

文章编号: 0253-2697(2000)-02-0027-04

# 盖层封闭能力与盖层厚度的定量关系

吕延防<sup>1</sup> 张绍臣<sup>1</sup> 王亚明<sup>2</sup>

(1. 大庆石油学院 黑龙江 安达 151400; 2. 大庆石油管理局采油六厂 黑龙江 大庆 163110)

**摘要:** 盖层封闭游离相烃类的能力由两部分组成, 一个是盖层底部岩石的排替压力, 一个是盖层毛细管孔隙的吸附阻力, 盖层毛管孔隙的吸附阻力与盖层岩性、成岩程度、厚度有关, 盖层岩石的粒度越小、粘土矿物含量越高、成岩程度越强、厚度越大, 盖层的吸附阻力越大, 盖层的封闭能力越强。根据泥质岩盖层中孔隙流体的低速渗流机理研究, 盖层中吸附阻力的大小恰等于其中孔隙流体超压值的2倍。通过对松辽盆地北部三肇地区青山口组盖层的封闭能力计算, 发现该盖层的吸附阻力近似于其底部岩石排替压力的2倍, 即实际封闭能力是以前研究的3倍。由此为我国众多盆地中第四系浅层高孔隙度、高渗透率、极低排替压力盖层封盖了大量生物气的机理解释奠定了理论基础。

**主题词:** 盖层; 封闭性; 排替压力; 吸附阻力

**中图分类号:** TE112.2

**文献标识码:** A

## 1 前言

盖层的物性封闭能力主要用盖层岩石的排替压力来衡量, 其大小可用公式表示为

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

式中  $P_c$  为排替压力, Pa;  $\sigma$  为界面张力, N/m;  $\theta$  为三相界面接触角, 度;  $r$  为岩石中最大连通孔隙半径, m。

据此, 人们不管盖层的厚度有多大, 均用岩样的最小毛管压力来衡量盖层封闭能力<sup>[1]</sup>, 而实际的统计资料也表明, 盖层厚度越大, 封闭的烃柱高度亦越大<sup>[2]</sup>。

实际岩石样品的实验室测试也表明, 随着岩样长度的增大, 岩石的“排替压力”增强, 在实验室所能测定的样品长度的范围内, 二者呈直线增长关系(图1), 显然, 岩石的封闭能力除受式(1)中所列因素控制外, 还受与厚度有关的其它某种因素的影响。

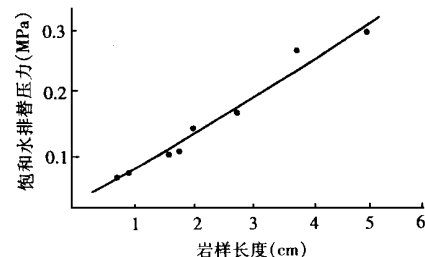


图1 人造石英粉砂岩“排替压力”与长度之间关系

Fig. 1 The relations of “displacement pressure” vs. length of man-made quartzose siltstone

## 2 盖层封闭能力的组成

泥岩盖层中孔隙水的流动遵循低速渗流规律, 其运动方程为<sup>[3]</sup>:

$$\begin{cases} \bar{V} = \frac{K}{\mu} \left( 1 - \frac{\lambda}{|p_g|} \right) p_g & p_g > \lambda \\ \bar{V} = 0 & p_g < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\bar{V}$  为渗流速度, m/s;  $K$  为渗透率,  $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $\mu$  为流体粘度, Pa·s;  $p_g$  为流体压力梯度, Pa/m;  $\lambda$  为常数, 具有压力梯度的因次, 渗流力学称之为起始压力梯度或起动压力梯度。

在  $p_g < \lambda$  时, 流体不运动且速度  $\bar{V} = 0$ , 当  $p_g > \lambda$  时, 流体开始流动,  $\lambda$  即为孔隙水开始流动所附加的外力。

基金项目: 中国石油天然气总公司“九五”重点科技攻关项目“大、中型油气田成藏定量研究”资助。

作者简介: 吕延防, 男, 1957年1月生。1993年毕业于中国地质大学(北京), 现为大庆石油学院教授, 博士。通讯处: 黑龙江安达市。

将式(2)改写为

$$p_g = - \left( \frac{\mu}{K} \bar{V} + \lambda \right) \quad (3)$$

上式有明显的力学意义, 等号右边第一项为粘滞阻力, 第二项为泥岩对孔隙水的吸附阻力, 驱动力则为二项之和。即单相流体在泥质岩中流动时, 需克服两个阻力——粘滞阻力和吸附阻力。

如果泥质岩毛管孔隙中为气水双相流动, 则需克服三个阻力, 即粘滞阻力、吸附阻力和毛管压力, 可用下式描述这一流体运动规律

$$\Delta p = - \left( \frac{\mu \bar{V} L}{K} + \lambda + p_c \right) \quad (4)$$

式中  $\Delta p$  为驱动压差;  $L$  为毛管长度;  $p_c$  为最大连通孔隙的毛管压力; 其它符号同前。

由式(4)可见, 驱动岩石孔隙流体所需的最低压力应是上式后两项之和。即盖层的封闭能力由排替压力和吸附阻力两部分组成。

### 3 盖层封闭能力研究原理

众所周知, 造成地层超压的原因很多, 诸如地层的欠压实作用、粘土矿物脱水作用、水热增压作用、粘土的半渗透膜作用以及构造作用等等<sup>[4]</sup>, 这些作用的最根本原因是因为超压地层顶部与底部岩石孔隙喉道小而使孔隙流体排出受阻。如果盖层孔道中为单相流体, 该流体的向外排运同样也遵循式(3)的低速渗流规律, 其阻力的大小可由式(3)改写后表示

$$\Delta p_a = - \left( \frac{\mu \bar{V} L}{K} + \lambda \right) \quad (5)$$

式中  $\Delta p_a$  表示地层超压值(即地层超压由粘滞阻力与吸附阻力两部分组成),  $M Pa$ 。

在假设超压孔隙流体是在流动的前提下, 笔者计算了松辽盆地三肇凹陷的升 61 井青山口组超压流体的流动速度为  $0.0000347 \text{ cm}^3 / \text{cm}^2 \cdot \text{a}$ , 说明流速是极低的(根据本区油气地质特征分析, 实际上超压流体是不流动的), 这个流速条件下的粘滞阻力只有  $0.019 M Pa$ , 与该层  $15 M Pa$  的超压值相比是极其微小的。可见地层超压主要是由于盖层孔隙对水的吸附阻力造成的。这样, 式(5)便可写成  $\Delta p_a = \lambda$ 。

设超压盖层之下储层孔隙水要通过厚度为  $H_2$  盖层下部达到最大超压点所需的最低压力为  $p_1$ (图 2), 在  $p_1 - \Delta p_a$  压差作用下, 储层孔隙水向超压盖层中流动, 其规律可用低速渗流公式描述, 即

$$p_1 - \Delta p_a = \frac{\mu \bar{V} H_2}{K} + \lambda H_2 \quad (6)$$

如果流速  $V$  近似为零, 则

$$p_1 - \Delta p_a + \lambda H_2 = 2\Delta p_a \quad (7)$$

即水穿盖层运移所需克服的总吸附阻力近似为  $2\Delta p_a$ 。因此, 盖层封闭能力可用公式表示为

$$p_1 = 2\Delta p_a + p_c = 2\lambda H_2 + p_c \quad (8)$$

根据式(8), 如果能求得盖层的最大超压值和地层条件盖层底部盖岩的排替压力, 则盖层封闭能力(即烃类在盖储界面上所受的阻力)便可求。

### 4 超压盖层剩余孔隙度与厚度、埋深变化模型(以三肇地区为例)

超压盖层剩余孔隙度与厚度、埋藏深度变化规律, 在三肇地区根据

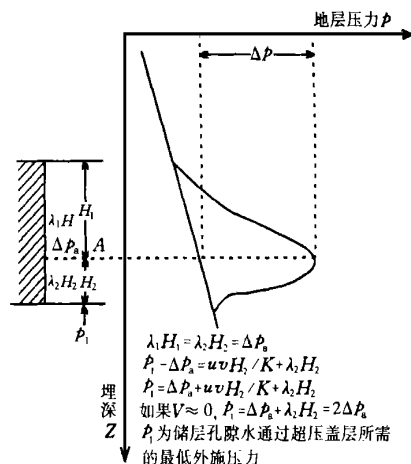


图 2 盖层超压与吸附阻力分布示意图

Fig. 2 The distribution of ultra-pressure and absorption pressure in caprock

实际资料建立的数学地质模型为<sup>[5]</sup>

$$\Delta\phi = \frac{K_M}{\pi} \arctg\left(\frac{H}{100}\right) K_p \exp\left[-\left(\frac{Z}{100} - \frac{Z^*}{100}\right)^2 / K_H\right] \quad (9)$$

$$(\Delta\phi_{Z,H,K_p} + \phi(Z)) = 0 \quad (10) \quad p(z, \Delta\phi) = 0.8p_b(Z) \quad (11)$$

式中  $\Delta\phi$  为超压盖层的最大剩余孔隙度, 小数;  $K_M$  为超压盖层孔隙度偏差理论极大值, 本区计算值为 0.26;  $H$  为超压盖层的厚度, m;  $K_p$  为超压盖层孔隙度偏差实测值与该层理论上可能达到的最大值之比;  $Z^*$  为研究区欠压实主带埋深, 本区为 1500m。  $K_H$  为拟合剩余孔隙度偏差资料得出的参量, 本区统计结果为 60;  $\phi(Z)$  为正常压实孔隙度, 小数;  $p(Z, \Delta\phi)$  为超压盖层流体压力, Pa;  $p_b(Z)$  为超压带之上覆层静压力, Pa。

## 5 盖层吸附阻力与厚度、埋藏深度变化关系

给定盖层厚度  $H$  和埋藏深度  $Z$ , 通过式(9)求得剩余孔隙度  $\Delta\phi$  以后, 由下式分别求得盖层正常压实孔隙度  $\phi$  和超压孔隙度

$$\phi(Z) = \phi_e^{-BZ} \quad (12) \quad \phi(Z, H) = \phi(Z) + \Delta\phi_{Z,H,K_p} \quad (13)$$

然后, 由式(14)求得等效深度  $Z_e$

$$Z_e = \frac{1}{B} \ln \frac{\phi}{\phi(Z, H)} \quad (14)$$

式中  $\phi(Z)$  为正常压实泥岩孔隙度, 小数;  $\phi$  为地表泥岩孔隙度, 小数;  $Z$  为盖层最大超压点埋深, m;  $\phi(Z, H)$  为超压层孔隙度, 小数;  $B$  为常数。

将式(14)代入式(15)可求得地层超压  $\Delta p_a$ , 根据前述的超压与吸附阻力的关系, 厚度为  $H$ 、埋深为  $Z$  的盖层总吸附阻力  $p_z$  便可由式(16)求得

$$\Delta p_a = \rho_w Z_e + \rho_{bw}(Z - Z_e) - \rho_w Z \quad (15) \quad p_z = -2(\rho_{bw} - \rho_w) \left( Z - \frac{1}{B} \ln \frac{\phi}{\phi(Z, H)} \right) \quad (16)$$

式中  $\rho_w$  为地层水密度, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_{bw}$  为地层平均密度, g/cm<sup>3</sup>。

三肇地区的计算结果如图 3。

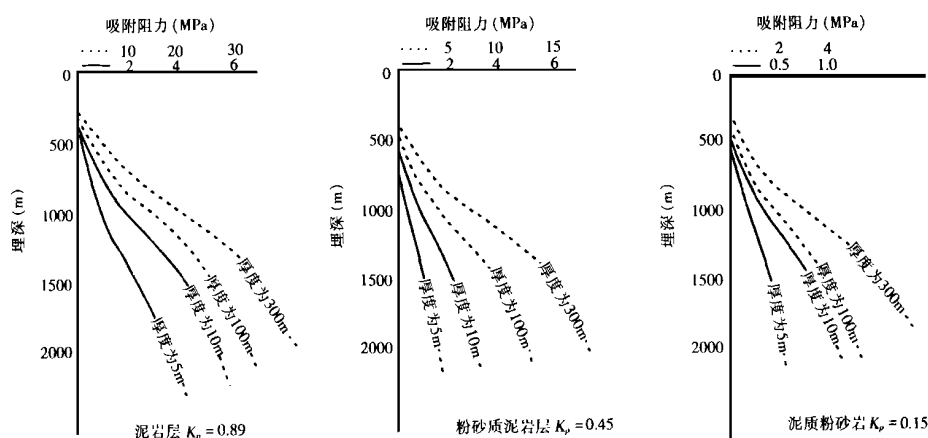


图3 盖层吸附阻力随埋藏深度变化曲线

Fig 3 The relational curve of absorption resistance of caprock vs depth

## 6 盖层封闭能力与厚度、埋深的关系

盖层封闭能力是烃类通过盖层向上以游离相态逸散的总阻力, 其大小等于盖层吸附阻力  $p_z$  与其底部岩石

最大连通孔隙的毛管压力  $p_c$  之和, 数学表达式为

$$p_1 = 2(\rho_{bw} - \rho_w) \left[ Z - \frac{1}{\beta} \ln \frac{\phi}{\phi_a(Z, H)} \right] + p_c \quad (17)$$

等式右边第一项为总的吸附阻力, 第二项  $p_c$  即为盖层底部岩石排替压力。

根据青山口组盖层岩性及埋深变化规律<sup>[6]</sup>, 计算了其底部岩石的排替压力(图 4); 根据青山口组盖层厚度及埋深, 计算了盖层吸附阻力(图 5)。根据青山口组盖层吸附阻力及其底部岩石的排替压力, 计算了盖层封闭能力(图 6)。

由计算结果编制的图中对比发现, 同一区域内盖层封闭能力要比盖层底部盖岩排替压力高 1 倍以上, 因此, 单纯用盖岩排替压力评价盖层会低估其绝对封闭能力, 盖层厚度越大, 估计的偏差越大。



图 4 青一段底盖岩排替压力等值图

Fig 4 The displacement pressure isogram of footwall of member one of Qingshankou

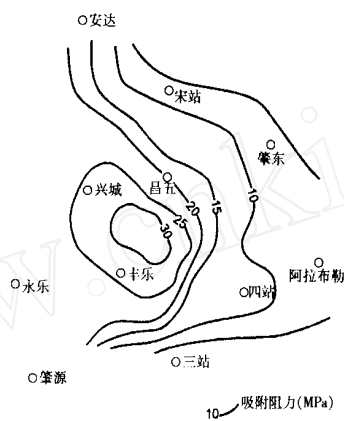


图 5 青山口组盖层吸附阻力等值图

Fig 5 The absorption resistance isogram of Qingshankou group

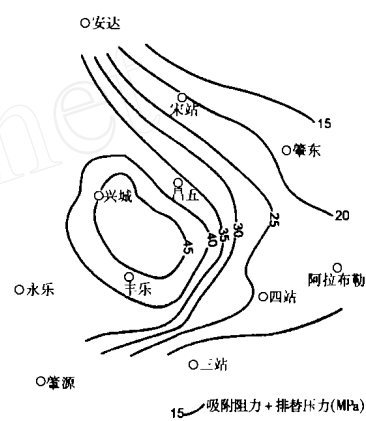


图 6 青山口组盖层封闭能力等值图

Fig 6 The sealing ability isogram of Qingshankou group cap rock

## 7 结 论

1. 盖层封闭能力等于盖层对孔隙水的吸附阻力与盖层底部岩石排替压力之和。
2. 吸附阻力随盖层厚度、埋深的增大而增大, 盖层封闭能力随盖层厚度、埋深增加而增强。盖层总吸附阻力是盖层流体超压的 2 倍。
3. 通过用计算超压所建立起来的盖层封闭能力与厚度、埋深之间的关系, 也可以求取那些不具明显欠压实的较薄盖层的封闭能力。
4. 通过盖层厚度与封闭能力的关系研究结果, 可以很好地解释为什么我国众多盆地中第四系浅层高孔隙度、高渗透率、极低排替压力盖层能封闭大量的生物气藏。

## 参 考 文 献

- [1] 李明诚等. 油气成藏保存条件的综合研究[J]. 石油学报, 1997, 18(2): 41~48.
- [2] 董晓光等. 区域盖层在油气聚集中的作用[J]. 石油勘探与开发, 1989, 16(4): 1~6.
- [3] 葛家理. 油气层渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1982.
- [4] 付 广. 三肇地区青山中组泥岩盖层封闭特性[J]. 天然气地球科学, 1995(2).
- [5] 庞雄奇等. 含油气盆地地质史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 10~16.
- [6] 吕延防. 盖层排替压力研究[J]. 大庆石油学院学报, 1993, (4): 1~8.

(本文收到日期 1998-04-28 修订日期 1998-06-30 编辑 孟伟铭)

and distribution of major hydrocarbon traps in the basin. Difference in the major oil and gas bearing series in different parts of the basin is partly related to the strength of strike-slip deformation.

**Key words:** Bohai Bay Basin; Cenozoic; strike-slip structure; basin formation; hydrocarbon accumulation

FORMATION AND CLASSIFICATION OF THE BASINS IN THE QINGHAI-TIBET PLATEAU ACTA 2000, 21(2): 21~26

LU Bing et al (*Northwest University*)

There exist four large fault belts in the Qinghai-Tibet Plateau from the north to the south. They are the southern Kunlun belt, the Longmuco-Jingshajiang belt, the Bengongcuo-Nujiang belt and the Yaluzangbu belt. According to these block boundaries, the plateau can be divided into six terraces including Lunlun, Bayankala, Qiangtang-Changdu, Gangdes and Himalaya. In each of the terranes there are many Mesozoic-Cenozoic remained basins which are overlapping basins. Based on the characteristics of the tectonic evolution and the sedimentary layers of the plateau, and referencing the plate tectonics theory, the plateau can be divided into twenty seven Mesozoic-Cenozoic remained basins. Based on their prototypes all of the basins can be classified into five categories which are interior rift basin, passive continental margin basin, fore-arc basin, inter-arc basin and back-arc basin.

**Key words:** Qinghai-Tibet Plateau; fault belt; interior rift basin; passive continental margin; remained basin

RESEARCH OF QUANTITATIVE RELATIONS BETWEEN SEALING ABILITY AND THICKNESS OF CAP ROCK ACTA 2000, 21(2): 27~30

LU Yang-fang et al (*Daqing Petroleum Institute*)

The ability of caprock sealing free hydrocarbons includes two aspects: one is displacement pressure of the bottom caprock and other is absorption resistance of capillary for water in caprock. The absorption resistance has something to do with lithology, degree of lithogenesis and thickness of caprock. The smaller the grain size of caprock is, the higher the content of clay mineral is, the stronger the degree of lithogenesis is and the thicker the caprock is, the stronger the absorption resistance and the sealing ability of caprock are. Based on the mechanism of low-velocity seepage of pore-fluid in caprock, the absorption resistance is equal to twice as much as ultra-pressure value of fluid in the pore of caprock. Calculated results reveal that the absorption resistance of Qingshankou formation in Sanzhao depression of Songliao Basin is approximately twice as much as the displacement pressure of the base for the caprock i.e. The real sealing ability of the caprock is approximately three times as big as the known ability in the past. The research result can be used to explain why Quaternary system caprocks with high porosity, high permeability, and ultra-low displacement pressure have sealed a great quantity organic gas in many basins in our country.

**Key words:** caprock; sealing ability; displacement pressure; absorption resistance

APPLICATION OF FRACTAL THEORY IN HIGH RESOLUTION PROCESSING OF SEISMIC DATA ACTA 2000, 21(2): 31~35

MENG Qing-wu et al (*Daqing Petroleum Exploration & Development Research Institute*)

At present, deep strata is the important field of natural gas exploration. Low resolution and low signal-noise ratio are big obstacles in the way of increasing the accuracy and level of deep strata exploration. According to seismic wave transmission theory, fractal method is adopted to combine seismic data with sonic log data together. A software package was developed to recover the high frequency of seismic that has been attenuated by strata absorption. Processed seismic data show the real underground structure in detail. Substantial seismic data has been processed and analysed in Wangjiatun-Shengping area and Gulong area. It shows that this software package is effective in enhancing the resolution and increasing the signal-noise ratio of seismic data.

**Key words:** deep strata; strata absorption; spectrum exponential; strata dimension; fractal theory; high resolution processing