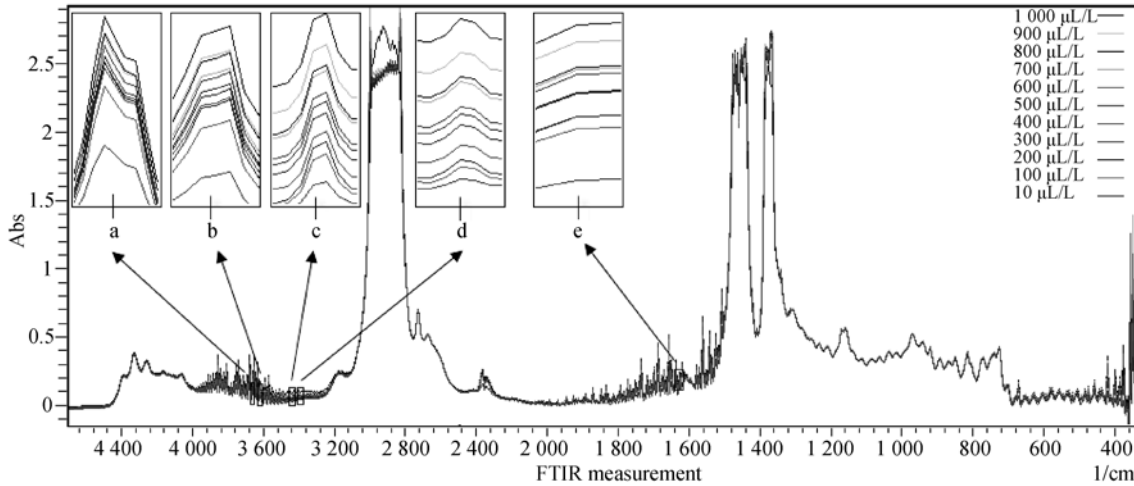


图 2 不同微水含量油样的中红外光谱图, a 为 T501 酚羟基在  $3\ 650\ \text{cm}^{-1}$  处的吸光度曲线; b 为水在  $3\ 615\ \text{cm}^{-1}$  处的反对称伸缩振动吸光度曲线; c 为水在  $3\ 450\ \text{cm}^{-1}$  处的对称伸缩振动吸光度曲线; d 为水在对称伸缩振动与反对称伸缩振动谱带中心  $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$  处的吸光度曲线; e 为水在  $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$  处的变角振动吸光度曲线

Fig. 2 Mid-infrared spectra of oil samples at wave number range of  $4\ 700 \sim 350\ \text{cm}^{-1}$ , where a is absorbance curves of phenolic hydroxyl of T501 at  $3\ 650\ \text{cm}^{-1}$ ; b is absorbance curves of asymmetric stretching vibration of water molecules at  $3\ 615\ \text{cm}^{-1}$ ; c is absorbance curves of symmetric stretching vibration of water molecules at  $3\ 450\ \text{cm}^{-1}$ ; d is absorbance curves of symmetric and asymmetric stretching vibration central band of water molecules at  $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ ; and e is absorbance curves of deformation vibration of water molecules at  $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$

提取图 2 中各油样在  $1\ 640, 3\ 400, 3\ 450, 3\ 615, 3\ 650\ \text{cm}^{-1}$  波数处的吸光度数值, 如表 2 所示。

由表 2 得到  $1\ 640, 3\ 400, 3\ 450, 3\ 615, 3\ 650\ \text{cm}^{-1}$  波数处吸光度随油样水分含量的变化曲线, 如图 3 所示。

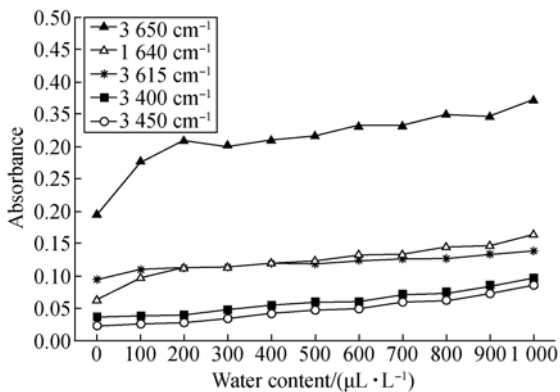


图 3 不同微水含量油样的吸光度实测值变化曲线  
Fig. 3 Curves of measured absorbance values of oil samples with different trace water contents

由图 3 可知, 随着水分含量的增加, 油液中水分子在  $1\ 640, 3\ 400, 3\ 450, 3\ 615\ \text{cm}^{-1}$  波数处的吸光度呈现均匀连续性增加, 对微水含量与 4 个特征波数处的吸光度数据进行皮尔逊相关系数分析<sup>[15-16]</sup>, 计算结果分别为  $0.964\ 1, 0.984\ 8, 0.984\ 5, 0.944\ 0$ , 由此说明在水分特征波数处的红外吸光度能够有效地反映出油液中微量水分含量的均匀增加。

而在  $3\ 650\ \text{cm}^{-1}$  波数处测得的 2,6-二叔丁基对甲酚(T501)中酚羟基的吸光度曲线变化规律显示, 当含水量为  $10 \sim 200\ \mu\text{L/L}$  时, 其吸光度有较为明显的升高, 油液在  $3\ 650\ \text{cm}^{-1}$  波数处吸光度的增加值为  $0.113$ ; 当含水量为  $200 \sim 1\ 000\ \mu\text{L/L}$  时, 油样吸光度随着水分含量的继续增加而缓慢增加, 并趋于平缓, 吸光度增幅为  $0.063$ 。这是因为油液中加入水分后, 水分含量能够与 2,6-二叔丁基对甲酚结合, 且液体水分子的羟基与 2,6-二叔丁基对甲酚的酚羟基之间存在分子间氢键作用, 因此使得加入水分的油液在

3 650  $\text{cm}^{-1}$  处的吸光度相比不加水分油液的吸光度有一定程度的增加。但由于油液中 2,6-二叔丁基对甲酚的含量较少,且酚羟基与水分子羟基之间的氢键作用较弱,对液体水分子的结合能力

也较弱,因此随着水分含量的继续增加,油液在 3 650  $\text{cm}^{-1}$  处的吸光度值的增加幅度趋于平缓。当 2,6-二叔丁基对甲酚的酚羟基与水分子的结合能力达到饱和之后,其吸光度值也趋于稳定。

表 2 不同水分含量油样在 1640, 3400,3450,3615,3650  $\text{cm}^{-1}$  波数处的吸光度值

Tab. 2 Absorbance of oil samples with different water contents at spectral wave numbers of 1640, 3400,3450,3615,3650  $\text{cm}^{-1}$

Wave number / $\text{cm}^{-1}$	Water content/ $(\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$										
	10	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
1 640	0.094	0.109	0.112	0.112	0.119	0.119	0.124	0.126	0.127	0.134	0.139
3 400	0.036	0.038	0.040	0.047	0.054	0.059	0.062	0.072	0.074	0.084	0.097
3 450	0.023	0.026	0.028	0.034	0.042	0.047	0.05	0.06	0.062	0.073	0.086
3 615	0.063	0.098	0.112	0.114	0.12	0.123	0.131	0.135	0.145	0.147	0.164
3 650	0.195	0.276	0.308	0.301	0.309	0.316	0.331	0.332	0.349	0.345	0.371

### 3.3 油样表面张力与红外光谱关系

结合表 1 与表 2,图 1 与图 3 可知,表面张力随水分含量的变化趋势和 3 650  $\text{cm}^{-1}$  波数处吸光度随水分含量的变化趋势较为接近,因此以 3 650  $\text{cm}^{-1}$  波数处的吸光度为例,将此时表面张力和吸光度随水分含量变化的趋势绘制成双坐标折线图,如图 4 所示。

由图 3 和图 4 可知,水分含量为 10 ~ 200  $\mu\text{L}/\text{L}$  时,油样的表面张力和 3 650  $\text{cm}^{-1}$  波数处的吸光度值的增加幅度分别为 0.25  $\text{mN}/\text{m}$  和 0.113,与水分含量为 200 ~ 1 000  $\mu\text{L}/\text{L}$  时二者的增加幅度 0.11  $\text{mN}/\text{m}$  和 0.063 相比,增加幅度均呈现减小的趋势。由此说明随着油液中添加剂物质与水分结合逐渐趋于饱和,原本受到极性添加剂物质影响而降低的表面张力得以“恢复性”提高,而 2,6-二叔丁基对甲酚的酚羟基与水分子的结合也同样趋于饱和,使得 3 650  $\text{cm}^{-1}$  波数处的吸光度值逐渐趋于平稳,和表面张力的变化趋势保持一致。

因此,对不同微水含量油样的表面张力与 3 650  $\text{cm}^{-1}$  波数处的吸光度进行皮尔逊相关系数分析,得到不同水分含量的油样表面张力与其在 3 650  $\text{cm}^{-1}$  波数处吸光度之间的相关系数为 0.987 3,表明二者具有良好的正相关性。此外,

因为微水含量直接影响了油液的表面张力,且 1 640,3 400,3 450,3 615  $\text{cm}^{-1}$  特征波数处的吸光度能够精确反映水分含量的变化,所以用油液在 1 640,3 400,3 450,3 615,3 650  $\text{cm}^{-1}$  波数处的吸光度变化来反映油液表面张力的变化。

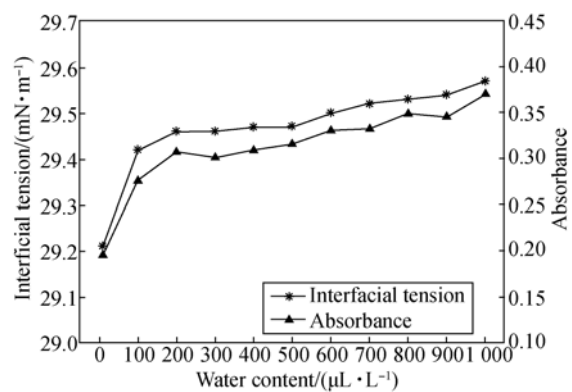


图 4 不同微水含量下油样的表面张力变化曲线和 3 650  $\text{cm}^{-1}$  处 2,6-二叔丁基对甲酚的吸光度变化曲线

Fig. 4 Curves of interfacial tension and absorbance values (at 3 650  $\text{cm}^{-1}$ ) of 2,6-Di-tert.-butyl-p-cresol for different trace-water oil samples

### 3.4 油样表面张力与红外吸光度关系的建立

结合上述油样的表面张力和 1 640,3 400,3 450,3 615,3 650  $\text{cm}^{-1}$  波数处吸光度随微水含

量的变化趋势,通过 Matlab 中多元线性拟合法进行了回归建模,经过优化得到油液表面张力对 1 640,3 400,3 450,3 615,3 650  $\text{cm}^{-1}$  波数处油液红外吸光度的多元线性回归模型为:

$$\gamma = 29.2680 + 4.0551A_{1640} - 5.6737A_{3615} - 63.0856A_{3400} + 61.6632A_{3450} + 3.9634A_{3650}, \quad (1)$$

式中:  $\gamma$  为油液表面张力;  $A_{1640}$ ,  $A_{3400}$ ,  $A_{3450}$ ,  $A_{3615}$ ,  $A_{3650}$  分别为油液在 1 640,3 400,3 450,3 615,3 650  $\text{cm}^{-1}$  波数处的红外吸光度,模型的拟合精度为 0.992 8。

另配置 11 组不同微水含量油液,测试它们在 1 640,3 400,3 450,3 615  $\text{cm}^{-1}$  波数处的红外吸光度以及表面张力,再根据式(1)预测油样的表面张力。各组油样的表面张力预测值与实测值对比如图 5 所示。5 组油样的表面张力预测值与实测值之间的误差为  $-0.07\% \sim 0.06\%$ ,表明根据油样红外吸光度所建立的油液表面张力计算公式是正确的。

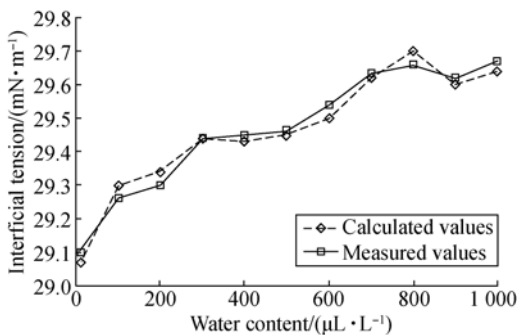


图 5 不同微水含量油样的表面张力计算值与实测值

Fig. 5 Calculated and measured values of interfacial tension for different-water-content oil samples

#### 参考文献:

- [1] 邹平,李剑,孙才新,等.植物绝缘油纸浸渍模型与试验研究[J].中国电机工程学报,2011,32(25):125-131.  
ZOU P, LI J, SUN C X, et al. Impregnation model and experimental investigation of vegetable insulating oil-paper insulation [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2011, 32(25): 125-131. (in Chinese)
- [2] 陈彬,刘阁,张贤明.连续投影算法的润滑油中含水量的近红外光谱分析[J].红外与激光工程,2013,

## 4 结 论

本文对不同微水含量油液的表面张力进行了实验研究。实验结果表明,随着微水含量的增加,油液的表面张力呈现逐渐升高然后趋向平稳的趋势。在微水含量为  $10 \sim 200 \mu\text{L}/\text{L}$  时,油液表面张力的升高幅度为  $0.25 \text{ mN}/\text{m}$ ;在水分含量为  $200 \sim 1000 \mu\text{L}/\text{L}$  时,油液表面张力的升高幅度为  $0.11 \text{ mN}/\text{m}$ 。结合中红外光谱分析可知:微量水会与表面活性剂或其他油液添加剂等极性物质发生吸附作用,如 2,6-二叔丁基对甲酚结构中的酚羟基会与水分子中的羟基形成氢键,从而与微量水具有一定的结合作用,因此水分含量的增加会弱化 2,6-二叔丁基对甲酚与油液中表面活性剂的结合作用,在一定程度上减弱了油液中极性物质对油液表面能的作用,进而使得含微水油液的表面张力比原始油样高,且随着水分含量的增加;在表面活性剂与水分的结合能力达到饱和之后,对油液表面能的“恢复性”升高作用趋于平稳。

然后采用红外光谱扫描法获取了油样中微量水在其特征波数处的吸光度,根据微水含量为  $10 \sim 1000 \mu\text{L}/\text{L}$  的 11 组油样的表面张力实测数据与 1 640,3 400,3 450,3 615  $\text{cm}^{-1}$  波数处的红外吸光度实测数据,建立了油液表面张力与特征波数处红外吸光度之间的多元线性回归模型,模型的拟合精度为 0.992 8。最后通过该模型对 11 组检验油样的表面张力进行预测,预测值与实测值之间的误差为  $-0.07\% \sim 0.06\%$ ,误差较小。因此,所建立的多元线性回归模型可有效地减少人为实验误差,并且实现对不同微水含量油液表面张力值的快速准确预测。

42(12):3168-3174.

CHEN B, LIU G, ZHANG X M. Analysis on near infrared spectroscopy of water content in lubricating oil using successive projections algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3168-3174. (in Chinese)

- [3] 陈彬,刘阁.基于近红外光谱的润滑油中含水量 T-S 模糊辨识[J].光子学报,2013,43(2):0230001-1-0230001-5.

CHEN B, LIU G. Analysis on near infrared spectroscopy of water content in oil using T-S fuzzy i-

- dentifying model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 43(2):0230001-1-0230001-5. (in Chinese)
- [4] 刘维民, 许俊, 冯大鹏, 等. 合成润滑油的研究现状及发展趋势[J]. *摩擦学学报*, 2013, 33(1):91-104. LIU W M, XU J, FENG D P, *et al.*. The research status and prospect of synthetic lubricating oil[J]. *Tribology*, 2013, 33(1):91-104. (in Chinese)
- [5] STACHOWIAK G, BATCHELOR A W. *Engineering Tribology* [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [6] 尹东霞, 马沛生, 夏淑倩. 液体表面张力测定方法的研究进展[J]. *科技通报*, 2007, 3(23):424-433. YIN D X, MA P SH, XIA SH Q. Progress on methods for measuring surface tension of liquids [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2007, 3(23):424-433. (in Chinese)
- [7] 伏喜胜, 姚文钊, 张龙华, 等. 润滑油添加剂的现状与发展趋势[C]. 中国汽车工程学会燃料与润滑油分会第十一届年会论文集. 北京: 机械工业出版社, 2005. FU X SH, YAO W ZH, ZHANG L H, *et al.*. The status and development trend of lubricant additives [C]. *The Eleventh Annual Conference Proceedings of Fuels and Lubricants Committee of SAE-China*. Beijing: Machinery Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [8] SUSANA V A, MURILO T F, ESTÉLIO M, *et al.*. A rapid method for evaluation of the oxidation stability of castor oil FAME; influence of antioxidant type and concentration [J]. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90:1272-1277.
- [9] AMMAWATH W, MAN CH Y B, RANMAN R B A, *et al.*. A fourier transform infrared spectroscopic method for determining butylated hydroxytoluene in palm olein and palm oil [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2006, 83(3):187-191.
- [10] ROSEN M J, KUNJAPPU J T. *Surfactants and Interfacial Phenomena* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2012.
- [11] 刘婕, 沈虹滨, 曹文杰. 红外光谱法测定航空润滑油液压油中 2,6-二叔丁基对甲酚含量[J]. *理化检验-化学分册*, 2009, 45(1):35-39. LIU J, SHEN H B, CAO W J. IR-spectrometric determination of 2,6-di-tert.-butyl-p-cresol in aviation lubricating oil and hydraulic press oil [J]. *PTCA(Part B: Chem. Anal.)*, 2009, 45(1):35-39. (in Chinese)
- [12] 刘婕, 曹文杰, 朱志谦. 红外光谱测定烃类航空润滑油中 2,6-二叔丁基对甲酚含量影响因素研究[J]. *石油化工应用*, 2013, 32(10):122-124. LIU J, CAO W J, ZHU ZH Q. Affects the factor research to 2,6-Di-tert.-butyl-p-cresol in hydrocarbon aviation lubricating oils measured by infrared spectrophotometric [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2013, 32(10):122-124. (in Chinese)
- [13] 吕涯. *石油产品添加剂* [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2011. LÜ Y. *Petroleum Products Additives* [M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2011. (in Chinese)
- [14] 翁诗甫. *傅里叶变换红外光谱分析* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010. WENG SH F. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [15] ADLER J, PARMRYD I. Quantifying colocalization by correlation: the pearson correlation coefficient is superior to the mander's overlap coefficient [J]. *International Society for Advancement of Cytometry*, 2010, 77(8):733-742.
- [16] FOULADI R T, STEIGER J H. The fisher transform of the pearson product moment correlation coefficient and its square cumulants, moments, and applications [J]. *Communications in Statistics Simulation and Computation*, 2008, 37(5):928-944.

#### 作者简介:



陈彬(1972—),男,重庆人,博士,教授,2007年于华中科技大学获得博士学位,主要从事油液污染控制技术方面的研究。E-mail:hustchb@163.com



刘阁(1973—),女,重庆人,副教授,主要从事油水分离技术的研究。E-mail:lycy9945@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)