

比较振荡管法和比重瓶法测定 15 ~ 80 °C 原油 视密度换算标准密度的研究

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 100190)

摘要: 原油标准密度(20 °C)是原油理化指标中重要的一项。通过使用安东帕(Anton Paar)DMA™ 35 V4 Ex Petrol 防爆便携密度计等设备,对多个油田的油井采出液原油试样在 15 ~ 80 °C 时分别用比重瓶法、振荡管密度计法进行密度检测,绘制密度-温度曲线,推导和完善了经验公式,并给出了一个以测试密度和温度为参数的计算公式。将振荡管密度测试法与石油计量表联合求解原油标准密度,相对误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内,使在现场快速得到原油标准密度参数成为可能。

关键词: 计量学; 原油标准密度; 振荡管密度计; 防爆便携; 现场检测; 计算方法

中图分类号: TB933

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2022)05-0629-07

Study on the Determination of Apparent Density Conversion Standard Density of Crude Oil at 15 ~ 80 °C by Comparing Oscillating Tube and Pycnometer Method

HE Yun-teng, ZHANG Jian, LI Hua, LI Dong-hui, WU Ying-xiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Crude oil standard density (20 °C) is an important item in the physical and chemical indicators of crude oil. By using Anton Paar (Anton Paar) DMA™ 35 V4 Ex Petrol explosion-proof portable density meter and other equipment, the density of crude oil samples from oil wells in multiple oilfields were detected by pycnometer method and vibrating-tube densitometer method respectively at 15 ~ 80 °C, the density temperature curve was drawn, the empirical formula was deduced and improved, and a calculation formula with test density and temperature as parameters was given. The oscillating tube density test method and the petroleum meter were combined to calculate the crude oil standard density, and the relative error was controlled within $\pm 0.5\%$. It is possible to quickly obtain crude oil standard density parameters on-site.

Key words: metrology; crude oil standard density; vibrating-tube density meter; explosion-proof portable; on-site inspection; calculation method

1 引 言

我国的原油标准密度是指对原油试样进行排气、脱水等预处理后,在 20 °C, 101.325 kPa 条件下所测得的密度值,是石油行业从采油到炼化整个工艺体系中重要的参数指标。近年来国际上油藏开采向着页岩油等非常规油气储层迈进,许多相关的持续研究已经跟进,国外大量工作围绕高温高压的实际工况环境展开^[1-4],其测试数据则进一

步指导采油生产或炼化工艺参数的优化,而标准密度(或 API 重度)是衡量其测试精度的有效依据。国内对于原油密度测量的研究主要还是基于对生产井的单井计量,国际原油贸易结算等场景的参数需求,当然精度要求也在不断提高。目前主流原油密度检测方法有:玻璃管密度计法^[5]、比重瓶法^[6]和振荡管数字密度计法^[7,8]。由于玻璃管密度计法必须搭配石油计量表使用,且由于试验中包括人员读数、浮子倾斜角度、温度、黏度等多种不确定度的影响^[9,10],玻璃管密度计所测得

收稿日期: 2020-08-16; 修回日期: 2021-06-18

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 B 类(XDB22030000)

的数据,已经无法满足现场日益增长的精度需求,特别是在长期贸易关系中,各自检测人员所测数据的差值往往需要相关国家贸易委员会的正式会议才能评议,这也直接增加了大量的贸易成本^[11,12]。

比重瓶法的在恒温 20 °C 时的准确性是毋庸置疑的,但由于其对温度非常敏感^[13],作为测量基准的分析天平在布置和使用时也有一定的要求,为得到比较准确的数值,比重瓶法对试验人员的操作技术要求较高,且伴随大量的后期数据修正和处理。振荡管法测量物质密度的原理已有文献进行了论述^[14]。为了取得更高精度的检测结果,最新版密度仪具备在一定范围内自动修正黏度影响的功能,且台式密度计都配有精密恒温组件。近些年大量的研究人员使用振荡管密度仪对石油产品进行了测试,取得了较好结果^[15-18],也在不断改进振荡管测试方法的结构和条件^[19,20]。

随着技术的发展和更新,近年来以科里奥利力(Coriolis force,科氏力)质量流量计为代表的多种油气水多相流量计(MPFM)等应用于油田生产井监测的例子不断增多^[21,22]。但就相含率测试而言,综合密度分析法仍然是一种不可或缺的有效方案,工况条件下管道内油、气、水各相的密度都是不可缺少的重要参数^[23],仪表对于参数整定的精度要求高。而随着人工智能和算法的进一步发展,虚拟计量技术已经开始崭露头角,但其计量计算将完全依赖独立而庞大的参数数据库及相关算法,以保证相关测试数据的精密度^[24]。这些日益增长的现场需求,使就地取样快速检测密度参数成为必要的工作。

本文通过使用安东帕(Anton Paar)防爆便携密度计,测定了常压下,温度 15 ~ 80 °C 时多个油田油井采出液的原油试样的密度,绘制了温度-密度曲线。同时采用国家标准给出的比重瓶法测定了相同条件下的试样密度,对比 2 种方法与石油计量表转换的适用性。鉴于各国标准对原油标准密度的描述和相关方法的推荐,本文原油标准密度的测定值决定使用比重瓶法在 20 °C 时所测得的数据。

2 试验原油试样的准备

2.1 试验设备与试剂试样信息

2.1.1 试验设备与试剂

防爆便携密度计 DMATM 35 V4 Ex Petrol; 分析天平 BSA224S-CW; 流变仪 Rheo Stress 6000; 台式高速离心机 H1850; 低温恒温水浴槽 DC1030; 其余相关仪器或器件:FEP 离心管,分液漏斗,沥青比重瓶,

温度计,玻璃夹套,保温管等。石油醚:馏程 90 ~ 120 °C, A. R, 二甲苯:A. R, 无水乙醇:A. R, 超纯水: 试验室自制,铬酸洗液,复配的表面活性剂。

2.1.2 试样信息

试样信息如表 1 所示。通过 Rheo Stress 6000 流变仪检测了 50 °C 时(剪切速率为 275 s⁻¹),表 1 中 1,3,4,5 号试样的流变特性。在此温度下,试样都有较好的流动性。1 号试样的黏度曲线趋近于直线,可见其少量蜡质已完全溶解,试样趋于牛顿流体;试样 3 和 5 号呈现常见的剪切变稀现象,即随剪切速率的增加,动力黏度呈现明显的下降趋势^[25];试样 4 却出现了罕见的剪切变稠现象,推测可能的原因是此原油试样中含有的高分子压裂成分没有完全去除干净而导致的。试样流变学特性见图 1,图 2 所示。

表 1 试验试样基本信息

Tab. 1 Test sample information

编号	来源	采油工艺	动力黏度/Pa·s	备注
1	辽河油田	游梁式抽油机	0.010 6	含蜡量较少,融化后质地轻稀
2	辽河油田	注热水驱	此温度下试样为固体	沈阳采油厂代表性高凝油
3	新疆准东	皮带抽油机	0.046 7	质地稀薄,含气量较高
4	新疆准东	压裂自喷	0.073 9	致密油,含大量高分子压裂成分
5	渤海绥中	电潜泵抽取	2.310 4	海相稠油,黏度大

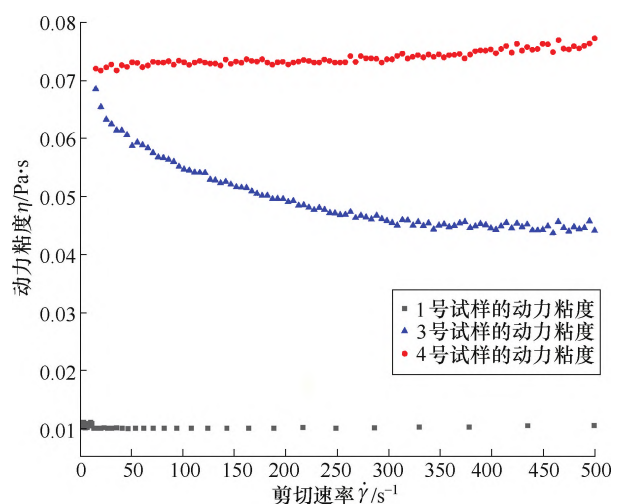


图 1 1,3,4 号试样在 50 °C 下原油黏度曲线

Fig. 1 Crude oil viscosity curve of samples 1,3,4 at 50 °C

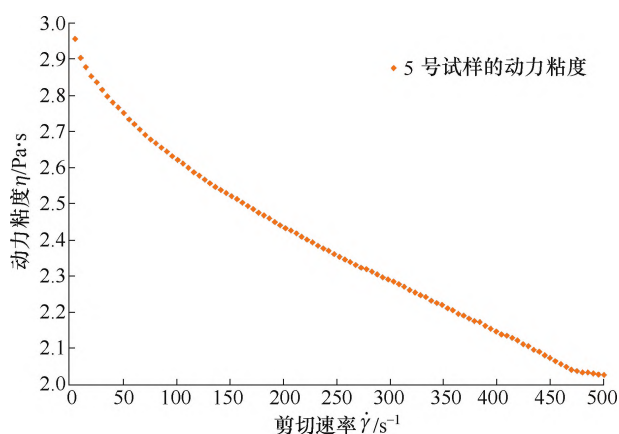


图2 5号试样在50℃下原油黏度曲线

Fig.2 Crude oil viscosity curve of sample 5 at 50 °C

2.2 试样前处理

2.2.1 井口采出液的取样

井口采出液试样按照 GB/T 4756-2015 要求在单井井口取样管处手工取样,采出液包含油、气、水三相^[26]。以 1 000 mL 容积高硼硅玻璃采样瓶为容器。原油试样在管道工况环境下的轻组分含量关系到原油密度测试的准确性,而 GB/T 4756-2015 中方法受限于现场环境和运输条件,轻组分会有一部分散失。轻组分的散失会造成所测密度增大,然而这在整个取样测试和制备试样的过程中是无法避免的^[27,28]。

2.2.2 原油试样的纯化

井口采出液需要进行分离纯化才能得到相对纯净的原油试样进行密度测试。本文使用加热-离心分离法:将井口采出液试样预热至可较好的流动,设定温度为 80 °C;将预热好的原油样本倒入离心管,并拧紧离心管盖,放入 80 °C 恒温水浴固定,持续保温;将装有试样的离心管放入离心机,设定转速 11 000 r/min,最大相对离心力 12 850g,持续离心 10 min;完成离心操作后,取出离心管,小心放回恒温水浴,固定,恒温 80 °C。重复前述步骤直至离心管内有水分界面不再有明显改变。

对于新疆准东油田的 4 号试样,由于采油工艺的特殊性,其在压裂过程中使用了大量含有高分子胶质成分的压裂液以及纳米乳化剂的应用,导致采出液中含有大量此类高分子成分,以上方法可以较好地去除这些杂质。

2.2.3 原油试样的匀化

采用加热-离心分离法制备原油试样有同相阶梯分布现象,高强度的离心操作虽然有利于油水混合物的两相分离,但不利于密度测试样本的均匀性。排除离心管内试样中的游离水,并冷冻干燥试样,再对原油试样进行密闭加热匀化,在匀化的同时应当

注意试样的保温,以保证其流动性,达到匀样的目的。本文采用保温“8”字摇样法^[29],将恒温中的试样离心管从水浴中取出,套上配套的保温套,摇样,持续 1 min;将试样从保温套中取出,放回恒温水浴,直至再次具有良好的流动性。重复前述步骤,直至摇样时间累计达到 5 min。手工匀样法国家标准并不推荐,但考虑在现场操作的可行性,且实践证明,手工“8”字摇样法”简便易行,完全可以保证匀样的效果。建议在现场测试时可以采用^[30]。

3 原油试样的密度测试试验

3.1 比重瓶法测定原油密度

首先根据 GB/T 13377-2010 的内容对样品进行比重瓶法密度测试试验。为降低低于室温条件下测定的冷凝水误差,拆下了分析天平的防风罩并安装水浴环空套。环空套不与称量盘有任何接触,环空套底部垫入适量的吸水纸,用于吸收夹套内壁流下的冷凝水。分析天平环空夹套,比重瓶恒温槽,通过三通阀与水浴恒温槽相连。适当直径的玻璃表面皿为上盖,减少空气流动造成的扰动误差。试验系统简图如图 3 所示。

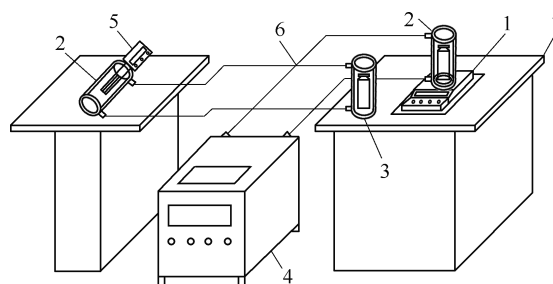


图3 密度测试试验系统

Fig.3 Density test experimental system

1-分析天平; 2-环空水浴夹套; 3-夹套水槽; 4-低温恒温槽;
5-振荡管密度计; 6-循环水浴管路; 7-抗振天平台

图 3 中环空水浴夹套(部件 2)在比重瓶法检测时提供相对稳定的低于室内温度的环境,尽可能的去除了空气冷凝水对此温度下的数据干扰,并抑制了室温造成比重瓶内介质的热膨胀现象,从而减小了下次检测的物料损失误差。同时环空水浴夹套能够在振荡管密度计检测试样时提供低于室温温度的外环境,用以测定设置温度下的密度。比重瓶法测定结果曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出在不经人工修正方法修正的密度测试结果在 30 °C 左右出现了拐点,国家标准 GB/T 13377-2010 中也明确表示如果测试温度与比重瓶标定温度不一致,则需进行相应的校准和修正。参数繁多,计算过程繁琐。1 号、2 号试样在

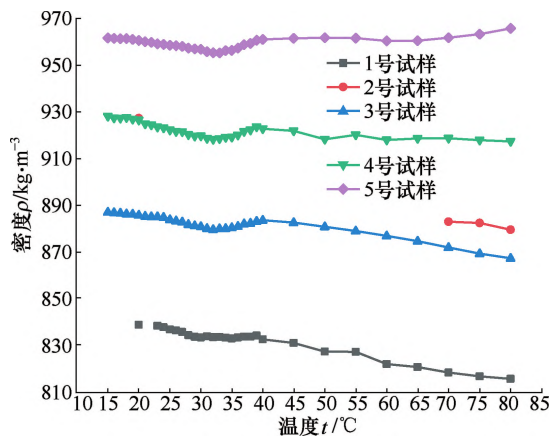


图4 比重瓶法测定的原油密度

Fig. 4 Crude oil density measured by pycnometer method

20 °C 时为固体,所以计算公式与其余温度下液体试样不一致,结果相对独立存在。

在较高温度下,以比重瓶测定纯水质量时,比重瓶内水的蒸发和水浴中水的蒸发冷凝过程都为以后计算带了不可修正的误差,试验中测定的附温满水比重瓶质量,如图5所示。

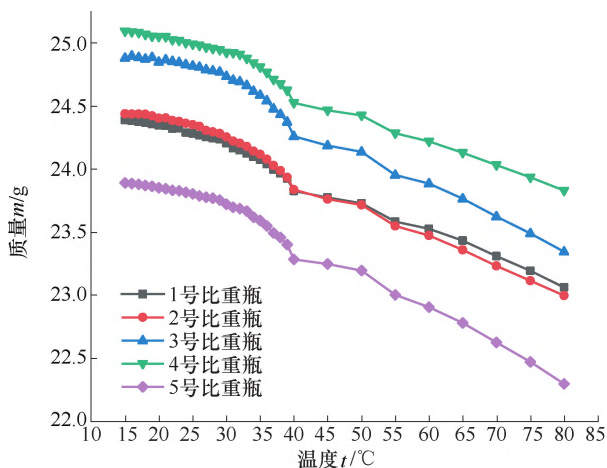


图5 测定的附温满水比重瓶质量

Fig. 5 Measured mass of full water pycnometer with temperature

由图5可以看出,在40 °C时比重瓶的满水质量变化趋势出现了明显的改变,而测定原油时这种高黏度试样时,一般只能选择广口比重瓶,由于没有防护帽或膨胀室,这种误差的引入更加明显。

3.2 振荡管法测定原油密度

参考 GB/T 29617-2013 和 ASTM D7777-3 (2018)e1 的内容对样品进行振荡管法密度测试试验。测试试验系统如图3所示。使用便携振荡管数字密度计,由于此型号便携密度计设计初衷就是为石油及石油化工行业在现场使用,需要考虑危险作业环境的防爆要求,所以并不能像实验室台式密度计那样集成温度控制元件。虽然产品手册中标注了

进样温度为100 °C,但有效的密度检测置信区间为0~40 °C。测量池的材质为硼硅玻璃,与密度计,比重瓶法所使用的玻璃材质相同。

现场油井采出液的温度分布广泛,从产生凝析油的低温井,海相油田的高产中温井,到采用蒸汽辅助重力泄油(steam assisted gravity drainage, SAGD)技术开采的超高温井^[31],大量温度不一的油井采出液,导致现场取样及化验的复杂性。为了验证在自然冷却条件下振荡管式密度计检测原油密度的可行性和精度,本次试验将原油恒温水浴至80 °C,并吸入预热的便携密度计检测管,并等待自然冷却。得到密度-温度趋势,如图6所示。

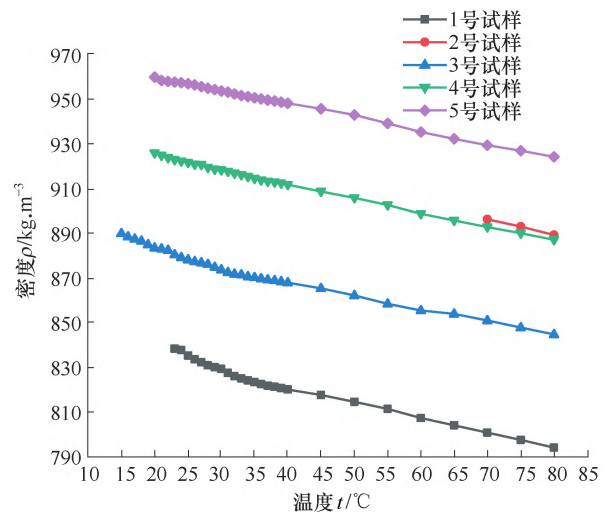


图6 原油试样的密度-温度曲线(振荡管法)

Fig. 6 Density-temperature curve of crude oil sample (oscillating tube method)

低于室温的数据点由前述试验系统中的环空水浴夹套提供恒温场进行测试。其中试样1在23 °C以下,试样4,5在20 °C以下,试样3在15 °C以下时,便携密度仪显示振荡管无振荡,终止试验。试样2在进入振荡管密度计后,仅提供了70,75,80 °C的密度数据后,也提示振荡管无振荡,无法测定密度。其中试样1,3,4,5,通过手动泵使用石油醚清洗时,可以快速地将试样冲洗出样品池;而试样2在清洗时发现已经完全凝固在样品池内,石油醚无法对其进行渗透和剥离。使用调温热风枪,控制热风输出温度为80 °C,对样品池进行热风处理,使用手动泵以石油醚为载体将融化的试样2洗出,并多次用石油醚,无水乙醇清洗,将样品池洗净。

4 密度数据处理

使用防爆便携密度仪的需求非常明确,即在油田井口现场取得单井采出液试样后,进行简单的初步处理纯化原油试样,并快速检测其密度值并同步

给出温度数据。此处通过套用 GB/T 1885-1998 即可查表转化得到此试样的 20℃ 标准密度^[32]。但原油计量表的功能如前文所述,且纸质资料厚重,使用也比较繁琐。沈文敏等以石油计量表为参考依据,结合迭代算法,excel 软件,实现了石油和石油产品密度、体积修正系数的高精度自动换算^[33]。刘林通过多次试验与数据分析,总结了一套半经验公式,从而通过温度参数,当前温度下测定的密度值,方便快速地换算出 20℃ 时的标准密度^[34]。考虑现场人员使用的难易程度和计算公式的复杂性,本文使用文

献[34]述的公式:

$$\rho_{20} = \rho_t + (1.35998 - 0.00081\rho_t)(t - 20) - k\rho_t \quad (1)$$

式中: ρ_{20} 为油品的标准密度, kg/m^3 ; ρ_t 为测试油品的密度读数, kg/m^3 ; t 为油品测试时的温度, $^\circ\text{C}$, $15^\circ\text{C} \leq t \leq 80^\circ\text{C}$; k 为修正系数。式(1)由经典的库沙柯夫公式改进得到^[35]。其中修正系数 k 与试验温度有关,通过多项式拟合原文相关数据及试验数据,得到:

$$k = \frac{-2.896 \times 10^{-5}t^3 + 7.1 \times 10^{-3} \times t^2 - 0.66159 \times t + 10.66295}{10000} \quad (2)$$

将式(1)和式(2)联立得到:

$$\rho_{20} = \rho_t(1.0172663 - 7.4384 \times 10^{-4} \times t - 7.1 \times 10^{-7} \times t^2 + 2.896 \times 10^{-9} \times t^3) + 1.35998t - 27.1996 \quad (3)$$

5 误差分析

通过试验发现在 20℃ 的情况下,比重瓶法测得的原油密度值无疑是准确的, DMA™ 35 V4 Ex Petrol 测得的值与其非常接近,但随着温度的变化,两种方法得到的原始数据出现了明显的差别。为了验证两种方法的准确性,根据式(3),计算并对比了所测试验数据点换算到 20℃ 标准状态下的值 ρ_{20} 与比重瓶法在 20℃ 下测得的标准密度值 $\rho_{s,20}$ 的相对误差。如图 7,图 8 所示。

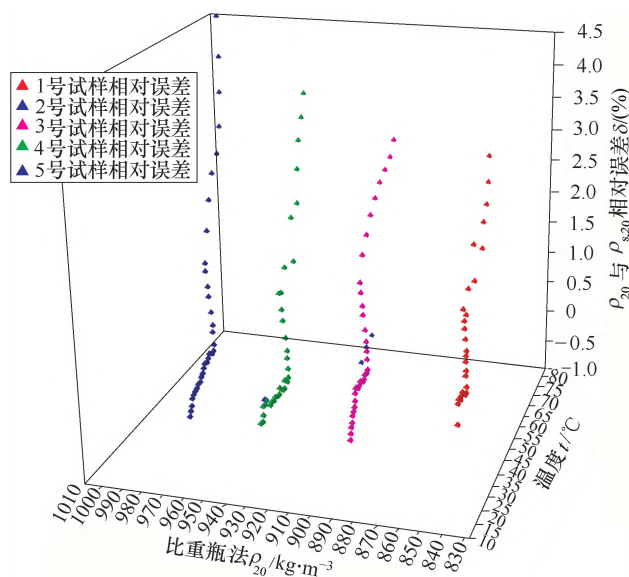


图 8 比重瓶法实测密度计算标准密度误差图

Fig. 8 The standard density error graph of the measured density calculated by the pycnometer method

$$\delta = \frac{\rho_{20} - \rho_{s,20}}{\rho_{s,20}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: δ 为相对误差, %; $\rho_{s,20}$ 为比重瓶法在 20℃ 时所测得的此试样密度, kg/m^3 ; ρ_{20} 为在不同温度下 2 种密度检测法得到的密度值以式(3)换算成 20℃ 下的标准密度值, kg/m^3 。

从图 7 和图 8 中可以很明显的发现,振荡管密度检测法所得的所有数据在换算成标准密度时,与比重瓶法测得的标准密度值之间的相对误差在 $\pm 0.5\%$ 之间;而通过比重瓶所得的数据在换算成标准密度时,随检测温度的上升而上升,特别是在 40℃ 以上的试样测试中,最大误差甚至达到了 4.5%。可见此方法以后期计算修正控制检测误差,对高温试样检测的准确性起到了越来越重要的作用,而高温条件下的误差很可能源于比重瓶自身材质的体积变化,高温水浴使比重瓶中超纯水加速挥发而导致。

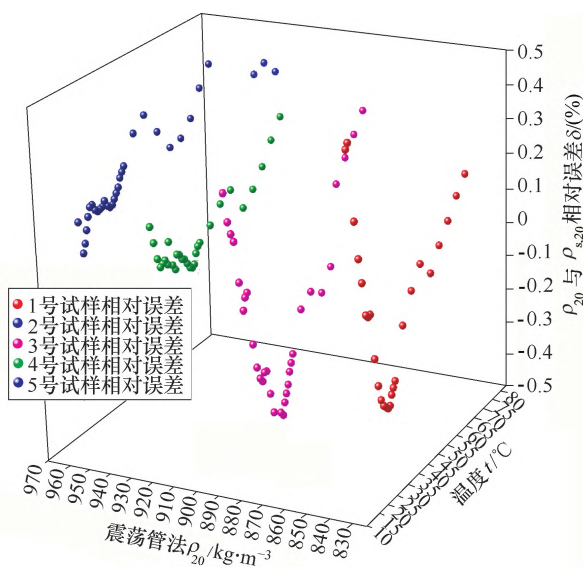


图 7 振荡管法实测密度计算标准密度误差图

Fig. 7 The standard density error graph of the measured density calculated by the oscillatory tube method

试样标准密度值与比重瓶法在 20℃ 下测得的密度值间的相对误差为:

6 结 论

1) 振荡管法测试原油密度,已完全数字化,校准与维护方便,并可自动进行黏度修正,一般无需试验人员干预,高温进样后的在环境温度下的自降温测定值与使用石油计量表拟合标准密度时比较理想,推测可能原油计量表对玻璃管密度计修正的依据也是试样的黏度。防爆便携密度计不仅所需试样量很少,而且可以在现场危险环境下使用,使现场就地取样检测具备了可行性。但振荡管测试无法检测凝固的试验试样,并难于清洗,测试前应了解油井原油凝点等参数信息。

2) GB/T 1885-98 的修正内容及参数,应仅配套适用于 GB/T 1884-2000。公式(3)所述计算方法也仅在作者所持有的所有原油试样测试中取得了较好效果。所以此方法目前仅推荐作为现场快速整定原油标准密度参数的参考依据之用,如果有条件还是应该以国标法进行精密测定。最新的 ASTM D1250 19e1 标准,在原有的温度修正基础上,还对试样检测时的压力影响进行了修正^[36],进一步提高了密度转换的精度。

3) 比重瓶法测试原油密度,在 20 °C 下测定的标准密度是准确的,但在高温条件下无法较好地与原油计量表拟合,证明其误差来源与玻璃管密度计不存在相似性。而此方法在使用环境要求,试样用量等因素的制约下,也限制其在现场的可用性。对于在高温下黏度较高的试样测试中,建议对于 GB/T 13377-2010 所推荐的 C 型广口比重瓶也应附加防护帽,以减少在恒温过程中,比重瓶内超纯水的损失;并将恒温水浴替换成适合的金属浴,消除高温水浴对试验引入的误差,以提高比重瓶水值的检测精度。

[参 考 文 献]

- [1] Baird Z S, Uusi-Kyyny P, Järvi O, *et al.* Temperature and Pressure Dependence of Density of a Shale Oil and Derived Thermodynamic Properties [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57 (14), 5128 - 5135.
- [2] Corraera S, Merlini M, Di Lullo A, *et al.* Estimation of the Solvent Power of Crude Oil from Density and Viscosity Measurements [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(24), 9307 - 9315.
- [3] Mendoza de la Cruz José L, Cedillo-Ramírez J C, Aguirre-Gutiérrez Adriana de J, *et al.* Incompatibility Determination of Crude Oil Blends from Experimental Viscosity and Density Data [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29 (2), 480 - 487.
- [4] Regueira V B, Pereira V J, Costa G M N, *et al.* Improvement of the Expanded Fluid Viscosity Model for Crude Oils: Effects of the Plus-Fraction Characterization Method and Density [J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32 (2), 1624 - 1633.
- [5] GB/T 1884 - 2000 原油和液体石油产品密度实验室测定法(密度计法)[S]. 2000.
- [6] GB/T 13377 - 2010 原油和液体或固体石油产品 密度或相对密度的测定 毛细管塞比重瓶和带刻度双毛细管比重瓶法[S]. 2010.
- [7] GB/T 29617 - 2013 数字密度计测试液体密度、相对密度和 API 比重的试验方法[S]. 2013.
- [8] ASTM D7777 - 13 (2018) e1 Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Liquid Petroleum by Portable Digital Density Meter [S].
- [9] 胡峰. 工作用密度计测量值的不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2015, 42(5): 86 - 87.
Hu F. The Uncertainty Evaluation for Working Glass Hydrometers [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2015, 42(5): 86 - 87.
- [10] 靳丹丹. 原油密度搅拌测温装置的设计研究[J]. 当代化工研究, 2018(11): 130 - 131.
Jin D D. Design and Research of Crude Oil Density Stirring Temperature Measuring Device [J]. *Chemical Intermediate*, 2018(11): 130 - 131.
- [11] 孔平, 田城, 孙延伟, 等. 进口俄罗斯原油密度检验的试验比对研究[J]. 检验检疫学刊, 2017, 27(5): 16 - 19.
Kong P, Tian C, Sun Y W, *et al.* Contrastive Study on the Experiment of Density in Crude Oil Imported from Russia [J]. *Journal of Inspection and Quarantine*, 2017, 27(5): 16 - 19.
- [12] 施盛林, 张达智, 崔立, 等. 原油贸易计量中净重量计算方法的差异分析[J]. 石油工业技术监督, 2020, 36(5): 48 - 50, 59.
Shi S L, Zhang D Z, Cui L, *et al.* Analysis on difference of net weight calculation methods in crude oil trade measurement [J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2020, 36(5): 48 - 50, 59.
- [13] 黄湘来, 赵珊红. 两种原油密度测量方法的比较试验[J]. 计量与测试技术, 2011, 38(5): 50 - 52.
Huang X L, Zhao S H. Two Methods for Measurement of Oil Density Test [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2011, 38(5): 50 - 52.
- [14] 江巍. 振荡管法测量物质密度[J]. 科技资讯, 2011 (4): 1 - 2.
- [15] 周鸿刚, 陆蓉. U 形管振动法测定石油产品密度的应用[J]. 石油化工应用, 2019, 38 (11): 115 - 118.
- [16] 宋昌盛, 徐磊, 唐亚丹, 等. 黏度对润滑油密度测定准确性的影响[J]. 润滑油, 2016(31)3: 39 - 41.
Song C S, Xu L, Tang Y D, *et al.* Effect of Viscosity

- on the Density Detection of Lubricating Oils [J]. *Lubricating Oil*, 2016 (31)3: 39-41.
- [17] 郝晨新, 马德起, 石岩. U形振动管阀测定原油密度的影响因素[J]. 理化检验-物理分册, 2016(52)4: 253-25.
- HAO C X, MA D Q, SHI Y. Influencing Factors for Determination of Crude Oil Density by U-shaped Vibrating Tube Method [J]. *Ptca (Part A: Phys. Test)*, 2016, 52 (4): 253-25.
- [18] 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.
- [19] 张竟月, 王金涛, 时文才, 等. 液体密度量传中大气压强影响的研究[J]. 计量学报, 2018, 39 (2): 192-196.
- Zhang J Y, Wang J T, Shi W C, et al. Study on the Influence of Ambient Pressure on Liquid Density Transmission [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39 (2): 192-196.
- [20] 韩立立, 曹旭, 王妍, 等. 支撑共振法测量液体密度的研究[J]. 计量学报, 2018, 39 (2): 197-200.
- Han L L, Cao X, Wang Q. Study on the Measurement of Liquid Density by Supporting Resonance Method [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 39 (2): 197-200.
- [21] 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.
- He Y T, Wu Q L, Chen S J, et al. Piston-type Oil-gas-water Multiphase Flowmeter with Constant Volume Tube [J]. *Well Testing*, 2019, 28(4): 45-50.
- [22] 吴东月. 基于 Coriolis 质量流量计和同轴电导传感器的含油率测量研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [23] 陈永新. 双能 γ 多相流量计计量误差原因分析与改善措施[J]. 中国海上油气, 2008, 20(2): 124-126.
- Chen Y X. Measuring Error Analysis and Improving Measurement about Dual Gamma Multiphase Flow Meter [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2008, 20(2): 124-126.
- [24] 尹丰. 水下井口计量方案研究[J]. 自动化应用, 2013(6): 1-2.
- [25] 程玉桥, 牛春荣, 苗得玉, 等. 胜利油区单家寺油田超稠油性质研究[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9 (4): 33-34.
- Cheng Y Q, Niu C R, Miao D Y, et al. Research on Property of Super Heavy Oil in Shanjiashi Oilfield of Shengli Petroliferous Province [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2002, 9 (4): 33-34.
- [26] GB/T 4756-2015 原油液体手工取样法[S]. 2015.
- [27] 周桂君. 稠油密度测定中存在的问题的探讨[J]. 工业计量, 2008, 18 (5): 55-57.
- Zhou G J. Discussion on the Problems Existing in the Determination of Density of Heavy Oil [J]. *Industrial Metrology*, 2008, 18 (5): 55-57.
- [28] 韩海外. 原油交接双方密度测定误差的原因分析[J]. 石化技术, 2019, 26(1): 2-4.
- Han H W. Discussion on the Reasons of Density Measurement Error Between Crude Oil Transition Parties [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2019, 26(1): 2-4.
- [29] 范玉华. 原油密度测定问题的研究分析[J]. 中国石油和化工标准与质, 2014(4): 255.
- [30] 朱晓强. 原油密度测定问题的分析[J]. 科学之友, 2011(21): 18-19.
- [31] 李苒, 陈掌星, 吴克柳, 等. 特超稠油 SAGD 高效开发技术研究综述[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(6): 729-741.
- Li R, Chen Z X, Wu K L, et al. Review on the effective recovery of SAGD production for extra and super heavy oil reservoirs [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2020, 50(6): 729-741.
- [32] GB/T 1885-1998 石油计量表[S]. 1998.
- [33] 沈文敏, 沈聪. 石油计量表自动计算的方法研究[J]. 石油工业技术监督, 2019, 35(8): 24-25, 28.
- Shen W M, Shen C. Research on Automatic Calculation Method of Petroleum Meter [J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2019, 35(8): 24-25, 28.
- [34] 刘林. 《石油计量表(原油部分)》中视密度与标准密度的换算[J]. 中国计量, 2005(7): 59.
- [35] 张宁, 张燕红, 李琼. 石油标准密度简便换算方法研究与实践[J]. 广州化工, 2020, 48 (3): 122-124.
- Zhang N, Zhang Y H, Li Q. Research and Practice on Simple Conversion Method of Standard Petroleum Density [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2020, 48 (3): 122-124.
- [36] ASTM D1250-19e1 Standard Guide for the Use of the Joint API and ASTM Adjunct for Temperature and Pressure Volume Correction Factors for Generalized Crude Oils, Refined Products, and Lubricating Oils: API MPMS Chapter 11. 1 [S].



第一作者: 何云腾(1989-), 北京人, 中国科学院力学研究所工程师, 从事多相流量计原型机的测试和参数整定研究工作。

Email: hyt@imech.ac.cn



通讯作者: 李东晖(1962-), 北京人, 中国科学院力学研究所高级工程师, 从事多相流量计的研发工作。

Email: donghui_li@imech.ac.cn