

文章编号:1001-6112(2012)03-0334-06

# 致密储层孔隙度测定参数优化

田 华<sup>1,2</sup>, 张水昌<sup>1,2</sup>, 柳少波<sup>1,2</sup>, 马行陟<sup>1,2</sup>, 张 洪<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 提高石油采收率国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**孔隙度是评价储层物性、计算原始油气储量的重要参数,致密储层孔隙度一般小于10%,页岩储层普遍小于5%,常规波义尔定律双室法孔隙度测定仪器很难满足精度要求。为了提高致密储层孔隙度测定精度,建立了孔隙度压力区分度目标函数,区分度越大,测定精度越高。通过数值模拟,对孔隙度测定仪器进行了参数优化,结果表明,欲使得区分度增大,需要满足3个条件:(1)平衡前参考室压力、平衡前样品室压力尽量大;(2)取出的标准块体积、样品体积尽量小;(3)标准块体积尽量与样品体积相等。参数优化后孔隙度为5.0%的标准样品测定值相对误差最大可降低14%,绝对误差最大可降低0.7%,通过参数优化为致密储层孔隙度测定提供了技术支持。

**关键词:**孔隙度;参数优化;数值模拟;页岩;致密砂岩

**中图分类号:**TE135

**文献标识码:**A

## Parameter optimization of tight reservoir porosity determination

Tian Hua<sup>1,2</sup>, Zhang Shuichang<sup>1,2</sup>, Liu Shaobo<sup>1,2</sup>, Ma Xingzhi<sup>1,2</sup>, Zhang Hong<sup>1,2</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of EOR, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The porosity is an important parameter to evaluate reservoir physical properties and calculate petroleum reserves. The porosity of tight reservoir is less than 10%, and that of gas shale is usually less than 5%, which is a great challenge of porosity determination apparatuses. Currently the Boyle's Law Double-Cell (Matrix Cup) Method is widely used. The porosity determination for gas shale and tight sandstone needs ultra high accuracy, and it is necessary to carry theory analysis and optimize determination parameters. The objective pressure distinction function is established and numerical simulation is carried out. To obtain higher accuracy, it is necessary to set higher reference cell primary pressure, higher sample cell primary pressure, lower standard bulk volume and lower sample bulk volume. The relative error of experimental porosity of the standard sample of 5.0% can decline as much as 14%, and the absolute error can decline by 0.7%. This study developed a theory calculation model, which will be useful for technical support for tight reservoir porosity determination.

**Key words:** porosity; parameter optimization; numerical simulation; shale; tight sandstone

孔隙度是评价储层物性、计算油气储量的重要参数。随着非常规油气的勘探开发,致密储层所占比例越来越高,与常规储层相比,致密储层孔隙度较低,一般小于10%,页岩储层普遍小于5%<sup>[1-6]</sup>。致密储层孔隙度测定成为一个被广泛关注的问题,出现了一系列测定方法<sup>[7-10]</sup>,主要包括:

(1) 波义尔定律双室法。通过氦气充入样品孔隙内部,根据波义尔定律来测定孔隙体积,由于此方法操作简单、快速,成本低,目前最为常用<sup>[11-16]</sup>。

(2) 高压压汞法。将液态汞注入样品,注入压力与孔半径满足 Washburn 方程,根据 Young-Duper

方程,求得比表面积和孔容,并计算孔隙度<sup>[1-2,11]</sup>。对于页岩储层而言,由于其孔隙十分微小,多为纳米级孔隙,液态汞多不能进入。除此之外,高压压汞会造成人工裂隙,影响测定结果。

(3) 气体吸附等温线法。对于压汞法不能测定的孔隙区域,尤其是纳米级孔隙的测量,采用气体吸附等温线法,其最小探测范围为所使用的探测气体分子的直径,一般为大于0.5 nm的开口孔隙。主要采用CO<sub>2</sub>低温吸附(D-R方法)与N<sub>2</sub>低温吸附(BET理论)。但由于每个方法的假设与理论模型存在差异,重叠部分的符合度不是很高<sup>[2-3]</sup>。

收稿日期:2011-10-27;修订日期:2012-03-05。

作者简介:田华(1986—),男,硕士,从事页岩储层孔隙结构研究。E-mail: drawtianhua@163.com。

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05007-001)、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2009CB219601)、中国石油天然气股份有限公司科技攻关项目(2011A-0203)资助。

(4) 核磁共振法(NMR)。核磁共振对孔隙中氢原子存在响应,通过低磁场核磁共振  $T_2$  谱,反映不同大小孔隙的体积占总孔隙体积的比例,计算得到孔隙度<sup>[1-2]</sup>。由于核磁共振只能通过  $T_2$  谱间接测得孔隙分布,而且设备昂贵,目前未能大量分析样品。

(5) 扫描电子显微镜(SEM)方法。对岩石切片进行连续扫描,可获得精细的孔隙结构图像,利用场发射扫描电子显微镜结合氦离子剖光技术可以观察到几个纳米的孔隙。对孔隙体积进行统计就可得到孔隙度<sup>[1,12-13]</sup>。但限于仪器昂贵,测定时间较长,应用较为局限。

目前孔隙度测定常用的方法为波义尔定律双室法<sup>[17-19]</sup>,致密砂岩与页岩等致密储层孔隙度测量精度要求较高,有必要对测定仪器参数进行理论分析,优化测试条件。本研究通过理论计算,提出了不同压力区分度条件下,致密储层孔隙度测定参数的优化值。

## 1 波义尔定律双室法测定原理与流程

### 1.1 基本原理

孔隙度定义为物质的孔隙空间体积与总体积之比。波义尔定律双室法测量岩石孔隙度的基本原理是:根据波义尔定律,当温度为常数时,一定质量理想气体的体积与其绝对压力成反比<sup>[1-4]</sup>。公式如下:

$$V_1/V_2 = P_2/P_1 \text{ 或 } P_1V_1 = P_2V_2 \quad (1)$$

式中: $P_1$  为初始绝对压力; $P_2$  为平衡后的绝对压力; $V_1$  为初始体积; $V_2$  为平衡后的体积。

为了准确测定颗粒体积,考虑温度的变化和非理想气体特征,扩展的公式如下:

$$P_1V_1/Z_1T_1 = P_2V_2/Z_2T_2 \quad (2)$$

式中: $T_1$  为初始绝对温度; $T_2$  为平衡后的绝对温度; $Z_1$  为  $P_1$  和  $T_1$  时的气体偏差因子; $Z_2$  为  $P_2$  和  $T_2$  时的气体偏差因子。

用双室法测定颗粒体积,在参考室输入一定的压力,打开参考室和样品室的阀门,参考室气体向装有已知体积岩样的岩心室膨胀,测定平衡后的压力,根据压力变化测得进入样品孔隙的气体体积,据此可计算颗粒体积,总体积减去颗粒体积,即为孔隙体积,进而计算孔隙度(图1)<sup>[1,11]</sup>。

### 1.2 测定流程

孔隙度测定步骤主要包括仪器参数标定与岩

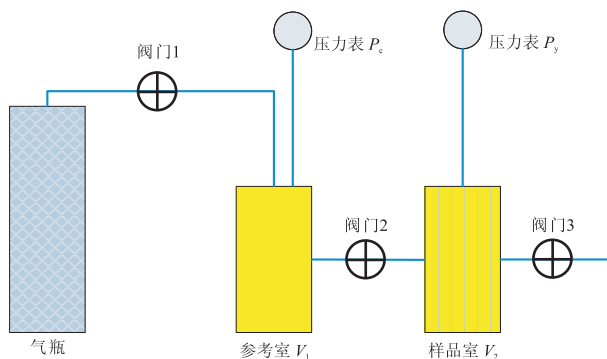


图1 波义尔定律双室法孔隙度测定示意<sup>[1,11]</sup>

Fig. 1 Schematic of porosity determination of Boyle's Law Double-Cell (Matrix Cup) Method

样测定2个部分。参数标定是指对仪器中的参考室体积  $V_1$  与装满标准块后样品室自由体积  $V_2$  进行测定, $V_1$  与  $V_2$  体积标定准确与否,对下一步孔隙度测定的准确度有很大影响;岩样测定则是根据标定结果对实际样品进行孔隙度测定。

#### 1.2.1 仪器参数标定

(1) 将参考室、样品室和管线的气体排空;关闭进气阀门1、岩心室阀门2和排空阀门3;在样品室放满标准块,打开进气阀门1,向参考室注气,初始压力为0.1~0.9 MPa,关闭进气阀门1,待压力表稳定后读数  $P_{c1}$  和  $P_{y1}$ ;打开样品室阀门2,到达一定压力后,关闭样品室阀门2,稳定后并记录压力表读数为  $P_{cy1}$ ;打开排空阀门3进行放空。

由公式(1)、(2)可得:

$$P_{c1}V_1 + P_{y1}V_2 = P_{cy1}(V_1 + V_2) \quad (3)$$

(2) 打开岩心室取出标块1,并记录其体积为  $V_{b0}$ ,重复(1)步骤,分别得到参数  $P_{y2}$ 、 $P_{c2}$  和  $P_{cy2}$ 。

由公式(1)、(2)可得:

$$P_{c2}V_1 + P_{y2}(V_2 + V_{b0}) = P_{cy2}(V_1 + V_2 + V_{b0}) \quad (4)$$

其中,只有  $V_1$ 、 $V_2$  为未知数,由公式(3)、(4),利用波义尔定律计算参考室体积  $V_1$  和充满标准块后样品室自由体积  $V_2$ :

$$V_1 = V_{b0}(R_{dp1} - R_{dp2}) \quad (5)$$

$$V_2 = -\frac{V_1}{R_{dp1}} = \frac{V_1 V_{b0}(R_{dp2} - R_{dp1})}{R_{dp1}} \quad (6)$$

式中: $R_{dp1} = D_{py1}/D_{pc1}$ ;  $R_{dp2} = D_{py2}/D_{pc2}$ 。  $D_{pc1} = P_{cy1} - P_{c1}$ ;  $D_{pc2} = P_{cy2} - P_{c2}$ 。  $D_{pc1}$ 、 $D_{pc2}$  为第一、第二次平衡前后参考室压力差(平衡后减平衡前)。  $D_{py1} = P_{cy1} - P_{y1}$ ;  $D_{py2} = P_{cy2} - P_{y2}$ 。  $D_{py1}$ 、 $D_{py2}$  为第一、第二次步骤平衡前后样品室压力差(平衡后减平衡前)。

### 1.2.2 岩样测试

(1)用游标卡尺分别测量岩心的直径  $D$  和长度  $L$ , 计算得到岩样的总体积为:

$$V_y = \pi LD^2/4 \quad (7)$$

(2)将岩心放入样品室, 并记录取出标准块的体积  $V_b$ , 重复 1.2.1 中(1)步骤, 得到参数  $P_{y3}$ 、 $P_{c3}$  和  $P_{cy3}$ 。

由公式(1)、(2)可得:

$$P_{c3}V_1 + P_{y3}(V_2 + V_b - V_y + V_k) = P_{cy3}(V_1 + V_2 + V_b - V_y + V_k) \quad (8)$$

(3)由公式(7)、(8)计算岩心的孔隙体积  $V_k$ :

$$V_k = \frac{V_1(P_{c3} - P_{cy3})}{(P_{cy3} - P_{y3})} + V_y - V_2 - V_b \quad (9)$$

$$\phi = (V_k/V_y) \times 100 \quad (10)$$

由公式(9)、(10)可得样品的孔隙度:

$$\phi = \left[ \frac{V_1(P_{c3} - P_{cy3})}{P_{cy3} - P_{y3}} - V_2 - V_b \right] \times 100 \quad (11)$$

## 2 参数优化的基本原理

由于在孔隙度测定过程中, 参考室体积  $V_1$ 、充满标准块后样品室自由体积  $V_2$ 、样品室初始压力  $P_{y3}$ 、取出的标准块体积  $V_b$  等参数均会对测量精度造成影响, 而且, 样品本身孔隙度较低, 仪器参数误差会对测定结果产生影响。所以, 有必要定量研究各个仪器参数对测定结果的影响<sup>[17,20]</sup>。根据 2 次孔隙度测定所得的平衡压力变化, 确定目标函数  $Y$ ; 定义为孔隙度测定压力区分度, 即不同孔隙度 ( $\phi_a, \phi_b, \phi_b > \phi_a$ ) 所测得的  $Y = P_{cy3}(\phi_a) - P_{cy3}(\phi_b)$  幅度越大, 说明仪器测定精度越高, 孔隙度测定效果越好。据此分析如何组合参考室体积  $V_1$ 、充满标准块后样品室自由体积  $V_2$ 、样品室初始压力  $P_{y3}$ 、取出的标准块体积  $V_b$ 、样品总体积  $V_y$  等参数, 使得  $Y$  值最大。具体方法如下:

孔隙度测定中, 平衡后压力为  $P_{cy3}$ , 根据式(11)将  $P_{cy3}$  移到等式左边:

$$P_{cy3} = \frac{V_1 P_{c3} + [(\phi/100-1)V_y + V_2 + V_b] P_{y3}}{(\phi/100-1)V_y + V_2 + V_b - V_1} \quad (12)$$

式中:  $\phi$  为孔隙度, %;  $\phi_a$  为孔隙度 1, %;  $\phi_b$  为孔隙度 2, %;  $V_1$  为参考室体积, mL;  $V_2$  为充满标准块后样品室自由体积, mL;  $P_{c3}$  为平衡前参考室压

力, MPa;  $P_{y3}$  为平衡前样品室压力, MPa;  $V_b$  为取出的标准块体积, mL;  $V_y$  为样品块体积, mL;  $P_{cy3}$  为平衡后压力, MPa。

目标函数  $Y$  定义为孔隙度测定的压力区分度 (单位: MPa), 根据 2 次孔隙度测定所得的平衡压力变化, 确定目标函数: 不同孔隙度 ( $\phi_a, \phi_b, \phi_b > \phi_a$ ) 所测得的  $Y = P_{cy3}(\phi_a) - P_{cy3}(\phi_b)$  幅度越大, 即区分度  $Y$  越大, 测定精度越高。

$$Y = P_{cy3}(\phi = \phi_a) - P_{cy3}(\phi = \phi_b) = \frac{V_1 P_{c3} + [(\phi_a/100-1)V_y + V_2 + V_b] P_{y3}}{(\phi_a/100-1)V_y + V_2 + V_b - V_1} - \frac{V_1 P_{c3} + [(\phi_b/100-1)V_y + V_2 + V_b] P_{y3}}{(\phi_b/100-1)V_y + V_2 + V_b - V_1} \quad (13)$$

式(13)分别对  $P_{c3}$ 、 $P_{y3}$ 、 $V_b$  等参数求导, 即可确定其对  $Y$  的影响, 也就是对测量精度的影响, 下列偏微分方程<sup>[20]</sup>:

方程 1:

$$\frac{\partial Y}{\partial P_{c3}} = \frac{V_1}{(\phi_a/100-1)V_y + V_2 + V_b - V_1} - \frac{V_1}{(\phi_b/100-1)V_y + V_2 + V_b - V_1} > 0 \quad (14)$$

方程 2:

$$\frac{\partial Y}{\partial P_{y3}} = \frac{(\phi_a/100-1)V_y + V_2 + V_b}{(\phi_a/100-1)V_y + V_2 + V_b - V_1} - \frac{(\phi_b/100-1)V_y + V_2 + V_b}{(\phi_a/100-1)V_y + V_2 + V_b - V_1} > 0 \quad (15)$$

方程 3:

$$\frac{\partial Y}{\partial V_b} = \frac{P_{y3}}{(\phi_a/100-1)V_y + V_2 + V_b - V_1} - \frac{P_{c3}V_1 + [(\phi_a/100-1)V_y + V_2 + V_b]P_{y3}}{[(\phi_a/100-1)V_y + V_2 + V_b - V_1]^2} - \frac{P_{y3}}{(\phi_b/100-1)V_y + V_2 + V_b - V_1} + \frac{P_{c3}V_1 + [(\phi_b/100-1)V_y + V_2 + V_b]P_{y3}}{[(\phi_b/100-1)V_y + V_2 + V_b - V_1]^2} < 0 \quad (16)$$

由以上方程, 可得出: 偏微分方程 1, 公式(14) 大于零, 为增函数,  $P_{c3}$  越大,  $Y$  值越大, 区分度越大; 偏微分方程 2, 公式(15) 大于零, 为增函数,  $P_{y3}$  越大,  $Y$  值越大, 区分度越大; 偏微分方程 3, 公式(16) 小于零, 为减函数,  $V_b$  越小,  $Y$  值越大, 区分度越大。

可见,  $P_{c3}$  越大,  $P_{y3}$  越大,  $V_b$  越小,  $Y$  值越大。致

密储层比常规储层对区分度要求高,为了使得  $Y$  值越大(区分度越大),需要使平衡前参考室压力  $P_{c3}$ 、平衡前样品室压力  $P_{y3}$  尽量大,取出的标准块体积  $V_b$ 、样品体积  $V_y$  尽量小。但在实际操作中,为了保证样品具有代表性,样品体积  $V_y$  不能太小,而且,取出的标准块体积  $V_b$  不能太小,  $V_b$  要大于样品体积  $V_y$ ,要求  $V_b$  尽量与  $V_y$  相等。

### 3 参数优化的具体分析

下面以低孔隙度样品测定为例介绍参数优化流程(图2)。实验前,设计人员应当掌握实验要求的压力区分度  $Y$ ,此处取 0.001 MPa)、样品孔隙度范围[孔隙度 1% ~ 10% 范围的致密岩石适用本方法进行优化(取  $\phi=5$ )]和样品体积  $V_y$ (取 12 mL)。调整参考室体积  $V_1$ 、样品室装满标准块后的自由体积  $V_2$ 、平衡前参考室压力  $P_{c3}$ 、平衡前样品室压力  $P_{y3}$  及取出的标准块体积  $V_b$  等参数。

第一步,确定测定实验所要达到的区分度  $Y$ ;

第二步,确定  $P_{c3}$ 、 $P_{y3}$ 、 $V_b$ ,方法为:根据式(13) ~ (16)可知,  $P_{c3}$  越大,  $P_{y3}$  越大,  $V_b$  越小,  $Y$  值越大,区分度越大。所以取  $P_{c3}=0.9$  MPa,  $V_b=12$  mL ( $V_b \geq V_y$ ),  $P_{y3}=0.1$  MPa(理论上应取 0.9 MPa,为了实验方便,未给样品室加压,保持大气压力,此处只取 0.1 MPa);

第三步,确定参考室体积  $V_1$  和样品室装满标准块后的自由体积  $V_2$ 。

当区分度  $Y$  为 0.001 MPa 时,图3表示参考室体积  $V_1$  和样品室装满标准块后的自由体积  $V_2$  与  $Y$  值的关系<sup>[20]</sup>。区分度  $Y$  为 0.001 MPa 时,图3a显示了参数优化后  $V_1$ 、 $V_2$  的综合取值范围;图3b和图

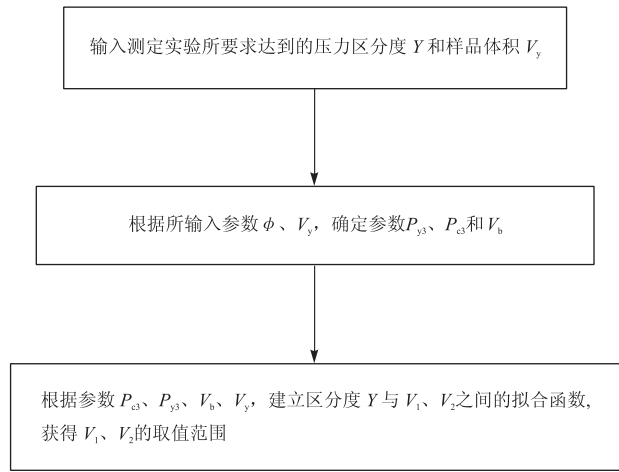


图2 孔隙度测定中仪器参数优化流程

Fig.2 Flow chart of parameter optimization in porosity determination

3c 分别显示了参数优化后  $V_1$ 、 $V_2$  的具体取值范围。可以看出:  $V_2 < 12$  mL(图3b),  $V_1 < 28$  mL(图3c)。

由此可知,如果区分度为 0.001 MPa 时:要求参考室体积  $V_1 < 28$  mL,样品室装满标准块后的自由体积  $V_2 < 12$  mL。类似的,图4(a,b,c)中,当区分度为 0.002 MPa 时,要求参考室体积  $V_1 < 6$  mL,样品室装满标准块后的自由体积  $V_2 < 7$  mL。致密储层孔隙度一般小于 10%,页岩储层普遍小于 5%,对仪器精度要求很高。常规的孔隙度测定仪器如果不经过参数优化,很难满足测定要求。

### 4 应用效果评价

为了验证孔隙度测定仪器参数优化的应用效果,通过对已知孔隙度的标准样品进行了重复测

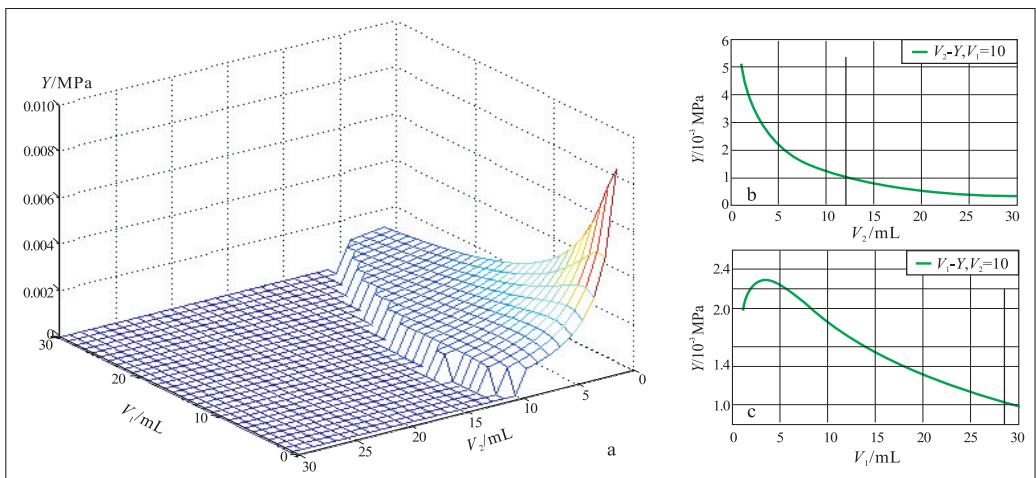


图3 区分度为 0.001 MPa 时,参考室体积  $V_1$  与充满标准块后样品室自由体积  $V_2$  取值范围确定

- a. 参考室体积  $V_1$  与充满标准块后样品室自由体积  $V_2$  对  $Y$  值的综合影响;
- b. 充满标准块后样品室自由体积  $V_2$  对  $Y$  值的影响;c. 参考室体积  $V_1$  对  $Y$  值的影响

Fig.3 Determination of reference cell volume  $V_1$  and sample cell volume  $V_2$  when accuracy equals to 0.001 MPa



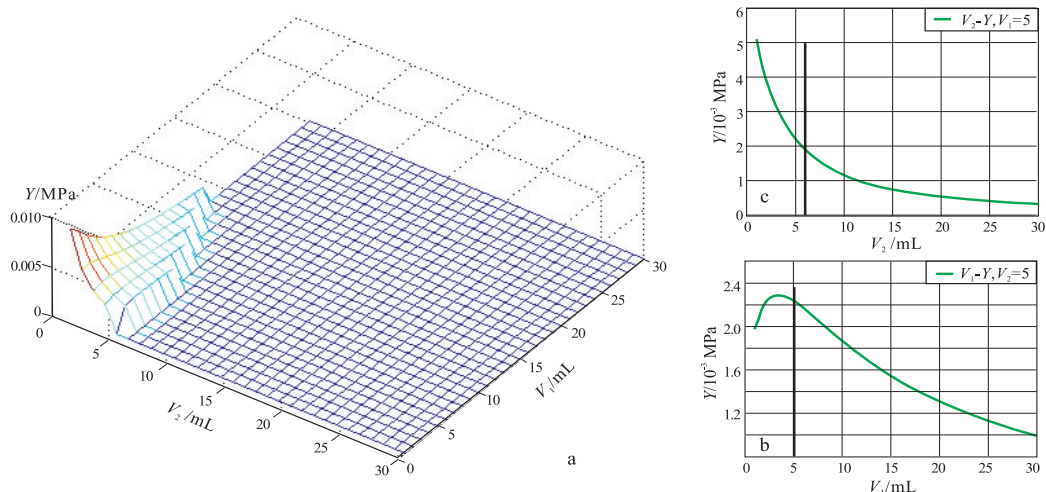


图4 区分度为0.002 MPa时,参考室体积  $V_1$  与充满标准块后样品室自由体积  $V_2$  取值范围确定

- a. 参考室体积  $V_1$  与充满标准块后样品室自由体积  $V_2$  对  $Y$  值的综合影响;
- b. 充满标准块后样品室自由体积  $V_2$  对  $Y$  值的影响;c. 参考室体积  $V_1$  对  $Y$  值的影响

Fig. 4 Determination of reference cell volume  $V_1$  and sample cell volume  $V_2$  when accuracy equals to 0.002 MPa

定。参数优化前孔隙度测定仪器参考室体积  $V_1$  为 30 mL, 样品室装满标准块后的自由体积  $V_2$  为 30 mL; 参数优化后孔隙度测定仪器参考室体积  $V_1$  减小为 5 mL, 样品室装满标准块后的自由体积  $V_2$  减小为 5 mL。在参数优化前后分别对孔隙度为 5.0% 的标准样品进行 5 次重复测定, 由图 5 可见, 参数优化前孔隙度测定值范围为 4.0% ~ 6.0%, 参数优化后孔隙度测定值浮动范围显著减小, 孔隙度测定值范围为 4.8% ~ 5.3%。图 6 用实测孔隙度与标准样品实际孔隙度的差值代表孔隙度测定绝对误差, 由此可以看出, 参数优化前孔隙度测定值范围为 -0.9% ~ 0.9%, 参数优化后孔隙度测定值范围为 -0.2% ~ 0.3%, 参数优化后相对误差降低 14%, 绝对误差最大可降低 0.7%。

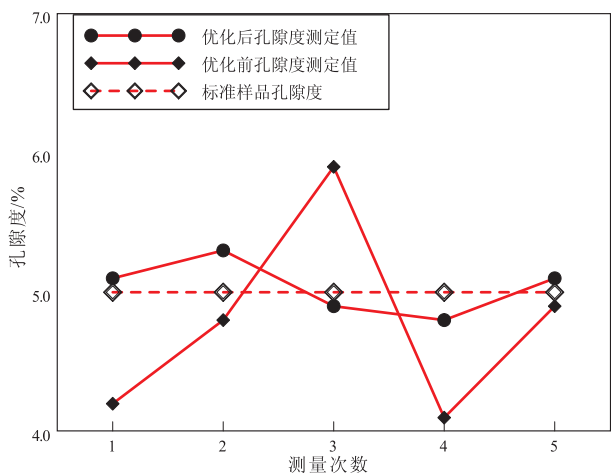


图5 参数优化前后孔隙度测定值对比

Fig. 5 Measured porosities before and after parameter optimization

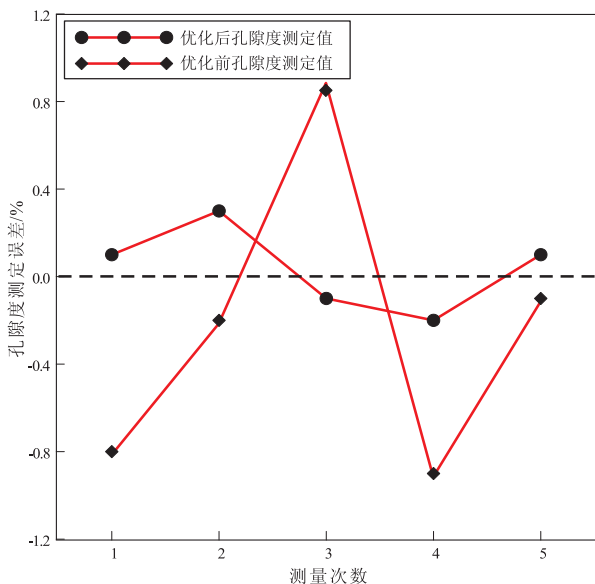


图6 参数优化前后孔隙度测定误差对比

Fig. 6 Measured porosity errors before and after parameter optimization

### 5 结论

孔隙度测定仪器中各个参数对区分度都有重要影响: 平衡前参考室压力  $P_{c3}$  越大、平衡前样品室压力  $P_{s3}$  越大, 取出的标准块体积  $V_b$  越小、样品体积  $V_s$  越小, 则区分度越大, 测定精度越高。

当区分度为 0.001 MPa 时, 平衡前样品室压力  $P_{c3}$  为 0.9 MPa, 平衡前样品室压力  $P_{s3}$  为 0.1 MPa, 取出的标准块体积  $V_b$  为 12 mL, 参考室体积  $V_1$  要小于 28 mL, 样品室装满标准块后的自由体积  $V_2$  要小于 12 mL。当区分度为 0.002 MPa 时, 参考室

体积  $V_1$  要小于 6 mL,样品室装满标准块后的自由体积  $V_2$  要小于 7 mL。

在各个参数的优化组合条件下,区分度  $Y$  可达 0.001 MPa。对于孔隙度为 5.0% 的标准样品,孔隙度测定参数优化之后,孔隙度测定值浮动范围由 4.0% ~ 6.0% 缩小到 4.8% ~ 5.3%,相对误差最大可降低 14%,绝对误差最大可降低 0.7%。

参考文献:

[1] Bustin R M, Bustin A, Ross D, et al. Shale gas opportunities and challenges [C]//AAPG Annual Convention, San Antonio, Texas, 2008.

[2] 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, 2010.

[3] 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, 2010. Pennsylvania: SPE 131771. 2010:1-25.

[4] Bustin R M, Bustin A M M, Cui X, et al. Impact of shale properties on pore structure and storage characteristics [C]//SPE Shale Gas Production Conference, Fort Worth, Texas, USA, 2008. Texas: SPE 119892. 2008:1-28.

[5] 范昌育, 王震亮. 页岩气富集与高产的地质因素和过程 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 465-469.

[6] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究: 以四川盆地及其周缘下古生界为例 [J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 221-225.

[7] 张忠涛, 施和生, 秦成岗, 等. 番禺低隆起—白云凹陷北坡断

层封闭性研究 [J]. 断块油气田, 2010, 17(1): 24-27, 51.

[8] 王欢, 王琪, 张功成, 等. 琼东南盆地梅山组泥岩盖层封闭性综合评价 [J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 152-158.

[9] 温晓红, 周拓, 胡勇, 等. 致密岩心中气体渗流特征及影响因素实验研究 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 592-595.

[10] 谢润成, 周文, 晏宁平. 致密低渗砂岩储层质量控制因素研究: 以靖边气田盒 8 段为例 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(2): 120-128.

[11] 中华人民共和国石油天然气行业标准: SY-T5336-2006 岩心分析方法 [S].

[12] 罗蛰潭. 油层物理 [M]. 北京: 地质出版社, 1985.

[13] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006.

[14] 李先鹏. 一种改进的岩样有效孔隙度测定方法 [J]. 江汉石油学院院报, 1997, 19(2): 39-41.

[15] Ross D J K, Bustin M, Marc R. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26: 916-927.

[16] Chalmers G R L, Bustin R M. The organic matter distribution and methane capacity of the Lower Cretaceous strata of Northeastern British Columbia, Canada [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70: 223-239.

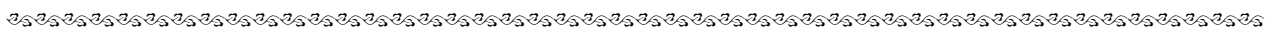
[17] 沈平平. 油层物理实验技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 30-82.

[18] 黄延章. 低渗透油层渗流机理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 12.

[19] 杨正明, 张英芝, 郝明强, 等. 低渗透油田储层综合评价方法 [J]. 石油学报, 2006, 27(2): 64-67.

[20] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解 [M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2008.

(编辑 韩 或)



(上接第 333 页)

[14] 刘建华, 朱玉双, 胡友洲, 等. 安塞油田 H 区开发中后期储层地质建模 [J]. 沉积学报, 2007, 25(1): 110-115.

[15] 兰义飞, 王东旭. 相控建模在剥蚀残留碳酸盐岩储层中的应用 [J]. 天然气工业, 2007, 27(8): 52-53.

[16] 胡向阳, 熊琦华, 吴胜和. 储层建模方法研究进展 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(1): 107-112.

[17] 刘立峰, 孙赞东, 杨海军, 等. 塔中地区碳酸盐岩储集相控建模技术及应用 [J]. 石油学报, 2010, 31(6): 952-958.

[18] 高博禹, 孙立春. 基于单砂体的河流相储层地质建模方法探讨 [J]. 中国海上油气, 2008, 20(1): 34-37.

[19] 梁积伟, 李宗杰, 刘昊伟, 等. 塔里木盆地塔河油田 S108 井

区奥陶系一间房组裂缝性储层研究 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 447-452.

[20] 王允诚, 孔金祥. 气藏地质 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 341-350.

[21] 徐景祯, 刘晓冬, 陶官仲. 渗透率建模的三维指示条件模拟方法及其应用 [J]. 石油学报, 2000, 21(3): 61-65.

[22] 兰立新. 储层地质建模技术及其在油藏描述中的重要性: 以南堡油田为例 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2006, 36(6): 988-991.

[23] Deuth C V. Geostatistical Reservoir Modeling [M]. New York: Oxford University Press, 2002: 4-10.

(编辑 徐文明)