

文章编号:1000-0550(2000)03-0465-04

超压盖层封烃能力的定量研究

吕延防 付广 张发强 付晓飞 王兴涛

(大庆石油学院勘探系 黑龙江安达 151400)

摘要 根据低速渗流理论及松辽盆地嫩江组一段超压盖层的实际资料,证实盖层超压形成的本质因素是盖层毛细管孔隙的吸附阻力。在此基础上,论证了盖层超压的封闭能力是该盖层超压值的2倍,超压盖层的总封闭能力是盖层底部岩石排替压力与2倍盖层超压值之和;结合超压盖层的成岩演化史及烃源岩生排烃史研究了超压盖层形成时间及其封烃有效性的评价方法,并以松辽盆地大庆长垣以东地区嫩江组一段区域盖层为例,研究了该盖层超压对其下部青山口组源岩层排出的油气封盖的有效性。根据超压盖层的特点,论述了超压盖层在油气保存过程中的意义。

关键词 盖层 封闭性 排替压力 吸附阻力 超压盖层

第一作者简介 吕延防 男 1957年生 教授 博士 煤田与油气地质

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

1 前言

超压盖层是指具有异常孔隙流体超压的油气保护层,所有研究者都承认,如果盖层中存在流体超压,可大大提高盖层对烃类的封闭能力,然而,超压盖层是如何提高对烃类封闭能力的?应如何对超压盖层作定量评价?迄今为止,还没有一个满意的回答。本文从盖层超压形成的低速渗透流机理研究出发,探讨盖层的超压封闭能力,指出超压盖层对油气的保存意义。

2 盖层超压的形成机理

泥岩中孔隙水的流动遵循低速渗流规律,描述这一渗流规律的运动方程为:

$$\bar{V} = \frac{K}{\mu} \left(1 - \frac{\lambda}{|grad_p|}\right) grad_p \quad grad_p > \lambda \text{ 时} \quad (1)$$

$$\bar{V} = 0 \quad grad_p < \lambda \text{ 时} \quad (2)$$

式中 \bar{V} —渗透速度, m/s;

K —渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;

μ —液体粘度, Pa·s;

$grad_p$ —流体压力梯度, Pa/m;

λ —常数,具有压力梯度的因次,渗流力学称之为启动压力梯度或起始压力梯度。

在 $grad_p < \lambda$ 时,流体不流动且速度 $V = 0$,当 $grad_p > \lambda$ 时,流体开始流动, λ 即为使微孔隙水开始流动所必须附加的外力。

将式(1)改写为:

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

式(3)具有明显的力学意义,等号右边第一项为粘滞阻力,第二项为吸附阻力,驱动力则为二者之和。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^[1]。

某一厚度的泥岩层,如果不存在断层或裂缝作为流体向外排出的通道,在其沉积埋藏的过程中,中部地层水的排出也遵循此低速渗流规律,该规律可由式(3)改写为:

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

式中 ΔP —流体压差,在超压盖层中,该压差即为流体超压, Pa;

L —泥岩层中最大超压点到该层顶部(或底部)的厚度, m;

λ_L —厚度为 L 的地层吸附阻力, Pa。

在泥岩压实的初期阶段,由于岩石孔径较大,渗透率较高,吸附阻力 λ_L 亦小,在正常静水压力梯度下,孔隙水容易排出,故而不形成明显的孔隙流体超压。随着地层埋藏深度的增加,地层压实程度增强,岩石密度增大,吸附阻力 λ_L 增大,渗透率 K 降低,泥岩层中部孔隙水的排出受到了 λ_L 大小的吸附阻力,使其在正常静水压力梯度下无法排泄流体,形成了明显的孔隙流体的滞流现象,泥岩层由此产生欠压实,滞流的孔隙水承担了部分上覆岩层重量,便形成了明显的孔隙流体超压。

由式(4)可见,泥岩层的孔隙流体超压由粘滞阻力和吸附阻力两部分组成。粘滞阻力和吸附阻力对泥岩层孔隙流体超压贡献的大小,可通过以下实际资料的分析知晓。

松辽盆地北部嫩江组为一套泥岩层段,其上下为渗透性较好的储层发育段,选择纯泥岩层(不含砂岩夹层)厚度相近、距断层较远、埋藏深度不同的富 62、杜 81 井和金 63 井作泥岩声波时差、孔隙度随深度变化散点图(图 1),发现三口井中嫩江组地层均存在着明显的欠压实现象,三口井中嫩江组泥岩层最大欠压实点的连线可代表该组泥岩层异常孔隙度的递减规律。由图中可见,嫩江组泥岩层埋深约 150 m(约距今 105.5 百万年)时便开始出现欠压实,当时的泥岩孔隙度约 35%,目前嫩江组泥岩层最大欠压实点处的孔隙度为 16.50%,二者差值为 18.50%,所以孔隙度的平均降低速率为 $5.5 \times 10^{-17}/s$ 。该区嫩江组泥岩层厚度约为 300 m;地层水粘度 μ 为 $10^3 Pa \cdot s$,三口井中嫩江组底界泥岩渗透率平均值为 $0.95 \times 10^{-6} \mu m^2$ 。根据以上数据计算,每平方米上该泥岩层中地层水向上下储层排运的平均速度应为 $8.25 \times 10^{13} cm^3/cm^2 \cdot s$,统一量纲后计算,最大超压点至泥岩层顶(或底)面所受的粘滞阻力($\mu vL/K$)为 0.013 MPa。利用等效深度法计算,金 63 井嫩江组泥层孔隙流体超压值为 14.3 MPa,比较二者发现,粘滞阻力对盖层孔隙流体超压的贡献是极其微小的。因此可以确认,盖层超压实质是由泥质岩孔隙的吸附阻力造成的。这是唯一用低速渗

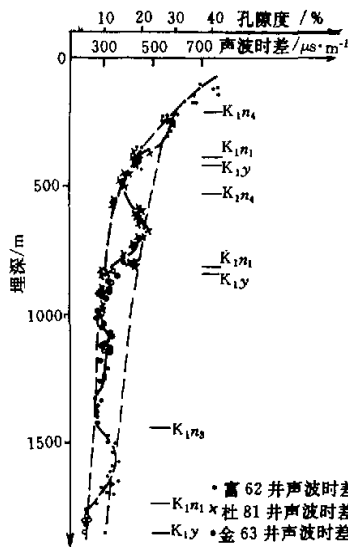


图 1 松辽盆地北部嫩江组盖层欠压实孔隙度演变规律
Fig. 1 Evolutionary law of uncompacted porosity of Nenjiang group caprock in the north of Songliao basin

流方程从机理上对泥岩层超压形成原因的解釋,这一解释还可以说明为什么薄层泥岩层内也有超压的存在,为什么埋藏在 5 000 m 以下、年龄很老的古生代泥岩层中也存在超压现象。

3 超压盖层的封烃能力及评价

超压带的流体在垂向上有向上下两个方向流动的趋势,之所以能保持 ΔPa 大小的地层超压,是因为在超压带上下同时受到大小相等的两个吸附阻力,设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 A 所需的最低压力为 P_1 (图 2),在 $P_1 - \Delta Pa$ 压差作用下,储层孔隙水向超压层中流动,其流动规律也可用低速渗流公式描述,即

$$P_1 - \Delta Pa = \frac{\mu \bar{v} H_2}{K} + \lambda_2 H_2 \quad (5)$$

则
$$P_1 = \Delta Pa + \frac{\mu \bar{v} H_2}{K} + \lambda_2 H_2 \quad (6)$$

如果流速近似为零

$$P_1 \approx \Delta Pa + \lambda_2 H_2 = 2\Delta Pa \quad (7)$$

在压力 P_1 ($2\Delta Pa$) 的作用下,流体质点可以达到最大超压点,在驱动压力衡定的情况下,流体质点则可继续向上运移,直至穿过整个盖层,所以,穿过超压盖层所需要的最低压力应该是 $P_1 = 2\Delta Pa$,即水穿盖层运移所需克服的总吸附阻力近似为 $2\Delta Pa$ 。

盖层之下储层中的油气,欲穿过超压盖层向上运移,除要克服 $2\Delta Pa$ 大小的盖层吸附阻力外,还要克服盖层底部岩石的排替压力,其要克服的总阻力可表示为:

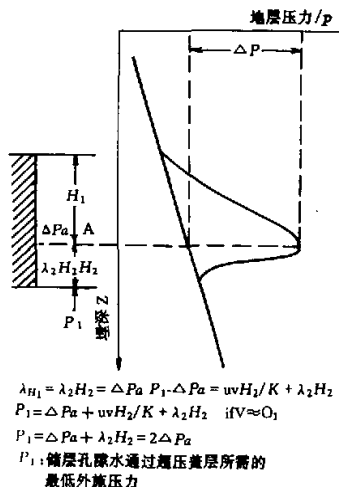


图 2 盖层超压分布与吸附阻力分布示意图
Fig. 2 Sketch map of distribution of ultra-pressure and adsorbed resistance of caprock

$$P_d = 2\Delta P_a + P_c \quad (8)$$

式中 P_d —超压盖层的封闭能力, Pa;

ΔP_a —超压盖层的最大超压值, Pa;

P_c —超压盖层底部最大连通孔隙的毛管压力, 即排替压力, P_a 。

上式表明, 超压盖层确实可以提高盖层的封烃能力, 其提高的量为盖层超压值的 2 倍。式(8)的确定, 使超压盖层封烃能力的定量评价变得非常简单, 只要求得盖层的最大超压值和盖层底部的排替压力, 超压盖层的量化封闭能力便可求出。根据该研究思路, 在计算了松辽盆地大庆长垣以东地区嫩一、二段盖层的超压值及其底部岩石的排替压力(图 3)的基础上, 编制了该层封烃能力评价图(图 4)。

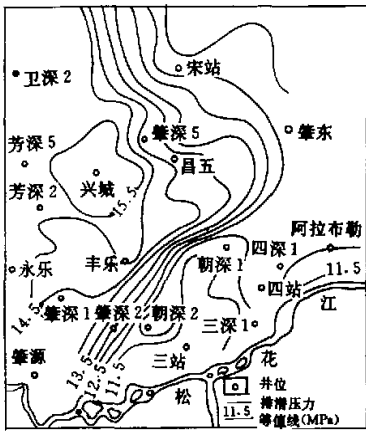


图3 嫩一、二段盖层底部排替压力等值图

Fig. 3 Isogram of displacement pressure at the bottom of Nenjiang group

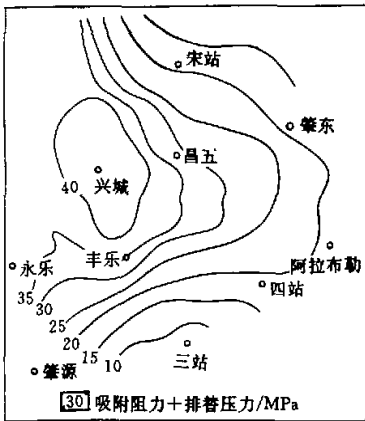


图4 嫩一、二段盖层封闭能力评价图

Fig. 4 The evaluation map of sealing capacity of caprock in Nenjiang 1 to 2 sections

由上两图的比较可见, 嫩一、二段盖层超压的存在, 可使盖层单纯靠其底部排替压力封闭烃类的能力提高了 1.3~2.6 倍。

4 超压盖层封烃的有效性

与圈闭的有效性一样, 只有当超压早于或与油气运移期同时形成, 盖层超压对油气的封闭才起作用, 超压才是有效的, 否则, 超压对油气的封闭是无效的。

声波时差随埋藏深度的变化曲线(图 5)可以表达超压盖层的成岩历史^[2], 图中可见, 当嫩一、二段超压

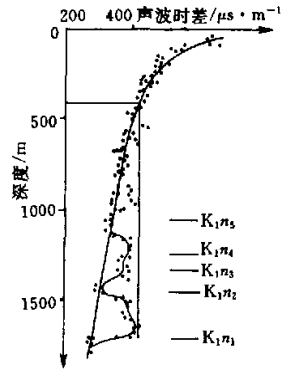


图5 松辽盆地升6井声波时差与深度关系

Fig. 5 Transit time differences vs. depth in Well Sheng 6, Songliao Basin

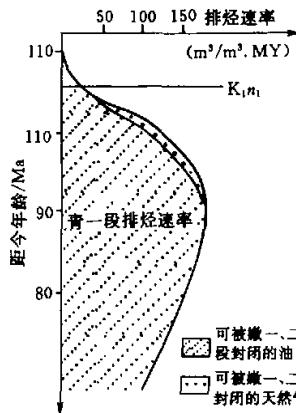


图6 嫩一、二段盖层对青一段源岩封烃有效性评价图

Fig. 6 The evaluation map on of effectiveness the capcocks from Nenjiang group 1 and 2 sections sealing the hydrocarbons generated from Qingshankou group 1 section

盖层埋深达到 C 点时, 孔隙流体不再向外排运, 孔隙度不再变化, 超压开始形成(实际上, 超压形成时间可能会更早些), 随着埋藏深度增加, 盖层超压增大, 超压封闭能力增强。C 点埋深即为超压形成时的深度, 对

应的地质时间为超压封闭形成时间。松辽盆地大庆长垣以东地区嫩一、二段是一套具有超压的区域性盖层,主要封闭其下部青山口组烃源岩层生排的油气,油气主要储存在姚家组地层中。由图5可见,嫩一、二段盖层超压形成深度约600 m,当时的地质时间距今约为100百万年,将盖层超压形成时间标注在源岩层排烃速率图上(图6),可清楚地了解到超压盖层的有效性。图6表明,本区青山口组源岩层在距今110百万年开始排烃,在距今90百万年达到排烃高峰期;嫩一、二段超压盖层形成时间尽管不早于源岩开始排烃期,但在源岩进入大量排烃期以前,超压就已形成,这对保存青山口组排出的油气十分有利。事实上,大庆长垣以东地区青山口组源岩层向上排运的油气基本被嫩一、二段超压盖层限定在姚家组储层之中,嫩一、二段盖层之上,几乎没发现青山口组源岩层排出的油气,可见,嫩一、二段超压盖层的有效性是相当好的。

5 超压盖层的油气保存意义

超压盖层与其它类型盖层相比,有其独特的优越性,具体表现为:

盖层超压增强了盖层对游离相烃类的物性封闭能力。前文已见,超压盖层的超压封闭能力是盖层超压值的2倍,作为盖层的这个附加的封闭能力,超压值越大,盖层的封闭能力增强的幅度也越大,松辽盆地大庆长垣以东地区嫩一、二段盖层,由于超压的存在,使其封闭能力提高了1.32~2.6倍。盖层超压对封闭能力增强的作用,在盖层埋藏较浅时尤为重要,由于盖层埋藏浅,成岩程度低,盖层毛管封闭能力差;盖层中的超压可起到良好的补充作用。

超压盖层具有封闭水溶烃能力。盖层中具有孔隙流体超压,意味着从超压盖层向下部储层具有压力递减的地层压力变化规律,在这种情况下,下部储层内的地层水在超压盖层的作用下,不可能穿盖层发生渗透,从而使溶解在储层孔隙水中的烃类被保存下来,这对水溶气藏的保存尤为重要。

超压盖层有生烃能力便增强了抑制烃类扩散能力^[3]。根据费克第二定律,只要存在烃浓度差,烃类就会从高浓度区向低浓度区扩散,在一定的地质历史阶段,天然气通过盖层的扩散,完全可以使一个具有相当规模的天然气藏破坏。地层中的天然气扩散浓度决定于地层水的溶解度,而地层水溶解度又受地层水温

度、压力、矿化度等影响。超压盖层中地层压力的增大,会大大增强其中水的溶解能力,如果超压盖层同时又具有生烃能力,则使之地层水的烃浓度明显增大,甚至出现向下部储层递减的烃浓度梯度,致使下部储层中的烃类通过盖层扩散逸失得到减弱,乃至被彻底抑制。

盖层中存在超压,表明盖层欠压实,其岩石的脆性较弱,塑性较强,断层往往容易在盖层段内终止,既使断层断穿了超压盖层,由于岩石具塑性也易使断面封闭,由此减少了油气沿断层的渗漏逸失。此外,由于超压盖层塑性较强,该类盖层不易形成裂缝,盖层本身的完整性不易遭到破坏,有利于下部油气的保存。

超压盖层可以有效地阻止地表水和细菌对油气藏的破坏。由于超压盖层的存在,使地表水不能通过盖层渗透下部储层之中,使油气藏免遭了地表水的冲洗破坏,同时,抑制了细菌随水渗入油气藏,也使油气藏免遭了细菌氧化的破坏。

总之,超压盖层是一种品质良好的盖层,它对油气的保存具有十分重要的意义。实际上,国内外绝大多数大油气藏,均有超压盖层伴生。

6 结论

(1) 盖层中超压形成的本质因素是盖层岩石中毛细管孔隙的吸附阻力,该吸附阻力随岩石的成岩程度的增加而增加,随盖层厚度的增大而增大。

(2) 超压盖层的封闭能力等于盖层底部岩石的排替压力与2倍盖层超压值之和。

(3) 盖层超压形成于烃源岩层排烃之前或同时,盖层超压是有效的,否则,盖层超压对油气保存无效。

(4) 超压盖层不仅增强了盖层封闭游离相烃类的能力,同时也起到了阻止水溶烃、扩散烃的逸失作用;盖层超压的存在,减少了盖层被裂缝、断层破坏的风险,也防止了地表水的渗入以及其所携带细菌对油气藏的破坏。

参 考 文 献

- 葛家理. 油气层渗流力学[M]. 北京:石油工业出版社,1982,28~29
- 吕延防,付广,高大峰. 油气藏封盖研究[M]. 北京:石油工业出版社,1996,60~65
- 付广. 欠压实泥岩是最有利的油气封盖层[J]. 小型油气藏,1997,(1):11~15

Quantitative Study on Sealing Ability of Ultra—Pressure Caprock

LU Yan-fang FU Guang ZHANG Fa-qiang FU Xiao-fei WANG Xing-tao

(Exploration Department of Daqing Petroleum Institute Anda 151400)

Abstract

According to theory of low - velocity seepage and the true information of ultra - pressure caprock of the first section in Nenjiang group in Songliao Basin, the essence factor forming ultra - pressure in caprock is discussed in this paper, it is adsorption resistance of capillary for water in caprock. It has been confirmed that the sealing ability of the ultra - pressure of caprock is equal to twice as much as ultra - pressure value of fluid in the pore of caprock, the total sealing ability of ultra - pressure caprock is equal to the sum of displacement pressure and twice ultra - pressure value of caprock. The forming time of ultra - pressure caprock, effectiveness of ultra - pressure caprock for sealing hydrocarbon and evaluating method are researched, and take the regional caprock of the first section in Nenjiang group to the east of Daqing placantiline in Songliao Basin as example, the effectiveness that the ultra - pressure caprock seals the oil and gas coming from the source rock of Qingshankou group is studied, the significance of ultra - pressure caprock for to protect hydrocarbons is generally discussed.

Key words caprock seal displacement pressure adsorption resistance ultra - pressure caprock