

一点法试井解释方法在吉林气田的应用

王海军¹, 杨天红², 孙伟¹, 蒋文心¹, 张英魁²

1. 吉林油田分公司二氧化碳捕集埋存与提高采收率(CCS-EOR)开发公司 吉林松原 138000

2. 吉林油田分公司勘探开发研究院 吉林松原 138000

通讯作者: Email: wanghaij-jl@petrochina.com.cn

项目支持: 股份公司重大科技专项“二氧化碳规模化捕集、驱油与埋存全产业链关键技术研究及示范”课题 4《CCUS 注采工艺、产出气循环利用及高效防腐关键技术研究》(2021ZZ01-04)

引用: 王海军, 杨天红, 孙伟, 等. 一点法试井解释方法在吉林气田的应用[J]. 油气井测试, 2024, 33(6): 73-77.

Cite: WANG Haijun, YANG Tianhong, SUN Wei, et al. Application of single-point well testing interpretation method in Jilin gas field [J]. Well Testing, 2024, 33(6): 73-77.

摘要 针对吉林气田多点试井测试时间长的实际情况, 通过常规多点产能回压试井和修正等时试井 28 个测试点数据, 统计出 α 的平均值为 0.857 9, 确定了一点法公式, 求出二项式无阻流量, 再利用无阻流量、产量稳定、流动压力等参数反求二项式产能方程 A、B 值, 从而建立单井二项式产能方程。通过常规多点产能回压试井和修正等时试井 37 井次、80 个测试点, 进行无因次压力和无因次产量进行线性回归, 得到回归数学方程模型, 求出另外一种一点法公式。利用无阻流量、产量稳定、流动压力反求指数式产能方程 C、n 值, 从而建立单井指数式产能方程。通过两种方法确定一点法产能经验公式, 用实际数据检验误差在 10% 以内, 为绘制 IPR 曲线和制定合理产量提供依据。该一点法经验公式具有测试时间短、影响气井产量少的特点, 填补了吉林油田在此领域的技术空白。

关键词 吉林油田; 试井解释; 产能试井; 一点法试井; 无阻流量; 二项式产能方程; 指数式产能方程

中图分类号: TE353

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.06.012

Application of single-point well testing interpretation method in Jilin gas field

WANG Haijun¹, YANG Tianhong², SUN Wei¹, JIANG Wenxin¹, ZHANG Yingkui²

1. Carbon Dioxide Capture, Storage and Enhanced Oil Recovery (CCS-EOR) Development Company of Jilin Oilfield Branch, CNPC, Songyuan, Jilin 138000, China

2. Exploration and Development Research Institute of Jilin Oilfield Branch, CNPC, Songyuan, Jilin 138000, China

Abstract: In response to the long testing time required for multi-point well testing in the Jilin gas field, data from 28 test points were analyzed through conventional multi-point productivity backpressure well testing and modified isochronous well testing were analyzed. The average value of α was found to be 0.857 9, and a single-point method formula was established. This formula allowed for the calculation of the binomial open flow rate. And using parameters such as open flow rate, stable production, and flow pressure, the coefficients A and B of the binomial productivity equation were derived, forming a single-well binomial productivity equation. Additionally, a linear regression was performed on the dimensionless pressure and dimensionless production data from 37 wells and 80 test points using conventional multi-point productivity backpressure well testing and modified isochronous well testing methods, establishing a mathematical regression model and an alternative single-point method formula. Using parameters such as open flow rate, stable production, and flow pressure, the exponential productivity equation (C and n values) for a single well was also derived. Two methods were employed to develop an empirical formula for the single-point well testing, with a testing error within 10% when verified against actual data, providing a foundation for constructing IPR curves and determining optimal production rates. This empirical formula is characterized by shorter testing times and minimal impact on well production, filling a technical gap in this field for the Jilin oilfield.

Keywords: Jilin oilfield; well test interpretation; productivity testing; single-point well testing; open flow rate; binomial productivity equation; exponential productivity equation

一点法产能试井操作简单, 测试时间短, 在气田的产能评价中得到了广泛应用。在一点法经验

公式研究方面, 陈元千^[1-2]针对多点稳定试井费时等问题, 通过四川盆地 16 口井测试资料分析, 确定

$\alpha = 0.25$, 建立了一点稳定试井法及经验公式, 方便了矿场应用。但在实际应用中发现不同的气田 α 值都会有所差别。张盛宗等^[3] 针对陈元千常规一点法 α 取值进行了探讨, 指出 $\alpha = 0.25$ 仅代表气井开采初期的特定情况。唐洪俊等^[4-5] 推导了变产能系数一点法产能公式, 用变系数法确定气井无阻流量。王富平等^[6] 基于考虑启动压力影响的低渗气藏产能方程。梁斌等^[7] 利用东海西湖凹陷压裂井试井资料修正 α 值的一点法产能方程。李跃刚等^[8-9] 提出了测试压差控制界限的一点法产能预测公式。李元生等^[10-11] 推导了确定了经验参数 α 和 δ 取值及影响因素及建立了考虑非均质及表皮因子的一点法试井资料处理方法。钟家峻等^[12] 基于苏里格低渗透气藏建立了数值模拟方法一点法产能经验公式。很多学者^[13-14] 针对不同类型气田特点和测试资料, 通过修正 α 值, 建立相应二项式一点法产能经验公式。这些方法是基于正常资料基础上进行 α 值的修正。对于异常资料的产能计算及处理方法, 徐俊芳等^[15] 提出了用延续期流动初期的压力和产量数据纳入产能试井分析的修正等时试井分析方法。张英魁^[16] 给出了用 $q_{\text{AOF}} - (Kh)$ 指数回归公式求取无阻流量的方法。张慧宇^[17] 针对异常资料导致的二项式斜率下倾 ($B < 0$) 的情况提出用试井的方法求出非达西流系数 D 值的计算方法。夏显佰等^[18] 用试井软件校正模型的方法消除试井曲线失真的现象, 求得了气井的产能参数。以上资料处理的方法及经验公式主要为二项式产能方程求取的一点法经验公式方法。对于气井指数式方程测试资料研究较少。文章在前人研究的基础上同时进行了两种一点法经验公式的求取, 有效的指导了吉林油田的气田开发。

1 利用二项式法建立一点法经验公式

一点法经验公式, 有可靠的理论基础。国内科研技术人员在推导的基础上, 结合实际测试资料分析, 建立针对不同类型气田的一点法产能经验公式, 广泛应用于气井产能评价。

1.1 一点法产能公式的理论基础

基于多点产能试井资料的拟稳定气藏二项式产能方程为

$$p_{\text{R}}^2 - p_{\text{wf}}^2 = Aq_{\text{g}} + Bq_{\text{g}}^2 \quad (1)$$

式中: p_{R} 为地层压力, MPa; q_{AOF} 为无阻流量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; q_{g} 为地面标准条件下气量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; p_{wf}

为井底流动压力, MPa; A 、 B 为气层特性和天然气物性参数有关的常数。

当井底流压等于大气压力时 $p_{\text{wf}} = 0.101 \text{ MPa}$, 无阻流量 q_{AOF} 的关系式

$$p_{\text{R}}^2 - 0.101^2 = Aq_{\text{AOF}} + Bq_{\text{AOF}}^2 \quad (2)$$

取 $p_{\text{R}}^2 - 0.101^2 \approx p_{\text{R}}^2$, 并(1)比(2)式, 进行简化整理如下

$$\frac{p_{\text{R}}^2 - p_{\text{wf}}^2}{p_{\text{R}}^2} = \alpha \frac{q_{\text{g}}}{q_{\text{AOF}}} + (1 - \alpha) \left(\frac{q_{\text{g}}}{q_{\text{AOF}}} \right)^2 \quad (3)$$

设定: 无因次压力

$$p_{\text{D}} = \frac{p_{\text{R}}^2 - p_{\text{wf}}^2}{p_{\text{R}}^2} \quad (4)$$

无因次产量

$$q_{\text{D}} = \frac{q_{\text{g}}}{q_{\text{AOF}}} \quad (5)$$

一点法经验系数

$$\alpha = \frac{A}{A + Bq_{\text{AOF}}} \quad (6)$$

整理(3)求得无因次二项式产能方程

$$p_{\text{D}} = \alpha q_{\text{D}} + (1 - \alpha) q_{\text{D}}^2 \quad (7)$$

由(7)解得无因次产量为

$$q_{\text{D}} = \frac{\alpha \left[\sqrt{1 + 4 \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha^2} \right) p_{\text{D}}} - 1 \right]}{2(1 - \alpha)} \quad (8)$$

绝对无阻流量为

$$q_{\text{AOF}} = \frac{2(1 - \alpha) q_{\text{g}}}{\alpha \left[\sqrt{1 + 4 \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha^2} \right) p_{\text{D}}} - 1 \right]} \quad (9)$$

式(9)即为一点法试井无阻流量经验公式。只要确定 α 值, 既可以建立气田适合的一点法公式, 根据单点测试的产量及井底流压及地层压力, 即可计算气井的绝对无阻流量。

$$\text{令 } a_1 = \frac{\alpha}{2(1 - \alpha)}, a_2 = 4 \left(\frac{1 - \alpha}{4\alpha^2} \right) \quad (10)$$

得到无因次产量及绝对无阻流量的简化公式如下

$$q_{\text{D}} = a_1 (\sqrt{1 + a_2 p_{\text{D}}} - 1) \quad (11)$$

$$q_{\text{AOF}} = \frac{q_{\text{g}}}{a_1 (\sqrt{1 + a_2 p_{\text{D}}} - 1)} \quad (12)$$

1.2 一点法经验公式的建立

根据吉林气区的 8 个气田现场资料, 通过常规多点产能回压试井和修正等时试井 28 个测试点数

据,将每次确定的无阻流量和地层压力值,经过公式(4)和(5)求取无因次压力 P_D 和无因次产量 q_D ,通过公式(6)计算出 α 的平均值为 0.857 9。

将此值 α 代入公式(9)得到吉林 8 个气田一点法试井无阻流量经验公式

$$q_{AOF} = \frac{q_g}{3.0186(\sqrt{1 + 0.7723p_D} - 1)} \quad (13)$$

利用二项式法推导的吉林一点法经验公式与通过常规多点产能回压试井和修正等时试井 28 井次测试点二项式计算无阻流量对比,平均相对误差为 9.62%。并留 3 口井为检验井,这 3 口井均不参加上述运算。计算相对误差平均为 6.15%。说明该经验公式适合吉林气区的 8 个气田现场应用。

2 利用指数式法建立一点法经验公式

指数式方程又称“简单分析”,通过以下推导及实践数据拟合,得到吉林气田的另外一种一点法公式。

2.1 一点法经验公式的理论基础

产能试井中地面气产量和井底流压满足关系式^[19]

$$q_g = C(p_R^2 - p_{wf}^2)^n \quad (14)$$

式中: C 为产能方程的系数,是气藏和气体性质的函数; n 为产能方程的系数(称渗流指数),是表征流动特性的常数,当只存在层流时, $n=1$;当只存在紊流时 $n=0.5$;当流动从层流向紊流过度时, $0.5 < n < 1$ 。

当 $p_{wf} = 0.101$ MPa 时

$$q_{AOF} = C(p_R^2 - 0.101^2)^n \quad (15)$$

由于 $p_R^2 \gg 0.101^2$

将(14)式除以(15)得(16)

$$\frac{q_g}{q_{AOF}} = \left(\frac{p_R^2 - p_{wf}^2}{p_R^2} \right)^n \quad (16)$$

简化为无因次压力与产量公式

$$q_D = (P_D)^n \quad (17)$$

在半对数曲线上 q_D 与 P_D 呈现线性关系,这是求解经验公式的关键。求解方程得到无阻流量

$$q_{AOF} = \frac{q_g}{\alpha_3 P_D^{\alpha_4}} \quad (18)$$

式(18)即为另外一种一点法无阻流量经验公式。式中 q_D 及 P_D 计算公式见(4)和(5)公式。式中 α_3 及 α_4 为计算无阻流量指数式方程常数项。只要确定 α_3 及 α_4 值,既可以建立气田指数式一点法公式,根据单点测试的产量及井底流压及地层压

力,计算气井的绝对无阻流量。

2.2 利用指数式方程方法求取一点法经验公式

根据吉林气区的八个气田现场统计,通过常规多点产能回压试井和修正等时试井 37 井次、80 个测试点的测试数据,将前人多点产能试井资料地层压力 p_R 、无阻流量 q_{AOF} 、稳定产量 q_g 、稳定流动压力 p_{wf} 进行统计,计算出每个测试点 p_D 和 q_D 值,然后将其画在双对数图上,呈一条直线关系(见图 1),经线性回归后,得到直线的斜率为 0.803 1,相关系数为 0.955 3。

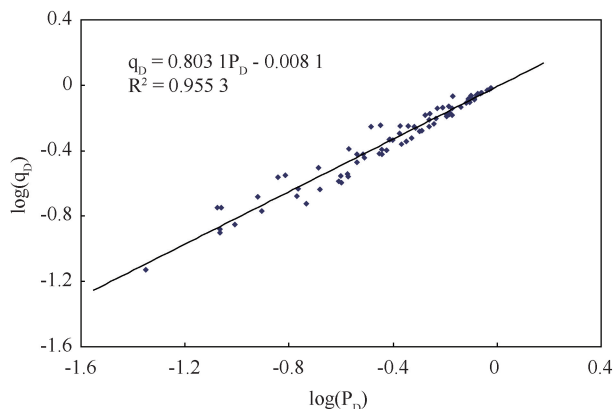


图1 吉林油区气井无因次产量与无因次压力关系曲线图

Fig. 1 Relationship curve between dimensionless production and pressure of gas wells in Jilin oil region

通过拟合求得 α_4 值,代入公式(18)得到吉林八个气田一点法无阻流量经验公式

$$q_{AOF} = \frac{q_g}{0.9815 p_D^{0.8031}} \quad (19)$$

利用指数式法推导的吉林一点法公式与常规多点产能回压试井和修正等时试井指数式计算无阻流量对比,平均相对误差为 9.05%。并留 3 口井为检验井,这 3 口井均不参加上述运算,计算相对误差平均为 7.40%。说明该经验公式适合吉林气区的 8 个气田现场应用。

在此基础上计算出经验方程式的产能方程系数 C ,即

$$C = \frac{q_g}{(p_D \times p_R^2)^n} = \frac{q_g}{(p_R^2 - p_{wf}^2)^n} \quad (20)$$

即得到指数式通式

$$q_g = C(p_R^2 - p_{wf}^2)^n \quad (21)$$

已知气井产能方程就可以作该井的 IPR 流入曲线,为气田开发提供依据。

3 实例分析

在吉林气田中利用以上方法已经成功不仅计

算无阻流量 23 井次,而且还确定出二项式和指数式方程,为气田开发提供依据。

(1) A 井测试基本情况

该井在 2017 年 5 月 29 日~6 月 8 日分别采用 4. 763、7. 94、9. 525、11. 11 mm 油嘴进行修正等时试井测试,延续生产采用 7. 94 mm 油嘴进行短期试

采,见表 1。应选用生产稳定的延续生产的日产气量 $10.862\ 9\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 、流压 18. 356 3 MPa、油压 14. 16 MPa、地层压力 28. 528 MPa、关井油压 21. 15 MPa。进行修正等时试井解释,二项式无阻流量为 $19.548\ 3\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 、指数式无阻流量为 $18.340\ 3\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

表 1 A 井修正等时试井测试数据表
Table 1 A well revised isochronous well testing data table

开井	油嘴/ mm	油压/ MPa	日产气量/ ($10^4\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	流压/ MPa	折流压/ MPa	关井	油压/ MPa	关井最高 压力/MPa	折关井最高 压力/MPa
关井恢复	-	-	-	-	-	-	21. 15	28. 169	28. 3573
一开	4. 763	16. 79	5. 590 0	24. 300 0	25. 444 3	—关	20. 05	27. 521	27. 709 0
二开	7. 94	14. 56	12. 014 7	19. 740 0	19. 914 3	二关	21. 03	27. 124	27. 312 3
三开	9. 525	13. 08	14. 568 0	17. 328 0	17. 554 3	三关	21. 09	26. 814	27. 002 3
四开	11. 11	10. 82	18. 809 6	14. 293 0	14. 381 3	-	-	-	-
延续	7. 94	14. 16	10. 862 9	18. 212 0	18. 356 3	-	-	-	-

注:2017 年 5 月 29 日~6 月 18 日进行修正等时试井,6 月 18 日~20 日进行压力恢复试井,解释地层压力为 28. 323 MPa(2 800. 0 m)、折中部压力 28. 528 MPa。

(2) 建立 A 井二项式产能方程

在二项式产能方程中:第一步,将 $P_R=28.528\ \text{MPa}$ 、 $q_g=10.862\ 9\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 、 $P_{wf}=18.356\ 3\ \text{MPa}$ 代入公式(12)计算无阻流量 $q_{AOF}=17.535\ 9\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$;第二步,将已知 $P_R=28.528\ \text{MPa}$ 、 $q_{AOF}=17.535\ 9\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 、 $q_g=10.862\ 9\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 、 $P_{wf}=18.356\ 3\ \text{MPa}$ 代入二元一次方程组公式(1)(2)计算二项式产能方程 $A=3.9817$ 和 $B=3.7594\times10^{-3}$;第三步,将气井的二项式产能方程 A 值和 B 值代入公式(1),可求出二项式产能方程

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = 3.981\ 7q_g + 3.759\ 4\times10^{-3}q_g^2 \quad (22)$$

吉林一点法计算无阻流量: $q_{AOF}=17.535\ 9\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,与修正等时试井二项式解释结果对比相对误差为 10. 0%。

(3) 建立 A 井指数式产能方程

在指数式产能方程中:第一步,将 $P_R=28.528\ \text{MPa}$ 、 $q_g=10.862\ 9\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 、 $P_{wf}=18.356\ 3\ \text{MPa}$ 代入公式(18)计算无阻流量, $q_{AOF}=17.000\ 5\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$;第二步,将 $P_R=28.528\ \text{MPa}$ 、 $q_{AOF}=17.000\ 5\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 、 $q_g=10.862\ 9\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 、 $P_{wf}=18.356\ 3\ \text{MPa}$ 代入二元一次方程组公式(14)(15)计算指数式产能方程: $n=0.838\ 0$ 和 $C=0.618\ 6$;第三步,将 C 值和 n 值代入方程(14),可求出指数式产能方程

$$q_g = 0.618\ 6(p_R^2 - p_{wf}^2)^{0.838\ 0} \quad (23)$$

吉林一点法经验公式计算无阻流量 $17.000\ 5\times10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。与修正等时试井指数式解释结果对比相对误差为 7. 3%。

4 结论

(1)基于推导二项式及指数式方程得到的吉林气田一点法经验公式方法,用实际数据检验误差在 10%以内,对吉林气区具有很好的适应性。

(2)利用无阻流量、稳定产量、流动压力反求指数式单井产能方程通式,可以进行不同压差下的产量预测。

(3)利用求取的一点法经验公式,只是测试一个稳定流量和流压,就可以进行产能计算。可以通过修正参数,进一步提高一点法经验公式的适应性。弥补了吉林气田在此领域的技术空白。

(4)一点法经验测试具有占井时间短、影响气井产量少的显著特点,根据此方法每年吉林气区可以减少 30 口井的多点产能测试工作量,经济效益非常可观。

致谢:感谢吉林油田分公司二氧化碳捕集埋存与提高采收率(CCS-EOR)开发公司王少清博士在试井解释方法方面给予的大力指导和帮助。

参考文献

[1] 陈元千. 油藏工程计算方法[M]. 北京:石油工业出版社,1990:5-10.
[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,1987,7(1):59-63.
CHEN Yuanqian. A simple method for determining absolute open flow rate of gas well[J]. Natural Gas Industry, 1987, 7(1):59-63.
[3] 张盛宗,李跃刚. 变系数确定气井绝对无阻流量方法

- [J]. 石油钻采工艺,1992(3):91-92.
- ZHANG Shengzong, LI Yuegang. Method of determining absolute open flow of gas well with variable coefficient[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1992(3):91-92.
- [4] 唐洪俊. 变系数确定气井绝对无阻流量的新方法[J]. 天然气工业,1996,16(4):82-83.
- TANG Hongjun. A new method for determining the absolute open flow of gas wells with variable coefficient [J]. Natural Gas Industry, 1996, 16(4):82-83.
- [5] 王会强, 邓清源, 于鹏, 等. 金秋气田变系数一点法产能公式建立与应用[J]. 油气井测试, 2022, 31(6):6-10.
- WANG Huiqiang, DENG Qingyuan, YU Peng, et al. Establishment and application of productivity formula of variable coefficient one point method in Jinjia gas field [J]. Well Testing, 2022, 31(6):6-10.
- [6] 王富平, 黄全华, 孙雷, 等. 低渗透气藏气井一点法产能预测公式[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(6):651-653.
- WANG Fuping, HUANG Quanhua, SUN Lei, et al. A single point deliverability formula for gas well in low-permeability gas reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(6):651-653.
- [7] 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.
- [8] 李跃刚. 利用一点法测试建立气井的产能方程—陈元千提出方法的改进[J]. 石油勘探与开发, 1992, 19(5):91-93.
- LI Yuegang. Establishment of gas well productivity equation by one point method testing—Improvement of the method proposed by Chen Yuanqian[J]. Petroleum Exploration and Development, 1992, 19(5):91-93.
- [9] 李跃刚, 郝玉鸿, 范继武. “单点法”确定气井无阻流量的影响因素分析[J]. 海洋石油, 2003(1):36-41.
- LI Yuegang, HAO Yuhong, FAN Jiwu. Factors analysis about non-resistance flow of gas well defined by “spot measurement”[J]. Offshore Oil, 2003(1):36-41.
- [10] 李元生, 李相方, 藤赛男, 等. 低渗气藏产水气井一点法产能试井研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(7):156-159.
- LI Yuansheng, LI Xiangfang, TENG Sainan, et al. The research of a single point deliverability forecasting formula for water-producing gas well in low-permeability reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(7):156-159.
- [11] 李元生, 李相方, 藤赛男, 等. 考虑非均质及表皮因子的一点法试井资料处理方法[J]. 断块油气田, 2013, 20(2):258-261.
- LI Yuansheng, LI Xiangfang, TENG Sainan, et al. Single-point method for well test data processing considering reservoir heterogeneity and skin factor [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(2):258-261.
- [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] 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 for processing production test data of gas field one point method [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2):111-113.
- [14] 陈建华, 骆逸婷, 刘凯, 等. 考虑应力敏感影响的气井产能分析新方法[J]. 油气井测试, 2020, 29(2):1-6.
- CHEN Jianhua, LUO Yiting, LIU Kai, et al. A new method for gas well productivity analysis considering stress sensitivity [J]. Well Testing, 2020, 29(2):1-6.
- [15] 徐俊芳, 陈恒, 袁冬, 等. 修正等时试井异常资料处理方法研究[J]. 油气井测试, 2013, 22(5):21-24.
- XU Junfang, CHEN Heng, YUAN Dong, et al. Research on processing methods for correcting abnormal data in isochronous well testing [J]. Well Testing, 2013, 22(5):21-24.
- [16] 张英魁. 试井解释技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社, 2019:68-73.
- [17] 张慧宇. 致密气藏试井异常资料产能计算新方法[J]. 油气井测试, 2019, 28(2):1-5.
- ZHANG Huiyu. A new method of productivity calculation for wells with abnormal testing data in tight gas reservoir [J]. Well Testing, 2019, 28(2):1-5.
- [18] 夏显佰, 王维君, 胡广军, 等. 气井系统试井异常资料处理中校正模型的应用[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(4):344-346.
- XIA Xianbai, WANG Weijun, HU Guangjun, et al. Application of correction model in abnormal well test data processing in gas well system [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(4):344-346.
- [19] 试井手册编写组. 试井手册(下)[M]. 北京:石油工业出版社, 1991:279-280.

编辑 吴志力

第一作者简介:王海军,男,1970年出生,高级工程师,大学本科,1995年毕业于大庆石油学院石油地质勘查专业,现从事油气田开发研究工作。电话:0438-6222758,13624385178,Email:wanghai-jl@petrochina.com.cn。通信地址:吉林省松原市吉林油田分公司二氧化碳开发公司,邮政编码:138000。