

# 致密储层样品体积测量对孔隙度误差的影响

陈思宇<sup>1,2,3</sup>, 田 华<sup>2,3</sup>, 柳少波<sup>3</sup>, 李才喜<sup>4</sup>, 郝加庆<sup>2,3</sup>, 郑永平<sup>2,3</sup>

(1. 中国农业大学, 北京 100083; 2. 中国石油天然气集团公司 盆地构造与油气成藏重点实验室, 北京 100083;  
3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 北京信桥恒达环保股份有限公司, 北京 100080)

**摘要:**非常规油气致密储层孔隙度较低, 一般小于 10%, 页岩储层甚至小于 5%, 常规方法对这类岩石样品孔隙度测定误差近来受到关注。针对常用的孔隙度测量方法(氦气注入法), 对致密储层和常规储层样品建立了孔隙度测量误差计算数学模型, 统计样品体积测量的误差来源和误差限, 结合数学模型和统计结果, 确定孔隙度误差限。研究得出以下结论: ①采用游标卡尺测量的致密储层孔隙度绝对偏差为 0.59%~2.47%, 高精度三维扫描方法孔隙度测量绝对偏差可以减小到 0.38%~1.04%, 与常规储层不同, 致密储层需提高孔隙度测试精度并进行误差分析; ②不同精度的测量方法均很难达到行业标准规定(孔隙度绝对偏差小于 0.5%), 建议将孔隙度误差质量控制标准降低, 即孔隙度绝对偏差放宽到小于 1%, 并给出了相应的体积测量误差要求; ③孔隙度测量误差与样品长度成反比, 为了提高测量精度, 样品长度应尽量大于 3 cm。

**关键词:** 孔隙度; 误差限; 致密储层; 非常规油气

中图分类号: TE122.23

文献标识码: A

## Influence of bulk volume measurement on porosity error in tight reservoir core plug analysis

Chen Siyu<sup>1,2,3</sup>, Tian Hua<sup>2,3</sup>, Liu Shaobo<sup>3</sup>, Li Caixi<sup>4</sup>, Hao Jiaqing<sup>2,3</sup>, Zheng Yongping<sup>2,3</sup>

(1. China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Basin Structure and Hydrocarbon Accumulation, CNPC, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 4. Beijing Bridge Information Ltd, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Unconventional tight reservoir has a low porosity, which is usually less than 10%, while that of shale reservoir is even less than 5%. The porosity test error of helium injection method has been considered. A mathematical model is established for the error of porosity determination and the statistical data of source and error limit was obtained for volume measurement. (1) The error limit of porosity determination of tight reservoir using vernier caliper is 0.59%–2.47%, while that can be reduced to 0.38%–1.04% by using a high-precision 3D laser scanner. Different from conventional reservoirs, the porosity measurement accuracy of tight reservoir should be improved and analyzed. (2) The accuracy of all porosity determination methods cannot reach the industry standard (<0.5%), so a new standard is suggested that reducing the error limit standard (i.e. <1%). The demand of volume measurement was made based on the new standard. (3) An inverse proportion is found between porosity error and core plug length, so sample length should be longer than 3 cm to reduce porosity error.

**Key words:** porosity; error limit; tight reservoir; unconventional petroleum

近年来,非常规油气的勘探开发成为全球油气勘探开发的热点,致密储层成为勘探开发的主要对象<sup>[1-2]</sup>。与常规储层相比,致密储层中存在大量纳米级孔隙,孔喉结构复杂,其突出的特点是孔隙度低,一般小于 10%,页岩储层甚至小于 5%<sup>[3-4]</sup>。如何进行致密储层孔隙度准确测量成为一个重要的问题。

针对致密储层目前发展了一些新技术,如聚焦

离子束—扫描电子显微镜法、显微 CT 法、核磁共振法、高压压汞法和气体吸附等温线法等<sup>[5-11]</sup>,这些方法存在样品代表性差、孔隙连通性不明确、测量时间较长、费用昂贵等问题,仅能针对微观孔隙结构等进行特殊的精细研究,工业应用不普遍。氦气注入法是目前实验室进行致密储层孔隙度测量最常用的方法,即通过在样品孔隙内部注入小分

收稿日期: 2016-06-17; 修订日期: 2016-10-20。

作者简介: 陈思宇(1995—),女,数学与应用数学专业。E-mail: 398018114@qq.com。

通信作者: 柳少波(1967—),男,教授级高级工程师,从事油气成藏研究。E-mail: lsb@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技攻关项目(2014A-0214, 2014E-3209)和国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ17046305)资助。

子量的氦气,根据波义尔定律来测量孔隙体积。该方法操作简单、快速,成本低。

石油天然气行业标准规定孔隙度绝对偏差小于0.5%<sup>[12]</sup>,但在致密储层中,由于孔隙度测量难度增大,导致误差可能增大,但是超出标准误差的程度并不清楚,没有定量评价依据。因此,如果不进行孔隙度误差的探讨,会增大有利区评价的风险,降低油气储量计算的准确性。孔隙度测量结果受到样品体积测量、压力表精确度、仪器空白体积、仪器气密性、温度变化等多种因素的影响,其中,样品体积测量因素影响较大且容易被忽略。本文针对该因素进行数学统计分析,建立孔隙度测量误差的数学模型,分析样品体积测量的误差来源,对不同长度和不同孔隙度大小的样品误差范围进行讨论,提出针对致密储层的孔隙度误差新标准。

## 1 氦气注入法孔隙度测量方法

利用氦气注入法测量岩石孔隙度的基本原理是:在参考室输入一定压力的氦气,打开参考室与样品室的阀门,参考室气体向装有已知体积样品的样品室充注,测量平衡后的压力,根据气体压力变化可测出样品孔隙体积,进而计算孔隙度(图1)<sup>[13-17]</sup>。对样品孔隙度测量的具体步骤如下:

(1)用游标卡尺分别测量岩心的直径 $D$ 和长度 $L$ ,计算得到样品的总体积( $V_y$ )为:

$$V_y = \pi D^2 L / 4 \quad (1)$$

(2)将参考室、样品室和管线的气体排空,在样品室放满标准块,测量参考室体积 $V_1$ 和样品室体积 $V_2$ ;

(3)将岩心放入岩心室,记录取出标准块的体积 $V_{b0}$ ,关闭进气阀门1、岩心室阀门2、排空阀门3;

(4)打开进气阀门1,向参考室注气,初始压力在0.1~0.9 MPa之间,关闭进气阀门1,等压力表

稳定后读参考室气体平衡时的压强 $P_c$ 和样品室气体平衡时的压强 $P_y$ ;

(5)打开样品室阀门2,到达一定压力后,关闭样品室阀门2,稳定后并记录样品室气体平衡时的压强 $P_{cy}$ ;

(6)打开排空阀门3进行放空,实验结束。假设样品体积为 $V_y$ ,样品孔隙体积为 $V_k$ ,由理想气体状态方程可得:

$$\begin{aligned} P_c V_1 + P_y (V_2 + V_{b0} - V_y + V_k) = \\ P_{cy} (V_1 + V_2 + V_{b0} - V_y + V_k) \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)计算样品的孔隙体积 $V_k$ :

$$V_k = \frac{V_1 (P_c - P_{cy})}{P_{cy} - P_y} - V_2 - V_{b0} + V_y \quad (3)$$

根据样品孔隙度定义:

$$\varphi = \frac{V_k}{V_y} \times 100\% \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得样品的孔隙度:

$$\varphi = \left( \frac{V_1 \left( \frac{P_c - P_{cy}}{P_{cy} - P_y} - V_2 - V_{b0} \right)}{V_y} + 1 \right) \times 100\% \quad (5)$$

## 2 样品体积测量误差对孔隙度的影响

孔隙度结果受到样品体积测量误差的影响,实验发现,针对同一样品的多次体积重复测定存在一定的误差。虽然样品体积测量误差绝对值较小,但是对孔隙度测量结果的影响较大,特别是致密储层属于低孔范围,孔隙度本身很低,更容易受到测量误差的影响。如绝对孔隙度5%的样品,如果绝对测量偏差在1%,其相对误差就可以达到20%,对实际的科研和生产工作带来很大的不确定性。为了定量确定样品体积测量误差对孔隙度的影响,建立了孔隙度误差的定量数学模型。

按照测量的精确程度,讨论了3种不同样品体积测量方式,并分别确定了测量误差的主要来源,并统计了实际操作过程中不同情况下样品体积的误差范围。将统计结果与数学模型结合,计算了不同条件下孔隙度的理论误差限<sup>[18]</sup>。

### 2.1 建立数学模型

孔隙度 $\varphi$ 关于样品体积 $V_y$ 的误差限:

$$\varepsilon(\varphi^*) = \left| \left( \frac{\partial \varphi}{\partial V_y} \right)^* \right| \times \varepsilon(V_y^*) \quad (6)$$

利用样品直径 $D$ ,样品长度 $L$ 这2个变量表示样品

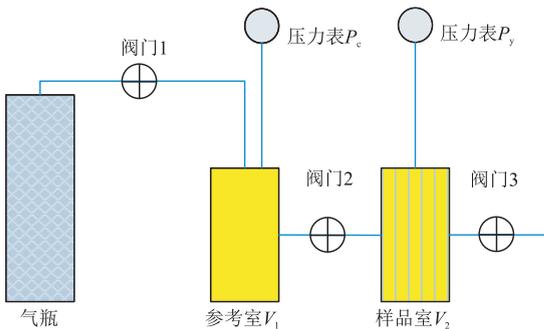


图1 氦气注入法孔隙度测量示意

Fig.1 Schematic diagram of porosity determination using helium injection method

体积  $V_y$  的误差限:

$$\varepsilon(V_y^*) \approx \left| \left( \frac{\partial V_y}{\partial D} \right)^* \right| \times \varepsilon(D^*) + \left| \left( \frac{\partial V_y}{\partial L} \right)^* \right| \times \varepsilon(L^*) \quad (7)$$

$\varphi$  对  $V_y$  求偏导:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial V_y} = \frac{-[V_1 \frac{(P_c - P_{cy})}{(P_{cy} - P_y)} - V_2 - V_{l0}]}{(V_y)^2} \quad (8)$$

$V_y$  分别对  $D$  和  $L$  求偏导:

$$\frac{\partial V_y}{\partial D} = \frac{\pi DL}{2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial L} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (10)$$

把公式(7)~(10) 代入公式(6), 可得孔隙度的误差限为:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\varphi^*) &\approx \left| \frac{-\left( V_1 \frac{(P_c - P_{cy})}{(P_{cy} - P_y)} - V_2 - V_{l0} \right)}{(V_y)^2} \right| \times \\ &\quad \left[ \frac{\pi DL}{2} \times \varepsilon(D^*) + \frac{\pi D^2}{4} \times \varepsilon(L^*) \right] \\ &= \left| \frac{-\left( V_1 \frac{(P_c - P_{cy})}{(P_{cy} - P_y)} - V_2 - V_{l0} \right)}{\left( \frac{\pi D^2 L}{4} \right)^2} \right| \times \left[ \frac{\pi DL}{2} \times \varepsilon(D^*) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\pi D^2}{4} \times \varepsilon(L^*) \right] \\ &= \left| \frac{-8 \left( V_1 \frac{(P_c - P_{cy})}{(P_{cy} - P_y)} - V_2 - V_{l0} \right)}{\pi L D^3} \right| \times \varepsilon(D^*) + \\ &\quad \left| \frac{-4 \left( V_1 \frac{(P_c - P_{cy})}{(P_{cy} - P_y)} - V_2 - V_{l0} \right)}{\pi L^2 D^2} \right| \times \varepsilon(L^*) \quad (11) \end{aligned}$$

式中: $\varepsilon(\varphi^*)$  为孔隙度的误差限; $\varepsilon(V_y^*)$  为样品体积的误差限; $\varepsilon(D^*)$  为样品直径的误差限; $\varepsilon(L^*)$  为样品长度的误差限; $( )^*$  为“( )”中测量数据的近似值。

### 2.2 不同测量方式的样品体积测量误差限

在孔隙度测量过程中,样品体积测量通常采用游标卡尺进行。由于不同样品的制样精度不同,不同实验室条件不同,不同实验员操作也存在差别,所以样品体积测量误差按照精确程度分为3种情况进行统计。(1)一般情况的游标卡尺测量。该方法精度最低,考虑了样品制样和实验员操作的误

差,最接近实际情况。(2)理想情况的游标卡尺测量。该方法精度是采用游标卡尺的最精确情况,仅考虑了游标卡尺的理论误差和样品切割的仪器理论误差,实际情况很难达到。(3)高精度三维扫描。该方法突破了游标卡尺测量规则岩心柱样的局限,可以对样品不规则表面进行测量。下面对不同测量方式的样品体积误差限进行讨论。

#### 2.2.1 游标卡尺测量(一般情况)

使用游标卡尺测量样品体积,误差主要来源于3个方面。(1)测量仪器的精度。实验中我们采用的游标卡尺的误差限为0.02 mm<sup>[19]</sup>。(2)实验员人为操作时读数误差,游标卡尺的操作规范程度。(3)样品的制作过程。实际制样很难成为标准的圆柱体,会出现多种现象,如上下段面不平行,柱体高度不一致(图2a);柱面不直(图2b);样品柱面残缺、凹凸不平、有裂痕(图2c);上下端面凹凸不平(图2d)。在样品体积测量过程中将样品视为理想的圆柱体,由此带来一定的误差。

该情况误差来源较多,制样的精度不同,不同实验人员测定也存在差别,难以确定统一的误差限。参考中国石油天然气集团公司盆地构造与油气成藏重点实验室测定结果进行说明,样品长度和直径测量误差限采用统计方式得到,选取大量样品进行体积测量,统计其长度和直径的误差限。一般情况下制样得到的样品,其长度误差较直径误差相比更大。长度的误差限为0.025 cm(即  $\varepsilon(L^*) = 0.025$  cm),直径的误差限为0.013 cm(即  $\varepsilon(D^*) = 0.013$  cm)。取最普遍使用的样品直径  $D = 2.54$  cm,样品长度  $L = 2.54$  cm,根据公式(7)、(9)、(10)得到样品体积的误差限为0.250 cm<sup>3</sup>。

#### 2.2.2 游标卡尺测量(理想情况)

在理想情况下,采用严格制样方法,样本完好没有残缺,样品的直径均匀,无表面凹凸不平现象,不考虑人为测量误差。仅在游标卡尺测量和样品切割

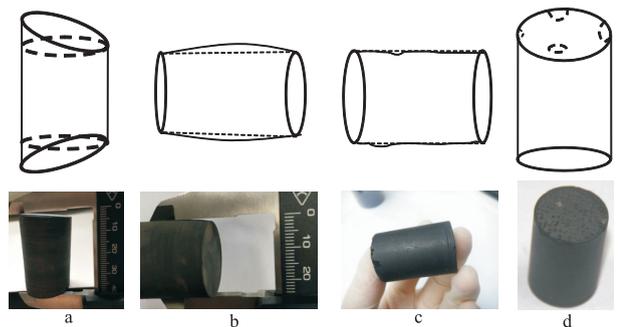


图2 岩石样品制样形状缺陷主要类型  
Fig.2 Main shape types of core plug sample cutting

过程中存在无法避免的仪器误差。游标卡尺的误差限为 0.002 cm。采用严格制样方法, 样品端面切割造成的长度误差限为 0.007 6 cm (0.003 in), 样品两端的总误差限为一端的两倍, 即为 0.015 cm (0.006 in), 切割后样品的直径误差限为 0.005 cm (0.002 in)。样品长度误差限为 0.017 cm (游标卡尺误差限与样品切割两端总误差限之和, 即  $\varepsilon(L^*) = 0.017$  cm), 直径总误差限为 0.007 cm (游标卡尺误差限与样品切割直径误差限之和, 即  $\varepsilon(D^*) = 0.007$  cm), 取最普遍使用的样品直径  $D = 2.54$  cm, 样品长度  $L = 2.54$  cm, 将数据代入公式 (7)、(9)、(10), 计算出样品体积的测量误差限为 0.182 cm<sup>3</sup>。

### 2.2.3 高精度三维扫描

三维激光扫描已经应用于不规则物体的体积测量<sup>[20-23]</sup>, 利用激光扫描仪对样品截面进行三维轮廓扫描, 进行三维重构得出样品的三维立体图像。采用同样原理, 本实验采用蓝光代替激光, 通过图像分析计算样品体积。该方法产生的体积测量误差与样品切割精度无关, 只与仪器本身的精度相关。经统计可得样品体积测量误差限为 0.105 cm<sup>3</sup> (表 1)。

### 2.3 样品体积测量误差与孔隙度误差的关系

为了研究样品体积测量误差对孔隙度误差的影响, 根据误差限统计结果 (表 2) 和已建立的数学模型 (公式 (11)), 进行理论分析。

氦气注入法孔隙度测量通常采用直径 2.54 cm 的样品, 根据采集原始样品大小不同、钻取难易程度不同, 岩心长度变化较大。目前的致密储层岩石钻取岩心难度较大, 尤其是致密页岩容易破碎, 长度较短。为了便于讨论, 选用长度为 2, 2.54, 3, 3.75, 5 cm 5 种情况进行分析 (表 2)。为了讨论致密储层岩石和常规储层岩石的区别, 将样品按照原始的真实孔隙度分 2 类: 孔隙度小于 10% 代表致密储层低孔隙度样品, 孔隙度为 10%~30% 代表常规储层高孔隙度样品。

样品体积 ( $V_y$ ) 测量误差变化可以导致孔隙度

表 2 不同测量方式测量不同长度样品的孔隙度误差限  
Table 2 Porosity error limit of samples of different length measured under different conditions %

测量方式	样品孔隙度	孔隙度误差				
		2 cm	2.54 cm	3 cm	3.75 cm	5 cm
游标卡尺 (一般情况)	1	2.47	1.94	1.65	1.32	0.99
	10	2.24	1.77	1.50	1.20	0.90
	30	1.76	1.39	1.17	0.94	0.70
游标卡尺 (理想情况)	1	1.63	1.28	1.09	0.87	0.65
	10	1.48	1.17	0.97	0.79	0.59
	30	1.16	0.92	0.76	0.62	0.47
高精度三维扫描	1	1.04	0.82	0.69	0.55	0.41
	10	0.94	0.74	0.63	0.50	0.38
	30	0.74	0.58	0.49	0.40	0.30

产生误差 (绝对偏差)。

$$k = \frac{\partial \varphi}{\partial V_y} = \frac{100[V_2 + V_{10} - V_1 \frac{P_{cy} - P_c}{P_y - P_{cy}}]}{V_y^2} \times \varepsilon(V_y^*) \quad (12)$$

$$k = \frac{100(1 - \varphi)}{V_y} \quad (13)$$

式中:  $k$  为图 3 中曲线的斜率, 即单位体积测量误差带来的孔隙度误差。

由式 (13) 可知, 由于测量体积的误差相对较小, 所以可以视为  $V_y$  测量误差与孔隙度误差呈正相关关系。根据公式 (13) 计算每条曲线的斜率, 作出图 3, 按孔隙度  $\varphi$  为 1%, 10%, 30% 这 3 种情况分别作图; 根据式 (1), 图 3 中不同长度  $L$  代表不同体积  $V_y$  的样品 (直径  $D$  取 2.54 cm)。

根据精确程度由低到高, 将样品体积测量方式分为 3 种: 一般情况的游标卡尺测量、理想情况的游标卡尺测量和高精度三维扫描 (表 1)。对比了致密储层和常规储层样品孔隙度在不同测量方式的误差限。

(1) 游标卡尺 (一般情况)。致密储层 (孔隙度小于 10%) 比常规储层 (10%~30%) 样品测试误差增大, 随着样品真实孔隙度降低, 孔隙度误差增大, 常规储层孔隙度误差为 0.70%~2.24%, 而致密储层增大到 0.90%~2.47%。以 3 cm 长度样品为例, 真实孔隙度为 30%, 10%, 1% 的样品, 孔隙度绝对

表 1 不同测量方式样品体积测量的误差限

Table 1 Error limit of core plug bulk volume under different measurement conditions

测量方式	测量误差限			来源
	体积/cm <sup>3</sup>	长度/cm	直径/cm	
游标卡尺 (一般情况)	0.250	0.025	0.013	一般制样、仪器和人为误差
游标卡尺 (理想情况)	0.182	0.017	0.007	理想制样、仪器误差
高精度三维扫描	0.105			仪器误差

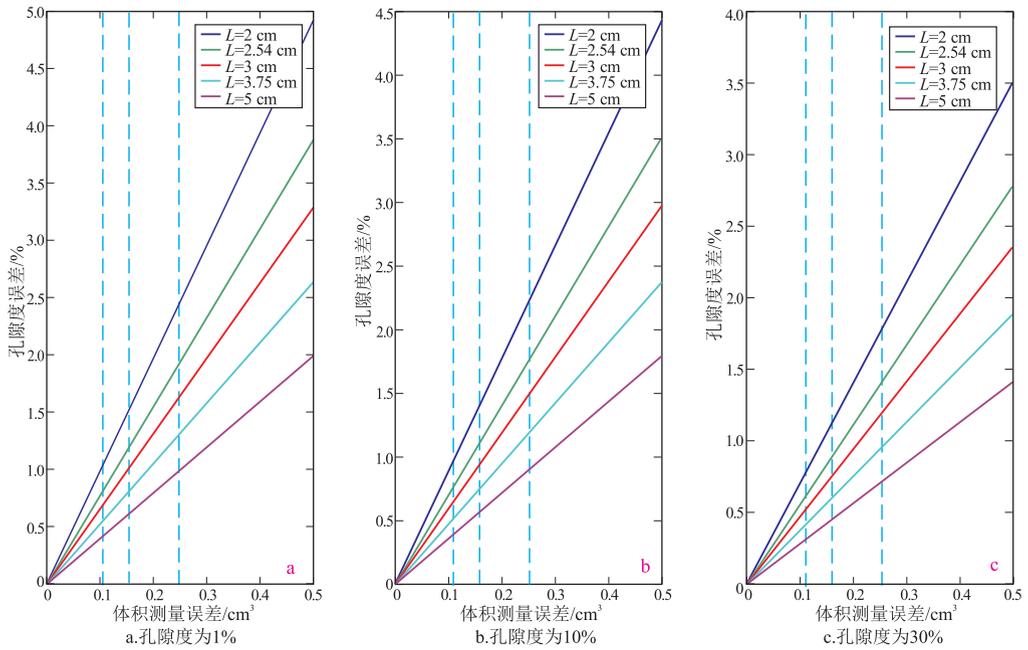


图3 不同样品长度(直径为2.54cm)样品体积误差与孔隙度误差的关系

图中3条虚线分别为体积测量误差为0.105,0.182,0.250 cm<sup>3</sup>的参考线。

Fig.3 Relationship between bulk volume and core plug porosity determination error (sample of different length and same diameter of 2.54 cm)

偏差逐渐增大,分别为1.17%,1.50%,1.65%,相对误差分别为3.9%,15%,165%。说明随着样品致密程度增强,测试难度增大。

(2)游标卡尺(理想情况)。该方法比一般情况的游标卡尺测量孔隙度误差降低,样品的孔隙度误差限为0.47%~1.63%,致密储层和常规储层绝对偏差分别为0.59%~1.63%和0.47%~1.48%,致密储层的相对误差可达14.8%~163%。

(3)高精度三维扫描。该方法测试精度最高,比游标卡尺测量孔隙度误差降低,样品的孔隙度误差限为0.30%~1.04%,致密储层和常规储层误差分别为0.38%~1.04%和0.30%~0.94%。致密储层的相对误差9.4%~104%。

### 3 讨论与应用

#### 3.1 四川龙马溪页岩孔隙度测量误差分析

目前广泛应用的孔隙度测量方法,采用游标卡尺测量样品体积。该方法测量致密储层孔隙度误差较大,一般情况绝对偏差在0.90%~2.47%,理想条件也在0.59%~1.48%。在实际应用中如果不进行分析,会对研究结果造成较大影响。采用游标卡尺测量了四川盆地某井龙马溪组不同页岩孔隙度范围为1.22%~5.50%,平均3.95%,按照游标卡尺(一般情况)考虑误差分析可知(图4a,表2):龙马溪组页岩孔隙度绝对偏差在0.95%~2.37%,相

对误差最高可达60%。即使按照游标卡尺(理想情况)考虑孔隙度绝对偏差为0.62%~1.56%,相对误差最高可达39%(图4b,表2),即按照目前游标卡尺孔隙度测量的方法,孔隙度的相对误差可高达39%~60%,结果准确性较差。这增大了储量计算和资源量评价的风险,有必要开发精度更高的孔隙度测量方法,如高精度三维扫描方法,避免样品制样精度的影响,减小测量误差。

#### 3.2 样品长度对孔隙度测量误差的影响

通过图3a可以看出,孔隙度误差随样品体积测量误差线性增大,真实孔隙度为1%的样品,游标卡尺一般情况的最大体积测量误差为0.25 cm<sup>3</sup>时(表1),孔隙度绝对偏差可达1%~2.5%(相对误差可达100%~250%),且在体积测量误差一致的情况下,不同长度样品孔隙度变化不同,随样品长度增大,孔隙度误差降低;样品长度由2 cm增大到5 cm,孔隙度误差由2.5%降低至1%,比例可达150%,即长度越长的样品,体积越大,孔隙度误差较小。

随着真实孔隙度的增大,孔隙度的误差减小,在最大体积测量误差为0.25 cm<sup>3</sup>的情况下,2 cm长度的样品随着孔隙度由1%增大到20%,孔隙度误差由2.5%降低到1.8%,孔隙度绝对偏差降低0.4%。5 cm长度的样品随着样品孔隙度由1%增大到30%,孔隙度误差由1%降低到0.75%,孔隙度绝

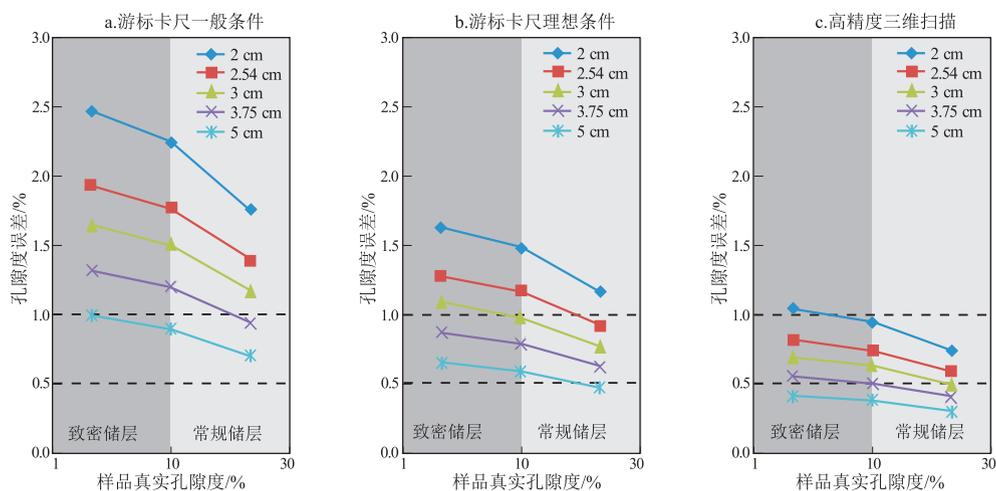


图4 致密储层和常规储层样品在不同测量方式和样品长度条件下的孔隙度误差限

Fig.4 Porosity error limits of tight and conventional reservoir samples of different length under different measurement conditions

对偏差降低 0.25%。对于同样长度的样品,致密储层孔隙度误差是常规储层的 1.4 倍,即低孔隙度的致密储层比高孔隙度的常规储层孔隙度误差增大,测试难度增大。与样品长度的影响相比,样品真实孔隙度造成的误差增大幅度不显著,最大孔隙度绝对偏差不会超过 0.7%。

### 3.3 致密储层孔隙度测定行业标准的讨论

从以上 3 种设定条件下孔隙度误差分析结果可以看出,游标卡尺一般情况测量条件下,样品的孔隙度误差范围为 0.70%~2.47%,即不论样品的长度和真实孔隙度大小,均大于 0.5% 的绝对偏差(图 4a),这不能满足现有的行业规范。游标卡尺理想测量条件下,除极特殊情况(样品长度大于 5 cm,真实孔隙度大于 30%),孔隙度绝对误差均大于 0.5% 的绝对偏差(图 4b),也不能满足现有的行业规范。高精度三维扫描测量条件下,长度大于 3.75 cm 样品能够达到 0.5% 的绝对偏差(图 4c)。

总体而言,致密储层和常规储层在目前测试条件均不能达到 0.5% 的绝对偏差,不能满足现有的行业规范,现有的行业标准质量控制偏高。采用游标卡尺的方法(一般情况和理想情况)仅能满足常规储层样品孔隙度误差限在 1% (绝对偏差),致密储层误差较大。高精度三维扫描精度较高,适用致密储层样品,可以使孔隙度测量误差降低,绝对偏差可控制在 1% 以内。建议将孔隙度误差质量控制标准降低,即孔隙度绝对偏差放宽到小于 1%。

## 4 结论

非常规油气已成为全球勘探开发的热点,致密储层孔隙度是影响非常规油气评价和选区的重要

参数。致密储层孔隙度小于 10%,部分页岩、碳酸盐岩、火山岩样品孔隙度甚至为 1%~2%,孔隙度测量偏差可达真实孔隙度的 100%~200%,误差值甚至超过了样品真实值。本文分析了致密储层孔隙度测量结果的误差,得到以下认识:

(1) 计算了致密储层和常规储层的孔隙度误差限,建立了误差分析定量图版。致密储层比常规储层误差偏大,其采用游标卡尺测量绝对偏差为 0.59%~2.47%,需要提高孔隙度测试精度并进行误差分析;高精度三维扫描方法孔隙度测量绝对偏差可以减小到 0.38%~1.04%,可以进一步研发和推广;

(2) 现有条件下,不同精确度的孔隙度测量方法均很难达到行业标准规定(孔隙度绝对偏差小于 0.5%),建议将孔隙度误差质量控制标准降低,即孔隙度绝对偏差放宽到小于 1%,并给出相应的体积测量误差要求;

(3) 孔隙度测量误差与样品长度成反比,为了提高测量精度,样品长度应尽量大于 3 cm。

致谢:感谢中国石油天然气集团公司盆地构造与油气成藏重点实验室及依托单位中国石油勘探开发研究院在实验仪器和样品方面提供的支持。

### 参考文献:

- [1] 匡立春,王霞田,郭旭光,等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油地质特征与勘探实践[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(6): 629-634. Kuang Lichun, Wang Xiatian, Guo Xuguang, et al. Geological characteristics and exploration practice of tight oil of Lucaogou Formation in Jimsar Sag [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(6): 629-634.
- [2] 汪少勇,王社教,李登华,等. 致密油地质风险分析方法与流程初探[J]. 特种油气藏, 2015, 22(3): 1-7.

- Wang Shaoyong, Wang Shejiao, Li Denghua, et al. Preliminary geology risk analysis and process in tight oil reservoir [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(3): 1-7.
- [3] 张月, 文慧俭, 白东来, 等. 松辽盆地大安油田纳米级孔隙隙研究 [J]. *断块油气田*, 2015, 22(4): 440-444.  
Zhang Yue, Wen Huijian, Bai Donglai, et al. Study on nanopore throat in Da'an Oilfield, Songliao Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2015, 22(4): 440-444.
- [4] 陈旋, 司学强, 刘书强, 等. 马朗凹陷沉凝灰岩致密储集层特征及主控因素 [J]. *特种油气藏*, 2015, 22(6): 40-44.  
Chen Xuan, Si Xueqiang, Liu Shuqiang, et al. Characteristics and main control factors of sedimentary tuff tight reservoirs in Malang Sag [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(6): 40-44.
- [5] 郝情情, 孙雨, 左银辉. 页岩气成藏条件及中国页岩气勘探风险 [J]. *新疆石油地质*, 2013, 34(3): 272-276.  
Hao Qingqing, Sun Yu, Zuo Yinhui. Hydrocarbon accumulation conditions of shale gas and exploration risks in China [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2013, 34(3): 272-276.
- [6] 刘富林, 李红星, 周建平, 等. 海底沉积物孔隙度 Micro-CT 扫描测定方法研究 [J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(18): 168-172.  
Liu Fulin, Li Hongxing, Zhou Jianping, et al. Study on seabed sediment porosity measurement method by micro-CT scanning [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(18): 168-172.
- [7] 曹永娜. 利用 CT 扫描技术实现对岩心微观驱替过程的研究 [J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(6): 64-68.  
Cao Yongna. Study of microscopic bleeding process using CT scanning technique [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(6): 64-68.
- [8] 韩文学, 高长海, 韩霞. 核磁共振及微、纳米 CT 技术在致密储层研究中的应用 [J]. *断块油气田*, 2015, 22(1): 62-66.  
Han Wenxue, Gao Changhai, Han Xia. Application of NMR and micrometer and nanometer CT technology in research of tight reservoir [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2015, 22(1): 62-66.
- [9] 罗少成, 成志刚, 林伟川, 等. 基于核磁共振测井的致密砂岩储层孔喉空间有效性定量评价 [J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(3): 16-21.  
Luo Shaocheng, Cheng Zhigang, Lin Weichuan, et al. Quantitative evaluation of the effectiveness of pore-throat space in tight sandstone reservoirs based on nuclear magnetic resonance log [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(3): 16-21.
- [10] 王胜. 用核磁共振分析岩石孔隙结构特征 [J]. *新疆石油地质*, 2009, 30(6): 768-770.  
Wang Sheng. Analysis of rock pore structural characteristic by nuclear magnetic resonance [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 30(6): 768-770.
- [11] 王磊, 李克文, 赵楠, 等. 致密油储层孔隙度测定方法 [J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(4): 49-53.  
Wang Lei, Li Kewen, Zhao Nan, et al. Methods research of porosity determination for tight oil reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(4): 49-53.
- [12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 岩心分析方法: SY/T 5336—2006 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2007.  
National Development and Reform Commission. Practices for core analysis: SY/T 5336—2006 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [13] Bustin R M, Bustin A, Ross D, et al. Shale gas opportunities and challenges [R]. San Antonio, Texas: AAPG Annual Convention, 2008.
- [14] Curtis M E, Ambrose R J, Energy D, et al. Structural characterization of gas shales on the micro- and nano-scales [C] // Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference. Calgary, Alberta, Canada: Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [15] Sondergeld C H, Ambrose R J, Rai C S, et al. Micro-structural studies of gas shales [C] // SPE Unconventional Gas Conference. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: Society of Petroleum Engineers, 2010: 1-25.
- [16] Bustin R M, Bustin A M M, Cui A, et al. Impact of shale properties on pore structure and storage characteristics [C] // SPE Shale Gas Production Conference. Fort Worth, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2008: 1-28.
- [17] 田华, 张水昌, 柳少波, 等. 致密储层孔隙度测定参数优化 [J]. *石油实验地质*, 2012, 34(3): 334-339.  
Tian Hua, Zhang Shuichang, Liu Shaobo, et al. Parameter optimization of tight reservoir porosity determination [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2012, 34(3): 334-339.
- [18] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995: 3-8.  
Li Qingyang, Wang Nengchao, Yi Dayi. Numerical analysis [M]. Beijing: Higher Education Press, 1995: 3-8.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 游标、带表和数显卡尺: GB/T 21389—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Vernier dial and digital display calipers: GB/T 21389—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [20] 王解先, 侯东亚, 段兵兵. 三维激光扫描仪在堆积物体积计算中的应用 [J]. *测绘通报*, 2013(7): 54-56.  
Wang Jiexian, Hou Dongya, Duan Bingbing. Applications of three-dimensional laser scanner in accumulation of volume calculation [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013(7): 54-56.
- [21] 宋振, 郝华东, 周晓雪, 等. 基于三维激光扫描仪法的大型立式罐容量的计量 [J]. *油气储运*, 2013, 32(12): 1367-1373.  
Song Zhen, Hao Huadong, Zhou Xiaoxue, et al. Capacity measurement of large vertical tank based on 3D laser scanner method [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2013, 32(12): 1367-1373.
- [22] 韦雪花, 王永国, 郑君, 等. 基于三维激光扫描点云的树冠体积计算方法 [J]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 235-240.  
Wei Xuehua, Wang Yongguo, Zheng Jun, et al. Tree crown volume calculation based on 3-D laser scanning point clouds data [J]. *Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 235-240.
- [23] 郑德华, 沈云中, 刘春. 三维激光扫描仪及其测量误差影响因素分析 [J]. *测绘工程*, 2005, 14(2): 32-34.  
Zheng Dehua, Shen Yunzhong, Liu Chun. 3D laser scanner and its effect factor analysis of surveying error [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2005, 14(2): 32-34.