

水淹衰竭型地下储气库的达容规律及影响因素

马小明 余贝贝 成亚斌 马东博 张桂明 王艳华 杨玉生

中国石油大港油田公司勘探开发研究院

马小明等.水淹衰竭型地下储气库的达容规律及影响因素.天然气工业,2012,32(2):86-90.

摘 要 水淹衰竭型地下储气库库容动态变化过程中的驱水达容规律具有复杂性和普遍性,是研究地下储气库达到设计库容时间及最终能达到库容量的重要依据。为此,以大港地下储气库群 5 个投产运行多年的水淹衰竭型地下储气库为例,通过含水岩心气驱扩容室内实验,揭示了地下储气库的达容规律:①地下储气库库容量呈现逐渐增加的趋势,并最终趋于最大库容量;②地下储气库投产初期库容增速快,后期增速变缓;③地下储气库地下垫气量与工作气量呈正增长关系,但增长不同步。进而总结出了影响地下储气库达容的主要因素,地下储气库的构造特征、储层物性、注采能力、水体分布以及扩容方式。

关键词 地下储气库 水淹衰竭型气藏 水体 库容 达容规律 影响因素 构造特征 储层物性 注采能力

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.2.021

1 概况

利用废弃油气藏改建地下储气库是国内外地下储气库建设的主要类型,在国内已建的地下储气库中由水淹气藏改建地下储气库又是普遍现象^[1]。目前我国建成投产的用于商业性调峰的地下储气库主要是大港地下储气库群,共有 6 座,均为砂岩孔隙型,其分布如图 1 所示。除大张坨地下储气库外,其余 5 座地下储气库均由水淹衰竭气藏改建而成。

目前国内对地下储气库库容的研究多集中于最大库容量值的确定方法^[2-6]。地下储气库设计的库容量是一个最大静态值,也是需要多个注采运行周期才能逐渐达到的目标最大值。因地质结构的复杂性、气藏内部流体的混杂性以及地下储气库生产运行方式等方面的原因,地下储气库达到设计库容是一个长期、复杂的动态变化过程,业内称为“达容”过程。对于水淹衰竭气藏改建的地下储气库其库容动态变化过程中体现的驱水达容规律,是研究地下储气库达到设计库容时间以及最终能达到库容量的重要依据,而目前国内尚无进行此项理论研究的报道,更缺少相应的实例研究。为此,以含水岩心气驱扩容室内实验为基础,以大港储气库群达容实例为依据,系统阐述了水淹衰竭气

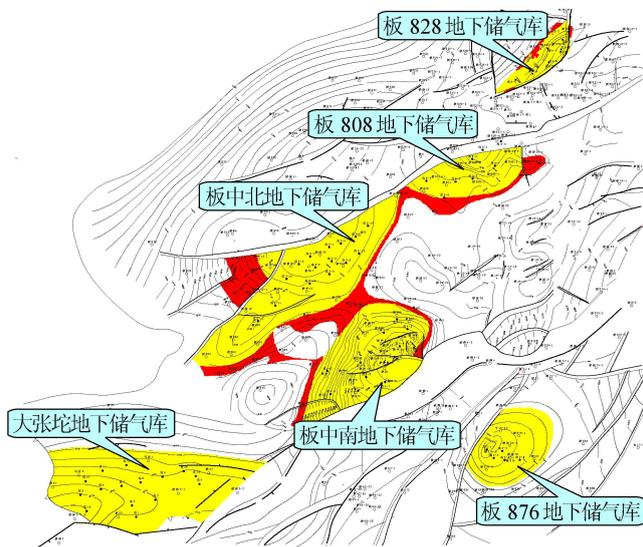


图 1 大港地下储气库分布图

藏改建地下储气库的达容规律及其影响因素。

2 含水岩心气驱扩容物理模拟实验研究

选择已建地下储气库代表性的岩心,进行地下储气库的注采机理物理模拟实验研究,测试在不同实验条件、不同注采周期下地下储气库岩心注气量、采气量

及产液量随时间的变化规律。研究水淹型地下储气库在多次循环注气、采气过程中气、液间的相互作用、气液渗流特征、采出程度及其对储采气能力的影响,为衰竭气藏改建储气库的达容变化规律提供实验依据。

2.1 实验过程

1)建立4块岩心的原始含水气藏模型,其中1-1、1-2号为低孔低渗岩心,2-1、2-2号为中高孔中高渗岩心。

2)针对4块岩心分别进行了较低采气速度下的3次采气和2次注气循环实验,模拟地下储气库低速注气驱水的3次过程。

3)对低孔低渗的岩心1-2和中孔中渗岩心2-2分别进行了较高采气速度下的4次采气和3次注气循环实验,模拟地下储气库高速注气驱水的4次过程。

4)4块岩心的试验压力介于35~10 MPa,相当于地下储气库原始压力的100%~29%。

2.2 实验结果

实验结果得出的地下储气库岩心注气驱水扩容变化曲线如图2所示。

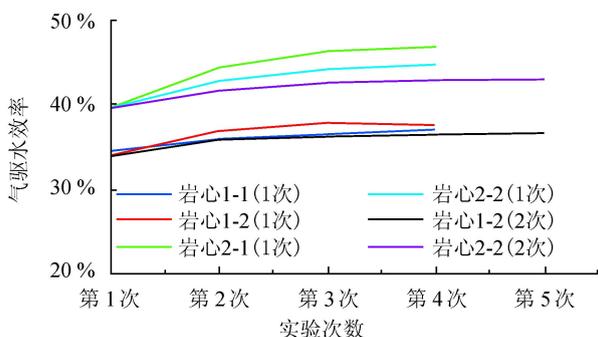


图2 地下储气库岩心注气驱水扩容变化曲线图

1)气驱水效率与岩石的致密性有关:中高孔中高渗岩心的气体驱水效率明显高于低孔低渗岩心,第1次气驱水效率可以达到34%~40%,经过3~4次的驱替,气驱水效率可以达到36%~46%。

2)气驱水效率与驱替速度有关:低速注气驱水扩容效率大于高速注气驱水扩容效率,中高孔中高渗岩心扩容效率差异较大,可达4%,低孔低渗岩心达2%。

3)气驱水效率与驱替次数有关:随驱替次数的增加,岩心每次采气的产水量逐渐减少,岩心增容能力逐渐减弱并趋于最大值,中高孔中高渗岩心的气体驱水最高效率可达46%,低孔低渗岩心气体驱水最高效率可达36%。

2.3 实验规律

实验结果揭示:地下储气库内的含水区可以实现较高的气体驱替,4块岩心的气驱试验压力降落区间

为地下储气库原始压力的100%~29%时,第1次气体驱替效率可达到34%~40%,第2、3次累加气驱效率可达36%~46%;地下储气库实际注采生产过程中随多周期的注采驱替,气驱水达容效率是逐步增加的过程,或者说若要实现地下储气库较高的气体驱替效率,则需要多年的注采周期。

3 已建水淹衰竭型地下储气库的库容变化规律

5座水淹衰竭气藏地下储气库都是由带边水的衰竭开发至废弃的凝析气藏改建而成,尽管注采周期不同,但都体现了相同的库容变化规律。各地下储气库注采时的库容变化曲线如图3~7所示。

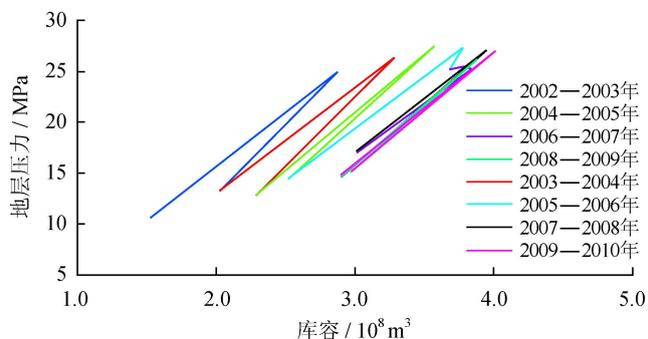


图3 板876地下储气库库容变化曲线图

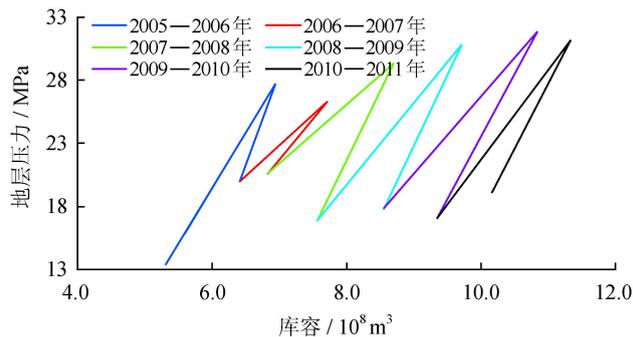


图4 板中南地下储气库库容变化曲线图

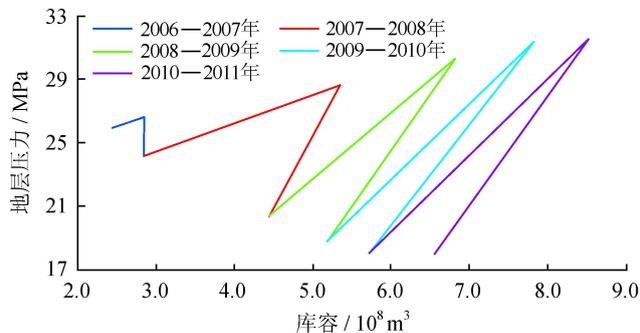


图5 板808地下储气库库容变化曲线图

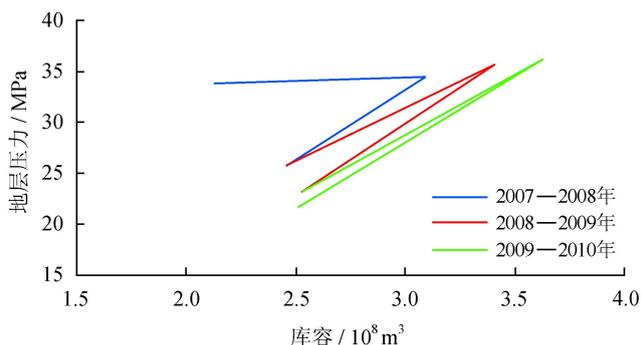


图 6 板 828 地下储气库库容变化曲线图

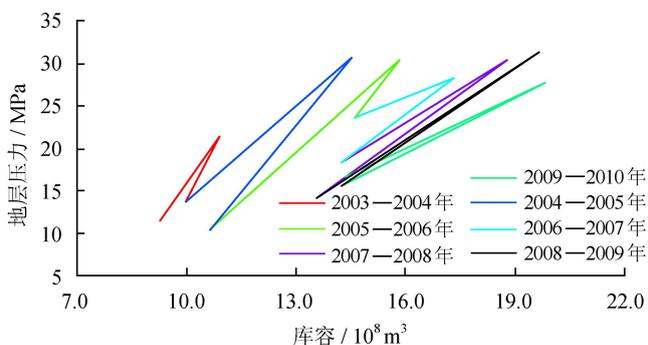


图 7 板中北地下储气库库容变化曲线图

1) 地下储气库库容量呈现逐渐增加的趋势,并最终趋于最大库容量。以注气期结束时的库容量为地下储气库的当期库容量,采气期结束时的库容量为地下储气库的当期垫气量,库容量与垫气量之差即为当期工作气量(采气量)。从地下储气库的实际库容量变化曲线看(图 3~7),随着地下储气库注采周期的增加,库容曲线普遍右移,地下储气库库容明显增大,而且注采周期越多,库容增加愈多。板 876 地下储气库运行 5~8 个注采周期时,库容变化曲线基本重叠,表明地下储气库已达到最大库容量。由此也说明地下储气库达容是一个长期的过程。从已建地下储气库的达容特征看,水淹型地下储气库的达容周期超过 5 年。

2) 地下储气库投产初期库容增速快,后期增速变缓。从地下储气库库容增量与注采周期关系曲线看(图 8),尽管地下储气库不同、注采周期不同,但基本遵循了早期扩容多、后期扩容少、库容逐渐增加的规律。水淹衰竭型气藏改建地下储气库后,第 1 注采周期由于地层压力低,地下储气库亏空大,注入气以弥补空余的孔隙空间为主,库容增加快。一旦第 1 注采周期补亏库容之后,随着地下垫气量增多和地层压力水平的提高,第 2 注采周期达容主要体现在以气驱水置换水体孔隙空间为主,驱水扩容成为主要增容方式,增容难度增大,增容幅度变小。同时此阶段也真实反映

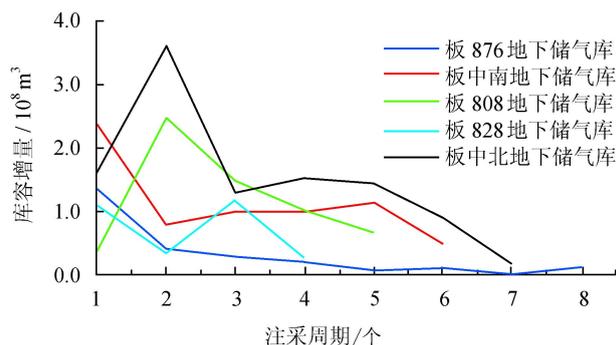


图 8 地下储气库库容增量与注采周期的关系曲线图

了地下储气库地层水体对库容的影响效果。

尽管地下储气库的达容过程具有前快后慢的特点,但地下储气库从第 2 注采周期开始,单位压力下库容的变化量即弹性库容率却基本维持在一个稳定值,尽管不同地下储气库的该数值不同,但同一地下储气库弹性库容率基本稳定的规律相同。地下储气库单位压力库容变化曲线图 9 所示。同理,在图 3~7 中每个地下储气库不同注采周期的曲线斜率也基本相同,反映每一个地下储气库在压力运行区间内单位压力变化所波及的有效孔隙空间容积基本不变。由此推测,实际上地下储气库内的气水与地下储气库外部的弱水体总体上组成了同一气水系统,类似于定容气水系统的特征。以板 876 地下储气库为例,在地下储气库生产运行的 8 个注采周期中,除第 5 注采周期生产管理因素外,其余各注采周期的弹性库容率基本相同,无论库容增速快慢或库容量大小变化,但弹性库容率却基本不变。但板中北地下储气库却是个特例,其具有较强的边部水体,在地下储气库生产运行的 7 个注采周期中,随着注采周期增加库容量逐渐增大,同期弹性库容率也逐渐增大,反映了强边水地下储气库的库容率变化规律。

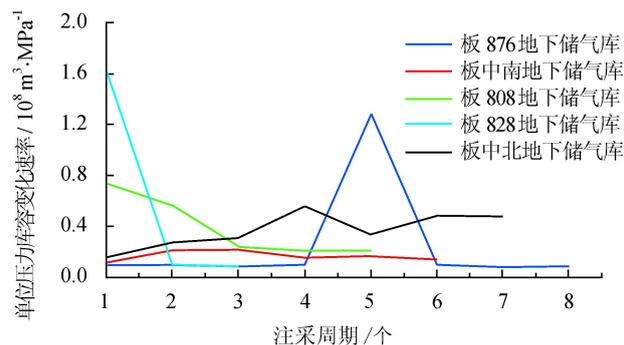


图 9 各注采周期内地下储气库单位压力库容变化曲线图

3) 地下储气库的垫气量与工作气量呈正增长关系,但增长不同步。地下储气库的每一注采周期垫气

量都在增加,由于储层物性的非均质性及地下储气库内侵入水体的存在,导致水淹型地下储气库注气阶段会有一部分气体向边部水体突进,在采气阶段由于水的阻隔作用,造成部分气体成为死气区无法采出,显示为尽管地下的存气量不断增加,库容量不断增加,但工作气量却比库容增加得缓慢(图 10、11)。

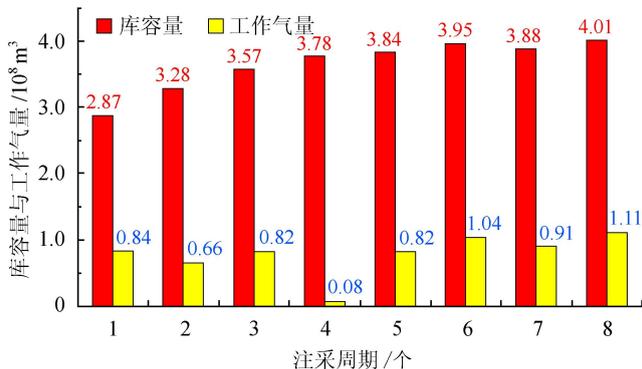


图 10 板 876 地下储气库各注采周期内库容量与工作气量关系图

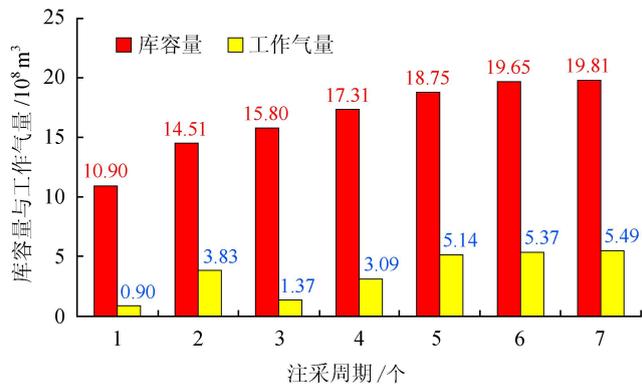


图 11 板中北地下储气库各注采周期内库容量与工作气量关系图

4 影响地下储气库达容的主要因素

目前,大港水淹衰竭型气藏改建的地下储气库经过 5~8 个注采周期的运行,库容达容率为 70%~90%,影响水淹衰竭型地下储气库达容的主要因素有以下 5 点:

4.1 地下储气库构造特征对达容的影响

地下储气库的构造特征影响着达容的速度。对于完整的背斜或单斜构造型地下储气库,边部水体在建库前的气藏开采阶段,由低向高的水侵结果通常使低部位含水多高部位含水少,流体分布遵循上轻下重的重力分异规律。当地下储气库采取由高向低的注气驱水达容方案时,这种规律性表现得更突出,这是由实践证实的普遍性规律。板中北高点地下储气库 7 个注采周期后的流体分布状态如图 12 所示。对于内部存在较多断层的破碎型地下储气库,由于断层的阻隔作用,

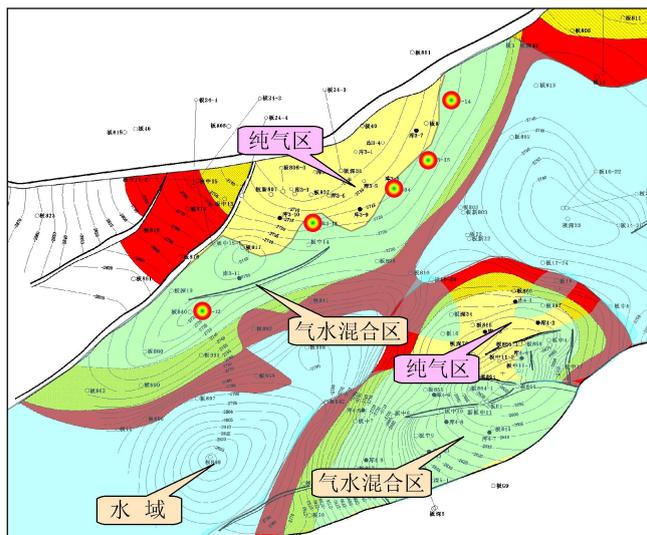


图 12 板中北地下储气库和板中南地下储气库的流体分布现状图

只能形成局部性的小单元注气驱水达容过程,通常由于范围小、井数少,无法实现高部位注气向低部位驱水的理想过程,造成小单元内气水分布混杂,驱水达容效果差,进而影响到整个地下储气库驱水达容的效果。如板中南地下储气库整体形态为一背斜构造(见图 12),但由于内部发育有 5 条小断层,造成多个小单元自成系统,难以实现完善的气体驱水注采关系,影响了达容效率,延长了达容时间。板中南地下储气库 5 个注采周期后的流体分布状态如图 12 所示。

4.2 地下储气库储层物性对达容的影响

储层物性的好坏和非均质性的强弱直接影响着地下储气库的达容效果。由于水淹衰竭型气藏改建的地下储气库实现库容主要依靠注气驱水扩容,因此储层物性较好的地下储气库注气驱水速度快、效果好,而储层物性较差的地下储气库注气驱水速度慢、效果差,这已为室内岩心实验和开采实践所证实。

储层非均质性强弱对地下储气库驱水扩容效率的影响较大,在注气和采气过程中,储层高渗透带气驱水速度快,低渗透带气驱水速度慢,非均质性强弱造成气水移动界面不会呈活塞式移动,而是出现舌进、指进等现象。其中板中南高点地下储气库除内部断层影响外,储层非均质性强也是造成达容效果差的重要原因。

4.3 地下储气库注采能力对达容的影响

水淹衰竭型气藏改建的地下储气库,改建地下储气库前的气藏内部均有不同程度的水淹,且通常气水分布复杂,往往出现新钻井井底气水混杂分布的现象,导致地下储气库井开始生产就见水。气井含水降低了

气井的产能,进而降低了地下储气库的采气量;同时气井井底地层含水,增大了地层流体的渗流阻力,影响了累计注气量。地层含水对气井注气、采气能力的双向影响,降低了地下储气库每个生产周期的注气量与采气量,致使气驱水达容速度降低。

4.4 地下储气库地层水体对达容的影响

水体对地下储气库达容的影响主要表现在以下 3 个方面:①地下储气库的快速采气生产导致边水侵入地下储气库内部,边部水体能量愈强则侵入地下储气库的程度越强,而退出地下储气库的程度越弱,达容难度越大;②地下储气库内存在的水体(尤其是井底附近的水体)封堵了气体渗流通道,降低了注入气的渗流能力和散布范围,使注气井少量注气就会造成井区压力快速升高,迅速达到地下储气库上限压力,使得注气过

程被迫停止,降低注气量,导致井区压力达到地下储气库上限压力,但整个地下储气库实际的平均地层压力明显小于设计的运行上限压力;③水体的影响导致气井含水后出现高压停采,使得地下储气库运行的下限压力高于设计的下限压力,缩小了地下储气库运行的真实运行区间,严重影响了地下储气库的达容速度和工作气量。

4.5 地下储气库扩容方式对达容的影响

地下储气库达容的途径有 2 种:①注入气驱替库内水体外移实现驱液达容;②通过气井采液来增加库容。从地下储气库实际生产效果分析,水淹衰竭型气藏改建地下储气库的达容规律以驱液达容为主、采液达容为辅。板 876 地下储气库运行 8 个注采周期驱液和采液增加的库容量数值如表 1 所示。

表 1 板 876 地下储气库不同注采周期库容量的变化情况表

10^8 m^3

项 目	注采周期/个									累计增加
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
驱替增加库容量	/	1.331	0.404	0.270	0.210	0.044	0.099	-0.084	0.112	2.385
采液增加库容量	/	0.009	0.006	0.014	0.000	0.017	0.013	0.016	0.014	0.090
总增加库容量	/	1.340	0.410	0.284	0.210	0.061	0.112	-0.068	0.126	2.475
地下储气库期末库容量	1.530	2.870	3.280	3.564	3.774	3.836	3.947	3.879	4.005	/

板 876 地下储气库库容量从投产运行前的 $1.530 \times 10^8 \text{ m}^3$ 上升到第 8 注采周期的 $4.005 \times 10^8 \text{ m}^3$, 累计增加了 $2.475 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中驱替累计增加 $2.385 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总库容增量的 96.36%, 采液累计增加 $0.090 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总库容增量的 3.64%。可见水淹衰竭型地下储气库库容的增加量以注气驱替水体为主, 气井采液增加的库容量比例较小。其他水淹衰竭型气藏改建地下储气库的达容规律也基本相同。

5 结论

大港地下储气库是国内最早一批建成投产的地下储气库, 其库容的变化规律及其影响因素对目前国内正在建设或待建的地下储气库有着重要的借鉴意义。地下储气库的注采机理物理模拟实验研究规律表明: 地下储气库内的含水区可以实现较高的气体驱替, 但气驱水达容效率是逐步增加的过程, 需要多年的注采周期才能实现。以大港水淹型地下储气库为例, 总结了地下储气库扩容规律及影响库容的主要因素:

1) 地下储气库库容量呈现逐渐增加的趋势, 并最终趋于最大库容量。

2) 地下储气库投产初期库容增速快, 后期增速变缓。

3) 地下储气库地下垫气量与工作气量呈正增长关系, 但增长不同步。

4) 影响地下储气库达容的主要因素包括: 构造特征、储层物性、注采能力、水体分布以及扩容方式。

参 考 文 献

- [1] 马小明, 余贝贝, 马东博, 等. 砂岩枯竭型气藏改建地下储气库方案设计配套技术[J]. 天然气工业, 2010, 30(8): 67-71.
- [2] 高发连, 舒霞. 储气库库容的估算方法[J]. 油气储运, 2005, 24(12): 22-24.
- [3] 黄海. 地下储气库储气量的校核[J]. 石油规划设计, 2001, 12(1): 11-15.
- [4] 王皆明, 姜风光. 砂岩气顶油藏改建储气库库容计算方法[J]. 天然气工业, 2007, 27(11): 97-99.
- [5] 杨广荣, 余元洲, 贾广雄, 等. 物质平衡法计算天然气地下储气库的库容量[J]. 天然气工业, 2003, 23(2): 96-99.
- [6] 王东营, 王凤田, 李原欣, 等. 影响地下储气库扩容的地质因素研究[J]. 河北能源职业技术学院学报, 2010, 35(1): 53-56.

(收稿日期 2011-09-24 编辑 何 明)