

页岩气开采模拟实验方法研究

端祥刚¹ 胡志明¹ 彭 辉² 李武广³ 常 进¹ 刘华勋¹ 沈 瑞¹

1. 中国石油勘探开发研究院, 河北 廊坊 065007;

2. 中国石油西南油气田公司, 四川 成都 610041;

3. 中国石油西南油气田公司页岩气研究院, 四川 成都 610041

摘 要:为提高对页岩气特有的赋存状态和产气规律的认识水平,利用自主研发的模拟实验装置,采用天然页岩储层岩心和甲烷气开展了气体流动能力、气井生产动态和全生命周期生产模拟实验。实验结果表明,研发的模拟实验装置和配套技术具有高压、超长周期、多点测压等特点,能够较真实模拟页岩储层条件下的页岩气流动过程,初步揭示了扩散是主要的传质运输机理、页岩基质压力传播较慢、生产初期主要产出游离气、后期吸附气开始供给等页岩气的传质运输机理和衰竭开发规律,从而为页岩气开发技术政策制定提供了实验依据。

关键词:页岩;开发;实验;产气量;递减规律

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.02.012

Research on Simulation Experiment Method of Shale Gas Production

Duan Xianggang¹, Hu Zhiming¹, Peng Hui², Li Wuguang³, Chang Jin¹, Liu Huaxun¹, Shen Rui¹

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang, Hebei, 065007, China;

2. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;

3. Shale Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China

Abstract: In order to improve the understanding of unique state of occurrence of shale gas and gas production law of shale gas, natural gas shale cores and methane were used to carry out gas flow capacity, gas well production dynamics and full life cycle production simulation experiments by using a self-developed simulation experimental device. The experimental results show that the developed experimental equipment and supporting technology have the characteristics of high pressure, long period and multiple measuring points. It can simulate the flow process of shale gas under shale reservoir conditions and preliminarily reveals the shale gas mass transfer mechanism and exhaustion development law. Such as diffusion is the main mass transfer mechanism, the shale matrix pressure propagation is slow, the main production of free gas in the early stage of production, the adsorption gas supply in the later stage and etc. It provides experimental basis for the development of technical policy for shale gas.

Keywords: Shale; Development; Experiment; Gas production; Diminishing law

收稿日期:2018-10-02

基金项目:国家科技重大专项“页岩气渗流规律与气藏工程方法”(2017 ZX 05037-001);中石油重大科技专项“四川盆地页岩气建产有利区评价优选及开发技术政策优化研究与应用”(2016 E-0611)

作者简介:端祥刚(1987-),男,安徽宿州人,工程师,博士,主要从事非常规油气渗流、页岩气渗流机理相关研究。

图3 衰竭开发实验装置流程图

2.3 实验结果与分析

页岩样品不同生产时间的压力剖面和产气量见图4。

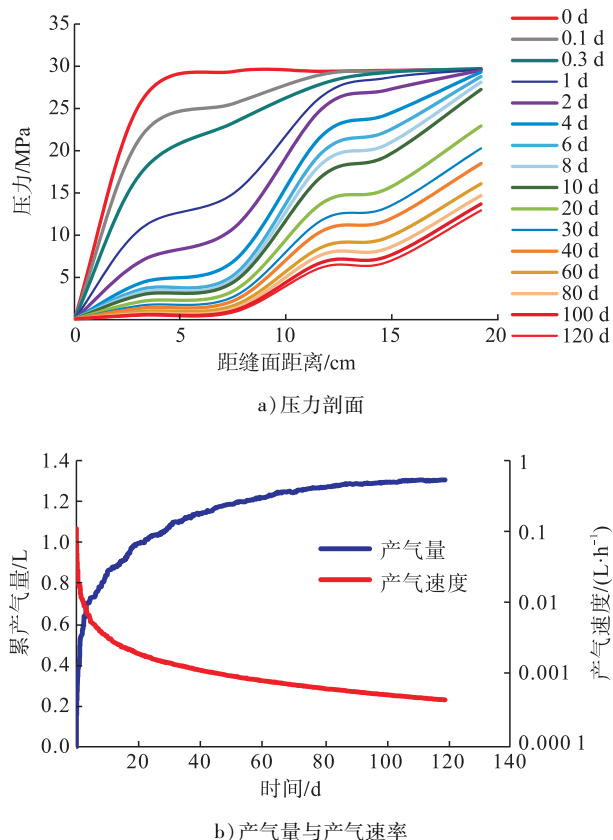


图4 压力剖面、产气量和产气速率随生产时间的变化曲线

从图4-a)可以看出,页岩基质渗流能力较低,生产时间非常长,5块岩心长度供给约20 cm,生产120 d,入口压力仅仅从初始的30 MPa降低至14 MPa,而且由于页岩气的吸附特征,越到生产后期,压力降幅越缓,因此对于页岩储层来说,常常具有长达几年到几十年的稳产期。从压力剖面可以看出,在初始开采阶段,页岩气的压力剖面与砂岩等常规气藏一样,动边界内呈“上凸型”的压降漏斗,越靠近采出端,压降越大,页岩储层压力传播动边界到达入口(1号测压点)的时间为6 d。

随着生产时间的推进,各测点压力逐渐降低,当压力降至约15 MPa以后,压力剖面逐渐由“上凸型”转为“下凹型”,而且压力越低,这种趋势越明显,这就是因为吸附气的大量供给,使得靠近出口端的4号和5号测压点压力降幅变缓,而远端测压点吸附气尚未动用,主要产出游离气,这与岩心内压力是否达到临界解吸压力密切相关,吸附气的供给是压力降低缓慢的主要原因。

3 全生命周期开采模拟实验

3.1 实验设计

页岩气井生产过程中,由于受到生产制度及工程因

素的影响,常常导致生产数据、压力不连续等问题,给产量历史拟合与预测带来困难,为真实模拟页岩气在地层中的流动,采用现场密闭取心的全直径岩心,在恢复地层压力模拟原始赋存状态之后,开始全生命周期的开发模拟实验,以获取完整的生产数据及计算过程中需要的一些关键参数,解决当前页岩气井产能计算与生产动态预测方法难以解决的难题。

3.2 实验设备与流程

全直径岩心取自川南昭通地区龙马溪组,长度15 cm,直径10 cm,孔隙度低于2.5%,渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。实验设备与生产动态模拟实验相同,密闭取心之后在实验室补充甲烷至储层压力,然后采用与现场相同的衰竭开发模式。具体实验过程如下:

1) 将保压取心全直径岩心夹持器取出,接入模拟实验装置流程,用高压泵将高压中间容器中的甲烷气增压并维持在28 MPa,直到岩心出、入口高压中间容器的压力不再降低,此时页岩气几乎完全处于原始地层的存储状态。

2) 打开出口调节阀,开始页岩气井全生命生产周期长期生产的动态模拟。实验过程中的入口压力、出口压力及出口气量分别通过压力传感器与气体质量流量计实时连续记录。

3.3 实验结果与分析

全直径岩心的压力、产气速率及累产气量曲线见图5。

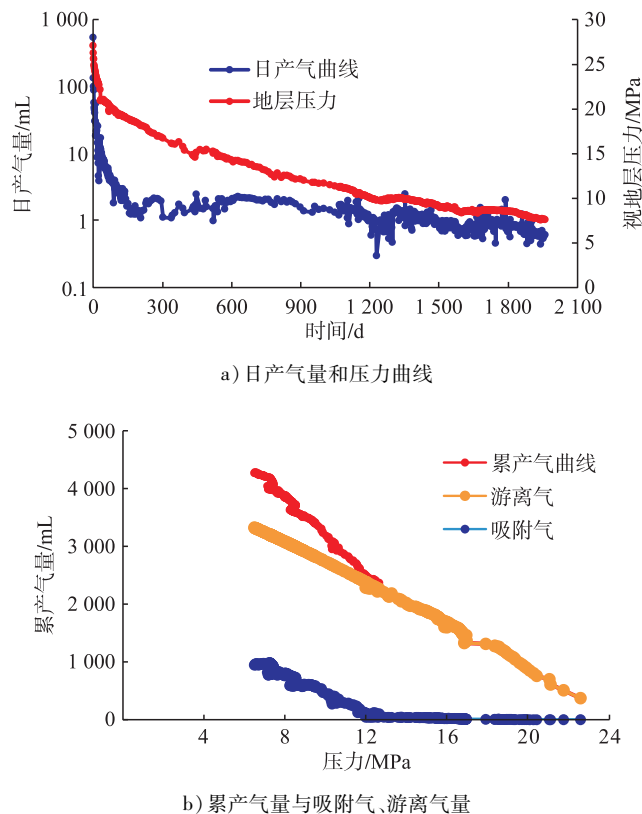


图5 全直径岩心实验压力与产量曲线

从图 5-a) 可以看出,页岩气生产初期产气量大、递减速度快,然后进入稳产期,产量递减曲线与单井产量递减曲线相似度很高,呈 L 型递减,前期产气量高是由于游离气动用,随后吸附气动用,实验进入稳产期,长达 1 900 d,物理模拟很好反映了页岩气生产初期产气量大、递减速度快、后期稳产时间长的特点。通过物质平衡方法可以获取吸附气和游离气的产气规律,从图 5-b) 可以看出,初期主要产出游离气,吸附气在后期供给才明显,累产气量明显上翘,进一步说明吸附气是页岩气后期长期稳产的重要气源^[18]。

从图 6 单井产气量与累产气量曲线可以看出,实验产气量变化曲线和实际生产井的产气量曲线变化规律基本一致。该生产井 2012 年 7 月开始生产,初期峰值产气量可达 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上,随后进入长达数年的稳产期,按目前产量预测,该井的低产稳产期仍然可以持续数年。从日产气量曲线可以看出,实际生产井的产气速率并不规律,尤其是开发初期,受压裂液返排和采气工艺的影响,采用常规方法利用压力和产量数据预测页岩气产能和产量异常困难。进入生产中后期,产气速率有一定规律性,但是生产制度的变化给模型计算带来困难,如数次开关井导致井底压力变化,产量数据不连续,给产量递减分析和 EUR 预测带来很大偏差。

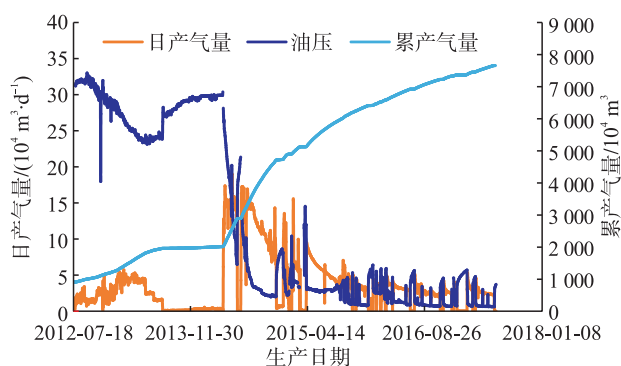


图 6 单井产气量与累产气量曲线

通过全生命周期开发实验可以获取全生命周期的压力和产量数据,解决了页岩气实际生产井生产时间短,生产制度变化带来的产量和压力不连续的问题,为建立单井产量预测模型,反演单井动态及 EUR 计算提供了宝贵的数据^[19-20]。同时通过实验数据建立模型可计算耦合传质实验岩心的压力传播距离,结合等温吸附曲线可以确定临界解吸压力,研究发生解吸附的区域。

4 结论

1) 研发的流动能力测试实验、开采动态模拟实验、全生命周期开发模拟实验具有高压(40 MPa)、长周期(5 a)、多点测压等特点,能够较为真实地模拟页岩储层温压条件下页岩气的赋存状态和产气规律。

2) 流动能力实验表明低压条件下努森扩散作用使得页岩渗透率大幅增加。生产动态模拟与全生命周期开采实验共同证实了页岩基质压力传播较慢,生产初期主要产出游离气,吸附气只有在生产后期才开始供给。

3) 通过系列物理模拟实验方法,能够较深入地揭示页岩气的传质运输机理和产出规律,为页岩气渗流机理和开采方式优选研究奠定实验基础。

参考文献:

- [1] 邹才能,张光亚,陶士振,等. 全球油气勘探领域地质特征,重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发,2010,37(2):129-145.
Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Geological Features, Major Discoveries and Unconventional Petroleum Geology in the Global Petroleum Exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37 (2): 129 - 145.
- [2] 兰 洁. 中国石油在川页岩气年产量超 $25 \times 10^8 \text{ m}^3$ [J]. 天然气与石油,2017,35(1):28.
Lan Jie. Shale Gas Output of PetroChina in Sichuan Exceeding $25 \times 10^8 \text{ m}^3$ [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (1): 28.
- [3] 王 祥,刘玉华,张 敏,等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学,2010,21(2):350-356.
Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, et al. Conditions of Formation and Accumulation for Shale Gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21 (2): 350 - 356.
- [4] 李武广,杨胜来,殷丹丹,等. 页岩气开发技术与策略综述[J]. 天然气与石油,2011,29(1):34-37.
Li Wuguang, Yang Shenglai, Yin Dandan, et al. Development Technology and Strategy of Shale Gas [J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29 (1): 34 - 37.
- [5] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and Depositional Setting of a Deep-Water Shale-Gas Succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91 (4): 579 - 601.
- [6] Gasparik M, Ghanizadeh A, Bertier P, et al. High-Pressure Methane Sorption Isotherms of Black Shales from the

- Netherlands [J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26 (8): 4995 – 5004.
- [7] 李武广, 吴建发, 宋文豪, 等. 页岩纳米孔隙分级量化评价方法研究[J]. *天然气与石油*, 2017, 35(2): 74 – 80.
- Li Wuguang, Wu Jianfa, Song Wenhao, et al. Research on the Method of Grading Quantitative Evaluation for Shale Nanoporous Distribution Characteristics [J]. *Natural Gas and Oil*, 2017, 35 (2): 74 – 80.
- [8] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组 – 龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. *地学前缘*, 2016, 23 (1): 1 – 10.
- Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, et al. Controlling Factors on the Enrichment and High Productivity of Shale Gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, Southeastern Sichuan Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23 (1): 1 – 10.
- [9] 蒲泊伶, 蒋有录, 王毅, 等. 四川盆地志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析[J]. *石油学报*, 2010, 31 (2): 225 – 230.
- Pu Boling, Jiang Youlu, Wang Yi, et al. Reservoir-Forming Conditions and Favorable Exploration Zones of Shale Gas in Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31 (2): 225 – 230.
- [10] 熊伟, 郭为, 刘洪林, 等. 页岩的储层特征以及等温吸附特征[J]. *天然气工业*, 2012, 32(1): 113 – 116.
- Xiong Wei, Guo Wei, Liu Honglin, et al. Shale Reservoir Characteristics and Isothermal Adsorption Properties [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32 (1): 113 – 116.
- [11] Curtis J B. Fractured Shale-Gas Systems [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86 (11): 1921 – 1938.
- [12] Pang Xiongqi, Li Sumei, Jin Zhijun, et al. Quantitative Assessment of Hydrocarbon Expulsion of Petroleum Systems in the Niuzhuang Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2004, 78 (3): 615 – 625.
- [13] Nelson P H. Pore-throat Sizes in Sandstones, Tight Sandstones, and Shales [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93 (3): 329 – 340.
- [14] Liu Yu, Zhu Yanming, Li Wu, et al. Molecular Simulation of Methane Adsorption in Shale Based on Grand Canonical Monte Carlo Method and Pore Size Distribution [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 30: 119 – 126.
- [15] Slatt R M, O'Brien N R. Pore Types in the Barnett and Woodford Gas Shales: Contribution to Understanding Gas Storage and Migration Pathways in Fine-Grained Rocks [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95 (12): 2017 – 2030.
- [16] Chareonsuppanimit P, Mohammad S A, Robinson R L, et al. High-Pressure Adsorption of Gases on Shales: Measurements and Modeling [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 95: 34 – 46.
- [17] 高树生, 刘华勋, 叶礼友, 等. 页岩气藏SRV区域气体扩散与渗流耦合数学模型[J]. *天然气工业*, 2017, 37(1): 97 – 104.
- Gao Shusheng, Liu Huaxun, Ye Liyou, et al. A Coupling Model for Gas Diffusion and Seepage in SRV Section of Shale Gas Reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37 (1): 97 – 104.
- [18] 张雪芬, 陆现彩, 张林晔, 等. 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(6): 597 – 604.
- Zhang Xuefen, Lu Xiancai, Zhang Linye, et al. Occurrences of Shale Gas and Their Petroleum Geological Significance [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25 (6): 597 – 604.
- [19] Javadpour F. Nanopores and Apparent Permeability of Gas Flow in Mudrocks (Shales and Siltstone) [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2009, 48 (8): 16 – 21.
- [20] 高树生, 刘华勋, 叶礼友, 等. 页岩气井全生命周期物理模拟实验及数值反演[J]. *石油学报*, 2018, 39(4): 435 – 444.
- Gao Shusheng, Liu Huaxun, Ye Liyou, et al. Physical Simulation Experiment and Numerical Inversion of the Full Life Cycle of Shale Gas Well [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39 (4): 435 – 444.