

# 基于单探针 MDT 资料的气井产能计算新方法

李纪智<sup>1</sup>, 关利军<sup>1</sup>, 吴明录<sup>2</sup>, 张伟<sup>3</sup>

- 1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司勘探部 广东深圳 518000
- 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院 山东青岛 266580
- 3. 中海油服油技事业部深圳作业公司 广东深圳 518000

通讯作者:Email:lijzh10@cnooc.com.cn

项目支持:中海石油(中国)有限公司“十三五”科技重大项目“南海东部油田上产 2000 万吨关键技术研究”(CNOOC-KJ135ZDXM37SZ)

引用: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.

Cite: LI Jizhi, GUAN Lijun, WU Minglu, et al. A new productivity calculation method for gas wells based on single probe MDT data [J]. Well Testing, 2021,30(3):64-69.

**摘要** 为快速准确估算气井产能,以渗流力学理论为基础,根据单探针 MDT 测试过程中的渗流特点,建立单探针 MDT 球形流渗流数学模型,通过拉氏变换等方法求解模型,对单探针 MDT 试井曲线的特征及参数敏感性进行分析,提出应用单探针 MDT 试井解释结果计算探井产能的新方法。应用该方法对南海东部某口探井进行了产能计算,结果为  $14.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,与 DST 实际测试结果  $17.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,相差 15.9%,能满足对产能评价的需要。该方法可以部分代替 DST 测试,大幅度降低勘探成本,提高勘探效益。

**关键词** 单探针; MDT 测试; DST 测试; 试井解释; 产能; 压力; 流度

**中图分类号**:TE353      **文献标识码**:B      DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.03.011

## A new productivity calculation method for gas wells based on single probe MDT data

LI Jizhi<sup>1</sup>, GUAN Lijun<sup>1</sup>, WU Minglu<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>3</sup>

- 1. Exploration Department of Shenzhen Branch, CNOOC (China) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China
- 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China
- 3. Shenzhen Operation Company, COSL Oil Technology Department, Shenzhen, Guangdong 518000, China

**Abstract:** In order to quickly and accurately estimate the gas well productivity, based on the theory of percolation mechanics, according to the percolation characteristics of single probe MDT testing, the mathematical model of single probe MDT spherical flow percolation is established. The model is solved by Laplace transform and other methods, and the characteristics and parameter sensitivity of single probe MDT testing curve are analyzed. A new method is proposed to calculate the productivity of exploration wells by using the interpretation results of single probe MDT well test. The productivity of an exploration well in the east of South China Sea is calculated by this method, and the result is  $14.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ . Compared with DST actual test result  $17.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ . The difference is 15.9%, which can meet the needs of capacity evaluation. This method can partly replace DST test, greatly reduce exploration cost and improve exploration benefit.

**Keywords:** single probe; MDT test; DST test; well test interpretation; production capacity; pressure; mobility

产能评价是油气田勘探领域的首要问题。对于各种类型的油气田,前人进行了一些针对性的产能研究<sup>[1-4]</sup>。肖寒运用灰色关联分析方法,建立了针对威远页岩气区块的多元线性回归产能预测模型<sup>[5]</sup>。章雨等利用研究区内多口井的测井资料,分析单井产量与各测井参数的关系,建立了多元线性回归的产能预测模型<sup>[6]</sup>。张慧宇基于致密气藏拟稳态流动时产能方程中压差和产量关系公式,得到

了计算无阻流量和产能方程的“稳定点”法<sup>[7]</sup>。杨敏等建立了考虑异常高压水驱气藏难以录取井底压力测试资料时,考虑应力敏感的气井产能计算模型<sup>[8]</sup>。陈建华等针对低渗气井回压试井录取地层不稳定流动时的流压资料导致二项式产能方程计算产能存在误差的问题,建立了考虑渗透率应力敏感的异常高压低渗气藏的气井不稳定产能方程<sup>[9]</sup>。陈超峰等利用压力恢复及储层岩石特征资料,采用

瞬时 IPR 曲线,对高探 1 井的产能进行了预测<sup>[10]</sup>。

上述这些方法主要针对陆上油气田,且在进行产能计算时,所采用的渗透率主要来自测井或试井解释结果<sup>[11-12]</sup>。而在产能评价过程中,渗透率是产能评价的关键参数。目前,获得储层渗透率的途径主要有岩心分析、测井解释、MDT,以及试井解释<sup>[13-14]</sup>。岩心分析时,由于无法还原地层的原始状态,且没有用真实的地层流体去测量渗透率,导致测出的渗透率值与地层流动状态下的渗透率存在偏差<sup>[15]</sup>。测井解释出的渗透率只代表井筒周围小范围内的渗透率,且该范围内的地层在钻井过程中容易受到泥浆污染<sup>[16]</sup>。试井解释出的渗透率最能代表地层性质,但由于其测试成本高而不能适用于所有井。

MDT 也称模块化地层测试(The Modular Formation Dynamics Testing),广泛应用于勘探井中,它不仅采集地层流体,还能够通过测试地层的压力变化,快速地估算地层渗透率<sup>[17-19]</sup>。MDT 包括单探针 MDT 和双封隔器 MDT 两种,而二者之中又以单探针 MDT 成本低廉,应用最为广泛,而现场中有众多单探针 MDT 测压资料,无法得到充分利用。近年来,开始有学者将 MDT 压降流度与气相渗透率联系起来。鹿克峰等提出了利用 MDT 压降流度计算气相渗透率的方法,并以东海低渗气田稳态法实验数据为基础,建立了该地区的经验关系式<sup>[20]</sup>,但该关系式仅适用于东海地区。

基于以上问题,本文在单探针 MDT 渗流特征的基础上,通过建立和求解渗流数学模型,研究了其试井曲线特征及参数敏感性。在此基础上,进一步研究了基于单探针 MDT 测压资料计算探井产能的新方法。研究成果对充分利用 MDT 测压资料、提高探井的测试成功率具有重要指导意义。

## 1 渗流数学模型的建立及求解

基于渗流力学基本原理,根据单探针 MDT 测试时的流体流动特征,建立了相应的渗流数学模型,并研究了该模型的求解方法。

### 1.1 模型建立

单探针 MDT 电缆地层测试时,在探针挤破泥饼与地层贯通后,地层中的流体从探针的上下、前后、左右,四面八方以球形流的形式流入测试器。为此,针对以上的流动形态,做以下基本假设:

(1)油藏均质各向同性、水平等厚,顶底边界不

渗透;

(2)地层和流体微可压缩,且压缩系数为常数;

(3)流体为单相,且在地层中的流动符合达西定律;

(4)不考虑重力和毛管力的影响。

基于以上假设,定义无因次量如下:

$$p_D = \frac{1.842 \times 10^{-3} Kh}{q\mu} (p_i - p)$$

$$t_D = \frac{3.6Kt}{\phi\mu C_i r_s^2}, \quad r_D = \frac{r}{r_s}$$

式中: $p$  为探针处压力,MPa; $p_i$  为原始地层压力,MPa; $q$  为井点处流量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $\mu$  为流体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ; $K$  为地层渗透率, $\mu\text{m}^2$ ; $h$  为地层厚度,m; $t$  为时间,h; $\phi$  为地层孔隙度,小数; $C_i$  为综合压缩系数, $\text{MPa}^{-1}$ ; $r$  为渗流半径,m; $r_s$  为探针半径,m;下标 D 表示无因次。

在上述假设及无因次参数定义下,无限大地层任意一点(连续点源)在 Laplace 空间中的渗流数学模型为

$$\begin{cases} \frac{1}{r_D^2} \frac{d}{dr_D} \left( r_D^2 \frac{d\bar{p}_D}{dr_D} \right) - s\bar{p}_D = 0 \\ \bar{p}_D(r_D \rightarrow +\infty) = 0 \\ \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left( r_D^2 \frac{d\bar{p}_D}{dr_D} \right)_{r_D=\varepsilon} = -\frac{h_D}{2s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $s$  为 Laplace 空间参数。

### 1.2 模型求解

对方程组(1)进行求解,可得无限大地层任意一点在 Laplace 空间的点源解,即

$$\bar{p}_D = \frac{h_D}{2s} \frac{\exp(-\sqrt{s} r_D)}{r_D} \quad (2)$$

对于顶底不渗透的地层,可采用镜像映射和叠加原理消除边界的影响。Ozkan E. 等给出了顶底不渗透无限大油藏在拉氏空间的点源解<sup>[21]</sup>,即

$$\Delta\bar{p}(s) = \frac{\mu}{2\pi K L h_D s} \left[ K_0(r_D \sqrt{s}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_0(r_D \varepsilon_n) \cos\left(n\pi \frac{Z}{h}\right) \cos\left(n\pi \frac{Z_w}{h}\right) \right] \quad (3)$$

其中

$$\varepsilon_n = \sqrt{s + n^2 \pi^2 / h_D^2}$$

式中: $L$  为特征长度(此处  $L=r_s$ ),m。

采用以上的无因次定义对(3)式进行无因次化,得到顶底不渗透无限大地层中任意一点在 Laplace 空间关于  $s$  的压降解,即

$$\bar{p}_D(s) = \frac{1}{s} \left[ K_0(r_D \sqrt{s}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_0(r_D \varepsilon_n) \cos\left(n\pi \frac{Z_D}{h_D}\right) \cos\left(n\pi \frac{Z_{wD}}{h_D}\right) \right] \quad (4)$$

式(4)即为单探针测试时引起的压降在 Laplace 空间的解。该解并没有考虑管线存储和近井污染的影响。引入无因次管线存储系数  $C_D$  和表皮系数  $S$ , 利用 Duhamel 原理, 可得到如下的 Laplace 空间解<sup>[22]</sup>, 即

$$\bar{p}_{wD}(s) = \frac{s\bar{p}_D(s) + S}{s\{1 + C_D s[s\bar{p}_D(s) + S]\}} \quad (5)$$

式中:  $C_D$  为无因次管线存储系数;  $S$  为表皮系数。

式(5)即为单探针 MDT 测试考虑管线存储和表皮效应时的 Laplace 空间解。

## 2 试井曲线特征及参数敏感性

利用 Stehfest 方法<sup>[23]</sup>对以上拉氏空间解进行数值反演, 得到单探针 MDT 的真实空间解, 应用 Matlab 进行编程, 得到试井曲线及参数敏感性特征。

### 2.1 试井曲线特征

单探针 MDT 的理论压力及压力导数曲线如图 1 所示。

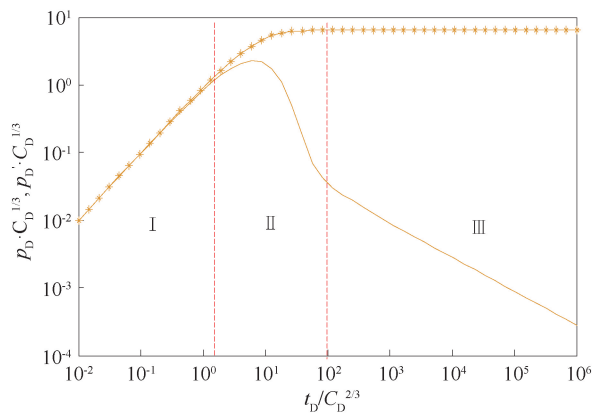


图 1 单探针 MDT 试井曲线

Fig. 1 Single probe MDT well test curve

从图 1 可以看出, 单探针 MDT 试井曲线可划分为三个阶段: (1) 第 I 阶段为纯管线存储阶段, 压力及其导数曲线为一条重合的单位斜率直线。此时, 活塞抽取的是管线内储存的流体, 地层内的流体还未流动。(2) 第 II 阶段为过渡段, 压力由持续上升开始变得平缓, 压力导数则由上升转为下降, 上升和下降的过渡过程中形成一个类似径向流的“隆起”。该阶段管线存储的影响逐渐减小, 地层流体开始流动, 受管线存储和表皮效应共同影响。

(3) 第 III 阶段为球形流阶段, 压力曲线近似平缓, 压力导数曲线呈  $-1/2$  斜率的直线, 该阶段管线存储的影响完全消失, 流体沿球半径方向流向探针, 表现为典型的球形流。

### 2.2 参数敏感性

单探针 MDT 试井曲线主要受管线存储系数  $C$  和表皮系数  $S$  的影响:

(1) 固定参数  $C_D = 100$ , 取不同的表皮系数  $S$  值, 研究表皮系数对试井曲线的影响特征, 如图 2 所示。

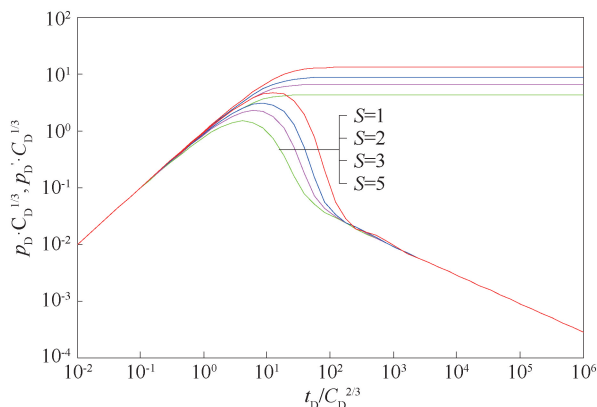


图 2 表皮系数对试井曲线的影响

Fig. 2 Effect of skin factor on well test curve

由图 2 可见, 表皮系数  $S$  主要影响第 II、III 流动阶段。  $S$  越大, 第 II 阶段压力导数曲线的“隆起”越高;  $S$  越大, 第 III 阶段的开始时间越晚, 压力和压力导数曲线的距离越大。不管  $S$  的值多大, 第 III 阶段压力导数曲线最终重合为一条  $-1/2$  斜率的直线。

(2) 固定表皮系数  $S = 1$ , 取不同的参数  $C_D$  值, 研究管线存储系数对试井曲线的影响特征, 如图 3 所示。

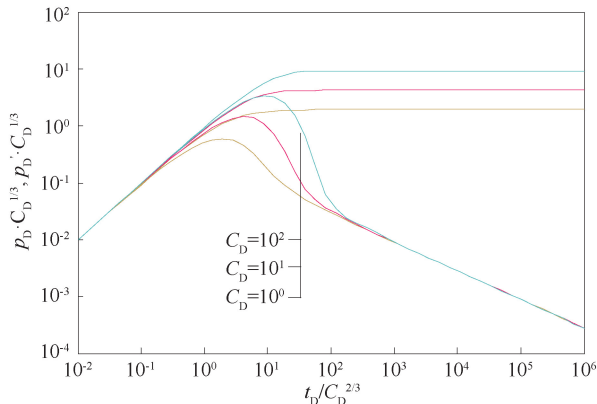


图 3 无因次管线存储系数对试井曲线的影响

Fig. 3 Effect of dimensionless pipeline storage coefficient on well test curve

如图 3 所示, 在以上的无因次定义下,  $C_D$  与  $S$

对试井曲线的影响规律相似,无法发现管线存储效应对试井曲线的真实影响规律。为此,将以上无因次参数转化为有因次参数,分别取值,研究有因次管线存储系数对MDT试井曲线的影响规律,如图4所示。

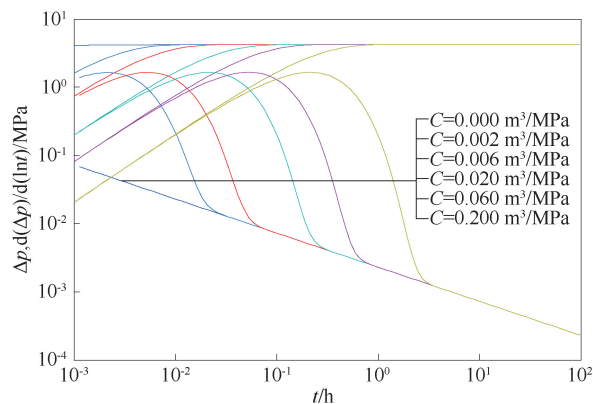
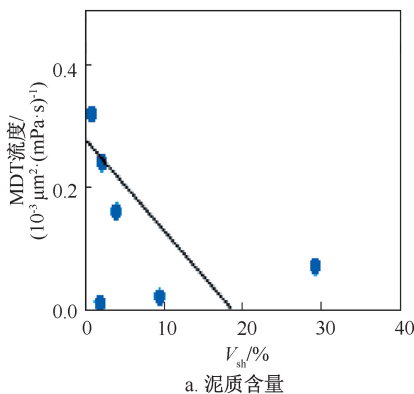


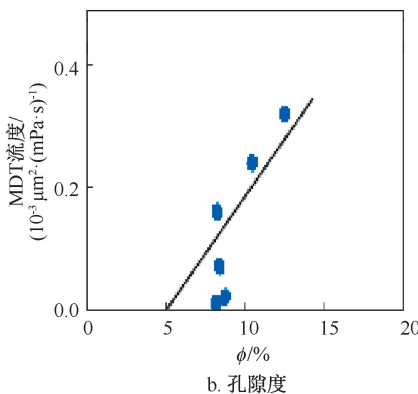
图4 存储系数对试井曲线的影响

Fig. 4 Effect of storage coefficient on well test curve

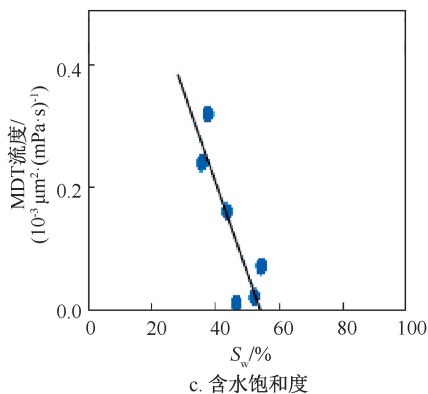
由图4可见,管线存储系数 $C$ 主要影响试井曲线的第I、II阶段。在其他参数相同的情况下, $C$ 越大,试井曲线在第I、II阶段的持续时间越长,进入球形流(-1/2斜率直线)的时间越晚。在测试时间较短的情形下,应尽量选择弹性形变较小的管线,以减少存储效应的影响。



a. 泥质含量



b. 孔隙度



c. 含水饱和度

图5 MDT流度与测井解释参数相关性曲线

Fig. 5 Correlation curve between MDT mobility and logging interpretation parameters

(2)利用下式,将各层段的MDT流度转化为地层流体(天然气)的流度,即

$$\lambda_g = \lambda \frac{\mu_w}{\mu_g} \frac{K_{rg}(S_w)}{K_{rw}(1 - S_{gr})} \quad (6)$$

式中: $\lambda_g$ 为天然气流度, $\mu\text{m}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ ;  $\lambda$ 为MDT测压流度, $\mu\text{m}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ ;  $\mu_w$ 为泥浆滤液黏度(可近似取为水黏度), $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $\mu_g$ 为天然气黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $K_{rg}(S_w)$ 为各层段含水饱和度下气相相对渗透率,小数;  $K_{rw}(1 - S_{gr})$ 为残余气饱和度下水相(泥浆滤液)

### 3 产能计算方法及矿场应用

在以上理论研究基础上,对单探针MDT压力测试资料进行试井解释,得到测点深度的液体(泥浆滤液)流度,将其转化为天然气生产时的气流度,并代入气井产能公式,即得到气井的产能。

#### 3.1 产能计算方法

MDT测压解释结果(主要是流度)无法直接用于产能计算。一是因为在MDT测压条件下,活塞抽取的主要是泥浆滤液,而不是地层的真实流体,因此要进行储层的产能计算,需要转化成地层流体的流度;二是MDT抽取流体的体积较少,压力扰动范围有限,若储层的非均质性比较严重,则仅靠少数几个测点的MDT流度代替整个储层进行产能计算,势必会造成较大误差。基于以上两个主要原因,本文采取以下方法进行产能计算:

(1)以现有MDT测点数据为基础,根据这些测点MDT流度与测井解释参数进行相关性分析,找到与MDT流度相关性比较强的量。如图5所示,本文探井MDT流度与泥质含量相关性不明显,而与孔隙度、含水饱和度的相关性较强。因此,用孔隙度、含水饱和度与MDT流度的关系进行二元回归,得到未测层段的MDT流度。

相对渗透率,小数。

(3)将以上各个层段的渗透率与净厚度相乘,有效厚度加权再除以总净厚度,得到整个测试层段的流度,再代入气井的产能下式进行计算,得到探井产能,即

$$q_{sc} = \frac{8.64 \times 10^{-2} \pi K h T_{sc} (\phi_e - \phi_{wf})}{p_{sc} T \ln(r_e/r_w + S)} \quad (7)$$

式中: $q_{sc}$ 为折算成标况下产气量, $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $h$ 为储层有效厚度, $\text{m}$ ;  $T_{sc}$ 为标准状况下温度, $\text{K}$ ;  $p_{sc}$ 为标准状况



下压力,MPa; $\phi_e$  为供给边界拟压力,MPa<sup>2</sup>/(mPa·s);  
 $\phi_{wf}$  为井底拟压力,MPa<sup>2</sup>/(mPa·s); $r_w$  为井眼半径,  
 m; $r_e$  为供给半径,m。

### 3.2 矿场应用

以南海东部一口探井某测点深度的MDT压力资料为例(图6)。主要参数如下:孔隙度14.5%,探针流动面积 $1.30 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ,测试流量 $1.8 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ,泥浆滤液黏度 $0.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,综合压缩系数 $1.62 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ 。应用计算机自动拟合方法,对MDT压力恢复阶段的数据进行试井解释,得到该测点深度的流量为 $9.2 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ,表皮系数为3.96,拟合曲线如图7所示。

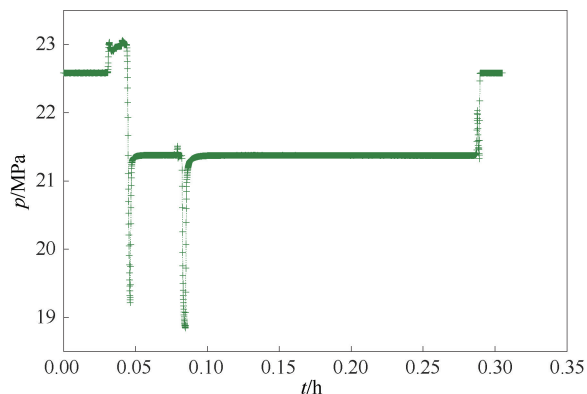


图6 单探针测试压力历史图

Fig. 6 Pressure history chart of single probe test

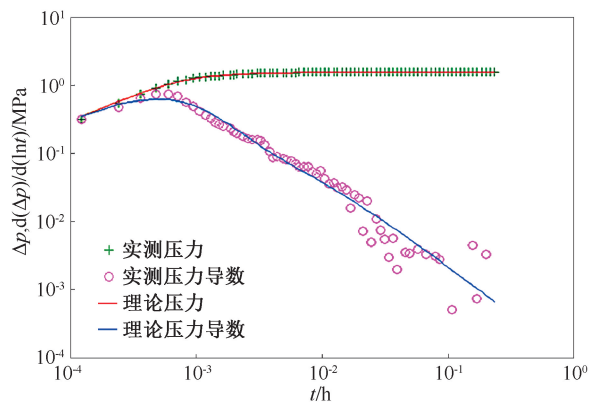


图7 单探针测试双对数拟合图

Fig. 7 Double logarithm fitting chart of single probe test

应用本文方法计算得到该井产能 $14.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,与DST实际测试结果 $17.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 相差15.9%,在工程许可的误差范围内,能满足产能评价预测的要求。

## 4 结论

(1)基于渗流理论,建立了单探针MDT试井解释模型。利用该模型对单探针MDT测试资料进行

试井解释,可得到储层渗透率、流度等参数,为产能计算提供依据。

(2)提出利用单探针MDT试井解释结果进行产能计算的方法。该方法计算的产能误差在20%以内,能满足产能评价的要求。

(3)该方法可部分替代DST测试,对大幅度降低DST测试成本、提高钻探成功率具有重要意义。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司“十三五”科技重大项目“南海东部油田上产2000万关键技术研究”的支持;感谢中海石油(中国)有限公司深圳分公司勘探部测试团队的大力支持;感谢中国石油大学(华东)吴明录老师的精心指导。

### 参考文献

- [1] 黎洪,彭苏萍. 高压气井产能评价方法研究[J]. 石油勘探与开发,2001,28(6):77-79.  
LI Hong, PENG Suping. High-pressure gas well productivity evaluation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001,28(6):77-79.
- [2] 刘洪,王新海,王祖文,等. 抽汲井产能评价方法[J]. 新疆石油天然气,2011,7(4):59-63.  
LIU Hong, WANG Xinhai, WANG Zuwen, et al. Deliverability evaluation method of swabbing well [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2011,7(4):59-63.
- [3] 刘华,胡小虎,王卫红,等. 页岩气压裂水平井拟稳态阶段产能评价方法研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2016,31(2):76-81.  
LIU Hua, HU Xiaohu, WANG Weihong, et al. Study on productivity evaluation method of fracturing horizontal shale gas well in pseudo-steady state [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2016, 31(2):76-81.
- [4] 王禹川,王怒涛,袁晓满,等. 碳酸盐岩缝洞型油藏产能评价方法探讨[J]. 断块油气田,2011,18(5):637-640.  
WANG Yuchuan, WANG Nutao, YUAN Xiaoman, et al. Discussion on deliverability evaluation method of fractured-vuggy carbonate reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011,18(5):637-640.
- [5] 肖寒. 威远区块页岩气水平井基于灰色关联分析的产能评价方法[J]. 油气井测试,2018,27(4):73-78.  
XIAO Han. Production evaluation method based on grey correlation analysis for shale gas horizontal wells in Weiyuan block [J]. Well Testing, 2018,27(4):73-78.
- [6] 章雨,李少华,李俊仪,等. 环江油田长6储层基于多元回归分析的产能评价[J]. 油气井测试,2019,28(2):68-72.  
ZHANG Yu, LI Shaohua, LI Junyi, et al. Productivity evaluation of Chang 6 formation in Huanjiang Oilfield based on multivariate regression analysis [J]. Well Testing, 2019,28(2):68-72.
- [7] 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.
- [8] 杨敏,李明,陈宝新,等. 异常高压水驱气藏产能评价及预测方法[J]. 油气井测试,2019,28(5):62-66.
- YANG Min, LI Ming, CHEN Baoxin, et al. Productivity evaluation and forecast method for waterflooding gas reservoir with abnormal high pressure [J]. Well Testing, 2019,28(5):62-66.
- [9] 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.
- [10] 陈超峰,孙刚,毛新军,等. 高探1井储层评价与产能分析[J]. 油气井测试,2020,29(5):61-67.
- CHEN Chaofeng, SUN Gang, MAO Xinjun, et al. Reservoir evaluation and productivity analysis of Well Gaotan 1 [J]. Well Testing, 2020,29(5):61-67.
- [11] 谢兴礼,朱玉新,冀光,等. 气藏产能评价方法及其应用[J]. 天然气地球科学,2004,15(3):276-279.
- XIE Xingli, ZHU Yuxin, JI Guang, et al. Evaluation methodology and application of well deliverability in gas reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2004,15(3):276-279.
- [12] 许立全,李秀生. 不同产能评价方法的对比分析[J]. 油气井测试,2005,14(6):15-17.
- XU Liquan, LI Xiusheng. Comparative analysis of different deliverability evaluation methods [J]. Well Testing, 2005,14(6):15-17.
- [13] 安小平,李相方,程时清,等. 不同方法获取渗透率的对比分析[J]. 油气井测试,2005,14(5):14-17.
- AN Xiaoping, LI Xiangfang, CHENG Shiqing, et al. Comparative analysis for permeability acquired from different methods [J]. Well Testing, 2005,14(5):14-17.
- [14] 鹿克峰,简洁,朱文娟,等. 利用MDT压降流度求取低渗气藏气相渗透率的方法[J]. 中国海上油气,2015,27(6):53-56.
- LU Kefeng, JIAN Jie, ZHU Wenjuan, et al. Calculating gas phase permeability with drawdown fluidity tested by MDT for low permeability gas reservoir [J]. China Offshore Oil and Gas, 2015,27(6):53-56.
- [15] AL-HARBI A, GRINGARTEN A, AKKURT R. A practical approach to determine permeability from wireline measurements [C]. SPE 111221, 2007.
- [16] TAWARE S V, TAWARE A G, SINHA A K, et al. Integrated permeability modeling using wireline logs core and DST data in a deepwater reservoir [C]. SPE 113599, 2008.
- [17] ONUR M, HEGEMAN P S, KUCHUK F J. Pressure-transient analysis of dual packer-probe wireline formation testers in slanted wells [C]. SPE 90250, 2004.
- [18] KRISTENSEN M, AYAN C, YONG C, et al. Flow modeling and comparative analysis for a new generation of wireline formation tester modules [C]. IPTC 17385, 2014.
- [19] CANTINI S, BALDINI D, BERETTA E, et al. Reservoir permeability from wireline formation testers [C]. SPE 164924, 2013.
- [20] 鹿克峰,简洁,朱文娟,等. 利用MDT压降流度求取低渗气藏气相渗透率的方法[J]. 中国海上油气,2015,27(6):53-56.
- LU Kefeng, JIAN Jie, ZHU Wenjuan, et al. calculating gas phase permeability with drawdown fluidity tested by MDT for low permeability gas reservoir [J]. China Offshore Oil and Gas, 2015,27(6):53-56.
- [21] OZKAN E, RAGHAVAN R. New solutions for well-test analysis problems. Part 1; Analytical considerations [J]. SPE Formation Evaluation, 1991,6(3):359-368.
- [22] YAO Jun, LI Aifen. General solutions for seepage flow in single porous medium [J]. Journal of Hydrodynamics, 1999,14(3):317-324.
- [23] 同登科,陈钦雷. 关于Laplace数值反演Stehfest方法的一点注记[J]. 石油学报,2001,22(6):91-92.
- TONG Dengke, CHEN Qinlei. Note on Stehfest method of Laplace numerical inversion [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001,22(6):91-92.

编辑 王 军

**第一作者简介:**李纪智,男,1983年出生,工程师,2006年毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业,现从事海上探井地层测试管理工作。电话:0755-26023376,18038181297;Email:lijzh10@cnooc.com.cn。通信地址:广东省深圳市南山区4168号中海油大厦A4006,邮政编码:518000。