

[引著格式] 张铭洋, 李菊花, 位云生, 等. 苏里格致密气田多层合采压裂直井产能影响因素分析 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (3+4): 38~42.

苏里格致密气田多层合采压裂直井产能影响因素分析

张铭洋 (油气资源与勘探技术教育部重点实验室 (长江大学); 长江大学石油工程学院, 湖北 武汉 430100)

李菊花 (长江大学石油工程学院, 湖北 武汉 430100)

位云生 (中国石油勘探开发研究院, 北京 海淀 100100)

[摘要] 多层合采压裂直井是苏里格致密气田提高单井产量、实现规模开发的有效技术手段。由于储层和流体物性差异, 压裂直井产量随各层产量贡献度不同而发生变化。采用考虑非达西和压敏的数值模拟方法, 以苏里格气田为例建立三层层间有窜流的典型地质模型, 分别从高、中、低渗透储层的储量分布、渗透率级差和压裂裂缝半长等方面采用单因素和多因素正交分析方法入手, 评价了多层合采压裂直井影响程度。并引入无量纲表征法, 展示各产层无量纲产量变化规律。研究结果显示: 渗透率级差不同, 各层储量动用程度差异大, 采收率差异越大; 随着储量比的增大, 差异逐渐减小; 压裂改善了渗流通道, 但裂缝改造效果有限裂缝半长对采收率影响程度不高。通过三因素五水平总计 25 组正交试验结果分析表明渗透率级差对采收率影响最大, 裂缝半长其次, 储量比影响较小。该方法对评价致密气藏多层合采压裂直井产能有积极意义。

[关键词] 致密气藏; 多层; 数值模拟; 产量贡献; 压裂直井

[中图分类号] TE375 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1000-9752 (2015) 03+04-0038-05

苏里格致密砂岩气藏属于河流相沉积, 是低孔、低渗、低丰度的非常规气藏, 平均渗透率 0.71mD, 平均孔隙度 9.6%^[1,2], 致密储层的特点和产能状况使得采用压裂直井多层合采方式可以充分发挥各层产能。由于储层和流体物性的差异, 受各产层影响的单井产能变化规律采用常规方法很难评价。

目前多层合采井产量贡献估算主要有试油、生产测井、地质分析以及油藏地球化学等多种方法^[3]。试油方法是最直接的方法, 但是耗时长, 影响生产; 生产测井是一种发展快速的技术, 但成本高; 而地质分析和油藏地球化学方法均为静态方法, 虽然成本低、耗时短, 但受油气藏条件的限制较多。学者运用物理法、气藏工程等方法多对二层合采井产气特征进行了研究^[4~13], 鲜有文献对致密气藏三层及以上合采压裂直井产能影响因素进行探讨。

笔者以苏里格致密气田为研究对象, 采用考虑压敏和非达西影响的数值模拟方法, 讨论并评价气井三层合采时各层的产量变化规律。从单因素和正交因素分析方法入手, 分析影响苏里格气田气井产能的主要因素。引入了多层合采产量贡献的无量纲处理方法, 展示了不同渗透率级差下各小层的无量纲产量变化, 并找出其变化规律, 为实现苏里格气田有效开发提供依据。

1 考虑压敏效应和非达西效应的数值模拟方法

苏里格气田储集层具有中-强压敏特征, 一旦地层压力下降到一定阶段后引起塑性变形, 使储集层渗透率损失 20%~40%。同时压裂直井在近井地带为非达西流动, 非达西流的存在影响压裂气井流动过程中压力降和生产动态。笔者采用 CMG 数值模拟器中的 IMEX 模块, 模型中考虑了受压敏影响的压裂井裂缝处的非达西流效应。

1.1 储层应力敏感性设置

统计苏里格气田压敏试验资料, 建立有效应力与渗透率、有效应力与孔隙度的关系式, 通过设置模

[收稿日期] 2014-10-13

[基金项目] 中国石油天然气股份有限公司重大科技项目 (2014B-1509)。

[作者简介] 张铭洋 (1991-), 女, 硕士生, 现主要从事油气田开发工程研究; 通信作者: 李菊花, lucyli7509@163.com。

块中储层传导率修正系数, 模拟储层压敏效应对气井产量的影响, 结果如图 1 (a) 所示。从图 1 (a) 中可以看出, 当考虑压敏效应影响时, 气井产量降低幅度增大, 这与苏里格气田实际生产状况接近。同时, 利用这种模拟方法可以将压裂井的压裂有效期表征出来。

1.2 非达西系数的确定

苏里格气田压裂直井采用水力加砂压裂技术, 裂缝半长在 60~140m 之间, 近井地带的压力降使得气体在裂缝处表现为高速非达西流。在 CMG 数值模拟器中有 4 种确定非达西系数的经验公式法。通过选用 4 种不同的方法比较发现, 压裂直井裂缝处的非达西系数主要受 α 值影响, 不同压裂支撑剂的 α 值差异较大, 根据苏里格气田压裂改造工艺技术选用第 1 种 Geertsma 相关式模拟非达西流动对生产指标的影响, 如图 1 (b) 所示。

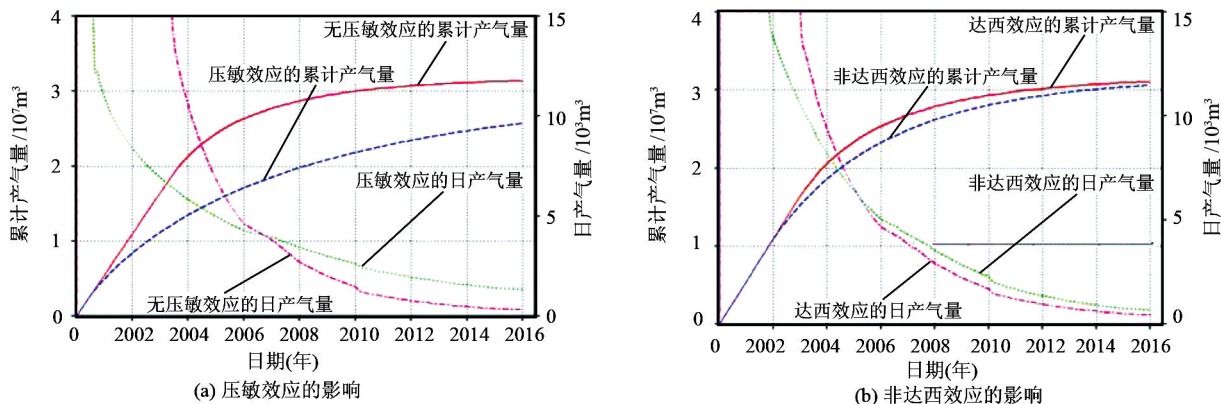


图 1 模拟压敏和非达西效应对压裂气井生产指标的影响

1.3 地质模型及网格划分

采用笛卡尔坐标系统建立三维地质模型, 为反映高、中、低渗透层的三层模型网格划分为 $51 \times 51 \times 3$, 选取苏里格气田真实储层平均渗透率 1mD 作为基础渗透率, 各向异性为垂直与水平渗透率之比为 0.3。模型中孔隙度为 0.10, 每层平均有效厚度为 8m, 井间距为 1000m, 单井控制地质储量为 $3.54 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。压裂井裂缝处采用 $17 \times 17 \times 5$ 局部加密方法。

2 多层合采压裂直井产量影响因素分析

2.1 渗透率级差对采收率的影响

该次模拟建立的三层考虑层间窜流的地质模型, 其中定高渗层 1mD 为基准, 低渗层的渗透率选取级差分别为 1、5、10、20 和 100 来计算, 中间层取高、低渗层渗透率的平均值。3 个储层的有效厚度均为 8m, 储量比为 1。

模拟了不同渗透率级差对生产指标的影响, 结果如图 2 所示。图 2 (a) 显示渗透率级差为 1 时, 各层的采收率均相等; 随着渗透率级差增大, 高渗层采收率变化不大, 而低渗层的采收率越来越低。当渗透率级差由 1 增加到 100 时, 低渗层采收率由 79.60% 下降到 4.75%, 降幅达 94.03%; 三层合采的总采收率也由 79.36% 降低到 48.26%, 降幅达 39.19%。究其原因, 与合采井各层的储量动用程度有关。图 2 (b) 显示, 由于渗透率级差不同, 每个层的储量动用程度差异较大。当渗透率级差由 1 增加到 100 时, 低渗层储量动用程度由 100% 下降到 57.62%, 降幅达 42.38%; 三层合采的总动用储量降低到 90%。

2.2 储量分布对采收率的影响

多层合采井不仅与储层渗透率有关, 也与各储层地质储量有关。储量分布对采收率的影响, 主要以高渗层与低渗层储量之比为模拟变量, 分别选取储量比为 0.1、0.2、0.5、0.8、1.0, 模拟合采气井采收率变化。

模拟了不同储量比对采收率的影响, 结果如图 3 所示。随着高渗层储量比例的增大, 合采压裂气井采收率增大。以渗透率级差 5 为例, 当高渗层与低渗层储量比由 0.1 增加到 1 时, 合采气井采收率由

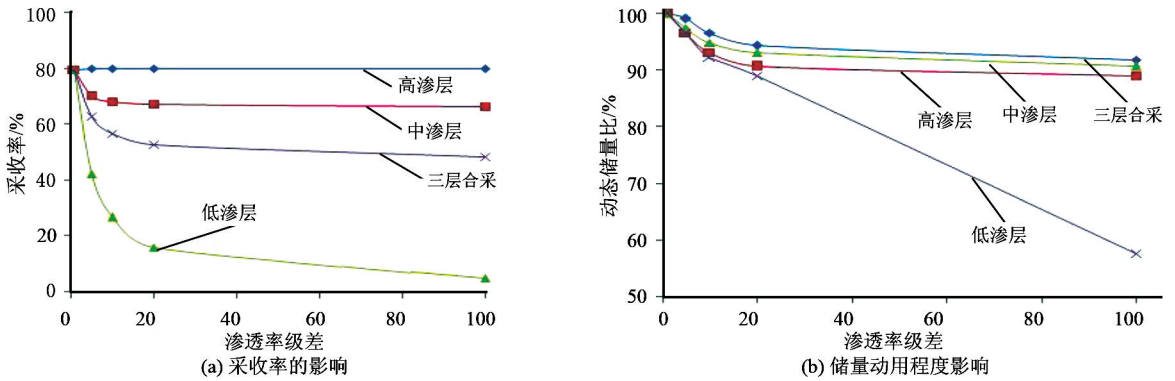


图2 高/低渗层渗透率级差对合采气井生产指标的影响

57.12% 增加到 63.82%，采收率增幅达 11.73%；而当渗透率级差为 100 时，高渗层与低渗层储量比由 0.1 增加到 1 时，合采气井采收率由 37.55% 增加到 50.09%，采收率增幅达 33.40%。表明合采气井产量贡献主要取决于高渗层储量的动用程度。

2.3 裂缝半长对采收率的影响

模拟了合采压裂直井不同裂缝半长对采收率的影响，结果如图 4 所示。选取裂缝半长分别为 60、80、100、120、140m，模拟采收率变化。随着裂缝半长的增加，合采压裂直井采收率增大，裂缝半长由 60m 增加到 140m，采收率增加 5.29%。究其原因是通过压裂改善渗流通道，裂缝半长的增加有利于储量的动用。但压裂改造效果有限，裂缝半长的增加对采收率影响不大。

2.4 多因素对采收率的影响分析

基于上述单因素分析，以渗透率级差、储量比、裂缝半长为主因素，设置 5 个参数水平，采用正交设计方法设计了 25 组模拟方案，方案详细列表及模拟结果分析如表 1、2 所示。

正交试验模拟结果分析表明，3 个主因素中对采收率影响程度由强到弱的顺序依次为：渗透率级差、裂缝半长、储量比。

2.5 多层产量贡献度讨论

将多层合采井模拟出的产量进行无量纲化处理^[14]，展示各产层无量纲变化规律。具体处理过程如下：

无量纲时间：

$$t_d = \frac{\bar{C}_l}{\bar{C}_s} \frac{t}{\mu C_t r_w^2} \tag{1}$$

无量纲产量：

$$q_d = \frac{q_i}{q_t} \tag{2}$$

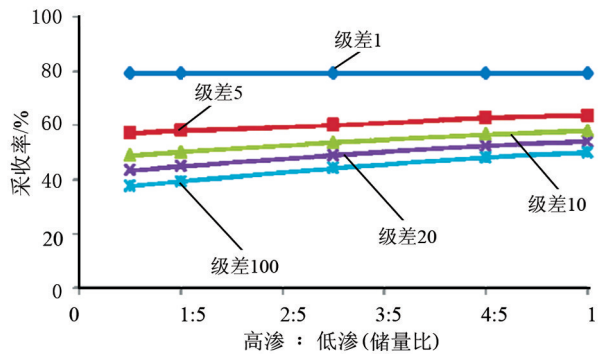


图3 高、低渗层储量比对合采气井生产指标的影响

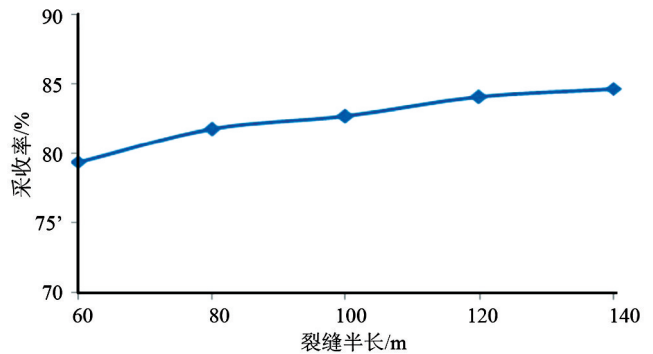


图4 裂缝半长对合采直井采收率的影响

式中： $\bar{C}_i = \sum_{j=1}^n k_j h_j$ 为平均地层系数， $mD \cdot m$ ； $\bar{C}_s = \sum_{j=1}^n \phi_j \cdot h_j$ 为平均储容系数， m ； k_j 为第 j 层的渗透率， mD ； ϕ_j 为第 j 层的孔隙度，小数； h_j 为第 j 层的有效厚度， m ； μ 为流体黏度， $MPa \cdot s$ ； r_w 为井筒半径， m ； C_i 为综合压缩系数， $1/MPa$ ； q_i 、 q_t 分别为 i 层和合采气井总日产气量， $10^4 m^3$ 。

表 1 正交设计试验及模拟结果分析表

试验方案	渗透率级差/1	储量比/1	裂缝半长/m	试验结果	试验方案	渗透率级差/1	储量比/1	裂缝半长/m	试验结果
1	1	1	60	0.7936	14	10	0.2	60	0.5022
2	1	0.8	80	0.8176	15	10	0.1	80	0.5279
3	1	0.5	100	0.8267	16	20	1	120	0.6087
4	1	0.2	120	0.8406	17	20	0.8	140	0.6051
5	1	0.1	140	0.8463	18	20	0.5	60	0.4905
6	5	1	80	0.6752	19	20	0.2	80	0.4830
7	5	0.8	100	0.6828	20	20	0.1	100	0.4834
8	5	0.5	120	0.6915	21	100	1	140	0.5646
9	5	0.2	140	0.6849	22	100	0.8	60	0.4826
10	5	0.1	60	0.5712	23	100	0.5	80	0.4685
11	10	1	100	0.6305	24	100	0.2	100	0.4328
12	10	0.8	120	0.6433	25	100	0.1	120	0.4340
13	10	0.5	140	0.6304					

将数值模拟的结果进行无量纲化处理得到各层无量纲产量变化规律，如图 5 所示。结果显示，随着生产的进行，高渗层、中渗层无量纲产量均有缓慢增加然后降低的过程，低渗层无量纲产量先缓慢降低后增加。定渗透率级差下，储量比由 0.1 增加到 1，高渗层无量纲产量增加了 40%，低渗层无量纲产量降低了 10%。储量比为 0.1 时，高渗层无量纲产量低且变化不大，随后有降低，这是因为高渗层渗流能力强，初期开采产量多，随着生产的进行，高渗层厚度小、储量低，产量递减快；并且由于窜流作用的影响，中渗层无量纲产量达到很高。各层无量纲产量变化均存在一个突变点，该突变点后无量纲产量变化情况相反，是由于压力波传递到地层边界所致。

表 2 正交设计试验结果

参数	渗透率级差/1	储量比/1	裂缝半长/m
均值 1	0.825	0.655	0.568
均值 2	0.661	0.646	0.594
均值 3	0.587	0.622	0.611
均值 4	0.534	0.589	0.644
均值 5	0.476	0.573	0.666
极差	0.349	0.082	0.098

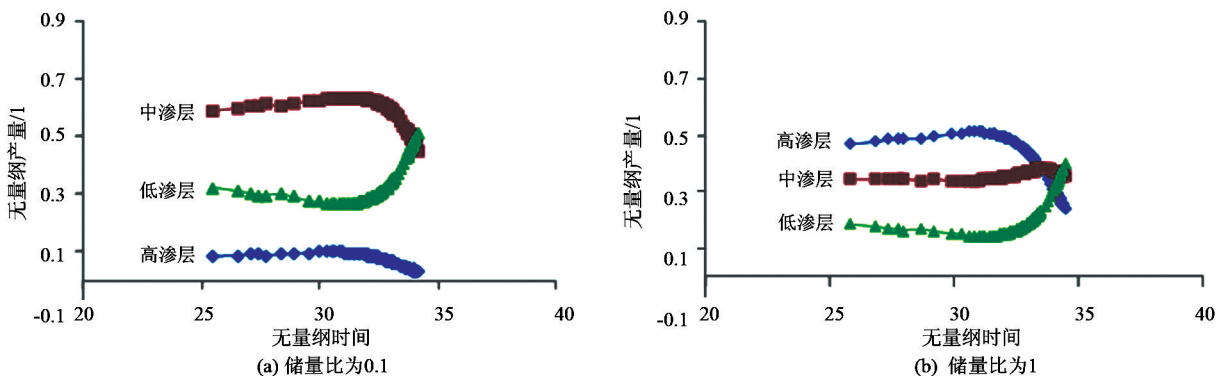


图 5 不同储量比下各产层无量纲产量变化图（渗透率级差为 5）

储量比、渗透率级差均为 1 时，各层产量贡献均为 33% 左右。根据无量纲化处理得到的结果，得出各层产量贡献率的规律，结果如图 6 所示。同一储量比下，高、中渗层产量贡献率随渗透率级差增大而增大，低渗层随渗透率级差增大而减小。同一渗透率级差下，中、低渗层产量贡献率随储量比的增大而减小，高渗层随储量比的增大而增大。储量比为 0.1 时，产量贡献主要来源于中渗层，渗透率级差由 1 增加到 100，中渗层产量贡献率由 47% 增加到 78%，产量贡献增幅达 31%。而高渗层产量贡献增幅 8%，低渗

层产量贡献由 47.49%降低到 8.41%。究其原因，是由于气体在流动过程中的窜流现象引起的。

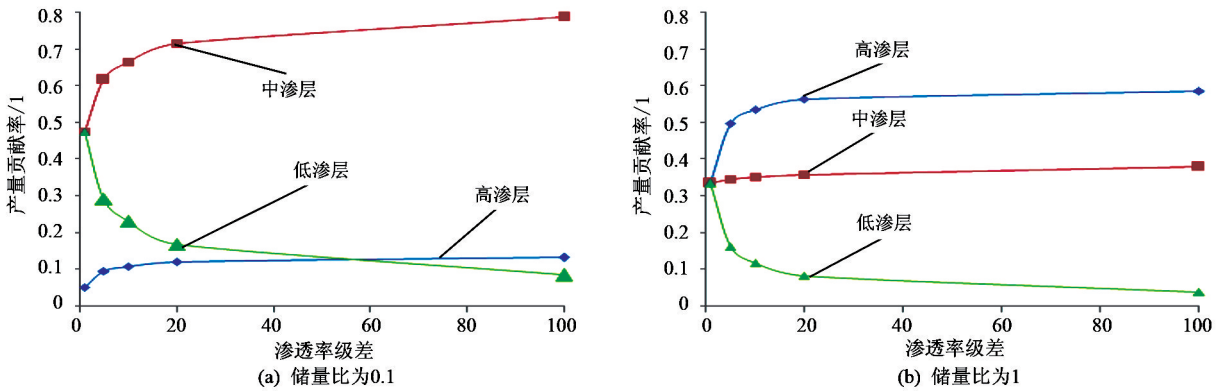


图 6 不同渗透率级差下各层产量贡献率

3 结论

1) 采用考虑压敏和非达西效应的数值模拟方法，模拟了致密气藏中渗透率级差、储量分布和裂缝半长对多层合采压裂直井产能的影响，结果表明，随着渗透率级差的增大，高渗层采收率变化不大，而低渗层的采收率越来越差，究其原因，与合采井各层的储量动用程度有关。

2) 随着高渗层储量比例的增大，合采压裂气井采收率增大，其原因是与高渗层储量动用程度有关；随着裂缝半长的增加，合采压裂直井采收率增大，其原因是由于通过压裂改善渗流通道，裂缝半长的增加有利于储量的动用。多因素正交模拟结果表明，3个因素中对采收率影响程度由强到弱的顺序依次为：渗透率级差、裂缝半长、储量比。

3) 通过无量纲处理方法展示了各层产量无量纲变化规律，随着生产的进行，高渗层、中渗层无量纲产量均有缓慢增加后降低的过程，低渗层无量纲产量先缓慢降低后增加。

[参考文献]

[1] 崔琳. 苏里格气田西南部盒8段储层特征研究 [J]. 长江大学学报 (自科版), 2014, 11 (8): 12~15.

[2] 余书漫, 陈启文, 张春雨, 等. 苏里格气田某区块低渗砂岩气藏水平井压裂效果评价 [J]. 长江大学学报 (自科版), 2014, 11 (31): 151~153.

[3] 尹太举, 白全明. 合采井产量贡献估算 [J]. 新疆石油天然气, 2005, 1 (3): 47~50.

[4] Banbi E, Ahmed H, Robert A. Analysis of commingled tight gas reservoirs [J]. SPE 36736, 1996.

[5] Sun H D, Wan Y J, Zhong S M, et al. Discussion on dynamic reserves estimation of multilayer gas reservoir with material balance method [A]. CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference [C]. Alberta, Canada; 2008.

[6] 熊燕莉, 冯曦, 杨雅和, 等. 多层合采气井动态特征及开发效果分析 [J]. 天然气勘探与开发, 2005, 28 (1): 21~24.

[7] 钟兵, 杨雅和, 夏崇双, 等. 砂岩多层气藏多层合采合理配产方法研究 [J]. 天然气工业, 2005, 25 (S0): 104~106.

[8] William M C, Ramey H J, Frank G M. Well-test analysis for wells producing commingled zones [J]. SPE3014, 1972.

[9] Shah P C, Spath J B. Transient wellbore pressure and flow rates in a commingled system with different layer pressures [J]. SPE25423, 1993.

[10] Prabowo H S, Rinadi M. A production allocation method for commingled gas completions [J]. SPE29913, 1995.

[11] Ahmed H, Robert A, Watten B. Analysis of commingled tight gas reservoirs [J]. SPE 36736, 1996.

[12] Fernando J F. Commingled production wells; experiences in Lake Maracaibo, Venezuela [J]. SPE49311, 1998.

[13] Spivey J P. Production data analysis for commingled multilayer gas reservoirs-graphical aides for flow regime identification and history matching [J]. SPE106305, 2007.

[14] 游媛, 段永刚, 方全堂, 等. 油藏多层合采动态特征分析 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2013, 35 (1): 121~125.