

低渗凝析气藏气井产能测试制度优化方法

田立强

中法渤海地质服务有限公司 天津 300457

通讯作者:Email:tianlq@cfhg.com

项目支持:国家重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05017)

引用:田立强. 低渗凝析气藏气井产能测试制度优化方法[J]. 油气井测试, 2024, 33(3): 60-66.

Cite: TIAN Liqiang. An optimization method for productivity testing regimes of gas wells in low-permeability condensate gas reservoirs [J]. Well Testing, 2024, 33(3): 60-66.

摘要 低渗凝析气藏气井进行产能测试时,利用二项式回归求取产能方程和无阻流量,常出现二项式产能方程异常的情况。通过对低渗凝析气藏气井测试期间生产动态的分析,确定导致产能方程计算异常的影响因素主要包括:平均地层压力误差、凝析油析出、测试制度不合理等;基于测试井的生产气油比、井口压力,确定凝析气井的最小测试制度和最大测试制度阈值,辅助设置测试产量的合理区间,形成产能测试制度选取的指导流程和方法。通过井场实例验证了方法的正确性。为低渗凝析气藏气井的产能测试提供了一种制度优化方法。

关键词 产能测试;测试制度;二项式产能方程;无阻流量;凝析气井;气油比;井口压力

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.03.010

An optimization method for productivity testing regimes of gas wells in low-permeability condensate gas reservoirs

TIAN Liqiang

China France Bohai Geoservices Co., Ltd., Tianjin 300457, China

Abstract: During productivity testing of gas wells in low-permeability condensate gas reservoirs, the application of binomial regression to derive productivity equations and absolute open flow often results in anomalies in the binomial productivity equations. By analyzing the production dynamics during testing of gas wells in low-permeability condensate gas reservoirs, it was determined that the primary factors causing calculation anomalies in the productivity equations include errors in average reservoir pressure, precipitation of condensate oil, and unreasonable testing regimes. Based on the gas-oil ratio and wellhead pressure of the tested wells, the minimum and maximum thresholds for the testing regimes of condensate gas wells were determined, aiding in setting a reasonable range for testing production. This led to the development of a guided process and methodology for selecting productivity testing regimes. This method has been validated with field examples, and it provides an optimization method for productivity testing regimes of gas wells in low-permeability condensate gas reservoirs.

Keywords: productivity testing; testing regime; binomial productivity equation; absolute open flow; condensate gas well; gas-oil ratio; wellhead pressure

气井的产能测试是了解油气藏规模、开发可行性、制定开发方案的重要依据。常规储层通过试井方法进行产能评价时,一般通过多个测试制度的试气生产,利用二项式回归得到不同渗流条件下的产能方程,但对于低渗凝析气藏的流动特性,通过试井方法进行产能测试和计算,往往会出现二项式产能方程异常的情况。

为了克服传统二项式产能方程测试与计算方

法的不足,不同学者进行了相关研究,分别考虑了高速非达西流、启动压力梯度、应力敏感效应和滑脱效应等,建立了产能计算模型^[1-5],并针对不同井型、完井条件、储层非均质条件,给出了低渗气藏气井的产能公式^[6-8];在基于数据分析的产能预测方面,不同学者利用相关性分析和灰色关联进行气井综合评价,确定主控因素,指导开发技术策略,并利用机器学习和深度学习方法,研究各类储层测试井

产能预测方法^[9-11];在气井产能预测制度优化与异常数据矫正方法方面,分析了导致产能测试和计算异常的因素,对异常产能测试资料进行定量或定性分析,确定主要影响因素,对产能方程进行修正后建立气井的产能评价方法^[12]。

上述研究根据渗流特征、应力敏感、启动压力梯度等条件给出了不同的物理模型^[13-15],但由于探井或初期开发井不能准确掌握储层有效厚度、渗透率、地层压力、非达西流系数等参数范围,容易导致测试工艺与测试制度设计不合理,特别是低孔低渗、凝析油析出等特殊储层和井况,产能计算常常会出现异常,影响气井产能解释评价的准确性^[16-18]。随着凝析气藏气井开发推进,往往会有凝析油的析出,在近井附近储层和井筒中形成凝析油积液,如果存储式压力计无法下入到井底,凝析油液柱的高低会对测试压力数据产生干扰,矫正后的产能方程和无阻流量,也不能够准确代表实际的气井产能^[19-20]。

因此,为了能够准确评价凝析气藏气井的产能,本文从试井测试角度,分析凝析气井产能测试异常的影响因素,以及通过测试与生产动态指标,确定合理的测试制度,优化凝析气井的产能测试方案和流程,提高产能评价的准确性和效率。

1 低渗凝析气藏产能测试影响因素

低渗透凝析气藏的产能测试往往受到多种影响因素的干扰,造成产能方程异常,如泄流半径内平均地层压力、凝析油析出、测试制度等。

1.1 平均地层压力

对于低渗储层或凝析油析出等情况,压力恢复的静压一是很难在短时间内达到泄流半径范围的平均压力,二是长时间开井后,地层压力同时下降,不能达到地层压力基本不变的条件。二项式产能方程对于平均地层压力较为敏感,模拟不同地层压力下,产能曲线和流入动态曲线计算的影响(见图1)。因为测量误差的引入,计算的产能方程、IPR曲线和无阻流量将出现非常大的偏差。

1.2 凝析油析出

凝析气藏开发过程中,如果地层压力降至露点压力以下,凝析油开始析出,并在井筒及附近储层堆积;当地层压力继续下降,凝析油析出量将有所减少,如下展示海上某凝析气田典型的凝析油析出液量与地层压力的对应关系曲线(见图2)。凝析油析出时,凝析油的析出将影响试井测试流压值和静

压值的准确性,计算的二项式产能方程会出现负斜率的情形(见图3)。

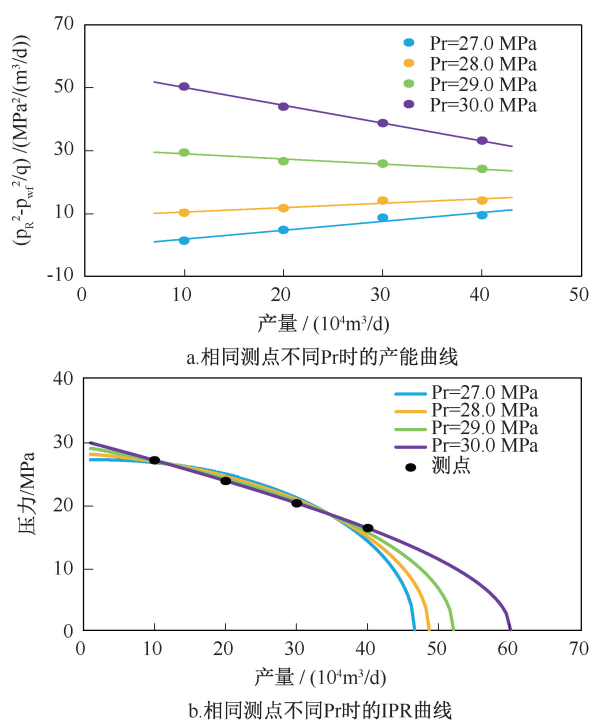


图1 地层压力误差对产能计算的影响

Fig. 1 Influence of p_r error on productivity calculation

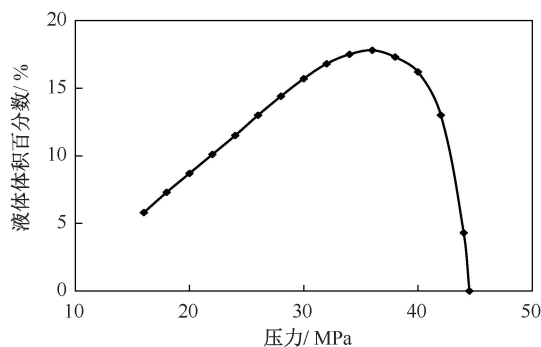


图2 凝析油析出液量与地层压力关系曲线

Fig. 2 Relationship curve of condensate and formation pressure

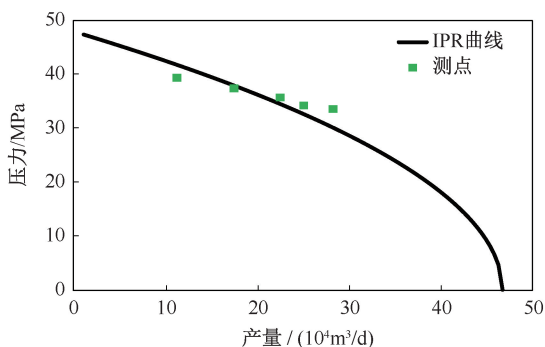


图3 凝析油析出对产能计算的影响

Fig. 3 Influence of condensation on productivity calculation

1.3 测试制度

产能测试能够准确掌握测试井的生产能力,并指导设定合理的开发工作制度。由于低渗气井生产过程中,外围能量补充较慢,同样产量情况下,生产时间不同,测得的井底流压有很大区别。产能测试时各个测点的求产时间有限,测得的井底流压比日常生产阶段同产量下的流压值高,展示海上某凝析气井产能测试点、计算得到的 IPR 曲线与日常生产数据点的对应关系曲线(见图 4)。

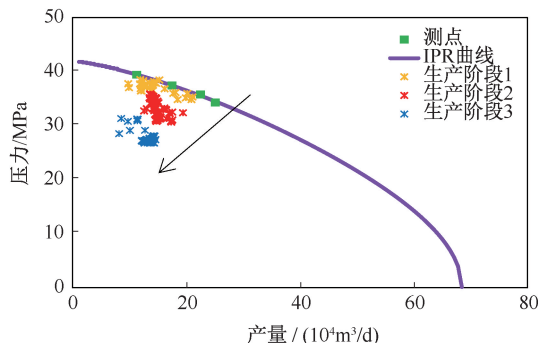


图 4 低渗气井 IPR 测试曲线和生产阶段数据点的对应关系

Fig. 4 Testing IPR curves and daily data points for low-permeability gas wells

其中,日常生产阶段数据点根据各个制度的开井时间长度分类大致分为三类,生产时长:生产阶段 1<生产阶段 2<生产阶段 3。生产阶段 1 的数据点与产能测点相差不大,普遍分布于 IPR 曲线下方;生产阶段 2 和生产阶段 3 分别更加偏离 IPR 曲线。由此可以看出,低渗透凝析气井进行产能测试时,各个测试制度如果没有保证相同或相近的测试时间,测得的井底流压值会出现非常大的偏差,导致产能曲线回归异常。

2 低渗凝析气藏气井产能测试制度优化方法

低渗凝析气藏由于储层非均质性、组分、温压条件不同,同一区域或同一气田的不同井之间,生产情况可能存在很大区别,利用理论公式计算携液能力等会有较大偏差。基于上节分析的产能计算影响因素,尝试利用生产动态资料,辅助优化目标井的产能测试制度,以实现合理准确的评价测试井产能,现场操作时将具有更好的指导意义。

2.1 最小产能测试制度确定

产能测试时产量序列(测点)应尽量保持有区分度,但最小油嘴的产量如果过小,气量不足以将

凝析油携带出井,在井筒堆积造成井底流压异常,展示海上某实测井测试与 IPR 曲线的关系(见图 5)。因此产能测试时为了保证计算准确性,需要找到合理的最小测试制度。

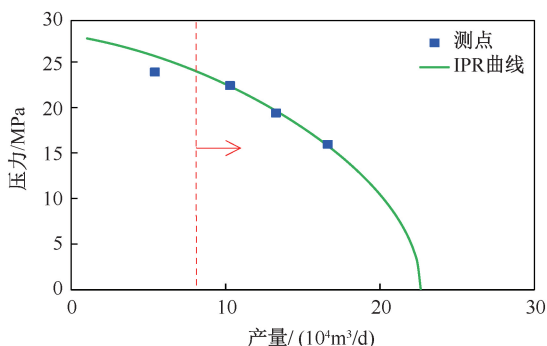


图 5 测试制度过小引入计算误差

Fig. 5 Calculation errors caused by too small testing system

随着生产的进行,凝析气井平均地层压力开始下降,凝析油开始析出,不同产能测试制度时井底流压对凝析油析出液量有一定程度影响,特别是地层压力、露点压力差值小的情况,凝析油在开发初期即产出并伴随整个开发周期。如图为地露压差小的情形,测试制度由小到大变化对井筒及储层流动状态和气油比的影响(见图 6)。此时各井底流压均处于最大液体体积百分数位置(图 2 液体体积分数最大值对应的流压)以下,气油比随着产量增大逐渐变大(即 $GOR\ 2 < GOR\ 3 < GOR\ 4$);如果最小的测试制度不足以将凝析油带出,则在凝析油滑落井底的过程中,出现气油比明显高于其他制度的情况,即 $GOR\ 1 > (GOR\ 2 \sim GOR\ 4)$ 。

因此凝析气井的产能测试,需要找到一个气油比或井口油压符合计算标准的最小值,指导现场测试。通过现场计量和测试发现:过小油嘴时井口压力和生产气油比均明显偏离正产生生产动态,如图井口压力甚至会小于大油嘴产量的井口压力(见图 7);继续开大油嘴达到一个阈值点,此时井底积液被带出井筒至地面,井底压力达到最大值,气油比达到最小值;继续开大油嘴后,井口压力逐渐下降,气油比逐渐增大。

从阈值点之后,井筒积液维持比较稳定的情况,气井的实际产气、产油基本同储层实际情况吻合。因此通过每口测试井的生产动态,可以找到产能测试的最小阈值点,以此设定合理的产能测试制度。

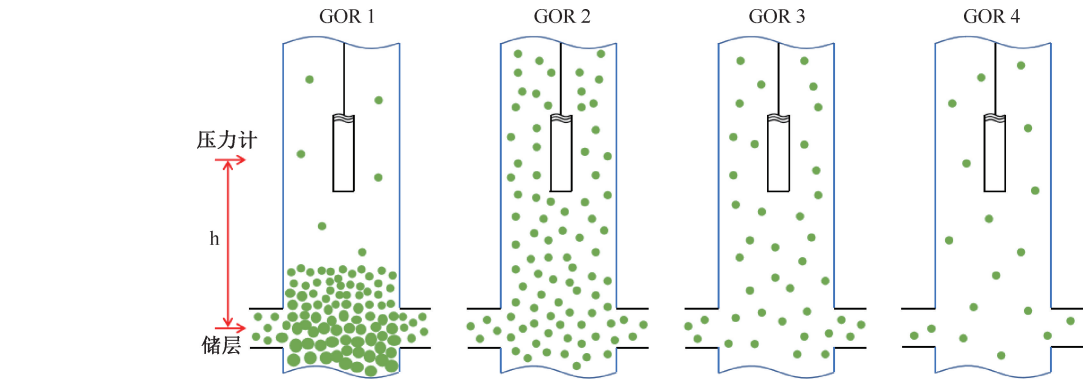


图 6 测试制度由小变大时流动状态和气油比变化
Fig. 6 Changes in flow state and GOR with testing system

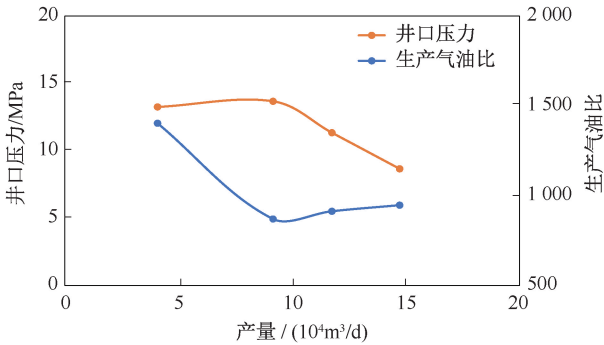


图 7 井口压力和气油比随井底压力变化情况
Fig. 7 Wellhead pressure and GOR vary with bottomhole pressure

2.2 最大产能测试制度确定

对于低渗透储层,采用较大的测试制度测试时,井筒附近压力降落明显,但压力传播范围有限,流压值不能代表对应产量下的稳定压力。所以采用大油嘴的测试制度,需要保证足够的测试时间,如果测试作业有时效限制,则需要找到允许的测试时间内最大的测试制度,在合理的产量曲线设置测试制度。如图所示为海上某低渗凝析气井的测试曲线,测试分为 4 个求产制度,可以看到最大油嘴的流压值还有明显下降趋势,没有达到稳定状态,测试时间不够(见图 8)。

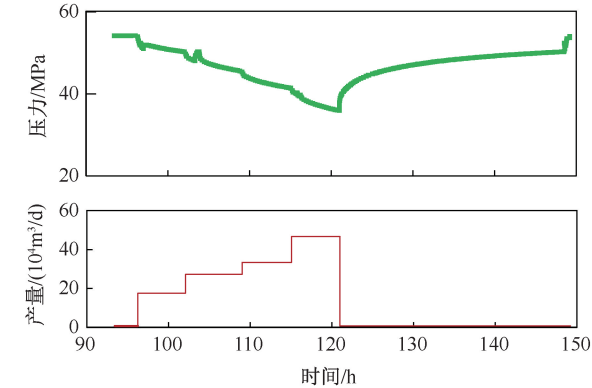


图 8 测试制度时间设定误差
Fig. 8 Time setting error of testing system

计算测试数据的 IPR 曲线(见图 9),最大制度测点明显偏离正常趋势。测试期间气油比动态变化如图,前三个制度能较快实现稳定,最大测试制度时,气油比上升速度较快,反应井底流压持续下降趋势(见图 10)。

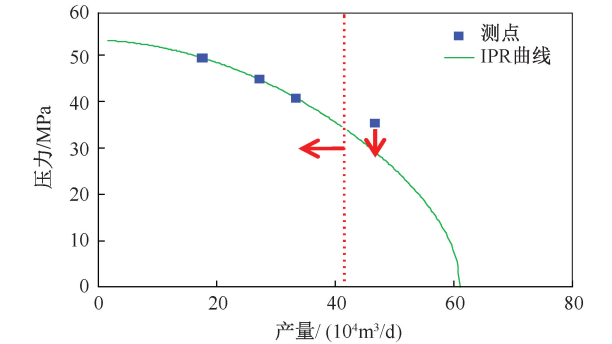


图 9 大油嘴测试制度不合理引入测量误差
Fig. 9 Measurement errors introduced by unreasonable testing systems

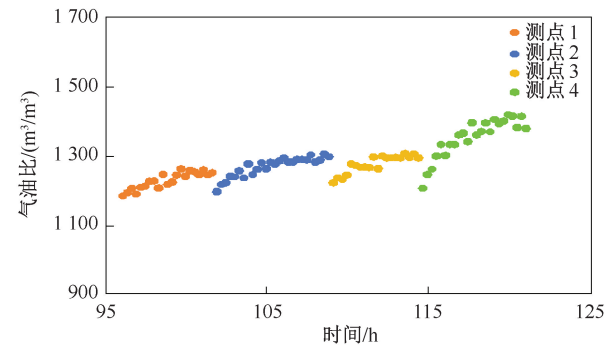


图 10 产能测试期间气油比动态变化
Fig. 10 Dynamic changes of GOR during production capacity testing

通过上述分析,总结出确定合理产能测试区间的方法(见图 11)。基于井口的实际测试动态数据,实时判断测试稳定状态,实现 3 个以上的产能测点,准确计算产能。

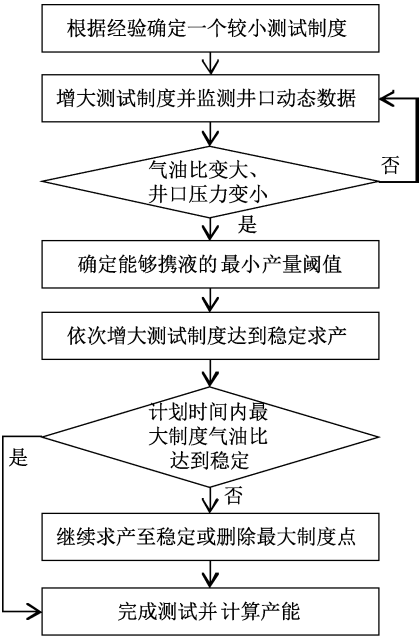


图 11 产能测试优化流程示意图
Fig. 11 Optimization process for production capacity testing

3 低渗储层凝析气藏测试井例

X 井是低渗凝析气藏的一口开发井,开发一年后计划进行产能测试,通过无阻流量计算给日常配产提供指导。该井所在层位深度为 3 720~3 852 m,裸眼生产。

3.1 X 井产能测试

该井所在储层流体的实验室分析显示地露压差小,开发初期凝析油开始析出,日常生产气油比约 1 290。本次产能测试要求保证 3 个测试制度,能够计算二项式产能方程。

展示测试期间井口压力和气油比数据(见图 12)。根据预估的最小测试制度调整油嘴后,井口压力逐步达到稳定,气油比在制度调整后明显跃升,然后逐步降低;待井口压力和气油比稳定后,开始增大油嘴,此时井口压力出现大于最小油嘴的情况,表明最小油嘴时,凝析油在气产量变小后滑落井底,在井底堆积抵消一部分压力,最小制度测点不满足产能计算的稳定测点的要求。在确定稳定测点 1 后,后续又进行了两个制度的测试,井口动态数据变化趋势均正常:井口压力随油嘴变大逐步降低,每个制度均达到稳定;气油比随着油嘴变大逐步增大。展示实际测试的压力和产量数据如下(见图 13)。

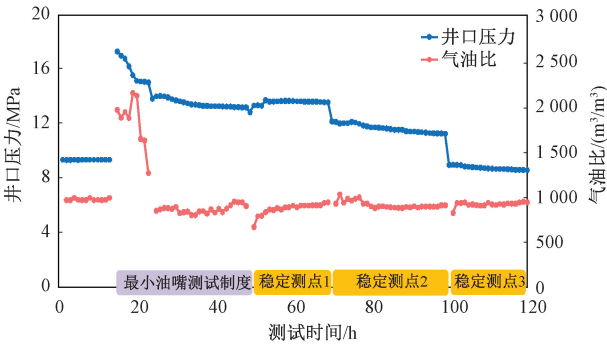


图 12 X 井产能测试动态数据
Fig. 12 Dynamic data of production capacity testing for X well

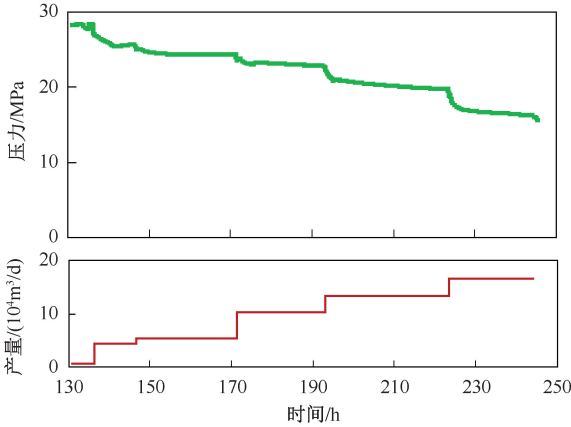
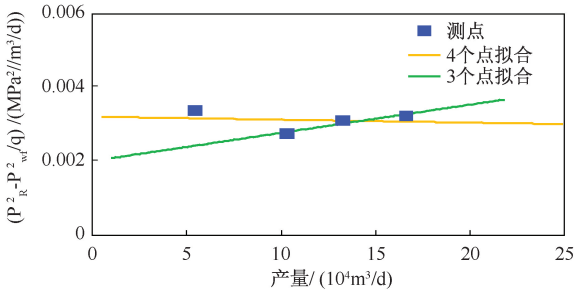


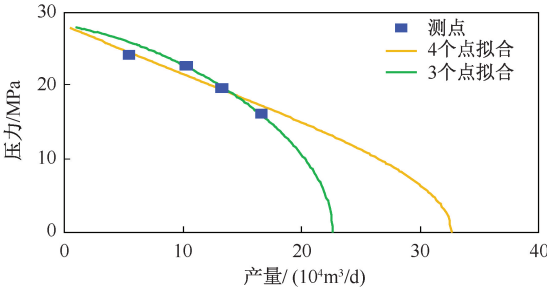
图 13 X 井产能测试曲线
Fig. 13 Production capacity testing curve of X well

3.2 X 井产能计算

产能测试结束后,利用二项式方法计算 X 井的产能方程,产能曲线和 IPR 曲线如图 14 所示。



a. 不同测点的产能曲线



b. 不同测点的IPR曲线

图 14 X 井产能曲线和 IPR 曲线计算
Fig. 14 Production capacity and IPR curve of X well

可以看出最小油嘴测点偏离整体测试趋势,排除该测点后,通过其他稳定测点回归计算,能够准确评价该井的产能方程,计算该井目前的无阻流量约为 $23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4 结论

(1)分析了低渗透凝析气藏气井产能测试时导致异常的主要影响因素:平均地层压力、凝析油析出、测试制度等,并分析了各个因素对产能方程影响规律和特点。

(2)对于低渗凝析气井的产能测试,总结出了最小和最大测试制度阈值的获取方法,通过气油比、井口压力等井口动态指标参数,辅助设定合理的测试区间,保证获取到三个以上合理测点,从而形成产能测试制度选取的指导流程和方法。

(3)井场实际井例的测试中,综合分析流体相态特征和井口动态参数变化,指导现场判断第一个制度异常,并根据气油比稳定增大、井口压力稳定减小的规律合理设置后续三个测试制度,保证了产能方程准确获取和无阻流量的准确计算。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司对本文技术现场应用的支持,感谢中法渤海地质服务有限公司领导和同事在方法研究方面的帮助。

参考文献

- [1] G. Narayanaswamy, G. A. Pope, M. M. Sharma, et al. Predicting gas condensate well productivity using capillary number and non-darcy effects[R]. SPE 51910, 1999.
- [2] 张黔川,吕涛,吕劲. 气藏水平井非达西流动二项式产能试井公式[J]. 天然气工业, 2004, 24(10):83-85.
ZHANG Qianchuan, LYU Tao, LYU Jin. Non-darcy binomial deliverability testing formula of horizontal gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(10):83-85.
- [3] 康晓东,李相方,郝伟. 气井高速非达西流动附加压降计算公式的修正[J]. 油气井测试, 2004, 13(5):4-5.
KANG Xiaodong, LI Xiangfang, HAO Wei. Pressure drop calculation of non-darcy flow at high velocity for gas well[J]. Well Testing, 2004, 13(5):4-5.
- [4] A Hashemi, Gringarten A-C. Comparison of well productivity between vertical, horizontal and hydraulically fractured wells in gas-condensate reservoirs[R]. SPE 94178, 2005.
- [5] 刘萍,杨辉华. 低速非达西渗流条件下水平气井产能预测公式[J]. 油气井测试, 2008, 17(6):19-20.
LIU Ping, YANG Huihua. The formula about productivity forecast at the condition of low velocity non-darcy percolation[J]. Well Testing, 2008, 17(6):19-20.
- [6] 何军,贾爱林,胡永乐,等. 考虑启动压力梯度的新的低

渗气藏指数式产能方程[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(4):118-121.

HE Jun, JIA Ailin, HU Yongle, et al. A new exponential productivity equation for low permeability gas reservoirs considering starting pressure gradient[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(4):118-121.

- [7] 张新,冯麟惠,王钊潦,等. 考虑应力敏感储层与变启动压力梯度的低渗气藏产能方程[J]. 河南化工, 2012, 29(24):8-11.

ZHANG Xin, FENG Linhui, WANG Fanliao, et al. Productivity equation for low-permeability gas reservoirs considering stress sensitive reservoirs and variable starting pressure gradients[J]. Henan Chemical Industry, 2012, 29(24):8-11.

- [8] 袁淋,李晓平,张良军. 异常高压气藏产水水平井产能影响因素分析[J]. 天然气与石油, 2016, 34(2):53-57.

YUAN Lin, LI Xiaoping, ZHANG Liangjun. Analysis of effect on productivity of gas-water horizontal well in over-pressured gas reservoir[J]. Oil and Gas Field Development, 2016, 34(2):53-57.

- [9] 卜亚辉,姚军,李爱芬,等. 三维油藏流动电位数值模拟及油水前缘预测[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(1):81-86.

BU Yahui, YAO Jun, LI Aifen, et al. 3D numerical simulation of streaming potential in water-flooded reservoir for oil-water front prediction[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2014, 38(1):81-86.

- [10] 赵欣. 煤层气产能主控因素及开发动态特征研究[D]. 中国矿业大学, 2018.

ZHAO Xin. The study of main influence factors on productivity of coalbed methane well and the development performance [D]. China University of Mining and Technology, 2018.

- [11] 潘元,王永辉,车明光,等. 基于灰色关联投影随机森林算法的水平井压后产能预测及压裂参数优化[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2021, 36(5):71-76.

PAN Yuan, WANG Yonghui, CHE Mingguang, et al. Post-fracturing production prediction and fracturing parameter optimization of horizontal wells based on grey relational projection random forest algorithm[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2021, 36(5):71-76.

- [12] 张文忠. 气井产能试井设计与分析方法研究[D]. 中国地质大学(北京), 2005.

ZHANG Wenzhong. Research on design and analysis methods for gas well capacity testing[D]. China University of Geosciences(Beijing), 2005.

- [13] 于伟强,赵洪涛,房鑫磊,等. 基于快速傅里叶变换的海上油气井试井解释潮汐效应消除方法[J]. 油气井测试, 2020, 29(6):1-7.

YU Weiqiang, ZHAO Hongtao, FANG Xinlei, et al.

Elimination of tidal effect in well test interpretation of offshore oil and gas wells based on fast Fourier transform [J]. Well Testing, 2020,29(6):1-7.

[14] Jose Umber A. Borges, Mahmoud Jamiolahmady. Well test analysis in tight gas reservoirs[R]. SPE 121113, 2009.

[15] 于伟强,毛敏,杨毅,等. 基于多参数敏感性分析的试井设计方法研究与应用[J]. 中国海上油气,2023,35(1): 89-97.

YU Weiqiang, MAO Min, YANG Yi, et al. Research and application of well test design method based on multi-parameter sensitivity analysis[J]. China Offshore Oil and Gas,2023,35(1):89-97.

[16] 杨滨, 方洋, 王国政. 气井产能递减分析与预测研究 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34 (4): 105-109.

YANG Bin, FANG Yang, WANG Guozheng. Analysis and prediction of the deliverability decline for gas well [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2012, 34(4): 105-109.

[17] 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.

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.

[18] 马帅,张风波,王雯娟,等. 高压低渗气井产能二项式改进与求解[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),

2020, 42(4): 121-126.

MA Shuai, ZHANG Fengbo, WANG Wenjuan, et al. Improvement and solution binomial production equation of high pressure and low permeability gas wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2020,42(4):121-126.

[19] 于伟强,赵洪绪,赵洪涛,等. 一种基于全局敏感性分析的气井产能测试制度优化设计方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2024, 39(2):79-86.

YU Weiqiang,ZHAO Hongxu,ZHAO Hongtao,et al. An optimization design method for gas well productivity testing system based on global sensitivity analysis[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition),2024, 39(2):79-86.

[20] 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[J]. Unconventional Oil & Gas. 2021, 8(6): 60 -67.

编辑 程莹

第一作者简介:田立强,男,1977 年出生,工程师,毕业于长江大学石油工程专业,现主要从事录试井技术支持与管理工作。联系电话:13682118938,Email:tianlq@cfbgc.com。通信地址:天津经济开发区信环西路 19 号天河科技园 1 号楼 3 层,邮政编码:300457。