

碳酸盐岩储气库盖层动态密封性评价研究

滕振超¹ 张品金¹ 贾善坡² 徐 萌³ 张广权⁴ 贾跃玮⁴

1. 东北石油大学土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163000;
2. 东北石油大学非常规油气研究院, 黑龙江 大庆 163000;
3. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江 大庆 163000;
4. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100089

摘 要:注采扰动会导致碳酸盐岩储气库盖层微观孔隙结构发生不同程度的弹塑性变形,甚至会使盖层发生宏观破坏,从而导致盖层泄漏。针对储气库高速往复注采的特点,从地质特征、毛细管物性密封和宏观力学完整性三个方面出发,开展了注采条件下的盖层动态密封性评价。以 Q 储气库碳酸盐岩盖层为背景,通过开展注采条件下的动态密封性试验,明确了交变力学对于盖层动态密封性的影响,发现交变荷载下渗透率和突破压力呈现出下降—稳定—上升的趋势,当围压较大时,规律主要表现为下降—稳定;通过研究应力—应变曲线及声发射特征,明确了盖层疲劳破坏风险及声发射特征,表明注采条件下交变疲劳破坏风险较低;综合运用 AHP 和可拓学理论,对碳酸盐岩储气库盖层动态密封性进行综合评价,Q 储气库评价为盖层动态密封性极好。评价体系的建立为碳酸盐岩储气库盖层动态密封性评价提供了科学依据。

关键词:碳酸盐岩;储气库;盖层;动态密封性评价;声发射

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.04.013

Study on dynamic sealing evaluation of carbonate gas storage cap rock

TENG Zhenchao¹, ZHANG Pinjin¹, JIA Shanpo², XU Meng³, ZHANG Guangquan⁴, JIA Yuewei⁴

1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163000, China;
2. Institute of Unconventional Oil & Gas, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163000, China;
3. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163000, China;
4. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing, 100089, China

Abstract: Injection-production disturbance will lead to varying degrees of elastic-plastic deformation of micro-pore structure of carbonate gas storage caprock, and even macro damage of the cap rock, resulting in cap rock leakage. According to the characteristics of high-speed reciprocating injection-production in gas storage, the dynamic sealing evaluation of caprock under injection-production conditions was carried out from geological features, capillary physical sealing and macro mechanical integrity. Taking the carbonate

收稿日期:2022-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目“气藏型储气库泥岩盖层的疲劳效应及密封性动态演化机理研究”(42072166);黑龙江省自然科学基金项目“地下储库泥岩盖层损伤及其渗透性演化机制研究”(LH2020D004);深部岩土力学与地下工程国家重点实验室项目“热—力耦合条件下泥岩损伤、自愈特性及其与渗透性的关联性研究”(SKLGDUEK2001)

作者简介:滕振超(1976-),男,河北故城人,副教授,博士,主要从事结构工程、防灾减灾及防护工程方面的研究工作。E-mail:tzcdqpi@163.com

caprock of Q gas storage as the background, the influence of alternating mechanics on the dynamic sealing of caprock was clarified through the dynamic sealing test under injection-production conditions. It was found that under alternating load, the permeability and breakthrough pressure showed the trend of first decline-stability-rise. When the confining pressure was large, the law is mainly in the decline-stability stage; Through the stress-strain curve and acoustic emission characteristics, the fatigue failure risk and acoustic emission signal characteristics of caprock were defined, which showed that the alternating fatigue failure risk was low under injection-production conditions; Using AHP and extension theory comprehensively, the dynamic sealing of carbonate gas reservoir cap was evaluated. Q gas reservoir cap is evaluated as excellent dynamic sealing. The establishment of the evaluation system provides a scientific basis for the dynamic sealing evaluation of carbonate gas reservoir caprock.

Keywords: Carbonate rock; Gas storage; Cap rock; Dynamic sealing evaluation; Acoustic emission

0 前言

盖层密封性是储气库密封性的重要指标,是评价储气库安全性的重要依据^[1]。与常规气藏相比,储气库具有多周期、强注强采的特性;由于碳酸盐岩具有很强的非均质性,其封闭性远不如泥岩和膏盐岩,与常规泥岩盖层相比,碳酸盐岩盖层具有脆性程度高受构造影响大的特性^[2],因此传统的盖层密封性评价标准已经不适用于碳酸盐岩储气库盖层的评价。

目前,不少学者针对盖层密封性评价开展了不同程度的研究,舒萍等人^[3]通过盖层岩性、厚度分布、物性、微观孔喉结构对盖层密封性进行了定性评价,通过盖层突破压力计算模型进行了定量评价;林建品等人^[4]开展了枯竭气藏型储气库盖层能力综合评价,建立基于全应力—应变特征的盖层岩石脆性评价标准。目前盖层的密封性评价多为静态下的突破压力测试^[5],未考虑交变应力对原始毛细管密封性的影响,不能准确地反映出储气库的动态封闭能力。同时,注采过程中应力的交替变化会导致盖层岩石逐渐损伤,渗透性有增大的趋势,因此,碳酸盐岩储气库需考虑交变应力下的盖层损伤及弹塑性变形特征^[6-10]。

针对碳酸盐岩储气库高速往复注采的特点,本文基于地质特征、毛细管物性密封和宏观力学完整性三个方面,综合盖层沉积环境、岩性特征、盖层厚度、静态密封性、动态密封性及岩石力学特征等因素,提出了一种碳酸盐岩储气库动态密封性的综合评价方法。建立基于AHP及可拓学理论的评价模型,为碳酸盐岩储气库建库提供理论依据。

1 地质背景

Q 储气库位于川东北达县—宣汉探区的东南部,构造简单,是一个受南、北断层控制的北西向长轴背斜构造。其构造的形成与演化主要受三个方向的挤压应力

构成的非均—联合应力场以及早期构造形迹的控制,气藏原始地层压力 77.0 MPa,压力系数 1.82,为超高压压力系统^[11]。

1.1 沉积环境

碳酸盐岩的形成受原始沉积环境的控制,沉积环境控制着沉积物的展布。沉积环境对盖层侧向分布和垂向叠置关系影响较大,不同地貌单元、不同相带的盖层发育特征相差各异。利用 FMI 成像资料对 Q 储气库进行沉积相分析,盖层沉积环境主要为开阔台地浅滩亚相及开阔台地滩间亚相。开阔台地浅滩亚相为开阔台地环境中的浅水高能地带,沉积时能量较高,以亮晶砂屑灰岩为主;多呈块状层理,泥质含量较滩间亚相泥质含量低。开阔台地滩间为浅滩之间的深水沉积区,沉积时海水较深,能量较小,沉积物粒度细,以泥—微晶灰岩为主夹少量泥岩薄层,水平层理发育。

1.2 岩性特征

根据岩性特征,盖层主要分为蒸发岩类盖层、泥岩类盖层及碳酸盐岩类盖层。对储气库而言,泥岩和蒸发岩是理想的盖层岩性^[12]。在碳酸盐岩盖层的研究中,泥质含量是影响封闭能力的重要因素。泥质含量一般通过常规测井中的自然伽马值来标定,即自然伽马值越大,则泥质含量越高,当盖层自然伽马值大于 20 API 时,盖层具有封闭能力^[13]。同时,在碳酸盐岩中会存在泥质含量较高或裂缝不太发育的纯岩性致密层,其电性特征表现为电阻率高^[14]。

盖层所在地层 FMI 测试结果,该段地层岩性主要以灰色灰岩夹薄层含云灰岩为主。4 523.9 ~ 4 530 m 段的岩性为含云灰岩,泥质含量稍高,电阻率平均值为 400 Ω ,自然伽马平均值为 41 gAPI,密度平均值为 2.735 g/cm³。4 530 ~ 4 549 m 段的岩性为泥质灰岩,电阻率平均值为 650 Ω ,自然伽马平均值为 37 gAPI,密度平均值为 2.715 g/cm³。FMI 静态图像颜色较亮,地层成层性非常好,为薄层灰岩,同时可见高阻的质较纯的灰岩发育。表明

目的盖层岩性较好且裂缝不太发育,有利于盖层封闭。

1.3 盖层厚度

盖层的封闭能力主要取决于盖层岩石的物性特征,与厚度没有直接联系。但目前储气库盖层厚度对封闭能力的影响程度还没有统一的评价标准,但发育较厚的盖层对其封闭能力具有补偿作用,厚度越大、其空间展布面积越大,横向连续性越好,越有利于气体封存^[12]。

对碳酸盐岩来说,除沉积过程中沉积环境的横向和纵向变化,多种成岩改造的联合作用均在不同程度上影响着碳酸盐岩的特征,使大多数碳酸盐岩呈现出较强的

非均质性且延展性差的特性,所以,相较于泥岩类、膏盐岩类盖层,碳酸盐岩盖层厚度在影响盖层封盖能力各因素指标中所占的比重较小^[13]。

根据地震资料等显示,Q 储气库盖层平均厚度 300 m 左右,最薄处 110 m 左右,厚度较大。按照盖层厚度可将盖层封闭能力分为四个等级,当厚度 > 100 m 时,可以认为盖层封闭能力较强,有利于气体封存。

1.4 地质综合分析

根据以往研究成果^[12],从地层特征、岩性特征和盖层厚度对盖层封闭能力进行划分,评价指标见表 1。

表 1 储气库盖层封闭能力等级划分标准表

Tab. 1 Standard table for sealing ability grade classification of gas storage cap layer

沉积环境	岩性	厚度及连续性 /m	等级划分
半深—深湖相、盆地相、广海陆盆相	盐岩、泥岩	> 100	好
台地相、滨—浅湖相、三角洲前缘相	含砂泥岩、含粉砂泥岩	50 ~ 100	较好
台地边缘、滨岸相、三角洲分流平原相	粉砂质泥岩、砂质泥岩	25 ~ 50	中等
河流相、冲积扇相	泥质粉砂岩、泥质砂岩	< 25	差

2 注采条件下毛细管密封性

目前,盖层的封闭机理主要为物性封闭(毛细管封闭)、压力封闭及烃浓度封闭三种,盖层的物性封闭是最常见、最重要的盖层封闭机理^[13]。

毛细管封闭指的是通过盖层最大喉道的毛细管压力差来封闭圈闭中的油气。排替压力是指岩石中最大连通孔隙的润湿相流体被非润湿相流体排替所需的最低压力,是反应盖层微观封盖能力的最直接、最根本的参数^[14-15]。

2.1 静态排替压力特征

盖层岩石静态突破压力测试主要为间接法和直接法。间接法是指压汞法,压汞法具有测试简洁快速的优点^[16],本文通过压汞法对 G1-1 和 G1-2 盖层岩石进行排替压力测试,盖层岩石毛细管压力曲线见图 1。

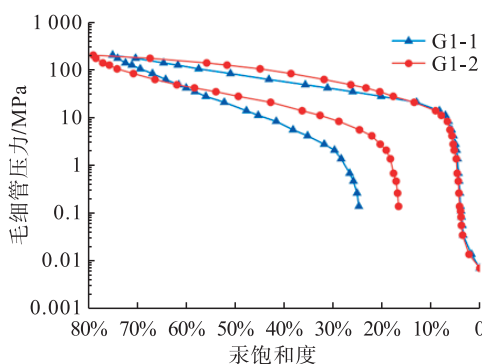


图 1 盖层岩石毛细管压力曲线图

Fig. 1 Capillary pressure curve of cap rock

根据行业标准^[17],岩石的排替压力为非湿润性开始连续进入岩心吼道时所对应的毛细管压力,从图 1 可知,半对数坐标沿着毛细管压力曲线平坦部分的第一个拐点做切线,切线延长线余纵坐标轴的交点压力值即为排替压力。根据排替压力测试结果可知,两块盖层岩心的排替压力值分别为 13.7 MPa、14.27 MPa,均值为 13.98 MPa。可根据排替压力值大小将盖层密封性等级分为四类^[12]: > 15 MPa 为优,10 ~ 15 MPa 为良,5 ~ 10 MPa 为中,< 5 MPa 为差。因此,可认为灰岩盖层为良好盖层,封闭能力良好。

2.2 动态渗透率与排替压力演化特征

通过开展室内试验模拟储气库注采过程,围压模拟有效水平应力(即水平应力减地层压力),通过轴压交变范围模拟注采过程中偏应力变化。根据注采条件下的有效应力变化规律,围压设置为 14.29 ~ 55.56 MPa,交变荷载范围为 3.26 ~ 39.2 MPa,交变次数设置为 60 次,分别在交变次数 0 次、15 次、30 次、45 次、60 次时进行渗透性测试。获得交变次数对渗透率的影响规律,绘制交变次数与渗透率关系图,见图 2。

根据试验结果,不同围压下四块盖层岩石的渗透率随交变次数的变化趋势基本一致,渗透率呈现出下降—平缓—升高的趋势。曲线分为压密阶段、平缓阶段及发展阶段三个阶段。

1) 压密阶段:随着循环荷载次数的增加,岩心骨架受到压缩,内部裂隙及孔喉通道被挤密,渗透率出现下降趋势。

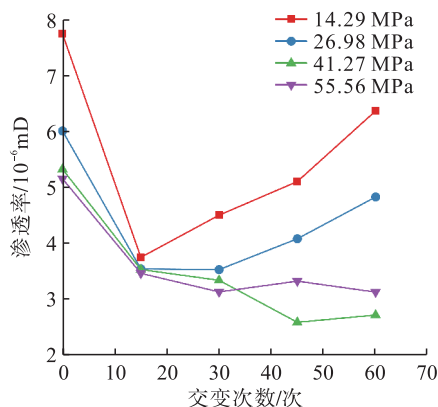


图 2 不同围压下渗透率变化规律图

Fig. 2 Diagram of permeability variation under different confining pressures

2) 平缓阶段: 随着交变荷载的持续加载, 岩心骨架进一步压缩, 但岩石内部未出现较大损伤, 渗透率呈现出稳定状态。

3) 发展阶段: 交变荷载作用下, 岩石内部发展出新的裂纹及微裂缝, 产生新的渗流通道, 渗透率出现上升趋势。

本文的渗透率演化曲线中发展阶段不明显, 交变后渗透率(60 次)均未超过初始渗透率(0 次), 主要是因为注采条件下的交变荷载幅值范围较小, 未对岩石产生较大损伤, 这也表明了当前注采条件下, 有效应力对盖层密封性影响较弱, 这一规律在下文中的基于声发射的岩石损伤演化中有进一步的探究。

根据国外储气库盖层评价经验, 若盖层岩石的渗透率已知, 则盖层的排替压力可以通过与渗透率之间的相关模型获得, 目前行业内广泛使用的盖层排替压力的预测模型的是由 LK Thomas 等人建立的相关性模型^[12]。针对室内岩心排替压力测试, 研究了排替压力与渗透率之间的相关关系, 其拟合公式为:

$$p_{cd} = 5.082 \times 10^{-2} \times \left(\frac{1}{k} \right)^{0.43} \quad (1)$$

式中: p_{cd} 为岩石排替压力, MPa; k 为渗透率, mD。

根据式(1)可以得到循环次数及围压与排替压力的关系, 见表 2。

表 2 动态突破压力信息表

Tab. 2 Dynamic breakout pressure informations

岩心	交变 0 次		交变 60 次后	
	渗透率 / 10^{-6} mD	突破压力 / MPa	渗透率 / 10^{-6} mD	突破压力 / MPa
G1	7.73	8.02	6.36	8.72
G2	6.00	8.94	4.82	9.82
G3	5.32	9.42	2.72	12.57
G4	5.15	9.55	3.13	11.83

3 盖层岩石的力学特性分析

在储气库注采交变运行中, 盖层微裂隙的渗漏是造成盖层有效性变差的主要因素。因此评价和界定盖层脆延性转化和注采造成的微裂缝是评价盖层有效性的关键问题^[9-10]。

相较于泥岩, 碳酸盐岩具有脆性程度高、在变形过程中易形成裂缝的特征, 同时交变荷载作用下, 岩石发生疲劳破坏的风险也较高。因此, 碳酸盐岩盖层应当更加注重注采条件下的岩石力学特征。

3.1 盖层脆性特性

三轴应力—应变曲线见图 3, 岩心经交变荷载后弹性模量为 29.92 ~ 32.04 GPa; 峰值强度随着围压的逐渐增大而增大, 因为岩石的非均质性, 导致岩心 G2 峰值强度明显高于其他试样, 这一效应在声发射信号中也有所体现; 岩心在荷载作用下, 峰值前后出现了明显的屈服平台, 岩石表现出明显的脆—延性变形转化过程。

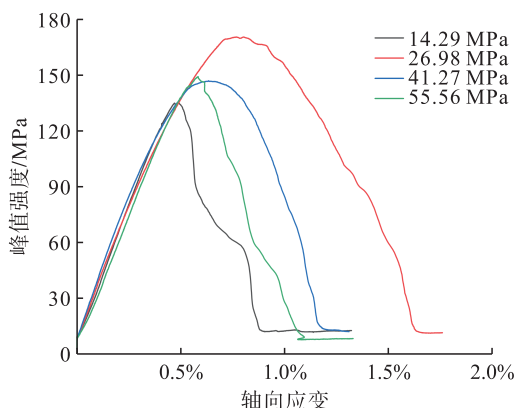


图 3 交变循环后三轴应力—应变曲线图

Fig. 3 Stress-strain curve after alternating cycle

通过采用应力—应变曲线特征的方法来评价盖层岩石破坏机制, 盖层的脆性程度可以通过峰值强度、残余强度、屈服阶段及峰后斜率来获取^[18-19]。经过综合考虑峰前、峰后及屈服阶段的力学特征, 建立盖层脆性评价体系, 过程见图 4。

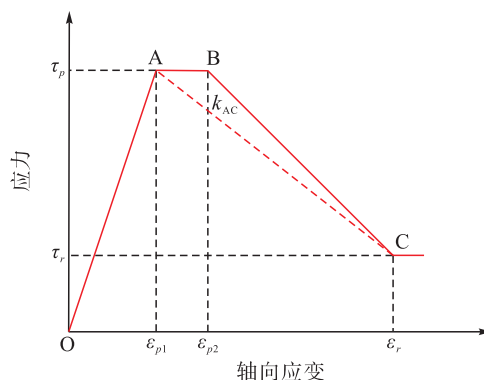


图 4 盖层脆性评价指标示意图

Fig. 4 Schematic diagram of brittleness evaluation of cap rock

首先定义参数 I'_1 、 I'_2 及 I'_3 为:

$$I'_1 = \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_p} \quad (2)$$

式中: I'_1 为峰后应力下降程度; τ_p 为峰值强度, MPa; τ_r 为残余强度, MPa。

$$I'_2 = \frac{\lg |k_{AC}|}{10} \quad (3)$$

式中: I'_2 为峰后应力下降的绝对速率; k_{AC} 为屈服起始点 A 到残余起始点 C 的斜率, OAC 段为某些岩石经过峰值强度后应力直接降低, OABC 为某些岩石峰值强度前后出现了明显的屈服平台, 屈服平台表明岩石出现了脆—延性变形转化过程, 脆性程度降低。

$$I'_3 = 1 - \frac{\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{p1}}{\varepsilon_r} \quad (4)$$

式中: I'_3 为峰值屈服段影响系数; ε_{p1} 、 ε_{p2} 、 ε_r 分别为屈服阶段起点应变、屈服阶段终点应变、残余应变。

岩石脆性程度指标 I 为:

$$I = I'_1 I'_2 I'_3 = \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_p} \frac{\lg |k_{AC}|}{10} \left(1 - \frac{\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{p1}}{\varepsilon_r} \right) \quad (5)$$

式中: I 取值为 0~1, I 越大, 表明脆性程度越高。

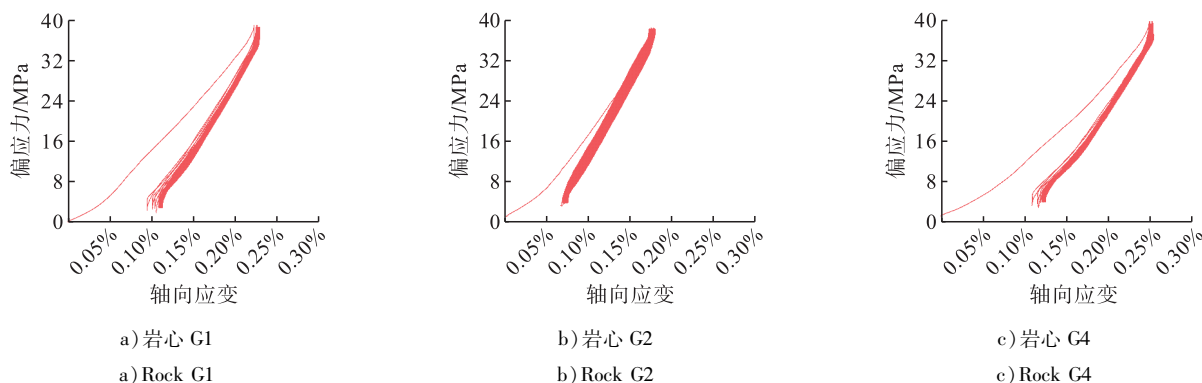


图5 交变荷载下应力—应变曲线图

Fig. 5 Stress-strain curves under alternating loads

根据应力—应变曲线, 加载初期轴向应变增幅较快, 随着交变次数的增加, 增幅趋于稳定。交变 60 次后, G3 因应变计问题, 数据采集不完整, 其他岩心累计轴向应变为 0.18%~0.26%, 且岩石均未发生破坏, 表明当前注采条件下盖层疲劳破坏风险较低。

在交变荷载作用下, 岩石内部不断产生裂纹, 进而产生声发射信号, 声发射活动中的能量信息反映了声发射信号相对能量的大小, 其与应力随时间在交变荷载下的规律基本一致, 能量可以反映出碳酸盐岩在交变荷载过程中的损伤程度^[20]。根据交变过程中声发射信号与时间的关系, 获得声发射能量强度大小随时间变化的关系。在低应力条件下, 岩石损伤随着交变次数的增加趋于平稳, 故有损伤随交变次数的对数模型关系式^[21]:

根据上述分析, 结合本文试验数据, 获得注采条件下盖层岩石力学试验测试结果, 根据试验结果可知岩石脆性指数分布为 0.207 3~0.232 88 之间, 具体结果见表 3^[5]。

表3 注采条件下盖层岩石力学试验测试结果表

Tab. 3 Rock mechanics test results of cap rock under injection-production conditions

岩心	弹性模量 /GPa	峰值应变	峰值强度 /MPa	残余应变	残余强度 /MPa	脆性指数
G1	32.04	0.47%	134.87	0.90%	12.23	0.222 7
G2	31.29	0.82%	170.26	1.66%	11.48	0.207 3
G3	31.10	0.72%	146.53	1.21%	12.98	0.212 6
G4	29.92	0.58%	148.93	1.12%	7.95	0.228 8

3.2 变形及声发射特征

岩石的损伤实际上是岩石受力作用下, 天然微小裂纹及裂隙裂纹扩展成宏观裂纹及生成新裂纹的过程。通过模拟储气库运行过程, 开展室内碳酸盐岩盖层岩石三轴交变力学试验, 绘制应力—应变曲线, 见图 5。

$$D = a + b \ln(N + c) \quad (6)$$

式中: D 为损伤变量; N 为交变次数, 次; a 、 b 、 c 为参数。

基于式(6), 对本次试验损伤累计值和交变次数进行拟合, 拟合结果与试验结果相关性均大于 96%, 可以认为试验结果与理论公式具有一定的相关性, 见图 6。

岩石周期加载过程是岩石内部原生微裂隙反复闭合、张开与扩展的过程。根据声发射信号能量随时间的分布可以看出, 交变荷载初期, 岩心内部微裂隙在力学作用下被压密, 声发射信号较为强烈, 损伤值急剧上升, 此时的损伤值为岩石的原始损伤; 交变荷载中期, 随着交变次数的增加, 声发射信号能量强度随着裂隙的压密逐步减小; 交变荷载后期, 随着岩石被进一步压缩, 原始裂隙扩展的同时萌发出新的裂隙, 岩石开始产生新的损伤, 声发射信号逐步增强。整体来看, 在低围压情况

下,声发射信号整体较为强烈,信号强度随着围压的升高逐步减弱。围压加载过程中,岩石内部微裂纹逐步闭合,围压越高裂纹闭合程度越高^[22]。

根据相关研究^[6],将 50 次交变荷载后的累计塑性

应变作为储气库盖层破坏的评价指标,当累计塑性应变大于等于 1% 时,储气库盖层破坏风险较高,若累计塑性应变低于 1%,则储气库盖层破坏风险较低,表明盖层具有较好的力学完整性。

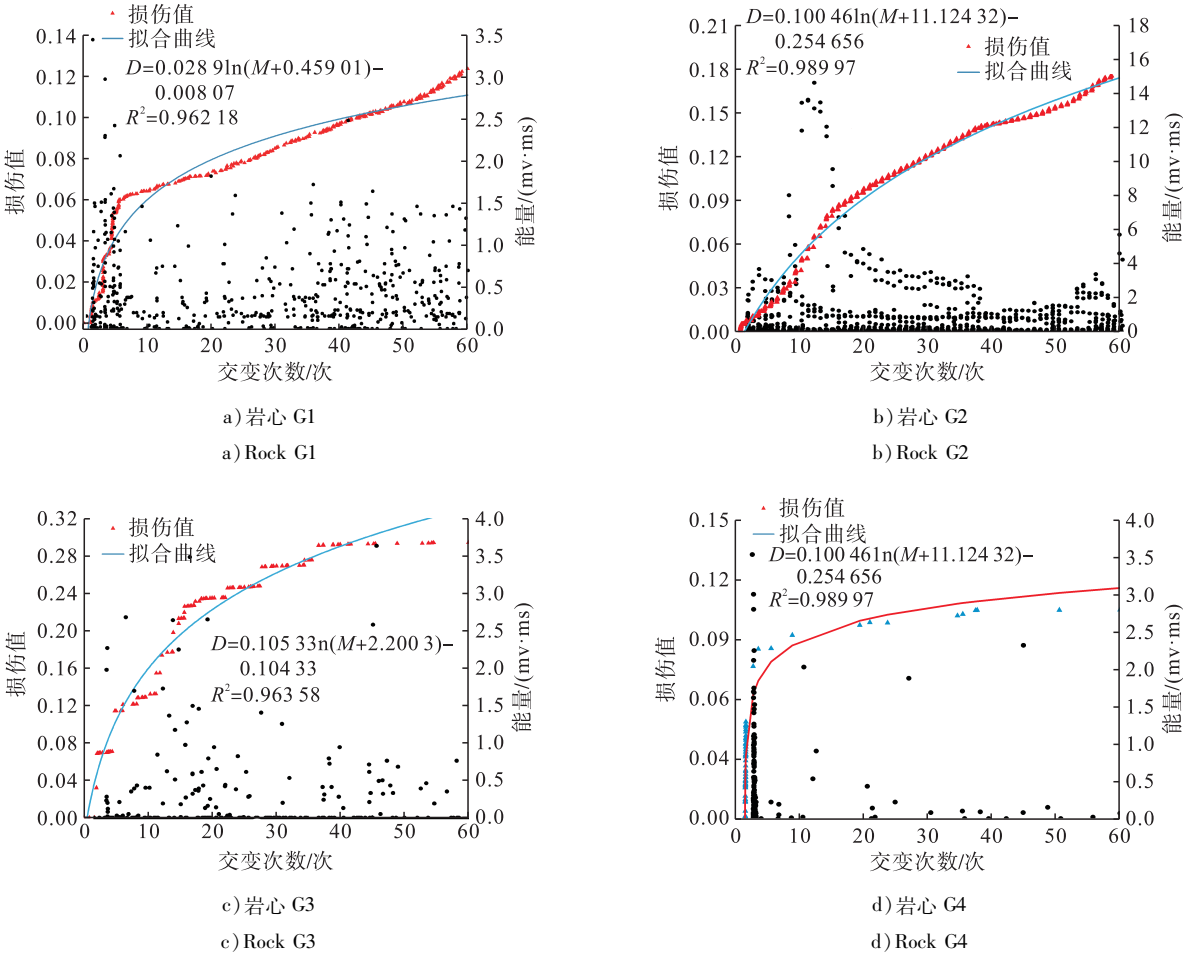


图 6 交变过程中损伤值、能量与时间关系图

Fig. 6 Diagram of damage,energy and time in alternating process

4 基于 AHP 的可拓学理论评价体系

4.1 评价指标选取

按照盖层动态密封性要求,结合地质信息,开展注

采条件下的盖层动态密封性试验,根据试验结果,对碳酸盐岩储气库盖层动态密封性进行综合评价,根据以往研究^[12,23]建立储气库盖层动态密封性单因素评价指标,见表 4。

表 4 盖层动态密封性单因素评价指标表

Tab.4 Single factor evaluation index of dynamic sealing performance of cap rock

等级	沉积环境	岩石岩性	盖层厚度 /m	排替压力 /MPa	静态渗透率 /mD	动态渗透率 /mD	脆性特征	累计应变
极好	半深—深湖相、盆地相、广海陆盆相	盐岩、泥岩	> 100	> 15	< 10 ⁻⁷	< 10 ⁻⁷	< 40%	< 0.25%
较好	台地相、滨—浅湖相、三角洲前缘相	含砂泥岩、含粉砂泥岩	50 ~ 100	10 ~ 15	10 ⁻⁷ ~ 10 ⁻⁶	10 ⁻⁷ ~ 10 ⁻⁶	40% ~ 50%	0.25% ~ 0.50%
好	台地边缘、滨岸相、三角洲分流平原相	粉砂质泥岩、砂质泥岩	25 ~ 50	5 ~ 10	10 ⁻⁶ ~ 10 ⁻⁵	10 ⁻⁶ ~ 10 ⁻⁵	50% ~ 60%	0.50% ~ 1.00%
一般	河流相、冲积扇相	泥质砂岩、粉砂岩	< 25	< 5	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	> 60%	> 1.00%

根据碳酸盐岩储气库盖层地质特征及盖层室内试验,获得碳酸盐岩储气库盖层单因素待评价指标,见表5。

为方便计算,需将各单因素评价指标进行量纲一化处理,量纲一化处理规则如下:

表5 盖层动态密封性单因素待评价指标表

Tab.5 Index table of single factor to be evaluated for dynamic sealing of cap rock

指标	沉积环境	岩石岩性	盖层厚度 /m	排替压力 /MPa	静态渗透率 / 10^{-6} mD	动态渗透率 / 10^{-6} mD	脆性特征	累计应变
评价	开阔台地浅滩亚相及开阔台地滩间亚相	碳酸盐岩类盖层	110	13.98	7.73	6.36	22.88%	0.26%

表6 盖层动态密封性单因素评价指标表(量纲一的量)

Tab.6 Single factor evaluation index of dynamic sealing performance of cap rock (dimensionless quantity)

等级	沉积环境	岩石岩性	盖层厚度	排替压力	静态渗透率	动态渗透率	脆性特征	峰值应变
极好	0.75~1.00	0.75~1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.60~1.00	0.75~1.00
较好	0.50~0.75	0.50~0.75	0.50~1.00	0.67~1.00	0.91~1.00	0.91~1.00	0.50~0.60	0.50~0.75
好	0.25~0.50	0.25~0.50	0.25~0.50	0.33~0.67	0.00~0.92	0.00~0.92	0.40~0.50	0.00~0.50
一般	0.00~0.25	0.00~0.25	0.00~0.250	0.00~0.33	0.00	0.00	0.00~0.40	0.00

表7 单因素待评价指标表(量纲一的量)

Tab.7 Single factor index to be evaluated (dimensionless quantity)

评价因素	评价结果	评价因素	评价结果
沉积环境	0.74	静态渗透率	0.23
岩石岩性	1.00	动态渗透率	0.36
盖层厚度	1.00	脆性特征	0.77
排替压力	0.93	峰值应变	0.74

4.2 构建 AHP 评价指标权重值

根据盖层封闭能力的要求,结合静态密封性特征,将盖层动态封闭性作为目标层,将盖层地层特征、盖层孔渗特征及岩石力学特征3个因素作为准则层,再将经过细化后的8项基本指标作为评价层,建立基于AHP的目标层次结构模型。

通过目标层次结构的建立,对各个因素进行量化分析,确定了上下层因素之间的隶属关系,从而构造出定性到定量转化的判断矩阵。根据 Saaty 提出的“1~9”标度法为依据,将任意层次的某个要素及其隶属的要素作为评价目标,将各个要素的重要性进行两两比较,根据比较结果获得判断矩阵。

根据判断矩阵求出最大特征值及其对应的特征向量,该特征向量即为各个评价因素的权重值,考虑到专家对各个因素评价时具有一定的主观性,不能完全精确的判断出权重值的大小,因此需定义一致性指标,计算

$$q' = \begin{cases} \frac{q - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} & (\text{针对越大越好的因素}) \\ \frac{q_{\max} - q}{q_{\max} - q_{\min}} & (\text{针对越小越好的因素}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: q 为单因素标准评价值; q' 为处理后单因素评价值。将表4~5数据进行处理获得量纲一后评价值见表6~7。

公式为:

$$CR = [(\lambda_{\max} - n) / (n - 1)] / RI \quad (8)$$

式中: CR 为一致性评价指标; $\lambda_{\max}$ 为矩阵最大特征根;当 $n=3$ 时, RI 取值为 0.58。当 $CR < 0.1$ 时可以认为判断矩阵具有满意的一致性,说明权值分配合理。

对储气库专家进行问卷调查,通过公式可以计算出各个评价因素的权重值,见表8。

表8 权重计算汇总表

Tab.8 Weight calculation summary

准则层	准则层权重值	指标层	指标层权重值	综合权重值
地层特征	0.16	沉积环境	0.162 9	0.027
		岩石岩性	0.297 1	0.048
		盖层厚度	0.540 0	0.088
孔渗特征	0.54	排替压力	0.209 4	0.113
		静态孔渗	0.240 4	0.130
		动态孔渗	0.550 2	0.297
岩石力学特征	0.29	脆性特征	0.333 3	0.097
		峰值应变	0.666 7	0.193

4.3 可拓学评价体系构建

可拓学以物元理论和可拓数学为基础,通过建立物元模型,将各个评价指标转化为一种相容的问题,并从可行性和优化的角度评价指标,是一种定性与定量的评

价方式^[23]。

建立物元 $R = \{M, c, v\}$:

$$R = \begin{bmatrix} M & c_1 & v_1 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: R 为 n 维物元, 本文中 $n=4$; M 为事物名称; c 为特征; v 为量值。

当 M_{ot} 为标准事物, 特征值 c_i 的量值范围为 $\langle a_{oti}, b_{oti} \rangle$, 则经典域和节域的物元矩阵为:

$$R_{ot} = (N_{ot}, C, V_{ot}) = \begin{bmatrix} N_{ot} & c_1 & \langle a_{ot1}, b_{ot1} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{otn}, b_{otn} \rangle \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$R_p = (N_p, C, V_p) = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: R_{ot} 为经典域的物元矩阵; R_p 为节域的物元矩阵, P 表示待评价指标的所有等级。

本文将碳酸盐岩储气库盖层动态密封性分为 I 级(极好)、II 级(较好)、III 级(好)、IV 级(一般)四个等级, $c_1 \sim c_8$ 为 8 个影响因素, 通过单因素的评价标准获得经典域参数取值。

通过碳酸盐岩储气库盖层动态密封性评价指标的取值范围确定节域, 一般为评价指标全体:

$$R_p = \begin{bmatrix} P & c_1 & \langle 0, 1 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_8 & \langle 0, 1 \rangle \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过测井信息、室内试验等方法确定待评价盖层参数, 获得待评物元 $R_1 = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8\} = \{0.74, 1.00, 1.00, 0.93, 0.23, 0.36, 0.77, 0.74\}$ 。

计算待评价物元关联度。待评价物元与等级 t 的关联函数为:

$$k_{ij}(v_{ij}) = \frac{\rho(v_{ij}, v_{oti})}{\rho(v_{ij}, v_{pi}) - \rho(v_{ij}, v_{oti})} \quad (13)$$

式中: $k_{ij}(v_{ij})$ 为第 j 个物质单元的第 i 个特征关于标准物元等级 t 的关联度, $\rho(v_{ij}, v_{pi})$ 为节域物元, $\rho(v_{ij}, v_{oti})$ 为经典域物元。

其中

$$\rho(x_0, x) = \begin{cases} a - x_0 & (x_0 \leq \frac{e+f}{2}) \\ x_0 - f & (x_0 \geq \frac{e+f}{2}) \end{cases} \quad (14)$$

式中: x_0 为数值; e, f 为区间。

物质单元 M_j 关于等级 t 的关联度为:

$$k_{ij}(M_j) = \sum W_i k_{ij}(v_i) \quad (15)$$

$$k_{j0}(M_j) = \max \{k_{ij}(M_j) \mid i=1, 2, 3, 4\} \quad (16)$$

计算结果为 $P = \{k_1, k_2, k_3, k_4\} = \{-0.080, -0.357, -0.607, -0.671\}$, 根据评价结果可知, Q 储气库盖层为 I 级盖层, 动态密封性能力极好, 有利于气体的封存。

5 结论与建议

1) 基于 AHP 和可拓学理论, 建立了碳酸盐岩储气库盖层动态密封性评价体系, 从地质特征、毛细管物性密封及宏观力学完整性三个方面对碳酸盐岩储气库盖层进行综合评价。在静态密封性能力的基础上, 开展了动态密封性评价, 从岩石力学角度解释了动态密封性机理, 弥补了之前研究的不足。根据注采条件下的地应力变化规律, 开展交变力学下的动态突破压力试验, 获得动态突破压力变化规律, 通过检测声发射信号, 获得交变荷载下岩石内部裂隙发展规律。

2) 碳酸盐岩盖层相较于泥岩、膏岩盖层, 具有明显的脆性特征, 在注采过程中易形成裂缝, 这极易导致盖层密封性降低, 应注重考虑碳酸盐岩的脆性特征, 防止碳酸盐岩盖层发生脆性破坏。

3) 以碳酸盐岩 Q 储气库为例, 采用上述评价方法对 Q 储气库进行综合评价, 盖层评价结果为 I 级盖层, 封气能力极好, 评价结果与实际情况一致, 证明该评价方法具有较高的有效性。

4) 本文中碳酸盐岩储气库盖层动态密封性评价体系的建立, 对于碳酸盐岩储气库建库具有一定的参考性, 但随着理论与技术的发展, 评价体系还有待于进一步改进。

参考文献:

- [1] 丁国生, 魏 欢. 中国地下储气库建设 20 年回顾与展望[J]. 油气储运, 2020, 39(1): 25-31.
DING Guosheng, WEI Huan. Review on 20 years' UGS construction in China and the prospect [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 25-31.
- [2] 吕修祥, 屈怡倩, 于红枫, 等. 碳酸盐岩盖层封闭性讨论——以塔里木盆地塔中北斜坡奥陶系为例[J]. 石油实验地质, 2014, 36(5): 532-538.
LYU Xiuxiang, QU Yiqian, YU Hongfeng, et al. Sealing capacity of carbonate cap rocks: A case study of Ordovician in northern slope of central Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(5): 532-538.
- [3] 舒 萍, 高 涛, 王海燕, 等. 大庆油田升平储气库盖层密封性划分标准及评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 272-276.

- SHU Ping, GAO Tao, WANG Haiyan, et al. Cap rock sealing-property classifying standard and evaluation of Shengping gas storage in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38 (5): 272-276.
- [4] 林建品, 贾善坡, 刘团辉, 等. 枯竭气藏改建储气库盖层封闭能力综合评价研究——以兴9枯竭气藏为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 4099-4107.
- LIN Jianpin, JIA Shanpo, LIU Tuanhui, et al. Comprehensive evaluation of sealing ability of mudstone cap rock for XING9 depleted gas reservoir in reconstructing underground gas storage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (Suppl 2): 4099-4107.
- [5] 张璐, 国建英, 林潼, 等. 碳酸盐岩盖层突破压力的影响因素分析[J]. 石油实验地质, 2021, 43(3): 461-467.
- ZHANG Lu, GUO Jianying, LIN Tong, et al. Influencing factors for breakthrough pressure of carbonate caprocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43 (3): 461-467.
- [6] 马新华, 郑得文, 申瑞臣, 等. 中国复杂地质条件气藏型储气库建库关键技术与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45 (3): 489-499.
- MA Xinhua, ZHENG Dewen, SHEN Ruichen, et al. Key technologies and practice for gas field storage facility construction of complex geological conditions in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (3): 489-499.
- [7] 郭印同, 赵克烈, 孙冠华, 等. 周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1353-1359.
- GUO Yintong, ZHAO Kelie, SUN Guanhua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (5): 1353-1359.
- [8] 林潼, 王铜山, 董景海, 等. 典型碳酸盐岩渗透力学行为特征及其对储、盖性质的判定[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(8): 1139-1151.
- LIN Tong, WANG Tongshan, DONG Jinghai, et al. Using permeability mechanics behavior of typical carbonate to identify reservoir and caprock properties [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31 (8): 1139-1151.
- [9] 李双建, 周雁, 孙冬胜. 评价盖层有效性的岩石力学实验研究[J]. 石油实验地质, 2013, 35(5): 574-578.
- LI Shuangjian, ZHOU Yan, SUN Dongsheng. Rock mechanic experiment study of evaluation on cap rock effectiveness [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35 (5): 574-578.
- [10] 孙军昌, 胥洪成, 王皆明, 等. 气藏型地下储气库建库注采机理与评价关键技术[J]. 天然气工业, 2018, 38 (4): 138-144.
- SUN Junchang, XU Hongcheng, WANG Jieming, et al. Injection-production mechanisms and key evaluation technologies for underground gas storages rebuilt from gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38 (4): 138-144.
- [11] 张俊法, 曾大乾, 张广权, 等. 超高压气藏改建储气库注采能力及库容评价——以川东北清溪储气库为例[J]. 断块油气田, 2021, 28(6): 775-780.
- ZHANG Junfa, ZENG Daqian, ZHANG Guanquan, et al. Injection-productivity and storage capacity evaluation for rebuilding gas storage based on ultra-high pressure gas reservoir: A case study of Qingxi gas storage in Northeast Sichuan [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28 (6): 775-780.
- [12] 贾善坡, 付晓飞, 王建军. 孔隙型地下储气库圈闭完整性评价[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 71-75.
- JIA Shanpo, FU Xiaofei, WANG Jianjun. Trap integrity evaluation of porous underground gas storage [M]. Beijing: Science Press, 2020: 71-75.
- [13] 吕延防, 付广, 高大岭, 等. 油气藏封盖研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 118-120.
- LYU Yanfang, FU Guang, GAO Daling, et al. Reservoir sealing research [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 118-120.
- [14] 吴俊. 碳酸盐岩盖层特征及封盖性能控制因素[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- WU Jun. Carbonate cap rocks and controlling factors on sealing capacity: A case study of the Ordovician Yingshan Formation in northern Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [15] 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.
- [16] 高帅, 魏宁, 李小春. 盖岩CO₂突破压测试方法综述[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2716-2727.
- GAO Shuai, WEI Ning, LI Xiaochun. Review of CO₂ breakthrough pressure measurement methods on caprocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (9): 2716-2727.
- [17] 全国石油天然气标准化技术委员会. 岩石毛管压力曲线的测定: GB/T 29171-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- China Natural Gas Standardization Technology Committee. Rock capillary pressure measurement: GB/T 29171-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.

- [18] 舒克通, 贾善坡, 高源, 等. 基于全应力—应变曲线的盖层岩石脆性评价改进方法[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(1): 248-260.
- SHU Ketong, JIA Shanpo, GAO Yuan, et al. An improved method to evaluate brittleness of cap rock based on complete stress-strain curve [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43 (1): 248-260.
- [19] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力—应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1114-1122.
- ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (6): 1114-1122.
- [20] 刘新锋, 赵英群, 王晓睿, 等. 岩石疲劳损伤及破坏前兆研究现状与展望[J]. 地球科学, 2022, 47(6): 2190-2198.
- LIU Xinfeng, ZHAO Yingqun, WANG Xiaorui, et al. Current status and prospects of research on fatigue damage and failure precursors of rocks [J]. Earth Science, 2022, 47 (6): 2190-2198.
- [21] 李西蒙, 刘长友, Syd SPENG, 等. 单轴分级循环加载条件下砂岩疲劳变形特性与损伤模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 8-17.
- LI Ximeng, LIU Changyou, Syd SPENG, et al. Fatigue deformation characteristics and damage model of sandstone subjected to uniaxial step cyclic loading [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46 (1): 8-17.
- [22] 李志成, 刘建锋, 边宇, 等. 三轴循环加载卸载过程中盐岩声发射演化特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1566-1572.
- LI Zhicheng, LIU Jianfeng, BIAN Yu, et al. Characteristic analysis on rock salt account emission evaluation in the triaxial loading and unloading process [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13 (6): 1566-1572.
- [23] 贾善坡, 金凤鸣, 郑得文, 等. 含水层储气库的选址评价指标和分级标准及可拓综合判别方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1628-1640.
- JIA Shanpo, JIN Fengming, ZHENG Dewen, et al. Evaluation indices and classification criterion of aquifer site for gas storage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (8): 1628-1640.

(上接第97页)

- CHEN Yong, ERNST A J B. Laser Raman microspectroscopy of fluid inclusions: theory, method, problems and future trends [J]. Geological Review, 2009, 55 (6): 851-861.
- [25] 施伟军, 席斌斌. 应用包裹体技术恢复气藏古压力[J]. 石油实验地质, 2016, 38(1): 128-134.
- SHI Weijun, XI Binbin. Calculation of paleo-pressure in gas reservoirs using fluid inclusions [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38 (1): 128-134.
- [26] 吴强. 甲烷包裹体恢复古地层压力方法研究[J]. 地质论评, 2019, 65(增刊1): 97-98.
- WU Qiang. The method of recovering pale-pressure from methane inclusion [J]. Geological Review, 2019, 65 (Suppl 1): 97-98.
- [27] 米敬奎, 肖贤明, 刘德汉, 等. 利用储层流体包裹体的PVT特征模拟计算天然气藏形成古压力——以鄂尔多斯盆地上古生界深盆气藏为例[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(7): 679-685.
- MI Jingkui, XIAO Xianming, LIU Dehan, et al. Simulation and calculation of paleopressure of natural gas reservoir formation by using PVT characteristics of reservoir fluid inclusions—Taking Upper Paleozoic deep basin gas reservoir in Ordos Basin as an example [J]. Science in China (Series D), 2003, 33 (7): 679-685.
- [28] 吴迪. 显微傅里叶红外在油气包裹体研究中的应用——以冀北—辽西拗陷中元古界下马岭组油气包裹体为例[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(1): 32-36.
- WU Di. Application of micro fourier transform infrared in hydrocarbon inclusions-taking hydrocarbon inclusions in the Xiamaling Formation of the Upper Proterozoic in Jibei-Liaoxi Depression as example [J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition), 2015, 38 (1): 32-36.