

非常规气储量计算方法分析

谷 宁¹ 朱学谦¹ 邢丽雯²

1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 英国纽卡斯尔大学石油地质化学系, 纽卡斯尔, NE 17 RU

摘 要: 随着非常规气在全球油气勘探、开发及交易中扮演越来越重要的角色, 如何可靠计算非常规气储量必然成为关注的焦点。非常规气主要包括致密砂岩气、煤层气和页岩气等。非常规气藏通常都具有储层致密、低孔低渗、流体赋存方式多样、储层非均质性强等特点, 同时每种非常规气藏又各具特点, 导致各类非常规气储量计算面临不同的问题。通过解剖目前海外项目中非常规气资源储量计算方法认为: 目前常规气储量计算的动态法和静态法用于非常规气储量计算存在不足; 而将常规气藏储量计算的动、静态法相结合用于非常规气藏储量计算才能获得相对可靠的计算结果。

关键词: 非常规气; 致密气; 煤层气; 页岩气; 储量; 低渗透; 吸附气; 产量预测

DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2014.06.011

0 前言

随着全球对油气需求的增大及开采技术的提高, 越来越多的非常规气项目逐渐出现在海外油气交易和生产中^[1-2]。如何准确计算非常规气储量成为人们关注的问题。与常规气藏相比, 无论是致密砂岩气、煤层气还是页岩气通常都具有储层致密、低孔低渗、流体赋存方式多样、储层非均质性强等特点, 给非常规气藏的储量评估带来了挑战。

常规气储量计算方法通常分为静态法和动态法。静态法主要为容积法。在非常规气储量计算中, 储层的致密和流体赋存方式的多样给容积法储量计算带来一系列问题。而动态法主要根据生产过程中储层参数或产量的动态变化来计算天然气的储量, 包括以生产中储层压力变化为基础的物质平衡法, 及以产量预测为基础的曲线递减法等。然而在非常规气藏中, 致密的储层和多种流体赋存方式导致多种流动状态的存在和瞬态流、过渡流时间过长等问题, 给动态法计算非常规气储量带来困难。

本文从致密砂岩气藏、煤层气藏和页岩气藏与常规气藏的不同点入手, 分析它们在气藏工程和采气工程上的不同特点, 进而分析常规气藏中常用的容积法、递减

曲线分析法、物质平衡法等储量计算方法在上述三种非常规气藏中各自所面临的挑战和适用性。

1 致密砂岩气储量计算方法探讨

1.1 静态储量计算方法

致密砂岩气的主体以游离态存在于致密砂岩层系中。容积法计算致密砂岩气藏的储量与常规气藏中的容积法公式相同。然而, 与常规砂岩储层相比, 在致密砂岩储层中, 强烈的成岩作用导致岩石中微观孔隙结构和孔隙类型变得复杂, 储层渗透率变低^[3-5], 使容积法计算致密砂岩气储量时各参数的不确定性增加。

首先, 储层致密和渗透率降低使致密砂岩气藏内气体的瞬态流动通常持续几年甚至十几年, 达到拟稳态流动之前, 泄气面积在不断变化, 渗透率越低这种变化越缓慢, 因此致密砂岩气藏泄气面积的大小受开采时间和开采方式的影响, 只有掌握大量生产数据后, 才能准确确定。同时, 低渗透储层通常过渡带都非常大, 给有效厚度的确定带来困难。

另外, 致密砂岩气藏包括分散泥质, 储层中的含泥分布非常复杂, 泥质含量不好估算; 同时因为孔隙结构和类型复杂, 侵入不完整等因素的影响, 致密砂岩气藏

孔隙度很难确定。此外,复杂的泥质分布方式、地层水电阻率难以确定等都给含气饱和度的确定带来困难。

因此在致密砂岩气储层中,用容积法计算储量比在常规气储层中存在更多的不确定性。

1.2 递减曲线分析法

递减曲线分析法是常规天然气中最常用的一种动态储量预测方法。通常在气田进入生产递减阶段后,通过预测其产量变化规律来求得可采储量。在储量预测中一般使用 Arps 递减曲线分析方法,其产量和时间的递减关系为:

$$q = \frac{q_i}{(1 + b D_i t)^{\frac{1}{b}}} \quad (1)$$

式中: q 为产量, m^3/d ; q_i 为初始时刻的产量, m^3/d ; b 为 Arps 递减因子, 无量纲; D_i 为初始递减率, $1/\text{d}$; t 为生产时间, d 。

从严格的流动阶段上来说, Arps 递减曲线代表的是边界控制流阶段, 不能用于分析生产早期的不稳定流动。然而, 对低渗透储层, 达到边界控制流动或拟稳态流动需要花费很长时间; 给定泄气面积的情况下, 渗透率越小, 达到拟稳态流动的时间越长。致密气储层通常需要几年才能达到稳定流动, 见图 1。

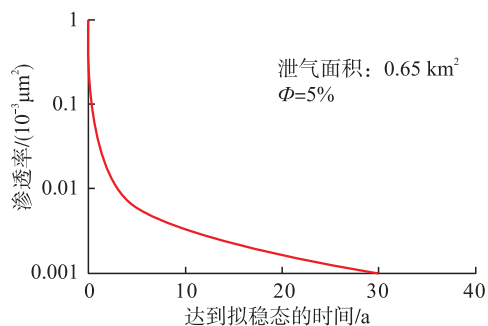


图1 达到拟稳态流动时间与渗透率的关系

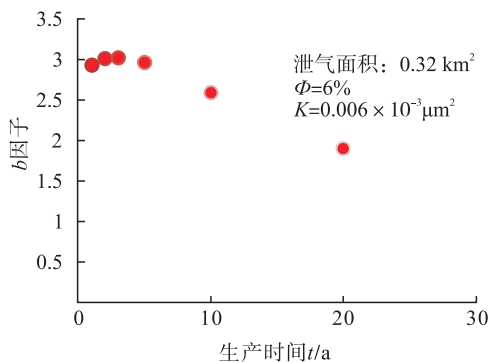


图2 瞬态流和过渡流阶段 b 因子的变化

在拟稳态流动到达之前的瞬态流和过渡流阶段, Arps 递减通常为双曲型递减, 此时递减因子 b 随着生产的进行在不断地变化, 而且通常大于 1^[6-8], 见图 2。这给用 Arps 递减曲线分析法预测储量带来两方面的问题: 首先用传统的 Arps 递减曲线预测生产剖面时, 要求 b 因子在 $[0, 1]$ 之间, $b > 1$ 有时会高估预测结果, 见图 3^[8]; 另外由于 b 因子在不断地变化, 其变化趋势很难预测, 因此在致密砂岩气藏内, 低渗透导致瞬态流持续时间过长, 而用瞬态流阶段的生产数据预测未来的生产剖面及估算储量必然存在较大风险。

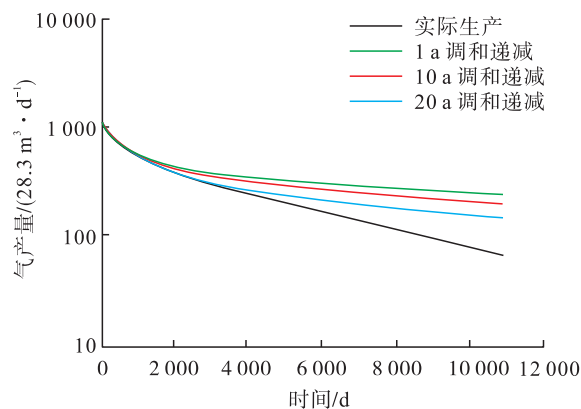


图3 致密砂岩气藏中瞬态流阶段传统 Arps 递减预测结果

1.3 物质平衡法

物质平衡法是指气藏体积一定的条件下, 气藏内天然气和水体积变化的代数和始终为 0。物质平衡法通过地层压力变化与产量的关系来预测气藏的储量。

要获得准确的储量数据, 气藏压力值要测准。既要求原始地层压力, 又要求不同生产时间内的平均地层压力, 通常的做法是用关井恢复获得平均地层压力。物质平衡法的局限性之一是必须关井确定地层压力, 尤其对低渗透储层, 需要很长的关井时间才能获得稳定的储层压力, 这点通常不能满足, 导致低渗透储层压力数据很难测准, 因此用物质平衡法预测的储量结果过低, 见图 4^[9]。

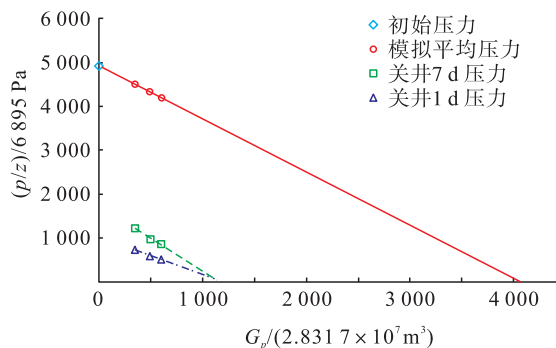


图4 用不同关井时间测得的地层压力预测储量

2 煤层气储量计算方法

与常规天然气或致密砂岩气藏相比,煤层气除了储层较致密的特点外,还具有储层以有机质为主、气体以吸附气为主等特点。煤层气储量计算方面的特点主要是由于气体吸附所带来的一系列问题。

2.1 静态储量计算方法

煤层气存储在煤层中,煤层是有机质储层,比表面大,其吸附的甲烷量能达到同体积常规储层的2~7倍,因此煤层中吸附气含量通常超过90%,煤层气的储量计算中通常忽略含量很少的游离气和溶解气。

体积法计算煤层气地质储量 *OGIP* 是用含气煤层的重量乘以其含气量来获得:

$$OGIP = \text{重量} \times \text{含气量} \quad (2)$$

式中:重量指有机质煤储层的重量,t;含气量主要是指吸附在有机质煤储层的气含量, m^3/t 。

在煤储层中,除了有少量的游离气外,还会存在游离水和少量的灰分,因此式(2)可以进一步写为:

$$OGIP = \text{煤体积} \times \text{密度} \times (1 - \text{灰分含量} - \text{含水量}) \times \text{含气量} \quad (3)$$

在体积法计算煤层气的过程中,含气量、灰分含量、生产下限是影响煤层气地质储量 *OGIP* 的主要因素,然而最主要的影响因素含气量却无法用测井资料直接获得。通常认为煤吸附气体属于单分子层吸附,可以用 Langmuir 方程描述绝大部分饱和煤层的吸附等温线,即含气量 G_s 可以表示为地层压力 p 的函数:

$$G_s = \frac{V_L p}{(p + p_L)} \quad (4)$$

式中: V_L 为 Langmuir 体积, m^3/t ; p_L 为 Langmuir 压力,MPa。

根据岩心资料分析,可以获得不同煤层的饱和含气量与地层压力的关系。然而,含气量不但与地层的温度、压力有关,还与灰分、煤阶、埋藏史、煤的化学组成和气体散失等多种因素有关,很难确定。

2.2 递减曲线分析法

煤层气主要靠地层压力以吸附态储存在煤层中,因此气体开采过程包括气体在煤层内表面的解吸、通过煤层中的微孔隙扩散和通过裂缝、割理流动等三种流动机制。表现在生产剖面上,对于未饱和煤层气藏,生产经历初期排水降压、天然气稳定生产及产量下降等三个阶段。在排水降压阶段,气体在煤层中不断地解吸,气产量逐渐上升,这一阶段的生产剖面与常规气有很大不同。因此,在煤层气产量出现递减之前,到达峰值产量的时间、峰值产量的大小、稳产期时间等因素受气体解吸及排水过程的影响,而这一过程随着储层压力和气体饱和

度等多种因素的变化而变化;当生产进入递减阶段后,由于煤层也是低渗透储层,生产曲线递减的类型、泄气面积大小等参数在瞬态流动阶段不断变化同样影响着煤层气递减曲线的预测。另一方面,煤储层的低渗透率会导致煤层气生产周期较长,目前可以借鉴的煤层气完整生产历史也很少。因此用递减曲线分析法预测煤层气可采储量存在着更多的挑战。

2.3 物质平衡法

为了将常规气藏中使用的物质平衡法应用到以吸附气为主的煤层气中,众多学者对物质平衡法进行了改进。以 Jensen 和 Smith 1997 年提出的方法最为典型。他们将煤层气吸附所遵循的等温吸附关系(式(4))与传统物质平衡法相结合,得到针对煤层气储量计算的改进的物质平衡法:

$$\frac{p}{p_L + p} = \frac{-G_p}{V_L A h \rho_B} + \frac{p_i}{p_L + p} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,地层压力 p 与气产量 G_p 之间形成直线关系,从而预测煤层气的储量。

由于煤层渗透率较低,上述改进的物质平衡法仍然要面临致密砂岩气藏中的问题,即需要准确测得生产过程中地层压力才能够应用。

3 页岩气储量计算方法

在页岩储层内,有机质和无机质共存,气体可以吸附在有机质表面,也可以游离在储层孔隙和裂缝中,因此储层内游离气和吸附气共存,通常吸附气含量占20%~85%。因此,页岩气储量计算可以看成是致密气与煤层气的结合,即致密储层内游离气与吸附气储量的叠加。但由于页岩与致密砂岩和煤层相比更加致密,储层渗透率在纳达西级别,其生产特征比其它两种非常规气更依赖于压裂效果等工程因素^[10],因此页岩气储量计算并不是其它两种非常规气的简单组合,而是有其特点。

3.1 静态储量计算方法

容积法计算页岩气储量是分别计算游离气和吸附气的储量,然后将二者相加。其中游离气的计算方法与常规天然气相同。但是页岩气位于资源三角的最底层^[11],其储层条件更为苛刻。与储层内主要是游离气的致密砂岩气藏相比,页岩储层的基质渗透率更低,在致密砂岩气储层中容积法遇到的问题在页岩气藏中更严重:泄气面积变化时间更长、过渡带更大,从而导致含气面积、有效厚度、孔隙度和含气饱和度更难确定。

页岩气藏中吸附气储量与煤层气藏中吸附气储量的计算方法相同,都可以用式(2)计算,由于气体通常吸附在有机质表面,吸附气含量与储层内有机质含量有密切关系,因此不同 TOC 含量所对应的甲烷等温吸附曲

线不同,即在相同地层压力的条件下,不同 TOC 含量的储层其含气量不同。然而,页岩在矿物成分、颗粒大小、孔隙结构及裂缝方面都有纳米级变化,整个页岩气开采区域内的 TOC 分布是很难确定的;另一方面,在实验室测量中,很难明确区分出游离气和吸附气,这些因素都给吸附气计算时含气量的确定带来了不确定因素。

3.2 递减曲线分析法

页岩气藏的超低渗透特性使得页岩气开发效果很大程度上依赖于水平井分段压裂来完成,与其它两种非常规气藏相比,工程因素在页岩气储量计算中的影响更大。不同水平段长度、不同的压裂段数及支撑剂等工程因素对储层改造的效果不同,从而预测的产量剖面也不同,但目前预测裂缝系统对产量的影响尚处于探索阶段,因此必然给用递减曲线分析法预测页岩气储量带来很大的不确定性。

3.3 物质平衡法

与致密砂岩气和煤层气相比,在渗透率更低的页岩气藏内,通常更难获得准确的气藏压力,因此物质平衡法很少用于页岩气藏的储量预测。

4 实例分析

海外某海相页岩气藏,埋深 3 600~4 500 m,储层稳定,含伊利泥、砂/粉砂及灰岩,有裂缝。气藏的平均孔隙度为 9%,含气饱和度为 74%,储层压力为 58.9 MPa,该气藏目前已钻 15 口井,尚未大规模投入生产。用容积法计算该页岩气藏的最终可采储量为 $0.62 \times 10^8 \text{ m}^3$,见表 1。

表 1 容积法计算某页岩气藏的储量

面积/ km^2	0.324
井筒温度/ $^{\circ}\text{C}$	126.67
储层压力/MPa	58.9
储层厚度/m	31.09
采收率/(%)	35
孔隙度/(%)	9
含气饱和度/(%)	74
最终可采储量/ 10^8 m^3	0.62

用递减曲线分析法计算某气藏最终可采储量见图 5。类比周边已生产页岩气藏内生产井的生产历史(图 5 中黑线),根据递减曲线分析法预测该气藏的产量剖面(图 5 中红线),假设为调和递减,递减因子 b 为 1.2,初始递减率为 70%,用递减曲线分析法预测最终可采储量为 $0.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

对比容积法和递减曲线法的计算结果可以看出,无论从储层体积出发的静态法还是从生产动态出发的动

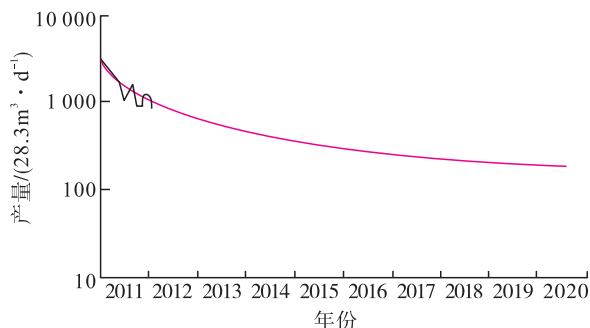


图 5 用递减曲线分析法计算某气藏最终可采储量

态法所计算的最终可采储量数值接近,因此认为目前对该气藏的最终可采储量计算是可靠的。

5 结论

非常规气储量计算目前仍采用常规气计算方法,但由于储层致密,流体赋存方式多样等因素存在,使非常规气储量计算的不确定性明显增大。评价中要尽量利用已有资料,将静态法和动态法相结合,用动态数据刻度静态参数,用静态结果调整动态方案,以期在复杂的非常规气储量评价中获得更可靠的结果。

参考文献:

- [1] 邹才能,董大忠,杨桦,等. 中国页岩气形成条件及勘探实践[J]. 天然气工业,2011,31(12):26-39.
Zou Caineng, Dong Dazhong, Yang Hua, et al. Conditions of Shale Gas Accumulation and Exploration Practices in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 26-39.
- [2] Guidelines for Application of the Petroleum Resources Management System[S].
- [3] 邹才能. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社,2011. 103-107.
Zou Caineng. Unconventional Petroleum Geology [M]. Beijing: Geological Press House, 2011. 103-107.
- [4] 黄鑫,董秀成,肖春跃,等. 非常规油气勘探开发现状及发展前景[J]. 天然气与石油,2012,30(6):38-41.
Huang Xin, Dong Xiucheng, Xiao Chunyue, et al. Present Situation and Development Prospect of Unconventional Oil and Gas Exploration and Development [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(6): 38-41.
- [5] 孙赞东,贾承造,李相方. 非常规油气勘探与开发[M]. 北京:石油工业出版社,2011. 411-424.
Sun Zandong, Jia Chengzao, Li Xiangfang. Unconventional Oil & Gas Exploration and Development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011. 411-424.
- [6] 姚猛,胡嘉,李勇,等. 页岩气藏生产井产量递减规律研究[J]. 天然气与石油,2014,32(1):63-66.

- Yao Meng, Hu Jia, Li Yong, et al. Research on Production Decline Regularity of Production Wells in Shale Gas Reservoir [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32(1): 63-66.
- [7] 蒋佩, 王怒涛, 姚锋盛, 等. 非常规天然气产量递减分析新方法及其应用[J]. 天然气与石油, 2012, 30(2): 52-55.
- Jiang Pei, Wang Nutao, Yao Fengsheng, et al. New Methods for Analysis on Unconventional Gas Production Rate Decline and their Application [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(2): 52-55.
- [8] Cheng Y, Lee W J, Mc Vay D A. Improving Reserves Estimates from Decline-curve Analysis of Tight and Multilayer Gas Wells [C]. Paper 108176 Presented at the Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, 1-3 April 2007, Dallas Texas, USA. New York: SPE, 2007.
- [9] Cox S A, Gilbert J V, Sutton R P, et al. Reserve Analysis for Tight Gas [C]. Paper 78695 Presented at the SPE Eastern Regional Meeting, 23-25 October 2002, Lexington Kentucky, USA. New York: SPE, 2002.
- [10] 李欣, 段胜楷, 孙扬, 等. 美国页岩气勘探开发最新进展[J]. 天然气工业, 2011, 31(8): 124-126.
- Li Xin, Duan Shengkai, Sun Yang, et al. Advances in the Exploration and Development of U.S. Shale Gas [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(8): 124-126.
- [11] 闫存章, 黄玉珍, 葛春梅, 等. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 1-6.
- Yan Cunzhang, Huang Yuzhen, Ge Chunmei, et al. Shale Gas: Enormous Potential of Unconventional Natural Gas Resources [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 1-6.

(上接第44页)

- Tan Mingwen, Jing Yuanquan, Zhang Chaoju, et al. Research on the Modification of Organic Boron Crosslinker DY 2-1 and Its Application [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 106-107.
- [3] 李延美, 何志勇, 宋友贵. 延迟交联无机硼水基冻胶高温压裂液 [J]. 油田化学, 1996, 13(1): 53-56.
- Li Yanmei, He Zhiyong, Song Yougui. A Delayed Borate Crosslinking Aqueous Gelling Fracturing Fluid for High Temperature Uses [J]. Oilfield Chemistry, 1996, 13(1): 53-56.
- [4] 王佳, 怡宝安, 杨文, 等. 压裂液用硼交联剂作用机理分析 [J]. 精细石油化工进展, 2009, 10(8): 23-24.
- Wang Jia, Yi Baoan, Yang Wen, et al. Analysis on Action Mechanism of Boron Crosslinker for Fracturing Fluid [J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2009, 10(8): 23-24.
- [5] 杨振周, 崔明月. 水基压裂液现场质量控制技术 [J]. 钻井液与完井液, 1998, 15(2): 25-26.
- Yang Zhenzhou, Cui Mingyue. Technology of Field Quality Control of Water Base Fracturing Fluid [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 1998, 15(2): 25-26.
- [6] 程运甫, 张胜传, 冯敬红, 等. 深层低渗油藏压裂改造技术 [J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(增刊1): 69-71.
- Cheng Yunfu, Zhang Shengchuan, Feng Jinghong, et al. Fracturing Reformation Technology of Deep and Low Permeability Reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(Suppl 1): 69-71.
- [7] 关中原. 硼交联水基冻胶压裂液的研究发展现状 [J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 1997, 12(1): 53-56.
- Guan Zhongyuan. Research and Development Status of Boron-Crosslinked Water-Base Fracturing Fluid [J]. Journal of Xi'an Shiyou Institute (Natural Science Edition), 1997, 12(1): 53-56.
- [8] SY/T 5107-2005, 水基压裂液性能评价方法 [S].
- SY/T 5107-2005, Recommended Practices on Measuring the Properties of Water-based Fracturing Fluid [S].
- [9] 车航, 崔会杰, 邱兵, 等. 压裂液延迟交联与快速破胶技术 [J]. 钻井液与完井液, 2003, 20(4): 24-25.
- Che Hang, Cui Huijie, Qiu Bing, et al. Delayed Crosslink and Rapid Break Techniques of Fracturing Fluid [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2003, 20(4): 24-25.
- [10] 邬国栋, 王玉斌, 袁文义, 等. 无机硼耐高温缓交联压裂液研究 [J]. 钻井液与完井液, 2007, 24(4): 50-53.
- Wu Guodong, Wang Yubin, Yuan Wenyi, et al. A High Temperature Retarded Crosslinking Inorganic Boron Fracturing Fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007, 24(4): 50-53.