

文章编号: 1001-6112(2011)01-0087-04

比表面积与突破压力联合确定泥岩盖层评价标准

范明, 陈宏宇, 俞凌杰, 张文涛, 刘伟新, 鲍云杰

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151)

摘要:在总结前人对泥岩盖层评价指标的基础上, 通过对中国南方海相碳酸盐岩地区泥岩样品的常规物性参数的分析, 认为用常规参数很难对盖层的封盖性能作出有效的判识。在此基础上, 通过分析比表面积和突破压力与盖层封盖性能的关系, 提出了以比表面积与突破压力 2 个参数共同建立盖层评价模板。该指标的建立可以对盖层的封盖性能做出较为客观的评价。

关键词:成岩作用; 突破压力; 排替压力; 比表面积; 盖层; 泥岩

中图分类号: TE112.2⁺5

文献标识码: A

Evaluation standard of mudstone caprock combining specific surface area and breakthrough pressure

Fan Ming, Chen Hongyu, Yu Lingjie, Zhang Wentao, Liu Weixin, Bao Yunjie

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: Based on summaries of previous analyses of evaluation standard of mudstone caprocks, it was analyzed in this paper the conventional physical parameters of mudstone samples from marine carbonate area in South China. It was concluded that the conventional physical parameters could not accurately evaluate the seal capability of mudstone caprocks. A new template to evaluate seal capability combining specific surface area and breakthrough pressure was proposed, providing relatively objective evaluation for seal capability of caprocks.

Key words: diagenesis; breakthrough pressure; displace pressure; specific surface area; caprock; mudstone

1 概述

理论上泥岩对天然气的封盖存在 3 种机理^[1-10], 即毛管压力封闭、超压封闭及浓度封闭。这 3 种方式从本质上来讲主要是毛管压力封闭, 如果毛管压力封闭失效, 依靠其他 2 种方式对天然气进行封闭, 其封闭能力是有限的, 很难形成工业气藏。因此毛管压力封闭是天然气盖层封闭机理的本质所在。目前用于评价天然气盖层封闭能力的评价参数主要有孔隙率、渗透率、扩散系数以及决定封盖能力的突破压力等参数。泥岩盖层对天然气的封闭性能主要取决于泥岩在饱和地层水条件下对天然气的突破压力, 也就是取决于泥岩对游离相天然气的封盖能力。

众所周知, 膏盐岩是很好的盖层, 但是膏盐岩的物性参数并不比泥岩好, 其突破压力往往只有几兆帕, 一般不大于 10 MPa。而有些泥岩的突破压力却高达 30 MPa, 如果仅凭突破压力大小就认为泥岩比

膏盐岩的封盖性能好, 这显然不合适。那么突破压力值又该如何用来判断盖层的优劣呢? 如何综合成岩作用、构造演化、微观指标参数对盖层的封盖能力做出客观的评价成为盖层评价中的一个难点。目前常用的几种单一指标均存在一定的局限性, 下面分别就常规参数局限性进行分析。

2 泥岩常规参数特征及封盖有效性评价的缺陷

2.1 孔隙率参数

孔隙率是盖层评价中最基本的参数, 普遍认为泥岩盖层的孔隙率越大, 盖层的封盖性能越差。由于泥岩初始沉积时孔隙率高达 50% 以上, 在早成岩阶段, 具有一定封盖能力的泥岩仍可具有较高的孔隙率。如贵州黔南坳陷麻江红花园组、翁项群加里东期古油藏的有效区域盖层为翁四段泥岩, 从区域沉积厚度看其厚度分布于 260~450m 之间, 志

收稿日期: 2010-11-06; 修订日期: 2011-01-04。

作者简介: 范明(1964—), 男, 博士, 高级工程师, 从事石油地质勘探及实验测试研究。E-mail: fm@mail.wuxisuo.com。

基金项目: 国家科技重大专项项目(2008ZX05005)和国家自然科学基金项目(40739904, 40739902)资助。

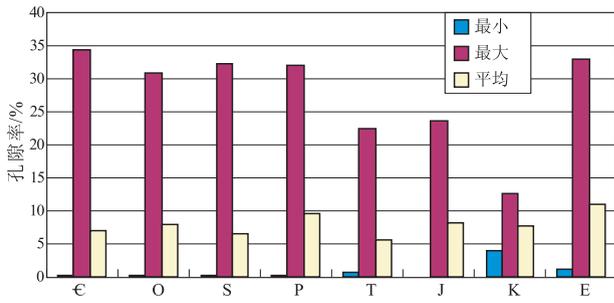


图 1 各时代泥岩样品孔隙率统计
主体为露头剖面样品。

Fig. 1 Statistics of porosity of mudstone samples from different strata

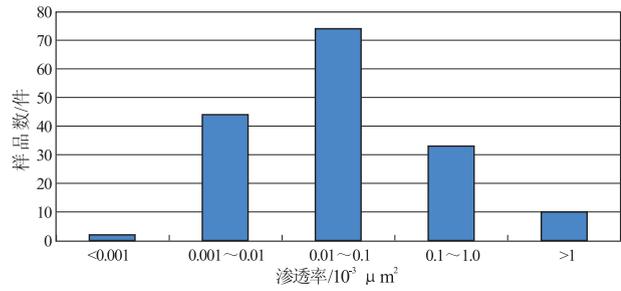


图 2 各时代泥岩样品渗透率统计
主体为露头剖面样品。

Fig. 2 Statistics of permeability of mudstone samples from different strata

留纪沉积末期其埋深一般在 500 m,处于早成岩阶段,因此,具备 500 m 埋深、累计厚 250 m 的泥岩可作为有效盖层的条件^[11]。南方海相碳酸盐岩地区志留系露头剖面的泥岩由于受到风化淋滤作用的影响,有时也会表现为较高孔隙率,尽管井下样品不会有这么高的孔隙率,但对南方而言,样品主要来自野外地质剖面,所以对野外地质样品的评价才是盖层评价的主体。笔者统计了近年来不同地区的 700 多件泥岩样品的孔隙率数据(图 1),不管时代新老,野外地质样品的孔隙率变化范围均较大。如贵州威信张家村一石坎剖面志留系泥岩样品孔隙率高达 32%,由此而推断该地区志留系已不具封盖能力则有失偏颇。而中生代样品的孔隙率反而整体比其他样品要低,这反映了风化作用以及裂隙的影响会导致孔隙率参数变大,仅凭孔隙率参数很难用于评价深埋于地下的盖层的封盖性能。

2.2 渗透率参数

渗透率参数也是评价盖层封盖性能的常用参数,但是由于地表剖面样品的渗透率是岩石应力释放后所表现出来的渗透性能,应力的释放导致泥岩微裂隙由非开启状态变成了开启状态,渗透率变大,这种变化带有不均一性和偶然性(图 2)。同一层位的样品,从外观及其它参数看,没太大差别,但

由于微裂隙的存在,使得渗透率参数相差较大。所以用渗透率进行盖层评价时,若岩性相同,渗透率差别较大,表明该区盖层样品中微裂隙较为发育。若仅用渗透率参数划定某一指标,则很难客观评价盖层的封盖性能。

2.3 泥岩成岩作用对封盖性能的影响

张长江等^[11]对南方志留系泥质岩盖层的动态评价研究表明,在所有成岩作用阶段,泥岩的封盖性能以中成岩期早期为最好,此时泥岩进入固结阶段,镜质体反射率为 0.5%~0.65%;并以镜质体反射率作为一项指标对泥岩的封盖性能进行了评价(表 1)。但仅以反射率作为泥岩封盖性能的评价指标还远远不够,因为镜质体反射率是反应泥岩中有机质经历过的最高温度,而泥岩的封盖性能与构造破坏的关系更加密切。

2.4 突破压力参数

在此,首先区分几个反映盖层封盖能力的压力参数:一是压汞(含吸附)突破压力^[12-13],二是驱替法突破压力,三是排替压力。有些学者将排替压力与突破压力相混,所以得到了不同的结论和划分标准。

压汞(含吸附)突破压力的测定是通过压汞法—吸附法联合测得岩石的全孔径毛管压力曲线,在曲线以 10% 气/水饱和度所对应的压力作为突

表 1 中国南方志留系泥岩盖层评价指标^[11]

Table 1 Evaluation index of Silurian mudstone caprocks in South China

成岩阶段	温度/℃	镜质体反射率/%	I/S 矿物中 I 含量/%	伊利石结晶度 IC($\Delta 2\theta$)	粘土矿物组合	油气阶段
成岩早期	<100	<0.6	<60	>0.42	蒙皂石,伊/蒙混层,高岭石	未成熟,低成熟生物气,低熟油
成岩中期	100~180	0.6~1.6	60~85	>0.42	伊/蒙混层,高岭石,伊利石,绿泥石	成熟,油和湿气
成岩晚期	180~212	1.6~2.6	>85	>0.42	伊/蒙混层,伊利石,绿泥石,绿蒙混层	高成熟,干气
极低级变质作用	>212	>2.6	无 I/S 混层	0.42~0.25	伊利石,绿泥石	过成熟

破压力,该方法不是直接采用气/水两相进行测试,而是将气/汞条件换算得到的气/水条件下的毛管压力曲线。尽管参数的获得带有一定主观和经验成分,但是作为盖层的评价参数,突破压力应该是最直观有效的。通常所说的突破压力即指该方法测定的突破压力值。气驱替法测定突破压力,即将岩心饱和地层水,在岩心后端用气进行驱替,驱替压力不断增加直至岩心后出现气泡,这种方法更为直观。尽管2种方法所测定的物理量都具有相同的物理意义,但由于方法的差别较大,所以测量值存在一定的差异,再加上气驱法突破压力测定周期较长,测量值最大允许误差可达15%,所以通常突破压力是以压汞法—吸附法联合测定而得到。

排替压力(孙明亮等^[1])则是以压汞法得到的毛管压力曲线,在曲线变平缓的第一个拐点处的进汞压力,并没有换算为气—水两相条件下气突破水的压力,所以该值比压汞法—吸附法联合测定的突破压力值要大5.25倍。该值不能作为盖层的突破压力参数,仅作为储层评价和油气田开发中常用的评价参数。

作为盖层评价的主要参数,突破压力应该是最直观有效的。统计数据显示(图3),各时代盖层的突破压力差异较大,白垩系泥岩显示的平均突破压力高于其它地层,最高的突破压力出现在志留系的泥岩中,由于压汞法—吸附法联合测定得到突破压力主要受孔隙结构的影响,而无法反应裂隙发育的情况,所以很难用这一单一的指标来评价盖层的封盖性能。

综上所述,目前很难用单一指标来评价盖层的封盖性能,必须采用多指标体系进行综合判识。

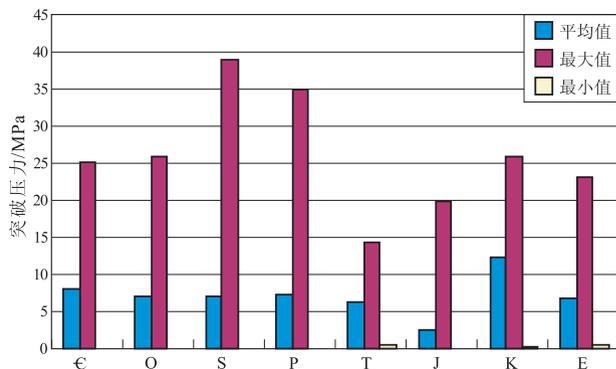


图3 各时代泥岩样品突破压力统计

主体为露头剖面样品。

Fig. 3 Statistics of breakthrough pressure of mudstone samples from different strata

3 突破压力与比表面积联合判识盖层的封盖性能

岩石比表面积是指单位重量内岩石总表面积,即岩石内部的内表面积和外部的外表面积之和,它是岩石颗粒大小、孔隙发育程度、压实程度、胶结程度的综合反映,而这些影响因素正是评价泥岩盖层封盖性能所必须的几个重要方面。一般而言,岩石的内表面积远大于岩石的外表面积。由于该参数一般不受裂隙的影响,测定结果相对稳定,其大小又可以用于判断成岩作用的强弱,而成岩作用的强弱往往反映了裂隙发育的程度,因此该参数可以配合突破压力参数对泥岩盖层进行综合评价。不管是埋藏压实还是构造挤压,对泥岩的成岩作用的影响,最终总是表现为岩石比表面积的变小。

一般认为当突破压力小于0.5 MPa时,盖层不具有封盖性,所以0.5 MPa以下的样品为非盖层样品。从大中型天然气藏与突破压力的关系^[14-17]可以看出,大中型气田资源丰度大于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 主要集中在1~15 MPa的突破压力范围内(图4)。也就是说,有些突破压力并不高的气藏,资源丰度却可以很高,而有些突破压力很高的地区盖层的封盖性能并不一定好。这也说明,微观检测得到的高突破压力盖层,其成岩演化程度可能相对较高,封盖性能反而变差。

郑德文等(1994)以突破压力对盖层等级进行了人为规定:能够封闭1000 m以上气柱高度的盖层为I类;封闭500~1000 m气柱高度的盖层为II类;封闭200~500 m气柱高度的盖层为III类;封闭100~200 m气柱高度的盖层为IV类。

4 泥岩盖层封盖性能模板的建立

根据以上分析,结合前人对盖层的评价标准,本文提出了以比表面积和突破压力联合判断盖层

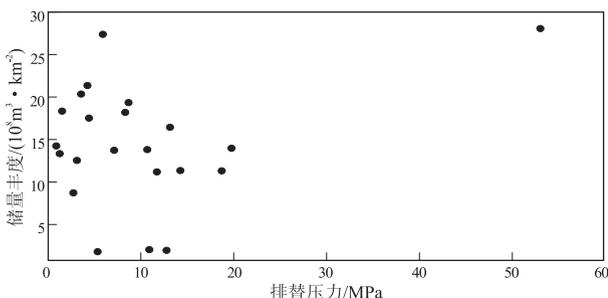


图4 资源丰度与突破压力关系^[17]

Fig. 4 Relationship between resource abundance and breakthrough pressure

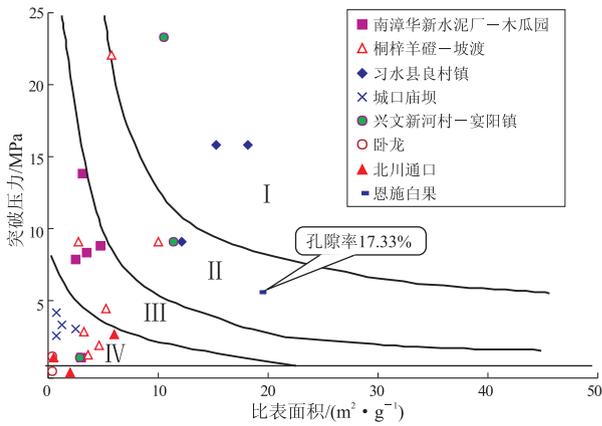


图 5 中上扬子区志留系泥岩盖层封盖性能等级划分

Fig. 5 Classification of seal capacity of Silurian mudstone caprocks in middle-upper Yangtze region

封盖性能的模板(图 5)。即以比表面积为横坐标,以突破压力为纵坐标,在该系统中分别划分出 4 类盖层及非盖层区。

以中上扬子区志留系泥岩为例,北川通口剖面位于龙门山构造带的中部,志留系泥岩轻微变质,测得的突破压力均较小,表明样品中几乎没有原生孔隙。其中有一个样品的突破压力为 0.33 MPa,压汞法测得的孔隙结构主要反映的是泥岩的微裂隙空间,所以其突破压力较小;另一个样品的突破压力虽然达到 2.98 MPa,理论上能封住 300 m 左右的天然气气柱,但其比表面积仅为 6.03 m²/g,从该模板上看,仅能评价为 IV 类盖层。综合评价,该区的志留系泥岩的封盖性能很差,不具有封盖条件。

湖北恩施白果乡志留系龙马溪组的碳质泥岩,尽管其突破压力仅为 5.86 MPa,且孔隙率达到 17.33%,但其比表面积达到 19.24 m²/g,表明该区志留系泥岩中微孔较为发育,尽管孔隙率较大,但仍可作为较好的盖层,在该模板中评价为 II 类盖层。

习水县良村镇剖面的下志留统 3 个泥岩样品,比表面积分别为 12.16, 15.31, 18.22 m²/g;突破压力分别为 9.29, 15.97, 15.97 MPa,按照本模板,其盖层类型应划为 I—II 类,表明该区下志留统泥岩具有较好的封盖性能。

突破压力与比表面积双参数盖层评价模板具

有一定的理论基础和实用价值,可作为南方高演化地区盖层样品评价的模板,但是,由于在已知油气藏的勘探开发过程中很少对泥岩盖层进行取心,即使取心也很少进行比表面积的测定,因此该模板缺乏已知油气藏实例的验证,对该模板的有效性还有待进一步的资料加以证实和补充。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张蕾. 盖层物性封闭力学机制新认识[J]. 天然气地球科学,2010,21(1):112-116.
- [3] 杨殿军. 超压对泥岩盖层封闭各种相态天然气的作用研究[J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(2):12-15.
- [4] 董忠良,张金功,王永诗,等. 油气藏封盖机制研究现状[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2008,44(S1):49-53.
- [5] 鲁雪松,蒋有录,宋岩. 盖层力学性质及其应力状态对盖层封闭性能的影响:以克拉 2 气田为例[J]. 天然气工业,2007,27(8):48-51,56.
- [6] 姜继玉,姜艳春,赵玉珍. 乌尔逊凹陷大一段泥岩盖层封盖保存条件定量评价[J]. 大庆石油学院学报,2009,33(2):36-39.
- [7] 刘士忠,查明,曲江秀,等. 东营凹陷深层天然气泥质盖层地质特征及封盖性研究[J]. 石油天然气学报,2008,30(2):390-393.
- [8] 付广,殷勤,杜影. 不同填充形式断层垂向封闭性研究方法及其应用[J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(1):1-5.
- [9] 付广. 泥岩盖层的超压封闭演化特征及封气有效性[J]. 大庆石油学院学报,2007,31(5):7-9,46.
- [10] 吕延防,万军,沙子莹,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.
- [11] 张长江,潘文蕾,刘光祥,等. 中国南方志留系泥质岩盖层动态评价研究[J]. 天然气地球科学,2008,19(3):301-310.
- [12] 承秋泉,陈红宇,范明,等. 盖层全孔隙结构测定方法[J]. 石油实验地质,2006,28(6):604-608.
- [13] 刘东鹰. 江苏下扬子区中—古生界盖层突破压力特征[J]. 石油实验地质,2010,32(4):362-365.
- [14] 付广,刘江涛. 中国高效大中型气田形成的封盖保存条件[J]. 石油勘探与开发,2006,33(6):662-666.
- [15] 胡国艺,汪晓波,王义凤,等. 中国大中型气田盖层特征[J]. 天然气地球科学,2009,20(2):662-666.
- [16] 金之钧. 中国大中型油气田的结构及分布规律[J]. 新疆石油地质,2008,29(3):385-388.
- [17] 吕延防,付广,于丹. 中国大中型气田盖层封盖能力综合评价及其对成藏的贡献[J]. 石油与天然气地质,2005,26(6):742-745,753.

(编辑 徐文明)