

基于启动压力梯度的亲水低渗透储层 物性下限确定方法

——以蜀南河包场地区须家河组气藏为例

蒋裕强¹, 高 阳², 徐厚伟¹, 罗明生¹, 杨长城³, 程方敏⁴

(1. 西南石油大学 资源与环境学院, 四川 成都 610500; 2. 中国石油大学(华东) 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061;

3. 中国石油西南油气田分公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610051;

4. 中国石油西南油气田分公司 重庆气矿地质研究所, 重庆 400021)

摘要:储层物性下限研究是客观合理认识气藏的基础, 常规的研究方法在亲水低孔低渗透储层物性下限的研究中具有较大的局限性。为准确界定该类储层的物性下限, 以气体低速渗流机理为指导, 以气体低速渗流实验为基础, 研究了气体在亲水低孔低渗透储层中的渗流规律, 并建立了应用启动压力梯度确定该类储层物性下限的方法, 即利用气体低速渗流实验查清研究区储层气体的渗流规律, 建立孔隙度、渗透率与启动压力梯度的关系, 界定启动压力梯度的临界点, 进而确定储层的物性下限。应用该方法对蜀南河包场地区须家河组气藏亲水低孔低渗透储层物性下限进行研究, 确定了河包场地区渗透率下限为 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 须二段、须四段、须六段有效储层孔隙度下限分别为 8.61%、4.67%、5.21%。

关键词:低速渗流; 启动压力梯度; 低渗透储层; 物性下限; 须家河组

中图分类号: TE112.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2010)05-0057-04

有效储层是指储集了烃类流体并可采出的储层, 合理界定有效储层物性下限是客观认识气藏的基础。目前常用的储层物性下限研究方法有生产测试法、经验统计法、含油产状法、泥质含量法、钻井液侵入法、最小流动孔喉半径法、孔隙度—渗透率交会法等^[1-4], 这些方法在具体应用中都有限制条件。中外学者在确定有效储层物性下限时多采用综合分析方法, 用其中的一种或者几种来综合判断。由于缺少确切的定量方法, 储层物性下限往往具有统计学特征, 给气藏评价和有效储量评估带来了不确定性, 准确界定有效储层物性下限是油气田开发工作者努力的方向。

含水状态下气体低速渗流实验能反映低速条件下气体在含水岩石中的渗流情况, 间接模拟了地层条件下气体在岩石中的渗流, 反映了气体在亲水岩石中的渗流规律^[5-14], 能够应用于亲水储层有效性评价。笔者应用气体低速渗流实验, 对河包场地区须家河组亲水低渗透储层气体渗流规律进行研究, 结合研究区储层的物性特征, 建立了利用低速渗流

启动压力梯度确定亲水低渗透储层物性下限的方法。

1 含水状态下低渗透储层气体低速渗流机理

周克明等^[14]在残余水状态下对亲水的低渗透储层气体低速渗流机理作了大量研究, 结果表明, 与不含水状态下的气体低速渗流实验相比, 岩样中残余水的存在使渗流曲线的非线性特征更加明显, 非线性渗流段延长, 渗流曲线直线段的延长线在流速轴上的截距增大, 渗流曲线位置降低, 且靠近压力平方梯度轴。

笔者对河包场地区须家河组低渗透储层进行含水条件下的低速渗流实验, 建立了研究区典型的低渗透储层非达西渗流模型。研究发现, 该类储层中气体的低速渗流具有明显的非达西渗流特征, 实验所得流速—压力平方梯度曲线和克氏回归曲线均可分为3阶段(图1)。

收稿日期: 2010-07-05; 改回日期: 2010-08-18。

作者简介: 蒋裕强, 男, 副教授, 从事天然气地质及储层研究工作。联系电话: 13981828815, E-mail: swap124@163.com。

基金项目: 国家重大专项“大型油气田及煤层气开发”子课题(2008ZX5001)

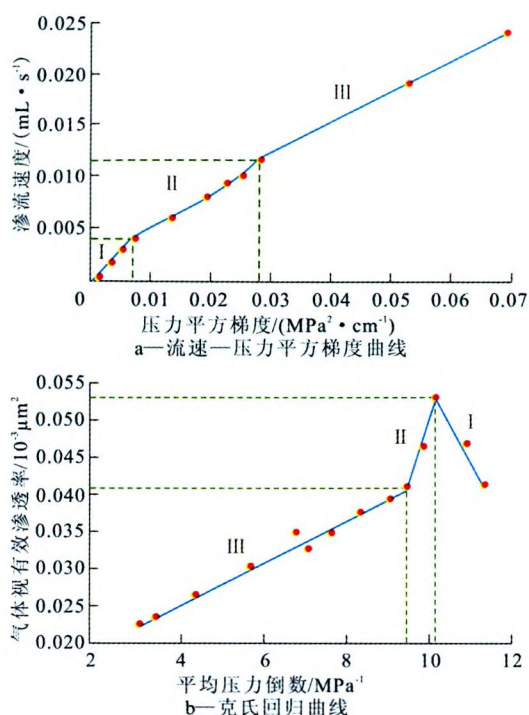


图1 包36井低渗透储层非达西渗流曲线

低速上凹型渗流 (I) 该阶段毛管压力占主导地位,毛细管阻力对气体低速渗流有较大的影响。在对应的克氏回归曲线上表征为:当实验压力小于临界压力时,气体视有效渗透率随压力增大而迅速增大。

低速下凹型渗流 (II) 随着压力的升高,毛管压力的作用逐渐减弱,气体滑脱效应逐渐增强,并占据主导地位,该阶段随压力增大,渗流速度增大,但增大幅度减小。克氏回归曲线上表征为:实验压力高于临界压力时,随压力增大气体视有效渗透率迅速减小。

较高速拟线性渗流 (III) 随着压力升高,气体滑脱效应趋于平稳,总体上表现为拟线性渗流特征。克氏回归曲线表现为:随着压力增大,视有效渗透率减小趋势减缓,并最终稳定。

2 确定储层物性下限的方法

在低速条件下,气体在亲水岩石中的渗流存在启动压力梯度,与之相对应的存在一个临界压力,低于该临界压力时毛管压力是气体渗流的主控因素;高于该临界压力时,气体滑脱作用是控制渗流的主要因素^[14-15]。研究发现,该临界压力与储层的孔隙度、喉道特征、含水饱和度等因素有关,对储层孔隙结构变化尤为敏感,能较好地反映储层气体的渗流

能力,可以作为衡量储层物性下限的指标。临界压力越低,孔隙结构越好,对应的储层渗流能力越强。

以上述理论为基础,笔者建立了应用启动压力梯度确定亲水低孔低渗透储层物性下限的方法,首先采用气体低速渗流实验方法查清研究区储层气体渗流规律,分别建立了孔隙度和渗透率与启动压力梯度的关系模型,界定启动压力梯度的临界点,最终确定储层的物性下限。

气体低速渗流实验 根据研究区具体的含水饱和度和度选择样品进行稳态的气体低速渗流实验,实验装置与气体渗透率测定装置类似。为保证实验测定数据的准确性,确保实验中气体在岩样内单相流动,实验应严格控制压差和含水饱和度的变化,根据岩样渗透性不同,采用尽可能低的实验压差,在实验前后对岩样称重,控制其含水饱和度变化不超过3%。

建立孔隙度、渗透率与启动压力梯度的关系模型 对于气体低速渗流实验得到的启动压力梯度与孔隙度、渗透率进行回归分析,采用统计学方法建立气体低速渗流实验中涉及样品的孔隙度、渗透率与启动压力梯度关系图版,从而得到随着孔隙度、渗透率变化启动压力梯度的变化情况,进而得出临界点对应的渗透率,即所要研究的渗透率下限。

建立孔隙度—渗透率模型估算孔隙度下限 由于孔隙度不是岩石渗流能力的直接相关参数,孔隙度与启动压力梯度的相关性可能会很差,因此,建议使用孔隙度—渗透率模型,根据求得的渗透率参数推算孔隙度下限。

3 应用实例

蜀南河包场地区须家河组气藏是典型的低孔低渗透储层,孔隙度直方图呈现单峰态,孔隙度主峰为6%~8%;渗透率主峰为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,个别样品由于裂缝渗透率可达 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图2),孔隙以残余粒间孔为主,次生溶蚀孔为辅(粒间、粒内溶孔),喉道多为片状、弯片状,孔喉匹配差。另外,该气藏储层岩石明显亲水,属于亲水低孔低渗透储层。采用常规方法不易准确判断其物性下限,因此笔者采用启动压力梯度法确定研究区的有效储层物性下限。

河包场地区须家河组40余块亲水岩样的低速渗流实验表明,气体渗流具有非达西渗流特征,存在明显的启动压力梯度和临界压力。以包46井1 847.71~1 847.9m井段为例,其流速—压力平方

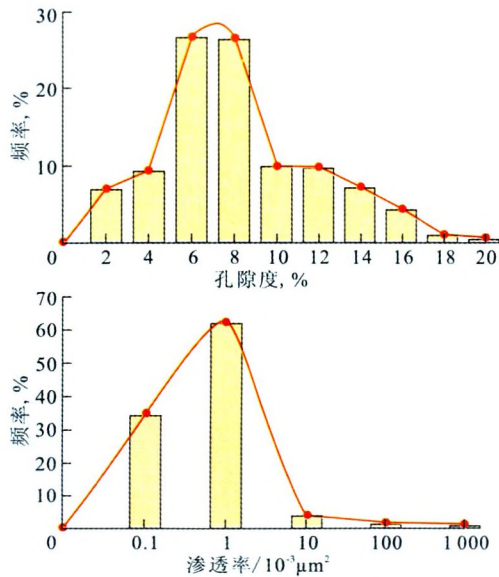


图 2 河包场地区须家河组孔隙度和渗透率频率分布

梯度曲线以及克氏曲线均分为 3 阶段(图 3),表明其具有明显的启动压力梯度。Ⅰ阶段气相低速渗流主要受毛细管阻力的影响,气体视有效渗透率随着净压力增大而增大;Ⅱ阶段,当驱替压力大于临界压力时,气相低速渗流主要受气体分子滑脱效应的影响,气体视有效渗透率随净压力增大而减小。Ⅲ阶段,当驱替压力继续增大时,气体视有效渗透率随着净压力增大而增大。研究表明,出现这种渗流现象是因为较高的渗流速度引起含水饱和度重新分布,气相渗流克服水膜阻力和水锁效应的结果。

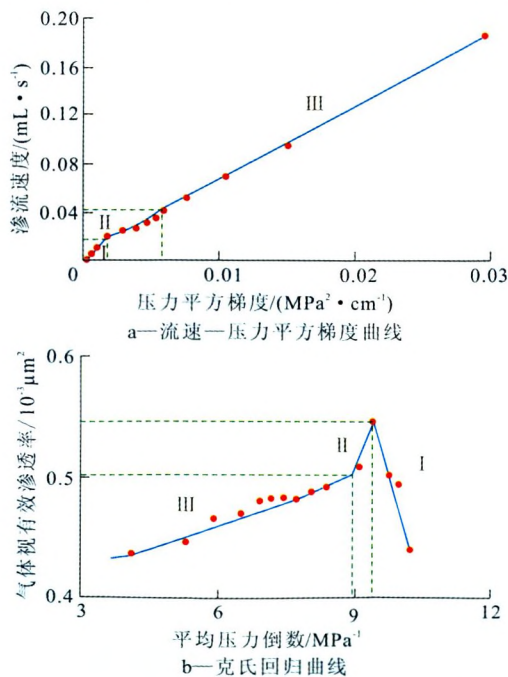


图 3 包 46 井 1 847.71 ~ 1 847.9m 井段气体低速渗流实验

分别建立了启动压力梯度与渗透率和孔隙度的关系图版(图 4),发现孔隙度与启动压力梯度相关性较差,而渗透率与启动压力梯度相关性较好,且随渗透率变化,启动压力梯度变化存在拐点,当渗透率小于该拐点渗透率时,随着渗透率的减小,启动压力梯度急剧增大;当渗透率大于该值时,启动压力梯度变化趋于平缓,该拐点反映了储层物性变化对于气体渗流能力的影响,求取该拐点值即能得到储层物性下限。

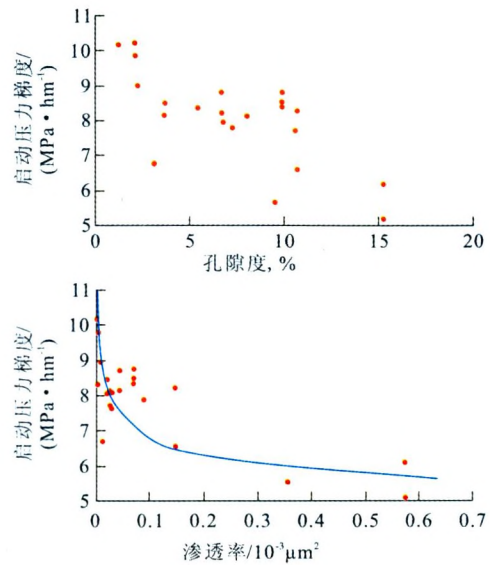


图 4 河包场地区孔隙度、渗透率与启动压力梯度的关系

应用曲线参数估计法,采用线性模型、对数模型、生长曲线模型、逻辑曲线模型等^[10]对启动压力梯度与渗透率进行回归分析(图 5)。由图 5 可知,

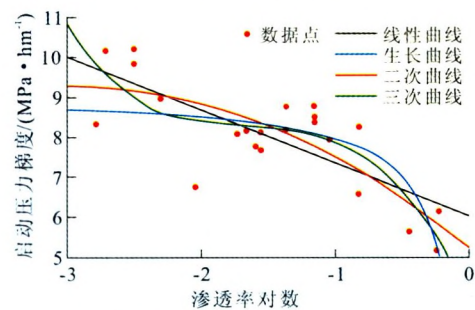


图 5 河包场地区渗透率对数与启动压力梯度的关系

三次曲线模型回归效果最好,相关系数达 0.821,其关系式为

$$G = 3.909 - 1.12 \lg K^3 - 4.365 \lg K^2 - 7.433 \lg K \quad (1)$$

式中: G 为启动压力梯度, MPa/hm; K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

对式(1)进行求导可得到较为精确的渗透率拐

点值,经二次导数计算得出三次曲线拐点对应渗透率为 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

由于孔隙度与启动压力梯度之间相关性差,笔者通过对研究区物性资料的分析,分段建立了孔隙度—渗透率回归曲线,并应用回归分析方法分别建立了须二段、须四段、须六段的孔渗关系

$$\lg K_{\text{二}} = -1.704 + 0.047\phi_{\text{二}} \quad (2)$$

$$\lg K_{\text{四}} = -1.659 + 0.077\phi_{\text{四}} \quad (3)$$

$$\lg K_{\text{六}} = -2.536 + 0.748\ln \phi_{\text{六}} \quad (4)$$

式中: $K_{\text{二}}, K_{\text{四}}, K_{\text{六}}$ 分别为须二段、须四段、须六段的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; $\phi_{\text{二}}, \phi_{\text{四}}, \phi_{\text{六}}$ 分别为须二段、须四段、须六段的孔隙度, %。

运用式(2)~(4)可计算出研究区渗透率下限为 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,须二段、须四段和须六段对应的孔隙度下限分别为 8.61%、4.67% 和 5.21%。

利用气体低速渗流的启动压力梯度确定储层物性下限是一种全新方法,为了验证其准确性,笔者在实际工作中应用最小流动半径、束缚水膜法、孔渗交会法对研究区有效储层物性下限进行研究,并与该方法确定的储层物性下限相比较,发现结果吻合性好。利用该方法可以准确地确定亲水低孔低渗透气藏有效储层的物性下限,对气藏评价、气藏储量评价具有一定的参考价值。

4 结论

以气体在亲水低孔低渗透岩石中低速渗流机理为指导,在残余水状态下的气体低速渗流实验的基础上,经研究认为,气体在含水低渗透岩石中渗流具有启动压力梯度,并根据启动压力梯度与岩石渗流能力之间的关系建立了采用启动压力梯度法评价亲水低渗透有效储层物性下限的方法。

应用启动压力梯度法评价亲水低渗透有效储层物性下限的方法对蜀南河包场地区须家河组气藏有效储层下限进行了研究,得到须二段、须四段、须六

段储层的渗透率下限为 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度下限分别为 8.61%、4.67% 和 5.21%。

参考文献:

- [1] 肖思和,周文,王允诚,等.天然气有效储层下限研究方法[J].成都理工大学学报:自然科学版,2004,31(6):672-674.
- [2] 高阳,蒋裕强,缪源,等.河包场地区上三叠统须家河组储层下限研究[J].西部探矿工程,2008,(12):95-97.
- [3] 段新国,王洪辉,胡永章,等.储层参数下限确定方法——以河南安棚油田为例[J].成都理工大学学报:自然科学版,2003,30(2):169-173.
- [4] 魏小薇,谢继容,唐大海,等.低孔渗砂岩储层基质物性下限确定方法研究——以川中 LA 构造沙一段油藏为例[J].天然气工业,2005,25(增刊):28-31.
- [5] 牟学益,刘永祥.低渗透油田启动压力梯度研究[J].油气地质与采收率,2001,8(5):58-59.
- [6] 葛家理.现代油藏渗流力学原理[M].北京:石油工业出版社,2001:29-31.
- [7] 王厉强,李彦,杜洪荣,等.启动压力梯度变化下低渗透油藏 IPR 影响因素的探讨——对《低速非达西渗流产能方程的建立》一文的商榷[J].油气地质与采收率,2007,14(2):78-80.
- [8] 王渝明,庞颜民,杨树锋,等.基于启动压力梯度的低渗透砂岩储层分类研究[J].高校地质学报,2005,11(4):617-621.
- [9] 贾振岐,王延峰.低渗低速下非达西渗流特征及影响因素[J].大庆石油学院学报,2001,25(3):617-621.
- [10] 李凡华,刘慈群.含启动压力梯度的段塞流的压力动态分析[J].试采技术,1997,18(3):16-21.
- [11] 李浩,赵鹏大,刘柏林.拟启动压力对低渗透单相流体及油水两相渗流的影响——以沙埕油田沙 7 断块为例[J].油气地质与采收率,2008,15(1):84-86.
- [12] 邓英尔,刘慈群.具有启动压力梯度的油水两相渗流理论与开发指标计算方法[J].石油勘探与开发,1998,25(6):36-39.
- [13] 吴凡,孙黎娟,乔国安.气体渗流特征及启动压力规律的研究[J].天然气工业,2001,21(1):82-84.
- [14] 周克明,李宁,袁小玲.残余水状态下低渗储层气体低速渗流机理[J].天然气工业,2003,23(6):103-106.
- [15] 李允,陈军,张烈辉.一个新的低渗气藏开发数值模拟模型[J].天然气工业,2004,24(8):65-68.

编辑 武云云

《油气地质与采收率》2010年第6期要目

李斌等 打破传统 转变观念 提高原油采收率的整体设计
刘玉瑞 苏北后生断陷油藏流体分布特征与成因
李菊花等 油藏注气混相驱考虑扩散作用的数值模拟研究
石砥石等 湖相碳酸盐岩去白云石化作用及其与储集性的关系

苏朝光 沾车地区沙四段湖相碳酸盐岩沉积特征及储层物性
牟建业等 酸压裂缝导流能力影响因素分析
李 骞等 吐哈气田凝析气藏产能影响因素分析及预测
王 玮等 胜利油田埕东联合站泡沫驱采出液综合处理技术