

引用格式:谭先红,梁斌,王帅,等.一种低渗储层凝析气藏气井产能评价方法研究[J].油气藏评价与开发,2021,11(5):724-729.

TAN Xianhong, LIANG Bin, WANG Shuai, et al. A productivity evaluation method of gas wells in condensate gas reservoirs with low permeability[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5): 724-729.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.05.009

## 一种低渗储层凝析气藏气井产能评价方法研究

谭先红,梁斌,王帅,田波,彭世强,李南,夏阳

(中海油研究总院有限责任公司,北京 100028)

**摘要:**采用常规二项式产能方程对渤海某高含凝析油的低渗厚层凝析气藏气井进行产能分析,得到负的产能方程系数 $B$ ,校正压力后产能方程系数 $B$ 仍为负,因此,该产能方程不能用于气井产能分析。为得到气井合理产能方程,首先采用高速非达西渗流判定准则和产能方程系数 $B$ 理论计算,证实本气井高速非达西可忽略不计,且地层压力和井底流压也需校正;然后基于不存在高速非达西的产能方程进行回归,得到了修正的产能方程;最后采用指数式产能方程进行验证,由其计算的无阻流量( $Q_{\text{AOF}}$ )与修正产能方程计算的 $Q_{\text{AOF}}$ 基本一致。将该方法应用在实际低渗凝析气田气井,能得到合理的气井产能方程,表明了修正产能方程的有效性。

**关键词:**低渗;凝析气藏;校正;高速非达西;产能方程

中图分类号:TE37

文献标识码:A

### A productivity evaluation method of gas wells in condensate gas reservoirs with low permeability

TAN Xianhong, LIANG Bin, WANG Shuai, TIAN Bo, PENG Shiqiang, LI Nan, XIA Yang

(CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

**Abstract:** When the conventional binomial productivity equation is used to analyze the deliverability of the gas wells in a low permeability thick layer condensate gas reservoir with high condensate content in Bohai Sea, the negative deliverability equation coefficient  $B$  can be obtained, which is still negative after pressure correction. Therefore, this equation is not suitable for the gas well productivity analysis. In order to obtain the reasonable productivity equation of the gas well, the following measures are taken. Firstly, the judgment criterion of high-speed non Darcy seepage and the theoretical calculation of productivity equation coefficient  $B$  are used to confirm that the high-speed non Darcy of the gas well is negligible, and the formation pressure and bottom hole flow pressure also need to be corrected. Then, the modified productivity equation is obtained without high-speed non Darcy productivity equation. Finally, the exponential productivity equation is used for verification, and the calculated  $Q_{\text{AOF}}$  (open flow, the same below) is basically consistent with the  $Q_{\text{AOF}}$  the modified productivity equation. When this new method is applied to the actual gas wells in low permeability condensate gas fields, a reasonable gas well productivity equation can be obtained, which shows the effectiveness of the modified productivity equation.

**Keywords:** low permeability, condensate gas reservoir, correction, high speed non-Darcy, deliverability equation

渤海某气田孔店储层为高含凝析油的低渗厚层凝析气藏,具有高温高压、地露压差小、产量低等特点。气藏主要储层孔店组为扇三角洲沉积,埋深3 500~4 500 m,地层压力40~60 MPa,地层温度

130~150 °C,储层厚度240~330 m。该气藏储层岩石类型多样(含砾砂岩、砂砾岩、砾岩等),储集空间以次生孔隙为主,平均孔隙度8%~10%,渗透率 $(0.2\sim 2)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,凝析油含量594 g/m<sup>3</sup>,地露压差

收稿日期:2021-04-14。

第一作者简介:谭先红(1971—),女,硕士,高级工程师,从事海上油气田开发技术研究。地址:北京市朝阳区太阳宫南街6号海油大厦A-1204,邮政编码:100028。Email:tanxh@cnooc.com.cn

基金项目:国家自然科学基金“深层裂缝性高含油凝析气藏高效开发基础理论研究”(U21B200105)。

2.92 MPa。

本气田孔店储层单井产能分析存在以下挑战:埋藏深、高温高压、渗透率低、测试难度大、测试资料有限。采用大压差测试,井底流压低于露点压力,凝析油反凝析析出,堵塞井筒附近储层,增大了渗流阻力,难以求准气井产能方程和合理产量。

为了得到此类低渗气藏气井的产能方程和单井合理产量,众多学者都进行了深入探讨和研究。黄全华等<sup>[1-2]</sup>针对低渗凝析气藏气井考虑了存在启动压力梯度或压力校正的产能方程,并针对凝析气藏,通过渗流数学模型的建立和求解,建立了考虑相态变化与多孔介质吸附影响的凝析气井产能方程;李允等<sup>[3]</sup>、苟宏刚等<sup>[4]</sup>、姜梅枝<sup>[5]</sup>、刘艳梅<sup>[6]</sup>、高创波等<sup>[7]</sup>针对二项式产能方程中产能方程系数 $B < 0$ 的情况,提出了通过对压力进行校正从而得到合理的产能方程;余元洲等<sup>[8]</sup>依据凝析气藏气相流体组成、相对密度、黏度及偏差因子随压力的变化,结合凝析气藏油气相渗实验结果,提出了对初期二项式产能方程的修正方法;朱绍鹏等<sup>[9]</sup>应用数值模拟技术系统分析了反凝析对产能的影响,定量给出了反凝析对产能的影响程度;张风波等<sup>[10]</sup>、潘昭才等<sup>[11-12]</sup>、田婉玲等<sup>[13]</sup>、刘立明等<sup>[14]</sup>,通过对产能方程系数或指数进行校正,建立了新的气井产能方程;WANG等<sup>[15]</sup>采用灰色理论方法预测了凝析气井产能;KANG等<sup>[16]</sup>分析了高速流对凝析气藏气井产能的影响;PANG等<sup>[17]</sup>提出了一个预测凝析气藏气井非稳态产能的新方法;张安刚等<sup>[18]</sup>提出了一种新的凝析气藏无因次产能评价方程。针对本凝析气田低渗、高温、高压和低露点压差的特点,这些学者的研究成果具有一定借鉴意见,但难以直接应用,还需进行完善和修正。

基于目标气田孔店储层测试资料,对压力数据校正后,按常规二项式产能方程得到负的产能系数 $B$ ,结合高速非达西渗流判定方法,证实高速非达西可忽略不计。因此,基于校正后的压力数据,按不存在高速非达西的产能方程进行回归,得到了修正的产能方程,并用指数式产能方程验证两者无阻流量( $Q_{AOF}$ )基本一致,表明修正产能方程的有效性。

## 1 常规二项式产能方程

常规二项式产能方程为<sup>[2]</sup>:

$$p_i^2 - p_{wf}^2 = A Q_g + B Q_g^2 \quad (1)$$

式中: $p_i$ 为地层压力,MPa; $p_{wf}$ 为井底流压,MPa; $Q_g$ 为日产气量, $10^4 \text{ m}^3$ ;A、B为二项式产能系数。

若地层压力和井底流压测量不准或存在启动压力梯度,则气井产能方程为<sup>[2]</sup>:

$$p_i^2 - p_{wf}^2 = C + A Q_g + B Q_g^2 \quad (2)$$

式中:C为压力或启动压力校正项,MPa<sup>2</sup>。

式(1)中产能方程系数B的表达式如下<sup>[20]</sup>:

$$B = \frac{2.282 \times 10^{-21} \beta \gamma_g Z T}{r_w^2 h^2} \quad (3)$$

式中: $\beta$ 为速度系数, $\text{m}^{-1}$ ; $\gamma_g$ 为气体比重; $Z$ 为偏差因子; $T$ 为地层温度,K; $r_w$ 为井筒半径,m; $h$ 为储层厚度,m。现场测试中若产能方程系数 $B < 0$ ,一般说明测试数据出现异常,一般需对压力进行校正使 $B > 0$ 。

其中,速度系数 $\beta$ 由式(4)确定:

$$\beta = 7.644 \times 10^{10} / K^{1.5} \quad (4)$$

另外,基于式(4)可计算出表征非达西渗流程度的紊流系数 $D$ :

$$D = 2.191 \times 10^{-18} \frac{\beta \gamma_g K}{\mu h r_w} \quad (5)$$

式中: $\mu$ 为气体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;K为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

## 2 二项式产能方程修正

### 2.1 气井产能测试情况

A-5井于2018年5月19日完钻,完钻井深4 419 m,完钻层位太古界。2018年5月24日至31日对该井进行了测试:测试层位孔店组,测试段3 500~3 566 m,采用TCP+APR射孔测试联作测试工艺,二开井期间进行了4个工作制度自喷求产,测试数据见表1。

在不同工作制度 and 测试压差下,该井日产气量( $11.78 \sim 27.17$ ) $\times 10^4 \text{ m}^3$ ,日产凝析油85.86~191.22  $\text{m}^3$ ,测试气油比1 372~1 421  $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。产出原油密度0.780 5  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,黏度1.21  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ,产出天然气比重

表1 孔店储层A-5井测试数据  
Table 1 Test data of Well-A-5 in Kongdian Formation

测试号	厚度(m)	油嘴(mm)	产量( $\text{m}^3/\text{d}$ )		压力(MPa)		
			油	气	井底流压	地层压力	生产压差
1	66	6.35	85.86	117 800	40.01		5.88
		7.94	127.98	168 100	36.91	45.9	8.99
		9.53	155.34	218 000	33.92		11.98
		11.11	191.22	271 700	31.43		14.47

0.776,测试结论为凝析气层。

## 2.2 高速非达西渗流判定

二项式产能方程的适用条件是存在高速非达西渗流,主要采用卡佳霍夫提出的雷诺数进行判定,定义如下<sup>[9]</sup>:

$$R_e = \frac{v\sqrt{K}\rho}{1750\mu\phi^{3/2}} \quad (6)$$

式中: $R_e$ 为雷诺数; $v$ 为渗流速度,cm/s; $\rho$ 为气体密度,g/cm<sup>3</sup>; $\phi$ 为孔隙度。

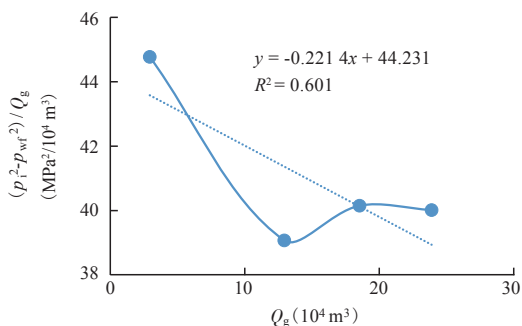
卡佳霍夫根据实验得到,高速非达西渗流临界 $R_e$ 介于0.2~0.3,即当 $R_e > 0.3$ 时存在高速非达西流,否则主要表现为达西渗流。

据A-5井相关数据,计算 $R_e=0.023$ , $R_e < 0.2$ ,储层厚度66.0 m,渗透率 $1.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度0.09,气体黏度0.087 mPa·s,气体密度0.402 g/cm<sup>3</sup>,测试产量 $27.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,渗流速度7.58 cm/s。说明该井主要表现为达西流,高速非达西流可忽略,即二项式产能方程系数 $B$ 可忽略。若该井要达到高速非达西流,其产量需达到 $240 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,或储层渗透率达到 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

由式(4)得到速度系数 $\beta=5.16 \times 10^{10}$ ,由式(3)得到产能方程系数 $B=1.05 \times 10^{-10}$ ,远低于常规 $B=10^{-8}$ ,由式(5)得到 $D=1.9 \times 10^{-7}$ ,远低于常规 $D=10^{-5}$ 。以上计算的速度系数、产能系数和紊流系数值都较小,进一步说明高速非达西渗流基本可忽略不计,即二项式产能方程系数 $B$ 可忽略。

## 2.3 常规二项式产能方程及校正

按式(1)将测试数据 $[(p_i^2-p_{wf}^2)/Q_g]$ 与 $Q_g$ 进行作图(图1),回归得到 $A=44.2$ ,而 $B=-0.22$ ,这与 $B > 0$ 矛盾,



注: $p_i^2-p_{wf}^2$ 为压力平方差,MPa<sup>2</sup>; $Q_g$ 为日产气量, $10^4 \text{ m}^3$ 。

图1 孔店储层A-5井的产能方程曲线

Fig. 1 Productivity equation curve of Well-A-5 in Kongdian Formation

说明测试压力需要进行校正。

为确定合理的压力校正值,将 $p_i^2-p_{wf}^2$ 与 $Q_g$ 在直角坐标系上作图(图2),发现该曲线为一条在 $p_i^2-p_{wf}^2$ 轴上存在截距为9.1的直线,线性相关系数高达0.999,这与式(1)中 $p_i^2-p_{wf}^2$ 与 $Q_g$ 为抛物线相悖。

由图2回归得到如下关系式:

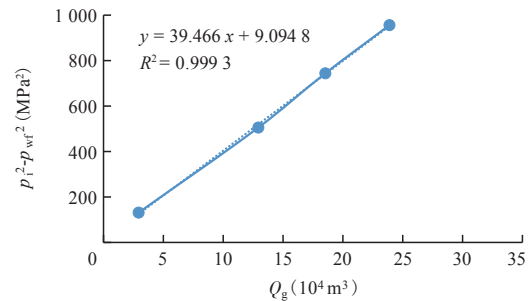
$$p_i^2 - p_{wf}^2 - 9.1 = 39.47Q_g \quad (7)$$

图2和式(7)表明,该井的渗流表现为达西线性渗流,存在压力校正系数9.1,不存在高速非达西渗流。在式(7)中,令校正压力为 $p'_{wf}$ :

$$p_{wf}^2 = p'^2_{wf} + 9.1 \quad (8)$$

式(8)中校正压力 $p'_{wf}$ 为考虑井底附近反凝析之后的井底流压,基于该式,可由实际井底流压 $p_{wf}$ 进行确定。由表1看出,该井在测试过程中井底流压已低于露点压力42.98 MPa,导致井底附近出现反凝析,由于凝析油饱和度低于临界流动饱和度,导致井底附近出现了污染和附加压降。由式(8)计算,由反凝析引起的附加压降大约0.11~0.14 MPa,随井底流压减小而增加(表2)。

因此,式(7)即为不考虑高速非达西渗流的产能方程。基于式(7),计算得到该井无阻流量 $Q_{AOF}$



注: $p_i^2-p_{wf}^2$ 为压力平方差,MPa<sup>2</sup>; $Q_g$ 为日产气量, $10^4 \text{ m}^3$ 。

图2 孔店储层A-5井 $(p_i^2-p_{wf}^2)$ 与 $Q_g$ 关系曲线

Fig. 2 Relation between  $(p_i^2-p_{wf}^2)$  and  $Q_g$  of Well-A-5 in Kongdian Formation

表2 孔店储层A-5井测试校正流压  
Table 2 Modified BHP of Well-A-5 in Kongdian Formation

油嘴 (mm)	产量( $\text{m}^3/\text{d}$ )		压力(MPa)		
	油	气	井底流压	校正流压	反凝析流压
6.35	85.86	117 800	40.01	40.12	0.11
7.94	127.98	168 100	36.91	37.03	0.12
9.53	155.34	218 000	33.92	34.05	0.13
11.11	191.22	271 700	31.43	31.57	0.14

53.4×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,单井合理产量按(1/3~1/6)Q<sub>AOF</sub>考虑,得到单井合理产量(8.9~17.7)×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。

## 2.4 指数式产能方程验算

基于表1中测试数据,按照指数式产能方程进行计算,得到图3所示的线性相关直线,回归得到指数式产能方程:

$$Q_g = 0.0167(p_i^2 - p_{wf}^2)^{1.0618} \quad (9)$$

式(9)表明,渗流指数 $n=1.0618$ , $n>1$ ,这与渗流指数 $0.5 \leq n \leq 1$ 矛盾,说明需校正流压。在指数式产能方程回归过程中,将表2中井底流压 $p_{wf}$ 替换为校正压力 $p'_{wf}$ ,再在双对数图上用指数式产能方程回归,得到图4所示校正后指数式产能方程曲线。

由图4得到校正后的指数式产能方程:

$$Q_g = 0.0497(p_i^2 - p_{wf}^2 - 9.1)^{0.9047} \quad (10)$$

从式(10)看出,校正后渗流指数 $n=0.9047$ , $n<1$ ,但接近1,说明该井的渗流主要是线性渗流,高速非达西渗流成分较少;同时也说明,通过对压力进行校正,

可得到合理的指数式产能方程。

基于校正的指数式产能方程式(10),得到 $Q_{AOF}=50.5 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,与式(7)计算的 $Q_{AOF}$ 接近,证实式(7)中不考虑高速非达西的校正产能方程的合理性。

## 3 实际井应用分析与验证

以实际生产井A-6井为例,说明该方法在该井的应用及验证。

### 3.1 生产情况

A-6井为渤海某气田试验区的1口采气井,该井于2020年10月4日自喷投产,平均日产气(16~28)×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,日产凝析油110~320 m<sup>3</sup>,截至2021年6月7日,该井已累产气0.489×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,累产凝析油4.383×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

### 3.2 气井产能测试及产能分析

该井于2020年12月19日进行5个工作制度产能测试,每个工作制度测试时间14~26 h,日产气(10~30)×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,日产油111.47~294.22 m<sup>3</sup>(表3)。静压测试地层压力为41.5 MPa。

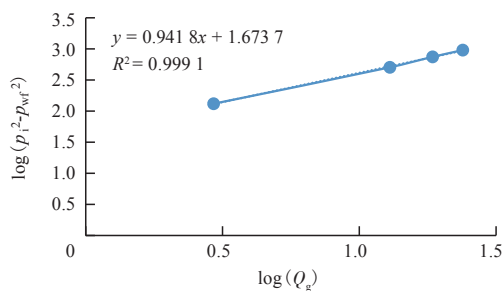
基于表3数据,按常规二项式产能方程求解,产能方程系数 $B<0$ ,不能用来求解合理产能(图5);即使对压力进行校正,也不能使 $B>0$ 。

若采用新的不考虑高速非达西的产能方程进行回归,将得到如图6所示的产能方程曲线,且线性相关性非常好。

由图6得到不考虑高速非达西的产能方程为:

$$p_i^2 - p_{wf}^2 - 30.83 = 17.0Q_g \quad (11)$$

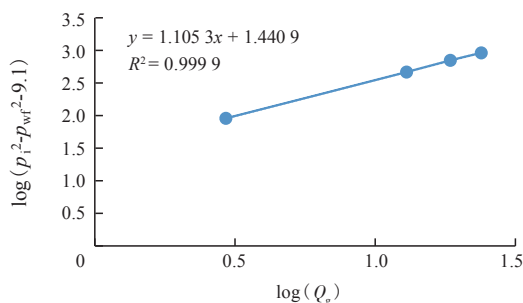
由式(11)得到无阻流量99.5×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,单井合理



注:  $\log(p_i^2 - p_{wf}^2)$  为压力平方差对数;  $\log(Q_g)$  为日产气量对数。

图3 孔店储层A-5井指数式产能方程曲线

Fig. 3 Exponential productivity equation curve of Well-A-5 in Kongdian Formation



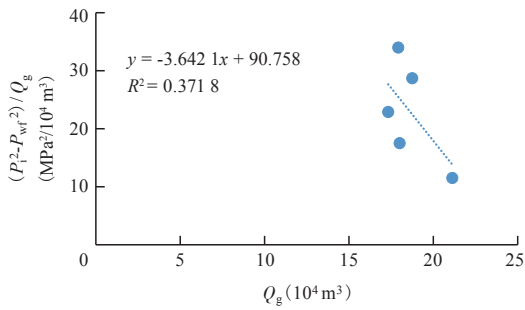
注:  $\log(p_i^2 - p_{wf}^2)$  为压力平方差对数;  $\log(Q_g)$  为日产气量对数。

图4 孔店储层A-5井校正后指数式产能方程曲线

Fig. 4 Modified exponential productivity equation curve of Well-A-5 in Kongdian Formation

表3 孔店储层A-6井测试数据及校正流压  
Table 3 Test data and modified BHP of Well-A-6 in Kongdian Formation

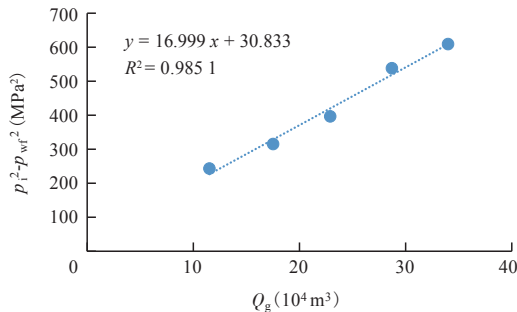
油嘴 (mm)	时间 (h)	产量(m <sup>3</sup> /d)		压力(MPa)		
		油	气	井底流压	校正流压	反凝析压降
6.11	14	111.47	100 000	38.46	38.85	0.39
8.61	13	185.24	150 000	37.51	37.92	0.41
10.28	16	213.13	200 000	36.41	36.83	0.42
12.38	23	272.84	250 000	34.41	34.85	0.43
14.29	26	294.22	300 000	33.36	33.82	0.46



注:  $P_i^2 - P_{wf}^2$  为压力平方差, MPa<sup>2</sup>;  $Q_g$  为日产气量, 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

图5 孔店储层A-6井的二项式产能方程曲线

Fig. 5 Binomial deliverability equation curve of Well-A-6 in Kongdian Formation



注:  $P_i^2 - P_{wf}^2$  为压力平方差, MPa<sup>2</sup>;  $Q_g$  为日产气量, 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

图6 孔店储层A-6井产能方程曲线

Fig. 6 Deliverability equation curve of Well-A-6 in Kongdian Formation

产量按  $(1/3 \sim 1/6) Q_{AOF}$  考虑, 得到单井合理产量  $(16.6 \sim 33.2) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该产量与实际生产情况相符, 表明了该方法的合理性。

## 4 结论

1) 针对低渗气藏气井二项式产能方程系数  $B$  为负的情况, 结合雷诺数判定和产能方程系数  $B$  的理论计算, 证实本低渗凝析气藏高速非达西可忽略, 且压力需校正, 从而得到一个新的气井产能方程。基于校正压力数据得修正产能方程, 得到了气井合理产能以及反凝析附加压降。

2) 为验证此方法的合理性, 基于校正压力得到修正指数式产能方程, 由其计算的  $Q_{AOF}$  与修正产能方程的  $Q_{AOF}$  非常接近。经过在实际生产井进行验证, 也表明了该方法的合理性。

### 参考文献

[1] 黄全华, 王富平, 尹琅, 等. 低渗气藏气井产能与动态储量计

算方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.

HUANG Quanhua, WANG Fuping, YIN Lang, et al. Calculation method of gas well productivity and dynamic reserves in low permeability gas reservoir[M]. Beijing: Petroleum Engineering Press, 2011.

[2] 黄全华, 孙雷, 李士伦, 等. 低渗凝析气藏气井产能的正确预测[J]. 天然气工业, 2005, 25(11): 82-84.

HUANG Quanhua, SUN Lei, LI Shilun, et al. Correct prediction of gas well productivity for condensate gas reservoir with low permeability[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(11): 82-84.

[3] 李允, 李治平, 张百灵. 气井及凝析气井产能试井与产能评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.

LI Yun, LI Zhiping, ZHANG Bailing. Production test and productivity evaluation of gas well and condensate gas well[M]. Beijing: Petroleum Engineering Press, 2002.

[4] 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, 2016, 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, 2016, 27(2): 210-212.

[5] 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): 25-31.

JIANG Meizhi. Binomial productivity equation slope of the curve for the analysis of the negative reasons and equation correction in gas well[J]. Oil and Gas Well Test, 2013, 22(2): 25-31.

[6] 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]. Oil and Gas Well Test, 2011, 20(6): 17-19.

[7] 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): 12-14.

GAO Chuangbo, SHAN Yongle, WU Shengli, et al. Inverted correction method with productivity test binomial equation curve in Sebei Gas Field[J]. Oil and Gas Well Test, 2014, 23(6): 12-14.

[8] 余元洲, 张彩, 杨丽容, 等. 不同压力下确定凝析气井二项式产能方程的一种新方法[J]. 天然气工业, 2006, 26(3): 84-86.

YU Yuanzhou, ZHANG Cai, YANG Lirong, et al. A new approach of establishing binomial deliverability equation of gas condensate well at different pressures[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(3): 84-86.

[9] 朱绍鹏, 李文红, 劳业春. 反凝析对凝析气井产能的影响研究[J]. 海洋石油, 2007, 27(2): 88-91.

ZHU Shaopeng, LI Wenhong, LAO Yechun. The influence of retrograde condensate on productivity of condensate gas well[J]. Offshore Petroleum, 2007, 27(2): 88-91.

[10] 张风波, 马帅, 张芟强, 等. 广义二项式产能方程的推导与应用[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(6): 87-91.

ZHANG Fengbo, MA Shuai, Zhang Jiqiang, et al. Derivation

- and application of generalized binomial productivity equation [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(6): 87-91.
- [11] 潘昭才,孙雷,阳广龙,等.气井二项式与指数式产能方程偏差分析[J].*油气井测试*,2007,16(4):8-9.  
PAN Zhaocai, SUN lei, YANG Guanglong, et al. Variance analyzing of binomial and exponential deliverability equation in gas well[J]. *Oil and Gas Well Test*, 2007, 16(4): 8-9.
- [12] 潘昭才,阳广龙,孙红海,等.确定气井二项式产能系数的新方法[J].*西南石油学院学报*,2006,28(6):40-41.  
PAN Zhaocai, YANG Guanglong, SUN Honghai, et al. A new method of computing the binomial deliverability coefficient of gas well[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2006, 28(6): 40-41.
- [13] 田婉玲,齐二波,吴茂富,等.气井试井产能分析新方法与新模型应用[J].*天然气与石油*,2012,30(4):46-49.  
TIAN Wanling, QI Erbo, WU Maofu, et al. Application of new method and new model of gas well test capacity[J]. *Natural Gas and Oil*, 2012, 30(4): 46-49.
- [14] 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.
- [15] WANG T C, GHALIH M. Evaluation of grey forecasting method in total Indonesian production crude oil and condensate[C]// 2017 4th international conference on advanced education technology and management science (AETMS 2017), September 17, 2017, Shenzhen, China.
- [16] KANG X D, LI X F, LIU Y J, et al. The influence of high-velocity flow on well productivity in gas condensate reservoirs [C]// *Advances in Multiphase Flows vol.2: Multiphase, Non-Newtonian and Reacting Flows* (Department of Petroleum Engineering, University of Petroleum), September 10-12, 2004, Hangzhou, China.
- [17] PANG J, LIU H, YU X N. The new methods for non-steady productivity prediction of condensate gas reservoir and the application evaluation[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 2049: 401-404.
- [18] 张安刚,范子菲,宋珩.一种新的凝析气藏无因次产能评价方程[J].*地球科学—中国地质大学学报*,2004,39(10):1491-1496.  
ZHANG Angang, FAN Zifei, SONG Heng. A new dimensionless deliverability equation of gas condensate reservoir[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2014, 39(10): 1491-1496.
- [19] 李治平.油气层渗流力学基础[M].北京:石油工业出版社,2001.  
LI Zhiping. *Foundation of percolation mechanics in oil and gas reservoir*[M]. Beijing: Petroleum Engineering Press, 2001.
- [20] 李士伦,孙雷,郭平,等.天然气工程[M].北京:石油工业出版社,2000.  
LI Shilun, SUN Lei, GUO Ping, et al. *Natural gas engineering* [M]. Beijing: Petroleum Engineering Press, 2000.

(编辑 黄颖)

(下转第715页)

- analysis and countermeasure research of water injection capacity decline in low permeability oilfield[J]. *Journal of Xi'an University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2009, 24(1): 52-55.
- [17] BEDRIKOVETSKY P, SILVA R M P, DAHER J S, et al. Well-data-based prediction of productivity decline due to sulphate scaling[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, 68(1-2): 60-70.
- [18] HOVADIK J M, LARUE D K. Static characterizations of reservoirs: Refining the concepts of connectivity and continuity [J]. *Petroleum Geoscience*, 2007, 13(3): 195-211.
- [19] 高奎成.低渗油藏注水能力下降分析及解决措施[J].*石油天然气学报*,2005,27(3):534-535.  
GAO Kuicheng. Analysis of water injection capacity reduction in low permeability reservoirs and measures for solving it[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2005, 27(3): 534-535.
- [20] 谢思宇.南海西部油田纳滤海水注水先导性应用[C]//第四届中海油开发开采青年技术交流会论文集.北京:中国石化出版社,2019:477-480.  
XIE Siyu. Pilot application of nanofiltration seawater injection in western South China Sea Oilfield[C]// Paper collection of the forth youth technical exchange meeting of CNOOC development and exploitation. Beijing: China Petrochemical Press, 2019: 477-480.

(编辑 李青)