

# 利用振荡管密度计检测循环流动附温油水混合物密度

何云腾, 张健, 李华, 李东晖, 吴应湘

(中国科学院力学研究所, 北京 100090)

**摘要:** 振荡管密度计广泛用于检测静止状态下的匀相液体密度。如果被测试样为非稳定的均一液体, 在检测其密度时试样静止, 则会发生试样相分离现象, 使测得的密度值持续跳变而无法读数。在流动状态下的试样流速会影响所测密度值, 但一定流速以下, 影响可以忽略不计。通过循环流动管路改造现有手持振荡管密度计, 按质量比配置标准油水混合物试样。在给定的实验条件下, 测得试样的附温密度, 与通过附温检测的单相密度结合混合密度公式计算的理论混合密度进行对比, 结果表明: 按照质量含率进行分配的混合密度计算可以很好地反映各相密度随温度变化及混合后变化的趋势, 在持续的剪切分散下, 油水混合物保持了介质的均匀稳定, 使通过循环改造的振荡管密度计完全可以进行多相液态混合物的密度检测。

**关键词:** 振荡管密度计; 循环流动; 附温密度; 油水混合物密度

中图分类号: O6-339 文献标识码: A 文章编号: 1002-4956(2022)05-0029-06

## Density measurement of circulating oil-water mixture with temperature by oscillating tube densitometer

HE Yunteng, ZHANG Jian, LI Hua, LI Donghui, WU Yingxiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100090, China)

**Abstract:** The oscillating tube densitometer is widely used to detect the density of homogeneous liquids in a static state. If the test sample is an unstable uniform liquid, and the sample is stationary when its density is measured, the phase separation phenomenon of the sample will occur, which will cause the measured density value to continuously jump and fail to read. The flow rate of the sample in the flow state will affect the measured density value, but below a certain flow rate, the effect can be ignored. The existing hand-held oscillating tube density meter is modified through the circulating flow pipeline, and the standard oil-water mixture sample is configured according to the mass ratio. Under the given experimental conditions, the measured temperature density of the sample is compared with the theoretical mixed density calculated by the combination of the single-phase density and the mixed density formula of the temperature detection. The results show that the mixture density calculation shall be carried out in accordance with the quality content of distribution is a good way to reflect the phase density changing with temperature and blend to the trend of change, under the constant shear dispersion, oil-water mixture to keep the uniform stability of medium, circulate through the transformation of oscillating tube densitometer can be used to detect multiphase mixture density of the liquid.

**Key words:** oscillating tube density meter; circulating flow; temperature density; oil-water mixture density

油水混合物密度在油井单井采出液的多相计量方面有着重要作用<sup>[1]</sup>。混合密度法是测试不同温压工况

下液相介质相含率的优势方法之一<sup>[2]</sup>。由于密度受温度影响较大, 当使用混合密度法进行相含率分析时,

收稿日期: 2021-09-16

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 B 类 (XDB22030201)

作者简介: 何云腾 (1989—), 男, 北京, 学士, 工程师, 研究方向为实验分析方法的工业应用与多相计量, hyt@imech.ac.cn。

通信作者: 李华 (1977—), 男, 山东青岛, 博士, 助理研究员, 研究方向为多相流可视化与测量, lihua@imech.ac.cn。

引文格式: 何云腾, 张健, 李华, 等. 利用振荡管密度计检测循环流动附温油水混合物密度[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(5): 29-34.

**Cite this article:** HE Y T, ZHANG J, LI H, et al. Density measurement of circulating oil-water mixture with temperature by oscillating tube densitometer[J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(5): 29-34. (in Chinese)

多相流量计参数库中一般具备油相和水相的单相附温密度曲线,商用的科氏力流量计为典型代表<sup>[3-4]</sup>。

振荡管密度计不仅适用于大部分温度-压力工况,更具有较高的精度<sup>[5]</sup>。目前大量使用的台式振荡管密度计多采用U型检测池<sup>[6]</sup>,基于行业对应相关标准<sup>[7-8]</sup>,在试样静止于检测池中,检测单一均相的液体试样密度。文献<sup>[9]</sup>分别详细描述了U型/双U型(W型)振荡管密度计的原理和标定与校准方法。由于液体是静止于检测池中的,不可避免地产生重力沉降效应<sup>[10]</sup>。随着重力影响,液体混合物试样开始发生缓慢的相分离,此过程中具备密度差的分相液体不断地在测量池中聚并、移动,进而导致密度检测值出现反复,跳变或超出密度计振动频率检测限,无法读取密度值。

从连续流动分析(CFA)技术得到启发<sup>[11]</sup>。使用类似的管路设计对手持密度计进行改进,根据仪器厂家提供的说明显示,流动的试样会造成检测值的误差。本文通过实验证明了较低流速的液体试样检测值与完全静止的试样检测值一致,在试样进行流动时,相分离过程对密度检测的影响将大幅减小,随着流动的持续进行,伴热检测池与环境间的热平衡逐步建立,最后使密度计得到稳定的附温密度检测读数。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料与仪器

(1) 实验设备:手持振荡管密度计(DMA 35 V4

Ex petrol,量程:0~3 000 kg/m<sup>3</sup>,密度精度 1.0 kg/m<sup>3</sup>,精度±0.2 °C);分析天平(BSA 224S-CW,量程 220 g,准确度±0.1 mg);低温恒温水浴(DC1030,设置温-10.00~100.00 °C,温度波动度±0.05 °C);高速剪切乳化机(HR-500DG,内切式,2 k~23 k r/min);蠕动泵(泵内管 3 mm×5 mm 硅胶,转速 0~300 r/min,流量范围 0~50 mL/min,分辨率 1.46×10<sup>-3</sup> mL/min)。其余相关仪器或器件:控温伴热保温套、玻璃夹套水槽、高颈烧杯、保温管等。

(2) 试样与药品:34#白油,实验室纯净水,市售液态油溶性乳化剂,石油醚(馏程 90~120 °C,分析纯),无水乙醇(分析纯)。

### 1.2 确定密度计最低误差工作条件

#### 1.2.1 测量池内流速的影响

振荡管密度计在检测密度时应在被检测液体介质完全静止的情况下进行检测,在本实验中是无法实现的,故进行流速对密度检测值影响的验证实验。蠕动泵泵体为6柱型,尽量减小蠕动泵的脉动问题。采用步进电机控制,实验前将整个实验管路搭建完成,模拟整个实验流路工况。通过泵流量标定,蠕动泵在输送水介质时最大流量为 43.69 mL/min,蠕动泵在输送白油介质时最大流量为 50.00 mL/min。分别对水相、白油相介质进行测试,对比液体试样静止到最大流速间的密度测试偏移量,以确定当流速超过一定阈值时,密度计的检测数据无法置信。实验数据见表 1。

表 1 实验用纯净水和 34#白油不同流速下测试密度数据及误差

实验介质		实验用纯净水				34#白油				
设计流量/ (mL·min <sup>-1</sup> )	实际流量/ (mL·min <sup>-1</sup> )	密度计样 品池流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	温度/°C	测试 密度值/ (kg·m <sup>-3</sup> )	流动与静止 检测密度值 相对误差 δ/%	实际流量/ (mL·min <sup>-1</sup> )	密度计样 品池流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	温度/°C	测试 密度值/ (kg·m <sup>-3</sup> )	流动与静止 检测密度值 相对误差 δ/%
0	0.00	0.000 0	26.8	997.9	0.00	0.00	0.000 0	27.0	866.5	0.00
0.5	0.50	0.002 7	26.8	997.9	0.00	0.50	0.002 7	27.0	866.5	0.00
1.0	1.00	0.005 3	26.8	997.9	0.00	1.00	0.005 3	27.0	866.5	0.00
2.0	2.00	0.010 6	26.8	997.9	0.00	2.00	0.010 6	27.0	866.5	0.00
3.0	3.00	0.015 9	26.8	997.9	0.00	3.00	0.015 9	27.0	866.5	0.00
4.0	4.00	0.021 2	26.8	997.9	0.00	4.00	0.021 2	27.0	866.5	0.00
5.0	5.00	0.026 5	26.8	997.9	0.00	5.00	0.026 5	27.0	866.5	0.00
6.0	6.00	0.031 8	26.8	997.9	0.00	6.00	0.031 8	27.0	866.5	0.00
7.0	7.00	0.037 1	26.8	997.9	0.00	7.00	0.037 1	27.0	866.5	0.00
8.0	8.00	0.042 4	26.8	997.9	0.00	8.00	0.042 4	27.0	866.5	0.00
9.0	9.00	0.047 7	26.8	997.9	0.00	9.00	0.047 7	27.0	866.5	0.00
10.0	10.00	0.053 1	26.8	997.9	0.00	10.00	0.053 0	27.0	866.5	0.00
15.0	15.00	0.079 6	26.8	997.8	-0.01	15.00	0.079 6	27.0	866.5	0.00
20.0	20.00	0.106 1	26.8	997.8	-0.01	20.00	0.106 1	27.0	866.5	0.00
25.0	25.02	0.132 7	26.8	997.7	-0.02	25.02	0.132 7	27.0	866.5	0.00
30.0	30.00	0.159 2	26.8	997.6	-0.03	30.00	0.159 2	27.0	866.5	0.00
35.0	34.98	0.185 6	26.8	997.5	-0.04	35.00	0.185 7	27.0	866.5	0.00
40.0	40.04	0.212 4	26.8	997.5	-0.04	40.26	0.213 6	27.0	866.5	0.00
45.0	43.69	0.231 8	26.8	997.4	-0.05	45.00	0.238 7	27.0	866.5	0.00
50.0	-	-	-	-	/	50.00	0.265 3	27.0	866.5	0.00

从测试数据可以看出, 在目前系统使用的蠕动泵提供的流量下, 密度计并未出现明显的检测数值偏移问题。考虑到密度计检测池容积为 2 mL, 油水混合物相稳定时间以及蠕动泵内管的寿命, 实验过程中将蠕动泵流量定为 8 mL/min。

### 1.2.2 试样黏度和均匀性的影响

郝晨新等<sup>[12]</sup>研究了黏度对振荡管密度计检测值的影响并描述了一种修正曲线。目前市售的振荡管密度计都具备自动黏度修正功能, 一般在 $\leq 3 \times 10^4$  mPa·s 的黏度范围内, 检测均匀介质液体试样时, 黏度变化对密度测试值的偏差可以忽略不计。

在实验过程中观察到当油水两相介质混合不均匀时, 密度计的示数会出现明显的跳变, 液体介质的不均匀性会明显影响密度计检测的精度, 同时可能影响密度计对检测值黏度修正的准确性。因此在实验进行时, 高速剪切乳化机应持续运转, 尽量保证试样的均匀性。同时乳化剂的使用必不可少, 实验室白油相对纯净, 在不添加药剂的情况下, 即使连续运转高速剪切乳化机, 乳化液的乳化程度及稳定性也较不理想。

### 1.2.3 空泡位置对 W 型样品池检测液体密度值的影响

实验观察到非均相液体对振荡管密度计检测值产生跳变影响, 设计可控实验测试空泡(密度突变段)位置, 大小对所测密度值影响的程度, 王文祥等<sup>[13]</sup>研究气泡位置及体积对 U 型振荡管密度计检测结果的影响。使用蠕动泵的定量功能, 空泡容积分别为 0.01、0.02、0.03 mL。为准确显示空泡与密度计检测池相关位置的关系, 按实验工况摆放状态进行绘图并标注位置命名, 如图 1 所示。

实验中使用蠕动泵调速模式将整个实验管路用待测实验用纯净水填充, 观察检测池中无微小空泡。停

止冲洗, 等待密度计对静止介质进行密度检测, 得到静止状态下的实验用纯净水密度值。使用蠕动泵的定量模式, 吸取 0.01 mL 的空气进入实验管路。返回蠕动泵调速模式, 慢速输送空泡直至进入密度计样品池, 待空泡出现在样品池观察窗视野内, 设置流量 1 mL/min。待空泡完全进入样品池后, 关闭蠕动泵, 空泡停滞在 A 点, 记录 A 点密度检测数值。打开蠕动泵, 输送空泡前往 B 点, 待空泡中心与 B 点重合后, 关闭蠕动泵, 空泡停滞在 B 点, 记录 B 点密度检测值。再打开蠕动泵, 等待空泡依次通过 C~H 点, 分别在空泡与各点中心对应时关闭蠕动泵, 记录各点数据。最后开启蠕动泵当空泡前端临近排出 I 点时, 关闭蠕动泵, 读取空泡在 I 点时的密度检测数据。

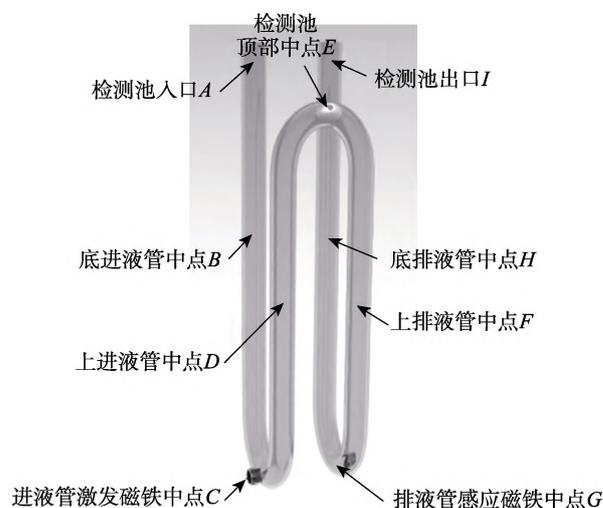


图 1 密度计检测池模型及空泡位置标注

重复上述过程, 分别定量抽取 0.02、0.03 mL 的空气进行测试。0.01、0.02 mL 的测试数据结果见表 2。

表 2 空泡容积及位置对密度检测值的影响

项目	位置描述	空泡容积			
		0.01 mL		0.02 mL	
空泡位置		密度检测值/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	与静止密度 相对误差 $\delta/\%$	密度检测值/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	与静止密度 相对误差 $\delta/\%$
A	检测池入口	997.7	0.000	997.2	-0.050
B	底进液管中点	987.6	-1.012	980.3	-1.744
C	进液管激发磁铁处中点	939.2	-5.863	883.2	-11.476
D	上进液管中点	986.7	-1.102 5	978.2	-1.954
E	W 式样池顶部中点	997.2	-0.050	997.1	-0.060
F	上排液管中点	986.9	-1.082	978.6	-1.914
G	排液管感应磁铁中点	939.7	-5.813	882.7	-11.526
H	底排液管中点	988.5	-0.922	980.7	-1.703
I	检测池出口	997.7	0.000	997.6	-0.010

0.03 mL 容积的空泡进行抽取后, 触发密度计卧位测试管路的被动集空泡设计, 无法得到完整的同体积空泡, 多次尝试后, 发现测试池中出现一次性大型空泡过流造成密度计无振荡无法检测。

从图 2 中可以看出, 当空泡位置距离检测池激发与接收磁铁元件的 C、G 2 点越近则误差越大, 此时空泡对玻璃管振动频率的影响达到顶峰, 严重影响激发与接收磁铁元件的电磁信号工作。但当空泡位于 A、

E、I点时，密度检测误差基本可以忽略不计，这也证明手持密度计的W型检测池对空泡的排异与误差消弭比常用U型检测池更优异。同时空泡体积越大，处在同一位置的检测误差越大。

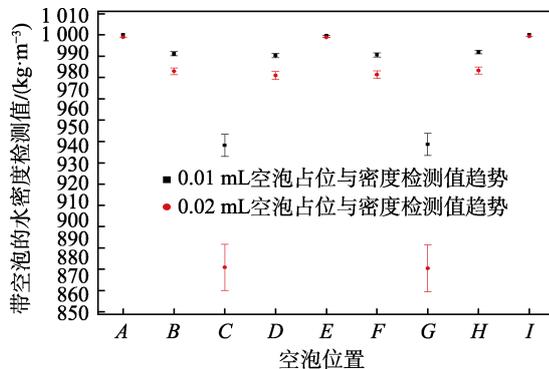


图2 空泡位置对密度检测值的影响

在实际检测试样时，如果试样可透光，尽量将空

泡或异常的液体试样部分控制在A、E、I3点上，或再次进样将异常部分移出检测池。如果试样为原油等不透光的液体介质，参照高黏度试样对注射进样要求的描述，使用密度计的平卧位，为减少不透光试样中不可见的空泡或非匀相液段对检测结果的偶然干扰，建议加大试样的准备量，少量多次进样，剔除异常值，消除此类问题带来的偶然误差。

### 1.3 油水混合密度检测实验过程

(1) 分别检测34#白油、实验用水、乳化剂在15~55℃附温区间下的单相密度。

(2) 按照高速剪切乳化机说明要求，容积为100 mL的高颈烧杯，试样质量应控制在80 g以内为宜。通过计算确定在各含油率下的3种组分质量，其中市售乳化剂按照说明书的使用量为白油质量的10%，油性乳化剂质量计入含油率。试样使用分析天平精密称量。实验设计数据与实际称取质量见表3。

表3 油水混合物试样组分配比数据

项目序号	含油率(m/m)/%		实验用水质量 $m_w/g$		白油质量 $m_o/g$		乳化剂质量 $m_e/g$	
	设计含油率	实际含油率	设计质量	实称质量	设计质量	实称质量	设计质量	实称质量
1	5	5.03	75.00	75.017 5	3.60	3.600 6	0.360	0.376 3
2	10	9.97	70.50	70.564 5	7.10	7.106 2	0.710	0.711 1
3	20	20.03	62.00	61.995 5	14.10	14.113 6	1.410	1.410 1
4	30	30.06	53.00	53.010 2	20.70	20.696 5	2.070	2.085 6
5	40	40.00	44.70	44.733 6	27.10	27.114 4	2.710	9

(3) 调节高速剪切乳化机的工作转速逐步调至 $1 \times 10^4$  r/min，当转速达到设定值后，连续搅拌分散30 min，观察试样是否均匀。当试样均匀后，则将保温循环管路硅胶管放入高颈烧杯适宜位置。

(4) 开启低温恒温水浴槽，设定温度为5℃，等待实验介质冷却。

(5) 设置最大流量循环混合试样密度测量管道的工质，且仅限于管道冲洗和循环试样。

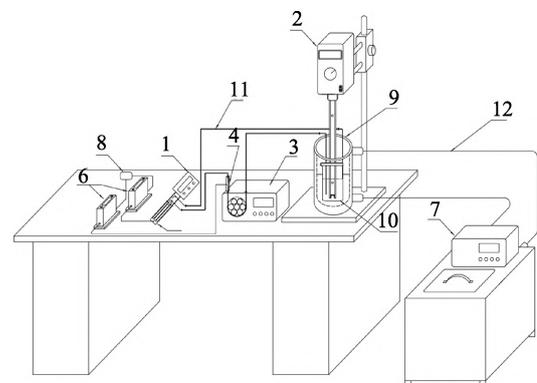
(6) 查看密度计显示的试样温度，待温度下降到10℃时，改变循环管路流量至8 mL/min。关闭恒温水浴槽的制冷功能，等待被测介质温度缓慢上升至15℃开始读取密度值，当检测温度超过室温后，将低温精密恒温槽的设置温度设定高于试样目前温度5℃，并用分配恒温水浴槽的外输流量，使高颈烧杯中的试样温度缓慢上升，电控伴热套设定温度随检测温度而上升，泵出口与密度计伴热套的设置温度为检测温度的值。整个系统连续运转直至连续读取油水混合试样在15~55℃附温区间的密度值。

(7) 在 $15 \leq T \leq 35$ ℃范围内每隔1℃读取稳定的密度数据， $35 < T \leq 55$ ℃范围内每隔5℃读取稳定的密度数据。得到的数据与理论计算数据进行对比计

算相对误差。

(8) 关闭蠕动泵将混合试样进出液管分别浸入清洗液烧杯和废液杯。依次使用石油醚、无水乙醇，以最大流量管道冲洗置换，之后晾干备用。

(9) 按如上步骤进行下一组配比的混合密度检测实验。实验系统简图如图3所示。



注：1—安东帕DMA35 V4 Ex Petrol手持密度计；2—高速剪切乳化机；3—蠕动泵；4—循环管道控温伴热套；5—密度计控温伴热套；6—伴热套温控器；7—低温恒温水浴槽；8—桌面PDU电源；9—水浴夹套水槽；10—试样高颈烧杯；11—保温循环管道；12—保温水浴循环管道。

图3 附温油水混合密度实验系统简图

## 2 实验结果

### 2.1 单相介质附温密度数据

使用图 3 所示的实验系统分别检测在附温条件下的实验用水、白油、乳化剂的单相密度。作为混合试样计算密度的依据, 结果见图 4。

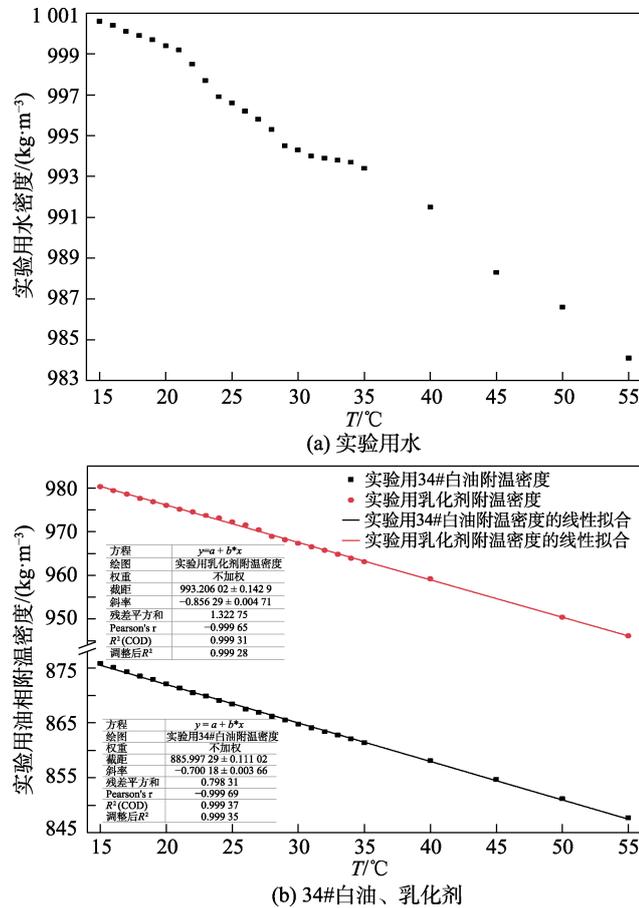


图 4 实验用 34#白油、乳化剂及实验用水的附温密度图

根据设计实验组各组分占总试样的质量百分比与实测单相密度, 通过公式进行计算其理论混合密度, 混合密度表示如下:

$$\rho_{\text{计混}}^{T_c} = \frac{1}{\frac{m\%_W}{\rho_W^{T_c}} + \frac{m\%_O}{\rho_O^{T_c}} + \frac{m\%_E}{\rho_E^{T_c}}} \quad (1)$$

式中:  $\rho_{\text{计混}}^{T_c}$  为在特定温度  $T_c$  下实验用水、白油、乳化剂三相的计算混合密度;  $\rho_W^{T_c}$  为在特定温度  $T_c$  下实验用水相的测试密度;  $\rho_O^{T_c}$  为在特定温度  $T_c$  下白单相的测试密度;  $\rho_E^{T_c}$  为在特定温度  $T_c$  下乳化剂单相的测试密度;  $m\%_W$  为本组测试试样中实验用水相占总试样质量的百分比;  $m\%_O$  为本组测试试样中白油相占总试样质量的百分比;  $m\%_E$  为本组测试试样中乳化剂相占总试样质量的百分比。

需要注意的是, 式 (1) 代表使用各单相介质的密度指在特定温度  $T_c$  下测得的数值, 计算出的混合密度

$\rho_{\text{计混}}^{T_c}$ , 为在给定温度  $T_c$  及本组三相介质质量占比组分下的混合密度值。

试样密度检测值, 相对误差的计算如下:

$$\delta = \frac{\rho_{\text{计混}}^{T_c} - \rho_{\text{测混}}^{T_c}}{\rho_{\text{计混}}^{T_c}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\delta$  为在特定温度  $T_c$  下, 计算混合密度与实测混合密度的相对误差;  $\rho_{\text{计混}}^{T_c}$  为在特定温度  $T_c$  下计算混合密度值;  $\rho_{\text{测混}}^{T_c}$  为在特定温度  $T_c$  下密度计测得的混合密度值。

### 2.2 油水混合物附温密度测试数据与误差

密度检测值与计算值实验数据见图 5—6。

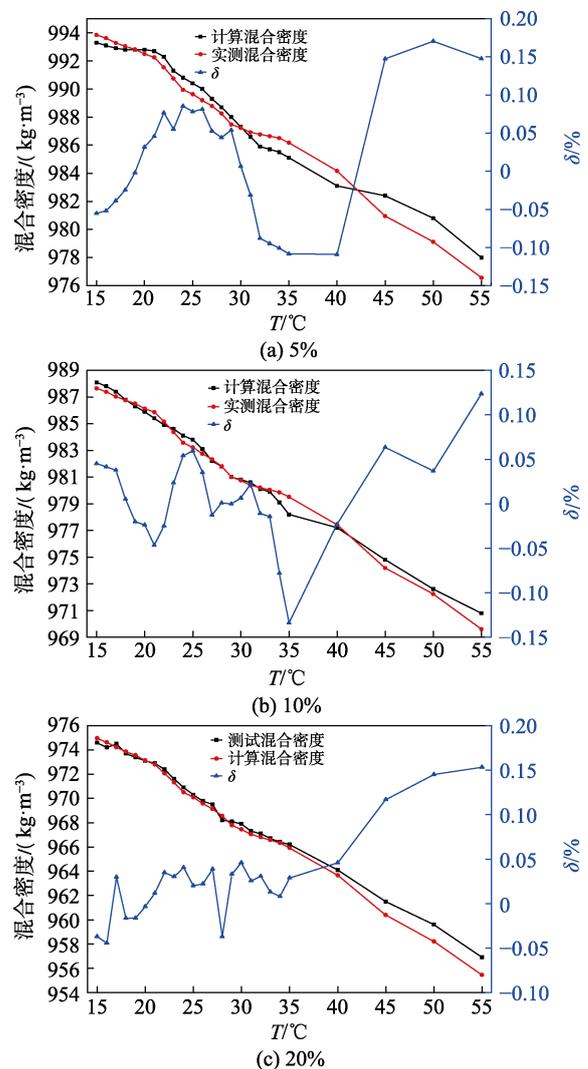


图 5 5%、10%、20%质量含油率混合密度检测值与计算值曲线及相对误差

## 3 结语

本实验方法主要研究油水混合物在附温 15~55℃ 下的计算密度与理论密度之间的偏差。从实验结果看, 按照质量含率进行分配的混合密度计算可以很好地反映各相密度随温度变化及混合后变化的趋势, 在持续

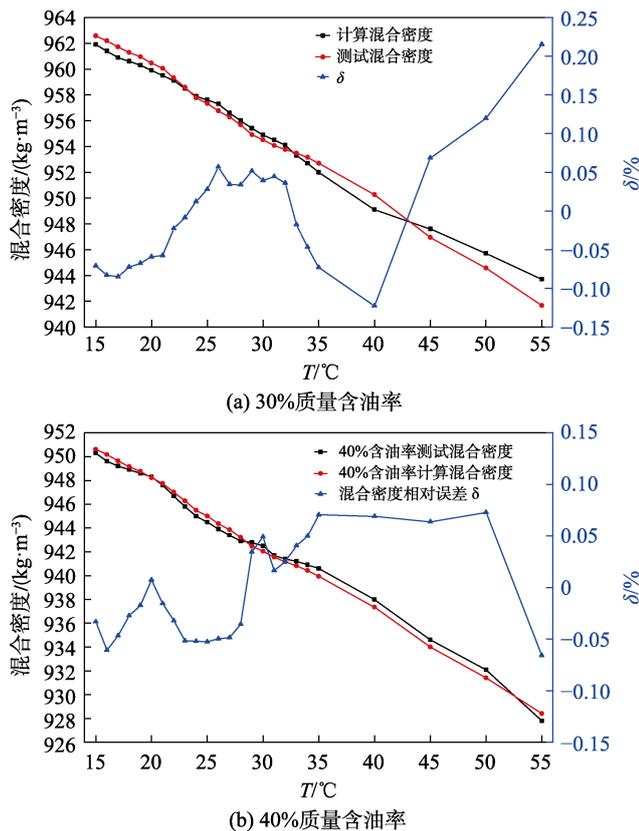


图6 不同质量含油率混合密度检测值与计算值曲线及相对误差

的剪切分散下,油水混合物保持了介质的均匀稳定,使通过循环改造的振荡管密度计完全可以进行多相液态混合物的密度检测。这为工业管道的多相计量检测提供了启发:科氏力流量计的检测基于振动管原理,前置的均相器可能会使其数据更加稳定可靠。在使用振荡管密度计进行检测前,应该特别注意试样的匀质

性、黏度、凝固点这3个参数,否则不仅会造成检测误差过大,还可能损坏仪器。

### 参考文献 (References)

- [1] 何云腾, 吴奇霖, 陈三君, 等. 定容管活塞式油气水多相流量计[J]. 油气井测试, 2019, 28(4): 45-50.
- [2] 韩云峰, 安维崢, 孙钦, 等. 水下多相流量计相分率参数测量技术研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 11(6): 172-176.
- [3] 李成刚. 科氏质量流量计的原理及选型注意事项[J]. 仪器仪表用户, 2018, 4(25): 29-32.
- [4] 徐宏光, 陈梅. 科里奥利质量流量计用于油品动态计量时油量计算方法研究[J]. 计量技术, 2017(6): 34-36.
- [5] DARIDON J L, BAZILE J P. Computation of liquid isothermal compressibility from density measurements: An application to toluene[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2018, 63(6): 2162-2178.
- [6] 周鸿刚, 陆蓉. U型管振动法测定石油产品密度的应用[J]. 石油化工应用, 2019, 11(38): 115-118.
- [7] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 数字密度计测试液体密度、相对密度和API比重的实验方法: GB/T 29617-2013[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [8] 李火云, 朱秋平, 增兰花, 等. 振荡型密度计法测定药物相对密度的探讨[J]. 中国药品标准, 2020, 21(6): 571-575.
- [9] 江巍. 振荡管法测量物质密度[J]. 科技资讯, 2011(4): 1-2.
- [10] 宫兆隆, 宋洁, 魏凯. 便携式数字液体密度计不确定度分析[J]. 工业计量, 2018(增刊1): 68-70.
- [11] 华毅超, 唐美华, 陈国松. 连续流动快速分析仪测定食品中的蛋白质[J]. 化学分析计量, 2019, 28(5): 10-13.
- [12] 郝晨新, 马德起, 石岩. U型振动管测定原油密度的影响因素[J]. 理化检验-物理分册, 2016, 4(52): 253-25.
- [13] 王文祥, 唐玉华. 振荡管式密度计测量精度的影响因素分析[J]. 分析仪器, 2020(1): 64-66.

(上接第28页)

- [7] HOGAN T F, LIU M, RIDOUT J A, et al. The Navy global environmental model[J]. Oceanography, 2014, 27(3): 116-125.
- [8] 王辉, 万莉颖, 秦英豪, 等. 中国全球业务化海洋学预报系统的发展和应用[J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1090-1104.
- [9] 郑沛楠, 宋军, 张芳苒, 等. 常用海洋数值模式简介[J]. 海洋预报, 2008, 25(4): 108-120.
- [10] 吴海燕, 李崇银. 热带太平洋-印度洋海温异常综合模的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(6): 567-586.
- [11] 梅勇, 宋帅, 周林. 北印度洋-南海海域海浪场、风场的年际变化特征分析[J]. 海洋预报, 2010, 27(5): 27-33.
- [12] 索夏寒. 印度洋区域海浪的数值模拟及涌浪传播耗散特性的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [13] 万荣强, 魏泽勋, 高秀敏, 等. 北印度洋半日潮波的数值模拟研究[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(4): 562-573.
- [14] CHEN C, ROBERT C B, GEOFFREY C, et al. FVCOM User

Manual[M]. New Bedford, MA, USA: Marine Ecosystem Dynamics Modeling Laboratory, 2013: 3-19.

- [15] 冯士筌, 李凤歧, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 145-154.
- [16] 陈月娟, 周任君, 王雨, 等. 大气-海洋学概论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 74-96.
- [17] FOREMAN M G G. Manual for Tidal Currents Analysis and Prediction[M]. Sidney, B.C., Canada: Institute of Ocean Sciences, 2004.
- [18] CHEN C, ROBERT C B, GEOFFREY C, et al. FVCOM User Manual[M]. New Bedford, MA, USA: Marine Ecosystem Dynamics Modeling Laboratory, 2013: 65-67.
- [19] AMIDROR I. Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: A survey[J]. Journal of Electronic Imaging, 2002, 11(2): 157-176.