

基于生产数据分析的气井产能动态评价方法

邓勇^{1,2}, 马成^{1,2}, 孙宝¹, 罗从勇¹

1. 振华石油控股有限公司 北京 100000

2. 成都北方石油勘探开发技术有限公司 四川成都 610081

通讯作者: Email: dengyong@zhenhuaoil.com

引用: 邓勇, 马成, 孙宝, 等. 基于生产数据分析的气井产能动态评价方法[J]. 油气井测试, 2022, 31(2): 74-78.

Cite: DENG Yong, MA Cheng, SUN Bao, et al. Dynamic productivity evaluation method of gas well based on production data analysis[J]. Well Testing, 2022, 31(2): 74-78.

摘要 为实时掌握气井产能, 准确评价气井在生产过程中产能的变化规律, 制定不同时期的合理配产, 基于气井初期产能测试数据得到的气井产能方程, 利用 Topaze 气井生产动态分析软件开展单井生产动态历史拟合, 得到气井地层压力的变化史, 计算不同时期、不同地层压力下气井绝对无阻流量。在埃及 K 气田 K-5 井、K-6 井、K-7 井生产管理过程中, 通过适时的气井优化配产, 实现气田稳定生产, 取得了较好的效果。该方法可有效减少气井产能测试及气井运营管理成本, 进而指导气井配产, 实现整个气藏的高效合理开发。

关键词 气井产能; 二项式产能方程; 地层压力; 绝对无阻流量; 压力历史拟合; 动态产能评价; 合理配产

中图分类号: TE37 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.02.013

Dynamic productivity evaluation method of gas well based on production data analysis

DENG Yong^{1,2}, MA Cheng^{1,2}, SUN Bao¹, LUO Congyong¹

1. China ZhenHua Oil Co., Ltd., Beijing 100000, China

2. Chengdu North Petroleum Exploration and Development Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610081, China

Abstract: To grasp the gas well productivity in real time, accurately evaluate the change law of well productivity during production, and define a rational production allocation in different periods, the gas well productivity equation was obtained from the initial productivity test data of gas well. The production performance history matching of single well was completed by using TOPAZE, a production performance analysis software, to determine the change history of formation pressure of gas well, and the absolute open flow of gas well in different stages and at different formation pressures was calculated. In the production management of Wells K-5, K-6 and K-7 in K gas field, Egypt, the stable production was realized through timely optimization of well production allocation. This method can effectively reduce the costs of gas well productivity test and gas well operation management, and guide the production allocation of gas wells, so as to realize the efficient and reasonable development of the whole gas reservoir.

Keywords: gas well productivity; binomial productivity equation; formation pressure; absolute open flow; pressure history matching; dynamic productivity evaluation; reasonable production allocation

在气田开发过程中, 准确预测气井的产能和分析气井的动态, 并了解气层及井筒的特性, 是科学开发气田的基础。通过气井产能测试及分析, 预测气井绝对无阻流量, 是评价气藏生产能力, 确定气井产量最主要的手段。国内外常用的气井产能计算方法是二项式和指数式, 廖代勇等^[1]对气井产能分析方法进行了系统的总结, 国内较早开展气井产能分析计算的是陈元千^[2-4], 重点介绍了如何将“一点法”的简便和快捷应用到气井产能评价当中, 近几年, 研究工作更多集中在针对不同类型气藏产能

的评价方法上, 肖香姣等^[5]在考虑气藏开发过程中应力敏感效应的基础上推导出三项式产能公式, 梁斌和曹鹏亮等^[6-7]把“一点法”应用到低孔低渗以及致密气藏压裂后产能计算中, 王香增等^[8]以延安气田为例, 研究了考虑时变效应的致密气井产能评价, 乔霞和蔡珺君^[9-11]针对异常高压气藏的气井产能计算和评价开展了研究, 乔霞利用生产数据计算井底流压, 结合二项式公式计算产能, 蔡珺君则利用对气井产水后修正产能方程、高压气藏产能方程、物质平衡方程的联合求解, 建立了气井“动态

法”产能方程来计算产能,陈春艳^[12]以磨溪区块龙王庙组高压气藏为例,通过引用二项式及指数式方程,推导出相应产能方程,提出试差法先求取指数 n 及方程系数 A 、 B 值,再利用交会法求解无阻流量。但在众多研究过程中,忽略了气井产能是随着地层压力的下降不断衰减的,因此如何实时的掌握气井产能,指导气井配产是气藏工程师面临的重要任务,关于地层压力对气井产能的影响,前人有所研究,郝玉鸿^[13]分析了地层压力下降对气井产能方程和无阻流量的影响,廖华伟^[14]提出了确定不同地层压力下的气井产能方法,李莲明^[15]也提出了地层压力下降气井产能评价的单点稳定法。本次研究是基于气井初期产能测试数据得到的气井产能方程,利用 Topaze 气井生产动态分析软件开展单井生产动态历史拟合,得到气井地层压力的变化史,计算不同时期、不同地层压力下气井绝对无阻流量 q_{AOF} ,从而实现对气井产能的动态评价,实时指导气井合理配产,达到气井高产和稳产的目的。

1 气井初期产能方程确定

目前常用的产能评价方法主要有两种^[16-19],同时也有不同的适用条件:一种是二项式产能评价方法,该方法是基于气藏渗流理论推导得出的压力与产量之间的关系,在气田现场实际操作过程中,通常是通过回归产能测试数据得到产能方程,由于该方程中压力与产量呈现二项式特征,因此称之为二项式产能方程;第二种是指数式产能评价方法,该方法也是利用产能测试数据进行曲线回归得到的,由于产量与压力呈现指数式,因此称为指数式产能方程。两种方法均有广泛应用,但由于二项式方程既考虑了层流作用,也考虑了湍流的影响,理论基础相对扎实,因此计算结果相对可靠。本文将采用二项式方程以及计算结果作为气井动态产能评价的基础。

二项式产能方程通式

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = Aq + Bq^2 \tag{1}$$

式中: p_R 为地层压力,MPa; p_{wf} 为井底流压,MPa; A 、 B 为二项式产能方程层流系数和紊流系数; q 为天然气产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

指数式产能方程通式

$$q = C(p_R^2 - p_{wf}^2)^n \tag{2}$$

式中: p_R 为地层压力,MPa; p_{wf} 为井底流压,MPa; C

为指数式产能方程系数; n 为产能指数; q 为天然气产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;

本文以埃及 K 气田 K-5 井为例,该气田位于埃及及开罗以西的西沙漠地区,典型的底水砂岩气藏,储层埋深 5 500 m 左右,以中孔中渗储层为主,气藏探明储量 300 亿方左右,目前有生产井 6 口,日产气 $300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。K-5 井于 2014 年 9 月投产,投产之前采用三个工作制度进行了产能测试,该井原始地层压力为 52.9 MPa,测试产量 $(65.9 \sim 164.8) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,测试结果见表 1。

表 1 K-5 井产能测试结果表
Table 1 Productivity test results of K-5

气嘴/ mm	井口 压力/ MPa	原始地 层压力/ MPa	井底 流压/ MPa	测试气产 量/(10^4 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	测试凝析 油产量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	折算测 试产量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot$ d^{-1})
19.05	27.35	52.88	43.89	164.96	76.18	165.95
14.29	33.03	52.88	47.83	122.30	49.67	122.94
9.53	37.10	52.88	50.69	65.79	28.15	66.16

利用测试数据绘制产能回归曲线(见图 1),得到 K-5 井二项式产能方程,并计算得到了该井初始无阻流量。采用相同方法,对同气藏剩余 2 口气井 K-6、K-7 井开展了初期产能评价工作(见图 2、图 3),计算了 3 口气井的无阻流量(见表 2),并得到了相应的产能方程,即

K-5 井二项式产能方程

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = 2.140 \ 1q + 0.018q^2 \tag{3}$$

K-6 井二项式产能方程

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = 1.851 \ 5q + 0.022 \ 3q^2 \tag{4}$$

K-7 井二项式产能方程

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = 7.678 \ 3q + 0.046 \ 5q^2 \tag{5}$$

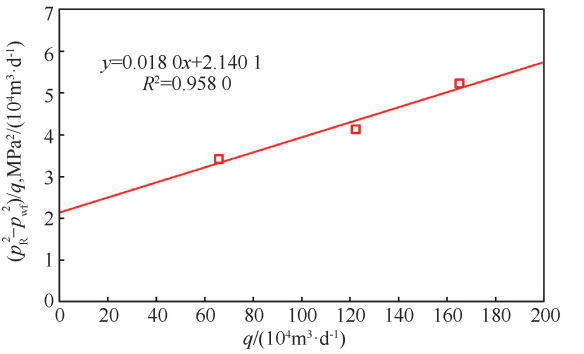


图 1 K-5 井二项式产能方程回归曲线
Fig. 1 The curve of productivity binomial equation for K-5

根据产能方程,计算气井初始无阻流量见表 2。初始无阻流量代表气井在原始地层压力下的最大

生产能力,根据初始无阻流量可以指导气井初期合理配产,同时也得到了气井的层流系数和紊流系数,建立起了气井的二项式产能方程,可用于不同地层压力下的无阻流量预测。

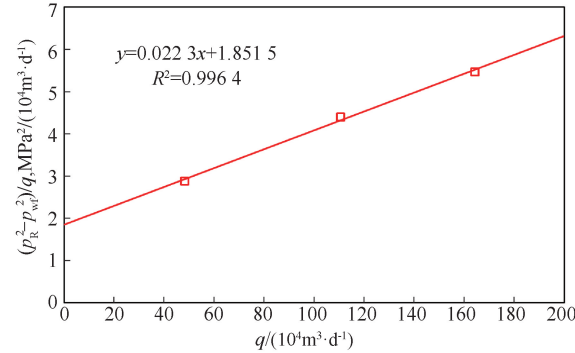


图 2 K-6 井二项式产能方程回归曲线

Fig. 2 The curve of productivity binomial equation for K-6

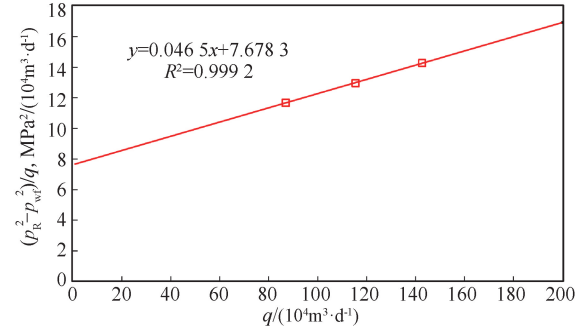


图 3 K-7 井二项式产能方程回归曲线

Fig. 3 The curve of productivity binomial equation for K-7

表 3 K 气田气井不同时期地层压力

Table 3 Formation pressure of gas wells under different stage in K gas field											单位:MPa
井号	日期/(年.月)										
	2014.09	2014.11	2015.01	2015.03	2015.05	2015.07	2015.09	2015.11	2016.01	2016.03	2016.05
K-5	52.9	51.9	50.2	48.3	46.5	44.7	42.9	41.1	39.5	38.4	37.1
K-6	—	53.8	50.7	48.2	45.5	42.9	40.6	38.4	36.1	34.1	32.4
K-7	—	—	—	51.7	49.5	47.2	45.0	42.7	40.6	38.4	36.6

3 气井产能动态评价

通过历史拟合结果可以看出,K-5 井初始地层压力为 52.9 MPa,无阻流量为 339×10⁴ m³/d。经过一年半的生产,地层压力降至 2016 年 5 月的 37.1 MPa(见表 3),计算得到该井此时无阻流量为 223×10⁴ m³/d,产能降低了 116×10⁴ m³/d。因此,气井产量从初期的 170×10⁴ m³/d 调减至目前的 99×10⁴ m³/d,以保证气井压力高于外输压力并稳产(见图 5)。

表 2 K 气田气井初始产能评价结果

Table 2 Productivity evaluation results of gas wells in K Field

井号	二项式产能方程			
	层流系数	紊流系数	初始地层压力/MPa	初始无阻流量/(10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)
K-5	2.140 1	0.018 0	52.88	339
K-6	1.851 5	0.022 3	53.75	321
K-7	7.678 3	0.046 5	51.97	172

2 气井生产动态历史拟合

在获取气井生产层位的有效厚度、孔隙度、井身结构、原始地层压力、气井产量、井口压力等数据的基础上,利用 Topaze 软件对气井生产动态进行历史拟合(见图 4),得到气井实时地层压力(见表 3),为下步开展气井动态产能评价提供关键参数。

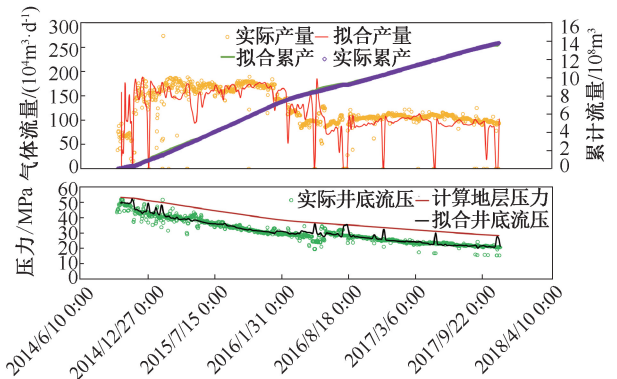


图 4 K-5 井生产动态历史拟合

Fig. 4 Performance history matching of K-5

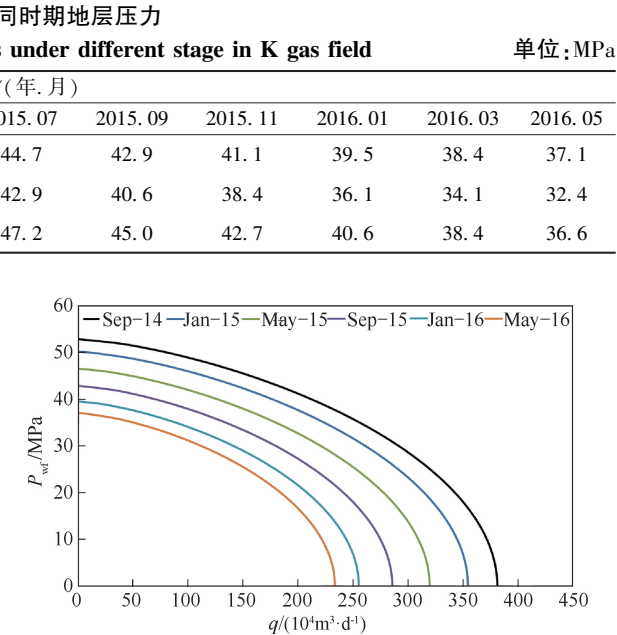


图 5 K-5 井动态 IPR 流入曲线

Fig. 5 Dynamic IPR curve of K-5

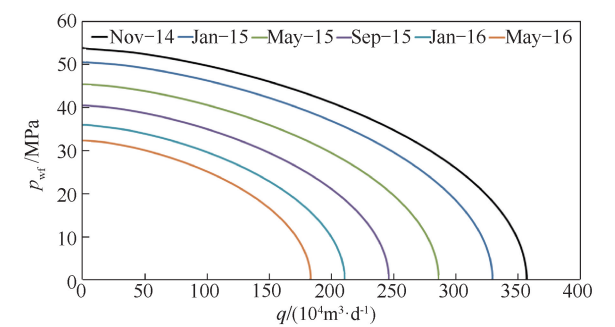


图 6 K-6 井动态 IPR 流入曲线
Fig. 6 Dynamic IPR curve of K-6

利用该方法,分别计算了剩余 2 口气井 K-6、K-7 井动态 IPR 流入曲线(见图 6、图 7),得到了 3 口气井不同时期无阻流量(见表 4),从而参照 K-5 井,为气井在不同时期调整配产提供依据,从计算结果来看,气井产能随着地层压力的下降不断衰减,在

气井生产一段时间后,气井井口压力会降低,当低于外输压力后,气井会进入递减阶段,因此在一定时间应该适当降低气井的配产,恢复井口压力来保障气井的稳定生产。

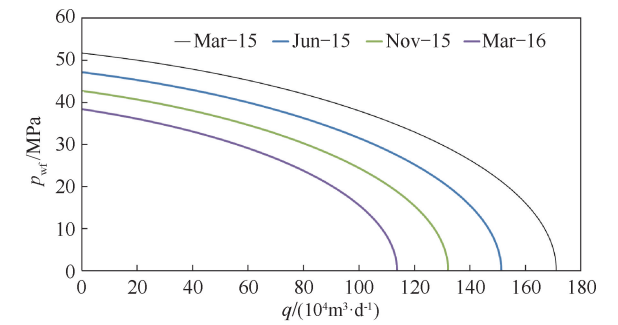


图 7 K-7 井动态 IPR 流入曲线
Fig. 7 Dynamic IPR curve of K-7

表 4 K 气田气井不同时期无阻流量
Table 4 The absolute open flowing rate of gas wells under different stage in K field 单位:10⁴m³·d⁻¹

井号	日期/(年.月)										
	Sep-14	Nov-14	Jan-15	Mar-15	May-15	Jul-15	Sep-15	Nov-15	Jan-16	Mar-16	May-16
K-5	340	331	320	306	292	278	266	252	241	232	224
K-6	-	323	300	283	266	249	232	218	204	190	178
K-7	-	-	-	170	161	150	142	133	122	113	105

4 结论

(1)天然气气井在实际生产过程中,其产能随着地层压力的不断降低是逐渐衰减的,因此,要实现对气井产能的实时把握,必须对其压力及产量的变化规律进行合理分析。

(2)常规方法是适时的开展产能测试工作,利用测试数据进行产能分析,并需要下压力计得到井底流压,大部分气田均会在气井关停检修期间开展该项工作,因此无法做到对气井产能的适时掌握。

(3)基于生产数据的动态产能评价方法是利用初始产能评价结果,在生产动态历史拟合的基础上,方便快捷的得到气井地层压力的变化史,从而计算得出气井无阻流量的动态变化规律,从而实现了对气井产能变化的实时把握。

(4)通过该方法的实际应用,可以有效地减少对气井产能测试,降低气藏及气井运营管理成本,进而指导气井配产,实现整个气藏的高效合理开发。

致谢:感谢振华石油及相关单位的支持和帮助。

参考文献

[1] 廖代勇,边芳霞,林平. 气井产能分析的发展研究[J].

天然气工业,2006,26(2):100-101.

LIAO Daiyong, BIAN Fangxia, LIN Ping. Deliverability analytical approach of gas well [J]. Natural Gas Industry, 2006,26(2):100-101.

[2] 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(1):1-5.

CHEN Yuanqian. A simple way to determine the absolute open-flow capacity of a gas well [J]. Natural Gas Industry, 1987(1):1-5.

[3] 陈元千. 确定气井绝对无阻流量和产能的一个简易方法[J]. 天然气工业,1987(4):38-43.

CHEN Yuanqian. A simple way to determine the absolute open-flow capacity and productivity of a gas well [J]. Natural Gas Industry, 1987(4):38-43.

[4] 陈元千. 确定气井绝对无阻流量的快速方法[J]. 油气井测试,2003,12(5):1-5.

CHEN Yuanqian. A quick way to determine the absolute open-flow capacity of a gas well [J]. Well Testing, 2003, 12(5):1-5.

[5] 肖香姣,毕研鹏,王小培,等. 一种新的考虑应力敏感影响的三项式产能方程[J]. 天然气地球科学,2014, 25(5):767-770.

XIAO Xiangjiao, BI Yanpeng, WANG Xiaopei, et al. A new trinomial deliverability equation with consideration of stress sensitivity[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5):767-770.

- [6] 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.
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.
- [7] 曹朋亮,杨小松,张一果,等. 致密低渗气藏水平井新的产能评价“一点法”[J]. 油气井测试,2019,28(6):1-8.
CAO Pengliang, YANG Xiaosong, ZHANG Yiguo, et al. “Single point” productivity evaluation method for horizontal wells in tight and low permeability gas reservoirs[J]. Well Testing, 2019,28(6):1-8.
- [8] 王香增,冯东,李相方,等. 考虑时变效应的致密气井产能评价——以延安气田为例[J]. 石油学报,2019,40(11):1358-1367.
WANG Xiangzeng, FENG Dong, LI Xiangfang, et al. Productivity evaluation of tight gas well with time-dependent mechanism: a case study of Yan'an gasfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(11):1358-1367.
- [9] 乔霞,罗明高,王洪峰,等. 一种利用生产动态历史评价异常高压气井产能的新方法[J]. 天然气地球科学,2017,28(12):1908-1913.
QIAO Xia, LUO Minggao, WANG Hongfeng, et al. A new method for evaluating the productivity of abnormal high pressure gas well by using the dynamic production history data[J]. Natural Gas Geoscience, 2017,28(12):1908-1913.
- [10] 蔡珺君,占天慧,邓庄,等. “动态法”产能方程在高压气藏开发中的应用——以四川盆地安岳气田为例[J]. 大庆石油地质与开发,2020,39(5):72-79.
CAI Junjun, ZHAN Tianhui, DENG Zhuang, et al. Application of the productivity equation dynamic method based on in high-pressure gas reservoir development: Taking Anyue Gas Field in Sichuan Basin as an example [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020,39(5):72-79.
- [11] 韩家新. 动态“一点法”产能方程在气藏开发中的应用[J]. 天然气技术与经济,2015,9(2):29-30,36.
HAN Jiaxin. Application of dynamic one-point-method deliverability equation to reservoir development [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2015,9(2):29-30,36.
- [12] 陈春艳,阮基富,吴利华,等. 磨溪区块龙王庙组高压气藏气井产能方程及求解方法[J]. 油气井测试,2021,30(2):67-73.
CHEN Chunyan, RUAN Jifu, WU Lihua, et al. Productivity equation and solution of gas wells in high pressure gas reservoir of Longwangmiao formation, Moxi block [J]. Well Testing, 2021,30(2):67-73.
- [13] 郝玉鸿,王方元. 地层压力下降对气井产能方程及无阻流量的影响分析[J]. 天然气工业,2000,20(1):71-73.
HAO Yuhong, WANG Fangyuan. Influence of formation pressure decrease on the productivity equation and open-flow capacity of gas well [J]. Natural Gas Industry, 2000,20(1):71-73.
- [14] 廖华伟,唐海,李宁,等. 确定不同地层压力下气井产能的方法[J]. 天然气技术,2008,2(4):30-33.
LIAO Huawei, TANG Hai, LI Ning, et al. A method for determining gas-well productivity under different formation pressure [J]. Natural Gas Technology, 2008,2(4):30-33.
- [15] 李莲明,李治平,车艳. 地层压力下降气井产能评价单点稳定法[J]. 油气井测试,2011,20(1):18-22.
LI Lianming, LI Zhiping, CHE Yan. Single point stability method for estimation of gas deliverability used in the cases of reservoir pressure decreasing during well testing [J]. Well Testing, 2011,20(1):18-22.
- [16] 张皓,陆家亮,曹雯,等. 不同计量单位下的气井产能试井常用公式[J]. 油气井测试,2017,26(6):1-7.
ZHANG Hao, LU Jialiang, CAO Wen, et al. Usual productivity equation of gas well on various units of measurement[J]. Well Testing, 2017,26(6):1-7.
- [17] 冯曦,彭先,李骞,等. 试气阶段评价气井不稳定产能的新方法[J]. 天然气工业,2020,40(4):59-68.
FENG Xi, PENG Xian, LI Qiang, et al. A new method for evaluating the unstable deliverability of gas wells in gas formation testing phase[J]. Natural Gas Industry, 2020,40(4):59-68.
- [18] 孙贺东,孟广仁,曹雯,等. 气井产能评价二项式压力法、压力平方方法的适用条件[J]. 天然气工业,2020,40(1):69-75.
SUN Hedong, MENG Guangren, CAO Wen, et al. Applicable conditions of the binomial pressure method and pressure-squared method for gas well deliverability evaluation [J]. Natural Gas Industry, 2020,40(1):69-75.
- [19] 李纪智,关利军,吴明录,等. 基于单探针MDT资料的气井产能计算新方法[J]. 油气井测试,2021,30(3):64-69.
LI Jizhi, GUAN Lijun, WU Minglu, et al. A new productivity calculation method for gas wells based on single probe MDT data[J]. Well Testing, 2021,30(3):64-69.

编辑 吴志力

第一作者简介:邓勇,男,1981年出生,教授级高级工程师,博士学位,2009年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业,主要从事油气藏工程、油气藏数值模拟方面的科研及技术管理工作。电话:13980532179;Email:dengyong@zhennhua-oil.com。通信地址:四川省成都市成华区建设路10号钻石广场33楼,邮政编码:610081。