

马天寿, 陈平. 2014. 随钻地层测试压力响应数学模型及物理实验考察. 地球物理学报, 57(7): 2321-2333, doi: 10. 6038/cjg20140726.

Ma T S, Chen P. 2014. Mathematical model and physical experimental research for pressure response of formation testing while drilling. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(7): 2321-2333, doi: 10. 6038/cjg20140726.

# 随钻地层测试压力响应数学模型及物理实验考察

马天寿, 陈平

油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 成都 610500

**摘要** 基于随钻地层测试基本原理和渗流理论, 建立了圆柱坐标系下压力下降和压力恢复阶段的压力扩散微分方程, 确定出随钻地层压力测试定解问题, 通过对定解问题的边界进行齐次化处理, 并采用有限差分方法建立了四维空间下的显格式差分方程, 以解析方法和有限差分方法分析了点源单相单测试室均质球形渗流问题, 两种方法计算误差小于 2.00%, 检验了有限差分方法的正确性. 采用有限差分方法定量分析了不同渗透率( $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  和  $10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) 地层下, 表皮效应、储集效应、地层非均质性、抽吸速率、抽吸探头半径等因素对压力响应的影响, 分析表明, 这些因素对压力响应曲线的影响十分显著, 主要表现在抽吸压降、压降速率、压力恢复速率、恢复时间等几个方面, 而且不同渗透率地层的敏感程度差异比较大. 建立了地层压力测试模拟实验平台, 模拟了 3 种不同渗透率( $108.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $16.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  和  $4.79 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) 地层的压力抽吸测试, 并采用有限差分方法对实验进行了数值模拟. 结果表明, 数值模拟与实测压力响应一致性非常好, 二者绝对误差小于 1.60 MPa, 相对误差低于 5.00% (最大误差 4.92%), 验证了有限差分数值方法的正确性和准确性.

**关键词** 地层压力; 孔隙压力; 随钻地层测试; 有限差分; 模拟实验

doi: 10. 6038/cjg20140726

中图分类号 P631

收稿日期 2013-08-17, 2014-06-12 收修定稿

## Mathematical model and physical experimental research for pressure response of formation testing while drilling

MA Tian-Shou, CHEN Ping

State Key Lab. of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

**Abstract** Based on the fundamental principle of formation testing while drilling (FTWD) and filtration theory, we built the pressure diffusion differential equation between pressure decline and pressure buildup in the cylindrical coordinate, and determined the definite solutions problem of FTWD. After homogenizing the boundary of definite solutions problem, the finite difference approach was adopted to establish the explicit difference equation under four-dimensional space and the analytic and finite difference methods were used to analyze homogeneous and spherical filtration problem in the condition of point source, single phase, single testing room. The calculation error of the two methods is less than 2.00%, indicating the validity of the finite difference method. With finite difference approach the influences of following factors on the response of different permeability ( $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,  $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  and  $10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) formation were quantitatively analyzed, including, skin effect, storage effect, formation heterogeneity,

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划(2013CB228003)及国家科技重大专项(2008ZX05026-001-09)资助.

**作者简介** 马天寿, 男, 1987 年 12 月生, 2009 年本科毕业于西南石油大学石油工程专业, 2012 年硕士毕业于西南石油大学油气井工程专业, 现为西南石油大学在读博士研究生, 主要从事页岩气钻井与随钻测量技术方面的研究. E-mail: matianshou@126.com

suction rate and suction probe radius. The analysis indicated that the impact of these factors on the pressure response curve is significant, which mainly manifested in the following respects, such as suction pressure drop, pressure drop rate, rate of pressure recovery, build-up time. And the sensitive degree of different permeability formation differs significantly. We established a formation pressure test simulation experiment platform to stimulate pressure suction testing in three different permeability ( $108.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,  $16.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  and  $4.79 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) formations and adopted finite difference approach to carry out numerical simulation for the experiment. The result shows that numerical simulation and the measured pressure response are consistent. The absolute error is less than 1.60MPa and the relative error less than 5.00% (maximum error is 4.92%). The correctness and accuracy of the finite difference numerical method were confirmed.

**Keywords** Formation pressure; Pore pressure; Formation testing while drilling; Finite difference; Simulated experiment

## 1 引言

地层压力(Formation Pressure)是指作用在地层孔隙内流体(油、气、水)上的压力,亦称地层孔隙压力(Formation Pore Pressure)或孔隙压力(Pore Pressure),地层压力是油藏地质和钻井工程重要的基础数据之一,准确地预测和监测地层压力,对于石油的勘探和开发具有及其重要的作用和意义(陈平, 2011). 为了准确的获取地层压力,形成了一系列的地层压力预测、检测方法,如钻速法(d 指数法、dc 指数法、A. M. 诺玛纳方法、等效深度法、Eaton 法、康布法等)(陈平, 2011; 杨进等, 2009; 管志川和魏凯, 2013)、地球物理方法(地震波法、Fillipone 法、R 比值法)(陈平, 2011; 郭志峰等, 2012)、测井方法(声波时差法)(陈平, 2011; Alan et al., 2013),但是这些方法的精度仍然很低. 后续又发展出了地层测试技术,如常规地层测试、钻杆地层测试(Drill-Stem Testing, DST)(Cervantes et al., 2012; 李纯泉和刘惠民, 2013)、电缆地层测试(Wireline Formation Testing, WFT)(Kuchuk et al., 2010; Du et al., 2013; Ferguson et al., 2013)等,其中,WFT 使用最为便捷,其应用也最广泛,WFT 历经电缆地层测试器、重复式电缆地层测试器(Repeat Formation Testing, RFT)、模块式电缆地层测试器(Modular Formation Dynamics Testing, MDT)等多个阶段的发展(Aguilera et al., 2012; Shazly and Nouh, 2013),但是,WFT 不仅占用钻机时间较长,在测试过程中因钻井液不循环可能导致仪器粘卡等风险,而且对于大斜度井、水平井、大位移井还存在仪器下入

困难等问题(Puech et al., 2013; 杨川等, 2013a).

随着地层测试技术应用的不断发展及钻井工程新的需求,20 世纪 90 年代中后期,在 WFT 的基础上提出了随钻地层测试(Formation Testing While Drilling, FTWD)的理念(Hooper et al., 1999). 2001 年,Panthfinder 能源服务公司推出了首支随钻地层测试器(Drilling Formation Tester, DFT)(Longis et al., 2004). 随后,其他公司也先后开发出同类产品(刘建立等, 2010; 吴旭东等, 2012; 张元中, 2012; 杨川等, 2013a),如 Halliburton 公司的 Geo-Tap(2002),Baker Hughes 公司的 Tes-Trak(2003)和 Schlumberger 公司的 Stetho-Scope(2003). 随钻地层测试器安装于井底钻具组合(Bottom Hole Assembly, BHA)中,在钻井作业暂停期间测量动态地层压力数据,由于此时近井壁地层受钻井液污染较轻,所测得的地层压力更准确(杨川等, 2013a). 近年来,在随钻地层测试技术基础上进一步发展了随钻地层流体取样(Formation Sampling While Drilling, FSWD)技术(杨兴琴等, 2012; 杨川等, 2013b),并研制出了 LWD-FAS(Logging While Drilling-Fluid Analysis and Sampling)工具,该工具可以一趟钻完成多次取样,便可取得更多更纯净的地层流体.

目前,国内外对 FTWD 压力响应方程(压力下降和压力恢复过程)的求解基本上都是以各向同性地层为基础(林梁, 1994; Hammond and Pop, 2005; 孟悦新等, 2010; 韩雄, 2012; 杨再生, 2013; 杨再生等, 2013),如圆柱形模型(林梁, 1994; 杨再生, 2013; 杨再生等, 2013)、半球形模型(林梁, 1994; 杨再生, 2013)、球形模型(Proett and Chin, 1998)、椭球形压降解释模型(关富佳等, 2011)、地层流量

分析技术(Formation-Rate-Analysis, FRA)(Sheng et al., 2004; Cartellieri et al., 2013),但实际地层大都具有非均质性和各向异性,其对测试结果的影响不可忽略(孙东生等, 2012; Chin, 2013),而且由于测试几何边界的复杂性,无法求得三维模型的解析解(林梁, 1994)。而后,国内外学者开始采用数值方法求解这类具有复杂几何边界的问题,谷宁等(2005a; 2005b)、周波等(2007)和周艳敏等(2009)根据渗流力学原理,建立了 WFT 的三维有限元分析模型并开发了求解程序,但这类方法并未得到实验验证,且目前针对 FTWD 的压力响应三维数值分析模型还未深入研究。因此,本文将根据 FTWD 的原理和特点,建立圆柱坐标系下 FTWD 的压力扩散微分方程,采用有限差分方法求解该定解问题,并采用模拟实验验证该模型的正确性,从而提供更加准确地认识和评价随钻地层测试结果的技术手段和方法。

## 2 随钻地层测试基本原理

FTWD 基本原理(如图 1):基于不稳定试井原理,在 FTWD 工具侧壁安装一测试探头,测试探头贴紧井壁地层,由抽吸系统抽吸地层流体而产生降压,通过压力计记录测试探头附近地层压力随时间变化曲线,称为压力恢复试井过程(由于压力逐渐上升,也称压力恢复),当时间趋于无穷大时,测试探头附近地层压力恢复至原始地层压力,运用渗流理论可计算出地层压力和地层渗透率等动态参数。

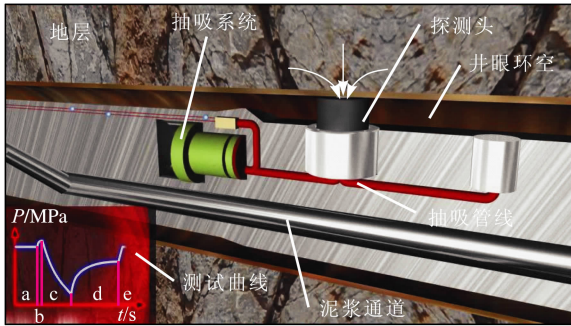


图 1 FTWD 测试原理

Fig. 1 Testing principle of FTWD

图 1 左下角为测试压力响应曲线,可以看出,FTWD 工具测试过程可分为 5 个阶段:a 测试前阶段→b 测试探头推靠阶段→c 压力下降阶段→d 压力恢复阶段→e 测试后阶段。测试中最重要的阶段主要是压力下降和压力恢复两个阶段,为此,建立压力下降和压力恢复过程中的压力响应数学模型,准

确解释压力响应曲线,从而得到真实地层孔隙压力。

## 3 随钻地层测试压力响应模型建立

FTWD 测试物理模型一般可简化为圆柱形模型或半球形模型,从而在柱坐标或球坐标下求解扩散方程的解析解。但由于真实地层具有非均质性、各向异性、可压缩性,地层流体具有单相、多相、可压缩性、相态变化、组分变化等特点,地层流体的流动是非稳定流动、非等温流动,其运动受力比较复杂(如惯性力、黏性力、重力、毛管力等),如果再考虑固相堵塞带、非均匀介质和井眼的存在,将使定解问题的求解十分复杂,难以得到有效的解析解,因此,可以采用数值分析方法来解决这类问题(林梁, 1994)。首先,需要建立 FTWD 的压力响应数学模型。

(1) 线性渗流方程:根据达西定律,三维达西公式(李晓平, 2008)为

$$\mathbf{V} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla P, \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{V}$  为速度矢量;  $\mathbf{K}$  为地层渗透率张量;  $\mu$  为地层流体黏度( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ );  $\nabla$  为 Hamilton 算子;  $P$  为地层压力( $\text{MPa}$ )。

(2) 地层流体状态方程:由于地层流体具有微可压缩性,随着压力降低,体积发生膨胀,则根据质量守恒定律,可得地层流体状态方程(谷宁等, 2005a)为

$$\rho = \rho_0 e^{C_p(P-P_0)}, \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为地层条件下流体密度( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $\rho_0$  为常数压力  $P_0$  下流体密度( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $C_p$  为流体压缩系数( $\text{MPa}^{-1}$ );  $P_0$  为常数压力( $\text{MPa}$ )。

(3) 渗流连续性方程:地层流体渗流必须遵循质量守恒定律,也称为连续性原理,从而得到微可压缩性流体在弹性孔隙介质中的质量守恒方程(李晓平, 2008)为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\mathbf{V}) = 0, \quad (3)$$

则将式(1)、(2)代入式(3),可得

$$\phi\mu \frac{\partial}{\partial t} [e^{C_p(P-P_0)}] = \nabla \cdot [\mathbf{K} \cdot e^{C_p(P-P_0)} \cdot \nabla P]. \quad (4)$$

由场论公式  $\nabla(\phi a) = \nabla\phi \cdot a + \phi \nabla \cdot a$ , 可得

$$C_p\phi\mu \frac{\partial P}{\partial t} = C_p \nabla \cdot P(\mathbf{K} \cdot \nabla P) + \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla P). \quad (5)$$

由于  $C_p$  是一个数量级为  $10^{-5}$  左右的数,与右端第二项相比,右端第一项非常小,可以忽略不计(林梁, 1994),因此,上式只保留第二项,则式(5)可变为

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{\phi\mu C_\rho} \nabla \cdot (\mathbf{K}\nabla P) = a_c \nabla \cdot (\mathbf{K}\nabla P), \quad (6)$$

其中,

$$a_c = \frac{1}{\phi\mu C_\rho}, \quad (7)$$

式中,  $t$  为时间(s);  $\phi$  为地层孔隙度(%);  $a_c$  为导压系数.

式(6)是三维坐标下 FTWD 的压力扩散微分方程. 由于地层具有非均质性, 其渗透率张量为

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

显然, 渗透率张量  $\mathbf{K}$  具有与应力张量完全相同的形式, 即  $\mathbf{K}$  也是对称张量. 因此, 渗透率张量也具有与应力张量类似的性质, 也存在相应的主张量. 对于各向异性地层, 常假设渗透率主张量与井眼坐标系重合, 即渗透率在  $xy$  平面内均为  $K_h$ , 在  $z$  方向上为  $K_z$ . 因此, 渗透率张量可以表示为

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_h & 0 & 0 \\ 0 & K_h & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中,  $K_h$  为横向渗透率( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ );  $K_z$  为垂向渗透率( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ).

在式(6)描述的微分方程中, 所描述的求解区域如图 2 所示, 其  $z$  轴与井轴重合, 由于井壁地层具有对称性, 一般采用圆柱坐标描述(林梁, 1994), 此时, 压力扩散微分方程可改写为

$$\frac{\partial P}{\partial t} = a_c \left[ \frac{K_h}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{K_h}{r^2} \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} + K_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right]. \quad (10)$$

式中,  $r$  为径向距离(m);  $\theta$  为井周角( $^\circ$ );  $z$  为井眼轴向距离(m).

在求解区域中, 井壁是一个封闭的界面, 井筒内和储集层中的空间不连通, 其中,  $\Gamma_1$  是在井壁处测试探头的面积,  $\Gamma_2$  是井壁面积. 在进行 FTWD 测试时, 测试探头处(即区域  $\Gamma_1$ ) 以流量  $q(t)$  抽吸地层流体, 因此, 探管过流面积近似处理为内半径是  $r_p$  的半球面, 其面积为  $2\pi r_p^2$ , 探头处渗流服从达西定律, 则

$$-v|_{r=r_w} = \frac{K_h}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = \frac{q(t)}{2\pi r_p^2}, \quad (11)$$

式中,  $r_w$  为井眼半径(m);  $r_p$  为测试探头半径(m);  $q(t)$  为抽吸流量(mL/s).

因此, 区域  $\Gamma_1$  处的内边界条件为

$$\frac{\partial P}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = \frac{q(t)\mu}{2\pi K_h r_p^2}, \quad (12)$$

而对于区域  $\Gamma_2$  所处的其余井壁壁面, 是一个封

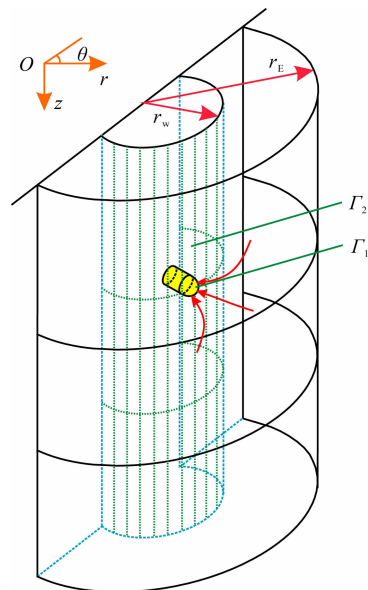


图 2 求解区域示意图(据林梁修改, 1994)

$r_w$  为井眼半径,  $r_e$  为外边界半径,  $\Gamma_1$  为井壁处测试探头边界,  $\Gamma_2$  为井壁边界.

Fig. 2 The sketch of solution domain (modified from Lin, 1994)

闭的界面, 井筒内和储集层中的空间不连通, 即压降梯度为 0, 因此, 区域  $\Gamma_2$  处的内边界条件为

$$\frac{\partial P}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = 0. \quad (13)$$

因此, 随钻地层测试的内边界条件为

$$\frac{\partial P}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = \begin{cases} \frac{q(t)\mu}{2\pi r_p^2 K_h} & \text{solution domain } \Gamma_1 \\ 0 & \text{solution domain } \Gamma_2 \end{cases}. \quad (14)$$

在求解区域中, 若取  $r \rightarrow \infty$ , 该处压力始终保持原始地层压力  $P_i$ . 因此, 外边界条件为

$$P(r \rightarrow \infty, \theta, z, t) = P_i, \quad (15)$$

式中,  $P_i$  为原始地层压力(MPa).

初始条件下, 求解区域的压力均为原始地层压力  $P_i$ . 因此, 初始条件为

$$P(r, \theta, z, t = 0) = P_i. \quad (16)$$

## 4 模型求解

压力扩散微分方程的求解常采用有限差分法, 有限差分法对求解边界条件整齐的定解问题, 具有较强的实用性(林梁, 1994). 而使用差分法常需要齐次边界, 但随钻地层测试压力响应模型的边界条件并非齐次, 因此, 需要将边界进行齐次化处理.

### 4.1 边界齐次化处理

对微分方程离散化过程中, 需将边界条件化为齐次边界. 为此, 选择一个满足式(15)、(16)的方程

$Q = P - P_i$ , 代入式(10)、(14)–(16)得

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = a_c \left[ \frac{K_h}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial Q}{\partial r} \right) + \frac{K_h}{r^2} \frac{\partial^2 Q}{\partial \theta^2} + K_z \frac{\partial^2 Q}{\partial z^2} \right], \quad (17)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = \begin{cases} \frac{q(t)\mu}{2\pi r_p^2 K_h} & \text{solution domain } \Gamma_1 \\ 0 & \text{solution domain } \Gamma_2 \end{cases}, \quad (18)$$

$$Q(r \rightarrow \infty, \theta, z, t) = 0, \quad (19)$$

$$Q(r, \theta, z, t = 0) = 0. \quad (20)$$

再选择一个满足式(18)的函数  $V$

$$V = \begin{cases} \frac{q(t)\mu(r-r_p)}{2\pi r_p^2 K_h} & \text{solution domain } \Gamma_1 \\ 0 & \text{solution domain } \Gamma_2 \end{cases}, \quad (21)$$

将函数  $V$  对  $r$  求导, 则有

$$\frac{dV}{dr} = \begin{cases} \frac{q(t)\mu}{2\pi r_p^2 K_h} & \text{solution domain } \Gamma_1 \\ 0 & \text{solution domain } \Gamma_2 \end{cases}. \quad (22)$$

再令  $Q = U + V$  代入式(17), 考虑到圆柱坐标系下

$\frac{\partial V}{\partial z}$  和  $\frac{\partial V}{\partial \theta}$  均为 0, 经变形整理可得

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a_c \left[ \frac{K_h}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{K_h}{r} \frac{dV}{dr} + \frac{K_h}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} + K_z \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right] - \frac{dV}{dt}. \quad (23)$$

为简化差分方程写法, 将其变形为

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a_c \left[ \frac{K_h}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{K_h}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} + K_z \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right] + f(r, \theta, z, t), \quad (24)$$

其中

$$f(r, \theta, z, t) = a_c \frac{K_h}{r} \frac{dV}{dr} - \frac{dV}{dt}, \quad (25)$$

再将  $Q = U + V$  代入式(18)–(20), 则边界条件和初始条件均处理为齐次边界, 即

$$\frac{\partial U}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = 0, \quad (26)$$

$$\frac{\partial U}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0, \quad (27)$$

$$U \Big|_{t=0} = 0. \quad (28)$$

式(24)–(28)构成了圆柱坐标系下 FTWD 压力响应的齐次边界定解问题.

#### 4.2 差分方程的建立

在式(24)所描述的 FTWD 压力响应定解问题中, 其左端是抛物型偏微分方程, 右端是三维椭圆型偏微分方程, 对这类问题的求解适宜采用差分法求解, 其涉及抛物型、椭圆型两种差分方程. 在定解问题中, 有三个空间坐标量和一个时间坐标量, 它们组成了一个四维空间, 采用圆柱形求解坐标系可建立起比较简便的差分格式, 此处采用显格式方法建立差分方程. 对于显式差分格式, 关于坐标和时间的变量  $r, \theta, z, t$  分别取等步长为  $h_r, h_\theta, h_z, \tau$ , 并令

$$\begin{aligned} r_i &= r_w + ih_r (i = 0, 1, 2, \dots, n), \\ \theta_j &= jh_\theta (j = 0, 1, 2, \dots, m), \\ z_L &= Lh_z (L = 0, 1, 2, \dots, s), \\ t_k &= k\tau (k = 0, 1, 2, \dots, T). \end{aligned} \quad (29)$$

式中,  $h_r, h_\theta, h_z, \tau$  分别为三个空间步长和时间步长;  $n, m, s, T$  分别为空间步和时间步的网格数;  $i, j, k, L$  为节点编号;  $r_i, \theta_j, z_L, t_k$  为节点.

这些节点将连续的四维空间离散化, 共用了  $(n+1) \times (m+1) \times (s+1) \times (T+1)$  个节点代替求解域空间. 在四维空间节点  $(r_i, \theta_j, z_L, t_k)$  上, 可分别采用相应节点的差分方程近似代替对时间  $t$  的导数、对  $r$  的导数、对  $\theta$  的导数以及对  $z$  的导数.

(1) 用向前差商近似代替对时间  $t$  的一阶导数

$$\left( \frac{\partial U}{\partial t} \right)_{ijL}^k = \frac{U_{ijL}^{k+1} - U_{ijL}^k}{\tau} + o(\tau), \quad (30)$$

式中,  $o(x)$  为截断误差, 其中  $x$  可以是  $h_r, h_\theta, h_z, \tau$ ;

(2) 用中心差商近似代替对半径  $r$  的导数

$$\left[ \frac{K_h}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) \right]_{ijL}^k = \frac{K_{h,ij}}{r_i h_r^2} \left[ r_{(i+0.5)} U_{(i+1)jL}^k - (r_{(i+0.5)} + r_{(i-0.5)}) U_{ijL}^k + r_{(i-0.5)} U_{(i-1)jL}^k \right] + o(h_r^2), \quad (31)$$

(3) 用中心差商近似代替对  $\theta$  的导数

$$\left( \frac{K_h}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} \right)_{ijL}^k = \frac{K_{h,ij}}{(r_i h_\theta)^2} [U_{i(j+1)L}^k - 2U_{ijL}^k + U_{i(j-1)L}^k] + o(h_\theta^2), \quad (32)$$

(4) 用中心差商近似代替对  $z$  的导数

$$\left( K_z \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right)_{ijL}^k = \frac{K_{z,L}}{h_z^2} [U_{ij(L+1)}^k - 2U_{ijL}^k + U_{ij(L-1)}^k] + o(h_z^2), \quad (33)$$

用式(30)–(33)的差商逼近式(24)的微商, 可得

$$\begin{aligned} U_{ijL}^{k+1} - U_{ijL}^k &= a_c \tau \left\{ \frac{K_{h,ij}}{r_i h_r^2} [r_{(i+0.5)} U_{(i+1)jL}^k + r_{(i-0.5)} U_{(i-1)jL}^k - (r_{(i+0.5)} + r_{(i-0.5)}) U_{ijL}^k] \right. \\ &\quad \left. + \frac{K_{h,ij}}{(r_i h_\theta)^2} [U_{i(j+1)L}^k - 2U_{ijL}^k + U_{i(j-1)L}^k] + \frac{K_{z,L}}{h_z^2} [U_{ij(L+1)}^k - 2U_{ijL}^k + U_{ij(L-1)}^k] \right\} + \tau f_{ijL}^k, \end{aligned} \quad (34)$$



其中,

$$f_{ijL}^k = f(r_i, \theta_j, z_L, t_k). \quad (35)$$

将式(34)整理成便于计算的形式:

$$U_{ijL}^{k+1} = a_0 U_{ijL}^k + a_1 U_{(i+1)jL}^k + a_2 U_{(i-1)jL}^k + a_3 U_{i(j+1)L}^k + a_3 U_{i(j-1)L}^k + a_4 U_{ij(L+1)}^k + a_4 U_{ij(L-1)}^k + \tau f_{ijL}^k \quad (36)$$

其中,

$$a_0 = 1 - a_c \tau \left[ \frac{1}{r_i h_r^2} K_{h,ij} (r_{i+0.5}) + r_{i-0.5} \right] + \frac{2}{(r_i h_\theta)^2} K_{h,ij} + \frac{2}{h_z^2} K_{z,L}, \quad (37a)$$

$$a_1 = a_c \tau \frac{1}{r_i h_r^2} K_{h,ij} r_{i+0.5}, \quad (37b)$$

$$a_2 = a_c \tau \frac{1}{r_i h_r^2} K_{h,ij} r_{i-0.5}, \quad (37c)$$

$$a_3 = a_c \tau \frac{1}{(r_i h_\theta)^2} K_{h,ij}, \quad (37d)$$

$$a_4 = a_c \tau \frac{1}{h_z^2} K_{z,L}. \quad (37e)$$

利用式(26)–(28)在节点上的值

$$U_{1jL}^k - U_{0jL}^k = 0, \quad (38)$$

$$U_{ijL}^0 = 0. \quad (39)$$

这样,就可以依次算出  $k=0, 1, 2, \dots, T$  各层上的值  $U_{ijL}^k$ , 即不同时刻的值. 可以证明,对于三围充分光滑的  $U$ , 式(36)的收敛的条件(林梁, 1994)是

$$\frac{a_c \tau}{h_{\min}^2} \leq \frac{1}{6}, \quad (h_{\min} = \min\{h_r, h_\theta, h_z\}). \quad (40)$$

式中,  $h_{\min}$  为三个空间步长的最小值, 即  $h_{\min} = \min\{h_r, h_\theta, h_z\}$ .

因此,在编程计算过程中,需要选择合适的步长,才能得到收敛解. 式(36)是非对称方程组,每个线性方程组最多有 5 个变量. 系数矩阵  $A$  阶数为  $nms$ , 即共有  $(nms)^2$  个数组成系数矩阵,该矩阵中至少有  $(nms - 5) \times nms$  个零元素. 系数矩阵在  $m = n = s = 3$  时,所组成的方程组有强对角优势,方程绝对收敛,而且稳定性好. 这相当于把时间  $t$  看作常量,求解一个泊松方程;然后增加一个时间步长,再求下一时刻的解.

### 4.3 模型求解验证

为了验证模型和算法的正确性,需要对比数值计算方法和解析方法计算结果. 此处以点源单相单测试室均质球形渗流问题为例进行分析,采用表 1 所示基础数据,分别计算不同地层渗透率 ( $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  和  $10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) 情况

下的压力响应曲线,结果如图 3. 由图 3 可以看出,数值计算方法和解析方法得到的压力响应曲线吻合良好,压力响应曲线总体上表现出较好的一致性,两者的变化规律完全一致,仅存在微小差异,压力响应误差也比较小,  $K = 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  最大误差为 0.297%,  $K = 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  最大误差为 1.997%,  $K = 10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  最大误差为 0.193%, 两种方法计算误差小于 2%, 因此,本文的数值计算方法完全能够满足 FTWD 测试中压力响应分析的需求.

表 1 基础数据

Table 1 Primary data

参数名称	数值	参数名称	数值
地层压力 $P_i$ /MPa	50	过平衡压力 $\Delta P_{ob}$ /MPa	3.0
地层渗透率 $K(K_h)/10^{-3} \mu\text{m}^2$	1.0	表皮系数 $S$	1.0
地层非均质系数 $\eta$	1.0	井眼半径 $r_w$ /cm	10.8
地层孔隙度 $\phi$	0.2	探头半径 $r_e$ /cm	0.5
地层流体黏度 $\mu$ /(mPa·s)	1.0	抽吸速率 $q_0$ /( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.1
流体压缩系数 $C_f$ /MPa $^{-1}$	0.0004	管线体积 $V_s$ /cm $^3$	200

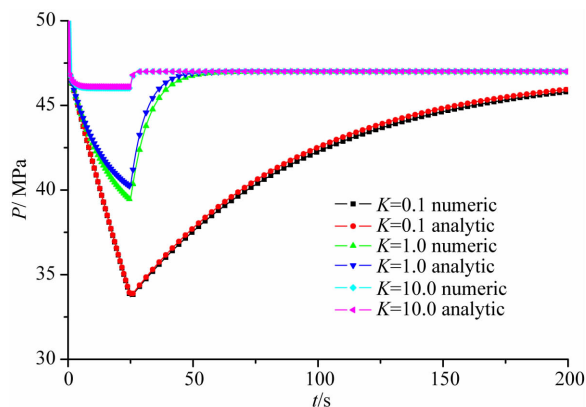


图 3 不同渗透率地层的压力响应曲线

Fig. 3 Pressure response curve under the formation with different permeability

## 5 随钻地层测试压力响应规律分析

在 FTWD 测试过程中得到的地层压力数据受诸多因素影响,如表皮效应、增压效应、抽吸速率、抽吸体积、压力恢复时间和抽吸管线储集效应等,为此,采用数值方法分析了这些因素的影响规律.

### 5.1 表皮效应的影响

FTWD 测试过程中也存在表皮效应,由于 FTWD 工具探测波及区域主要是在探头附近,使表

皮效应对测试结果影响较大,而且由于测试时间短、抽吸量小、波及范围小,使井周表皮区域对地层的测试影响更加显著.通常采用表皮系数表征表皮效应, $S>0$ 表示井壁受污染(有表皮), $S=0$ 表示井壁未受污染(无表皮), $S<0$ 表示井壁未受污染增产措施见效(负表皮),其中表皮系数为

$$S = \left(1 - \frac{r_p}{r_s}\right) \left(\frac{K_h}{K_s} - 1\right), \quad (41)$$

式中, $S$ 为表皮系数,无因次; $r_s$ 为固相阻塞带半径(m); $K_h$ 为地层原始渗透率( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ); $K_s$ 为固相阻塞带渗透率( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ).

分析不同地层渗透率( $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )情况下表皮系数对探头处压力响应的影响,结果如图4.由图4不难看出:(1)表皮系数对压力响应的影响非常显著,主要表现在压降速率、压降幅度、压力恢复时间等几方面.(2)若表皮系数越低(即污染越轻),地层流体更容易流到测试探头,其附加压降更小,测试压降小,压力恢复越快.(3)若表皮系数越高(即污染越重),地层流体更难流到测试探头,其附加压降更大,测试压降越大,压力恢复就越慢.(4)不同渗透率地层对表皮系数敏感程度差异比较大;低渗透性地层( $K < 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),表皮效应的影响比较显著;中等渗透和高渗透性地层( $K > 10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),表皮效应的影响相对减弱.

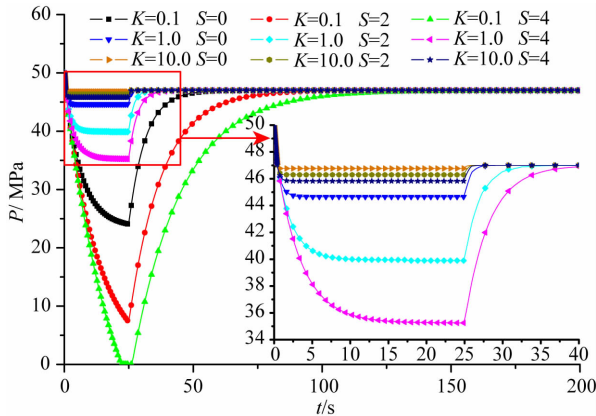


图4 表皮系数对压力响应曲线的影响

Fig. 4 The influence of skin factor on pressure response curves

## 5.2 储集效应的影响

FTWD工具通过探头抽吸流体的压力响应解释地层压力,其中,抽吸系统内部抽吸腔、抽吸管线等均会存储流体,即停止抽吸后,地层压力达到平衡状态前,探管入口处仍有一定流量流体,这将导致测

得的压力响应出现偏差,这种现象称为储集效应.由于随钻测试时间短,使得测试受储集效应的影响更加显著,测试数据点基本都受储集效应影响.合理的储集空间体积,可使压降变化平稳,不会出现高压冲击,特别是对低渗透性地层,抽吸时流体不能及时进入抽吸腔将导致过高的压降,甚至造成真空;另一方面,储集效应会使压力恢复时间增加,并影响最终抽吸压降.因此,需合理控制储集体积,使其有利方面得到利用,这就需要分析储集效应的影响.为此,分析了不同地层渗透率( $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )情况下储集体积对压力响应的影响,结果如图5.由图5不难看出:(1)储集体积对压力响应的影响也十分显著,集中表现在压降速率、压降幅度、压力恢复时间等几方面.(2)储集体积越小,测试压降和压力恢复越快,地层流体进入管线被存储压缩的量越小,从而使压降变化比较迅速,但有可能出现压力冲击现象.(3)储集体积越大,测试压降和压力恢复越平缓,地层流体进入管线被存储压缩的量越多,具有较好的缓冲作用,不会出现压力冲击现象.(4)不同渗透率地层对储集体积的敏感性差异也比较大;低渗透性地层( $K < 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),储集效应的影响更显著;中等渗透和高渗透性地层( $K > 10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),储集效应的影响相对减弱.

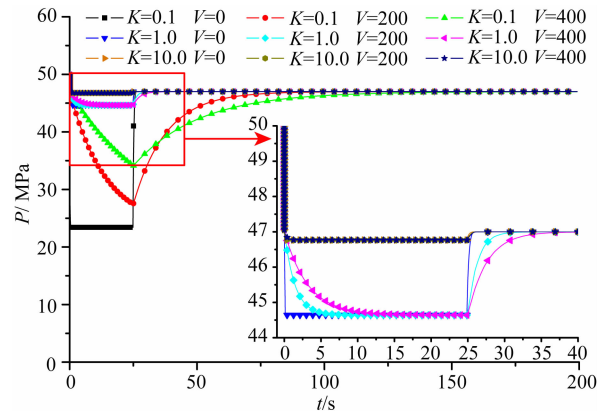


图5 储集体积对压力响应曲线的影响

Fig. 5 The influence of store volume on pressure response curves

## 5.3 地层非均质性的影响

真实地层一般具有一定的非均质性、各向异性,地层非均质性常采用地层非均质系数 $\eta$ 表示,其中

$$\eta = \sqrt{K_h/K_z}. \quad (42)$$

基于非均质系数的定义,分析了不同地层渗透率( $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )情况下,地层非均质系数 $\eta$ 对测试压力响应的影响,结

果如图 6. 由图 6 不难看出: (1) 地层非均质性对压力响应的影响非常明显, 其表现形式主要有压降速率、压降幅度、压力恢复时间等方面. (2) 不同渗透性地层, 非均质性的影响不同, 总体差异较大; 对低渗透性地层 ( $K < 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), 非均质性的影响更为显著; 对中等和高渗透性地层 ( $K > 10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), 非均质性的影响相对减弱. (3) 地层非均质性的影响是由于地层在垂向和横向的渗透率不同所致, 从而使得假设的球形渗流模型变为椭球形渗流模型, 即测试时压力波在地层里的传播为椭球状, 因此, 不同非均质性, 压力响应表现为测试压降和压力恢复时间不同.

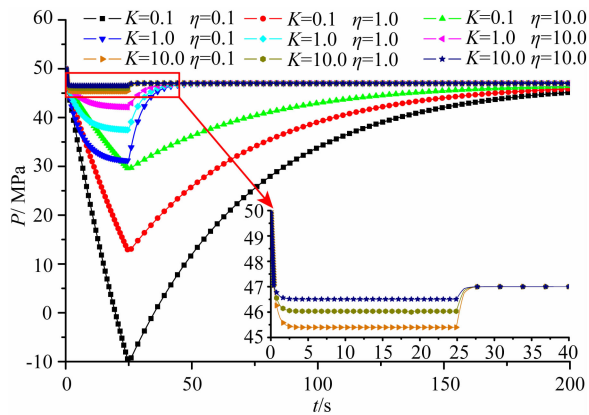


图 6 非均质系数  $\eta$  对压力响应曲线的影响

Fig. 6 The influence of inhomogeneous coefficient  $\eta$  on pressure response curves

#### 5.4 测试参数的影响

随钻地层测试要求尽量缩短测试时间 (以避免发生卡钻等井下复杂), 同时要求满足规定的测试压降, 保证近井壁地层的有效探测, 从而获得地层压力、渗透率等地层信息. 为此, 需研究测试可控参数的影响, 如抽吸速度、抽吸探头半径.

##### 5.4.1 抽吸速率的影响

抽吸速率是测试的可控因素, 也是测试响应最主要和最显著影响因素之一, 会影响平衡时候的压降以及压力恢复时间. 为此, 分析了不同地层渗透率 ( $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,  $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  和  $10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) 情况下抽吸速率  $q$  对测试压力响应曲线的影响, 结果如图 7.

由图 7 不难看出: (1) 抽吸速率对压力响应的影响非常明显, 其表现形式主要有压降速率、压降幅度、压力恢复时间等方面, 随着抽吸速率增加, 最终压降逐渐增加, 且基本成线性关系; (2) 不同渗透率地层, 对抽吸速率的敏感性差异比较大; 对低渗透地

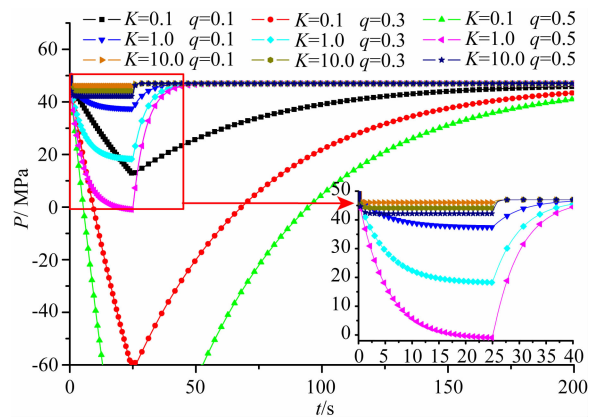


图 7 抽吸速率  $q$  对压力响应曲线的影响

Fig. 7 The influence of suction rate  $q$  on pressure response curves

层 ( $K < 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), 抽吸速率的影响更为显著, 若抽吸速率过大, 可能产生较大真空度 (即负压), 负压的产生对仪器损伤较大, 而且由于地层供液能力弱, 压力恢复时间长, 不利于快速测得真实地层压力, 因此, 低渗透性地层要求采用较低抽吸速率; 对中等和高渗透性 ( $K > 10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) 地层, 抽吸速率的影响相对减弱, 主要是由于地层渗透率高, 地层供液能力强, 抽吸过程中达到平衡的时间短, 因此, 为了缩短测试时间, 大都采用较大的抽吸速率, 使其快速达到预定压降.

##### 5.4.2 抽吸探头半径的影响

抽吸探头是地层流体进入的通道, 其尺寸直接影响着测试响应, 主要表现为两个方面: (1) 抽吸探头自身作为流动通道的影响 (流动速度); (2) 抽吸探头半径与井眼半径综合作用下的尺寸效应. 便于分析, 假设井眼半径固定, 调节探头尺寸, 分析地层渗透率为  $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  情况下抽吸探头半径  $r$  (0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 cm) 对压力响应的影响, 结果如图 8. 由图 8 可知, 若探头半径越小, 压降越大, 主要由于抽吸半径过小, 限制了抽吸流量, 造成了附加的压降, 而且探头半径过小, 其强度也难以保证, 并且容易堵塞. 若抽吸探头半径过大, 可能达不到需要的测试压降. 因此, 抽吸探头的尺寸对测试的影响也不能忽视.

在动态钻井过程中, 由于井下环境的复杂性, 还存在很多其他因素的影响, 诸如地层孔隙度、地层流体黏度、流体压缩系数、地层含气、泥饼性质、过平衡压力、井眼尺寸、钻井液浸泡时间、抽吸时间、恢复时间、抽吸流体量等, 各种因素的影响程度也存在较大差异, 限于篇幅, 不再讨论相关因素的影响.



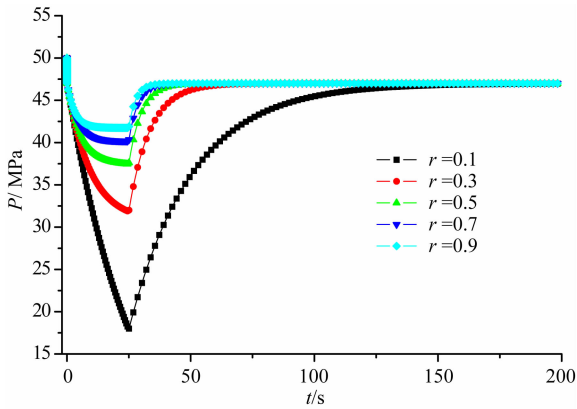


图 8 抽吸探头半径对压力响应曲线的影响

Fig. 8 The influence of radius of suction probe on pressure response curves

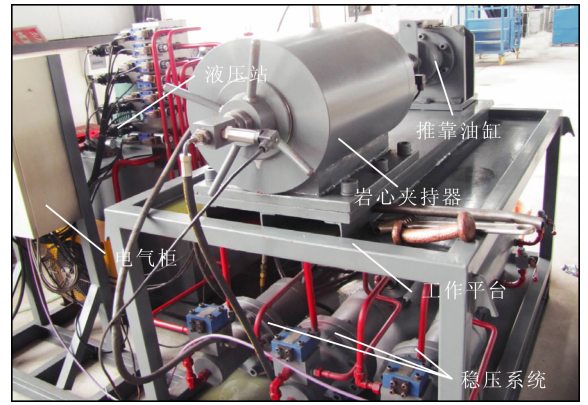


图 9 模拟实验平台

Fig. 9 The simulation experiment platform

## 6 地层测试压力响应物理考察实验

### 6.1 实验平台

为了验证所建立的地层测试压力响应数学模型,采用“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室建立的地层测试模拟实验平台进行物理考察实验,该平台主要功能:

- (1) 模拟井下地层抽吸环境,验证和修正压力解释模型;
- (2) 对抽吸系统、探头设计展开验证实验;
- (3) 通过实验确定相关设计参数,如确定探头密封力、橡胶头损坏力等;
- (4) 试验不同橡胶材料、尺寸大小对密封效果的影响等。

模拟实验平台如图 9,其主要技术指标如表 2,地层测试模拟实验平台主要由液压站、电气柜、工作平台和控制电脑等组成.实验平台的关键在于模拟地层环境进行抽吸,其基本原理(图 10):在岩心夹持器内安装岩心,模拟围压、地层压力、环空压力作用下的地层环境,通过推力杆推动探头贴紧岩心端面,由抽吸系统抽吸流体,即完成抽吸模拟,抽吸完成后,测试压力恢复即达到地层压力模拟测试目的.另外,为了确保各路模拟压力的稳定性,在各压力输入入口安装有独立的稳压系统(图 9).

### 6.2 实验方案

(1) 岩心选择:选用了 3 种不同渗透率(高渗和中低渗)的人造砂岩岩心,对岩心分别编号 1#、2#、3#.然后,分析了三种岩心的物性参数,结果如表 3.

表 2 实验平台主要技术指标

Table 2 The key technical indexes of experiment platform

序号	项目	指标	控制精度
1	模拟环空压力/MPa	$\leq 70$	$< \pm 1\% \text{FS}$
2	模拟地层压力/MPa	$\leq 70$	$< \pm 1\% \text{FS}$
3	模拟岩石围压/MPa	$\leq 70$	$< \pm 1\% \text{FS}$
4	抽吸体积/mL	$\leq 25$	$< \pm 1\% \text{FS}$
5	抽吸速率/( $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\leq 5$	$< \pm 1\% \text{FS}$
6	岩心直径/mm	$\phi 100$	/
7	岩心长度/mm	50~200	/
8	探头直径/mm	50~60	/
9	探头行程/mm	$\leq 60$	$< \pm 1\% \text{FS}$
10	探头推靠力/kN	$\leq 50$	$< \pm 1\% \text{FS}$

表 3 实验岩心物性参数

Table 3 The physical parameters of experimental cores

序号	项目名称	内容		
1	岩心编号	1#	2#	3#
2	岩性描述	浅褐色中砂岩	浅褐色细砂岩	浅褐色泥质粉砂岩
3	直径/cm	10.00	10.00	10.00
4	高度/cm	10.08	10.03	7.06
5	密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	2.179	2.261	2.451
6	孔隙度/(%)	16.20	15.00	12.00
7	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	108.81	16.10	4.79
8	渗透性	高	中等	低
9	泥质含量/(%)	12.50	22.60	30.0
10	泊松比	0.229	0.271	0.319
11	抗压强度/MPa	97.785	116.225	170.891

(2) 抽吸参数确定:由于人造岩心渗透率较高、均质性较好,抽吸速率初步定为 0.50~5.00 mL/s,且抽吸腔体积为 15.00~25.00 mL,抽吸时间为

3.0~5.0 s;抽吸次数为 3—5 次,抽吸过程中通过控制系统控制抽吸时间和抽吸间隔次数.

(3) 探头推靠参数:液压油推动活塞的推力为 2.0~5.0 MPa(即推靠液压缸工作压力),推靠活塞移动距离为 0.5~3.0 cm,注意准确控制液压驱动压力,防止探头压碎岩心.

(4) 探头选择:橡胶需耐用,确定在橡胶中心的金属抽吸管(探测头)是否紧密接触岩心,便于抽吸;探测头刺穿的泥饼由人工泥饼代替.

(5) 模拟流体:岩心两个端面的液体应该存在明显的差异,被抽吸的一端应为模拟地层水,其环形空间中的流体应为水(或钻井液).

(6) 实验中应严格保证岩心的密封,注意判断、检验岩心是否密封.

根据上述实验方案,采用图 9 所示的地层测试模拟实验平台,于 2010-10-04—2010-12-08 开展了相关的模拟抽吸实验.

## 6.3 实验结果及分析

### 6.3.1 1#岩心实验结果及分析

1#岩心  $K=108.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (高渗透性地层),模拟围压 35.00 MPa,模拟环空压力 30.00 MPa,模拟地层压力 29.50 MPa,流体压缩系数  $4 \times 10^{-5} \text{MPa}^{-1}$ ,模拟管线体积 500.0  $\text{cm}^3$ ,模拟探头半径 0.50 cm,模拟抽吸时间 5.0 s,模拟抽吸速度 1.00 mL/s,通过实验和数值模拟,得到图 11a 所示压力响应曲线.不难发现,数值模拟与实测压力响应一致性非常好,数值模拟地层压力为 28.65 MPa,而实际地层压力为 29.50 MPa,两者绝对误差为 0.85 MPa,而相对误差仅 2.88%,说明数值方法对于高渗透性地层的模拟是比较准确的.

### 6.3.2 2#岩心实验结果及分析

2#岩心  $K=16.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (中等渗透性地层),模拟围压 35.00 MPa,模拟环空压力 36.50 MPa,模拟地层压力 32.50 MPa,流体压缩系数  $4 \times 10^{-5} \text{MPa}^{-1}$ ,模拟管线体积 500.0  $\text{cm}^3$ ,模拟探头半径 0.50 cm,模拟抽吸时间 5.0 s,模拟抽吸速度 1.00 mL/s,通过实验和数值模拟,得到图 11b 所示压力响应曲线.

不难发现,数值模拟与实测压力响应一致性比较好,数值模拟解释的地层压力为 34.10 MPa,而实际地层压力为 32.50 MPa,两者绝对误差为 1.60 MPa,而相对误差为 4.92%.但是,2#岩心模拟实验测得的地层压力偏高,这可能与围压的控制有一定关系,由于围压比环空压力略低,可能导致模拟的环空与地层形成了串流,使得模拟的地层压力高出设定值,

从而导致解释值偏高.若假设串流已经发生,则可按环空压力解释,不难发现,解释得到的地层压力为 34.10 MPa,实际模拟的环空压力与模拟的地层压力均为 36.50 MPa,两者的绝对误差为 2.40 MPa,而相对误差仅为 7.38%,其误差比未串流更大,说明模拟环空压力与地层压力并未完全串流,可能只是部分串流,从而影响了模拟实验结果.即便如此,该测试结果仍然可以说明,数值方法对中等渗透性地层的模拟是比较准确的.

### 6.3.3 3#岩心实验结果及分析

3#岩心  $K=4.79 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (低渗透性地层),模拟围压 30.00 MPa,模拟环空压力 27.00 MPa,模拟地层压力 17.00 MPa,流体压缩系数  $4 \times 10^{-5} \text{MPa}^{-1}$ ,模拟管线体积 500.0  $\text{cm}^3$ ,模拟探头半径 0.50 cm,模拟抽吸时间 7.0 s,模拟抽吸速度 0.50 mL/s,通过实验和数值模拟,得到图 11c 所示压力响应曲线.不难发现,数值模拟与实测压力响应一致性非常好,数值模拟地层孔隙压力为 16.41 MPa,而实际地层压力为 17.00 MPa,两者绝对误差为 0.59 MPa,而相对误差仅为 3.47%,说明数值方法对低渗透性地层的模拟比较准确.

### 6.3.4 实验结果对比分析

对比 3 块不同渗透率岩心实验结果,将测试环境、实验结果汇总,得到表 4 所示不同渗透率岩心模拟测试实验结果.通过分析不难得出如下结论:

表 4 不同渗透率岩心实验结果

Table 4 The experimental results of cores with different permeability

序号	项目名称	实验结果		
1	岩心编号	1#	2#	3#
2	岩心渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	108.81	16.10	4.79
3	岩心孔隙度/(%)	16.20	15.00	12.00
4	模拟围压/MPa	35.00	35.00	30.00
5	模拟环空压力/MPa	30.00	36.50	27.00
6	模拟地层压力/MPa	29.50	32.50	17.00
7	抽吸速率/( $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$ )	1.00	1.00	0.50
8	抽吸时间/s	5.00	5.00	7.00
9	抽吸量/mL	5.00	5.00	3.50
10	抽吸压降/MPa	25.00	37.00	25.00
11	压力恢复时间/s	30.0	200.0	>350.0
12	压力恢复速度	快	中等	慢
13	数值模拟地层压力/MPa	28.65	34.10	16.41
14	绝对误差/MPa	-0.85	1.60	-0.87
15	相对误差/(%)	2.88	4.92	3.47

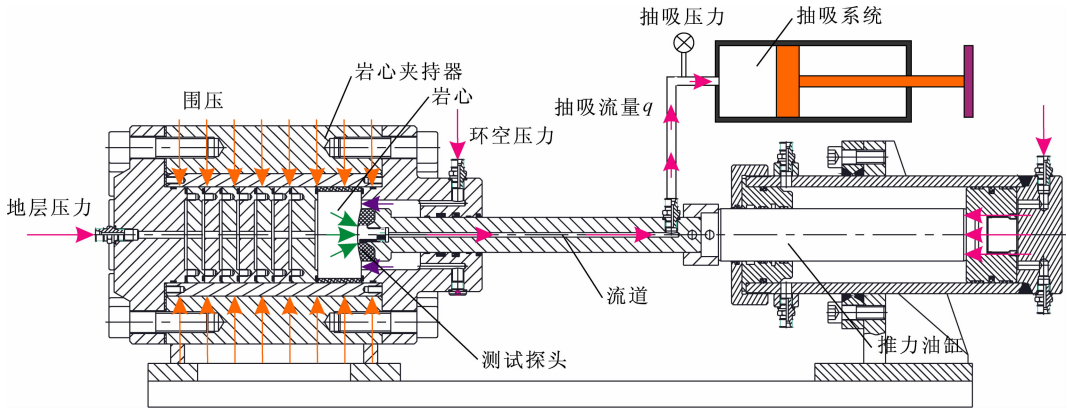


图 10 模拟实验原理

Fig. 10 The principle of simulation experiment

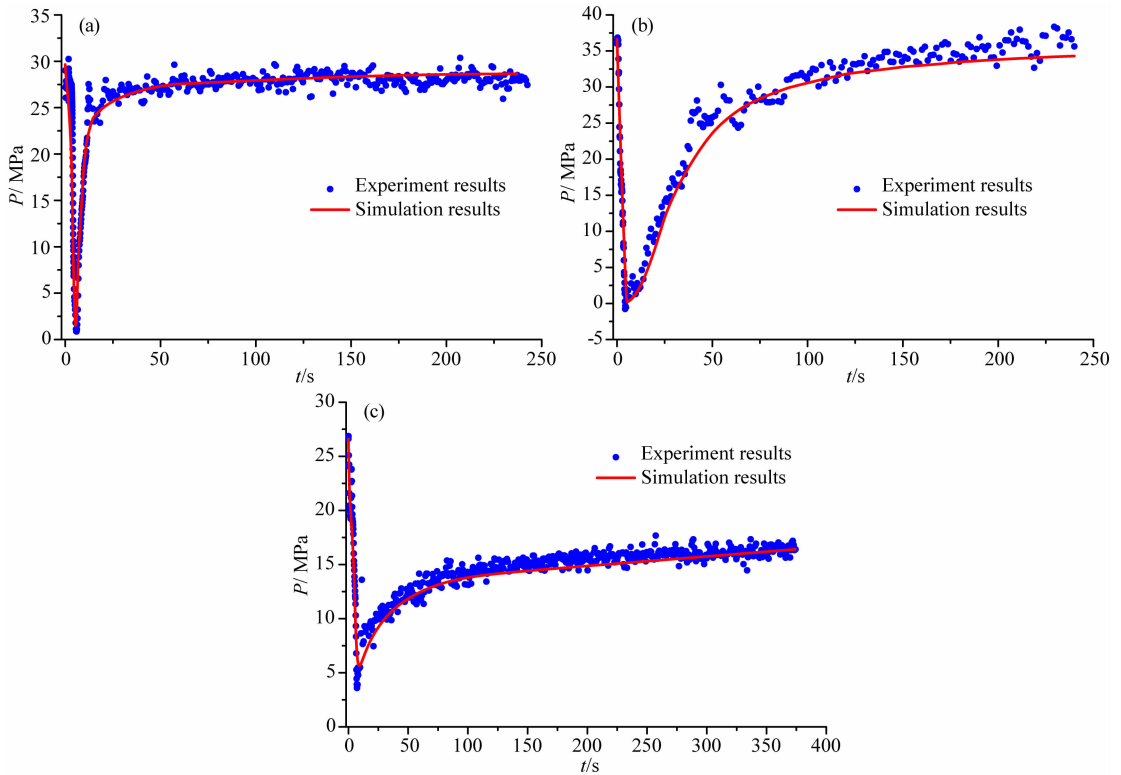


图 11 物理考察实验压力响应曲线

(a) 1#岩心;(b) 2#岩心;(c) 3#岩心.

Fig. 11 The pressure response curves of physical experimental

(a) Core No. 1#; (b) Core No. 2#; (c) Core No. 3#.

(1) 数值模拟与实测压力响应数据吻合程度高,数值模拟地层压力与实际地层压力的绝对误差小于 1.60 MPa,其相对误差低于 5.00%,说明数值模拟方法对于不同渗透性地层的模拟结果准确性是比较高的,完全能够满足工程需求。

(2) 岩心在抽吸时产生的压降与抽吸量呈明显的正相关关系,即抽吸量越大抽吸压降越大,但不同

渗透性岩心抽吸产生的压降是不同的,岩心渗透性越低,抽吸相同量的液体,所产生的压降越大。

(3) 渗透率越高的岩心,压力恢复速度较快;渗透率越低的岩心,压力恢复速度较慢;1#岩心压力恢复时间大约为 30.0 s,2#岩心压力恢复时间大约要 200.0 s,3#岩心压力恢复时间大于 350.0 s,与数值模拟结果基本一致。

## 7 结论

(1) 基于随钻地层测试基本原理,建立了随钻地层压力测试三维微分数学模型,确定了圆柱坐标系下的随钻地层压力测试定解问题。

(2) 随钻地层测试定解问题具有并非齐次边界,通过对定解问题进行边界齐次化处理,采用有限差分方法建立了圆柱坐标系下随钻地层测试的四维空间离散化差分格式,并以点源单相单测试室均质球形渗流问题为例,采用解析方法和有限差分方法进行对比分析,两种方法计算误差小于 2.00%,检验了有限差分方法的正确性。

(3) 采用有限差分数值方法分析了表皮效应、储集效应、地层非均质性、抽吸速率、抽吸探头半径等因素对压力响应曲线的影响规律,这些因素对压力响应曲线的影响十分显著,而且不同渗透率地层的敏感程度差异也比较大。

(4) 根据随钻地层测试原理,建立了地层测试模拟实验平台,对 3 种不同渗透率( $108.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $16.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  和  $4.79 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )岩心开展模拟实验,采用有限差分数值方法对实验结果进行了数值模拟分析.结果表明,数值模拟与实测压力响应一致性非常好,二者绝对误差小于 1.60 MPa,相对误差低于 5.00%(最大误差 4.92%),验证了有限差分数值方法的正确性和准确性。

**致谢** 感谢西南石油大学夏宏泉教授、郑华林教授、韩雄和刘阳在实验方面给予的指导和帮助;同时衷心感谢本文审稿人所提出的宝贵评审意见,对本文的完善起到了很大的作用。

## References

Aguilera L, Flamenco F, Contreras J, et al. 2012. Success in production estimation in high profile deepwater well using dynamic formation testers. *SPE* 158383.

Alan R H, Jeffrey M, Robert G, et al. 2013. Geophysical Pore Pressure Prediction in Complex Geologic Environments, Offshore Libya. *OTC* 24075.

Cartellieri A, Pragt J, Galvan-Sanchez F, et al. 2013. Challenges and opportunities of LWD sampling; a case study from the Gulf of Mexico. *SPE* 166427.

Cervantes T, Bravo G, Loaiza J, et al. 2012. Drill stem test design optimization improves quality of reservoir data and time requirements for deep and ultra deep water well testing. *OTC* 23629.

Chen P. 2011. *Drilling and Completion Engineering* (2nd edition) (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press.

Chin W C. 2013. Formation tester flow analysis in anisotropic media with flowline storage and skin at arbitrary dip. *Well Logging Technology*, 37(1): 1-12.

Du H, Liu Y, Li X, et al. 2013. Interpreting reservoir permeabilities from wireline formation test data. *Petroleum Science and Technology*, 31(18): 1819-1826.

Ferguson R, Canas J, Stankiewicz A, et al. 2013. Low H<sub>2</sub>S concentration sampling using wireline formation tester and well testing: Case studies. *SPE* 164780.

Gu N, Tao G, Liu S M. 2005a. Responses of the wireline formation tester in permeability anisotropic formations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 48(1): 229-234.

Gu N, Tao G, Liu S M. 2005b. The finite element simulation of formation wireline testing for oil-water two-phase flow. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 20(2): 337-341.

Guan Z C, Wei K. 2013. A new method for establishing regional formation pressure profile based on drilled wells data. *Journal of China University of Petroleum* (in Chinese), 37(5): 71-75.

Guan F J, Cao B J, Tai D H. 2011. Pressure drop interpretation model of ellipsoidal flow for formation testing in anisotropic reservoir. *Fault-Block Oil & Gas Field* (in Chinese), 18(1): 134-136.

Guo Z F, Liu Z, Lü R, et al. 2012. Predrill prediction of formation pressure using seismic data in deep-water area of Baiyun Depression, northern South China Sea. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 47(1): 126-132.

Hammond P, Pop J. 2005. Correcting supercharging in formation-pressure measurements made while drilling. *SPE* 95710.

Han X. 2012. The research on the formation pressure test while drilling theory and the ground simulation test experiment [Master thesis] (in Chinese). Chengdu: Southwest Petroleum University.

Hooper M, MacDonald C, Shalhope R, et al. 1999. Applications for an LWD formation tester. *SPE* 52794.

Kuchuk F J, Onur M, Hollaender F. 2010. Formation and well testing hardware and test types. *Developments in Petroleum Science*, 57: 1-26.

Li X P. 2008. *Seepage Flow Mechanics in Oil and Gas Reservoir* (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press.

Li C Q, Liu H M. 2013. Abnormal formation pressure and its evolution features of the third member, Shahejie formation, Linnan Sag. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience* (in Chinese), 38(1): 105-111.

Lin L. 1994. *Interpretation Principle and Geological Application of Wireline Formation Tester Information* (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press.

Liu J L, Chen H N, Gao B T. 2010. Foreign measurement system for formation pressure while drilling and its application. *Oil Drilling & Production Technology* (in Chinese), 32(1): 94-98.

Longis C, Holm G, Hill J. 2004. An LWD formation pressure test tool (DFT) refined the otter field development strategy. *SPE* 87092.

Meng Y X, Li X F, Du H, et al. 2010. Optimization method of key

- test point picking and best plot choosing from pumping wireline formation test data. *Fault-Block Oil & Gas Field* (in Chinese), 17(5): 632-636.
- Proett M A, Chin W C. 1998. New exact spherical flow solution with storage and skin for early-time interpretation with applications to wireline formation and early-evaluation drillstem testing. SPE 49140.
- Puech J C, Taylor M, Richards M, et al. 2013. Rank wildcat drilling risks & drilling time reduced in ultra deepwater offshore namibia with the application of seismic & formation pressure while drilling technology. SPE 163496.
- Shazly T F, Nouh A Z. 2013. Determination of some reservoir characteristics of the Bahariya formation in Bed-1 Field, Western Desert, Egypt, by using the Repeat Formation Tester. *Petroleum Science and Technology*, 31(7): 763-774.
- Sheng J, Georgi D, Alberto M, et al. 2004. Formation rate analysis in an anisotropic formation and its practical applications. SPE 90226.
- Sun D S, Li A W, Wang H C, et al. 2012. Experiment on anisotropy of permeability with tight sandstone. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 27(3): 1101-1106.
- Wu X D, Fang M Z, Shao S J, et al. 2012. Application of formation pressure test tool while drilling in well A9 of Yacheng 13-1 gas field. *Petroleum Drilling Techniques* (in Chinese), 40(2): 124-126.
- Yang C, Chen P, Xia H Q, et al. 2013a. Progress in research and development of measurement while drilling apparatuses. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 33(2): 71-75.
- Yang C, Chen P, Ma T S, et al. 2013b. New technology of formation fluid sampling while drilling and application. *China Petroleum Machinery* (in Chinese), 41(1): 101-104.
- Yang J, Liu S J, Shi L, et al. 2009. Research on prediction model for formation pressure in compression structure. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 30(5): 764-768.
- Yang X Q, Wang S N, Zhou Z H. 2012. Progresses in formation testing and subsurface fluid sampling & analysis technology. *Well Logging Technology* (in Chinese), 36(6): 551-558.
- Yang Z S. 2013. Research on key technology of measurement system for formation pressure while drilling [Ph. D. thesis] (in Chinese). Chengdu: Southwest Petroleum University.
- Yang Z S, Chen P, Yang C, et al. 2013. Mechanism research of supercharging effect response in formation pressure testing while drilling. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 35(3): 117-123.
- Zhang Y Z. 2012. Progress of well logging techniques during the second five years of the new millennium. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 27(3): 1133-1142.
- Zhou B, Mo X W, Tao G. 2007. The numerical simulation of wireline formation tester with finite element method. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 37(3): 629-632.
- Zhou Y M, Tao G, Gu N, et al. 2009. Numerical simulation of response for wireline formation tester in permeability anisotropic formation. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)* (in Chinese), 33(3): 71-75.

## 附中文参考文献

- 陈平. 2011. 钻井与完井工程(第二版). 北京: 石油工业出版社.
- Chin W C. 2013. 考虑管线存储及表皮效应各向异性介质任意倾角下地层测试器流体分析. 测井技术, 37(1): 1-12.
- 谷宁, 陶果, 刘书民. 2005a. 电缆地层测试器在渗透率各向异性地层中的响应. 地球物理学报, 48(1): 229-234.
- 谷宁, 陶果, 刘书民. 2005b. 电缆地层测试器测量的油水两相有限元模型. 地球物理学进展, 20(2): 337-341.
- 管志川, 魏凯. 2013. 利用已钻井资料构建区域地层压力剖面的方法. 中国石油大学学报(自然科学版), 37(5): 71-75.
- 关富佳, 曹宝军, 太东华. 2011. 各向异性储层地层测试椭圆流动压降解释模型. 断块油气田, 18(1): 134-136.
- 郭志峰, 刘震, 吕睿等. 2012. 南海北部深水白云凹陷钻前地层压力地震预测方法. 石油地球物理勘探, 47(1): 126-132.
- 韩雄. 2012. 随钻地层压力测试理论与地面模拟实验研究[硕士论文]. 成都: 西南石油大学.
- 李晓平. 2008. 地下油气渗流力学. 北京: 石油工业出版社.
- 李纯泉, 刘惠民. 2013. 临南洼陷沙三段异常地层压力及其演化特征. 地球科学—中国地质大学学报, 38(1): 105-111.
- 林梁. 1994. 电缆地层测试器资料解释理论与地质应用. 北京: 石油工业出版社.
- 刘建立, 陈会年, 高炳堂. 2010. 国外随钻地层压力测量系统及其应用. 石油钻采工艺, 32(1): 94-98.
- 孟悦新, 李相方, 杜辉等. 2010. 泵抽式电缆地层测试关键点及曲线优化新方法. 断块油气田, 17(5): 632-636.
- 孙东生, 李阿伟, 王红才等. 2012. 低渗砂岩储层渗透率各向异性规律的实验研究. 地球物理学进展, 27(3): 1101-1106.
- 吴旭东, 方满宗, 邵诗军等. 2012. 随钻测压工具在崖城 13-1 气田 A9 井的应用. 石油钻探技术, 40(2): 124-126.
- 杨川, 陈平, 夏宏泉等. 2013a. 随钻地层压力测量仪研究新进展. 天然气工业, 33(2): 71-75.
- 杨川, 陈平, 马天寿等. 2013b. 随钻地层流体分析取样新技术及其应用. 石油机械, 41(1): 101-104.
- 杨进, 刘书杰, 石磊等. 2009. 挤压构造地层压力预测模型研究. 石油学报, 30(5): 764-768.
- 杨兴琴, 王书南, 周子皓. 2012. 地层测试与井下流体取样分析技术进展. 测井技术, 36(6): 551-558.
- 杨再生. 2013. 随钻地层压力测量系统关键技术研究[博士论文]. 成都: 西南石油大学.
- 杨再生, 陈平, 杨川等. 2013. 随钻地层压力测试增压效应响应机理研究. 西南石油大学学报(自然科学版), 35(3): 117-123.
- 张元中. 2012. 新世纪第二个五年测井技术的若干进展. 地球物理学进展, 27(3): 1133-1142.
- 周波, 莫修文, 陶果. 2007. 电缆地层测试器的有限元数值模拟. 吉林大学学报(地球科学版), 37(3): 629-632.
- 周艳敏, 陶果, 谷宁等. 2009. 地层测试器在渗透率各向异性地层中响应的数值模拟. 中国石油大学学报(自然科学版), 33(3): 71-75.