

# The Combination of Mercury Injection Method and Gas Absorption Method for Pore Texture Analysis of Tight Reservoir Rock in the Well of Shen352

Pengchao Guo

Exploration and Development Research Institute, Liaohe Co. Ltd., Petrochina, Panjin Liaoning  
Email: 853504647@qq.com

Received: Apr. 14<sup>th</sup>, 2016; accepted: Apr. 28<sup>th</sup>, 2016; published: May 3<sup>rd</sup>, 2016

Copyright © 2016 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Mercury injection and gas absorption analytical methods are the main technical means of pore diameter distribution diagram of Petroleum Reservoir. Mercury injection method constantly is used for determination of connected middle pore and macropore, and gas absorption method is used for determination of Microporous and middle pore. Based on combination of mercury injection and gas absorption analytical methods, the complete pore diameter distribution diagram of tight reservoir rock can be obtained. By the use of the combination of two methods in tight reservoir rock of the well of shen352, the author makes a conclusion: Pore diameter which is less than 100 nm of oil shale is about 70%; it has "three peaks" at 5 - 30 nm, 30 - 200 nm and 1000 - 3000 nm. Pore diameter which is less than 100 nm of pelitic micrite dolomite is about 75%; it slightly presents "two peaks" at 2 - 30 nm, 50 - 100 nm. Pore diameter which is less than 100 nm of dolomitic mudstone is more than 90%; the main range of pore diameter of this rock is less than 15 nm.

## Keywords

Tight Reservoir Rock, Pore Texture, Mercury Injection Method, Gas Absorption Method

---

# 压汞法与气体吸附法联用分析沈352井致密储层岩石孔隙结构

郭鹏超

中国石油辽河油田公司勘探开发研究院, 辽宁 盘锦  
Email: 853504647@qq.com

收稿日期: 2016年4月14日; 录用日期: 2016年4月28日; 发布日期: 2016年5月3日

## 摘要

油气储层孔隙直径分布研究的主要技术手段有压汞法、气体吸附法等。压汞法常用于测试连通的中孔和大孔的孔隙结构。氮气吸附法侧重于表征微孔和中孔的孔隙结构。仅靠一种方法不能给出孔结构的所有信息。因此, 压汞法和气体吸附法相结合分析全孔隙结构特征尤为重要。本文将两种测试方法联用, 分析沈352井致密储层岩石(油页岩、泥质泥晶云岩、云质泥岩)全孔隙结构的孔径分布特征, 认为: 油页岩中孔隙直径小于100 nm的占70%左右; 孔隙直径呈现“三个峰”, 第一个主峰为5~30 nm, 次峰30~200 nm, 第三个峰1000~3000 nm。泥质泥晶云岩中孔隙直径小于100 nm的占75%左右; 孔隙直径略现“二个峰”, 第一个主峰为2~30 nm, 次峰50~100 nm。含云泥岩或云质泥岩中孔隙直径小于100 nm的占90%以上; 孔隙直径以小于15 nm为主。

## 关键词

致密储层岩石, 孔隙结构, 压汞法, 气体吸附法

## 1. 引言

沈352井位于大民屯凹陷安福屯构造带。该井所揭示的地层序列由下至上为太古界、元古界、新生界古近系房身泡组、沙河街组沙四段、沙三段、沙一段、东营组及新近系[1]。大民屯凹陷沙四段下亚段油页岩分布稳定, 在西部安福屯地区沉积厚度大, 为100~200 m, 母质类型好, 有机质丰度和成熟度均较高, 是极好生油岩和储集岩[2] [3]。油页岩发育段致密储层分布广, 储集岩类型多样, 由泥晶云岩, 碳酸盐质油页岩等, 石英、长石、方解石等脆性矿物含量高, 岩石脆性越强, 构造缝、层理缝合收缩缝发育, 有利于油气聚集。安福屯油页岩储层具有低孔、低渗的物性特征, 孔隙度为1.2%~7.8%, 平均孔隙度为5.4%, 渗透率一般小于0.1 mD, 属于致密储层。

致密储层其孔隙远远小于砂岩储层孔隙, 孔径大小达到纳米级。Beaufort Mackenzie盆地浅层页岩孔径为25~1000 nm, 深层页岩孔径为2.5~25 nm [4]; Mississippian盆地Barnett页岩孔径范围为5~750 nm, 平均为100 nm [5]; 中国四川盆地成熟页岩孔隙直径一般约为100 nm [6]。油气储层孔隙结构研究的主要技术手段有铸体薄片分析法、压汞法、氮气吸附法和扫描电镜法等[4] [7] [8]。应用铸体薄片分析法研究时, 由于普通光学显微镜受到分辨率的限制, 难以观察铸体薄片中的纳米级孔隙[9]。压汞法常用于测试连通的中孔和大孔[10]。低温氮气等温吸附法侧重于表征微孔和中孔的孔隙结构[10]。扫描电镜技术不能分辨在机械抛光过程中由于页岩表面硬度不同所造成的不规则形貌和纳米孔, 也难以识别新鲜断面上由于样品破裂造成的假孔隙[11]。因此, 单一的方法均无法完成岩样全孔隙结构分析。本文所述的方法将压汞法和气体吸附法相结合, 全面阐述致密岩石全孔隙结构特征。

## 2. 测试原理

### 2.1. 压汞法原理

汞是液态金属, 具有液体的表面张力, 在压汞过程中, 一定压力下, 汞只能渗入相应既定大小的孔

中，压入汞的量就代表内部孔的体积，逐渐增加压力，同时计算汞的压入量，可测出多孔材料孔隙容积的分布状态[12]。根据 Wasburn 公式，可以计算出孔隙半径[10]：

$$r = 2\sigma \cos \theta / p_c \quad (1)$$

其中孔隙半径为  $r$ ，接触角为  $\theta$ ，压力为  $p_c$ ，汞的表面张力为  $\sigma$ 。

将汞的表面张力  $\sigma_{Hg} = 0.48 \text{ N/m}$ ，润湿角  $\theta_{Hg} = 140^\circ$ ，代入公式(1)，则：

$$r = \frac{750}{P_c} \quad (2)$$

压汞法使用的 Wasburn 公式对大孔的分析很准确，但是对微孔和中孔的分析就存在较大误差。因为 Wasburn 公式假设孔隙为圆柱体，而致密储层岩石存在大量形态极不规则的微孔隙。另外压汞法假设测试样品孔隙表面是光滑的，但是致密储层岩石孔隙表面形态凹凸不平，增大了毛细管压力，测试时就将表面粗糙的大孔体积计算入微孔体积内[11]。为此，对于致密储层岩石的微孔及中孔部分，就需要考虑用气体吸附法来计算其分布。

## 2.2. 气体吸附法原理

气体吸附法测定固体物质的孔径分布，是基于多孔物质孔壁对气体的多层吸附和毛细管凝聚原理[10]。将吸附于一定表面上的气体量记录为吸附物质相对压力的函数，可以采用等温吸附分支上一系列逐步升高的相对压力或等温脱附分支上一系列逐步降低的相对压力，也可二者并用。在恒定温度下，气体吸附量与气体平衡相对压力之间的关系即为吸附等温线。在不同分压下所吸附的吸附质体积对应于相应尺寸孔隙的体积，故可由孔隙体积的分布来测定孔径分布[13]。

对于大多数的中孔使用 Kelvin 原理进行计算孔径分布[10]，在液氮温度(77K)下，以氮气为吸附气体，Kelvin 计算公式如下：

$$r_k = - \left( \frac{2\sigma_l V_{ml}}{RT_b \ln(p/p_0)} \right) = - \frac{0.953}{\ln(p/p_0)} \quad (3)$$

式中： $\sigma_l$  为液态凝聚物的表面张力； $V_{ml}$  为液态凝聚物的摩尔体积； $R$  为理想气体常数； $T_b$  为分析温度； $r_k$  为凝聚在孔隙中的吸附气体的曲率半径； $p_0$  为液氮温度下氮气的饱和蒸气压； $p$  为氮气的吸附平衡压力。对于 77K 下的氮气吸附，式中数值常数的计算值为 0.953 nm。

对于只有在孔壁上形成了吸附层之后，才可能发生凝聚，因而必须考虑该吸附层的厚度。吸附层厚度的计算公式[10]：

$$r = r_k + t \quad (4)$$

$$t = - \frac{0.736}{[\ln(p/p_0)]^{\frac{1}{3}}} \quad (5)$$

式中： $r$  为孔半径，单位 nm； $t$  为吸附层厚度，单位 nm。

若岩样处在气、水两相介质条件下，气水界面张力  $\sigma_{gw} = 0.07 \text{ N/m}$ ，润湿角  $\theta_{gw} = 0^\circ$ ，根据 Wasburn 公式，则孔隙半径为[14]：

$$r = \frac{140}{P_c} \quad (6)$$

把(3)、(4)、(5)代入(6)中，

$$P_c = -140 \left/ \left( \frac{0.953}{\ln(p/p_0)} + \frac{0.736}{[\ln(p/p_0)]^{\frac{1}{3}}} \right) \right. \quad (7)$$

通过以上公式可以把气体吸附法相对压力转换为毛管压力，与压汞法毛管压力结合成一条直线，可以进行全孔隙结构分析。

### 3. 全孔隙结构分析

#### 3.1. 样品的选取

大民屯凹陷沙四段沉积早期以发育缺氧湖亚相为特征，沉积了一套连续分布的油页岩，厚 50~150 m 不等，主要分布于沈 233 井 - 沈 177 井 - 沈 1 井一线以北，最大厚度位于安福屯洼陷，沙四段沉积中晚期广泛发育半深湖 - 深湖亚相，沉积了生烃潜力很好的厚层暗色泥质岩，厚度一般为 300~650 m。本次研究中选取的样品为安福屯洼陷沈 352 井沙四段沉积早期油页岩发育处，既为烃源岩又为储层，为典型的致密储层岩石。

选择了沙四段六个深度不同的致密储层岩石样品进行压汞法和气体吸附法实验。

#### 3.2. 孔隙直径分布特征

通过公式(7)把气体吸附法的相对压力转换为毛管压力，可以对样品进行全孔隙直径分析。例如，样品 2 气体吸附法测定的结果见表 1，采用公式(7)把气体吸附法的相对压力(P/P0)转化为毛管压力，见表 1 最后一列，绘制转化后的毛管压力与累计饱和度曲线，见图 1 (粉色曲线)；样品 2 压汞法测定的结果见表 2，绘制的毛管压力与累计饱和度曲线，见图 1 (蓝色曲线)；二者有重合可结合，见图 1 (红色曲线)。绘制其对应的孔隙直径与饱和度曲线，见图 2。用同样的方式对其余 5 个样品进行全孔隙结构分析，通过对这 6 块样品的结合中发现，两种方法的孔隙直径结合点一般在 50 nm 到 100 nm 之间。样号 1、样号 3、样号 4 为含云或云质泥岩，毛管压力曲线与孔隙直径分布特征类似，因此放在一起分析。同样样号 5、样号 6 放在一起分析，见图 3、图 4。

由图 1、图 2、图 3、图 4 可以看出，泥质泥晶云岩孔隙分布较均匀，以孔隙直径小于 500 nm 的孔为主、占 98%以上，其中孔隙直径小于 100 nm 的占 75%左右；孔隙直径略现“二个峰”，第一个主峰为 2~30 nm、占 50.3%，次峰 50~100 nm、占 13.3%。油页岩中孔隙直径在小于 2 nm 到大于 5000 nm 均有分

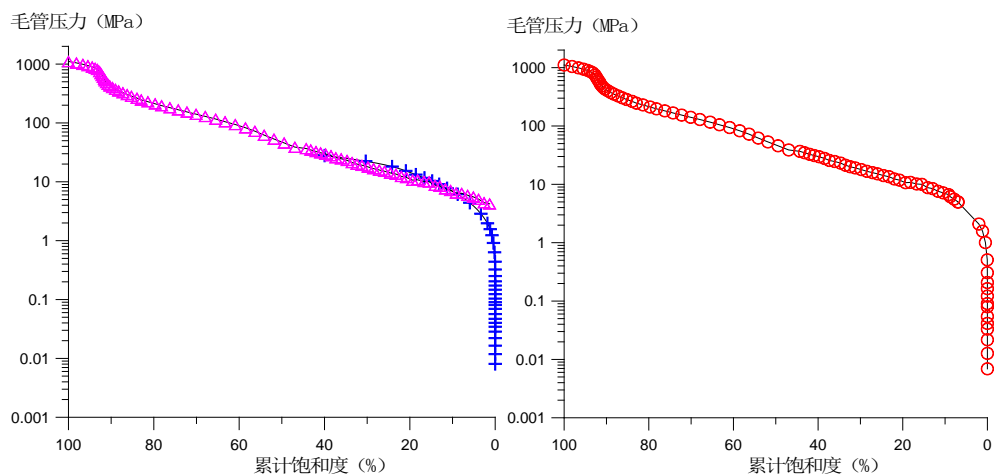
Table 1. The test result of gas absorption method of sample 2

表 1. 样品 2 气体吸附法测试结果

序号	P/P0	累计饱和度, %	吸附量, ml/g	孔隙直径, nm	饱和度, %	毛管压力, MPa
1	0.99	1.30	0.18	173.69	1.30	4.23
2	0.99	2.60	0.19	165.86	1.30	4.43
3	0.99	3.90	0.19	144.84	1.30	5.07
4	0.99	5.12	0.17	132.69	1.21	5.54
...	...	...	...	...	...	...
74	0.05	96.62	0.07	0.74	1.17	992.64
75	0.04	98.13	0.09	0.70	1.52	1045.28
76	0.03	100.00	0.10	0.66	1.87	1108.58

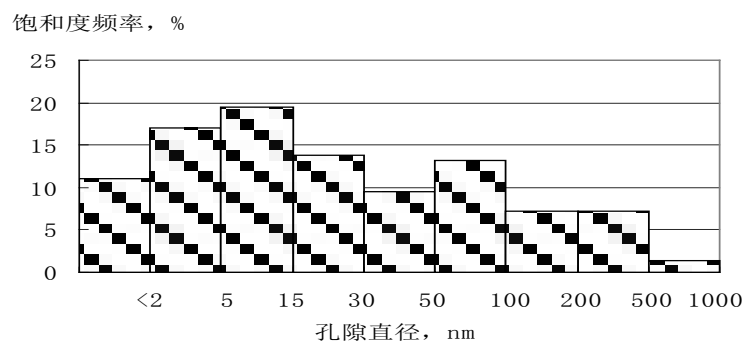
**Table 2.** The test result of mercury injection method of sample 2  
**表 2.** 样品 2 压汞法测试结果

序号	毛管压力, MPa	累计饱和度, %	孔隙半径, $\mu\text{m}$	孔隙半径分布频率, %
1	0.01	0	100.00	0
2	0.01	0	63.00	0
3	0.02	0	40.00	0
4	0.03	0	25.00	0
...	...	...	...	...
22	11.98	17.13	0.02	1.16
23	14.96	20.71	0.01	0
24	19.94	25.66	0	0



**Figure 1.** Combination of mercury injection and gas absorption analytical methods—capillary pressure and saturation of the cumulative curve (pelitic micrite dolomite 3246.73 m)

**图 1.** 压汞法与气体吸附法结合之毛管压力与累计饱和度曲线(泥质泥晶云岩 3246.73 m)



**Figure 2.** The complete pore diameter distribution characters (pelitic micrite dolomite 3246.73 m)

**图 2.** 全孔隙直径分布特性(泥质泥晶云岩 3246.73 m)

布, 孔隙直径小于 500 nm 的占 86.7%, 小于 100 nm 的占 70%左右; 孔隙直径呈现“三个峰”, 第一个主峰为 5~30 nm、占 46.7%, 次峰 30~200 nm、占 30.7%, 第三个峰 1000~3000 nm、占 5.5%。含云泥岩或云质泥岩孔隙分布不均匀, 孔隙直径小于 100 nm 的占 90%以上; 孔隙直径以小于 15 nm 为主。

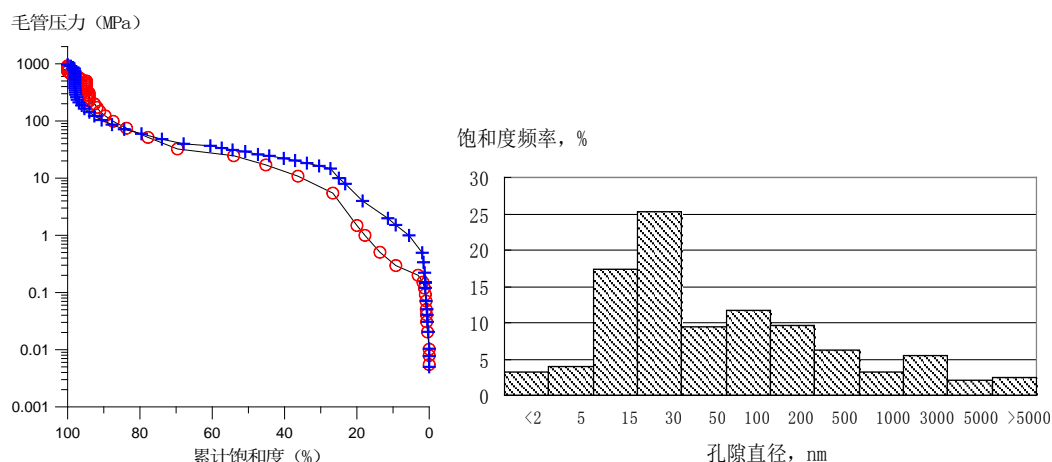


Figure 3. The complete pore diameter distribution characters (oil shale)

图 3. 全孔隙直径分布特性(油页岩)

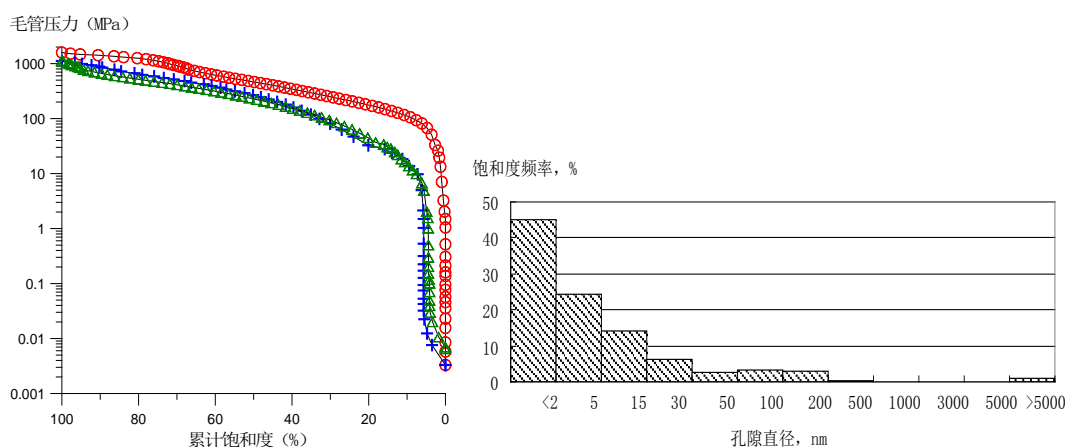


Figure 4. The complete pore diameter distribution characters (dolomitic mudstone)

图 4. 全孔隙直径分布特性(云质泥岩)

## 4. 结论

(1) 通过 Wasburn 计算公式和 Kelvin 计算公式把气体吸附法的相对压力转换为毛管压力, 实现压汞法和气体吸附法的联用。

(2) 通过压汞法与气体吸附法的联用, 实现了对沈 352 井致密储层岩石的全孔隙结构分析。油页岩中孔隙直径小于 100 nm 的占 70% 左右; 孔隙直径呈现“三个峰”, 第一个主峰为 5~30 nm, 次峰 30~200 nm, 第三个峰 1000~3000 nm。泥质泥晶云岩中孔隙直径小于 100 nm 的占 75% 左右; 孔隙直径呈现“二个峰”, 第一个主峰为 2~30 nm, 次峰 50~100 nm。含云泥岩或云质泥岩中孔隙直径小于 100 nm 的占 90% 以上; 孔隙直径以小于 15 nm 为主。

## 参考文献 (References)

- [1] 史彦尧, 谢庆宾, 彭仕宓, 等. 大民屯凹陷沙四段层序地层学研究[J]. 西安石油大学学报, 2007, 22(3): 15-18.
- [2] 谢文彦, 姜建群, 张占文, 等. 大民屯凹陷油气系统研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 38-41.
- [3] 尹宏, 代宗仰, 郭伟, 等. 大民屯凹陷西部斜坡带沙四段成藏条件分析[J]. 断块油气田, 2006, 13(6): 4-6.
- [4] 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 等. 页岩储层微观孔隙结构特征[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 302-309.

- [5] Loucks, R.G., Reed, R.M., Ruppel, S.C., *et al.* (2009) Morphology, Genesis, and Distribution of Nanometer-Scale Pores in Siliceous Mudstones of the Mississippian Barnett Shale. *Journal of Sedimentary Research*, **79**, 848-861.  
<http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2009.092>
- [6] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [7] 罗顺社, 魏炜, 魏新善, 等. 致密砂岩储层微观结构表征及发展趋势[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2013, 35(9): 6-10.
- [8] 黄振凯, 陈建平, 王义军, 等. 松辽盆地白垩系青山口组泥岩微观孔隙特征[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 31-35.
- [9] 陈杰, 周改英, 赵喜亮, 等. 储层岩石孔隙结构特征研究方法综述[J]. 特种油气藏, 2005, 12(4): 12-14.
- [10] 朱庆山, 黄文来, 周素红, 等. 压汞法和气体吸附法测得固体材料孔径分布和孔隙度-GB/T21650.2-2008 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会共同发布.
- [11] 杨峰, 宁正福, 张世栋, 等. 基于氮气吸附实验的页岩孔隙结构表征[J]. 新能源, 2013, 33(4): 135-139.
- [12] 谢晓永, 唐洪明, 王春华, 等. 氮气吸附法和压汞法在测试泥页岩孔径分布中的对比[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 100-102.
- [13] 黄振凯, 陈建平, 王义军, 等. 利用气体吸附法和压汞法研究烃源岩孔隙分布特征[J]. 地质论评, 2013, 59(3): 588-592.
- [14] 承秋泉, 陈红宇, 范明. 盖层全孔隙结构测定方法[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 605-608.