

# 测试制度对凝析气藏产能评价结果的影响

赵洪涛<sup>1</sup>, 陈鹏<sup>2</sup>

- 1. 中法渤海地质服务有限公司 天津 300457
- 2. 长江大学 地球科学学院 湖北武汉 430100

通讯作者:Email:394420114@qq.com

项目支持:中法渤海地质服务有限公司科研项目“产能评价及试井特征曲线分析”(CFB\_TG\_TL\_2020\_003)

引用:赵洪涛,陈鹏. 测试制度对凝析气藏产能评价结果的影响[J]. 油气井测试,2022,31(3):67-72.

Cite: ZHAO Hongtao, CHEN Peng. Influence of testing system on productivity evaluation results of condensate gas reservoirs[J]. Well Testing,2022,31(3):67-72.

**摘要** 凝析气藏流体性质特殊,不同测试制度下的产能测试结果差异明显。以某凝析气井产能测试资料为例,采用拟单相流法评价不同测试制度下气井无阻流量,分析无阻流量差异产生的原因。结果表明:当井底流压低于流体的露点压力时,随着测试油嘴尺寸增加,近井地带凝析油析出范围增加,气体流动阻力增加,导致气井解释的无阻流量明显下降;凝析油在近井地带析出产生的表皮系数贡献较大,远井地带析出对表皮系数影响较小。该评价结果对凝析气井产能评价具有一定指导意义。

**关键词** 凝析气藏;产能测试;工作制度;拟单相流;无阻流量;表皮系数;评价解释

**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.03.012

## Influence of testing system on productivity evaluation results of condensate gas reservoirs

ZHAO Hongtao<sup>1</sup>, CHEN Peng<sup>2</sup>

- 1. China-France Bohai Geoservices Co., Ltd., Tianjin 300457, China;
- 2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China

**Abstract:** For condensate gas reservoirs with special fluid properties, the productivity test results under different systems vary significantly. Taking the productivity test data of a condensate gas well as example, the pseudo-single-phase flow method was used to evaluate the absolute open flow potential (AOFP) of the condensate gas well under different testing systems, and the reasons for the difference in AOFP were analyzed. The results show that when the bottomhole flow pressure is lower than the dew point pressure of the fluid, with the increase of the test nozzle size, the condensate precipitation range in the near-wellbore area increases, and the gas flow resistance increases, resulting in a significant decrease in the interpreted AOFP of the well. In addition, the precipitation of condensate oil in near-wellbore area contributes greatly to the skin factor, and the precipitation of condensate oil in far-wellbore area has little effect on the skin factor. The evaluation results are of certain significance for the productivity evaluation of condensate gas wells.

**Keywords:** condensate gas reservoir; productivity test; working system; pseudo-single-phase flow; absolute open flow potential; skin factor; evaluation and interpretation

凝析气藏作为一类特殊的气藏,当井底压力低于气藏露点压力时,井筒周围储层内会出现流体组分和性质的改变,导致井筒周围出现气液两相流动现象。陈雷等<sup>[1]</sup>通过调研类比以及室内凝析油注干气抽提相态实验和长岩心驱替实验,评价分析凝析气藏开发中后期注气提压、提高采收率的可行性。赵晓亮等<sup>[2]</sup>提出了一种直接相态恢复法。王奥等<sup>[3]</sup>通过构建平行毛管束模型和三维网络模型展示凝析气体在多孔介质中的相态特征。左洁

等<sup>[4]</sup>利用法国 ST 公司制造的多功能高温高压流体 PVT 测试仪和高倍显微固相沉积测定仪对博孜 104 井井流物进行相关实验研究。当前气井产能评价中常用的方法有二项式产能方程法、指数式产能方程法、拟压力法,这些评价方法计算的基础是基于 3~4 个不同尺度油嘴下测试厚度的产量和井底流压数据进行产能评价。王国政等<sup>[5]</sup>提出了适合现场操作的测试工艺改进方法,将小尺寸油嘴多点递增测试法运用于实例井测试。许克亮<sup>[6]</sup>从塔河油

田凝析气藏水平井渗流机理和井筒流动出发,分析凝析气藏水平井测试资料异常原因,并基于两相拟压力方法提出了新的产能方程。李纪智等<sup>[7]</sup>提出应用单探针 MDT 试井解释结果计算探井产能的新方法。洪舒娜等<sup>[8]</sup>基于不稳定试井理论及二项式产能方程,分析了引起产能变化的参数,推导并建立了适用于海上的在生产气井动态产能评价方法。吴永辉等<sup>[9]</sup>基于三线性流模型表征压裂改造体,考虑流体相变和相渗,并用 Langmuir 等温吸附模型表征页岩基质中气体的吸附解吸,建立了页岩凝析气井产能预测数学模型。薛展等<sup>[10]</sup>考虑到凝析气井井底压力低于厚点压力后井底附件出现气液两相流的特征,引入毛管束效应对二项式产能方程进行了修正,对凝析气井测试资料进行了解释。卢德唐等<sup>[11]</sup>针对凝析气井测试从气液两相渗流理论出发,结合凝析气多组分闪蒸特征,构建了拟压力产能模型,实现了产能气井产能的准确计算。由于凝析气藏特殊的流体性质,不同测试制度下由于井底流压的不同,导致气藏中凝析油析出的范围不同,进而产生的表皮系数不同,因此不同测试制度下的测试结果可能对产能评价结果造成显著影响。当前凝析气藏产能评价的相关研究主要集中在凝析气藏产能测试资料解释方法研究,很少见到关于测试制度对凝析气藏产能评价结果影响的分析<sup>[12-14]</sup>。本文以某凝析气田测试井为研究对象,通过井筒流体取样分析了储层流体性质,利用其不同测试制度下产能测试结果采用拟压力法计算了测试层无阻流量,评价了测试制度下对无阻流量计算的影响,分析了凝析油析出对气井产能的影响,研究结果对凝析气井产能评价有一定借鉴意义。

1 测试层流体性质分析

测试井开钻时间为 2012 年 12 月,2013 年 4 月完钻,完钻井深 5 326 m,为定向井。当前储层压力约为 25 MPa,温度约为 118 ℃,孔隙度为 14.5%~18.9%,渗透率为 15.9~46.8 mD,对评价储层物性和产能开展了压力恢复测试和产能评价测试。测试层组分决定了流体在地层流动过程中性质的变化特征,通过井底取样获取地层流体分析了地层流体组分,流体分类组分为  $C_1+N_2$  大于 85%, $C_2\sim C_6+CO_2$  约为 10%,置于三角相图上,属凝析气藏的范围,凝析油含量在 2.5~29.6 g/m<sup>3</sup>(图 1)。

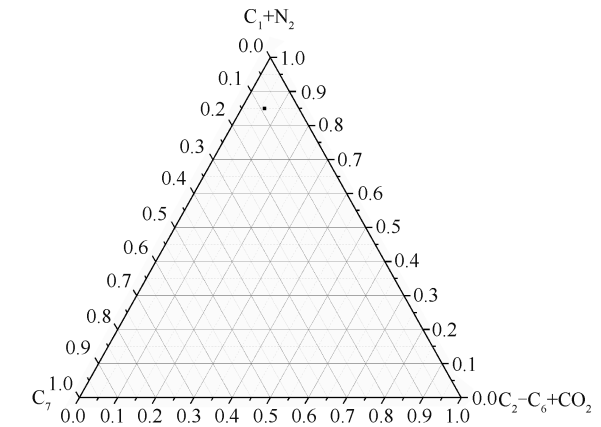


图 1 地层流体类型三角相图  
Fig.1 Triangular phase diagram of formation fluid type

2 测试结果及解释

以一口实际凝析气藏测试井为研究对象,根据指数式产能方程和二项式产能方程评价了不同测试制度下的无阻流量,分析了不同测试制度下造成产能差异的原因。

2.1 测试结果

该井生产一段时间后,为了解该井的生产能力,对该井进行了流压/流温梯度、产能测试、压力恢复及静压/静温梯度测试。在产能测试过程中,分别采用了 14.9/64" mm、16.7/64" mm、20.5/64" mm、24.0/64" mm 和 26.9/64" mm 油嘴进行测试,测试结果如表 1 所示。14.9/64" mm 油嘴工作制度下的流动压力异常,可能是受井底积液的影响,流动压力出现偏移,因此在产能评价时没有采用该工作制度的测试数据计算无阻流量,在不同测试制度下,随着油嘴尺度增加,生产油气比出现一定程度下降,表明地层内存在一定凝析油的析出。

表 1 某井产能测试结果表  
Table 1 Result of well productivity testing

制度	油嘴/ mm	气产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	油产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	流压/ MPa	静压/ MPa	压力计 垂深/m
1	14.9/64"	39 888	3.02	24.785	25.087	2 796.68
2	16.7/64"	84 042	6.93	24.884	25.087	2 796.68
3	20.5/64"	144 962	11.67	24.599	25.087	2 796.68
4	24.0/64"	203 562	14.76	24.163	25.087	2 796.68
5	26.9/64"	247 132	16.53	23.695	25.087	2 796.68

2.2 测试资料解释方法

由于凝析气井在测试过程中存在气液两相流动,导致其测试资料解释不同于常规气藏所采用的二项式产能方程法和指数式产能方程法。在凝析气藏测试资料解释中,相关学者构建了拟单相流产

能评价方法和气液两相稳定点产能评价方法,这里采用拟单相流产能评价法对测试资料进行了解释<sup>[15]</sup>。由于在凝析气藏测试过程中,当井底压力高于气体的露点压力时气藏中为气体单相流动,当井底压力低于气体露点压力时地层中会有凝析油析出,当凝析油在地层中的饱和度低于流动所需的最低饱和度时气藏中仍为单相流动。本井测试时间相对较短,析出凝析油量有限,可以将地层中的流体流动视为单相流动。在凝析气井资料解释中,应考虑凝析油析出对气井产量的影响,凝析油产量折算为气体产量<sup>[16]</sup>

$$q_{GE} = 544.9 \times (1.03 - \gamma_o) q_o$$

(1)

式中: $q_{GE}$  为凝析油折算产气量, $m^3/d$ ;  $\gamma_o$  为凝析油相对密度; $q_o$  为凝析油产量, $m^3/d$ 。

在气藏中气体的相关物性参数(黏度、偏差因子等)是压力的函数,在一般气井产能解释过程中都引入拟压力来构建产能模型。这里定义气体的拟压力为

$$\Psi(p) = \int_{p_0}^p \frac{2p}{\mu Z} dp$$

(2)

式中: $\Psi(p)$  为拟压力, $MPa^2/(mPa \cdot s)$ ;  $\mu$  为气体黏度, $mPa \cdot s$ ;  $p$  为压力, $MPa$ ;  $Z$  为气体偏差因子。

用拟压力表示的气体二项式产能方程为

$$\Psi(p_e) - \Psi(p_{wf}) = a q_g + b q_g^2$$

(3)

式中: $p_e$  为地层压力, $MPa$ ;  $p_{wf}$  为井底压力, $MPa$ ;  $a$ 、 $b$  为系数; $q_g$  为气井产量, $10^4 m^3/d$ 。

拟压力二项式无阻流量的表达式为

$$q_{AOF} = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4b\Psi(p_e)}}{2b}$$

(4)

式中: $q_{AOF}$  为无阻流量, $10^4 m^3/d$ 。

用拟压力表示的气体指数式产能方程为

$$q_g = C [\Psi(p_e) - \Psi(p_{wf})]^n$$

(5)

式中: $C$  和  $n$  均为系数。

拟压力指数式无阻流量的表达式为

$$q_{AOF} = C \Psi(p_e)^n$$

(6)

采用的拟压力可以直接根据商业试井解释软件中的压力与拟压力的关系曲线计算。

2.3 解释结果与评价

根据不同测试制度下测得的井底流压与气井产量,采用拟单相流方法分别根据测试制度 2、3、4,测试制度 2、3、5 和测试制度 3、4、5 计算了气井无阻流量,无阻流量解释结果如表 2 所示,采用二项式产能方程和指数式产能方程确定的测试井流入动态

曲线如图 2 和图 3 所示。

表 2 不同测试制度下解释结果统计表

Table 2 Statistical table of interpretation results under different test systems

测试制度	无阻流量/( $10^4 m^3 \cdot d^{-1}$ )	
	二项式	指数式
2,3,4	95.50	113.66
2,3,5	90.76	101.24
3,4,5	87.55	88.87

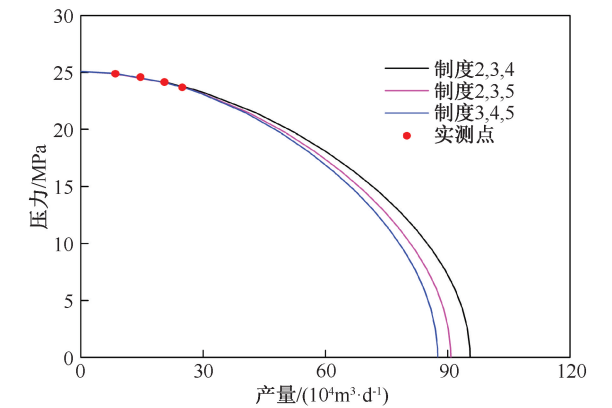


图 2 二项式产能方程流入动态曲线图  
Fig. 2 Inflow performance curve of binomial productivity equation

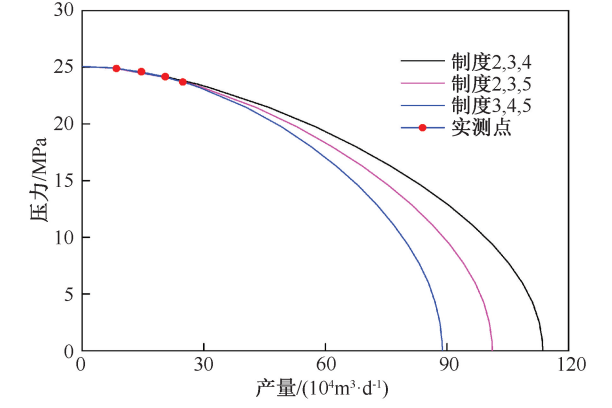


图 3 指数式产能方程流入动态曲线图  
Fig. 3 Inflow performance curve of exponential productivity equation

结果表明:指数式产能方程计算得到的无阻流量大于二项式产能方程计算无阻流量,随着油嘴尺度的增加,解释得到的无阻流量明显减小。采用不同测试制度计算时,测试时采用的油嘴越大,计算得到的无阻流量越小,采用测试制度 2、3、4 数据进行解释时,二项式产能方程和指数式产能方程分别求得的无阻流量为  $95.5 \times 10^4 m^3/d$  和  $113.66 \times 10^4 m^3/d$ ,平均为  $104.58 \times 10^4 m^3/d$ ;采用测试制度 3、4、5 数据解释时,解释的无阻流量为这主要是  $87.55 \times 10^4 m^3/d$  和  $88.87 \times 10^4 m^3/d$ ,平均为  $88.21 \times 10^4 m^3/d$ ,

解释得到的无阻流量明显减小。由于在凝析气井测试过程中,随着油嘴尺度增加,气井产量增加,地层中析出凝析油范围增加,导致流体流动阻力增加,气井无阻流量下降。

3 结果分析

在凝析气井测试过程中,随着油嘴尺度的增加,气井产量增加,井底压力下降。当井底压力下降到露点压力以下,近井地带会析出凝析油,导致孔隙中含气饱和度下降,流动能力降低,进而使大油嘴下计算的无阻流量小于小油嘴下计算的无阻流量。一些学者对凝析气井产能测试资料解释方法进行了研究,但未见到有关测试制度对凝析气井无阻流量影响评价的相关报道。假设凝析油析出后,凝析油析出区域的渗透率为  $K_s$ ,凝析油析出区域的半径为  $r_s$ ,于是地层中渗透率分布可以表示如下

$$K(r) = \begin{cases} K_s & r_w < r \leq r_s \\ K & r_s < r \end{cases} \quad (7)$$

式中: $K$  为地层渗透率,mD; $K_s$  为凝析油析出区域渗透率,mD; $r$  为半径,m; $r_w$  为气井井筒半径,m; $r_s$  为凝析油析出区域半径,m。

基于达西定律和径向流特征,气井产量方程可以写为

$$q = 172.8 \pi r h \frac{K(r)}{\mu} \frac{dp}{dr} \quad (8)$$

式中: $h$  为地层厚度,m; $\mu$  为气体黏度,mPa·s。于是,

$$dp = \frac{q \mu}{172.8 \pi h r K(r)} dr \quad (9)$$

对上式两边进行积分,可以得到

$$\begin{aligned} p_e - p_w &= \frac{q \mu}{172.8 \pi h} \int_{r_w}^{r_e} \frac{dr}{r K(r)} \\ &= \frac{q \mu}{172.8 \pi h} \left[ \frac{1}{K_s} \ln \frac{r_s}{r_w} + \frac{1}{K} \ln \frac{r_e}{r_s} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

不考虑其它因素造成的污染,凝析油析出造成的表皮系数可以写为

$$p_e - p_w = \frac{q \mu}{172.8 \pi K h} \left[ \ln \frac{r_e}{r_w} + S_d \right] \quad (11)$$

其中,凝析油析出造成的表皮系数可以写为

$$S_d = \left( \frac{K}{K_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_w} \quad (12)$$

式中: $S_d$  为凝析油析出产生的表皮系数。

这里以一个实际凝析气藏的参数为例,计算了

不同测试制度下,近井地带凝析油析出半径、产生的污染表皮系数的大小,并对相关测试制度下的无阻流量进行了评价。实际凝析气藏储层物性参数及流体性质参数如表 3 所示。

表 3 某凝析气井基本参数表  
Table 3 Basic parameters of a condensate gas well

地层压力/ MPa	46	地层温 度/℃	130	储层厚 度/m	50
孔隙度/ %	13.5	渗透率/ mD	7.8	井筒半 径/cm	0.078
露点压 力/MPa	45	气体黏度/ mPa·s	0.073	气体体 积系数	0.003 6

根据无限大地层中任意一点地层压力计算模型,以  $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  生产时,不同生产时间地层压力下降幅度随半径的变化曲线如图 4 所示。从图中可知,气井生产过程中主要压力降集中在近井地带,随着生产时间延长,远井地带压力下降幅度逐渐增大。这表明在气井投产前的产能测试过程中,测试时气井生产时间较短,地层中的主要压力降集中在近井地带,导致较小油嘴测试时近井地带析出凝析油的范围比较大油嘴测试时析出凝析油的范围小得多,从而使采用多个大油嘴测试制度计算的无阻流量小于采用小油嘴测试时计算的无阻流量。

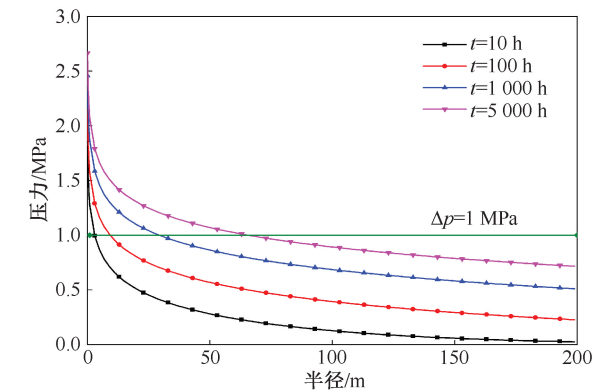


图 4 不同生产时间地层压力下降幅度随半径的变化曲线图  
Fig. 4 Variation curve of formation pressure drop with radius at different production times

为分析采用不同测试制度生产相同时间下地层内压力的分布状况,分别计算产量为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  和  $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  下气井生产 100 h 时地层压力下降幅度随半径的变化曲线(见图 5)。随着产量增加,地层压力下降幅度增加,压力降主要集中在近井地带,但地层压力下降的范围明显增加。如果以地层压力下降 1 MPa 作为凝



析油析出的边界范围,以  $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$  生产 100 h 时地层中基本无凝析油析出,而以  $40\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$  生产 100 h 时地层中凝析油析出的范围接近 65 m,凝析油析出范围明显增加。

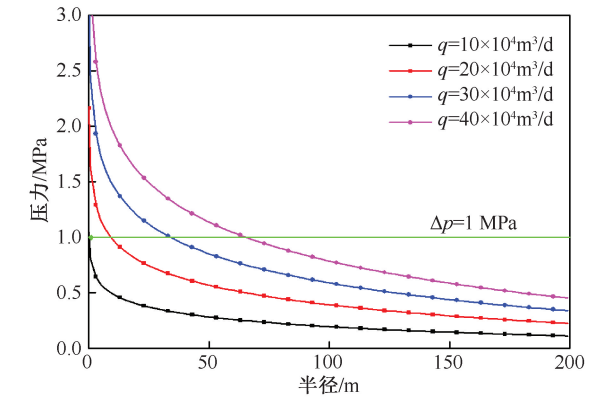


图 5 不同产量下地层压力下降幅度随半径的变化曲线图  
Fig. 5 Variation curve of formation pressure drop with radius under different production

为分析不同测试制度与不同生产时间下凝析油析出范围,这里四个测试制度下的产量分别为  $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$  和  $40\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,这四个测试制度下生产 10 h、50 h 和 100 h 时凝析油的析出半径如图 6 所示。从图中可以看出,在产量较小时,生产时间增加,凝析油析出的范围增加较小;产量较大时,随着生产时间的增加,凝析油析出半径明显增加。在油气井测试过程中,由于测试时间有限,这一现象将导致同一测试制度下,随着测试时间的增加,凝析油析出半径增加,计算无阻流量下降的现象。

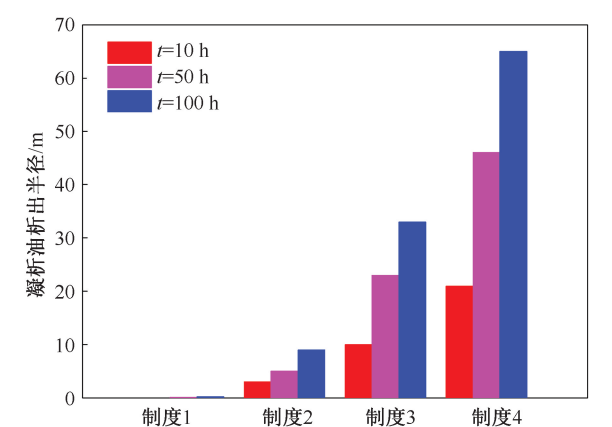


图 6 不同测试制度下凝析油析出半径柱状图  
Fig. 6 Histogram of condensate precipitation radius under different test systems

为分析凝析油析出对气井产生附加压力降的大小,现将凝析油析出区域看作均匀损害储层,采用表皮系数计算模型,计算了不同损害程度下损害

半径随表皮系数的变化关系曲线图(见图 7)。随着时间和产量增加损害半径增加,近井地带损害对表皮系数贡献较大,远井地带损害对表皮系数影响较小,说明在测试过程中近井地带损害会对气井产能产生明显影响。

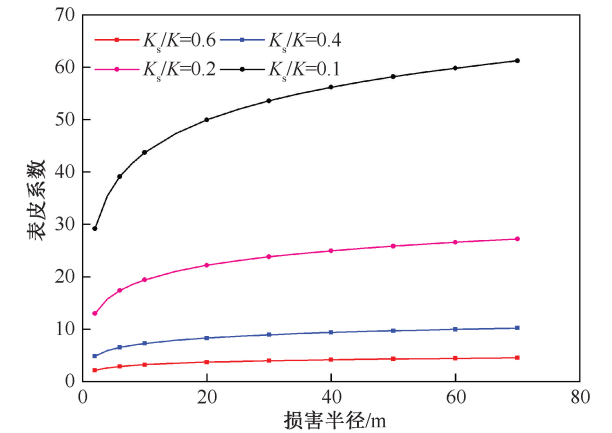


图 7 表皮系数与损害半径关系曲线  
Fig. 7 Relationship curve between skin coefficient and damage radius

4 结论

(1)在凝析气井测试过程中,当井底流压低于流体的露点压力时,随着测试油嘴尺寸增加,气井解释的无阻流量会明显下降,会对产能评价造成明显影响。

(2)在产量较小时,井底压力下降幅度有限,凝析油析出的范围增加较小;产量较大时,井底压力下降幅度增加,凝析油析出半径明显增加。在油气井测试过程中,随着测试时间的增加,凝析油析出半径增加,计算无阻流量下降的现象。

(3)随着测试时间和产量增加损害半径增加,近井地带损害对表皮系数贡献较大,远井地带损害对表皮系数影响较小,在测试过程中近井地带损害会对气井产能评价产生明显影响。

致谢:感谢中法渤海地质服务有限公司对本文提供的技术支持。

参考文献

[1] 陈雷,罗辑,饶华文,等.凝析气藏开发中后期注气提高采收率[J].新疆石油地质,2019,40(1):98-102.  
CHEN Lei, LUO Ji, RAO Huawen, et al. Gas Injection EOR at Mid-Late Development Stage in Condensate Gas Reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40 (1):98-102.  
[2] 赵晓亮,廖新维,赵伦.一种凝析气藏相态恢复方法[J].石油学报,2009,30(1):104-107.

- ZHAO Xiaoliang, LIAO Xinwei, ZHAO Lun. In-line phase recovery method for condensate gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 104-107.
- [3] 王奥, 李菊花, 郑斌. 多孔介质中凝析气相态特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(1): 61-67.
- WANG Ao, LI Juhua, ZHENG Bin. Study on the phase behaviors of the condensate gas in porous media[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(1): 61-67.
- [4] 左洁, 李稚飞, 钟诚, 等. 塔里木油田博孜区块深层凝析气结蜡现象的实验研究[J]. 钻采工艺, 2019, 42(6): 37-40.
- ZUO Jie, LI Zhifei, ZHONG Cheng, et al. Experimental study of wax deposition pattern of deep condensate gas in Bozi block of Tarim Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(6): 37-40.
- [5] 王国政, 张显文, 李军平, 等. 凝析气藏探井测试技术工艺改进及应用[J]. 油气井测试, 2012, 21(5): 67-70.
- WANG Guozheng, ZHANG Xianwen, LI Junping, et al. Application of well testing technology for the condensate gas exploration well and its improvement [J]. Well Testing, 2012, 21(5): 67-70.
- [6] 许克亮. 井筒气液两相流凝析气藏合理产能评价[J]. 油气井测试, 2012, 21(6): 25-27.
- XU Keliang. Productivity evaluation of gas condensate reservoir with gas-liquid two-phase flow in wellbore [J]. Well Testing, 2012, 21(6): 25-27.
- [7] 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 MAT data[J]. Well Testing, 2021, 30(3): 64-69.
- [8] 洪舒娜, 秦峰, 陈斯宇, 等. 海上生产气井动态产能评价新方法[J]. 非常规油气, 2021, 8(6): 60-67.
- HONG Shuna, QIN Feng, CHEN Siyu, et al. A new method for dynamic productivity evaluation of offshore gas wells, Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(6): 60-67.
- [9] 吴永辉, 程林松, 黄世军, 等. 页岩凝析气井产能预测的三线性流模型[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(11): 1745-1754.
- WU Yonghui, CHENG Linsong, HUANG Shijun, et al. A tri-linear model for production prediction in retrograde shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(11): 1745-1754.
- [10] 薛展, 刘鹏程, 夏静, 等. 考虑毛管数效应修正凝析气井产能的新方法[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2014, 16(2): 78-81.
- XUE Zhan, LIU Pengcheng, XIA Jing, et al. A new method of correction of gas condensate well productivity considering capillary number [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2014, 16(2): 78-81.
- [11] 卢德唐, 何鹏, 牛聪, 等. 考虑闪蒸的凝析气井动态产能计算[J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 47-53.
- LU Detang, HE Peng, NIU Cong, et al. Dynamic productivity calculation of condensate gas wells considering flash evaporation [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(10): 47-53.
- [12] 石军太, 李相方, 隋秀香, 等. 高温高压凝析气井测试工作制度及生产压差设计[J]. 油气井测试, 2009, 18(1): 12-15.
- SHI Juntao, LI Xiangfang, SUI Xiuxiang, et al. Design of working system and differential pressure for well test in condensate gas wells with high temperature and high pressure [J]. Well Testing, 2009, 18(1): 12-15.
- [13] 郑伟东, 毕全福, 胡广军, 等. 准噶尔盆地低渗油藏地层测试技术研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(4): 134-137.
- ZHENG Weidong, BI Quanfu, HU Guangjun, et al. Test technology study of low permeability reservoir in Junggar basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2010, 32(4): 134-137.
- [14] 李相方, 刘文远, 刘书杰, 等. 深水气井测试求产阶段管柱内天然气水合物防治方法[J]. 天然气工业, 2019, 39(7): 63-72.
- LI Xiangfang, LIU Wenyuan, LIU Shujie, et al. A prevention and control method for natural gas hydrate in pipe strings during deepwater gas well production tests [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(7): 63-72.
- [15] 陆家亮, 张皓, 常宝华, 等. 气液两相状态下的凝析气井产能评价新方法[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 111-116.
- LU Jialiang, ZHANG Hao, CHANG Baohua, et al. A new deliverability evaluation method of gas condensate wells in gas-liquid two phase state [J]. Nature Gas Industry, 2018, 38(4): 111-116.
- [16] 刘能强. 凝析气井试井解释中凝析油的折算处理[J]. 油气井测试, 1994, 3: 19-21.
- LIU Nengqiang. Conversion of condensate oil in test interpretation of condensate gas well [J]. Well Testing, 1994, 3: 19-21.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 赵洪涛, 男, 1987 年出生, 硕士, 工程师, 2014 年毕业于中国地质大学(北京)地质工程专业, 现主要从事试井资料解释研究工作。电话: 022-65310731, 16602681979; Email: zhaohao@cfbge.com; 通信地址: 天津经济技术开发区信环西路 19 号天河科技园 1 号楼 3 层, 邮政编码: 300457。