

# 复杂断块油藏建库圈闭密封性综合评价技术

王 森, 盖长城, 何海燕, 辛春彦, 段 彬

(中国石油冀东油田公司勘探开发研究院, 河北 唐山 063004)

**摘要:** 以M储气库为例, 通过室内实验与理论分析, 从盖层和断层综合评价圈闭密封性。从宏观、微观和力学评价盖层密封强度, 从侧向、垂向和动态评价断层密封能力, 落实圈闭密封极限压力。研究表明: 盖层岩性以泥岩为主, 厚度大, 岩石致密、孔喉细小、排替压力大, 岩石力学性质优良。主控断层两盘砂泥对接为主, 断层泥岩比率(SCR)均较高, 断层开启系数低, 断层断面正压力大于7.5 MPa, 断层岩排替压力大于储层岩排替压力, 示踪剂等动态资料证实断层两侧不连通。综合评价M储气库圈闭密封性良好。由圈闭气体散逸、盖层毛细管密封失效、拉张和剪切破坏及断层剪切滑移失稳条件下盖层和断层的承压极限, 综合确定圈闭密封上限压力为44.6 MPa。形成的复杂断块油藏圈闭密封性综合评价技术对同类油藏的密封性评价具有一定推广意义。

**关键词:** 复杂断块; 储气库; 盖层密封性; 断层密封性; 圈闭密封性

**中图分类号:** TE822 **文献标志码:** A

## Comprehensive evaluation technology of trap sealing performance in complex fault block reservoir construction

WANG Miao, GAI Changcheng, HE Haiyan, XIN Chunyan, DUAN Bin

(Exploration and Development Research Institute of Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan 063004, China)

**Abstract:** Taking M Gas storage as an example, indoor tests and theoretical analysis are used to thoroughly assess the trap sealing performance from caprocks and faults. The fault sealing capacity is evaluated from the lateral, vertical, and dynamic views, the sealing strength of the caprock is evaluated from the macroscopic, microscopic, and mechanical perspectives, and the ultimate pressure of the trap seal is calculated. The results show that mudstone comprises the majority of the caprock's lithology and that it possesses excellent mechanical capabilities as well as a large thickness, compact physical characteristics, narrow pore throat, and high displacement pressure. Sand and mud are primarily used to connect the two sides of the primary control fault, which also has a greater SCR and a lower opening coefficient. The two sides of the fault are not connected because the positive pressure of the fault section is larger than 7.5 MPa, the displacement pressure of the fault rock is greater than that of the reservoir rock, and this is proved by dynamic data such as tracers, etc. A comprehensive analysis indicates that M Gas storage has effective trap sealing. The upper limit pressure of the trap seal is determined to be 44.6 MPa based on the pressure limit of the caprock and fault under the conditions of trap gas escape, capillary seal failure, tensile and shear failure, and fault shear slip instability. A certain promotion relevance exists for the comprehensive sealing assessment technology of complex fault-block reservoirs formed in the sealing evaluation of related oil reservoirs.

**Key words:** complex fault-block; gas storage; caprock sealing property; fault sealing property; trap sealing property

地下储气库是国家天然气战略储备、应急调峰、安全保供的重要手段, 是经济有效的储气调峰设施。目前国内储气库类型正在从气藏型和盐穴型向油藏型延伸, 圈闭密封性是决定油藏建库的第一要素。南堡凹陷油藏普遍具有构造破碎、储层非均质性强等特点, 因此油藏型储气库对圈闭密封性提出了更高要求。前人认为储气库圈闭密封性研究不仅需评价其原始静态密封性, 而且需评价建库

后长期注采交变应力作用下圈闭完整性。现有研究更加侧重原始气藏的静态密封性评价, 亟待针对油藏建库的圈闭密封性评价展开研究。

以南堡凹陷M储气库为例, 应用地质、测井、录

收稿日期: 2021-12-20; 改回日期: 2022-01-14。

第一作者简介: 王森(1988—), 女, 硕士, 工程师, 现主要从事油气田开发工作。E-mail: wangmiao2013@petrochina.com.cn。

井、地震、实验等资料,从侧向、垂向和动态三方面评价断层密封能力,从宏观、微观和力学三方面评价盖层密封强度,明确圈闭密封机理和密封性。应用动态监测资料等方法,对动态圈闭密封性进行评价,落实圈闭密封极限压力,形成了复杂断块油藏圈闭密封性评价技术,对整个南堡凹陷油藏改建储气库具有重要的借鉴意义。

## 1 盖层密封强度评价

盖层密封性评价从宏观、微观和力学三个方面进行。基于地质、地震、测井等资料,采用多种室内实验方法,包括岩石脉冲孔渗、恒速压汞、扫描电镜、全岩矿物分析等测试,获取盖层岩石的微观密封性参数(孔隙度、渗透率、孔喉半径、排替压力等),利用岩石力学性质实验结果,分析盖层岩石的突破压力和抗压强度等参数,进而结合盖层岩性、厚度等宏观密封性特征,综合评价盖层静态密封性,并通过岩石力学实验模拟计算,分析盖层发生破坏或气体泄漏风险,综合评价盖层力学密封性。

### 1.1 宏观密封性

在地层对比及泥岩顶底板构造精细解释的基础上,综合利用测井和录井等资料,对M储气库目的层段直接及区域盖层、底板地层岩性、厚度及空间展布特征展开研究。M储气库沙一段( $E_{s1}$ )油藏盖层为上覆东三段( $E_{d3}$ ),岩性以泥岩为主,夹细砂岩、粉砂岩等细粒沉积岩,底部的连续泥岩段为最佳盖层,地层泥地比平均为0.84,结合盖层岩心、岩屑样品信息,东三段泥岩黏土矿物含量较高,平均为64.67%,泥质含量高,为岩性致密泥岩。通过盖层有效厚度(东三段未被断层错开部分的厚度)、累计泥岩厚度(东三段所有泥岩层厚度之和)、直接泥岩盖层厚度(沙一段直接上覆连续泥岩厚度)等多个参数表征,直接泥岩盖层厚度平均为90 m。按照累计泥岩厚度分级标准<sup>[1]</sup>,M储气库东三段盖层的密封能力整体较强,属于较好—好范畴。

### 1.2 微观密封性

对X井12块样品开展盖层岩石基本物性测试,脉冲孔渗测试结果表明M储气库东三段泥岩平均孔隙度为3.21%,渗透率为 $0.006\ 53 \times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ,按照天然气封盖层密封能力分级评价标准<sup>[2]</sup>,盖层密封能力好。同时选取3块X井东三段泥岩样品开展高压压汞测试(见图1),结果表明M储气库东三段泥岩最大进汞饱和度较小,平均为69%,表明岩石较

致密,连通孔喉细小;岩石压汞曲线形态类似,均表现为微米级孔隙纳米级喉道特征,且岩石退汞效率低,平均为42.70%;排替压力较大,平均为9.22 MPa,M储气库东三段泥岩孔喉结构细小,平均喉道半径为15~60 nm,盖层密封能力较好。

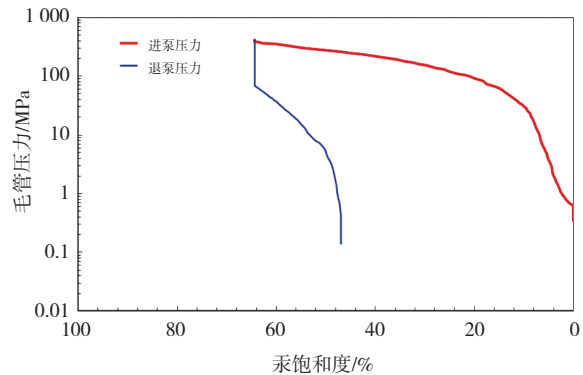


图1 X井盖层泥岩压汞曲线

### 1.3 力学密封性

对盖层岩石展开突破压力测试,明确盖层岩石在原始突破压力及交变应力下的突破压力变化特征,M储气库采用围压为65 MPa,试验样品下限压力为23 MPa,上限压力为35 MPa。结果表明M储气库东三段泥岩盖层突破压力相对较高,平均为8.4 MPa,按照气藏盖层密封性评价标准<sup>[3]</sup>,已满足建库的动态突破压力临界指标5 MPa的盖层密封要求。

利用三轴应力-应变实验,对盖层岩石的力学性质展开系统研究,明确盖层岩石的基本力学参数,采用循环三轴应力-应变实验,确定盖层岩石的疲劳、剪切及拉张强度,进而对盖层的力学密封能力展开评价。单轴实验是获得岩石的弹性模量、泊松比、抗压强度的最直接方法。对M储气库9块次的泥岩样品展开单轴压缩实验,结果表明M储气库东三段泥岩弹性模量较大,平均为35.19 GPa,岩石的弹性模量大,表明在外力作用下岩石产生单位弹性变形所需的应力大,即岩石在外力作用下不易变形。岩石的泊松比较低,明显小于0.2,平均为0.142,表明岩石受力之后未发生塑性变形前横向变形量比纵向变形量小,岩石硬度大,在外力作用下发生破坏风险低。泥岩样品的单轴抗压强度相对较低,平均为26.67 MPa。抗拉实验采用巴西劈裂法进行,对M储气库选取6块次深灰色泥岩样品展开拉伸实验。结果表明M储气库东三段泥岩样品的破坏形式均为到达抗拉强度后沿轴线破坏,泥岩样品的抗拉强度相对较低,平均为1.47 MPa。

三轴压缩实验主要是考虑不同围压下岩石的

变形特征,实验结果表明随着围压增加,东三段泥岩样品的抗压强度逐渐增大,当围压达到 50 MPa 时,岩石的抗压强度高达 222.35 MPa,表明岩石抗破坏能力强;不同围压条件下,泥岩样品的弹性模量和泊松比变化不大,表明 M 储气库东三段泥岩的岩石力学性质较稳定。由样品破坏后的状态可知,岩石的破坏形态以共轭剪切破坏模式为主,岩石力学性质优良。

## 2 断层密封能力评价

在断层发育特征研究的基础上,定性与定量相结合,通过断层两盘岩性对置关系、流体性质分析、压力系统分布等定性方法,以及泥岩涂抹因子法、断层启闭系数法、排替压力差法等综合评价断层侧向密封性;采用断层活动分析法、断面正压力法及

断-储排替压力差法等综合评价断层的垂向密封性;利用断层岩石力学参数确定断面滑移最小压力与断层开启压力,并借助干扰试井、示踪剂测试、流体组分分析等方法,综合评价断层动态密封性。

### 2.1 断层基本特征

M 储气库沙一段为被断层复杂化的背斜构造,主要发育两期断裂,其中早期断裂走向以近东西向为主,晚期断裂以北东—南西向为主,且早期断裂被切割,共发育断层 11 条,1 条断层(F3)断至 Ng III 底,1 条断层(F2)断至地表,其余 F7—F11 为断距较小的内部断层,延伸长度和断距均较小。M 储气库东三段顶面断层的发育特征见表 1,断层延伸长度为 0.17 ~ 6.81 km,断层倾向以北西—南东向为主,断层走向以北东—南西向为主,断层平均断距为 15 ~ 173 m,断裂带宽度差异较大。

表 1 M 储气库东三段顶面断层发育特征

断层编号	断层走向	断层倾向	延伸长度/km	断裂带宽度/m	断距/m
F1	NE—SW	NW—SE	5.60	481.09	40 ~ 210
F2	NEE—SWW	NE—SW	5.34	391.87	90 ~ 110
F3	近 EW	NW—SE	6.81	182.78	105 ~ 220
F4	NW—SE	NW—SE	1.08	39.99	88 ~ 155
F5	NE—SW	NW—SE	2.69	104.12	10 ~ 65
F6	NW—SE	NE—SW	3.53	99.79	60 ~ 250
F7	NW—SE	NE—SW	0.29	38.59	15
F8	NW—SE	NE—SW	1.11	27.56	10 ~ 20
F9	NW—SE	NE—SW	0.42	37.55	10
F10	NE—SW	NW—SE	0.31	35.99	5
F11	NNW—SSE	近 EW	0.17	57.00	10

### 2.2 断层侧向密封性

通过断层两盘的岩性配置关系和压力分布分析,对断层的侧向密封性展开定性评价;采用泥岩涂抹法、断层启闭系数法和排替压力差法等进行定量评价。

断层虽断距较大,但断层下盘 Es<sub>1</sub> 砂岩层与 Ed<sub>3</sub> 泥岩直接对接,断层两盘以砂泥对接为主,主要为对接封闭,表明断层侧向密封性良好(见图 2)。

断层泥岩比率(SGR)大于 0.4,断层侧向密封性良好。泥岩涂抹系数评价 M 储气库各条断层的侧向密封性良好。

Es<sub>1</sub> 砂岩排替压力平均为 0.37 MPa;Ed<sub>3</sub> 泥岩排替压力平均为 9.22 MPa,砂岩排替压力平均为 1.71

MPa。Ed<sub>3</sub> 泥岩与砂岩排替压力明显大于 Es<sub>1</sub> 砂岩,断层侧向密封性良好。

断层开启系数也常用于评价断层的侧向密封性<sup>[4]</sup>,计算公式如下:

$$F_{01} = \frac{P}{\delta SGR} \quad (1)$$

$$\delta = (\sin \alpha \sin \theta)^2 \sigma_H + (\cos \alpha \cos \theta)^2 \sigma_h + \cos^2 \theta \sigma_v \quad (2)$$

式中, $F_{01}$ 为断层开启系数,为 0.5 ~ 5.0,值越大,断层密封性越差; $p$ 为流体压力,MPa; $\delta$ 为断面正应力,MPa; $\alpha$ 为断层走向与最大水平主应力方向间的夹角,(°); $\theta$ 为断层倾角,(°); $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$ 、 $\sigma_v$ 分别为最大水平主应力、最小水平主应力和垂直应力,MPa。

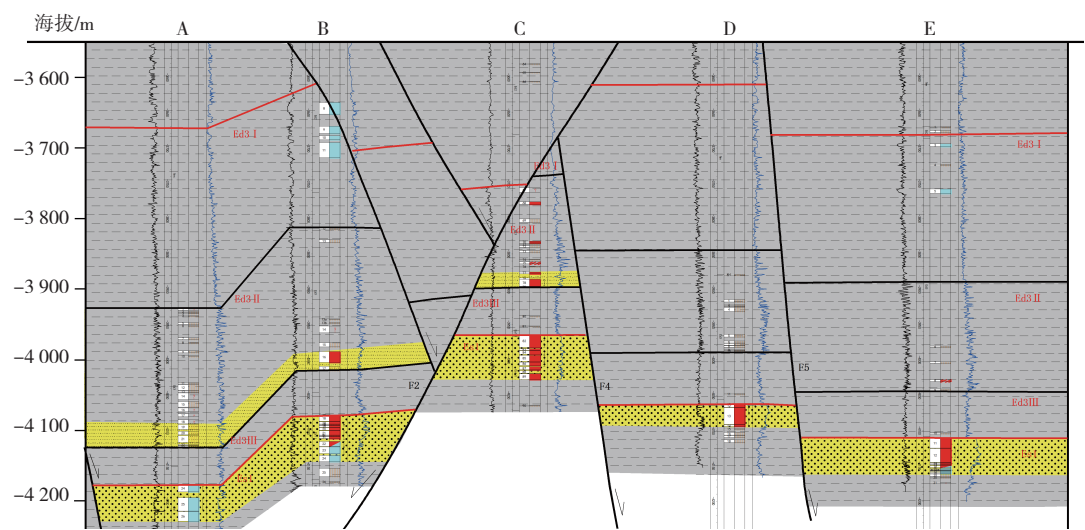


图2 过A井~E井各断层两盘岩性对置

根据上述公式计算了各条断层的断层开启系数,结果表明M储气库各条断层 $F_{01}$ 平均为0.86,根据断层开启系数评价<sup>[4]</sup>,断层侧向密封性良好。

利用岩性对接法等对区内所有断层两侧岩性进行分析,断层两侧以砂岩-泥岩接触为主,封闭性

较好;利用断层开启系数、泥岩比率和排替压力等方法对区内11条断层进行评价,SGR均较高,断层开启系数平均为0.86,远低于3.5的界限值,表明边界断层横向具有良好密封性。断块内部断层密封性中等,但不影响储气库建设(见表2)。

表2 M储气库各断层指标计算数据

断层编号	$\delta/\text{MPa}$	$\text{SGR}/\%$	$p/\text{MPa}$	$F_{01}$	侧向封闭性
F1	102.49	41.56	0.62	0.65	好
F2	93.08	41.37	0.60	0.74	好
F3	73.48	41.91	0.50	1.14	中
F4	88.81	40.18	0.51	0.89	中
F5	68.21	40.48	0.52	1.14	中
F6	79.84	42.15	0.44	1.20	中
F7	97.72	39.59	0.67	0.60	好
F8	73.04	40.53	0.75	0.74	好
F10	85.93	39.20	0.78	0.58	好
F11	112.14	40.18	0.38	0.94	中

2.3 断层垂向密封性

在断层发育特征研究的基础上,通过断层的活动性分析、断层走向与应力方向关系等对主控断层的垂向密封性开展定性评价,同时,利用测井资料,采用断面正应力法、断层启闭系数法等开展定量评价。

南堡凹陷东三段底垂直断距主要分布在0~200 m,活动性较弱,断层停止活动时间距今7~2.5 Ma,平均4 Ma,且均已停止活动。南堡凹陷现今最

大水平主应力方向以近东西向为主,其次为北东向<sup>[5]</sup>。根据断面正压力计算公式,表明各条断层断面正压力为8.48~47.43 MPa,明显高于7.5 MPa,结合SGR数值普遍大于40%,对应砂地比小于60%,按断层垂向密封性评价标准<sup>[6]</sup>,断层垂向密封性属于中等—好范畴。

因缺乏实测排替压力数据,故针对南堡凹陷东二段泥岩建立的排替压力与埋深、泥质含量间的函数关系进行模拟计算<sup>[7]</sup>:



$$p_{\text{dfv}} = 0.399e^{0.117 \frac{Z_f R_f}{100}}, p_{\text{df}} = p_{\text{dfv}} \tan \theta \quad (3)$$

$$p_{\text{drv}} = 0.160e^{0.165 \frac{Z_f R_f}{100}}, p_{\text{dr}} = p_{\text{drv}} \cos(\sigma - \theta + 90^\circ) \quad (4)$$

式中,  $p_{\text{dfv}}$  为盖层内垂直断层方向断层岩石排替压力, MPa;  $p_{\text{df}}$  为盖层内油气运移方向断层岩石排替压力, MPa;  $p_{\text{drv}}$  为垂直储层方向储层岩石排替压力, MPa;  $p_{\text{dr}}$  为油气运移方向储层岩石排替压力, MPa;  $\theta$  为断层倾角, ( $^\circ$ );  $Z_f$  为盖层内断层岩压实成岩埋深, m;  $Z_r$  为与断层岩具有相同压实成岩速率的储层岩石现今埋深, m;  $R_f$  为盖层内断层岩泥质含量, %;  $R_r$  为储层岩石泥质含量, %。

计算结果表明断层的断-储排替压力差均大于0, 断层差为1.72~11.49 MPa, 垂向密封性好。通过理论与统计规律认为, 通过断层活动性、断层面正压力和断-储排替压力评价分析, 断层垂向密封良好。

## 2.4 断层动态密封性

通过断层两盘的地层压力系数、示踪剂监测和开发动态分析, 对断层的侧向密封性进行动态评价。从地层压力系数来看, 上盘压力明显大于下盘压力, 存在明显压力差, 推测断层均封闭。示踪剂监测注入4井组, 共检测3条大断层1条小断层, 断层两侧均未见示踪剂, 动态分析表明断层两侧油井生产情况明显不同, 各断层均密封。通过流体性质、压力与示踪剂监测、生产动态评价断层动态密封性良好。

## 3 圈闭密封性综合评价

通过确定圈闭气体逸散、盖层毛细管密封、拉张和剪切破坏, 以及断层剪切滑移失稳条件下盖层、断层承压极限, 综合分析储气库圈闭密封承压极限、稳定性及提压扩容潜力<sup>[8-10]</sup>。

当储气库运行的上限压力超过圈闭溢出点临界压力时, 天然气将发生逸散。圈闭溢出点的气体逸散临界压力表示为:

$$p_{\text{溢散}} = p_{\text{油藏}} + \rho_w g \Delta H \quad (5)$$

式中,  $p_{\text{溢散}}$  为气体逸散临界压力, MPa;  $p_{\text{油藏}}$  为油藏原始地层压力, MPa;  $\rho_w$  为地层水密度, g/cm<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度, 9.8 m/s<sup>2</sup>;  $\Delta H$  为圈闭闭合幅度, m。结果表明, 各断块逸散压力平均为52.56 MPa, 取气体逸散压力的最小值作为储气库运行的上限压力, 为44.6 MPa。

储气库强注强采过程中, 盖层可能会发生毛细管密封失效、剪切破坏、拉张破坏和长期疲劳破坏。M储气库7块泥岩样品经过50次疲劳加载后突破压力平均为8.21 MPa,  $E_d_3$ 中部平均埋深为3 913 m, 上覆地层压力38.5 MPa, 则毛细管密封失效的临界压力等于上覆地层压力与动态突破压力之和, 为46.7 MPa。不同围压条件下的三轴压缩岩石可得到泥岩样品的剪切破坏应力摩尔圆, 当盖层岩石的应力状态与剪切破坏包络线相切时, 盖层岩石将发生剪切破坏。原始地层条件下, 东三段盖层中部平均埋深为3 913 m, 地层压力为40.17 MPa, 最小主应力为65 MPa, 对应的最大主应力为224.4 MPa, 由此可计算得到盖层岩石发生剪切破坏时的临界剪应力为95.9 MPa。各断块最小水平主应力平均为64.32 MPa, 计算得到的最小水平主应力为63.46 MPa, 可作为盖层发生拉张破坏的临界压力。

疲劳破坏风险评价是在模拟储气库注采工况条件下, 通过开展室内岩心三轴加卸载交变应力实验研究盖层岩石变形破坏特征, 采用累计塑性应变来定量评价储气库长期交变载荷下盖层疲劳破坏风险。疲劳实验后抗压强度的最小值为218.88 MPa, 可作为盖层岩石疲劳破坏的临界压力。

储气库强注强采过程中, 断层可能会活化开启或滑移失稳。M储气库断层活化开启所需的附加流体压力为31.17 MPa, 各断层活化开启的临界压力值变化范围大, 平均为71.75 MPa, 根据各断块的主控边界断层可得到各断块的断层活化开启临界压力为70.76 MPa。

M储气库断层滑移失稳的临界压力变化范围较大, 平均为56.91 MPa, 断层滑移失稳风险相对较低。断层滑移失稳的临界压力取断层中的最小值, 为48.06 MPa。

综合圈闭、盖层及断层动态破坏风险, 可得到储气库运行的上限压力为44.6 MPa。

## 4 结论

(1) 从宏观、微观和力学三个方面进行盖层密封强度评价, 同时从侧向、垂向和动态三个方面进行断层密封能力评价, 可进行油藏建库的圈闭密封性评价。

(2) 通过油藏建库的圈闭密封性综合评价, 在南堡凹陷M储气库得出盖层岩性为泥岩, 平面分布稳定、范围广、厚度大, 平均为90 m, 具强宏观密封

性;盖层岩性致密、渗透性差、孔喉小,具良好微观密封性;盖层岩石力学性质优良,塑性系数较大,具良好力学密封性,总体上盖层密封性好。

(3)断层两侧以砂岩-泥岩接触为主,SGR均较高,活化开启系数远低于界限值, $E_d$ 泥岩与砂岩排替压力大,侧向具有强密封性;断层面正压力大于8 MPa、断-储排替压力差大于零,垂向密封性良好;断层两侧的压力测试、示踪剂等监测资料证实断层两侧不连通,总体上断层密封性好。

(4)综合各断块气体逸散、毛细管密封失效、拉张破坏、剪切破坏、疲劳破坏、活化开启、滑移失稳的最低压力,得出气库密封性上限压力为44.6 MPa,超过上限压力则会发生失稳等风险。

参考文献:

[1] 陈章明,吕延防. 泥岩盖层封闭性的确定及其与源岩排气史的匹配[J]. 大庆石油学院学报, 1990, 14(2): 1-6.  
[2] 邓祖佑,王少昌,姜正龙,等. 天然气封盖层的突破压力[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 136-138.  
[3] 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.

[4] 张立宽,罗晓容,宋国奇,等. 油气运移过程中断层启闭性的量化表征参数评价[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 92-100.  
[5] 徐珂,戴俊生,商琳,等. 南堡凹陷现今地应力特征及影响因素[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(3): 570-583.  
[6] 吕延防,沙子萱,付晓飞,等. 断层垂向封闭性定量评价方法及其应用[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 34-38.  
[7] 胡欣蕾,吕延防,付广,等. 南堡凹陷1号构造断层垂向封闭能力定量评价[J]. 地球科学, 2019, 44(11): 3882-3893.  
[8] 赵树栋,王皆明. 天然气地下储气库注采技术[M]. 北京:石油工业出版社, 2000.  
[9] 魏国齐,丁国生,何刚. 储气库地质与气藏工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2020.  
[10] 廖伟,刘国良,陈如鹤,等. 气藏型地下储气库动态密封性评价——以新疆H地下储气库为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 133-141.

(编辑 谢 葵)

(上接第93页)

参考文献:

[1] 卢轶宽,柴世超,何滨,等. 注水井附加压降的研究与应用[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2018, 30(6): 47-52.  
[2] 张利健,田盼盼,任宜伟,等. 海上油田水驱开发注水压力优化[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(1): 63-67.  
[3] 邹德昊,柴世超,阮新芳,等. 提压增注技术在渤海油田的先导试验与应用[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(6): 106-108.  
[4] 何芬. 薄互层油藏注水井提压增注研究与应用[J]. 录井工程, 2019, 30(4): 141-144.  
[5] 周润才,栾立业. 用霍尔曲线分析聚合物溶液注入率

[J]. 国外油田工程, 1991, 7(3): 1-8, 16.

[6] 周海燕,刘斌,孙强,等. 海上河流相稠油油田纳米微球多轮次调驱效果评价研究[J]. 新疆石油天然气, 2021, 17(1): 60-64.  
[7] 高淑玲,邵振波,顾根深. 霍尔曲线在聚驱过程中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(3): 119-121.  
[8] 张钧,余克让. 海上采油工程手册[M]. 北京:石油工业出版社, 2001: 120-130.  
[9] 王鸿勋,张琪. 采油工艺原理[M]. 北京:石油工业出版社, 1981: 85-96.  
[10] 李勇明,岳迎春,郭建春,等. 考虑储层污染的破裂压力计算方法[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(5): 108-109, 112.

(编辑 谢 葵)