

深层气泥岩盖层封闭能力的综合评价

——以东濮凹陷杜桥白地区沙河街组三段泥岩盖层为例

谈玉明^{1,3}, 任来义^{2,3}, 张洪安³, 张金报³, 胥菊珍^{3,4}, 金振华³

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 石油大学地球资源与信息学院, 山东东营 257061;
3. 中国石化中原油田分公司勘探开发科学研究院, 河南濮阳 457001; 4. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 通过对东濮凹陷杜桥白地区沙河街组三段深层气盖层泥岩样品实验测试分析和研究, 结果表明孔隙度的变化主要受深度和层位的控制; 渗透率与深度关系密切, 受层位的影响不大, 与孔隙度等参数之间也没有明显的相关关系; 突破压力随深度加大而增大, 但这一趋势并不是十分突出; 突破压力与层位的对应关系较明显, Es_3^4 亚段的突破压力最大, Es_3^2 亚段次之, 而 Es_3^3 则相对较低。为了准确评价盖层封闭能力, 选择了孔隙度、渗透率、排替压力、孔径 4 个盖层评价的指标参数, 并根据其重要性的大小分别给予 0.1、0.3、0.5 和 0.1 的权系数, 以确定东濮凹陷深层气盖层的评价标准: 当综合评价的权值大于 0.8 时, 为封闭能力好的 1 类盖层; 当权值为 0.6 ~ 0.8 时, 为封闭能力中等的 2 类盖层; 而权值为 0.5 ~ 0.6 时, 为 3 类盖层; 权值为 0.3 ~ 0.5 时, 则为 4 类盖层; 而权值 < 0.3 时则为非盖层。

关键词: 泥岩封盖层; 物性; 封闭能力; 突破压力; 评价标准; 东濮凹陷

第一作者简介: 谈玉明, 男, 39 岁, 高级工程师, 油气勘探及油气藏综合研究

中图分类号: TE112.32

文献标识码: A

与油藏相比, 天然气藏对储层条件要求低, 而对盖层条件要求高^[1]。东濮凹陷是中国东部少有的富含天然气的盆地之一。由于其北部具有多套巨厚的大面积盐膏层作为油气优质盖层, 在以往的气藏研究中仅对盖层进行定性评价。但随着近年来东濮凹陷的杜寨、桥口、白庙地区作为天然气勘探的重要地区以来, 由于缺少盐膏沉积, 深入研究其泥岩盖层的封闭能力, 对天然气勘探具有重要的意义。

根据泥岩测试样品数据, 结合超压特征研究和区域沉积相展布特征, 对盖层封闭性进行了分析。泥岩测试样品共计 36 个, 分别采自沙河街组三段 1~4 亚段(以下简称为 Es_3^1 , Es_3^2 , Es_3^3 和 Es_3^4), 其中 Es_3^2 , Es_3^3 和 Es_3^4 亚段样品集中, Es_3^1 亚段只有几个样品。在地区分布上, 大量样品采自白庙、桥口和前梨园地区, 少量样品采自西洼。测试项目包括: 孔隙度、渗透率、平均密度、比表面积、总孔体积、平均孔径、突破压力和扩散系数。

1 物性特征

地下游离相的天然气要通过盖层孔隙喉道运

移, 必然受到盖层岩石与储集岩石之间排替压力差的阻挡, 当天然气的能量小于其盖层与储层的排替压力差时, 天然气就被封闭在盖层之下聚集起来。因此, 评价盖层毛管封闭能力的主要指标有排替压力和孔隙度、渗透率、密度、比表面积、微孔隙结构等。由于排替压力是由孔喉半径和弯曲度大小决定的, 并受孔隙度、密度和比表面等因素的影响, 因此, 盖层岩石排替压力是评价盖层物性封闭能力的有效参数。排替压力越大, 则封闭能力越强^[2~5]。

1.1 孔隙度和渗透率

孔隙度是指岩石中孔隙体积占岩石总体积的百分比, 而渗透率则是表征各孔隙之间的连通性或流体在岩石中流动难易程度的一个参数^[6], 因此, 可以通过对岩石孔隙度和渗透率的分析, 间接评价盖层的封闭性。通过对 31 个岩样进行常规物性分析, 孔隙度小于 2.5% 为 7 个, 占 22.5%; 分布在 2.5% ~ 5% 的为 11 个, 占 35%; 大于 5% ~ 8% 的 9 个, 占 29%; 大于 8% 的为 4 个, 占 13%。渗透率小于 $0.005 \times 10^{-3} \mu m^2$ 的样品 14 个, 占 45%; 介于 $0.005 \times 10^{-3} \sim 0.01 \times 10^{-3} \mu m^2$ 的样品 8 个, 占 26%; 大于 $0.01 \times 10^{-3} \mu m^2$ (小于 $0.05 \times$

$10^{-3} \mu\text{m}^2$) 的样品 9 个, 占 29%。根据李国平等提出的天然气盖层评价标准^[7~9], 该区的泥岩物性分布相当分散, 孔隙度好、中、一般的比例相近, 渗透率以中等为主。

测试岩样的深度范围主要集中在 3 300~5 000 m。在此区间内, 孔隙度随深度的变化可分为两个带(图 1a), 以 4 000 m 为界, 其上孔隙度分布分散, 为 2%~12%, 其下主要为 2%~5%, 4 000 m 深度是一个明显的分界面。在层位上, 由浅至深, 孔隙度分布区间缩小, 逐步收敛。 E_{s3}^2 亚段孔隙度分布最为分散, 由 11% 变化至 2.5%, E_{s3}^4 亚段则收缩在 2%~4% 的区间内(图 1b)。随层位加深, 孔隙度总体呈减小趋势。在地区分布上, 白庙地区最高, 桥口次之, 而杜寨地区最低, 这与不同地区盖层埋深增大相对应(图 1c)。由此可见, 孔隙度的变化主要受深度和层位的控制。孔隙度大于 6% 的高孔隙带主要出现在白庙地区的 E_{s3}^1 和 E_{s3}^2 亚段中, 桥口和杜寨地区只有极少数(3 个数据)的孔隙度值大于 6%。

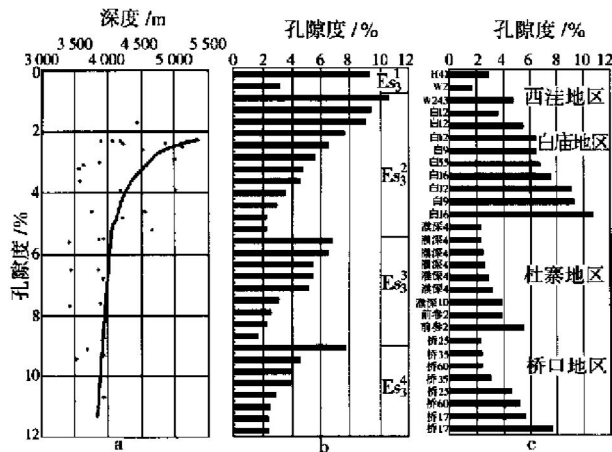


图 1 泥岩孔隙度随深度、层位和地区的变化

Fig. 1 Variations of claystone porosity with depths, horizons and areas

渗透率的变化与深度、层位和地区也有着明显的对应关系。在 3 800~4 200 m 的区间内, 出现渗透率异常高值。与该层段孔隙度的突变相对应(图 2a)。在层位上渗透率的分布均相当分散, 虽然各层段的平均值接近, 但都存在异常高值(图 2b)。在地区分布上, 白庙与桥口地区渗透率低, 而杜寨与西部深洼区明显偏高(图 2c)。上述结果说明, 渗透率与深度关系密切, 在深洼区(东洼的

濮深 4、濮深 10、西洼的胡 41 井区等) 的 4 000 m 左右最高, 受层位的影响不大, 与孔隙度等参数之间也没有明显的相关关系。

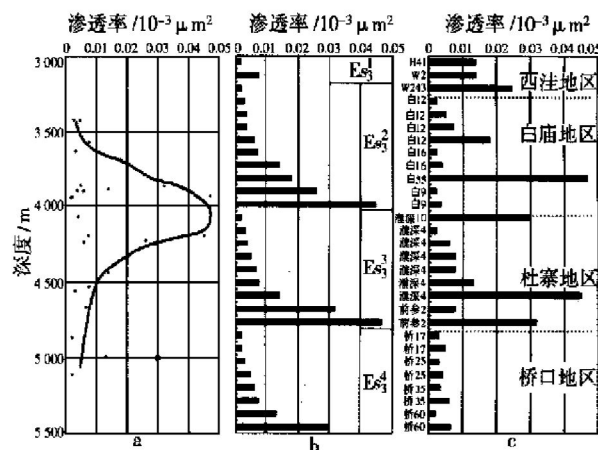


图 2 泥岩渗透率随深度、层位和地区的变化

Fig. 2 Variations of claystone permeability with depths, horizons and areas

1.2 微孔分布

封盖层的孔隙结构是决定封盖性能好坏的关键因素, 利用孔径和比表面可描述盖层微孔隙结构特征。

图 3a 显示了平均孔径、比表面和总孔体积随深度的变化规律。可以看出, 大约以深度 4 000 m 为界, 其上平均孔径分布在 3.5~5.5 nm, 较为分散, 其下平均孔径分布在 3.0~4.5 nm, 相对集中, 只有少数样品(占 11%)孔径偏大, 在 5.5~16 nm。其中小于 5 nm 的孔隙占 80%, 总体以微孔径占优势。

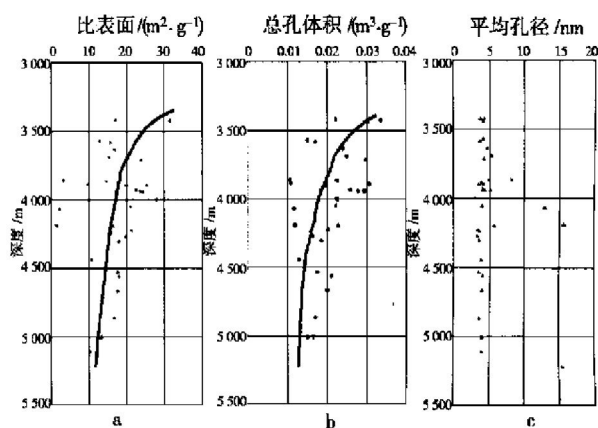


图 3 泥岩微孔隙结构特征

Fig. 3 Characteristics of micro-pore structures in claystones

比表面和总孔体积随深度的变化规律相似, 具有指数曲线形态, 随深度增大而减小(图 3b, c)。在深度 4 000 m 以上数据较大, 且分布区间宽, 下部则明显趋于集中。

盖层微孔结构特征主要受到泥质岩沉积和成岩作用的影响。特别是岩石粒度、磨圆度、压实作用强度、粘土矿物的接触形式等影响。平均孔径、比表面、总孔体积与岩石密度、孔隙度之间均存在较好的相关关系。

1.3 突破压力

突破压力是反映盖层物性封闭能力的最根本、最直接的参数。虽然渗透率、孔隙度、密度、比表面积和微孔隙结构等微观测试参数从不同的侧面反映盖层的物性封闭能力, 但由于突破压力是由孔喉半径和弯曲度大小决定的, 而孔喉半径又受粒度、磨圆度等因素制约, 比表面积又是反映粒级的指标之一, 岩石密度和孔隙度是与孔喉半径关联的参数。所以, 排替压力与这些评价参数之间是相关的。

根据 26 个测试样品统计, 突破压力大于 10 MPa 样品 12 个, 占 46%, 介于 5~10 MPa 的样品 9 个, 占 35%, 小于 5~1 MPa 的样品 4 个, 占 11%, 小于 1 MPa 的仅 1 个样品, 占 2%。根据李国平等研究^[9], 在深度 3 500 m 以下, 封盖 50 m 的气柱高度, 突破压力应大于 7.5 MPa。而本区突破压力大于 7.5 MPa 的岩样占 58%, 说明本区泥岩封闭能力以好为主(但优势不明显), 还有部分地区和层位具有中等的封闭能力。

图 4a, 4b 和 4c 分别展示了突破压力随地区、层位和深度的变化规律。可以看出, 虽然随深度加大, 突破压力增大, 但这一趋势并不十分突出, 在深度 3 400~4 000 m, 突破压力变化较大, 分布区间在 0.5~16 MPa; 4 000 m 以下, 突破压力快速增大, 多数分布在 15~17 MPa(图 4c)。

突破压力与层位的对应关系较明显(图 4b), Es_4^3 亚段的突破压力最大, 集中分布于 16 MPa 上下, Es_2^2 亚段次之, 而 Es_3^3 则相对较低, 多数集中在 6 MPa 附近。

突破压力大小与地区也有着一定的对应关系, 桥口地区和杜寨地区突破压力值高, 而白庙地区明显偏低, 这与白庙地区样品深度较浅, 孔隙度偏高, 层位上以 Es_2^2 和 Es_3^3 为主有关(图 4a)。

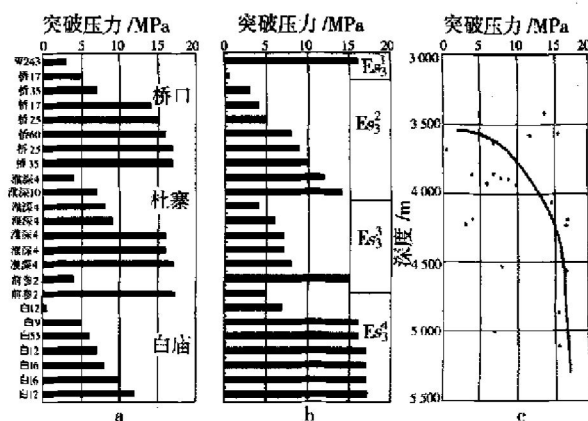


图 4 盖层突破压力随地区、层位和深度的变化

Fig. 4 Variation of caprock's breakthrough pressure with depths, horizons and areas

突破压力受控于孔隙度、岩石密度、比表面等, 因此它们之间有着良好的相关性(图 5a, b)。但突破压力与渗透率的相关关系表现为分段性(图 5c), 当渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu m^2$ 时, 突破压力可以变化很大(从 4 MPa 到 17 MPa), 当渗透率大于 $0.2 \times 10^{-3} \mu m^2$ 时, 突破压力迅速下降, 在 7 MPa 以下。说明当渗透率大过一定界限时, 盖层的封闭性就会明显降低, 甚至消失。

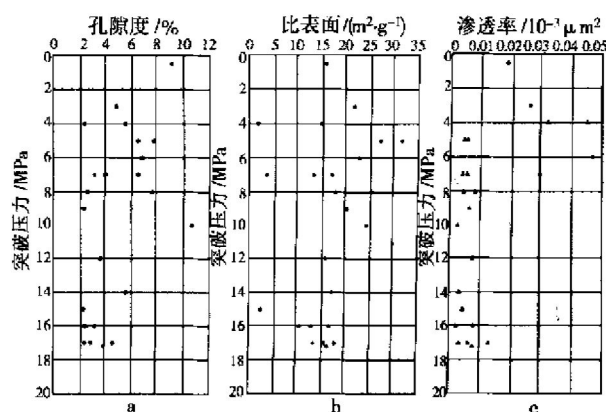


图 5 盖层突破压力的影响因素

Fig. 5 Factors influencing the breakthrough pressure of cap rocks

2 综合评价

用于盖层物性封闭能力评价的参数很多, 但决定毛细管封闭能力的最主要参数是排替压力或突破压力。其他参数可以进一步分为两类: 一类是排替压力的派生参数, 即由排替压力计算得出,

如最大连通孔径、最大封闭气柱高度等,这类参数与排替压力具有同等意义;另一类是相关参数,即与排替压力具有相关性,如渗透率、比表面、孔隙度等,或是排替压力的影响因素,如粘土矿物的类型与含量、平均孔径等。

根据各类参数对盖层封闭能力度量的准确性和重要性,结合前人在大量统计分析基础上得出的认识^[2~11],选择了孔隙度、渗透率、排替压力、孔径 4 项参数作为盖层评价的指标。将所有评价

参数看作 1,然后根据 4 个参数的相对重要性分别给予 0.1、0.3、0.5 和 0.1 的权系数,其中排替压力在盖层评价中最重要,给予 0.5,而相对次要的孔隙度及微孔含量给予较低的系数 0.1;渗透率介于排替压力及孔隙度之间,则给予系数 0.3。当综合评价的权值大于 0.8 时,为 1 类盖层;权值为 0.6~0.8 时,为 2 类盖层;权值为 0.5~0.55 时为 3 类盖层;权值为 0.3~0.45 时为 4 类盖层;权值<0.3 时则为非盖层(表 1)。

表 1 盖层物性封闭综合评价标准

Table 1 Comprehensive evaluation standards of sealing quality of cap rocks

权 值	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	排替压力/MPa	孔径小于 10 nm 孔隙含量/ %	评价结果(类别)
> 0.8	< 2.5	< 10^{-3}	> 10	> 85	1 类(好)
0.6~ 0.8	2.5~ < 5	$10^{-3} \sim < 10^{-2}$	5~ 10	75~ 85	2 类(中等)
0.5~ < 6	5~ 8	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	1~ < 5	50~ < 75	3 类(一般)
0.3~ < 5	> 8	> 10^{-1}	< 1	< 50	4 类(差)
< 0.3					非储层

根据上述评价标准,从东濮凹陷各项盖层参数的变化特点,分别按深度、层位和地区对盖层封闭性能进行了评价。结果表明:4 000 m 以下的盖层(1 类)封闭性能好于 4 000 m 以上(2 类);随层

位变深盖层封闭性能变好,Es₃⁴ 亚段为 1 类盖层,Es₃³ 和 Es₃² 亚段为 2 类盖层;在地区分布上,杜寨和桥口地区的盖层封闭性能良好,为 1 类,白庙地区及西洼边部地区为 2 类(表 2)。

表 2 东濮凹陷泥岩盖层物性封闭评价

Table 2 Evaluation of sealing quality of cap rocks in Dongpu depression

评价分类方式		孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	排替压力/MPa	孔径小于 10 nm 孔隙含量/ %	评价结果	
按深度评价	4 000 m 以上	6.1	0.009 9	8.2	100	0.7	中等
	4 000 m 以下	3.2	0.001 28	12.5	87	0.88	好
按层位评价	Es ₃ ²	5.8	0.012 1	7.8	92	0.64	中等
	Es ₃ ³	4.3	0.013 6	7.8	91	0.71	中等
	Es ₃ ⁴	3.8	0.008 6	14.0	100	0.87	好
按地区评价	白庙	7.3	0.010 1	6.9	100	0.72	中等
	桥口	4.2	0.004 1	13.0	87	0.88	好
	杜寨	2.8	0.015 9	11.0	89	0.87	好
	其他	3.8	0.018 7	8.1	100	0.75	中等

致谢:本文是在中原油田分公司与中国地质大学(北京)樊太亮教授合作的“东濮凹陷深层气成藏机理与有利区带评价”的基础上完成的,泥岩样品实验室分析由中国石油勘探开发研究院廊坊分院天然气所完成,在此向有关人员一并致谢!

参 考 文 献

1 蒋有录. 气藏与油藏形成和保存条件差异问题讨论[J]. 天然气地球科学, 1998, 9(2): 1~ 4
2 吕延防, 付广, 高大岭. 油气藏封盖研究[M]. 北京: 石油工业出

- 版社, 1996. 4~ 30
- 3 游秀玲. 天然气封盖层评价方法探讨[J]. 石油与天然气地质, 1991, 12(3): 1~ 10
- 4 郝石生, 陈章明. 天然气藏的形成与保护[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995. 5~ 96
- 5 许化政. 渤海湾盆地泥岩封闭性能研究[J]. 天然气工业, 1991, 11(6): 1~ 5
- 6 戴启德, 纪友亮. 油气储层地质学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996. 1~ 184
- 7 邓祖佑, 王少昌, 姜正龙, 等. 天然气封盖层的突破压力[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 136~ 138
- 8 付广, 陈章明, 吕延防. 泥质岩盖层性能综合评价方法探讨[J]. 石油实验地质, 1998, 20(1): 80~ 86
- 9 李国平, 郑德文, 欧阳永林. 天然气封盖层研究与评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996. 1~ 80
- 10 房德全, 宋岩, 夏新宇. 准噶尔盆地南缘西部天然气封盖层的有效性[J]. 石油实验地质, 1999, 21(2): 137~ 140
- 11 郝石生, 黄志龙. 天然气运聚动平衡及其应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994. 3~ 55
- 7 邓祖佑, 王少昌, 姜正龙, 等. 天然气封盖层的突破压力[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 136~ 138

COMPREHENSIVE EVALUATION OF SEALING CAPACITY OF CLAYSTONE IN DEEP GAS RESERVOIR

—AN EXAMPLE OF E_{s3} CLAYSTONE CAPROCK IN DUQIAOBAI AREA IN DONGPU DEPRESSION

Tan Yuming^{1,3} Ren Laiyi^{2,3} Zhang Hong'an³ Zhang Jinbao³ Xu Juzhen^{3,4} Jin Zhenhua³

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong;

2. Geo-Resources and Information College, Petroleum University, Dongying, Shandong;

3. Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan; 4. China University of Geosciences, Beijing)

Abstract: The result from the experimental analyses of the 3rd member of Shahejie Fm (E_{s3}) claystone's sealing capacity in the deep gas pools in Duqiaobai area in Dongpu depression shows that the variation in porosity has been controlled by depth and horizons, whereas the permeability has close relation with depth, but it is almost not affected by the horizons, and doesn't have obvious relation with porosity and other related parameters, too. The breakthrough pressure is getting greater with the increase of depth, but this trend is not very prominent. There is a close relation between the breakthrough pressure and the horizons, among which, the E_{s3}^4 has the biggest breakthrough pressure, then the E_{s3}^2 comes next, and the E_{s3}^3 has relatively low breakthrough pressure. For the sake of evaluating the sealing capacity of cap rock accurately, porosity, permeability, displacement pressure, and pore diameter have been selected as the indexes of cap rock evaluation, and weight coefficients of 0.1, 0.3, 0.5, and 0.1 have respectively been given to them based on their importance, so as to determine the evaluation standards caprocks of deep gas pools in Dongpu depression: when the weight coefficient is larger than 0.8, the cap rock belongs to I type, with good sealing capacity; if it is in the range of 0.6~ 0.8, the cap rock belongs to type II, having moderate sealing capacity; when it is in the range of 0.5~ 0.55, the cap rock belongs to type III; and if it is in the range of 0.3~ 0.45, the cap rock belongs to type IV; when it is less than 0.3, it is then of non-caprock.

Key words: claystone caprock; reservoir quality; sealing capacity; breakthrough pressure; evaluation standard; Dongpu depression.