

基于压力的气井二项式产能方程曲线校正新方法

吴英¹, 马焕英², 张子前², 叶旭峰³

1. 中海油研究总院有限责任公司水合物和海洋资源战略研究中心 北京 100192

2. 中海油田服务股份有限公司油田技术事业部 河北廊坊 065201

3. 中国石油大庆钻探工程公司试油测试公司 黑龙江大庆 163412

通讯作者: Email: 87087884@qq.com

引用: 吴英, 马焕英, 张子前, 等. 基于压力的气井二项式产能方程曲线校正新方法[J]. 油气井测试, 2022, 31(6): 1-5.

Cite: WU Ying, MA Huanying, ZHANG Ziqian, et al. A new correction method of gas well binomial productivity equation curve based on pressure [J]. Well Testing, 2022, 31(6): 1-5.

摘要 渤海海上气田在实际系统试气时,受多种因素影响,许多井的系统试气资料出现异常,不能直接利用指数式和二项式气井产能方程得到准确评价气井产能的相关参数和重要指标,无法计算气井无阻流量。通过现场实际经验,结合油藏工程理论方法,分析气井系统试井资料出现异常的4种可能原因,理论推导出气井二项式产能曲线校正新方法,并采用试凑法对理论公式中的测试压力进行校正,经实例气井测试资料计算得到校正后的二项式产能方程系数 A 为 0.001 6、 B 为 0.388 9、回归系数 R^2 为 1,计算的无阻流量 $480 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,气井投产后产量高,证明基于压力校正后的二项式产能方程理论公式和曲线符合气井产能规律,能真实反映气井实际产能,可为渤海海上气田勘探开发提供科学依据,类似气井可借鉴和应用。

关键词 气井;系统试井;二项式产能方程;压力校正;无阻流量;试凑法;产能曲线

中图分类号: TE353

文献标识码: A

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.06.001

A new correction method of gas well binomial productivity equation curve based on pressure

WU Ying¹, MA Huanying², ZHANG Ziqian², YE Xufeng³

1. Hydrates and Marine Resources Strategic Research Center, CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China

2. Well Tech Division, China Oilfield Services Co., Ltd., CNOOC, LangFang HeBei 065201, China

3. Oil Testing Company of PetroChina Daqing Drilling Engineering Company, Daqing Heilongjiang 163412, China

Abstract: In view of the abnormal situation of the well test data of the gas well system in Bohai field work due to various reasons, the abnormal shape of the productivity curve, the relevant parameters and important indicators for the accurate evaluation of the gas well productivity cannot be directly obtained by the exponential method and binomial method, so the open flow calculation can't be carried out. Based on the practical experience in the field and the theoretical method of reservoir engineering, this paper analyzes four possible causes of anomalies in the well test data of the gas well system, theoretically deduces a new method for correcting the binomial productivity curve of the gas well, and uses the trial and error method to correct the test pressure in the theoretical formula. The corrected binomial productivity equation coefficients $A=0.001\ 6$, $B=0.388\ 9$ and regression coefficient $R^2=1$ are calculated from the test data of Bohai gas Wells. The calculated open flow is $480 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, and the production is high after the gas well is put into operation. It is proved that the theoretical formula and curve based on pressure correction not only accord with the productivity law, but also can reflect the actual productivity of gas Wells, which can provide scientific basis for the exploration and development of Bohai offshore gas fields, and can be used for reference and application in similar gas Wells.

Keywords: gas well; system well test; productivity binomial equation; pressure correction; open flow productivity; cut-and-trial; deliverability curve

目前在渤海海上探井试气时,为得到气井产能,一般采用多个气嘴求产进行系统试气,利用测试数据得到气井产能二项式方程和指数式方程,计

算气井无阻流量,然后进行产能评价。然而在现场实际工作中受诸多因素的影响,系统试井所采集的产量和压力数据往往存在不同程度的偏差,导致产

能曲线出现异常形态,无法准确求得气井无阻流量等有关参数。因此,必须对气井试井的异常资料进行分析和处理,找出气井产能测试资料异常(指数方程指数 $n > 1$,二项式产能方程线性回归相关系数 R 低、斜率为负、非直线)的原因,并对其进行修正,从而求得正确的气井产能相关参数来计算无阻流量,继而来评价气井产能。

前人对气井系统试井资料异常原因分析、处理和构建、求解新的产能二项式方程做了大量的研究工作。夏显佰等^[1]、王坤等^[2]、高创波等^[3]针对气井系统试井资料异常进行了原因分析,并利用基于地层压力和井底流压校正的试凑法对气井系统试井异常资料进行处理校正。姜梅枝^[4]利用二项式产能方程处理气井系统试井异常现象,并采用试值法进行求解。阳晓燕等^[5]利用 Saphir 试井软件进行试井解释处理得到动态表皮系数,求出校正后的流压。刘立明等^[6]、刘艳梅^[7]利用拟压力方法建立新的凝析气产能二项式方程。李星民等^[8]利用二项式-单点法的联解方法得到二项式产能系数和无阻流量值。苟宏刚等^[9]利用压力叠加方法对气井系统试井异常资料进行处理校正。虽然前人都对气井系统试井资料异常给出了原因分析,并构建方程进行了校正,但校正方程求解繁琐,试凑法没有给出试凑参数范围,部分需要利用语言编程、Excel 规划求解宏以及第三方专业软件来求解,求解过程不利于操作。

本文基于气井渗流方程,采用压力校正方式对气井二项式产能曲线方程进行修正,更接近于现场实际生产,且在求解方程中采用简便的试凑法,给出了试凑法中试凑参数的范围及如何判断试值趋势方法,缩短了试凑求解时间,且求出压力差后,可以与试井结果进行互相验证。本文的方法可为渤海海上气田勘探开发提供科学依据。

1 系统试气产能方程异常

目前在系统试气进行求产和计算无阻流量时,通常采用二项式方程和指数式产能方程^[10-12]进行线性回归,即

$$\frac{(p_R^2 - p_{wf}^2)}{q_{sc}} = A + Bq_{sc} \quad (1)$$

$$\lg q_{sc} = n(p_R^2 - p_{wf}^2) + \lg C \quad (2)$$

式中: q_{sc} 为地面标准条件气产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; p_R 为气藏地层压力,MPa; p_{wf} 为井底流动压力,MPa; A 、 B 为二项式产能方程系数, A 为层流系数, B 为紊流系

数; n 为指数产能方程指数, $0.5 \sim 1$; C 为产能方程系数(气藏和气体性质的函数), $10^4 \text{ m}^3/\text{d}/(\text{MPa}^{2n})$ 。

在实际系统试气中,由于多种因素影响,许多井的系统试气资料出现异常,实际线性回归发生如下现象:指数方程指数 $n > 1$,二项式产能方程线性回归相关系数 R 低、斜率为负、非直线。渤海某凝析气藏探井 1 测试井段 2 425.0~2 436.5 m,射开厚度 11.5 m,地层压力 23.557 MPa、泡点压力 22.9 MPa。利用系统试气数据进行稳定试井产能评价(见表 1),因为地下凝析油气呈单相,所以采用下式将地面凝析油折算成地面标准条件下干气气体当量^[13],即

$$M_o = \frac{44.29\gamma_o}{1.03 - \gamma_o} \quad (3)$$

$$GE_o = \frac{24\,056\gamma_o}{M_o} \quad (4)$$

式中: M_o 为凝析油分子量; f ; GE_o 为 1 m^3 凝析油的当量气体体积, m^3 ; γ_o 为凝析油相对密度, f 。

计算结果见表 1,利用表中数据进行指数式和二项式产能方程回归均出现异常(见图 1):二项式产能方程曲线反向、紊流系数 B 为负值($B = -0.0112$),指数式产能方程 $n = 2.8799 > 1$,因此无法直接利用测试数据准确计算无阻流量。

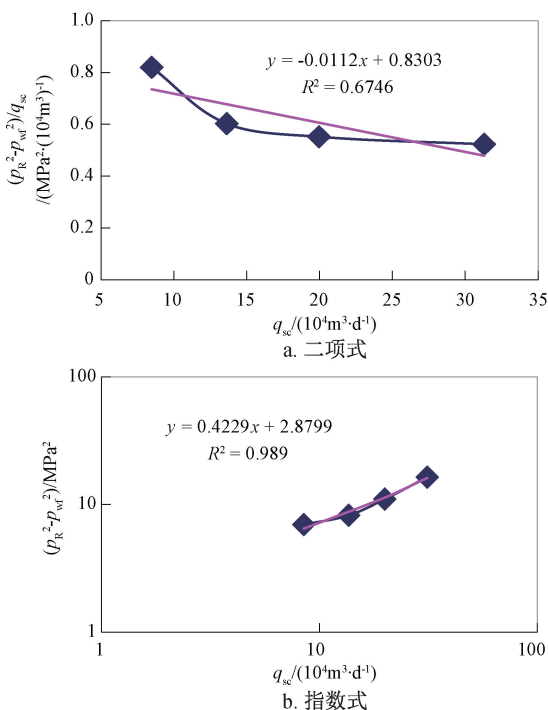


图 1 渤海某凝析气藏探井 1 产能方程曲线

Fig. 1 Productivity equation curve of exploration well 1 of a condensate gas reservoir in Bohai

表 1 渤海某凝析气藏探井 1 系统试气数据表
Table 1 Gas test data table of exploration well 1 of a condensate gas reservoir in Bohai

油嘴/ mm	流压/ MPa	生产压 差/MPa	日产油/ (m ³ ·d ⁻¹)	测试日产 气/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	折算日产 气/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
5.56	23.409	0.148	0	8.48	8.478 9
7.14	23.382	0.175	17.5	13.35	13.633 1
8.73	23.322	0.235	31.4	19.46	19.965 2
10.32	23.207	0.350	41.8	30.63	31.300 2

2 产能方程曲线异常原因分析

根据气藏的理论分析,传统的气藏二项式产能方程只能描述高速非达西渗流。系统试气试井资料反常,说明在试气过程中,气藏或者气井可能形成了低速非达西渗流,分析可能主要存在以下几方面原因。

2.1 气藏类型

不同的气藏类型,其油气呈现的地下渗流特征也不尽相同。对于凝析气藏,当气体从储层流向井底时,随着储层压力的逐渐降低,井底附近的储层会凝析出凝析油,且量越来越多,后果是产生附加阻力或在井筒内形成积液,使测得的井底压力偏小,对于带油环的凝析气藏更加严重。对于边底水油气藏,由于测试流量过高,带出部分底水或在井底形成积液,影响井底流压测定,或在较大压差下由于水侵入而使气增加很少。

2.2 储层物性

气藏的储层是油气的地下渗流通道。致密气藏的储层物性因为低孔低渗导致测试时压力恢复时间特别长,使得测试的地层压力偏小,同时对于上下无良好隔夹层的两气层储层,层间干扰也会造成流量的测试失真,因此储层物性对气井测试影响很大。

2.3 钻完井方式

气藏的储层条件不同,钻完井方式一般也是不同的,由此造成的井筒井底污染程度也是不同的。虽然在试气测试前进行了井筒放喷清污,但仍有可能不能彻底清除污染,导致在测试过程中随着生产压差的增大,井底解堵,清除井筒或井底污染,使得气井在测试重的前后时间段里渗流特征不同。

2.4 试井方式

气井试气试井的测试制度对测试结果也有非常大的影响,特别对于气井产能试井。气井产能试井一般是从较小产量或较小油嘴开始,依次增大。

若从大到小,则在较大产气量或较大油嘴下可将井底积液带出,而在后期的低产气量或小油嘴下却无法将积液带出,且井底积液随着气井投产时间的增加而逐渐产生,因此试气工作制度即油嘴大小也是影响气井试气试井资料异常原因之一。

渤海某探井 1 为凝析气井,通过上述可能原因分析:

(1) 地层压力 (23.557 MPa) 大于泡点压力 (22.9 MPa), 因此井底无凝析油析出;

(2) 储层物性中等 (试井渗透率), 因此不存在压力恢复时间长;

(3) 地面产量无水, 因此井筒积液不存在或微小。

因此,渤海某探井 1 系统试气试井资料反常的最可能原因是钻井过程中受到钻井液的浸泡和污染,在井筒附近形成污染带,导致附加压力降和渗流速度降低,形成低速非达西渗流,改变了地层渗流规律,因此普通的二项式产能方程无法描述该气井的生产状况,必须对二项式产能方程进行校正、建立新的产能方程。

3 气井二项式产能方程曲线校正新方法

为了更好的利用二项式产能方式描述气井生产状况,须对二项式产能方程进行校正,以建立新的二项式产能方程,并进行求解。

3.1 新方法理论推导

根据渗流力学基本理论,地层高速非达西渗流和低速非达西都符合气体平面径向流规律,在稳定渗流条件下,各截面积的质量流动不变,可采用下述公式描述其渗流规律、渗流速度 v 和标准条件下天然气密度 ρ_{gsc} ^[14-15],即

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{K}v + \beta\rho_g v^2 \tag{5}$$

$$v = \frac{q_m}{\rho_g A} = \frac{\rho_{\text{gsc}} q_{\text{sc}}}{\rho_g 2\pi r h} \tag{6}$$

$$\rho_{\text{gsc}} = \frac{p_{\text{sc}} M}{RT_{\text{sc}} Z_{\text{sc}}} \tag{7}$$

式中: dp/dr 为压力求导, MPa/m; μ 为气体黏度, mPa·s; K 为气层渗透率, mD; v 为渗流速度, m/d; h 为气层厚度, m; r_w 、 r_e 为井半径、供给半径, m; ρ_g 、 ρ_{gsc} 为气密度、标况下气密度, g/m³; Z 、 Z_{sc} 为气偏差系数、标况下气偏差系数, f; T 、 T_{sc} 为地层温度、标况下温度, f。

考虑到由于污染导致的附加压力降 Δp , 进一步整理得

$$p_R^2 - (p_{wf} + \Delta p)^2 = \left(\frac{\mu}{\pi K h} \frac{p_{sc} Z T}{Z_{sc} T_{sc}} \ln \frac{r_e}{r_w} \right) q_{sc} + \left(\frac{\beta \cdot \rho_g}{2 \pi^2 h^2} \frac{p_{sc}^2}{Z_{sc}^2 T_{sc}^2 p} \right) \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right) q_{sc}^2 \quad (8)$$

式中: p_R 为气藏地层压力, MPa; p_{wf} 为气井测试流压, MPa; q_{sc} 为地面标准条件气产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

进一步简化得

$$p_R^2 - (p_{wf} + \Delta p)^2 = A q_{sc} + B q_{sc}^2 \quad (9)$$

式(9)即为处理系统试井资料异常的新产能方程。

3.2 新方法求解

通过(9)式处理表1数据得

$$\begin{cases} p_{R1}^2 - (p_{wf1} + \Delta p)^2 = A q_{sc1} + B q_{sc1}^2 \\ p_{R2}^2 - (p_{wf2} + \Delta p)^2 = A q_{sc2} + B q_{sc2}^2 \\ p_{R3}^2 - (p_{wf3} + \Delta p)^2 = A q_{sc3} + B q_{sc3}^2 \\ p_{R4}^2 - (p_{wf4} + \Delta p)^2 = A q_{sc4} + B q_{sc4}^2 \end{cases} \quad (10)$$

采用试凑法求解式(10)中的 A 和 B , 继而求得无阻流量 q_{AOF} , 进行产能评价。

试凑法具体步骤: 先假设一个 Δp , 然后做 $(p_R^2 - (p_{wf} + \Delta p)^2)/q_{sc}$ 与 q_{sc} 关系曲线, 通过试凑法, 直到 $(p_R^2 - (p_{wf} + \Delta p)^2)/q_{sc}$ 与 q_{sc} 关系曲线的线性回归系数 $R^2 > 0.99$ 、接近于 1 为止。在试凑过程中如果关系曲线上凸, 说明 Δp 值偏大; 如果关系曲线下凹, 说明 Δp 值偏小。

利用渤海某凝析气藏探井 1 测试表 1 数据, 通过试凑法, 得到很好的线性回归 (见图 2), 并求得附加压力降 $\Delta p = 0.0557 \text{ MPa}$ (以后 3 个点拟合试凑为主)、 $A = 0.0016$ 、 $B = 0.3889$ 、回归系数 $R^2 = 1$, R^2 满足大于 0.99 接近于 1 的要求。探井 1 试井解释结果表明: 该井试井解释渗透率为 $84.5 \sim 145.5 \text{ mD}$, 试井解释表皮系数为 $0.08 \sim 2.96$, 说明地层近井区域存在一定污染, 导致渗流速度降低, 形成低速非达西渗流, 可用式(9)来描述其渗流规律, 这也验证了本文提出的系统试井数据异常处理方法, 即基于压力的气井二项式产能曲线校正新方法和新的产能方程是正确的。

在实际应用中, 因为系统试井前期低产量测试点与后期高产量测试点的 Δp 可能会存在差异, 因此一般应用后几个高产量测试点进行试凑法线性回归拟合出系数 A 和 B 。

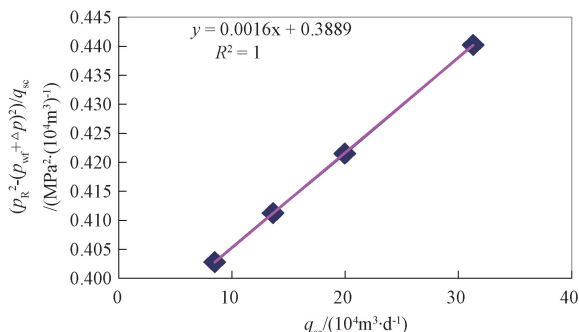


图 2 渤海某凝析气藏探井 1 修正二项式产能曲线

Fig. 2 Modified binomial productivity curve of exploration well 1 of a condensate gas reservoir in Bohai

3.3 无阻流量计算及产能评价

计算无阻流量公式为

$$q_{AOF} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B(p_R^2 - p_{wf}^2)}}{2B} \quad (11)$$

利用回归系数 $A = 0.0016$ 、 $B = 0.3889$ 和 $p_R = 23.557 \text{ MPa}$ 、 $p_{wf} = 0.101 \text{ MPa}$ 计算出无阻流量为 $480 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$, 说明产能高。在实际应用时, 一般取无阻流量 $1/6 \sim 1/4$ 对气井进行配产^[16], 考虑到若气井产量设计偏高, 地层压力下降快, 会加剧地层反凝析现象及水侵, 造成凝析油损失、影响气井产能, 参考渤海其他凝析气田生产实际情况以及输气体系输气量的变化, 并根据采气速度及井数, 凝析气层单井配产为 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 实施投产后产气量高。

4 结论

(1) 影响气井产能曲线异常因素较多, 如导致钻井液污染的钻完井方式、导致井底积液的气藏类型、导致渗透率低的储层物性、导致油嘴大小不一的试井方式等, 需仔细逐步分析。

(2) 通过分析, 探井 1 在钻井过程中受到钻井液的浸泡和污染, 在井筒附近形成污染带, 导致附加压力降和渗流速度降低, 形成低速非达西渗流, 改变了地层渗流规律, 普通的二项式产能方程无法描述该气井的生产状况, 必须对二项式产能方程进行校正、建立新的产能方程。

(3) 理论推导出气井二项式产能曲线校正新方法, 并采用试凑法对理论公式中的测试压力进行校正, 通过渤海实例气井测试资料计算得到校正后的二项式产能方程系数 $A = 0.0016$ 、 $B = 0.3889$ 、回归系数 $R^2 = 1$, 计算的无阻流量 $480 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 气井投产后产量高, 证明基于压力校正后的二项式产能方

程理论公式和曲线既符合气井产能规律,又能真实反映气井实际产能,可为渤海海上气田勘探开发提供科学依据,类似气井可借鉴和应用。

致谢:论文撰写过程中,得到了中海油田股份有限公司油田技术事业部资料解释中心开发生产技术支持,在此一并感谢。

参考文献

- [1] 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 for abnormal well test data processing in gas well system[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(4):344-346.
- [2] 王坤,陈明强,曹宝格,等.气井系统试井异常资料分析及处理方法[J].油气井测试,2008,17(4):29-31.
WANG Kun, CHEN Mingqiang, CAO Baoge, et al. Analysis and process method for abnormal data of systematic well testing in gas well[J]. Well Testing, 2008, 17(4):29-31.
- [3] 高创波,单永乐,吴胜利,等.涩北气田产能试井二项式方程曲线倒转校正方法[J].油气井测试,2014,23(6):25-28,31.
GAO Chuangbo, Shan Yongle, Wu Shengli, et al. Inverted correction method with productivity test binomial equation curve in Sebei gas field[J]. Well Testing, 2014, 23(6):25-28,31.
- [4] 姜梅枝.气井二项式产能方程曲线斜率为负值原因分析及方程修正[J].油气井测试,2013,22(2):25-28,31.
JIANG Meizhi. Binomial productivity equation slope of the curve for the analysis of the negative reasons and equation correction in gas well[J]. Well Testing, 2013, 22(2):25-28,31.
- [5] 阳晓燕,黄琴,江聪,等.系统试井异常资料判断及处理新方法在渤海油田的应用[C].2016油气田勘探与开发国际会议(2016 IFEDC)论文集(上册),2016:677-681.
YANG Xiaoyan, HUANG Qin, JIANG Cong, et al. Application of a new method to judge and process abnormal data of systematic well testing in Bohai oilfield[C]. IFEDC, 2016:677-681.
- [6] 刘立明,景向伟,李勇泳,等.凝析气藏产能方程异常分析[J].石油勘探与开发,2004,31(5):99-101.
LIU Liming, JING Xiangwei, LI Yongyong, et al. Abnormal productivity equation of condensate reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5):99-101.
- [7] 刘艳梅.气井二项式产能曲线反向修正方法[J].油气井测试,2011,20(6):17-19.
LIU Yanmei. Method of reverse correction for binomial production curve of gas well[J]. Well Testing, 2011, 20(6):17-19.

- [8] 李星民,高春光,郎兆新.气井系统试井异常资料处理及其应用[J].新疆石油地质,2005,26(5):552-553.
LI Xingmin, GAO Chunguang, LANG Zhaoxin. Application and abnormal data processing from systematic well test of gas well[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(5):552-553.
- [9] 苟宏刚,赵继承,秦志保,等.二项式产能方程系数异常情况(B小于零)分析[J].新疆石油地质,2006,27(2):210-212.
GOU Honggang, ZHAO Jicheng, QIN Zhibao, et al. Analysis of abnormal binomial coefficient ($B < 0$) for binomial deliverability equation[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(2):210-212.
- [10] 周红,潘琳,王婉.油气藏工程动态分析案例库建设[M].北京:中国地质大学出版社,2019:38-39.
- [11] 王明,张茂林,梅海燕,等.利用指数式产能方程的改进方法求取无阻流量[J].内蒙古石油化工,2008(10):80-81.
WANG Ming, ZHANG Maolin, MEI Haiyan, et al. Using an improved method of exponential productivity equation to calculate open flow rate[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008(10):80-81.
- [12] 刘鹏超,欧志鹏,周伟,等.一种新的高温高压气藏二项式产能方程[J].石油化工应用,2019,38(3):18-22.
LIU Pengchao, OU Zhipeng, ZHOU Wei, et al. A new method of deliverability equation in high temperature and high pressure gas reservoirs—considering unsteady pressure correction and stress sensitivity when the irreducible water is produced[J]. Petrochemical Industry Application, 2019, 38(3):18-22.
- [13] 陈元千.油气藏工程计算方法[M].北京:石油工业出版社,1990:21-27.
- [14] 李士伦.天然气工程[M].北京:石油工业出版社,2009:120-129.
- [15] 刘容和,郭春华,冯文光,等.低渗透气藏压裂井三项式方程推导及应用[J].天然气工业,2006,26(9):109-111.
LIU Ronghe, GUO Chunhua, FENG Wenguang, et al. Derivation and application of trinomial equation for fractured well in low permeability gas reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9):109-111.
- [16] 郭平,汪周华,朱忠谦,等.凝析气藏提高采收率技术与实例分析[M].北京:石油工业出版社,2015:95-97.

编辑 穆立婷

第一作者简介:吴英,女,1979年6月出生,高级工程师,硕士研究生,2005年毕业于中国石油大学(北京)油气田开发工程专业,现从事油气藏开发和海洋资源战略研究工作。电话:15210385367,Email:87087884@qq.com。通信地址:北京市昌平区蓬莱苑南街中海油科技园区 B1008 室,邮政编码:100192。