

文章编号: 1001-6112(2010)06-0592-04

致密岩心中气体渗流特征及影响因素实验研究

温晓红^{1,2}, 周拓³, 胡勇^{2,4}, 朱华银^{2,4}, 王淑英^{2,4}

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007;

3. 中国石油大学石油工程系, 山东青岛 266555; 4. 中国石油天然气成藏与开发重点实验室, 河北廊坊 065007)

摘要:致密砂岩气藏储层岩石孔隙结构复杂, 孔喉细小, 气体渗流特征有别于常规气藏。采用逐级增压气驱实验和定容衰竭开采物理模拟实验相结合的方法, 测试分析了气体在砂岩储层岩心中的渗流特征。研究表明: 气体在致密砂岩储层岩心中有效流动的条件是需要有足够大的流动压差克服沿程摩阻, 这也是致密气藏储量得到动用的门槛条件。气相渗流特征受岩心基质渗透率、含水饱和度和岩心长度、上覆压力等多种因素的影响, 在致密气藏开发过程中, 需要综合考虑这些因素对气井产能及稳产能力的影响。

关键词:致密岩心; 实验研究; 影响因素; 气体渗流

中图分类号: TE311

文献标识码: A

EXPERIMENTAL STUDY OF PROPERTIES AND INFLUENCING FACTORS OF GAS FLOW IN TIGHT CORE

Wen Xiaohong^{1,2}, Zhou Tuo³, Hu Yong^{2,4}, Zhu Huayin^{2,4}, Wang Shuying^{2,4}

(1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China*;

3. *China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266555, China*;

4. *Key Laboratory of Gas Reservoir Formation and Development, Langfang, Hebei 065007, China*)

Abstract: Properties of gas flow in tight gas reservoirs are different from those in conventional gas reservoirs due to complex pore structure and tiny pore throat. Gas drive experiment by increasing pressure progressively and constant depletion physical simulation experiment were used in this paper so as to analyze gas flow characteristics in sandstone reservoir cores. The results indicated that, flow pressure difference enough big was required to overcome friction. This is the threshold for tight gas reservoir development. Gas flow properties are influenced by many factors such as basis permeability, water saturation, core length and overburden pressure. They may influence gas well productivity and rate maintenance capability and should be paid attention to before tight gas reservoir development.

Key words: tight core; experimental study; influential factors; gas flow

致密气藏分布广泛, 储量丰富, 是增储上产的重要领域。美国最早使用致密气藏的概念, 20世纪70年代, 美国联邦能源管理委员会将储层渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的气藏(不包含裂缝)定义为致密气藏, 并以此作为是否给予生产商税收补贴的标准^[1-2]。借鉴该标准, 我国的大气田(如苏里格、须家河)50%以上岩心的常规空气渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于致密储层范畴。致密气藏由于其复杂的孔隙结构和致密性, 在气水渗流特征方面与常规气藏储层存在较大差异^[3-5], 搞清楚气体

在致密岩心中的流动特性及其影响因素, 可为类似气藏的有效开发提供参考依据。

1 实验用岩心

实验所用岩心均来自于苏里格气田砂岩储层天然岩心, 其基本参数见表1。

2 气体渗流特征实验

2.1 逐级增压气驱实验

实验组别S1, 设置气驱压力从0.1 MPa逐级增

收稿日期: 2010-03-29; 修订日期: 2010-10-08。

作者简介: 温晓红(1978-), 女, 工程师, 主要从事天然气藏开发工作。E-mail: wenxh69@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05013-003)资助。

表 1 实验用岩心参数
Table 1 Experiment core data

实验组别	岩心长度/cm	岩心直径/cm	孔隙度/%	干岩心常规渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	实验围压/MPa	围压 40 MPa		实验类型	备注
						下干岩心渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	含水饱和度/%		
S1	13.13	3.77	7.65	0.095	40	0.001 2	0.0	增压气驱	图 1,3,6
S2	100.00	9.90		0.055	40		0.0	定容衰竭	图 2
S3	13.18	3.75	13.00	1.495	40	0.296	0.0	增压气驱	图 3
S4	19.76	3.75	9.23	0.740	40	0.015	100.0	增压气驱	图 4
S5	19.76	3.75	9.23	0.740	40	0.015	72.5	增压气驱	图 4
S6	19.76	3.75	9.23	0.740	40	0.015	0.0	定容衰竭	图 5,7
S7	19.76	3.75	9.23	0.740	40	0.015	56.6	定容衰竭	图 5
S8	19.76	3.75	9.23	0.740	40	0.015	58.9	定容衰竭	图 5
S9	6.58	3.77	6.40	0.094	40	0.001 2	0.0	增压气驱	图 6
S10	19.69	3.75	6.00	0.095	40	0.000 8	0.0	增压气驱	图 6
S11	6.57	3.73	9.30	0.659	40	0.018	0.0	定容衰竭	图 7
S12	13.18	3.73	9.30	0.660	40	0.017	0.0	定容衰竭	图 7
S13	19.70	3.75	13.77	1.530	40	0.120	0.0	增压气驱	图 8
S14	19.70	3.75	13.77	1.530	10	0.120	0.0	增压气驱	图 8

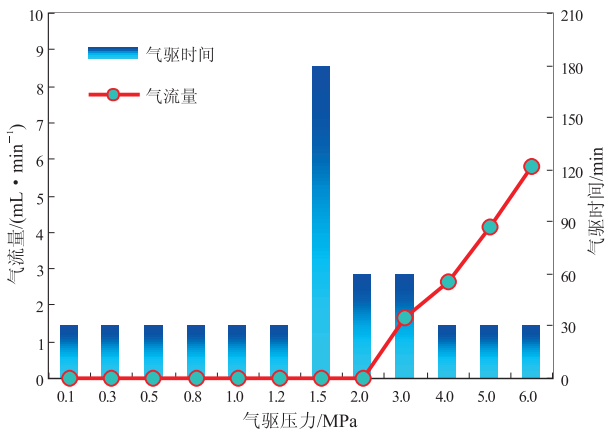


图 1 逐级增压气驱实验结果

Fig. 1 Result of gas drive experiment by increasing pressure progressively

加,最大气驱压力达 6.0 MPa,每个气驱压力下气驱时间在 30 min 以上,采用皂漠流量计检测气体通过岩心的流量。实验结果表明:压力小于 2.0 MPa 逐级增压气驱过程中,累计驱替 420 min 内无法有效检测气流量;当气驱压力为 3.0 MPa 时,气驱 60 min 检测到气流量,气体能有效通过该岩心,表明气体在致密岩心中需要有足够大的流动压差才能有效渗流(图 1)。

2.2 定容衰竭开采物模实验

实验组别 S2,采用多测压孔岩心夹持器,建立物理模拟模型^[6]。对模型饱和气,至孔隙压力平衡为 25 MPa,以初期实验配产 1 000 mL/min 进行定容衰竭开采。在模型出口处、距离出口 40 cm 处,以及边界处(距离出口 100 cm)分别进行压力监测,

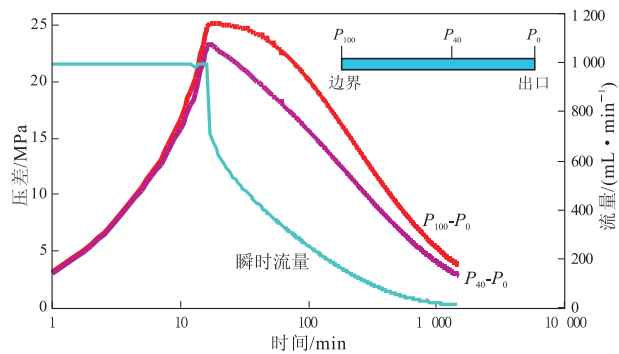


图 2 定容衰竭开采物理模拟实验

Fig. 2 Result of constant depletion physical simulation experiment

记录压力 P_0, P_{40}, P_{100} (图 2)。实验结果表明:在定容衰竭开采过程中,气体从边界流向井底需要克服沿程摩阻,因此压差 $P_{100} - P_0$ 总比 $P_{40} - P_0$ 大。由于存在摩阻,气体需要建立一定压差才能有效流动。在压力未波及边界之前,外围有足够大的动能来不断扩大流动压差,实现稳产;当压力波及到边界后,外围没有补给动能,流动压差逐渐减小,导致生产进入递减期,直至无产量。这一图版解释了气田开发过程中,气井稳产、产量递减与流动压差的关系。

3 影响因素分析

通过室内岩心实验,分析了岩心基质渗透率、含水饱和度、岩心长度、上覆压力对气体渗流的影响。

3.1 岩心基质渗透率

岩心基质渗透率是控制气体渗流的关键因素。实验 S1, S3 的结果表明: 渗透率为 $1.495 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心, 气驱压力为 0.1 MPa 时就能检测到气流量, 表明气体在较小的压差下就能在该岩心中有效流动; 但对于渗透率为 $0.095 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心, 气驱压力小于 2.0 MPa 时均检测不到气流量。说明岩心渗透率越低, 气体渗流阻力越大, 越制约气体有效流动(图 3)。基质渗透率低是致密气藏普遍低产的直接原因。

3.2 岩心含水饱和度

岩心含水饱和度是影响气体渗流的重要因素。实验 S4, S5 的结果表明: 岩心含水饱和度越高, 气体流动初始压差越大, 产生流动后的气流量越小(图 4)。

实验 S6, S7, S8 的结果表明: 岩心含水饱和度越高, 边界压力下降越缓慢, 岩心含水进一步增大气体流动阻力, 导致远井区储量动用慢(图 5)。

3.3 岩心长度

实验 S1, S9, S10 的结果表明: 气体流动所需

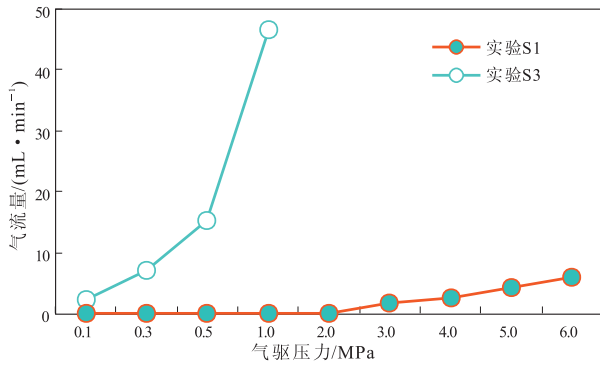


图 3 不同渗透率岩心气体渗流实验
Fig. 3 Gas flow experiment of cores with different permeability

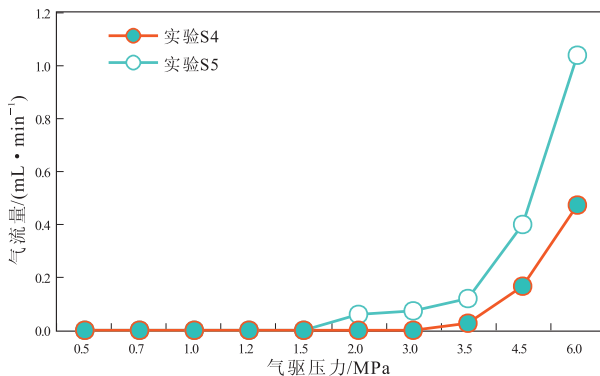


图 4 不同含水饱和度岩心气体渗流特征
Fig. 4 Gas flow experiment of cores with different water saturation

的初始压差随岩心长度增加而增加; 气体流动后, 在相同压差下, 岩心长度越大, 气流量越小。这是因为, 气体在流动过程中需要克服更大的摩阻, 这一实验现象为致密气藏确定井控半径提供了基础依据(图 6)。

实验 S6, S11, S12 的结果表明: 岩心长度越大, 边界压力下降越缓慢, 开采后期剩余压力越高, 外围储量动用受井控范围影响(图 7)。

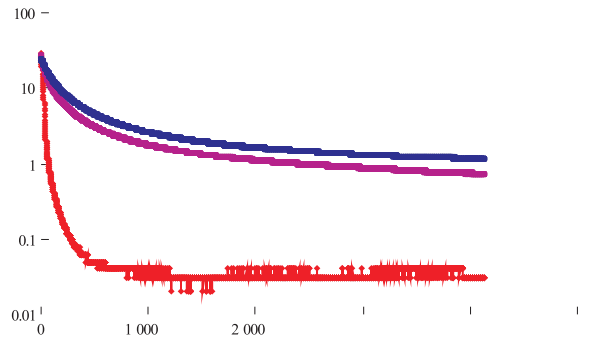


图 5 不同含水饱和度岩心定容衰竭开采实验
Fig. 5 Constant depletion physical simulation of cores with different water saturation

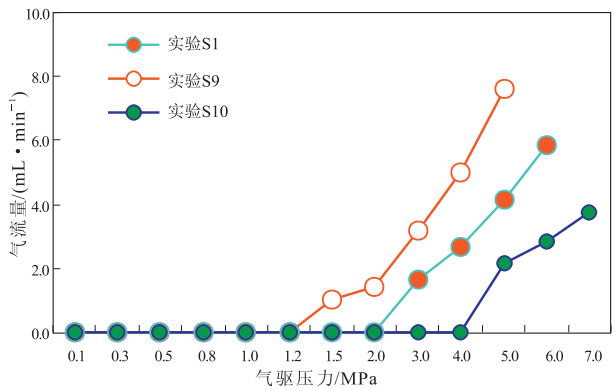


图 6 不同长度岩心气体渗流特征
Fig. 6 Gas flow experiment of cores with different length

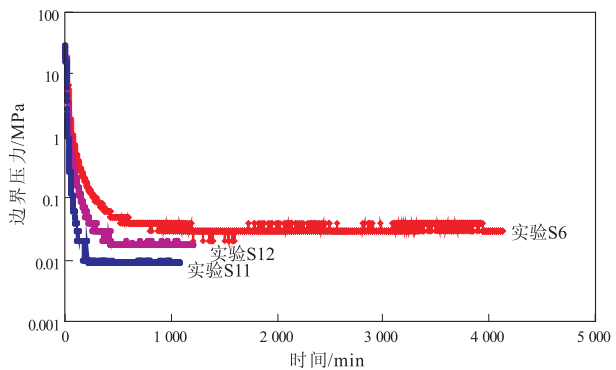


图 7 不同长度岩心定容衰竭开采实验
Fig. 7 Constant depletion physical simulation of cores with different length

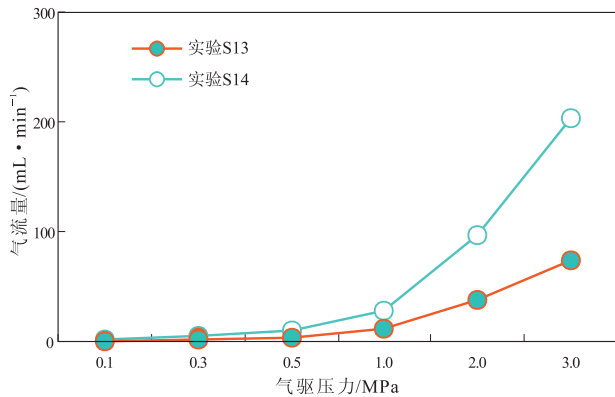


图8 不同上覆压力下岩心气体渗流特征

Fig. 8 Gas flow characteristics of cores under different overburden pressure

3.4 上覆压力

实验 S13, S14 的结果表明:上覆压力增加也会使气体流动阻力增加,上覆压力越大,在相同气驱压力下气流量越小(图 8)。

4 结论

气体在致密岩心中渗流需要克服沿程摩阻,特别是在常规空气渗透率小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩

心中,需要有较大的初始流动压差才能有效流动。

气体在致密岩心中的渗流特征受基质渗透率、含水饱和度、岩心长度、上覆压力等多种因素的影响。基质渗透率控制渗流能力,如果没有裂缝沟通,致密气藏自然产能将很低;含水饱和度对气体渗流影响很大,储层含水增加会造成产能大幅度下降;岩心长度增加摩阻,制约单井有效控制范围;上覆压力增加对岩心压实作用更强,降低气相渗流能力。

参考文献:

- [1] HOLDITCH S A. Tight gas sands[J]. JPT, 2006, 58(6): 85-90.
- [2] 国外致密砂岩气藏的勘探与开发:现状、地质特征及主要研究方向和技术[J]. 四川石油普查, 2000, 52(增刊): 2-32.
- [3] 杨建,康毅力,李前贵,等. 致密砂岩气藏微观结构及渗流特征[J]. 力学进展, 2008, 38(2): 229-236.
- [4] 朱华银,周娟,万玉金,等. 多孔介质中气水渗流的微观机理研究[J]. 石油实验地质, 2004, 26(6): 571-573.
- [5] 胡勇,朱华银,万玉金,等. 大庆火山岩孔隙结构及气水渗流特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2007, 29(5): 63-65.
- [6] 胡勇,朱华银,陈建军,等. 高、低渗“串联”气层供气机理物理模拟研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 469-472.

(编辑 韩 或)

(上接第 591 页)

- [3] 刘文汇,郑建京,妥进才,等. 塔里木盆地深层气[M]. 北京:科学出版社, 2007: 4-17.
- [4] 刘文汇,张建勇,范明,等. 叠合盆地天然气的重要来源:分散可溶有机质[J]. 石油实验地质, 2007, 29(1): 1-6.
- [5] 刘文汇,张殿伟,高波,等. 天然气来源的多种途径及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 393-401.
- [6] LEWAN M D, WINTERS J C, MCDONALD J H. Generation of oil-like pyrolyzates from organic-rich shales[J]. Science, 1979, 203(4383): 897-899.
- [7] 秦建中,刘井旺,刘宝泉,等. 加温时间、加水量对模拟实验油气产率及地化参数的影响[J]. 石油实验地质, 2002, 24(2): 152-157.
- [8] 王兆云,程克明,张柏生. 加水热模拟实验气态产物特征及演化规律研究[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(3): 36-42.
- [9] KENNEDY G C. Pressure-volume-temperature relations in water at elevated temperatures and pressures[J]. American Journal of Science, 1950, 248: 540-564.
- [10] 赵文智,邹才能,宋岩,等. 石油地质理论与方法进展[M]. 北京:石油工业出版社, 2006: 268-282.
- [11] 王兆云,赵文智,何海清. 超压与烃类生成相互作用关系及对油气运聚成藏的影响[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 12-15.
- [12] MONTHIOUX M, LANDAIS P, DURAND B. Comparison between extracts from natural and artificial maturation

series of Mahakamdelta coals[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1/3): 299-311.

- [13] BRAUN R L, BURNHAM A K. Mathematical model of oil generation, degradation and expulsion[J]. Energy Fuels, 1990, 4(1): 132-146.
- [14] MCTAVISH R A. Pressure retardation of vitrinite diagenesis, offshore northwest Europe[J]. Nature, 1978, 271(5): 648-650.
- [15] PRICE L C. Thermal stability of hydrocarbons in nature: limits, evidence, characteristics, and possible controls[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57(17): 3261-3280.
- [16] LEWAN M D. Laboratory simulation of petroleum formation: hydrous pyrolysis[G]// ENGEL M H, MACKO S A, eds. Organic geochemistry. New York: Plenum Press, 1993: 419-442.
- [17] 赵国欣. 烃源岩层中异常高压研究:以渤海湾盆地东营凹陷古近系为例[J]. 石油实验地质, 2008, 30(4): 340-344.
- [18] 张守春,张林晔,查明,等. 压力抑制条件下生烃定量模拟实验研究:以渤海湾盆地济阳凹陷为例[J]. 石油实验地质, 2008, 30(5): 522-526.
- [19] 程本合. 超压盆地热演化及其对油气勘探潜力的影响:以南海北部陆缘盆地为例[J]. 石油实验地质, 2009, 31(1): 36-39.
- [20] 郝芳,邹华耀,方勇,等. 超压环境有机质热演化和生烃作用机理[J]. 石油学报, 2006, 27(5): 9-18.

(编辑 韩 或)