文章编号:1673-5005(2018)01-0021-11

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2018.01.003

### 盖层有效厚度计算方法及应用

马存飞<sup>1,2</sup>, 董春梅<sup>1,2</sup>, 林承焰<sup>1,2</sup>, 尹 鹤<sup>3</sup>, 谢晶晶<sup>4</sup>, 栾国强<sup>1</sup>, 曾 芳<sup>1</sup>, 孙小龙<sup>1</sup>, 沈正春<sup>5</sup>

(1.中国石油大学地球科学与技术学院,山东青岛 266580;2.山东省油藏地质重点实验室,山东青岛 266580;
3.新疆油田公司勘探开发研究院,新疆克拉玛依 834000;4.中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200335;
5.中国石化胜利油田物探研究院,山东东营 257022)

**摘要**:基于盖层非均质性导致盖层内部产生物性封闭能力的强弱差异,提出盖层有效厚度的计算方法。综合利用泥 质岩盖层和砂岩储层的薄片、扫描电镜、突破压力、孔隙度和渗透率等分析测试资料确定盖层和储层的分界,包括突 破压力界限、临界岩性(粒度)和物性界限,进而建立盖层物性封闭评价标准;利用自然伽马曲线、声波时差曲线和分 析测试资料建立测井解释模型,定量识别盖层岩性并计算孔隙度、渗透率和突破压力;根据盖层物性封闭评价标准 综合评价盖层中每种岩性的物性封闭等级,剔除不具有封闭性的部分,从而获得有效厚度。应用该方法表明:X 气藏 盖层和储层的突破压力界限为 2 MPa、临界岩性(粒度)是泥质粗粉砂岩、孔隙度界限约6%、渗透率界限约0.02× 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,并将盖层物性封闭能力划分为 I ~ V5 个等级,剔除不具有封闭能力的Ⅳ和Ⅴ,获得单套盖层的有效厚度 为4~10 m。气柱高度和有效厚度的相关关系证明该方法是适用的,继而利用盖层有效厚度对突破压力进行加权平 均获得盖层等效突破压力,有效地确定盖层的整体物性封闭能力为中等。

关键词:盖层;有效厚度;物性封闭;评价标准;测井解释;计算检验;等效突破压力

中图分类号:TE 122.2 文献标志码:A

**引用格式**:马存飞,董春梅,林承焰,等. 盖层有效厚度计算方法及应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018, 42(1):21-31.

MA Cunfei, DONG Chunmei, LIN Chengyan, et al. Calculation method and application of cap rock's effective thickness [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2018, 42(1):21-31.

## Calculation method and application of cap rock's effective thickness

MA Cunfei<sup>1,2</sup>, DONG Chunmei<sup>1,2</sup>, LIN Chengyan<sup>1,2</sup>, YIN He<sup>3</sup>, XIE Jingjing<sup>4</sup>, LUAN Guoqiang<sup>1</sup>, ZENG Fang<sup>1</sup>, SUN Xiaolong<sup>1</sup>, SHEN Zhengchun<sup>5</sup>

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Reservoir Geology Key Laboratory of Shandong Province, Qingdao 266580, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China;

4. Shanghai Branch of CNOOC Limited, Shanghai 200335, China;

5. Geophysical Research Institute of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257022, China)

**Abstract**: A method of computing cap rock's effective thickness is proposed based on that cap rock's heterogeneity may result in different capillary sealing ability within cap rock. Using data of thin section, SEM, breakthrough pressure, porosity, permeability and other test data of argillaceous cap rock and sandstone reservoir, the boundary between cap rock and reservoir

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05009-001);国家留学基金项目(201506450031)

作者简介:马存飞(1987-),男,博士,博士后,研究方向为非常规油气地质和油藏描述。E-mail:mcf-625@163.com。

通讯作者:董春梅(1963-),女,教授,博士,研究方向为矿物岩石学、沉积相、储层地质学及沉积盆地流体矿产。E-mail:dongchunmeil@ 126.com。

收稿日期:2017-06-22

can be defined, which includes breakthrough pressure limit, critical lithology(grain size) and petrophysics limit. Subsequentlythe evaluation criteria of cap rock's capillary sealing ability is established. With gamma ray curve, interval transit time curve and test data, a logging interpretation model is established to quantitatively recognize cap rock's lithology and to calculate porosity, permeability and breakthrough pressure. A comprehensive evaluation on capillary sealing ability of cap rock has been made to first remove the cap rock with no capillary sealing ability and then to obtain the effective thickness. Our results show that between cap rock and reservoir of X gas reservoir, the breakthrough pressure limit is 2 MPa; the critical lithology (grain size) is argillaceous coarse siltstone; the porosity limit is about 6%, and the permeability limit is about  $0.02 \times 10^{-3}$  $\mu$ m<sup>2</sup>. Cap rock's capillary sealing ability has been divided into five grades from I to V. By removing grade IV and V which correspond to no capillary sealing ability, the effective thickness of single cap rock is obtained between 4 and 10 m. Correlation between the height of gas column and the effective thickness suggests the robustness of the method. Based on the effective thickness, a weighted average of breakthrough pressure has been taken to obtain equivalent breakthrough pressure, and the whole capillary sealing ability of cap rock has been evaluated as moderate effectively.

**Keywords**: cap rock; effective thickness; capillary sealing ability; evaluation criteria; logging interpretation; calculation and examination; equivalent breakthrough pressure

在油气成藏要素中,生烃是基础,圈闭是条件, 保存是关键,而盖层封闭性是保存条件研究的核心 内容<sup>[1]</sup>。其中,盖层厚度对油气的保存具有积极作 用,是评价盖层封闭性的主要参数之一<sup>[29]</sup>。为了更 确切地反映盖层厚度对油气封闭性的影响,曹成 润<sup>[10]</sup>提出了盖层有效封盖厚度的概念,即对发育一 定倾角的盖层来讲,当无断层和裂缝破坏时盖层中 能够封闭油气的铅直厚度。吕延防[11]、付广等[12-13] 分别提出并应用了盖层断接有效厚度的概念,即盖 层被断层破坏后,断层两盘的盖层未被完全错开,彼 此仍对接的那部分厚度。上述盖层有效厚度的定义 从几何角度出发,重点考虑了盖层的产状和断裂的 发育情况,适用于均质的盖层。当盖层岩性不纯、局 部发育微裂缝或物性与储层差异性较小时,盖层内 部的非均质性同样导致封闭能力的差异性,形成封 闭能力强的部分、封闭能力弱的部分和无封闭能力 的部分。笔者在前人研究基础上,将盖层有效厚度 定义为"剔除由断层破坏、微裂缝发育和盖层非均 质性等因素导致的盖层中不具有封闭性的部分,得 到真正具有封闭性部分的铅直厚度",并利用 X 气 藏实际数据,对盖层有效厚度的内涵、计算方法、检 验及应用进行分析。

#### 1 盖层有效厚度的内涵

盖层是指位于储层之上阻止油气向上运移的致 密岩层。在砂泥岩互层发育且厚度很大的地层剖面 中,由于缺少稳定的标准层控制,划分盖层的发育段 是困难的。油气藏存在于一定的流体系统中,处于 该系统中的盖层具有关键的封闭效应,而稳定分布 的区域性盖层(标准层),地层界限(通常是不整合) 和大型断裂等均是控制流体系统的边界。基于此, 本文中定义盖层发育段是在地层格架内,储层顶部 到地层界限(级别通常为"组"及以上)或大型断裂。 不同类型的油气藏,定义盖层发育段的方法相同,但 断层油气藏和地层油气藏比较特殊。具体来讲,背 斜油气藏和岩性油气藏中盖层发育段定义为储层顶 部到区域性盖层、地层界限或大型断裂,而断层油气 藏和地层油气藏除了存在盖层封闭作用之外,断层 和不整合也可能具有独立封闭能力,此时需要分析 断层和不整合的结构及其对油气的封闭作用,判断 断层和不整合之上或侧向的地层是否对油气藏具有 封闭贡献,从而更合理地确定盖层发育段。

盖层封闭能力受沉积环境、成岩作用和断裂等 宏观因素控制,具体受孔隙结构和流体性质等微观 因素影响<sup>[14]</sup>。盖层的微观封闭机制包括物性封闭、 烃浓度封闭和超压封闭 3 种<sup>[15]</sup>。X 气藏盖层不具 备生烃能力,且不发育超压,因此盖层封闭能力主要 为物性封闭。通常采用实验测试的毛细管力近似为 突破压力或排替压力来表征盖层物性封闭能力<sup>[16]</sup>, 根据毛细管力产生机制,当流体性质一定时,毛细管 力主要受孔喉半径影响,故盖层物性封闭能力主要 受孔隙结构控制。

泥质岩盖层和砂岩储层在孔喉类型及大小、 壁面特征、孔喉比、迂曲度、连通情况、孔渗和束缚 水饱和度等孔隙结构方面的差异性是物性封闭产 生的根本,是盖层有效厚度的微观基础。泥质岩 盖层中孔喉类型以粉砂级或黏土级碎屑颗粒粒间 孔和黏土矿物晶间孔为主,富有机质泥岩中还发 育有机质孔<sup>[17]</sup>,孔喉尺度主要为纳米级,壁面粗 糙,迂曲度大,孔喉配位数低,连通性差,而砂岩储 层中孔喉类型主要为砂级碎屑颗粒粒间(溶)孔和 粒内(溶)孔,尺度为微米级,壁面光滑,迂曲度小, 孔喉配位数高,连通性好,由此造成泥质岩盖层较 砂岩储层孔渗低,束缚水饱和度高,故突破压力 大,产生物性封闭(图1)。

泥质岩盖层的非均质性导致了盖层物性封闭能 力的差异性,是盖层有效厚度的宏观条件。对于单套 盖层来讲,由于岩性不纯、夹层及纹层发育或裂缝存 在使得盖层内部具有强非均质性,造成孔隙结构的差 异性,导致盖层内部物性封闭能力具有差异性,从而 产生封闭能力强弱不同的部分和无封闭能力的部分。 对于砂泥岩互层发育的多套盖层来讲,不仅单套盖层 内部存在非均质性,而且盖层之间也存在非均质性, 形成具有不同封闭能力的盖层,甚至由于砂体侧向连 接造成盖层封闭能力失效,因此盖层内部和盖层之间 的非均质性导致盖层物性封闭能力的差异性,而只有 那些具有封闭能力的部分对封闭油气才是有贡献的, 其单层厚度或累加厚度为有效厚度。



图 1 泥质岩盖层和砂岩储层孔隙结构差异性对比

Fig. 1 Difference comparison of pore structure between argillaceous cap rock and sandstone reservoir

#### 2 盖层有效厚度的计算

盖层和储层具有相对性,因此盖层有效厚度求取 的关键是建立盖层和储层的判别标准。本文中的研 究思路是利用泥质岩盖层和砂岩储层的分析测试资 料,通过对比首先确定盖层和储层的界限,具体参数 包括突破压力、岩性(粒度)、孔隙度和渗透率,进而建 立盖层的物性封闭评价标准:然后利用测井资料和分 析测试资料建立评价参数的解释模型,识别岩性和计 算孔隙度、渗透率及突破压力:最后参照物性封闭评 价标准综合确定盖层中不具有封闭性的部分,并从盖 层厚度中剔除,从而得到有效厚度。本文中以X 气藏 为例介绍盖层有效厚度的计算方法。X 气藏构造平 缓,断裂不发育,圈闭类型属于大型宽缓背斜,闭合高 度大且天然气充注程度高。气藏埋深3000~4000 m,其上部为正常压力系统,而下部发育异常超压,地 温梯度较高,约为3~4℃/100 m。盖层属于辫状河三 角洲泛滥平原沉积,非均质性强,突出表现为砂泥岩 薄互层发育、累积厚度大且内部岩性不纯,包含泥岩、 粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、含泥粉砂岩和粉砂岩等,其 中以粉砂质泥岩和泥质粉砂岩为主。盖层岩石中碎 屑颗粒粒度范围跨度大,介于黏土级~巨砂级别(小 于 0.0039~2 mm).但主要分布在细粉砂~粗粉砂范 围内(0.0039~0.0625 mm)。此外,盖层粉砂含量 高、弹性模量大、脆性强,裂缝较发育。

#### 2.1 盖层物性封闭评价标准的建立

2.1.1 突破压力界限

在盖层物性封闭评价标准建立过程中,盖层和储层的界限是首要解决的问题,而两者的本质区别体现在孔喉结构的差异上,由此导致突破压力不同,故突破压力是划分盖层和储层的有效指标。X 气藏盖层和储层的突破压力测试数据统计表明 97.7%以上的砂岩储层突破压力小于2 MPa,而泥质岩盖层的突破压力普遍大于2 MPa,两者的数据分布趋势线的交点约为2 Ma(图2),据此判断两者的突破压力界限为2 MPa。

盖层的作用是阻止油气运移,其结果是在储层中 形成油气聚集。当油气供给充足时,对于一套砂泥岩 组合,在油气充注过程中如果上覆泥质岩的封闭能力 比下伏砂岩大,那么它能够捕获一部分油气,且封闭 性越强捕获的油气越多,含油气情况越好。相反地, 如果上覆泥质岩的封闭能力与下伏砂岩相近或更低, 那么它显然是不具有封闭能力的,无法捕获油气。所 以,储层中含油气好坏在一定程度上可以反映盖层的



封闭能力,特别是油水同层或气水同层对判断盖层和 储层的突破压力界限有重要作用。对于油水同层或 气水同层,随着盖层突破压力减小,封闭能力减弱,储 层中的油气不断散失,含油气饱和度降低,而当盖层 突破压力降低到不能封闭油气时,油水同层或气水同 层将变为水层。换言之,在油水同层或气水同层中存 在一个最低的突破压力,使得油水同层或气水同层中存 在一个最低的突破压力,使得油水同层或气水同层保 持稳定,若盖层低于该突破压力,气水同层将会消失 而变为水层,此时盖层失效而变为储层,因此油水同 层或气水同层中直接盖层的突破压力下限可以作为 盖层和储层的界限。X 气藏储层中含油气性包括气 层、气水同层、干层和水层,其中气层的直接盖层的突 破压力大于4 MPa,气水同层的直接盖层的突破压力 下限约2 MPa(图3),故将2 MPa 作为盖层和储层的 突破压力界限是可靠的。



2.1.2 临界岩性(粒度)

由于盖层的物性封闭能力主要受孔隙结构控制, 而岩性是影响孔隙结构的主要因素,故突破压力与岩 性之间存在良好的相关性。随着岩石中碎屑颗粒粒 度变粗,孔喉增大,孔隙结构变好,突破压力降低,物 性封闭能力减弱(图4)。具体来讲,粉砂质泥岩和泥 质细—极细粉砂岩的碎屑颗粒粒度小于0.015 625 mm,突破压力均大于8 MPa,物性封闭能力好;泥质中 粉砂岩的碎屑颗粒粒度为0.015 625 ~0.031 25 mm, 突破压力最小值为4 MPa,物性封闭能力中等;泥质 粗粉砂岩的碎屑颗粒粒度为0.03125~0.0625 mm. 突破压力下限约2 MPa,物性封闭能力差;泥质极细 砂岩的碎屑颗粒粒度为 0.062 5~0.125 mm,突破压 力为1~2 MPa,物性封闭能力极差;细砂岩的碎屑颗 粒粒度为 0.125~0.25 mm,突破压力小于 1 MPa,一 般没有物性封闭能力,但当细砂岩中存在少量灰质 时,突破压力能够增大至约1.5 MPa(图4)。从突破 压力和岩性的相关关系能够看出泥质粗粉砂岩的突 破压力下限约2 MPa,这与盖层和储层的突破压力界 限一致,因此泥质粗粉砂岩可以作为判别盖层和储层 的临界岩性,其中碎屑颗粒粒度比粗粉砂小的岩性, 如粉砂质泥岩、泥质细—极细粉砂岩和泥质中粉砂岩 的突破压力最大值、平均值和最小值均大于2 MPa. 物性封闭能力更强,而碎屑颗粒粒度较粗粉砂大的岩 性,如泥质极细砂岩、灰质砂岩和细砂岩的突破压力 最小值均小于2 MPa,通常物性封闭能力极差或不具 有物性封闭能力(图5)。



2.1.3 物性界限

与突破压力类似,孔隙度和渗透率也主要受岩 性和孔隙结构影响,三者具有良好的相关性<sup>[16]</sup>。随 着岩性变粗,孔隙度增加,渗透率增大,而突破压力 减小,物性封闭能力减弱。当孔隙度和渗透率增加 到一定值时,突破压力降低到临界标准,盖层将失去 物性封闭能力。当突破压力界限为2 MPa 时,盖层 的孔隙度和渗透率分别为6%和0.02×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>(图 6、7),这与临界岩性泥质粗粉砂岩的孔隙度上限和 渗透率上限吻合(图8)。泥质中粉砂岩、泥质细— 极细粉砂岩和粉砂质泥岩的孔隙度上限和渗透率上 限均小于6%和0.02×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>,并且依次降低,而 突破压力下限则依次增加,物性封闭能力逐渐增强, 属于盖层;泥质极细砂岩、灰质砂岩和细砂岩的孔隙 度上限和渗透率上限均大于6%和0.02×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>, 并且逐渐升高,而突破压力均小于2 MPa,通常不具 有物性封闭能力,属于储层(图6~8)。



Fig. 8 Relationship of lithology-permeability-porosity

在盖层突破压力、岩性(粒度)和物性界限确定 的基础上,根据参数之间的关系(图4、图6~8),采 用突破压力下限、优势岩性(粒度)、孔隙度上限和 渗透率上限等指标进一步对盖层物性封闭分级评 价,将盖层物性封闭划分为 I ~ V 5 个等级(表1), 其中 I ~ Ⅲ级盖层突破压力大于 2 MPa,优势岩性 为泥质粗粉砂岩或更细,孔隙度小于 6%,渗透率小 于 0.02×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,均具有一定的物性封闭能力,划 分为盖层; 而 Ⅳ、V级盖层突破压力小于 2 MPa,优 势岩性较泥质粗粉砂岩更粗,孔隙度大于 6%,渗透 率大于 0.02×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,一般不具有物性封闭能力, 划分为储层。

表1 X 气藏盖层物性封闭分级评价标准

物性封 闭等级	突破压力 下限/MPa	优势岩性(粒度)	物性上限		封闭性	
			孔隙度 φ/%	渗透率 k/10 <sup>-3</sup> µm <sup>2</sup>	判断	
Ι	≥8	粉砂质泥岩、泥质细—极细粉砂岩	≦3.5	€0.006		
П	4~8	泥质中粉砂岩	3.5 ~4.5	0.006 ~ 0.008	盖层	
Ш	2~4	泥质粗粉砂岩	4.5~6	$0.008 \sim 0.02$		
IV	1~2	泥质极细砂岩、灰质细砂岩	6~8	0.02 ~0.04	44日	
V	≤1	细砂岩、中砂岩、粗砂岩	≥8	≥0.04	阳広	

Table 1 Hierarchical evaluation criteria of cap rock's capillary sealing of X gas reservoir

#### 2.2 盖层物性封闭评价参数的测井解释

#### 2.2.1 测井岩性识别

岩性定名方法有两种,一种是基于碎屑颗粒粒 度的定名,通过薄片鉴定或粒度分析实现,而另一种 是基于碎屑颗粒含量的定名,通过薄片鉴定或全岩 矿物衍射测试实现。利用常规测井资料计算岩石中 碎屑颗粒粒度是困难的,而计算碎屑颗粒含量已得 到普遍应用<sup>[19]</sup>,故利用自然伽马曲线建立岩石的泥 质含量模型进行全井段解释,并按照基于碎屑颗粒 含量的三级命名原则将 X 气藏盖层岩性划分为泥 岩、含砂泥岩、砂质泥岩、泥质砂岩、含泥砂岩和砂 岩<sup>[20]</sup>。计算公式为

$$V_{\rm sh} = \frac{2^{H_{\rm GCUR}I_{\rm GR}} - 1}{2^{H_{\rm GCUR}} - 1} , \qquad (1)$$

$$I_{\rm GR} = \frac{GR - GR_{\rm min}}{GR_{\rm max} - GR_{\rm min}} \,. \tag{2}$$

式中, V<sub>sh</sub>为泥质含量,%; H<sub>GCUR</sub>为希尔奇(Hilchie)指数, 与地质年代有关的经验系数, 老地层取2, 第三系地层取3.7; I<sub>GR</sub>为自然伽马相对值; GR为目的层的自然伽马值, API; GR<sub>min</sub>为纯砂岩的自然伽马最小值, API; GR<sub>max</sub>为纯泥岩的自然伽马最大值, API。

在岩性识别过程中,由于测井资料对岩性(粒度)识别的尺度达不到薄片鉴定的精度,并且无法 识别层理构造,导致薄片鉴定的岩性种类比测井解 释的岩性种类更多,即利用测井解释的一种岩性中 可能包含了多种通过薄片鉴定获得的岩性,因此需 要建立两种识别尺度下的岩性对应关系。在应用测 井资料识别岩性后,通过与薄片鉴定的岩性进行统 计归类,最终确定了X 气藏盖层中九种主要岩性的 归属(表2)。从颗粒优势粒度统计来看,含泥砂岩 和砂岩中颗粒优势粒度大于粗粉砂,根据盖层物性 封闭的岩性(粒度)标准判断含泥砂岩和砂岩不具 有封闭性,而泥质砂岩、砂质泥岩和泥岩中颗粒优势 粒度均小于粗粉砂,具有封闭性,因此利用自然伽马 曲线解释的泥质砂岩是判别盖层和储层的另一岩性 (含量)标准,这为常规测井资料求取盖层有效厚度 提供了重要依据。

#### 表 2 X 气藏盖层 9 种主要岩性的测井

#### 解释和薄片鉴定对应关系

# Table 2 Corresponding relation between logging interpretation and thin section authentication of nine types of primary cap rock's lithologies

of X gas reservoir

	8			
测井解	薄片鉴	薄片优势	封闭性	
释岩性	定岩性	粒度测量	判断	
泥亗	块状泥岩	私土石细松砂		
116.石	块状含粉砂泥岩	和工主知初步		
砂质	块状粉砂质泥岩	细蚁动云山蚁动	- 	
泥岩	纹层状粉砂质泥岩	细初吵主中初吵	面因	
泥质	块状泥质粉砂岩	中业历史和业历	_	
砂岩	纹层状泥质粉砂岩	中初迎王祖初迎		
含泥	块状含泥粉砂岩	相 蚁石小云 扭 细石小		
砂岩	纹层状含泥粉砂岩	祖初迎王攸知辺	储层	
砂岩	块状砂岩	极细砂至粗砂	_	

#### 2.2.2 孔隙度、渗透率和突破压力的测井计算

测井曲线是岩石骨架、孔隙结构和流体性质的 综合响应,不同测井曲线反映岩石不同的性质,其中 声波时差与孔隙度之间具有很好的线性关系,而孔 隙度和渗透率、渗透率和突破压力之间存在良好的 指数或幂函数关系。为了尽可能地提高测井解释模 型的精度,本文中利用声波时差和孔隙度测试数据 分构造带建立了盖层孔隙度模型(图9(a)),并根

· 27 ·

据孔隙度与渗透率、渗透率与突破压力之间的函数 关系依次建立了渗透率和突破压力模型(图9(b)、 (c)),最终实现全井段求取盖层的孔隙度、渗透率 和突破压力(图10)。

#### 2.3 盖层有效厚度的求取

利用测井解释模型依次获得盖层的岩性、孔隙 度、渗透率和突破压力后,参照盖层物性封闭评价标 准(表1),综合判断盖层中每一种岩性的物性封闭 等级,将不具有物性封闭能力的Ⅳ级和Ⅴ级剔除,并 把具有封闭能力的Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ级累加,从而获得盖层 有效厚度。由于影响盖层物性封闭的因素多样且彼 此间存在非线性变化关系,基于回归方法建立的测 井解释模型不可避免地存在误差,造成单一标准获 得的评价结果存在不一致的情况,故在评价过程中 首先参考模型精度和解释结果可信度较高的岩性数 据,其次是突破压力,而孔隙度和渗透率作为辅助, 最后考虑其他可能的地质因素综合判断物性封闭等 级。图10所示的X气藏a、b两套盖层中,含泥砂岩 部分对应的孔隙度大于6%、渗透率大于0.02×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>、突破压力小于2 MPa,不满足成为盖层的标准, 物性封闭等级评价为Ⅳ级,而在c套盖层下部的泥 质砂岩中,岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜分析和声 波时差响应均表明微裂缝发育,导致盖层局部失去 封闭能力,微裂缝发育部分的物性封闭等级综合判 断为Ⅳ级。剔除盖层中Ⅳ级部分并将Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ级 累加后,单套盖层的有效厚度为4~10 m。



图 9 X 气藏盖层物性封闭评价参数测井解释模型

Fig. 9 Logging interpretation model of evaluation parameters of cap rock's capillary sealing

×	岩性	物性封闭参数	有效厚度/m	突破压力/MPa	封闭能力
层	自然伽马/API 泥质含量/% 30——140 0——100 岩屑录井 释岩性	声波时差/ 孔隙度/% 渗透率/10 <sup>3</sup> μm <sup>2</sup> 突破压力/MPa     164 (μs·m <sup>-1</sup> )     426 0 - 6 15 10 <sup>3</sup> - 0.0 <sup>2</sup> 10 <sup>-1</sup> 0 <sup>2</sup> - 14	单层 累加 06012	单层 0——10 0 <sup>等效</sup>	单层 综合 评价 评价
a			<u>N</u>		II IV I
-	<u> </u>				I I
b			8		
c					



Fig. 10 Comprehensive logging interpretation of cap rock's capillary sealing of X gas reservoir

#### 3 盖层有效厚度的检验及应用

尽管盖层有效性与盖层厚度、盖层物性具有良 好的正相关关系,但是还存在其他影响因素,如盖层 分布、断裂发育、圈闭闭合高度和油气充注程度等。 盖层有效性受盖层分布规模和分布样式影响,而这 与沉积环境有关。河流、三角洲平原等沉积环境中 形成的盖层,单层厚度小且与砂岩互层,横向分布不 稳定而造成砂-砂对接。由于油气运移总是选择阻 力最小的路径,故油气在砂岩内横向运移过程中容 易绕过上覆盖层而散失。前三角洲、半深湖—深湖 等稳定沉积环境中形成的盖层,单层厚度大,平面分 布稳定,油气很难绕过运移而被封盖。特别是当盖 层被垂向开启性断裂切穿时,油气将沿着断裂散失, 导致盖层封闭性失效。盖层的有效性评价应当在圈 闭有效性基础上开展,如果圈闭是无效的或闭合高 度很小.那么讨论盖层有效性是没有意义的。盖层 有效性还与含油气高度或油气充注程度密切相关. 油气藏高度大,充注程度高,产生的浮力大,对盖层 的要求条件就高。当浮力大于盖层封闭阻力时,盖 层将被突破,甚至可能造成盖层完全失效。因此,油 气藏含油气高度是直观判断盖层有效性、定量评价

盖层封闭能力的实用指标。综上,盖层有效性是计 算盖层有效厚度的基础,但盖层有效性受多种地质 因素影响,故在具体计算过程中应当综合考虑各种 因素,确定盖层有效或失效的关键因素,合理求取盖 层有效厚度,并采用大量数据统计分析的方法建立 盖层有效厚度与盖层封闭性的联系。

盖层厚度与封闭的烃柱高度存在明显正相关关 系<sup>[21-23]</sup>,并且在实验和理论方面证实了该种关系的 存在<sup>[24-27]</sup>。然而,烃柱高度除受盖层封闭性影响之 外,还受油气充注、储层性质和断裂发育等多种因素 影响,因而一定厚度的盖层只能封闭一个最大烃柱 高度。X 气藏盖层厚度与其封闭的气柱高度相关关 系可以检验盖层有效厚度求取的合理性。当统计的 盖层中包括砂岩或含泥砂岩时,相关关系图中存在 一个随着盖层厚度增加而气柱高度不变的无效段 (图 11(a)、(b)),且剔除砂岩后无效段变短(图 11 (b)),而当继续剔除含泥砂岩后无效段消失,气柱 高度表现出符合气藏实际情况的变化特征(图 11 (b)),而此时的盖层厚度正是有效厚度,因此盖层 有效厚度计算方法具有良好的适用性,采用有效厚 度评价盖层的封闭性更准确。







对于非均质性强的盖层,由于存在物性封闭能 力差异,如何评价整套盖层的物性封闭能力是困难 的,其关键问题是怎样反映整套盖层中不同部分的 物性封闭贡献。由于突破压力是表征盖层物性封闭 能力的有效指标,本文中利用盖层中具有封闭能力 的各部分的有效厚度和突破压力,采用有效厚度加 权平均的方法获得整套盖层的等效突破压力。具体 方法是以盖层中的岩性为基本单元,根据物性封闭 评价标准,综合评价其物性封闭等级,剔除不具有物 性封闭部分,进而获得具有封闭能力部分的单层有 效厚度和累加有效厚度,同时利用突破压力曲线读 取相应的单层突破压力(或取算术平均值)。将单 层有效厚度占累加有效厚度的比值作为权系数对相 应的单层突破压力进行加权平均,最终获得整套盖 层的等效突破压力。计算公式为

$$\hat{p} = \sum_{i=1}^{n} a_i p_i, \qquad (3)$$

$$a_i = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \,. \tag{4}$$

式中, $\hat{p}$ 为等效突破压力,MPa;n为盖层中具有封闭 能力部分的层数; $p_i$ 为盖层中第i层的突破压力, MPa; $a_i$ 为第i层的有效厚度加权系数; $h_i$ 为盖层中 第*i* 层的单层有效厚度,m;  $\sum_{j=1}^{n} h_j$  为盖层中具有封闭 能力部分的累加有效厚度,m。

显然,等效突破压力是盖层中不同部分的物性 封闭贡献叠加,体现了有效厚度和突破压力的双重 作用,同时能够直观反映整套盖层的封闭能力,能够 简单而有效地评价盖层的整体物性封闭等级。图 10 所示的 X 气藏中 3 套盖层的等效突破压力为4~ 8 MPa,整体物性封闭能力中等,为 II 级。

#### 4 结 论

(1)提出盖层有效厚度的概念,即剔除由断层 破坏、微裂缝发育和盖层非均质性等因素导致的盖 层中不具有封闭性的部分,得到真正具有封闭性部 分的铅直厚度。

(2) 泥质岩盖层和砂岩储层在孔隙结构方面的 差异性是物性封闭产生的根本,是盖层有效厚度的 微观基础,盖层非均质性是盖层有效厚度的宏观条 件,最终形成物性封闭能力强的部分、物性封闭能力 弱的部分和无封闭能力的部分,而只有那些具有封 闭能力的部分才对封闭油气是有贡献的,其单层厚 度或累加厚度为有效厚度。

(3)提出一种盖层有效厚度的计算方法,包括 盖层物性封闭评价标准的建立、盖层物性封闭评价 参数的测井解释和盖层有效厚度的求取3个步骤。 应用有效厚度计算方法,X气藏泥质岩盖层和砂岩 储层的突破压力分布以及气水同层的直接盖层对应 的突破压力下限表明盖层和储层的突破压力界限为 2 MPa,突破压力界限标定的岩性(粒度)和不同岩 性突破压力统计结果表明临界岩性(粒度)是泥质 粗粉砂岩,突破压力界限和临界岩性(粒度)是泥质 粗粉砂岩,突破压力界限和临界岩性(粒度)标定的 孔隙度界限约6%、渗透率界限约0.02×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>, 进而将盖层物性封闭能力划分为I ~ V共5 个等 级,其中I~Ⅲ具有封闭性,IV和V不具有封闭性; 参照盖层物性封闭评价标准,综合评价盖层中每种 岩性的物性封闭等级,剔除不具有封闭能力的IV和 V,最终获得单套盖层的有效厚度为4~10 m。

(4)依次剔除盖层中的砂岩、含泥砂岩后,气柱 高度和盖层厚度相关关系图中的无效段消失,气柱 高度表现出先增大后减小的规律,由此证明有效厚 度计算方法是适用的。利用单层有效厚度和累加有 效厚度对单层突破压力进行加权平均,获得整套盖 层的等效突破压力,有效地确定 X 气藏盖层的整体 物性封闭能力为中等。

#### 参考文献:

- [1] 李明诚,李伟,蔡峰,等. 油气成藏保存条件的综合研究[J]. 石油学报,1997,18(2):41-47.
  LI Mingcheng, LI Wei, CAI Feng, et al. Integrative study of preservation conditions of oil and gas pools[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997,18(2):41-47.
- [2] 李双建,沃玉进,周雁,等.影响高演化泥岩盖层封闭 性的主控因素分析[J].地质学报,2001,85(10):1691-1697.
  LI Shuangjian, WO Yujin, ZHOU Yan, et al. Controlling factors affect sealing capability of well-developed muddy cap rock[J]. Acta Geologica Sinica, 2001,85 (10):1691-1697.
  [3] 张立含,周广胜.气藏盖层封气能力评价方法的改进
  - J 张立宫,向) 准. 气藏盖层到气能力评价方法的改进 及应用:以我国 46 个大中型气田为例[J]. 沉积学报, 2010,28(2):388-394.
     ZHANG Lihan, ZHOU Guangsheng. Improvement and application of the methods of gas reservoir cap sealing ability[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010,28(2): 388-394.
- [4] 薛永超,程林松,付广.大庆长垣以东地区登二段泥质 岩盖层封气能力综合评价[J].吉林大学学报(地球科 学版),2005,35(5):626-630.
  XUE Yongchao, CHENG Linsong, FU Guang. Comprehensive evaluation of gas sealing ability of the lower Denglouku Formation(K<sub>1</sub>d<sub>2</sub>) mudstone cap-rock in the east of the Daqing placanticline[J]. Journal of Jilin University
- (Earth Science Edition), 2005,35(5):626-630.
  [5] 付广,胡明,于丹.火山岩盖层类型及封气能力:以松 辽盆地徐家围子断陷为例[J].吉林大学学报(地球科 学版),2010,40(2):237-244.
  FU Guang, HU Ming, YU Dan. Volcanic cap rock type and evaluation of sealing gas ability: an example of Xujiaweizi Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth
- [6] 侯连华,刘泽容,王京红.盖层封闭能力的定量评价方 法及其应用[J].石油大学学报(自然科学版),1996, 20(6):1-4.

Science Edition), 2010,40(2):237-244.

HOU Lianhua, LIU Zerong, WANG Jinghong. Quantitative evaluation method for seal property of cap formation [J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 1996,20(6):1-4.

[7] 付广,张发强,吕延防. 厚度在泥岩盖层封盖油气中的作用[J]. 天然气地球科学,1998,9(6):20-25.
FU Guang, ZHANG Faqiang, LÜ Yanfang. The role in sealing oil and gas of cap rock thickness[J]. Natural Gas Geoscience, 1998,9(6):20-25.

[8] 史集建,李丽丽,吕延防,等.致密砂岩气田盖层封闭 能力综合评价:以四川盆地广安气田为例[J].石油与 天然气地质,2013,34(3):307-314.

> SHI Jijian, LI Lili, LÜ Yanfang, et al. Comprehensive evaluation on the sealing ability of cap rocks in tight sandstone gas field: a case study from Guang'an gas field in the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34 (3):307-314.

[9] 张雷,朱伦葳,卢双舫,等. 徐家围子断陷火山岩天然 气盖层差异特征[J]. 石油与天然气地,2015,36(1): 7-16.

> ZHANG Lei, ZHU Lunwei, LU Shuangfang, et al. Differential characteristics of cap rocks of volcanic gas reservoirs in the Xujiaweizi fault-depression, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015,36(1):7-16.

- [10] 曹成润,吕延防,陈章明.盖层有效封盖厚度定量分析[J].中国海上油气(地质),1998,12(5):328-331.
  CAO Chengrun, LÜ Yanfang, CHEN Zhangming.
  Quantitative analysis of effective seal rock thickness[J].
  China Offshore Oil and Gas(Geology), 1998,12(5): 328-331.
- [11] 吕延防,万军,沙子萱,等.被断裂破坏的盖层封闭能 力评价方法及其应用[J].地质科学,2008,43(1): 162-174.

LÜ Yanfang, WAN Jun, SHA Zixuan, et al. Evaluation method for seal ability of cap rock destructed by faulting and its application [J]. Chinese Journal of Geology, 2008,43(1):162-174.

[12] 付广,王浩然,胡欣蕾. 断裂带盖层油气封盖断接厚 度下限的预测方法及其应用[J]. 中国石油大学学报 (自然科学版),2015,39(3):30-37.

FU Guang, WANG Haoran, HU Xinlei. Prediction method and application of cap rock faulted contact thickness lower limit for oil-gas sealing in fault zone [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015,39(3):30-37.

[13] 付广,张博为,吴伟.区域性泥岩盖层阻止油气沿输 导断裂运移机制及其判别方法[J].中国石油大学学 报(自然科学版),2016,40(3):36-43.

FU Guang, ZHANG Bowei, WU Wei. Mechanism and detection of regional mudstone caprock sealing oil and gas migration along transporting fault [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(3):36-43.

[14] ARMITAGE P J, WORDEN R H, FAULKNER D R, et al. Diagenetic and sedimentary controls on porosity in Lower Carboniferous fine-grained lithologies, Krechba field, Algeria: a petrological study of a caprock to a carbon capture site [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010,27(7):1395-1410.

- [15] 孙明亮,柳广弟,李剑. 气藏的盖层特征及划分标准
  [J]. 天然气工业,2008,28(8):36-38.
  SUN Mingliang, LIU Guangdi, LI Jian. Features of cap rocks of gas pools and criteria of identification[J]. Natural Gas Industry, 2008,28(8):36-38.
- [16] 石鸿翠,周江羽,王龙樟,等.鄂尔多斯南部上古生界 泥岩突破压力测井解释及区域预测[J].物探与化 探,2014,38(1):63-70.
  SHI Hongcui, ZHOU Jiangyu, WANG Longzhang, et al. Logging interpretation and regional prediction of mudstone breakthrough pressures in the upper Paleozoic south Ordos Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014,38(1):63-70.
- [17] 马存飞,董春梅,栾国强,等. 苏北盆地古近系泥页岩 有机质孔发育特征及影响因素[J].中国石油大学学 报(自然科学版),2017,41(3):1-13.
  MA Cunfei, DONG Chunmei, LUAN Guoqiang et al. Characteristics and influencing factors of organic-matter pores in paleogene shale, Subei Basin. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(3):1-13.
- [18] JIN Z, YUAN Y, SUN D, et al. Models for dynamic evaluation of mudstone/shale cap rocks and their applications in the Lower Paleozoic sequences, Sichuan Basin, SW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 49:121-128.
- [19] 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释[M].东 营:石油大学出版社,1996.
- [20] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 2001.
- [21] 童晓光,牛嘉玉.区域盖层在油气聚集中的作用[J]. 石油勘探与开发,1989,16(4):1-8.
   TONG Xiaoguang, NIU Jiayu. Effects of regional cap formation on oil and gas accumulation [J]. Petroleum Exploration and Development, 1989,16(4):1-8.
- [22] 庞雄奇,付广,万龙贵,等.盖层封油气性综合定量评价:盆地模拟在盖层评价中的应用[M].北京:地质出版社,1993.
- [23] 蒋有录. 油气藏盖层厚度与所封盖烃柱高度关系问题探讨[J]. 天然气工业,1998,18(2):20-23.
  JIANG Youlu. A discussion on the relation between the cap rock thickness of oil & gas reservoir and its hydrocarbon column height[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(2):20-23.
- [24] 袁际华,柳广弟,张英. 相对盖层厚度封闭效应及其 应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2008,23 (1):34-36.

YUAN Jihua, LIU Guangdi, ZHANG Ying. Thickness sealing effect of relative cap rock and its application [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2008,23(1):34-36.

- [25] 吕延防,张绍臣,王亚明. 盖层封闭能力与盖层厚度的定量关系[J]. 石油学报,2000,21(2):27-30.
  LÜ Yanfang, ZHANG Shaochen, WANG Yaming. Research of quantitative relations between sealing ability and thickness of cap rock [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000,21(2):27-30.
- [26] 付广,许凤鸣. 盖层厚度对封闭能力控制作用分析 [J]. 天然气地球科学,2003,14(3):186-190.

FU Guang, XU Fengming. Quantitative research on controlling of thickness to seal abilities of cap rock [J]. Natural Gas Geoscience, 2003,14(3):186-190.

[27] 张林晔,包友书,刘庆,等.盖层物性封闭能力与油气 流体物理性质关系探讨[J].中国科学:地球科学, 2010,40(1):28-33.

> ZHANG Linye, BAO Youshu, LIU Qing, et al. Effects of hydrocarbon physical properties on cap rock's capillary sealing ability[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2010,40 (1):28-33.

> > (编辑 修荣荣)