

柴达木盆地三湖地区第四系生物气 盖层封闭机理的特殊性

李 剑^{①*} 严启团^① 张 英^① 柳广弟^② 王晓波^③

(^① 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007; ^② 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; ^③ 中国矿业大学, 北京 100083)

摘要 柴达木盆地东部第四系生物气藏时代新、埋藏浅, 作为盖层的泥岩成岩程度都很低, 具有高孔隙度、高渗透率的特点. 按常规天然气藏泥质岩盖层评价标准来衡量, 这些岩石不能作为盖层. 但是, 正是在这种岩石盖层的封闭下形成了柴达木盆地的大型高效生物气藏, 其盖层的封闭机理具有特殊性. 对这种盖层岩石的特殊封闭机理进行了模拟实验与研究, 结果表明柴达木盆地生物气盖层的封闭性与岩石的含水饱和度有密切关系, 饱含盐水的盖层能够有效地阻止天然气渗流散失和扩散散失, 而且多套储盖层组合具有累积封闭效应, 使得大气田得以形成. 对于该地区盖层的封闭能力已经不能采用常规盖层参数的评价方法来评价.

关键词 柴达木盆地 生物气 盖层 封闭机理 含水饱和度 累积封闭 扩散

盖层是位于储集层之上能阻止油气向上渗漏或散失的岩层^[1], 它是控制油气成藏的关键因素之一, 也是石油天然气地质研究的重点内容. 盖层研究包括盖层分类、盖层封闭机理、盖层实验和盖层评价等方面的内容^[2-5]. 按岩性盖层可分为三大类: 泥质岩、蒸发岩(膏岩和盐岩等)和致密灰岩^[6], 以泥页岩和蒸发岩最为主要. 据Klemme^[7]和Grunau^[8]的统计, 世界334个大油气田中, 以泥质岩为盖层的占65%, 以蒸发岩为盖层的占33%. 封闭机理和封闭性研究是盖层研究中最重要内容, 随着油气勘探的深入, 盖层的封闭性和封闭机理研究取得了显著的进展.

1980年, AAPG主办了油气盖层讨论会, 较早地对盖层研究经验进行了交流. Downey^[9]通过盖层宏观和微观特性的论述, 对油气藏的盖层条件进行了评价. Watts^[10]对盖层封闭机理进行了深入研究并提出“薄

膜封闭”的概念, 付广等^[11]、郑德文^[12]分别对物性封闭研究方法和评价标准进行了详细的研究. 随着盖层封闭机理的深入研究, 又出现了超压封闭机理^[13-18]和烃浓度封闭机理^[19-21]. Hunt^[22]根据异常流体压力系统中油气生成和运移的研究, 提出“流体封存箱”的概念. 张义纲^[23]根据轻烃扩散原理提出“烃浓度封闭”. 目前, 盖层封闭机理日趋完善和系统化, 物性封闭和压力封闭和烃浓度封闭成为盖层封闭的三大机理普遍已被接受. 尽管国内外学者在天然气盖层的封闭性和封闭机理研究上做了大量工作^[24-26], 但对封闭机理及其特殊性的研究工作开展的较少. 本文针对柴达木盆地三湖地区第四系生物气盖层封闭机理的特殊性进行研究, 既可以丰富生物气盖层封闭机理及其特殊性的研究成果, 也可指导同类生物气田的勘探, 因此, 具有重要理论和实践意义.

1 柴达木盆地第四系生物气藏及盖层特征

柴达木盆地处于青藏高原北部，总面积约为 $12.1\times10^4\text{ km}^2$ ，是我国著名的十大内陆盆地之一，中、新生界最大沉积岩厚度达 17200 m。印支运动后，柴达木盆地经历了裂陷阶段、挤压阶段、挤压断陷与局部走滑阶段和挤压褶皱拗陷阶段。在复杂的地质作用下，柴达木盆地的沉积、沉降中心由西向东不断迁移，在盆地的不同部分沉积了多套烃源岩，形成了多套含油气系统。到更新世，柴达木盆地的沉积、沉降中心已移至三湖拗陷，到第四纪，沉积了一套厚达 3000 m 的湖相砂泥岩互层叠置的地层。在特殊的地质条件，造就了大型生物气藏。

柴达木盆地生物气的勘探从 1958 年盐湖气田的发现开始，历经 40 多年，目前在柴达木盆地已发现 5 个第四系生物气田，分别为涩北一号气田、涩北二号气田、台南气田、盐湖气田、驼峰山气田，探明含气面积 134 km^2 ，探明储量 $2770.95\times10^8\text{ m}^3$ 。其中涩北一、二号和台南气田，3 个气田的探明含气面积为 127.2 km^2 ，探明储量为 $2768.56\times10^8\text{ m}^3$ ^[27]，是世界上唯一的第四系大型生物气田聚集地。但是，柴达木盆地第四系气藏泥岩盖层压实程度差，成岩作用弱，孔隙度值与作为储层的粉砂岩和泥质粉砂岩相近，均值达到 33%，泥岩盖层渗透率值虽然小于储层，但平均值也高达 $19\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ (表1)，远高于常规盖层 $1\times10^{-5}\text{ }\mu\text{m}^2$ 的标准^[28]。按盖层常规标准衡量，第四系盖层封闭性能很差，完全不能作为盖层，但在区内，又实实在在地起到了封盖作用，这种盖层的封闭作用必然有其特殊的封闭机理^[29]。

2 柴东第四系生物气盖层的封闭机理

尽管相同深度的第四系泥岩和砂岩的孔隙度基本相近，没有明显差别，但不同岩性的渗透率的差异却比较明显，作为主要储集层的粉砂岩与泥质粉砂

岩、粉砂质泥岩和泥岩的渗透率具有比较明显的差异(图 1)。对于柴东第四系盖层的封闭机理，盖层的封闭作用主要依靠盖层的最大喉道和储层的最小孔隙之间的毛细管压力差来封盖圈闭中的天然气^[4]，从理论上讲，这样的储盖组合具有一定的封闭天然气的能力。但是，这种高孔渗性盖层的绝对孔隙度值和渗透率值确实太大了，甚至比很多天然气储集层的孔渗性还要好，仅凭储盖层之间具有的毛细管力差能否作为大型高效气藏盖层的依据仍存在很大疑问。为此，从该区盖层特殊的地质条件出发，对封盖条件进行模拟，探讨其封闭机理，并在实验室进行实验验证。

2.1 高含水泥岩的物性封闭

与常规气藏的盖层不同，柴达木盆地东部第四系盖层埋藏浅、成岩程度低、孔隙度高，其孔隙的含水饱和度也高，一般达到 80%~90%。由于泥岩粒径小，孔隙喉道小，含水饱和度增大后，突破压力增大，使盖层的封闭能力得到增强。从矿物成分看，粘土以伊利石和伊蒙混层矿物为主，这两种粘土矿物都具有很强的亲水性，天然气属非润湿相，岩石饱和水后突破压力增大使岩石具有封闭性^[29]。

为了研究高含水饱和度泥岩的封闭能力，针对柴达木盆地第四系气田的具体情况，进行了不同含水饱和度下岩石封闭能力的物理模拟实验。封闭能力以突破压力参数体现。由于取得的井下岩芯样品疏松易碎，所以将样品周围包裹，末端加筛网等进行特殊包装。参照涩北气田的具体地质条件，进行实验方案设计。

2.1.1 实验条件

温度：室温；围压：10MPa；含水饱和度：0~100%。

实验仪器：岩石突破压力测试装置。

表 1 柴达木盆地第四系物性数据表

岩性	孔隙度/%			渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$			样品块数
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	
粉砂岩	31.5	40.1	36.3	19.8	612	180.7	12
含泥粉砂岩	17	41.1	31.4	0.372	469	34.9	125
泥质粉砂岩	10.3	43.4	32	0.119	400	29.7	315
粉砂质泥岩	21.6	42	33.4	0.458	327	24.6	161
泥岩	23.6	42	33.2	0.307	170	19	59

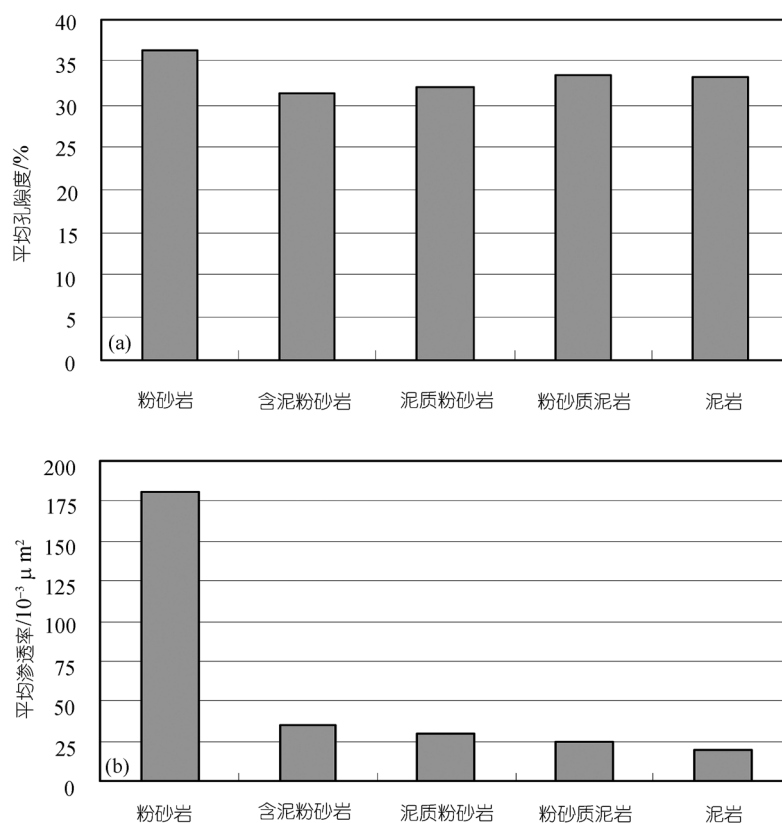


图 1 柴达木盆地第四系地层物性分布直方图

(a) 不同岩性岩石的平均孔隙度分布; (b) 不同岩性岩石的平均渗透率分布

泥岩含水饱和度: 采用恒温加湿方法建立泥岩含水饱和度, 该技术在国内属首创。

2.1.2 实验样品

本次选择了涩北气田钻井柱塞岩芯和人工柱塞岩芯进行了对比实验。岩芯长度约 4.0 cm, 直径 2.5 cm。实验数据有四组, 具有相同的规律性, 本文以一组数据为例。

青海柴达木盆地钻井岩芯样品为泥岩, 孔隙为 30.7%, 渗透率为 $0.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

人工岩芯由砂子加树脂做成, 孔隙度为 17.3%, 渗透率为 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.1.3 实验结果与认识

实验表明随着含水饱和度的增加, 柴达木盆地第四系岩石对天然气的封闭能力呈指数增加。当含水饱和度大于 60% 时, 岩心突破压力随含水饱和度的增加而显著增加(图 2)。

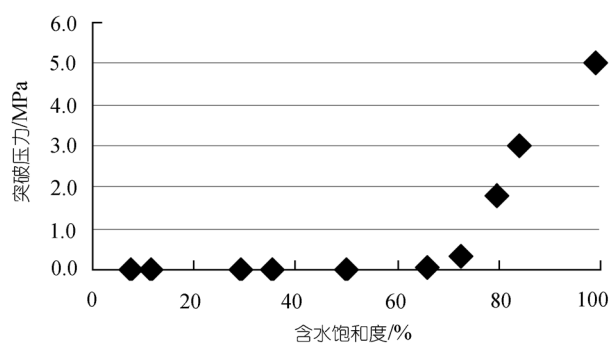


图 2 天然岩芯样品不同含水饱和度下突破压力的变化特征

人造砂质岩芯突破压力随岩石含水饱和度的增加也有所增加(图 3)。但即使达到饱含水状态时, 其突破压力值仍然很小, 仅 0.14 MPa, 不具有封闭性。这和柴达木生物气藏的盖层岩芯形成明显的对比。

相对于天然岩芯样品, 人造岩芯样品的孔隙度和渗透率都低。单从物性考虑, 人造岩芯应该具有更强的封闭能力, 然而实验结果证明这种岩石不具有

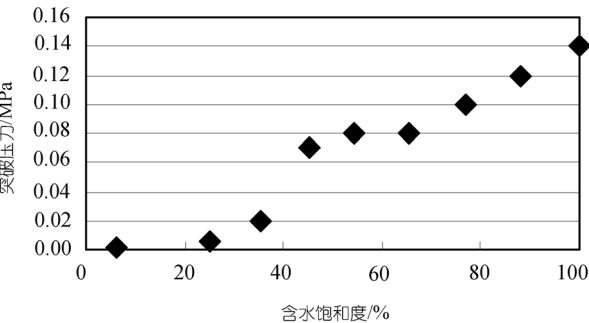


图3 人造岩芯样品不同含水饱和度下突破压力的变化特征

封闭性. 造成这种结果的原因不仅与岩石孔隙结构有关, 也与天然岩芯中含有的粘土矿物成分有关. 第四系泥质岩中含有较多的粘土矿物, 粘土总量一般在 60% 以上, 由于粘土结构为层状硅酸盐, 具有很强的亲水性和膨胀性, 粘土饱和水后体积膨胀, 堵塞部分孔隙及喉道, 使得岩石毛细管压力增大, 气体通过性变差, 封闭能力增强. 通过十多次的模拟实验, 认为柴达木盆地泥岩高孔隙度、高渗透率的浓度仍能封闭住大气田与含水饱和度有密切关系, 说明高含水泥岩具有很强的封闭能力.

2.2 上覆盖层厚度累加封闭

2.2.1 盖层厚度与气柱高度的统计关系

柴达木盆地泥岩盖层物性封闭能力差, 除含水饱和度高使盖层的封闭能力有一定增强外, 泥岩厚度的增加也在一定程度上补偿了物性封闭能力的不足^[30]. 以涩 19 井为例, 含气高度与直接盖层厚度的统计分析表明, 含气单元气柱高度与其直接盖层泥岩厚度关系不明显(图 4), 说明直接盖层不能起到完

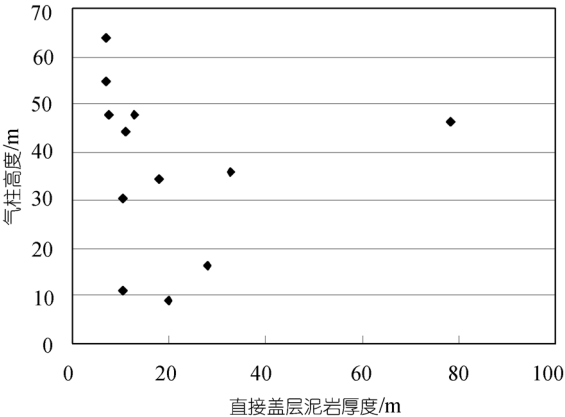


图4 涩 19 井直接盖层泥岩厚度与含气单元气柱高度关系图

全封闭的作用; 而气柱高度与各气层组内上覆泥岩累加厚度呈较好的正相关关系(图 5), 说明泥岩累加厚度越大, 所能封住的气柱高度越大.

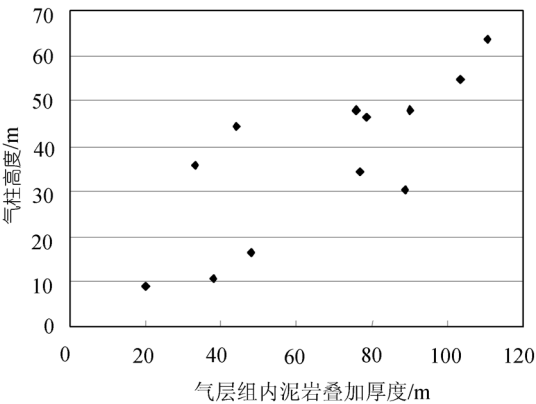


图5 涩 19 井气层组内泥岩叠加厚度与含气单元气柱高度关系图

2.2.2 厚度累加封闭的模拟实验

为了考察多层薄泥岩的累加封闭效应, 进行了实验室物理模拟实验.

(1) 实验方法. 模拟地层储盖层配置关系, 设计了两种实验方案.

实验方案一: 首先测定单个岩芯的突破压力, 然后把突破压力接近、长度接近的 4 块岩芯中间夹高渗层拼接, 再测定岩芯长度累加后的突破压力值.

实验方案二: 选择突破压力有差异的多块岩芯, 把突破压力接近、长度接近的 2 块岩芯作为一组, 分别测定岩芯长度累加后的突破压力值, 与算术求和值比较, 考察岩芯是否具有累积封闭效应.

(2) 实验结果与认识. 两种实验方法均证明, 随着累积厚度增加, 岩石的突破压力增大, 即多层泥岩盖层叠加, 可以增强封闭能力. 以前人们认为突破压力与岩石的孔隙结构有关, 与岩石长度无关, 随着近年来认识的发展, 人们已经意识到或推测突破压力物理模拟测试值与岩芯长度有密切的关系, 但缺乏实验数据的证明. 该实验结论很好地揭示了岩石突破压力与长度的关系, 说明岩芯长度增加, 流体运移阻力增大, 因此突破压力增大.

图 6 为实验方案一的结果. 分别测定 4 块岩芯样品的突破压力值, 获得 4 块岩芯长度与突破压力数据. 每块岩芯的长度约 6 cm, 突破压力值分别为 1.5, 1.7, 1.8, 2.1 MPa, 再把 4 块样品叠加在一起, 测定叠加后

突破压力值. 实验结果表明, 岩石叠加后累计长度为 24 cm, 实验测得的岩石叠加后突破压力为 6.0 MPa, 与 4 块岩芯突破压力算术相加值 7.2 MPa 相近. 图 6 是把 4 块岩芯作为一组叠加, 直接反映突破压力随着盖层厚度的叠加具有累加效应.

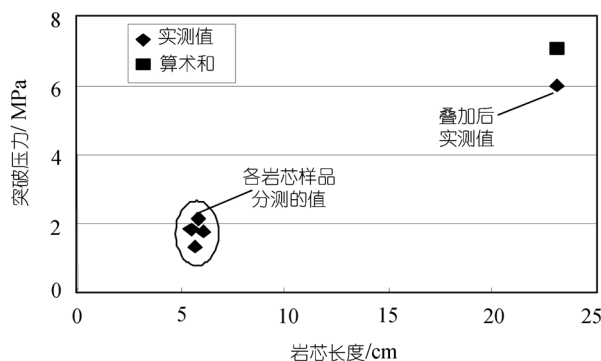


图 6 一组样品岩芯长度与突破压力关系图

图 7 为实验方案二的结果. 20 块突破压力不同的岩芯分为 10 组, 每块岩芯的直径 2.5 cm, 长度约 5 cm. 把突破压力接近的 2 块岩芯作为一组. 每组叠加后测得的突破压力值作为纵坐标, 每一组的 2 块岩芯单独测得的突破压力值算术和作为横坐标. 图 7 纵坐标是实测值, 横坐标是理论计算值, 图 7 说明盖层岩芯长度叠加后突破压力实测值和理论值具有一致性.

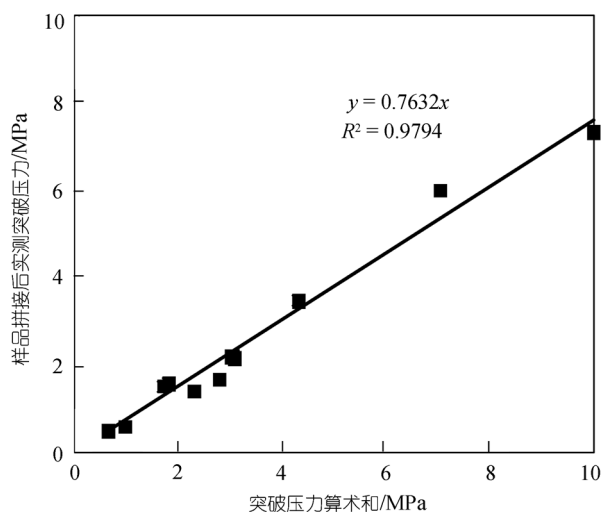


图 7 多组岩石突破能力实验反映叠加效应的统计

2.3 生物气泥质岩盖层的扩散能力

在研究泥质岩盖层对扩散相天然气封闭机理时, 对柴达木盆地生物气泥质岩盖层的扩散能力进行了

研究. 通常情况下泥质岩盖层饱和水后扩散系数与干样品的扩散系数相差 1 个数量级, 而柴达木盆地第四系盖层饱和水后扩散系数与干样品的扩散系数相差 4 个数量级(表 2), 饱和水后岩石的扩散系数接近常规天然气良好盖层的扩散数值, 说明这种盖层对生成的生物气扩散起到良好的封闭作用. 通过盖层对扩散相天然气封闭性与气源岩排气期之间的匹配关系研究, 认识到饱和水后的岩石在该区天然气聚集与保存中起到了重要作用. 不仅可以预测其对扩散相天然气封闭能力的演化, 也可以研究其封闭扩散相天然气的有效性.

表 2 柴达木盆地生物气盖层对扩散相天然气的封闭能力

井号	井深/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	样品描述	扩散系数/ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
台 5-7	1032	34.6	0.737	干燥样品	$2.50\text{E-}3$
台 5-7	1030	34.2	1.08	饱和地层水	$6.65\text{E-}7$

一个气藏形成后, 如果没有天然气继续补充到该圈闭, 仅靠扩散作用, 经过漫长的地质时间就可使原来已形成的天然气藏破坏掉或部分散失掉; 气藏形成的时间距今越久远, 气藏散失量就会越大, 残留量越小. 因此, 气藏的形成过程存在着“聚”和“散”两种作用过程 [31]. 一方面源岩中生成的天然气通过运移, 不断进入圈闭, 聚集成藏; 另一方面聚集在圈闭中的天然气因扩散和渗透作用不断通过盖层逸散. 当来自源岩的补充量大于通过盖层的散失量时, 圈闭中的天然气不断富集, 反之, 圈闭中的天然气就不断减少以至枯竭, 即天然气成藏过程一直处于一种聚和散的动态平衡过程中 [21,26]. 通过模拟计算表明, 柴达木盆地台南气田天然气扩散散失量约为天然气地质储量的 10%.

3 柴东第四系生物气盖层封闭能力的评价标准

盖层的岩性、厚度、空间分布以及突破压力是反映盖层封闭能力的重要指标.

良好的区域盖层是形成柴达木盆地生物气大气藏的必要条件. 区域盖层在部分地区厚度超过 500 m(指靠近盆地中心的台南、涩北一号、涩北二号地区). 区域盖层越厚, 形成的气田规模越大, 如台南、涩北一号、二号气田的探明储量远远大于盐湖和驼峰山气田.

突破压力是反映盖层岩石封闭能力的主要实验

室参数之一,与盖层岩石毛细管力的大小相关.该参数可以评价盖层岩石所能封闭的最大气柱高度.因此,生物气盖层封闭性评价可以突破压力为主,以扩散系数、烃浓度、含水饱和度、渗透率等为辅进行评价.

扩散系数,也是反映天然气保存条件的主要参数之一.生物气盖层岩石与常规天然气盖层在岩石性质和封盖机理上有很大差异,因此扩散机理和扩散系数值会有较大的差别,在聚散动平衡的研究中有重要意义.

岩石孔隙度、渗透率、粒度、矿物成分、孔隙结构等可作为辅助参数用于评价生物气盖层.例如对于柴达木生物气藏,即使高孔隙度、高渗透率泥质岩在饱含水时可以作为良好的盖层.

综合柴东第四系生物气盖层的特点,表3用实验室参数对生物气盖层封闭能力进行评价,这些参数一般具有较好的相关性.表3中突破压力指盖层岩石饱和水后单位(cm)长度上所测得的气体突破压力值,含水饱和度指仅存在气水两相条件的含水饱和度,渗透率为干燥岩石的气体渗透率,扩散系数为岩石饱和地层水条件下对于甲烷的扩散系数.

表3 生物气盖层封闭能力评价

评价参数	等级划分		
	好	中等	差
突破压力/MPa	>1.0	1.0~0.1	<0.1
含水饱和度/%	>80	80~60	<60
渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	<0.1	0.1~1	>1
扩散系数/ cm^2s^{-1}	< 10^{-7}	$10^{-7}\sim 10^{-6}$	> 10^{-6}

4 结论

通过对柴达木盆地天然气盖层封堵性特征的研究,得出了一些新的观点和认识.认为柴达木盆地生物气盖层封闭机理具有特殊性.

除了常规天然气盖层所具有的封闭机理以外,柴达木盆地生物气盖层还具有高含水封闭和累积封闭的特征.较低渗透率的泥质岩含水饱和度是影响岩石性封闭性的主要因素.渗透率低于 $10\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的泥质岩,当地层含水饱和度大于 60%时可作为气藏盖层,封闭能力会随含水饱和度的增大而迅速增强.由于多套储盖层组合的存在,盖层不仅具有累加封闭效应,而且上一气层或直接盖层的高含气饱和

度有效地阻止了气体的向上扩散^[31],形成烃浓度封闭^[32,33].因此评价生物气盖层封闭能力的主要参数为盖层岩石的突破压力、含水饱和度、渗透率和扩散系数.

参 考 文 献

- 张厚福,方朝亮,高先志,等编.石油地质学.北京:石油工业出版社,1999.35—89
- 郝书生,黄志龙.天然气盖层实验研究及评价.沉积学报,1991,9(4):20—26
- 游秀玲.天然气盖层评价方法探讨.石油与天然气地质,1991,12(3):32—38
- 付广,陈章明,姜振学.盖层封堵能力评价方法及其应用.石油勘探与开发,1995,22(3):46—50
- 何光玉,张卫华.泥岩盖层研究现状及发展趋势.天然气地球科学,1997,8(2):9—12
- 陈荣书,主编.石油及天然气地质学.武汉:中国地质大学出版社,1994.53—55
- Klemme H. World oil and gas reserves from analyses of giant fields and basins (Provinces), chapter12. In: Meeyer R, ed. The Future Supply of Nature-made Petroleum and Gas. Pergamon Press, 1977. 173—256
- Grunau H R. A worldwide look at the caprock problem. J Petrol Geol, 1987, 10(3): 245—266^[DOI]
- Downey M W. Evaluation seals for hydrocarbon accumulation. AAPG Bull, 1984, 68(11): 1752—1763
- Watts N L. Theoretical aspects of cap-rock and fault seals for single and two phase hydrocarbon columns. Mar Petrol Geol, 1987, 4: 274—307^[DOI]
- 付广,陈章明,姜振学.盖层物性封闭能力的研究方法.中国海上油气(地质),1995,9(2):83—88
- 郑德文.天然气毛细管封闭盖层评价标准的建立.天然气地球科学,1994,23(5):29—33
- 陈荷立,邱世祥,汤锡元,等译.真柄钦夫,著.压实与流体运移.北京:石油工业出版社,1981.111—122
- 刘方槐.盖层在气藏保存与破坏中的作用及其评价方法.天然气科学,1991,1(5):220—232
- 吕延防,付广,高大岭,等.油气藏封盖研究.北京:石油工业出版社,1996.4—30
- 付广,姜振学,李椿.压力封闭在盖层封闭油气中的应用.天然气工业,1995.5,15(3):12—18
- 吕延防,付广,张发强,等.超压盖层封烃能力的定量研究.沉积学报,2000,18(3):465—468
- 付广,陈章明,姜振学,等.欠压实泥岩在封盖油气中的作用.中国海上油气(地质),1995,(3):164—169
- Pandey G N, Rasin M T, Donalol Z K. Diffusion of fluids through

- porous media with implication in petroleum geology. AAPG Bull, 1974, 58: 291—303
- 20 付广, 姜振学, 庞雄奇. 盖层烃浓度封闭能力评价方法探讨. 石油学报, 1997.1, 18(1): 39—44
- 21 郝石生, 黄志龙, 高耀斌. 轻烃扩散系数研究及天然气运聚动平衡原理. 石油学报, 1991, 12(3): 17—24
- 22 Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. AAPG Bulletin, 1990, 74: 1—12[DOI]
- 23 张义纲. 天然气的生成聚集和保存. 南京: 河海大学出版社, 1991. 32—34
- 24 付广, 陈昕, 姜振学, 等. 烃浓度封闭及其在盖层天然气中的重要作用. 大庆石油学院学报, 1995, 19(2): 22—27
- 25 黄志龙, 郝石生. 天然气扩散与浓度封闭作用的研究. 石油学报, 1996, 17(4): 37—43
- 26 郝石生, 黄志龙, 杨家琦, 著. 天然气运聚动平衡及其应用. 北京: 石油工业出版社, 1994. 3—29
- 27 魏国齐, 刘德来, 张英, 等. 柴达木盆地第四系生物气形成机理、分布规律与勘探前景. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 84—89
- 28 李国平, 郑德文, 欧阳永林, 等. 天然气封盖层研究与评价. 北京: 石油工业出版社, 1996. 24—30
- 29 张祥, 纪宗兰. 柴达木盆地第四系泥岩盖层的封盖机理. 天然气工业, 1997, 17: 75—76
- 30 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. 石油学报, 2003, 3: 27—28
- 31 付广, 陈章明, 王鹏岩. 泥质岩盖层对扩散相天然气的封闭作用及研究方法. 石油实验地质, 1997, 19(2): 46—47
- 32 付广, 陈章明, 吕延防. 上覆烃浓度盖层对下覆天然气扩散的屏蔽作用及其应用. 中国海上油气, 1995, 9(6): 385—386
- 33 付广, 吕延防. 泥岩盖层浓度封闭演化特征——以松辽盆地下白垩统泥岩为例. 地质科学, 2003, 38(2): 165—171