

东海低孔低渗气田气井压裂投产后“一点法”产能方程

梁斌¹, 谭先红¹, 焦松杰¹, 彭世强¹, 张利军¹, 段永刚²

1. 中海石油(中国)有限公司北京研究中心 北京 100028

2. 西南石油大学石油与天然气工程学院 四川成都 610500

通讯作者: Email: liangbin2@cnooc.com.cn

项目支持: 中海石油(中国)有限公司综合科研项目“临兴-神府致密气压裂裂缝形态研究”(FLSFWSYJ-15-168)

引用: 梁斌, 谭先红, 焦松杰, 等. 东海低孔低渗气田气井压裂投产后“一点法”产能方程[J]. 油气井测试, 2018, 27(2): 73-78.

Cite: LIANG Bin, TAN Xianhong, JIAO Songjie *et al.* “Single-point” productivity equation for fractured gas wells in low-porosity and low-permeability reservoirs, East China Sea [J]. Well Testing, 2018, 27(2): 73-78.

摘要 东海西湖凹陷气田为典型的低孔、低渗砂岩气田, 通常需实施压裂增产措施。由于海上低渗气井压裂测试难度大、测试费用高, 致使气井压裂测试资料有限, 快速评价单井产能难度大。针对东海不同低渗区块实施压裂测试的探井或生产井资料, 回归得到了不同区块气井的二项式产能方程, 获得了区块的值范围和平均值, 推导出了适合于东海不同低渗区块气井压裂投产后的“一点法”产能方程。实例分析表明, 采用推导的“一点法”产能方程, 可以只由一个稳定产量点及流压计算无阻流量, 且其计算的气井无阻流量与二项式产能方程和陈元千 α 公式计算的无阻流量非常吻合, 表明了本文“一点法”产能方程的有效性。

关键词 天然气; 西湖凹陷; 低孔低渗气田; 压裂; 测试; “一点法”产能方程

中图分类号: TE353

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.02.012

“Single-point” productivity equation for fractured gas wells in low-porosity and low-permeability reservoirs, East China Sea

LIANG Bin¹, TAN Xianhong¹, JIAO Songjie¹, PENG Shiqiang¹, ZHANG Lijun¹, DUAN Yonggang²

1. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China

2. College of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

Abstract: The typical low-porosity and low-permeability sandstone gas reservoirs in the Xihu Sag, East China Sea, are usually treated with fracturing simulation to enhance the recovery. However, due to the difficulty and high cost of fracturing test in offshore gas wells in low-permeability reservoirs, the fracturing test data are limited, so it is difficult to quickly evaluate the productivity of single well. In this paper, according to the fracturing test data of exploration wells or production wells in different low-permeability blocks in East China Sea, the binomial productivity equations of gas wells in these blocks are obtained by regression. Then, the numerical range and average value of the “one-point” regression coefficients of the blocks are determined and finally a “single-point” productivity equation suitable for gas wells in these low-permeability blocks is deduced. The case study shows that, by using the “one-point” productivity equation, the open flow capacity can be calculated from only one stable production point and flow pressure. The calculated results are consistent with the results from the binomial productivity equation and the Chen Yuanqian formula. This proves the validity of the “single-point” productivity equation.

Keywords: natural gas; Xihu Sag; low-porosity and low-permeability reservoirs; fracturing; testing; “single-point” productivity equation

东海西湖凹陷气田为典型的低渗、薄层、高含水饱和度气田^[1]。气藏埋深3 000~4 000 m, 其主要含气层段为渐新统花港组和始新统平湖组^[2], 其中

花港组主要为三角洲平原河道砂体和前缘水下分流河道砂体, 平湖组储集层主要为三角洲水下分流河道砂体、河口坝以及潮道砂体; 压力系数约1.2~

1.3; 储层岩性以中砂岩为主, 其次为细砂岩和粉砂岩; 平均孔隙度约 10.5%~11.2%; 平均渗透率以小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为主; 纵向上小层多, 隔夹层发育, 小层厚度主要小于 5 m; 气体中以甲烷为主。

东海西湖凹陷气田气井测试中存在着如下难点: 由于渗透率低, 采用回压试井^[3-4]或等时试井^[5]需多个稳定测点, 影响测试成本和气田产能建设; 气井产能低或无自然产能, 通常需实施压裂测试, 因此测试难度大、费用高; 由于地层压力高、地层含水饱和度高, 气井测试期间易出水或井底积液, 使井底流压测试不准, 难以求准气井产能方程。综合以上原因, 海上气井产能测试^[6]需寻求测试时间短, 且产能测试结果可靠的方法。在气井产能求取方面, 陈元千等^[7-8]最早在国内提出了气井产能测试的“一点法”, 在陕甘宁大气田得到了广泛有效的应用, 取得了较好的经济效益、环境效益和资源效益; 方军成等^[9]对大牛地气田 5 口井的修正等时试井资料修正后建立了该气田的“一点法”产能经验公式; 藤赛男等^[10]建议在“一点法”评价特殊气藏的产能时, 最好与产能试井相结合; 胡建国等^[11]考虑储层类型及特性对产能试井资料的影响, 对靖边气田“一点法”试井资料解释的经验公式进行了校正; 钟家俊等^[12]应用气藏数值模拟方法, 选择苏里格气田典型井建立气藏单井模型, 结合二项式产能方程, 得到了苏里格气田水平井“一点法”产能公式; 何光怀等^[13]从气井渗流理论出发, 利用单井的储层特征参数, 推导计算气井达到拟稳态的时间, 再利用该时间计算气井的产能以及无阻流量; 张晶等^[14]采用 Saphir 试井软件对川西深层 7 口井的系统试井数据进行分析, 首次对川西地区“一点法”经验公式进行了校正; 胥洪成等^[15]提出针对不同的无阻流量区间确定平均产能系数 α , 建立了新的经验公式; 孙志道等^[16]认为气藏开发和工程设计所需的数据应在试采初期用多流量试井方法取得, 而“一点法”获取的数据不能作为依据; 贺英等^[17]根据稳定试井资料获得了对长岭气田的“一点法”经验公式; 赵钊等^[18-19]利用大牛地气田已有的“一点法”试井资料, 结合产能公式推导理论和致密气藏渗流特征, 对指数式进行修正, 得出了不同层位的“一点法”公式。由此可见, 众多气藏工作者都针对所研究的气田, 对气井“一点法”产能方程系数 α 进行了相应的改进, 研究出了适合于其研究气田地质油藏特点的“一点法”产能方程, 并获得了较好的效果。

基于不同区块大量气井的产能测试资料, 回归出不同区块的二项式产能方程, 获得了区块的 α 值范围和平均值, 推导了不同区块的“一点法”产能方程。通过该“一点法”产能方程, 可由一个稳定的测试产量点就能快速地求取气井无阻流量。且其无阻流量与二项式产能方程和陈元千公式计算的无阻流量非常吻合^[8], 表明了本文的“一点法”产能方程的适用性。

1 气井二项式产能方程异常及处理

常规二项式产能方程为^[7]

$$\frac{p_e^2 - p_{wf}^2}{q_g} = A + Bq_g \quad (1)$$

式中: p_e 为地层压力, MPa; p_{wf} 为实测井底流压, MPa; q_g 为气井产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; A 、 B 为二项式系数。

(1) 式表明, $(p_e^2 - p_{wf}^2)/q_g \sim q_g$ 呈线性关系, 斜率和截距分别为 B 和 A , 由此可计算气井无阻流量。

1.1 二项式产能方程异常情况

在现场测试中, 有时出现产能方程系数 $B < 0$ 的情况, 说明测试资料出现异常。在产能方程图中, 表现为回归的直线向下倾斜(图 1)。出现上述情况的主要原因有: 气井初开井时, 井底没有得到充分的冲刷, 具有较大的表皮系数, 使最初的低产量生产条件下流压偏低, 显示较大的生产压差; 测试井井底积水, 压力计又未能下到气层部位, 造成生产压差不准。

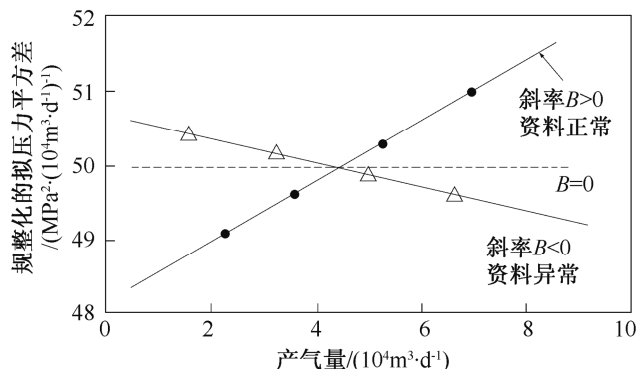


图 1 二项式产能方程 $B < 0$ 的情况

Fig.1 $B < 0$ for binomial productivity equation

1.2 二项式产能方程异常情况处理

(1) 当测取的地层压力偏小时, 由于关井时间不足, 未达到稳定即测取压力。显然, 以此压力作为地层压力是偏小的, 绘制指示曲线将如图 2 中曲线 3 所示, 此曲线在纵轴上有一负的截距 C_e 。

(2) 在某些情况下, 如井筒积液, 由于压力计未下至产层中部, 若井筒仍按纯气柱考虑, 势必造成

流动井底压力偏低,如图 2 中曲线 2 所示,此曲线在纵轴上有一正的截距 C_w 。

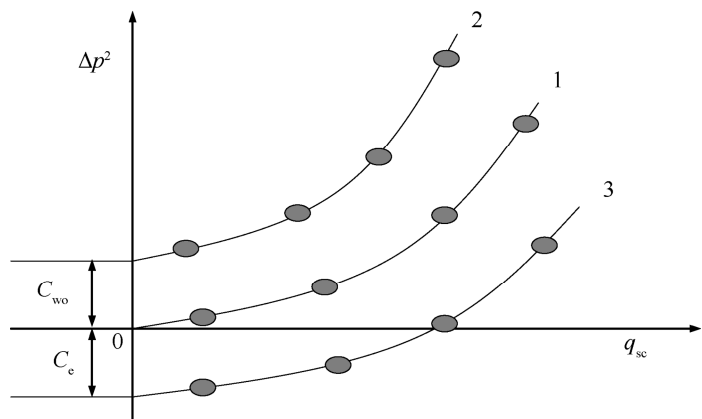


图 2 二项式产能方程曲线图

Fig.2 Binomial productivity equation curve

对于图 2 中曲线 3,仅需进行如下校正。

设真实平均地层压力 p_R ,此压力和实测压力之差为

$$\delta_e = \bar{p}_R - p_e \quad (2)$$

式中: δ_e 为平均地层压力与实测地层压力之差,MPa; p_e 为地层压力,MPa; \bar{p}_R 为平均地层压力,MPa。

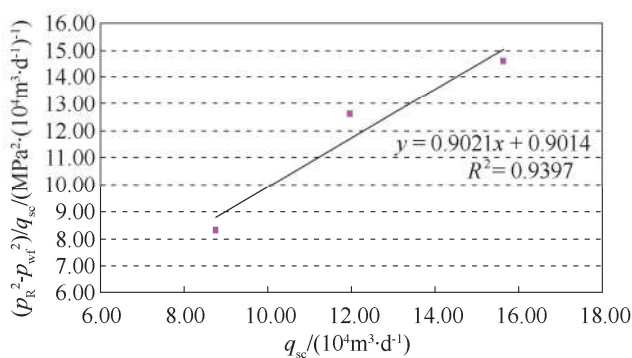
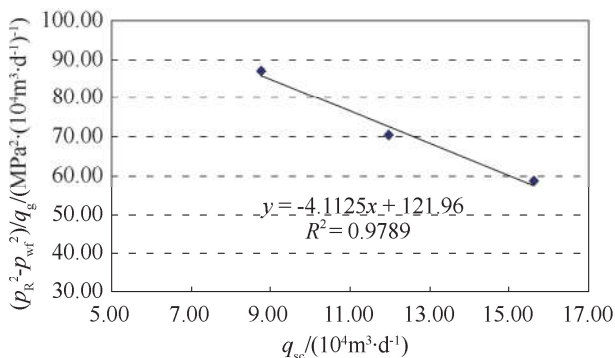


图 3 BH1 井产能测试异常曲线及产能修正曲线

Fig.3 Abnormal curve of production test and its correction curve for BH1 well

2 低渗气藏气井“一点法”产能方程

基于二项式产能方程而推导的“一点法”产能方程为

$$\frac{p_R^2 - p_{wf}^2}{p_R^2} = \alpha \left(\frac{q_g}{q_{AOF}} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{q_g}{q_{AOF}} \right)^2 \quad (6)$$

式中: α 为“一点法”产能方程系数,无因次; q_{AOF} 为气井无阻流量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

其中

$$\alpha = \frac{A}{A + Bq_{AOF}}$$

由(6)式可得气井无阻流量

$$q_{AOF} = \frac{2(1 - \alpha)q_g}{\alpha \left[\sqrt{1 + 4 \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha^2} \right) \frac{p_R^2 - p_{wf}^2}{p_R^2}} - 1 \right]} \quad (7)$$

将(2)式代入二项式产能方程可得

$$\frac{p_e^2 - p_{wf}^2 + C_e}{q_{sc}} = A + Bq_{sc} \quad (3)$$

其中

$$C_e = 2\delta_e p_e + \delta_e^2$$

式中: C_e 为二项式产能方程校正系数, MPa^2 ; δ_e 为平均地层压力与实测地层压力之差,MPa。

当出现曲线 2 时,可用如下方法校正:设 p_{wfi} 为真实井底流动压力, p_{wf} 为实测或计算井底压力。

$$\delta_i = p_{wfi} - p_{wf} \quad (4)$$

式中: δ_i 为平均流压与实测流压之差,MPa; p_{wfi} 为真实井底流压,MPa。

将上式代入二项式产能方程得到

$$\frac{p_e^2 - (p_{wf}^2 + C_w)}{q_{sc}} = A + Bq_{sc} \quad (5)$$

其中

$$C_w = 2\delta_i p_{wf} + \delta_i^2$$

式中: C_w 为二项式产能方程校正系数, MPa^2 。

以东海气田 BH 区块 BH1 井为例,产能系数 $B < 0$,用该方法进行校正,能获得正常曲线(图 3)。

(7) 式表明,若 p_R 、 p_{wf} 和 q_g 已知,只要确定 α ,就可计算气井无阻流量。如果一个气田在多个井进行产能试井,取得了大量产量及稳定流压数据,且通过回归找到了无阻流量与 α 的统计规律,则此后该气田新井测试时,可只测一个稳定产量及稳定流压,再由该经验公式即可计算出无阻流量。

3 东海低渗气藏气井“一点法”产能方程推导

以东海气田 AH 区块和 BH 区块为例,说明“一点法”产能方程的应用。根据区块气井系统试井资料,回归得到气井二项式产能方程,由(6)式获得区块 α 值的变化范围,求其平均值作为“一点法”回归系数 α ,进而求取无阻流量(表 1)。

表 1 东海低渗气田系统回压试井基本数据

Table 1 Back pressure testing data in low permeability gas fields in the East China Sea							
区块	井号	测试井段/m	油嘴/mm	油产量/(m ³ ·d ⁻¹)	气产量/(m ³ ·d ⁻¹)	地层压力/MPa	流压/MPa
AH	AH1	2 976.8~2 983.3	4.36	3.90	78 044	26.32	25.745
			5.55	5.52	105 336		25.411
			6.35	6.52	135 900		25.008
			7.14	7.65	166 888		24.571
	AH2	3 845.2~3 872.8	5.55	16.34	56 359	31.23	29.310
			7.93	32.70	88 020		26.140
			8.73	53.00	117 574		22.780
			10.71	57.72	146 400		19.200
BH	BH1	3 526.0~3 555.0	5.55	3.40	87 142	34.85	21.224
			7.93	4.30	119 262		19.291
			8.73	10.00	155 115		17.182
	BH2	3 350.0~3 361.0	4.76	14.40	113 376	32.29	26.522
			6.35	22.10	155 569		23.581
			7.93	28.30	193 800		20.904
			9.52	29.80	229 907		18.989

由表 1 可知,东海低孔低渗气田气井的测试产量不高,介于 $7.8\times10^4\sim23.0\times10^4\text{m}^3$ 。基于表 1 的回压测试数据,采用二项式产能方程进行了处理,得到不同区块气井的二项式产能方程系数和无阻流量^[20](表 2)。

表 2 东海低渗气田回压试井产能计算结果统计表

Table 2 Statistics of back pressure test deliverability in low permeability gas fields in the East China Sea							
区块	井号	测试日期	测试井段/m	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	二项式产能方程	无阻流量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	
AH	AH1	2007.04.01	2 976.8~2 983.3	10.04	$(p_R^2 - p_{wf}^2) = 2.58q + 0.17q^2$	57.34	
	AH2	2006.12.02	3 845.2~3 872.8	1.41	$(p_R^2 - p_{wf}^2) = 10.29q + 1.98q^2$	19.73	
BH	BH1	2012.02.20	3 526.0~3 555.0	4.90	$(p_R^2 - p_{wf}^2 - 691) = 0.75q + 0.93q^2$	35.80	
	BH2	2011.04.17	3 350.0~3 361.0	20.10	$(p_R^2 - p_{wf}^2 - 304) = 2.10q + 0.62q^2$	39.35	

由表 2 看出,不同区块气井无阻流量介于 $19\times10^4\sim57\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ 。基于表 2 中回归的二项式产能方程系数和无阻流量值,计算了不同气井的 α 系数值,求其平均值作为各区块气井的“一点法”回归系数 α ,从而得到 AH 区块、BH 区块的 α 系数值分别为 0.28 和 0.08,然后由(7)式即可确定各区块的“一点法”无阻流量表达式。

4 实例分析

AH 区块 AH2 井目的层位于平湖组 P11 层,埋深约 3 000 m,地层压力 31.23 MPa,储层厚度 20.8 m,孔隙度 13.8%,试井解释渗透率约 $1.0\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。该井于 2006 年 11 月进行了测试(表 1),4 个工作制度下的日产气量介于 $5.63\times10^4\sim14.64\times10^4\text{m}^3$ 之间。采用二项式方法进行回归,得到二项式产能方程系数 A 为 10.29、B 为 1.98,计算无阻流量 $19.73\times10^4\text{m}^3$ (表 2)。基于 AH 区块 6 口探井的测试资料,分别回归每口井的二项式产能方程系数,得到区块的平均 α 值为 0.28,由(7)式得到了 AH 区块的“一点法”产能方程计算公式为

$$q_{\text{AOF}} = \frac{5.20q_g}{\sqrt{1 + 37.44 \frac{p_R^2 - p_{wf}^2}{p_R^2} - 1}} \tag{8}$$

采用(8)式、(1)式及陈元千^[7]的“一点法”公式进行了验算和对比(图 4)。可以看出,采用本文推导的“一点法”产能公式计算 AH2 井的无阻流量为 $19.50\times10^4\text{m}^3/\text{d}$,略大于陈元千公式计算的 $18.80\times10^4\text{m}^3/\text{d}$,但与二项式法计算的无阻流量 $19.73\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ 接近,表明了本文“一点法”产能公式的有效性。

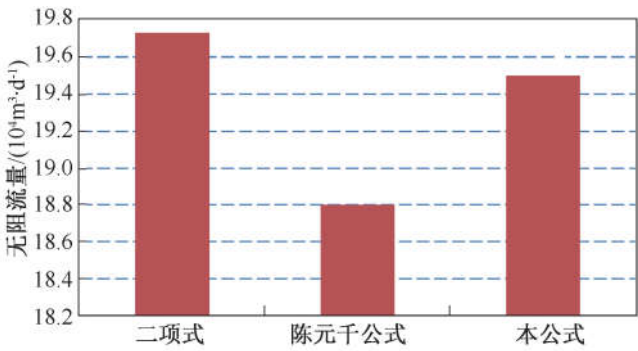


图 4 二项式、陈元千公式及本文“一点法”产能公式计算的 AH2 井无阻流量对比

Fig.4 AOF comparison of AH2 gas well for binomial, Chen yuan qian and developed one point formula

由于“一点法”产能公式系数 α 的准确性取决于二项式产能方程的数据点数,为了提高“一点法”产能方程的可靠性,需要在大量的回压试井结果的基础上进行回归^[21-24]。因此,随着区域探井和生产井测试资料的增多,不同区域的“一点法”产能公式的精度会逐步提高。

5 结论

(1) 基于东海低渗区块气井二项式产能方程,推导得到不同区块的“一点法”产能方程。与二项式产能方程和陈元千“一点法”公式对比发现,采用本文提出的“一点法”产能方程能得到比较正确的无阻流量值。

(2) 采用本文提出的“一点法”公式,可只由一个稳定产量点及流压就可计算无阻流量,缩短了东海低渗气田气井的测试时间,减少了天然气排放。

(3) 为提高不同区块“一点法”产能方程的预测精度,未来建议 α 值应随着新增测试资料进行更新。

致谢:感谢研究中心团队及外委单位对本成果的大力支持;感谢中海油上海分公司提供的数据。

参 考 文 献

- [1] 贾健谊, 陈琳琳. 东海西湖凹陷春晓气田群 H5 砂体成因分析及成藏综述[J]. 海洋石油, 2002, 22(3): 1-8.
JIA Jianyi, CHEN Linlin. Analysis of sandbody formation and oil/gas reservoir-forming Mechanism of H5 Horizon in Chunxiao Field Group of Xihu Trough, the East China Sea [J]. Offshore Oil, 2002, 22(3): 1-8.
- [2] 陈琳琳, 孙伯强, 王乐闻, 等. 西湖凹陷中央背斜带北部花港组天然气特征及气源分析[J]. 海洋石油, 2017, 37(1): 21-29.
CHEN Linlin, SUN Boqiang, WANG Lewen *et al.* Characteristics and source of natural gas from Huagang formation in north segment in central anticline belt of Xihu seg [J]. Offshore Oil, 2017, 37(1): 21-29.
- [3] 张宏友, 黄凯, 阳晓燕, 等. 渤海气井回压试井产能方程校正新方法及应用[J]. 天然气勘探与开发, 2013, 36(3): 46-49.
ZHANG Hongyou, HUANG Kai, YANG Xiaoyan *et al.* A new method to calibrate productivity equation of back-pressure testing for gas wells in Bohai and its application [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2013, 36(3): 46-49.
- [4] 廖锐全, 李军亮, 汪双喜, 等. 天然气井常规回压试井的改进——不关井产能试井[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(3): 96-97.
LIAO Ruiquan, LI Junliang, WANG Shuangxi *et al.* Im-

- provement of conventional back-pressure testing in a natural gas well-deliverability test without shut-in [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2003, 25(3): 96-97.
- [5] 樊友宏, 范继武, 李跃刚. 低渗透气藏修正等时试井产能异常现象的理论分析[J]. 油气井测试, 2002, 11(6): 11-13.
FAN Youhong, FAN Jiwu, LI Yuegang. The theory analysis of abnormal producibility phenomenon of modified isochronal test in low permeability gas reservoir [J]. Well Testing, 2002, 11(6): 11-13.
- [6] 刘冠南, 余洪骥. 缩短气井产能试井时间的新方法[J]. 中国海上油气(地质), 1991, 5(4): 31-43.
LIU Guannan, YU Hongji. New method to shorten the time of deliverability test in gas well [J]. China Offshore Oil & Gas (Geology), 1991, 5(4): 31-43.
- [7] 陈元千. 确定气井绝对无阻流量的简单方法[J]. 天然气工业, 1987, 7(1): 1-5.
CHEN Yuanqian. A simple method for determining absolute open flow rate of gas well [J]. Natural Gas Industry, 1987, 7(1): 1-5.
- [8] 陈元千, 漆雕良. “一点法”在陕甘宁大气田的应用[J]. 油气井测试, 1993, 2(4): 15-20.
CHEN Yuanqian, QI Diaoliang. Application of “single-point” in Shan Ganning large gas field [J]. Well Testing, 1993, 2(4): 15-20.
- [9] 方军成, 王念喜, 尹超. 大牛地气田一点法产能结果评价[J]. 天然气工业, 2007, 27(12): 121-123.
FANG Juncheng, WANG Nianxi, YIN Chao. Analysis of single-point well test in Daniudi gas field [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(12): 121-123.
- [10] 腾赛男, 梁景伟, 李元生, 等. 气井一点法试井资料处理方法评价[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(1): 92-94.
TENG Sainan, LING Jingwei, LI Yuansheng *et al.* Evaluation of processing methods for single-point well test data in gas wells [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(1): 92-94.
- [11] 胡建国, 张宗林, 张振文. 气田一点法产能试井资料处理新方法[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 111-113.
HU Jianguo, ZHANG Zonglin, ZHANG Zhenwen. A new method on processing the data from one-point deliverability test in gas fields [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 111-113.
- [12] 钟家峻, 唐海, 吕栋梁, 等. 苏里格气田水平井一点法产能公式研究[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(2): 107-111.
ZHONG Jiajun, TANG Hai, LYU Dongliang *et al.* Study on a single point deliverability formula of horizontal wells in Sulige gas field [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(2): 107-111.
- [13] 何光怀, 许进进. “一点法”产能评价的改进方法[J]. 油气井测试, 2005, 14(5): 1-4.
HE Guanghuai, XU Jinjin. “Single point” of capacity evaluation method of improvement [J]. Well Testing,

- 2005, 14(5):1-4.
- [14] 张晶, 牟小清, 邱玲. 川西深层“一点法”产能试井公式的校正[J]. 油气井测试, 2011, 20(5):19-20.
ZHANG Jing, MU Xiaoqing, QIU Ling. Correction for well testing formula of “one point” production testing in Chuanxi deep layer [J]. Well Testing, 2011, 20(5):19-20.
- [15] 胥洪成, 陈建军, 万玉金, 等. 一点法产能方程在气藏开发中的应用[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3):454-456.
XU Hongcheng, CHEN Jianjun, WAN Yujin *et al.* Single-point of productivity equation in the application of the gas reservoir development [J]. Journal of Oil and Gas. 2007, 29(3):454-456.
- [16] 孙志道, 胡永乐, 方义生, 等. “一点法”求气井产能适用范围的研究[J]. 天然气工业, 2011, 31(11):63-65.
SUN Zhidao, HU Yongle, FANG Yisheng *et al.* Applicable scope of the single-point test method for the evaluation of gas well deliverability [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(11):63-65.
- [17] 贺英, 贾永禄, 阮宝涛, 等. 长岭气田“一点法”产能试井分析[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(2):193-195.
HE Ying, JIA Yonglu, RUAN Baotao *et al.* Analysis of single point well test in Changling gas field [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(2):193-195.
- [18] 赵钊, 李治平, 赖枫鹏, 等. 致密气藏一点法公式在大牛地气田的应用[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(30):28-32.
ZHAO Zhao, LI Zhiping, LAI Fengpeng *et al.* Single point method of tight gas reservoir applied in Daniudi gas field [J]. Science Technology & Engineering, 2014, 14(30):28-32.
- [19] 赵钊, 李治平, 赖枫鹏, 等. 致密气压裂水平井“一点法”合理测试时间研究[J]. 油气井测试, 2015, 24(1):1-3.
ZHAO Zhao, LI Zhiping, LAI Fengpeng *et al.* Study of single-point testing time for tight gas of fractured horizontal wells [J]. Well Testing, 2015, 24(1):1-3.
- [20] 郑爱维, 李继庆, 卢文涛, 等. 涪陵页岩气田分段压裂水平井非稳态产能评价方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(1):22-30.
ZHENG Aiwei, LI Jiqing, LU Wentao *et al.* Unsteady productivity evaluation method of multi-stage fractured horizontal well for shale gas in Fuling shale gas field [J]. Well Testing, 2018, 27(1):22-30.
- [21] ROBERT W C, CASSANDRA R S. Predicting horizontal gas well deliverability using dimensionless IPR curves [C]. Paper SPE 91101 presented at the SPE Eastern Regional Meeting, 15 - 17 September, 2004, Charleston, West Virginia.
- [22] CHASE R W. Improved estimation of gas well deliverability from single-point tests[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2002, 41(11):52-59.
- [23] 乔向阳, 李元生, 冯婷婷, 等. 延长气田一点法产能评价模型[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(1):89-93.
QIAO Xiangyang, LI Yuansheng, FENG Tingting *et al.* Productivity evaluation model based on single point method used for Yanchang Gasfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(1):89-93.
- [24] 米瑛, 王振兴. 四川盆地涪陵页岩气田气井合理配产方法探讨[J]. 天然气勘探与开发, 2017, 40(3):78-83.
MI Ying, WANG Zhenxing. Rational proration method for shale gas wells in Fuling Shale Gasfield, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2017, 40(3):78-83.

编辑 穆立婷

第一作者简介:梁斌,男,1981年出生,博士,高级工程师,2008年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业,现从事海上油气田开发技术研究工作。电话:010-84526249,18500613689;Email:liangbin2@cnoc.com.cn。地址:北京市朝阳区太阳宫南街6号海油大厦B-504,邮政编码:100028。