

doi:10.3788/gzxb20154406.0630002

用中红外光谱法分析含微水绝缘油的粘度

陈彬, 武宏阳, 韩超, 颜欢, 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: 配制不同微水含量的绝缘油样, 对每组油样进行红外光谱扫描, 得到油样中水分在特征波数处 ($1\ 640\ \text{cm}^{-1}$, $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$, $3\ 450\ \text{cm}^{-1}$, $3\ 615\ \text{cm}^{-1}$) 的吸光度值; 定义油液中水分均匀系数, 构建含微水绝缘油的粘度计算模型; 实验测试含微水绝缘油 $40\ ^\circ\text{C}$ 的运动粘度值, 并与粘度计算模型的计算值进行比较. 结果表明: 本文所构造的计算模型能够有效地反映微量水分对油液运动粘度的影响; 运动粘度实测值与计算值的相关系数为 0.9449, 误差范围为 $-4.458 \times 10^{-4} \sim 5.175 \times 10^{-4}$.

关键词: 微量水分; 中红外光谱; 绝缘油; 运动粘度

中图分类号: O657.33

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)06-0630002-6

Viscosity of Insulating Oil with Trace Water Based on the Mid-Infrared Spectral Analysis

CHEN Bin, WU Hong-yang, HAN Chao, YAN Huan, LIU Ge

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

Abstract: A series of insulating oil samples with different trace moisture contents were made up, and infrared spectrum scans were conducted on these samples to get the absorbance values of the water molecules at different characteristic wave numbers (namely $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$, $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$, $3\ 450\ \text{cm}^{-1}$ and $3\ 615\ \text{cm}^{-1}$). The uniformity coefficient of moisture in oil samples was defined, on the basis of which a calculation model for the kinematic viscosity of hydrous insulating oil was built up. The kinematic viscosity values of these oil samples under $40\ ^\circ\text{C}$ were measured through experiments, which were compared with the calculated values based on the calculation model. The results showed that the calculation model can effectually reflect the influence rules of trace moisture on the kinematic viscosity of oil, and the correlation coefficient between the calculated values and the measured values was 0.9449, with an error range from -4.458×10^{-4} to 5.175×10^{-4} .

Key words: Trace moisture; Mid-infrared spectrum; Insulating oil; Viscosity

OCIS Codes: 300.6300; 300.6340; 300.6170

0 引言

对于绝缘油而言, 油液流动性能的好坏直接影响绝缘油运行过程中仪器循环冷却效果的好坏^[1], 受水分污染后, 油液的理化性能将发生一系列变化^[2-3]. 其中粘度指标是表征油液流动性能^[4]的重要理化性能指标, 是选择绝缘油油品的主要依据. 因此, 研究油液中

水分含量变化对油液运动粘度的影响并准确获取不同微水含量绝缘油的粘度数值对于绝缘油储运和使用具有重要的实际意义.

目前油水两相液体的流动机理尚未明晰, 因此对不同水分含量油水分散系油液的粘度计算多是根据经验公式^[5]. 流体力学中, 用 Stokes-Einstein 公式^[6]对 W/O 油包水型乳化液计算粘度时将水滴颗粒视作刚

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51375516)、重庆市基础与前沿研究项目(Nos. cstc2014jcyjA90015, cstc2013jcyjA90021)、重庆市教育科学技术项目(No. KJ130710)、重庆工商大学研究生创新项目(No. yjsexx2014-052-32)和教育部平台科技资助项目(No. fykf201503)资助

第一作者: 陈彬(1972-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为油液污染控制技术. Email: hustchb@163.com

通讯作者: 刘阁(1973-), 女, 副教授, 主要研究方向为油水分离技术. Email: lycy9945@163.com

收稿日期: 2014-12-24; **录用日期:** 2015-02-04

<http://www.photon.ac.cn>

性球体且忽略水滴之间的相互作用,其适用范围是水分含量较小且水滴分散均匀的油水分散系;Richardson公式^[7]、Brinkman公式^[7]等均是针对水分含量较低情况下油水分散系的粘度,这些经验公式的应用前提都是假设油液中的水分在油相中均匀稳定分布.因此,对于实际工程中水分与油液不可能混合均匀情况,由经验公式所计算的粘度值会出现较大偏差.

Pan等^[8]研究了油水乳状液的混合均匀性问题,认为油水混合均匀性对其粘度有一定程度的影响,引入了参量 C_m 作为描述油水分散系的均匀系数,构建了Pan粘度计算公式, C_m 是从0~1的参量,越接近1表示混合均匀程度越高.由于参量 C_m 因油样成分不同、水分含量不同、混合程度不同而存在差异.而红外光谱技术可以获取不同微量水分的油液在一定特征波数处的吸光度,且由于油液中水分均匀性的不一致,吸光度实测值与均匀性一致的吸光度之间存在差异,从而为不同微水含量的油样中水分均匀程度的表征提供可行性.

本文通过红外光谱法获取油液中水分吸光度实测值与理论值间的差异关系来重新定义油液中水分的均匀系数 C_m ,从而使得油水分散系的混合均匀程度得到精确量化;建立含微水绝缘油的运动粘度计算模型,得到不同水分含量绝缘油液的粘度值,并与运动粘度实测值进行相关性分析和误差分析,深入探讨微量水分对油液运动粘度的影响规律,为含微水绝缘油的粘度检测提供一种新的方法.

1 实验仪器及方法

1.1 实验仪器

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400W,超声频率40kHz)对不同微水含量的油水分散系进行预处理.不同微水含量油样的中红外光谱分析采用IRAffinity-1傅里叶变换红外光谱仪(日本岛津),其波数范围 $7\,800\text{ cm}^{-1}\sim 350\text{ cm}^{-1}$ 、分辨率可选0.5、1、2、4、8、16 cm^{-1} .不同微水含量油样的粘度测试采用SYD-265H型石油产品运动粘度测定器(上海昌吉地质仪器有限公司),水浴温度控制准确度为 $\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$,毛细管粘度仪内径0.8mm,粘度计常量为 $0.031\,15\text{ mm}^2/\text{s}^2$,油液流动时间计时准确度为0.1s.

1.2 实验方法

1)配制油样.为保证实验油样与实际应用中油样的一致性,实验采用油样取自使用中的25#变压器油,将实验用油在TY500型真空滤油机中循环过滤脱

水30min,使得油样的含水量降为 $10\text{ }\mu\text{L/L}$,在此基础上取100mL的25#变压器油盛入250mL锥形瓶中,用5、10、50 μL 微量注射器向其中注入蒸馏水配制成为 $100\text{ }\mu\text{L/L}$ 为梯度配制含水量为 $100\text{ }\mu\text{L/L}\sim 1000\text{ }\mu\text{L/L}$ 的11组油样.为保证油样中水分能够形成均匀稳定的油水分散系,对所有油样进行8h超声波震荡,震荡过程存在的超声波加热作用使得油样温度保持在 $40\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 之间.

2)采集中红外光谱数据.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.光谱数据采集时采用KBr固定厚度液体池,液体池垫片厚度选取 $100\text{ }\mu\text{m}$,扫描范围为 $4\,700\text{ cm}^{-1}\sim 350\text{ cm}^{-1}$,分辨率 2 cm^{-1} ,扫描次数45次,并取45次平均得到扫描光谱图像数据.

3)实验测试油样的运动粘度值.根据《GB/T265石油产品石油产品运动粘度测定法和动力粘度计算法》,采用SYD-265H型石油产品运动粘度测定器,分别测试11组不同微水含量的油样在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 的运动粘度值,根据油样的流动时间 t ,结合运动粘度的计算公式 $\nu=c_0\cdot t$ 进行实测值计算,实验准确度达到 $0.000\,01\text{ mm}^2/\text{s}$,且每组油样的运动粘度值均进行4次平行实验测试其运动粘度值.

2 实验数据分析与结果

2.1 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扫描总图($4\,700\text{ cm}^{-1}\sim 350\text{ cm}^{-1}$),见图1,将部分波段进行放大以显示各个油样水分特征吸收波数处的红外光谱图(图1中a、b、c、d所示),其中a为 $3\,615\text{ cm}^{-1}$ 水分子反对称伸缩振动吸光度曲线,b为 $3\,450\text{ cm}^{-1}$ 水分子对称伸缩振动吸光度曲线,c为 $3\,400\text{ cm}^{-1}$ 水分子对称伸缩振动与反对称伸缩振动谱带重叠中心吸光度曲线,d为 $1\,640\text{ cm}^{-1}$ 水分子变角振动吸光度曲线.

经过红外光谱法扫描可以获得油液中水分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^[9]: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 $\nu_3=3\,615\text{ cm}^{-1}$;4)除此之外的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为 $\nu=3\,400\text{ cm}^{-1}$.

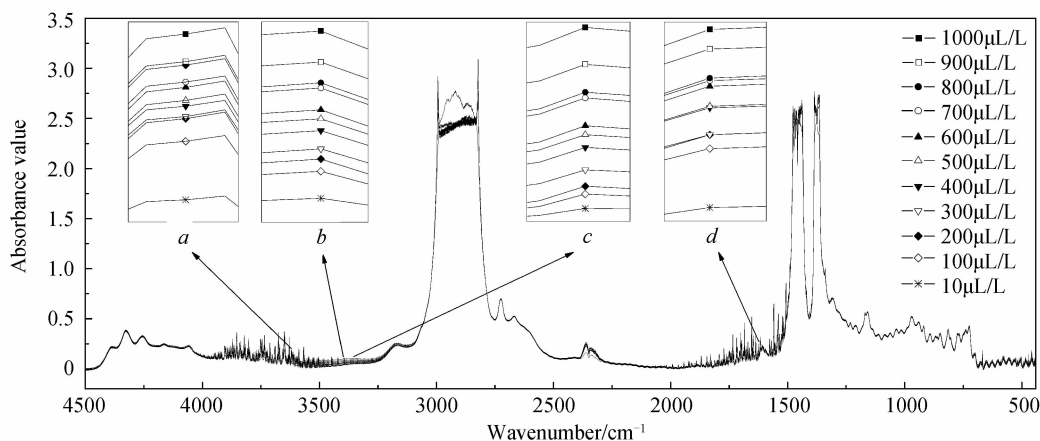


图 1 不同微水含量油样的中红外光谱总图

Fig.1 The mid-infrared spectral scanning image of oil samples with different content water

表 1 微水含量为 10 μL/L 油样在水分特定波数处的吸光度值平行实验及偏差

Table 1 The five parallel tests of absorbance value to oil samples (trace-water content 10 μL/L) at the characteristicspectral wavenumber of water and the deviation analysis

Wavenumber/cm ⁻¹	1 640	3 400	3 450	3 615	
Values of Absorbance	1 0.09374 0.03600 0.02312 0.06276	2 0.09422 0.03627 0.02340 0.06345	3 0.09469 0.03653 0.02368 0.06415	4 0.09327 0.03574 0.02284 0.06206	5 0.09293 0.03555 0.02264 0.06158
Average	0.09377	0.03602	0.02314	0.06280	
Absolute deviation	1 0.00003 0.00002 0.00002 0.00004	2 0.00045 0.00025 0.00026 0.00065	3 0.00092 0.00051 0.00054 0.00135	4 0.00050 0.00028 0.00030 0.00074	5 0.00084 0.00047 0.00049 0.00122
Average deviation	0.00055	0.00031	0.00032	0.00080	
Relative deviation/(%)	0.58%	0.85%	1.40%	1.27%	

为保证后续的粘度预测模型的准确度不受实验装样、清洗等操作过程产生的误差影响,对每组油样均进行 5 次检测.以含水量为 10 μL/L 的油样为例分析该油样 5 次平行实验在 1 640 cm⁻¹、3 400 cm⁻¹、3 450 cm⁻¹、3 615 cm⁻¹ 波数处的红外吸光度值偏差,如表 1.

由表 1 可知,每次装样、清洗等操作引起的各个特征波数处吸光度差别较小,其误差分别为 0.58%, 0.85%, 1.40%, 1.27%.

提取图 1 中各油样在特定波数 (1 640 cm⁻¹、3 400 cm⁻¹、3 450 cm⁻¹、3 615 cm⁻¹) 处对应的吸光度数值,如表 2.

由表 2 可知,含水量 10 μL/L 相对于 10 μL/L 油样在 1 640 cm⁻¹、3 400 cm⁻¹、3 450 cm⁻¹、3 615 cm⁻¹ 波数处的吸光度值增长率分别为 15.98%、6.72%、11.35%、56.46%,与重复装样、清洗等操作过程中的误差相比较,可见以油样在 4 个特定波数处的吸光度数值差别变化来反映油样中水分含量为 10 μL/L 到 1 000 μL/L 是可行的.

表 2 不同水分含量油样在特定波数处的吸光度值

Table 2 The absorbance value of oil samples with different content water at the specific spectral wavenumber

Trace water(μL · L ⁻¹)	10	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
A _i	0.0937	0.1087	0.1121	0.1124	0.1190	0.1194	0.1245	0.1258	0.1266	0.1337	0.1387
1 640/cm ⁻¹ Growth value		0.0150	0.0034	0.0002	0.0066	0.0004	0.0051	0.0014	0.0007	0.0072	0.0050
Growth rate/(%)		15.98%	3.15%	0.21%	5.86%	0.37%	4.24%	1.11%	0.56%	5.66%	3.77%
A _i	0.0360	0.0384	0.0402	0.0466	0.0543	0.0587	0.0615	0.0717	0.0736	0.0838	0.0966
3 400/cm ⁻¹ Growth value		0.0024	0.0018	0.0064	0.0077	0.0044	0.0028	0.0102	0.0019	0.0102	0.0128
Growth rate/(%)		6.72%	4.60%	15.99%	16.44%	8.13%	4.77%	16.53%	2.70%	13.87%	15.30%
A _i	0.0231	0.0257	0.0275	0.0343	0.0421	0.0466	0.0496	0.0600	0.0622	0.0726	0.0859
3 450/cm ⁻¹ Growth value		0.0026	0.0018	0.0068	0.0078	0.0045	0.0030	0.0104	0.0021	0.0104	0.0133
Growth rate/(%)		11.35%	6.99%	24.59%	22.68%	10.77%	6.37%	21.05%	3.55%	16.70%	18.38%
A _i	0.0628	0.0982	0.1120	0.1138	0.1201	0.1233	0.1313	0.1348	0.1454	0.1475	0.1645
3 615/cm ⁻¹ Growth value		0.0354	0.0139	0.0018	0.0063	0.0032	0.0080	0.0035	0.0105	0.0021	0.0170
Growth rate/(%)		56.46%	14.11%	1.58%	5.51%	2.67%	6.53%	2.64%	7.82%	1.46%	11.53%

因此,将油样中水分在 $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 450\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 615\ \text{cm}^{-1}$ 波数处的吸光度数值 A_i 与对应的油样水分含量 c 进行数据拟合得到微水含量与特定波段吸光度值 A_i^c 的计算关系分别为

$$\begin{aligned} A_i^c &= 0.0956 + 1.043 \times 10^{-4}c - 1.568 \times 10^{-4}c^2 + \\ & 9.645 \times 10^{-11}c^3, R^2 = 0.9564; \\ A_i^c &= 0.0306 + 5.931 \times 10^{-5}c, R^2 = 0.9743; \\ A_i^c &= 0.0178 + 6.077 \times 10^{-5}c, R^2 = 0.9716; \\ A_i^c &= 0.0663 + 2.842 \times 10^{-4}c - 4.63 \times 10^{-7}c^2 + \\ & 2.775 \times 10^{-11}c^3, R^2 = 0.9601 \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, A_i^c 为油样在特征吸收波段的吸光度计算值,其中 i 分别为 $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 450\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 615\ \text{cm}^{-1}$ 波数处的红外吸光度; c 为油样的微水含量,单位为 $\mu\text{L}/\text{L}$.

将油样中水分特征吸收波段的吸光度实测值与对应的计算曲线进行绘图得到二者的关系,如图 2.

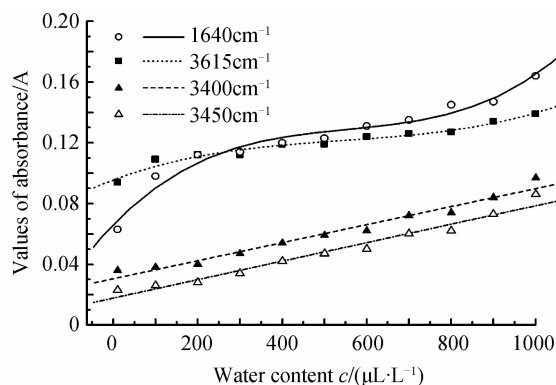


图 2 不同微水含量油样的吸光度实测值与计算曲线
Fig. 2 The measured absorbance values and calculated curves of different trace water content oil samples

由表 1、表 2、图 2 及式 (1) 可知,油样在

表 3 不同微水含量油样在特定波数处的吸光度实测值(A_i)、计算值 A_i^c 和水分均匀系数

Table 3 The measured absorbance values(A_i), calculated values (A_i^c) and uniformity coefficient (C_m) of different trace water content oil samples at the specific spectral wavenumber

Water content/ $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$	$1\ 640\ \text{cm}^{-1}$			$3\ 400\ \text{cm}^{-1}$			$3\ 450\ \text{cm}^{-1}$			$3\ 615\ \text{cm}^{-1}$			C_m
	A_i	A_i^c	C_{m_1}	A_i	A_i^c	C_{m_2}	A_i	A_i^c	C_{m_3}	A_i	A_i^c	C_{m_4}	
10	0.094	0.097	0.969	0.036	0.031	0.839	0.023	0.018	0.722	0.063	0.069	0.912	0.745
100	0.109	0.105	0.962	0.038	0.036	0.944	0.026	0.024	0.917	0.098	0.090	0.915	0.951
200	0.112	0.111	0.991	0.04	0.042	0.952	0.028	0.030	0.933	0.112	0.107	0.952	0.942
300	0.112	0.115	0.974	0.047	0.048	0.979	0.034	0.036	0.944	0.114	0.117	0.971	0.965
400	0.119	0.118	0.992	0.054	0.054	1.000	0.042	0.042	1.000	0.12	0.124	0.971	0.971
500	0.119	0.121	0.983	0.059	0.060	0.983	0.047	0.048	0.979	0.123	0.127	0.966	0.982
600	0.124	0.123	0.992	0.062	0.066	0.939	0.05	0.054	0.926	0.131	0.130	0.993	0.933
700	0.126	0.125	0.992	0.072	0.072	1.000	0.06	0.060	1.000	0.135	0.134	0.989	0.989
800	0.127	0.128	0.992	0.074	0.078	0.949	0.062	0.066	0.939	0.145	0.139	0.960	0.947
900	0.134	0.133	0.992	0.084	0.084	1.000	0.073	0.073	1.000	0.147	0.149	0.984	0.984
1 000	0.139	0.140	0.993	0.097	0.090	0.922	0.086	0.079	0.911	0.164	0.165	0.994	0.918

2.3 运动粘度计算模型及模型评价

由于实验油样中微水含量为 $10\ \mu\text{L}/\text{L} \sim 1\ 000\ \mu\text{L}/$

$1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 450\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 615\ \text{cm}^{-1}$ 波数处的吸光度值和水分含量之间建立数量关系式的拟合度分别达到了 0.956 4、0.974 3、0.971 6、0.960 1,表明式(1)能够较好地模拟出油样吸光度值随水分含量增加而相应增加的理论值.

2.2 油样中水分均匀系数

结合图 2 中水分在各个特征吸收波段的吸光度实测值与计算曲线可知,随着油液中水分含量的增加,吸光度实测值与计算曲线之间存在不同程度的差异,将计算曲线看作是油样均匀性不同的水分红外特征波数处的吸光度,则二者的差异反映了不同微水含量的油样中水分均匀程度不同,因而可根据实测值 A_i 与相应计算值 A_i^c 之间的吻合程度来确定油样中水分含量的均匀性. 定义在 $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 450\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 615\ \text{cm}^{-1}$ 波数处的各油样中水分的均匀系数 C_m 的计算式为

$$C_m = 1 - \frac{|A_i^c - A_i|}{A_i^c} \quad (2)$$

结合式(1)、(2),代入相应数据分别得到各油样在 $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 450\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 615\ \text{cm}^{-1}$ 波数处的水分均匀系数 C_{m_1} 、 C_{m_2} 、 C_{m_3} 、 C_{m_4} ,根据每组油样对应的四个水分均匀系数的最大值、最小值差异^[10]确定该组油样的水分均匀系数 C_m 为

$$C_m = 1 - \frac{\max(C_{m_i}) - \min(C_{m_i})}{\max(C_{m_i})} \quad (3)$$

根据吸光度实测值 A_i 及相应的计算值 A_i^c ,计算各油样在特定波数 ($1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 450\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 615\ \text{cm}^{-1}$)处的水分均匀系数 C_{m_1} 、 C_{m_2} 、 C_{m_3} 、 C_{m_4} 及油样的均匀系数 C_m 数据,如表 3.

L,其体积含水率为 $0.001\% \sim 0.1\%$,水分含量较低,故实验油水分散系属于 O/W 水包油型,连续相为油

相,因此可认为 Pan 粘度计算公式中 $\mu_c = \mu_o, \epsilon_c = 1 - \epsilon_w$ [11-12]。由于微量水分的增加对油液密度的影响可忽略,因此引入动力粘度值和运动粘度值变换关系 $\nu = \mu / \rho$ 后,可得含微水绝缘油的运动粘度模型

$$\nu = (1 - C_m) \left((1 - \epsilon_w) \nu_o + \epsilon_w \nu_w \frac{\rho_w}{\rho_o} \right) + C_m \nu_o (1 - \epsilon_w)^{-k} \quad (4)$$

式中, ν 为油水分散系运动粘度值,单位为 mm^2/s ; ν_o 为

表 4 不同微水含量油样的运动粘度实测值、平均值及其相对偏差和计算值与平均值误差

Table 4 The measured values, average values, average deviation of them and calculated values of the kinematic viscosity of different trace-water oil samples and the error between average measured values and calculated values

Water content/ $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$	10	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
Measured value/ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	1	9.8431	9.8459	9.8484	9.8533	9.852	9.8537	9.8561	9.8566	9.861	9.8657	9.8694
	2	9.843	9.8462	9.8479	9.8537	9.8501	9.8529	9.8546	9.8543	9.8607	9.8665	9.8711
	3	9.8428	9.8464	9.8487	9.8525	9.8506	9.8544	9.8554	9.854	9.8622	9.8649	9.8696
	4	9.8432	9.8465	9.8488	9.8529	9.8505	9.8541	9.856	9.8539	9.8612	9.864	9.872
	Average	9.8430	9.8463	9.8485	9.8530	9.8508	9.8538	9.8555	9.8550	9.8613	9.8653	9.8705
Average deviation	0.000125	0.0002	0.0003	0.0004	0.0006	0.000475	0.000525	0.00095	0.000462	0.000825	0.001025	
Calculated value/ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	9.8432	9.8452	9.8476	9.8501	9.8527	9.8549	9.8570	9.8601	9.8616	9.8650	9.8661	
Error/ $(\times 10^{-4})$	0.203	-1.117	-0.913	-2.943	1.929	1.116	1.522	5.175	0.304	-0.307	-4.458	

由表 4 中各个油样的运动粘度数据可知,平行实验中运动粘度实测值之间的粘度变化相对偏差范围为 0.000125~0.001025,表明平行实验间油样的粘度偏差值小于不同微水含量油样间的粘度变化值,因此根据运动粘度计算模型式(4)所得的油样运动粘度值能够反映不同微水含量对油样粘度变化的影响。

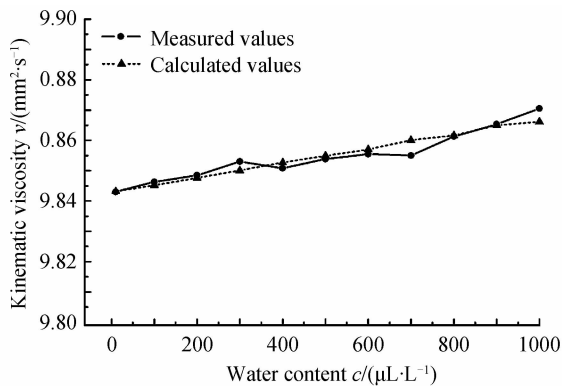


图 3 不同微水含量油样的运动粘度实测值和计算值比较
Fig. 3 The comparison of measured kinematic viscosity values and calculated values of different trace water content oil samples

同时,通过对不同微水含量条件下各个油样的运动粘度实测值与计算值的对比分析,得到 11 组油样的运动粘度实测值与计算值之间的相关系数 [13-14] 为 0.944 9,误差范围为 $-4.458 \times 10^{-4} \sim 5.175 \times 10^{-4}$ 。说明以水分特征吸收波段吸光度值实测值与计算值吻合度为依据定义的油中水分均匀系数能够较精确地反映出油水分散系中水分的均匀程度,以此构建的油水分散系运动粘度计算模型能够更为准确反映出油样中水

油相运动粘度值,单位为 mm^2/s ; ν_w 为水相动力粘度值,单位为 mm^2/s ; ϵ_w 为水分含量,单位为 %; ρ_w 为水密度为 $992.2 \text{ kg}/\text{cm}^3$; ρ_o 为油样密度为 $868.5 \text{ kg}/\text{cm}^3$; k 为常量,取 2.5。

测得不同微水含量条件下各个油样的运动粘度 4 次平行实验实测值均值,并根据式(4)计算各个油样在对应水分均匀系数 C_m 时的运动粘度值如表 4。

分含量和运动粘度之间的数量关系,更为准确地计算出不同微水含量条件下油液的运动粘度值。

结合图 3 中油样运动粘度的实测值和计算值比较可知,11 组油样的实测数据和计算数据较为接近,且随着微水含量增加,油样的运动粘度计算值增加趋势和幅度与实测值趋于一致。

3 结论

微量水分与绝缘油混合之后,两相之间会形成油水分散系,随着微水含量的增加,油样的均匀稳定性受各种外部条件影响而有所差别。通过采用红外光谱扫描的方法,获取油样中水分在其特征波数处的吸光度,根据红外吸光度实测值与理论计算值之间差异定义油样中水分的均匀系数,得到不同微水含量条件下绝缘油油样的运动粘度计算模型。研究发现:

1) 随着油水分散系中水分含量增加,油样在 1640 cm^{-1} 、 3400 cm^{-1} 、 3450 cm^{-1} 、 3615 cm^{-1} 波数处的红外吸光度值逐渐增加,表明通过测试油样在特定波数处的吸光度可以获得油中微水含量,它们之间的对应关系拟合度分别为 0.9564、0.9743、0.9716、0.9601;

2) 不同微水含量油样中水分的混合均匀程度不同,定义了以油样中水分特征吸收波段的实测值和计算值之间差异程度为依据的水分均匀系数,根据各个油样中水分的均匀系数,有效的反映出了各个油样中水分的混合均匀程度。

3) 以水分均匀系数 C_m 建立了不同水分含量绝缘

油运动粘度计算模型,可得油样运动粘度的计算值与相应实测值之间的相关系数为 0.9449,误差范围为 $-4.458 \times 10^{-4} \sim 5.175 \times 10^{-4}$. 构建的油水分散系运动粘度计算模型能准确获取不同水分含量油样的运动粘度. 对于采取有效措施监控绝缘油的运行状态具有重要意义.

参考文献

- [1] ZOU Ping, LI Jian, SUN Cai-xin, *et al.* Impregnation model and experimental investigation of vegetable insulating oil-paper insulation [J]. *Proceeding of the Chinese Society For Electrical Engineering*, 2011, **32**(25): 125-131.
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.
- [2] CHEN Bin, LIU Ge, ZHANG Xian-ming. 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.
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, **42**(12): 3168-3174.
- [3] CHEN Bin, LIU Ge. Analysis on near infrared spectroscopy of water content in oil using T-S fuzzy identifying model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): (0230001-1)-(0230001-5).
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*, 2014, **43**(2): (0230001-1)-(0230001-5).
- [4] STACHOWIAK G, BATCHELOR A. *Engineering tribology* [M]. Oxford, U. K., Butterworth-Heinemann, 2013.
- [5] HU Zhi-hua, LIU Lei, ZHOU Fang-de, *et al.* An experimental study on the flow characteristics for oil-water emulsions[J]. *Journal of Shang Hai Jiao Tong University*, 2005, **39**(2): 314-316.
胡志华, 刘磊, 周芳德, 等. 油水两相乳化液流动特性的实验研究[J]. *上海交通大学学报*, 2005, **39**(2): 314-316.
- [6] MONTGOMERY T. *Introduction to polymer rheology* [M]. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. 2012.
- [7] ZHANG Yi-min. Study on rheology behavior of W/O waxy crude oil emulsion[D]. Northeast Petroleum University, 2013.
张一民. 油包水型含蜡原油乳状液流变特性研究[D]. 东北石油大学, 2013.
- [8] 陈听宽. 两相流与传热研究[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [9] 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.
- [10] CHEN Bin, LIU Ge, ZHANG Xian-ming. Influence of moisture concentration on water/oil separation in low vacuum [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2014, **34**(4): 329-335.
陈彬, 刘阁, 张贤明. 含水率对油水真空分离的影响研究[J]. *真空科学与技术*, 2014, **34**(4): 329-335.
- [11] LIU lei, LI cao, ZHOU Si-yi, *et al.* Horizontal oil-water two-phase flow in a fracture with different spread angles[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, **30**(4): 615-617.
刘磊, 李操, 周思怡, 等. 油水两相在不同展角裂缝中的水平流动特性[J]. *工程热物理学报*, 2009, **30**(4): 615-617.
- [12] DONG Qiao-ling, PU Chun-sheng, ZHENG Li-ming, *et al.* Microscopic reasons of apparent viscosity changes of water-in-oil emulsion in heavy oil[J]. *Journal of Shanxi University of Science & Technology*, 2014, **32**(5): 95-99.
董巧玲, 蒲春生, 郑黎明, 等. 稠油 W/O 型乳状液表观粘度变化微观原因解析[J]. *陕西科技大学学报*, 2014, **32**(5): 95-99.
- [13] JEREMY A, INGELAP. 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.
- [14] FOULADI R T, STEIGER JH. 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.