

泥岩研究与盖层评价技术

秦建中, 刘伟新, 范明, 张文涛, 俞凌杰

(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 214126)

摘要: 泥岩是沉积盆地的主要组成部分, 但由于样品保存性差、黏土矿物膨胀与收缩、颗粒细小, 对于泥岩性质的认识并不深入。而弄清楚泥岩的性质有利于解决目前油气勘探所面临的一系列难题, 如钻井稳定性、超压风险、泥岩各向异性、泥岩岩石力学性质、物理特征及测井响应等。特别是在页岩气勘探过程中, 对泥页岩的性质也需要有更多的认识。目前国内外泥岩性质研究与盖层评价技术已取得一系列进展。

关键词: 泥岩; 盖层; 评价

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Shale research progress and achievements in seal appraisal technology

Qin Jianzhong, Liu Weixin, Fan Ming, Zhang Wengtao, Yu Lingjie

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: Shales form a large proportion of sedimentary basin fill worldwide and they have not been studied in great detail to date due to the lack of preserved specimens, clay mineral dilation and shrinkage, small granular, timing taken to perform tests. Understanding shale behavior is critical to a range of issues confronting petroleum industry, such as wellbore stability, top seal, predicting overpressure for low-permeability shale, understanding the effects of anisotropy on depth conversion, shale mechanics and petrophysical response on logs. It is also necessary for the exploration of shale gas. A series of progress has been made in shale research and seal appraisal at home and abroad.

Key words: shale; seal rocks; assessment

目前在世界范围内广泛开展了与泥页岩性质有关的技术研究, 其研究的动力来自于环境、资源与工程的需要: 温室气体 CO₂ 的封存研究、放射性废物的封存处理、非常规油气尤其是页岩气的勘探与开发。除了对泥页岩有关的岩石矿物特征分析外, 逐步加强了针对泥页岩地下状态的泥岩力学性质、泥岩热力学、泥岩岩石物性与岩石物理、泥岩非均质性理论模型的研究, 其研究的最终目标是建立泥页岩的力学、岩石物性、岩石物理模型, 用于解决与泥岩有关的钻井稳定性、泥岩盖层的封盖评价、泥岩测井解释及油气开发中的增储上产等问题。随着对泥岩认识的深入, 也促进了泥岩盖层评价技术的进步。众所周知, 泥岩与油气封盖密切相关, 天然气对泥岩盖层的封盖要求更高; 特别是随中国南方海相油气勘探的深入, 对泥岩盖层的评价方法与技术也提出了更高的要求^[1-8]。本文主要

介绍泥岩研究与盖层评价技术取得的进展。

1 泥岩性质实验研究

1.1 泥岩岩石特征分析技术

对于泥页岩样品的取样、保存、制样及有效的实验分析技术方法主要有: 采用 X-CT 扫描、X 衍射、离子交换 (CEC) 技术、电镜分析及三维可视化技术 (FIB/SEM)、压汞及吸附分析, 目的是取得泥岩微观结构及非均质性、孔隙结构与矿物组成、成岩作用信息。其次是进行泥岩的专项分析如岩石力学分析。由于泥岩样品取心较少, 而且由于黏土的膨胀与水化作用, 泥岩样品制样也非常困难, 泥岩力学参数资料相对较少。随泥岩力学分析新技术的不断提出, 如采用刻划实验技术 (scratch test)、纳米刻痕技术 (nano-indentation test)、高压及流体条件下的三轴应力实验, 同时进行岩石物理测量如纵

收稿日期: 2012-11-23; 修订日期: 2013-10-17。

作者简介: 秦建中 (1957—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事石油地质勘探与油气地球化学研究。E-mail: qjz.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项《海相碳酸盐岩层系优质储层分布与保存条件评价》项目 (2008ZX05005-002) 和中国石化科技部《泥岩盖层封堵机理与保存条件评价技术研究》项目 (P09016) 联合资助。

横波的测量及围压下的渗透率测量,针对泥页岩性质的实验分析技术也愈加完善,这些性质与参数对于页岩气的开发、工程稳定性及泥岩盖层封盖能力的评价至关重要^[9]。

1.2 泥岩化学多孔弹性实验研究

化学多孔弹性(chemoporomechanical)研究最新的进展是通过小尺度实验方法研究泥岩对钻井流体化学响应的定量分析方法。以往主要通过三轴应力分析取得泥岩的多孔弹性力学参数,对泥页岩而言常受大取样尺寸的限制。最新的研究方法是通过 MicroRx 小样品实验来替代三轴应力分析(autonomous triaxial cell)^[10],得到样品在不同条件下的弹性顺度、反射系数和化学力学耦合系数,并进行不同实验结果的对比,建立 MicroRx 小样品实验与常规三轴应力测试所取得的多孔弹性参数分析之间的联系,实现从毫米级的泥岩样品分析而得到泥岩的多孔弹性参数,进而分析钻井过程中泥岩地层与钻井泥浆成分之间如何相互作用,其结果可直接用于钻井泥浆成分配比与钻井稳定性分析。

1.3 泥岩热水力性质研究

泥岩热水力实验(thermohydromechanics——THM)研究源于非常规能源的勘探与开发、地热资源的利用、危险废弃物的处置。泥岩的热水力性质需要采用新的实验技术研究泥页岩不同水饱和度与温度条件下的应力与应变行为^[11],这些实验包括不同温度与抽吸条件下页岩的实验仪器的开发,页岩等温与非等温条件下的保水特征^[12],高应力加载条件下的体积应变,抽吸下的泥岩的膨胀与收缩响应。近年来,提出了较新的泥岩热力学参数耦合模型,用于解决多孔介质中热流及流体多相流动与岩石变形与应力问题^[13],使实验室不同尺度的物理与化学过程的模拟结果能在实际地质研究中得到应用。对泥岩来说最重要的性质是有关其热塑性及非均质变形行为,通过页岩的抽吸与固结实验,不同温度页岩滞水曲线分析而得到的热力学数据可作为泥岩力学、热、毛细管加载响应与变形的本构模型的基础。

1.4 泥页岩岩石物理实验技术

主要强调泥页岩的电性与核磁共振(NMR)分析技术。在电性分析中采用一些新的方法,消除因金属电极极化得到重复性很高的宽频介电谱^[14-15]。Josh 等提出了有关电阻聚合薄膜的宽频范围内页岩介电常数和电导率电性综合测量方法^[15],开展泥页岩电导率和介电常数与黏土含量、离子交换能力(CEC)、水含量与比表面积之间的定

量分析,以及电性参数与有关的物理性质如弹性波速度之间的相关性用于泥岩的岩石物理测井评价。

在泥岩研究中充分应用核磁共振技术,可对饱和流体条件下流体—泥岩之间相互作用进行分析,应用 NMR 技术分析页岩中流体的含量与分布^[16]:自由水、黏土束缚水、毛细管束缚水,并进行孔隙度和孔隙结构分析,也可把 NMR 技术用于页岩的分散性及页岩的非均质性研究。

1.5 泥岩岩石物理模型

页岩弹性性质与矿物学之间的关系对认识区域沉积作用、孔隙压力预测、地震数据反演与 AVO 分析非常重要。依据孔隙微结构、黏土矿物、定向分布函数模拟页岩弹性性质研究较多^[17-19],可这些模型所需大量的测试参数,而实际上通过有限的实验样品得到的分析数据很有限,模拟的结果在统计学上的可靠性就存在着较大不确定性。Ulm 和 Abousleiman 提出了一个模型来模拟页岩弹性性质^[20],主要依据 2 个参数:粉砂含量与黏土堆积密度(CPD),并把该模型进一步用于声波测井速度,其所需参数——粉砂含量与黏土堆积密度可通过常规的测井或元素捕获谱测井所得到。Pervukhina 等通过假定黏土弹性系数与黏土堆积密度的线性相关修正了该模型,更好地反映了泥页岩的基质—包体微结构特征:泥页岩是粉砂包体嵌入于黏土基质的纳米混杂物,并称之为黏土—粉砂模型,可更好地利用黏土堆积密度与粉砂含量预测泥页岩的声波速度并进一步预测页岩超压带^[21]。

2 泥岩盖层评价技术

对泥页岩盖层如何进行评价,尤其是高成岩阶段的泥岩盖层如何进行评价,一直没有好的方法。同时因为泥页岩矿物组成、结构构造与分析技术的特殊性,泥页岩盖层评价技术研究长期未有大的进展。近年来对我国不同时代、不同地区、不同成岩阶段的大量野外与井下泥岩样品的分析,提出了一些新的泥页岩盖层评价技术与思路,认为针对泥页岩盖层的评价,要从物质组成—成岩作用阶段、盖层物性—封盖能力的量化、岩石力学性质—泥岩的强度 3 个方面进行分析,在具体应用上要结合构造运动与埋藏史进行盖层的综合评价。

2.1 泥岩微观结构、成岩作用与盖层评价

通过大量不同时代泥岩矿物组成、结构构造与成岩作用阶段的分析,提出了成岩作用阶段划分与盖层评价指标。由于泥岩组成与结构的特殊性,伊利石结晶度、黏土矿物含量与类型是成岩作用阶段

划分的有效指标^[22-25]。采用X衍射与扫描电镜对泥岩结构与矿物组成分析,划分出5种泥岩盖层成岩阶段与结构表现形式:伊利石型—定向型—裂缝型;伊利石型—定向型—微孔型+裂缝型;伊蒙混层R=3型—定向型+微孔型;伊蒙混层R=1型—均匀型+微孔型;伊蒙混层R=0型—均匀型+微孔型。初步提出泥岩伊利石结晶度指标及与泥岩盖层封盖能力好坏的关系:伊利石结晶度小于0.25,为极低变质阶段,泥岩封盖性能较差;伊利石结晶度为0.25~0.42,为高成岩阶段,泥岩封盖性能一般;伊利石结晶度为0.42~0.50,中等成岩阶段,泥岩封盖性能良好;伊利石结晶度大于0.50,弱成岩阶段,泥岩封盖性能较好。

泥页岩成岩作用阶段的正确划分是盖层评价的基础,不同的成岩阶段其盖层评价的技术内容存在差别。基本思路是:成岩阶段较低时,主要依靠物性参数进行评价;而对高成岩泥页岩而言,物性参数一般表现具有较好的封盖能力,这时盖层岩石的力学性能及是否产生裂缝是泥岩盖层封盖能力评价的关键,这就需结合泥岩沉积埋藏史与构造演化进行综合分析。

2.2 泥岩盖层物性与模拟实验

2.2.1 常规物性

孔隙度与渗透率是盖层物性评价的最常用指标。从统计角度而言,因为泥页岩的各向异性,泥岩孔隙度与渗透率变化很大,如第四系泥岩具有很高的泥岩孔隙度,而对于下古生界泥岩其孔隙度可以很低。同时盖层物性及模拟分析测试结果表明,地层条件下泥岩样品的物性与常规分析相比存在较大的差异,在深埋条件及饱和水条件下泥岩渗透率非常低,说明泥岩在地层条件下封盖能力与地表是不一样的,应该具有更好的封盖能力。泥岩饱和盐水条件下扩散系数相比常规烘干样品要低2~3个数量级,在盖层评价时要充分考虑到泥岩在地层条件下具有更好的封盖能力。

2.2.2 突破压力

它是盖层评价中最有效的参数^[26],可反映盖层的封盖气柱高度。以往的相关研究认为盖层突破压力随厚度增加而增加^[27]。对具有相同孔隙度与渗透率的泥岩模拟实验表明,泥岩的突破压力与泥岩的长度(厚度)没有关系,长度大时需要泥岩的突破时间更长^[28]。在油气聚集成藏过程中,任何泥岩盖层都是渗漏的,泥岩突破压力值与泥岩的厚度并不相关,是泥岩固有特性;但在泥岩盖层厚度较大时,油气渗漏与散失需要更多的时间,该认

识对泥岩封盖机理的认识具有重要意义。

2.3 泥岩盖层与保存条件地球化学研究

金属矿化、热液活动等地球化学异常均为油气保存条件较差的表现。在油气盖层与保存条件评价中,泥岩及其储层中的方解石脉、石英脉体等的地球化学信息可以提供较多的盖层封盖性能及保存条件的地质信息,其中主要是C、O同位素及与流体包裹体冰点与盐度分析相结合的方法能较好地判别油气的保存条件^[29]。一般而言,包裹体冰点小于-2℃时,反映包裹体形成时的地层处于较封闭的环境。且包裹体冰点越低,盐度越高,其形成时的地层环境越封闭;反之地层受大气水的影响程度越高。结合碳氧同位素,保存条件评价的可靠性会更高。

流体化学组成对油气封盖及保存条件也具有较好的判别作用,如矿化度指数、变质系数、盐化系数和脱硫系数,但需要有较多的地层水资料,并需要进行各个不同地质单元的地球化学成分的对比分析^[30]。

2.4 泥岩盖层的力学分析

2.4.1 泥岩盖层脆性特征与盖层评价

对于泥岩封盖能力的评价,尤其是成岩作用阶段较高的泥页岩,如南方志留系、寒武系泥岩,需要对泥岩裂缝产生的可能性进行分析,即进行力学参数的分析与评价。但对与泥岩岩石力学有关的封盖能力的分析一直是个难点,要取得适合力学常规分析的泥岩样品很难,而且除了常规的杨氏模量、泊松比等参数外,并没有其他更好的泥岩盖层力学评价参数。在实际盖层评价中,应力对盖层的封闭性有着不可忽视的影响,应力可以使盖层发生变形,随着变形的递进局部会产生裂缝甚至破裂,从而破坏盖层的宏观连续性。一旦盖层产生裂缝或断裂,盖层的封盖即遭破坏。因此在盖层评价中,可以通过针对盖层样品的弯曲变形能力,即盖层的脆性特征进行分析,同时进行盖层的岩石力学分析建立盖层的破裂准则,进行盖层的力学评价。

在盖层评价中提出了一个有关盖层脆性指数的评价方法。通过专门设计的泥岩脆性测定仪,按照材料力学的挠度理论,进行泥岩单点载荷强度(样品加载时的载荷)、挠度(样品加载的弯曲变形量)及抗弯模量(抵抗弯曲变形的能力)的测量,得到盖层的脆性参数。分析这些参数与盖层封盖能力的关系,通过实际的盖层脆性参数分析建立盖层划分标准(表1)。同时进一步进行数学处理,将抗弯模量与最大挠度值进行归一化处理,采用2个参

表 1 泥岩盖层的挠度、抗弯模量分类标准
Table 1 Classification standard for deflection and flexural modulus of shale seal

盖层类别	挠度/mm	抗弯模量/MPa
I 类	>0.4	<1 000
II 类	0.3~0.4	1 000~2 000
III 类	0.2~0.3	>2 000

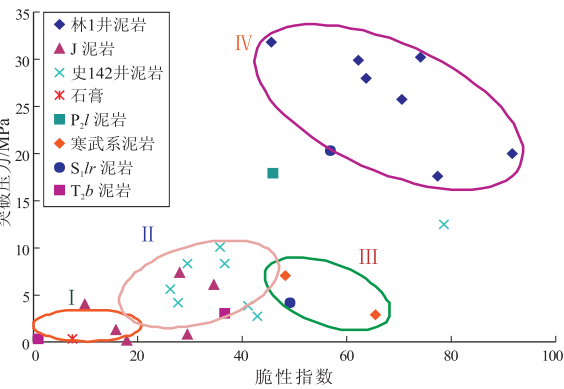


图 1 泥岩盖层的脆性指数—突破压力评价
Fig.1 Appraisal of brittleness index—breakthrough pressure of shale seal

数的归一化平均值得到盖层岩石的脆性指数。该参数既反映出泥岩的变形量,又反映造成变形的应力特点,与盖层突破压力参数相结合,建立泥岩盖层评价的脆性指数—突破压力评价模版,用于盖层评价(图 1)。

2.4.2 泥岩应力分析——脆延转换与盖层动态评价
对于高成岩泥岩,盖层的封盖性能更多的取决于岩石力学性质,失稳、破裂才是导致泥岩封盖失效的根本原因^[19]。因此正确认识泥岩盖层的力学

状态并能有效地预测泥岩及盖层的破裂失效是油气勘探中盖层评价的重要内容。盖层的应力与失效分析需要与地层条件的温度、压力与流体状态相联系。在不同的围压条件与温度下对样品进行加载直至破坏,从而得到样品的载荷—位移曲线以及应力—应变曲线,进一步分析可得到样品的强度包络线及拟合方程,进而分析泥岩盖层在不同围压和温度条件下的失效形式、脆—延转化特征、破裂准则。

为准确得到盖层样品的岩石力学性质与变形行为信息,开展了室温条件下不同围压对岩石力学性质及变形的影响,以及不同温度对岩石力学性质及变形的影响研究。

通过对膏岩、硅质泥岩、粉砂质泥岩盖层不同温度与压力条件的力学分析,提出泥岩盖层脆延转换动态评价技术:膏岩以塑性为主^[31];硅质泥岩以脆性为主;而泥质岩介于二者之间,存在脆延转换过程。泥质岩在温度、压力增大的条件下会发生脆延转化。脆延转换点是评价泥岩盖层的重要参数。在脆延转化点以下,重点以盖层物性评价为主;而在脆延转化点以上要结合实际地质条件以是否产生裂缝进行评价(图 2)。通过不同成岩阶段泥岩的力学性质与脆性特征分析,结合现有地应力或盖层埋藏史,就可以有效地分析或预测泥岩盖层的封盖能力与保存条件。

2.4.3 泥岩盖层的动态评价

通过对泥岩盖层的成岩作用、微观结构、岩石物性、力学性质提出了泥岩盖层与保存条件评价的流程(图 3),依靠常规的物性参数(孔隙度、渗透率、突破压力)对泥岩盖层评价是不够的,还需要

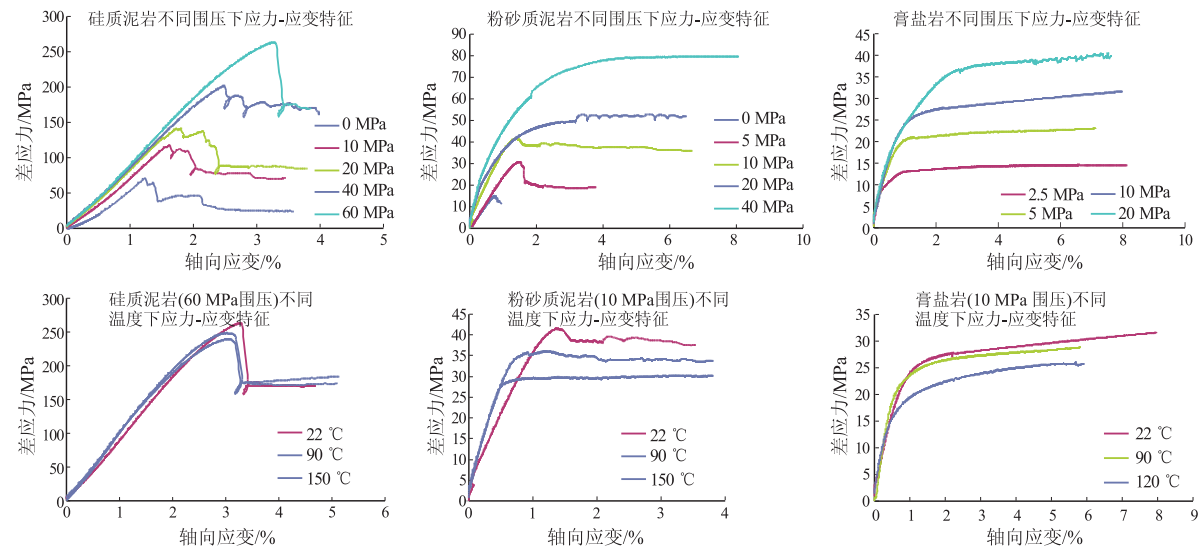


图 2 泥岩、膏岩不同围压、温度条件下的应力—应变与脆延转化

Fig.2 Stress-strain and brittle-ductile transformation of shale and gypsolyte under different confining pressure and temperature

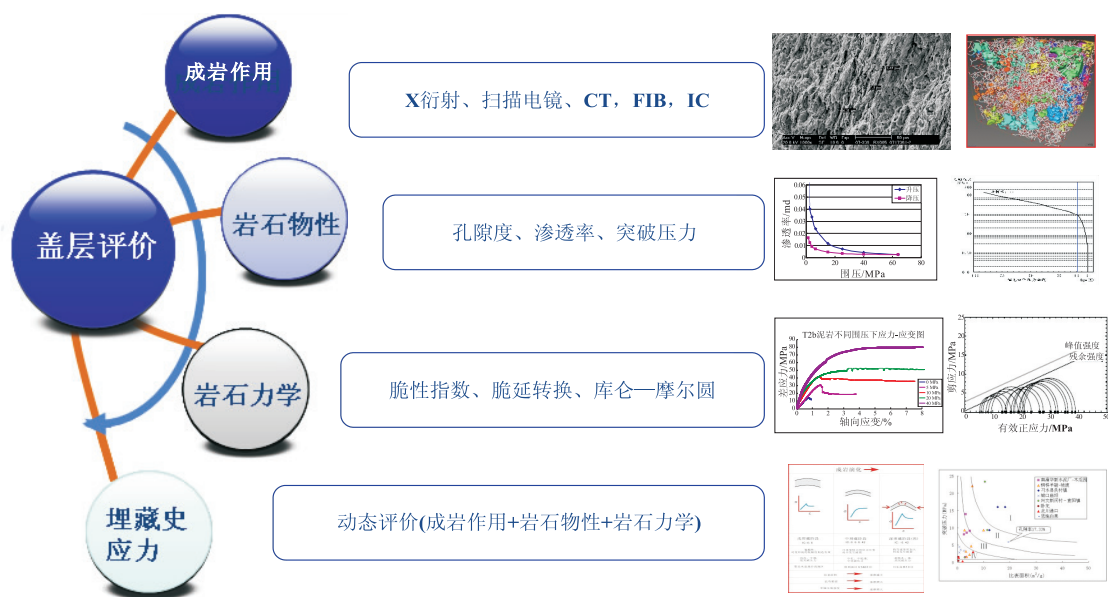


图 3 泥岩及盖层的动态评价分析技术及流程

Fig.3 Analysis technique and flow chart of dynamic evaluation of shale seal

结合泥岩盖层是否产生裂缝进行评价。而对裂缝进行评价时,还要考虑不同温度与压力条件下盖层岩石的脆延转换点,成岩作用阶段与脆延转换是评价泥岩盖层的重要参数。

3 问题与讨论

对泥岩性质的认识非常重要,除了应用于油气盖层评价外,它还涉及到其他领域如核废料的封存、温室气体的封存。泥岩性质的研究,包括页岩气的研究更多地依赖于物理方法,在进行泥岩盖层封盖评价时要加强以下几个方面的工作:

(1) 正常压实泥岩物性如孔渗与深度具有一定的规律性,但成岩阶段较高的泥岩封盖能力的评价参数需要进一步的验证;泥岩的颗粒效应、泥岩流体状态及温度压力对盖层的封盖能力的影响需要用更多的物理方法进行验证;泥岩封盖能力的模拟实验分析技术要进一步加强。

(2) 对泥岩封盖能力起关键作用的力学分析还有待深入。所有岩石类型中对泥岩的力学与变形特征了解最少,主要因为泥岩的取样困难而且保存较难。泥岩应力非均质性 & 岩石物理的响应关系需要进一步研究。

(3) 需要运用泥岩的物理性质(声、波、电)及建立相应数学模型进行泥岩的非均质性评价,把泥岩岩石物理参数用于盖层的测井与地震解释。泥岩盖层的实验结果如何应用到宏观的评价上还要有多学科的方法。

(4) 对目前的非常规页岩气勘探来说,需要对

泥页岩性质有更深入的了解,包括泥岩的可压裂性、泥页岩纳米级储集空间定量、泥页岩气体流动性分析、泥页岩的数学建模及产能预测。

参考文献:

[1] 金之钧,周雁,云金表,等.我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向[J].石油与天然气地质,2010,31(6):715-724.

[2] 刘伟新,承秋泉,范明.盖层、压力封盖和异常压力系统研究[J].石油实验地质,2011,33(1):74-80.

[3] 周雁,金之钧,朱东亚,等.油气盖层研究现状与认识进展[J].石油实验地质,2012,34(3):234-245.

[4] 袁玉松,范明,刘伟新,等.盖层封闭性研究中的几个问题[J].石油实验地质,2011,33(4):336-340.

[5] 魏水建,冯琼,冯寅,等.川东北通南巴地区三叠系膏盐岩盖层预测[J].石油实验地质,2011,33(1):81-86.

[6] 张军涛,吴世祥,李宏涛,等.川东南志留系泥岩盖层水岩相互作用的实验模拟及其研究意义[J].石油实验地质,2011,33(1):96-99.

[7] 史集建,付广,吕延防,等.歧口凹陷沙河街组一段中部区域盖层封气能力综合评价[J].石油与天然气地质,2011,32(5):671-681.

[8] 周雁,彭勇民,李双建.中上扬子区层序样式对盖层封闭性的控制作用[J].石油实验地质,2011,33(1):28-33.

[9] 中国石化科技部与澳大利亚 CSIRO 泥岩研究中心联合工业项目报告 (SHARC JIP) [R].无锡:无锡石油地质研究所,2010-2012.

[10] Sarout J, Detournay E. Pore pressure transmission test for reactive shales: Chemoporosity-elastic analysis and experimental validation[J].Int J Rock Mech Min Sci,2011,48:759-772.

[11] Ferrari A, Laloui L. Advances in the testing of the hydro-mechanical behaviour of shales [C]//Laloui L, Ferrari A. Multiphysical Testing of Soils.Springer,2012:57-68.

石油与天然气地质,2012,33(4):646-649.

[12] 邓辞,陈同飞,刘志霞,等.江苏油田 SEC 静态储量潜力研究[J].石油实验地质,2012,34(5):527-530.

[13] 刘韵,张贵生,马丽梅.中国与 SEC 储量评估差异分析:以元坝长兴组元坝 103H 井区长二段气藏为例[J].石油实验地质,2012,34(5):514-517.

[14] 张玲,袁向春,林豪,等.国内储量计算与上市储量评估对比分析[J].中国西部油气地质,2006,2(3):245-248.

[15] 胡允栋,萧德铭,王永祥,等.按 SEC 标准进行油气证实储量评估的基本原则[J].石油学报,2004,25(2):19-24.

[16] 徐永梅.SEC 储量评估与中国储量评价的区别[J].企业科技与发展,2009,9(10):179-181.

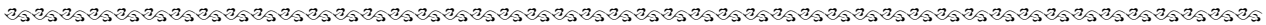
[17] 张伦友.国内外油气储量的概念对比与剖析[J].天然气工业,2005,25(2):186-189.

[18] 戴建军,常洪卫.SEC 储量评估与国内储量评估的差异[J].内江科技,2013(1):54-55.

[19] 李显路,龙卫江,余小红,等.河南油田 SEC 上市储量评估经济影响因素研究[J].石油实验地质,2012,34(5):518-521.

[20] 程晓珍,王亮,魏浩源,等.浅析经济因素对 SEC 原油储量评估的影响[J].新疆石油地质,2008,29(6):785-787.

(编辑 韩 或)



(上接第 693 页)

[12] Salager S, Rizzi M, Laloui L. An innovative device for determining the soil water retention curve under high suction at different temperatures[J].Acta Geotechnica,2012,6(3):135-142.

[13] Seiphoori A, Ferrari A, Laloui L. An advanced calibration process for a thermo hydro mechanical triaxial testing system[C]// International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials. Séoul, August 31-Sept 2,2011.

[14] Josh M, Clennell B, Siggins T, et al. Wideband electrical/dielectric measurements from millihertz to gigahertz frequencies[C]// 77th Annual Meeting of the SEG, San Antonio, TX. Expanded Abstracts,2007:1701-1705.

[15] Josh M, Esteban L, Delle Piane C, et al. Laboratory characterisation of shale properties[J].Journal of Petroleum Science and Engineering,2012,88/89:107-124.

[16] Borysenko A, Clennell B, Sedev R, et al. Experimental investigations of the wettability of clays and shales[J].J Geophys Res,2009,114(7):1-11.

[17] Bayuk I O, Ammerman M. Elastic moduli of anisotropic clay[J].Geophysics,2007,72(5):107-117.

[18] Chesnokov E M, Tiwary D K. Mathematical modelling of anisotropy of illite rich shale[J].Geophysical Journal International, 2009,178(3):1625-1648.

[19] Bachrach R. Elastic and resistivity anisotropy of shale during compaction and diagenesis:joint effective medium modeling and field observations[J].Geophysics,2011,76(6):175-186.

[20] Ulm F J, Abousleiman Y. The nanogranular nature of shale[J].Acta Geotechnica,2006,1(2):77-88.

[21] Pervukhina M, Golodoniuc P, Gurevich B C, et al. An estimation of sonic velocities in shale from clay and silt fractions from the Elemental Capture Spectroscopy log[J].EAGE,2012.

[22] 刘伟新,王延斌,秦建中.川北阿坝地区三叠系黏土矿物特征及地质意义[J].地质科学,2007,42(3):469-482.

[23] 李明瑞,张清,段宏臻,等.苏里格气田上古生界主要含气层系粘土矿物分布及其主控因素[J].石油与天然气地质,2012,33(5):743-750.

[24] 卢龙飞,蔡进功,刘文汇,等.泥质烃源岩中粘土矿物结合有机质热演化的红外发射光谱研究[J].石油实验地质,2012,34(2):215-222.

[25] 刘伟,余谦,闫剑飞,等.上扬子地区志留系龙马溪组富有机质泥岩储层特征[J].石油与天然气地质,2012,33(3):346-352.

[26] 范明,陈宏宇,俞凌杰,等.比表面积与突破压力联合确定泥岩盖层评价标准[J].石油实验地质,2011,33(1):87-90.

[27] 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.

[28] 俞凌杰,范明,刘伟新.盖层封闭机理研究[J].石油实验地质,2011,33(1):91-95.

[29] 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,2011,85(10):1691-1697.

[30] 马永生,楼章华,郭彤楼,等.中国南方海相地层油气保存条件综合评价技术体系探讨[J].地质学报,2006,80(3):406-417.

[31] 俞凌杰,张文涛,范明,等.膏岩三轴压缩试验及高温相变特征研究[J].岩土力学,2012,33(11):3318-3322.

(编辑 叶德燎)