

文章编号: 0253-2697(2017)05-0562-08 DOI:10.7623/syxb201705009

# 未出现径向流的试井典型曲线及其分析方法

林加恩<sup>1,2</sup> 何 辉<sup>2,3</sup> 韩章英<sup>2,3</sup>

(1. 西安石油大学石油工程学院 陕西西安 710065; 2. 西部低渗—特低渗油藏开发与治理教育部工程研究中心 陕西西安 710065;  
3. 西安华线石油科技有限公司 陕西西安 710065)

**摘要:**低渗透、特低渗透油气藏经过长时间测试后会仍然不出现径向流响应,采用常规 Gringarten-Bourdet 复合图版难以有效地确定出地层参数。通过均质无限大试井模型短时渐近解,求解出无因次井筒储集系数和表皮因子复合参数与无因次时间、无因次井底压力的关系式( $\zeta$ 函数)。利用无因次压力和  $\zeta$  函数构造出新的早期试井解释图版,该图版能够降低早期试井数据分析的多解性。通过建立均质油藏达西流模型及考虑启动压力梯度的均质油藏非达西流模型,给出了这 2 种模型对应的早期新图版,并分析了新图版的典型特征和渐近性质。与已有的早期试井分析图版对比发现,新图版对均质模型及考虑启动压力梯度的均质模型参数变化响应更加敏感,能够更有效地降低早期试井解释的多解性。

**关键词:**早期试井解释;低渗透油气藏;均质模型;启动压力梯度;早期图版

中图分类号:TE353

文献标识码:A

## Typical curves and their analysis method for well test data without radial flow response

Lin Jia'en<sup>1,2</sup> He Hui<sup>2,3</sup> Han Zhangying<sup>2,3</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Shaanxi Xi'an 710065, China; 2. MOE Engineering Research Center of Development & Management of Western Low & Ultra-Low Permeability Oilfield, Shaanxi Xi'an 710065, China; 3. Xi'an Sinline Petroleum Science Technology Company Limited, Shaanxi Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The radial flow response does not exhibit after a long time testing for the low and ultra-low permeability reservoirs. In this case, it is difficult to determine the formation parameters effectively by using the conventional Gringarten-Bourdet's typical curve method. Based on a short-time asymptotic solution of homogeneous infinite well testing model, the relation between the dimensionless time and bottom pressure and the combination parameters of dimensionless wellbore storage coefficient and skin factor ( $\zeta$  function) was obtained. A new type of early-time transient well testing interpretation type curve was constructed by using the dimensionless bottom pressure and  $\zeta$  function, which can reduce the non unique solution problem of early-time transient well testing data analysis. The homogeneous Darcy flow model and homogeneous non-Darcy flow model considering the threshold pressure gradient were established to construct the new type curves. The characteristics and asymptotics of the above two kinds of type curves were also discussed. The results showed that compared with the conventional type curves the two new kinds of type curves were more sensitive to the parameter changes in homogenous model, which would effectively reduce the non unique solution problem of the well testing interpretation.

**Key words:** early-time well testing interpretation; low permeability reservoir; homogenous model; threshold pressure gradient; early-time type curve

引用:林加恩,何辉,韩章英.未出现径向流的试井典型曲线及其分析方法[J].石油学报,2017,38(5):562-569.

Cite:LIN Jia'en, HE Hui, HAN Zhangying. Typical curves and their analysis method for well test data without radial flow response [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(5): 562-569.

20 世纪 70 年代,在 Agarwal 等<sup>[1]</sup>首次建立了考虑井筒储存和表皮效应的典型曲线后,又相继出现了 Ramey<sup>[2]</sup>典型曲线, Mckinley<sup>[3]</sup>典型曲线和 Earlougher-Kersch<sup>[4]</sup>典型曲线。Gringarten 等<sup>[5-6]</sup>在前人的基础上提出了 Gringarten-Bourdet 复合图版(压力—压力导数复合图版)分析技术,使得试井分析的多解性问

题得到了极大的改善,可以计算更多的模型参数<sup>[7-8]</sup>。但是对于低渗、特超低渗油气藏<sup>[9]</sup>以及非常规油气藏中的致密油气藏<sup>[10-11]</sup>经长时间测试后仍不出现径向流的情况,Gringarten-Bourdet 复合图版对试井模型参数变化不敏感,导致该复合图版有很强的多解性。为了提高不出现径向流压力测试资料的利用率、缩短测

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(13JS090)资助。

第一作者及通信作者:林加恩,男,1961 年 12 月生,1983 年获西南石油学院学士学位,2007 年获清华大学博士学位,现为西安石油大学教授、硕士生导师,主要从事油气藏工程与监测、试井分析及其应用软件技术研究工作。Email:jn5000@126.com

试时间,学者们提出了一些相应的分析方法,主要有特征综合分析方法<sup>[12-13]</sup>,基于续流量函数的压力校正方法、反卷积方法<sup>[14-23]</sup>以及基于变形 Gringarten-Bourdet 图版拟合方法<sup>[24-33]</sup>等。

特征综合分析方法最早由 Tiab<sup>[12]</sup>提出,该方法依据双对数图早期特征齐全和早期峰值特征分别采用不同的模型对储层参数进行计算。特征综合分析方法的优点是不需要进行图版拟合,缺点是受人为主观影响较大。

基于续流量函数的压力校正方法,包括指数递减法、双曲递减法、拉塞尔递减法<sup>[14]</sup>,反卷积法<sup>[15-23]</sup>以及模拟反卷积法<sup>[23]</sup>等。前3种递减法先是通过试错法确定压力与续流量之间的直线关系,然后通过直线的斜率及截距计算地层参数。后2种反卷积方法是通过部分或全部消除井储效应,使得径向流出现的时间提前,然后计算相应的地层参数。基于续流量函数的压力校正方法的优点是在正确使用这些方法的前提下,通过图版拟合获取地层参数,解释结果受人为主观因素相对较小。缺点是对实际数据的质量要求较高,需要反复试错确定额外的待定参数,使用不方便。实践表明,基于续流量函数的压力校正方法对于理论数据往往能获得较好的解释结果,而对于有噪音干扰的实际数据效果不理想。

基于变形 Gringarten-Bourdet 图版拟合方法<sup>[24-33]</sup>提出的时间主要集中在20世纪70—90年代,近20年理论成果相对较少。20世纪80—90年代具有代表性的成果包括: Ehlig-Economides<sup>[24]</sup>提出二阶压力导数典型曲线; Onur 等<sup>[25-26]</sup>和 Duong<sup>[27]</sup>通过定义重整的无因次压力函数(无因次压力与无因次压力导数的比值),将压力与其导数曲线结合成一条曲线; Blasingame 等<sup>[28]</sup>和 Onur 等<sup>[29]</sup>同时发表压力积分与其导数典型曲线; Aminian 等<sup>[30]</sup>提出半对数典型曲线; 马强<sup>[31]</sup>提出基于压力导数与压力比(DPR)的不稳定试井分析变形 Gringarten-Bourdet 图版; Bahramih 等<sup>[32]</sup>提出使用二阶压力导数的半对数图版。在早期试井资料分析中这些变形 Gringarten-Bourdet 图版曲线均不能有效解决早期试井资料不出现径向流的问题。卢德唐等<sup>[33]</sup>利用无因次压力与无因次时间比值(PTR)、无因次压力导数(DTR)的高阶小量构造出适用于早期试井资料解释的变形 Gringarten-Bourdet 图版。该图版能够分析受井筒储集影响的均质无限大地层的早期试井资料,并且时间越小,不同井筒储集系数与表皮组合参数变化对早期曲线形态影响越大。一些学者<sup>[34-37]</sup>对该图版进行了许多应用研究,但该方法未研究考虑启动压力梯度的均质油藏非达西流模型。同时,对于不同储层渗流模

型文献<sup>[33]</sup>中的早期图版函数在时间较小时可能会出现负值,在双对数图曲线显示上存在缺陷。另外,不同储层渗流模型参数的变化对文献<sup>[33]</sup>中早期图版曲线影响的敏感性也有待进一步提高。

笔者基于均质无限大试井模型压力的短时渐近解,构造了一种新的理论图版,并结合 Gringarten-Bourdet 复合图版,可以有效降低低渗透或特低渗透油气藏中经长时间测试仍不出现径向流的试井资料解释问题。同时,讨论了均质油藏达西流模型和考虑启动压力梯度的均质油藏非达西流模型在该方法下的曲线特征,并与文献<sup>[33]</sup>的方法进行了比较研究。

## 1 早期试井资料解释图版

### 1.1 均质油藏达西流模型

在均质无限大地层中,油井以定产量生产且开井前地层中压力均为原始地层压力,同时假设地层及流体满足:①油藏储层各向同性、等厚;②储层中流体及岩石为微可压缩;③储层中流体满足达西流动;④考虑表皮因子及井筒储集。

根据以上假设,基于有效井径模型建立了均质油藏达西流无因次模型<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial (t_D/C_D)} \quad (1)$$

$$p_D(r_D, t_D/C_D = 0) = 0 \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial p_{wD}}{\partial (t_D/C_D)} - r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = 1 \quad (3)$$

$$p_{wD} = p_D(r_D = 1, t_D/C_D) \quad (4)$$

$$p_D(r_D = \infty, t_D/C_D) = 0 \quad (5)$$

其中,无因次变量定义为:

$$p_D = \frac{Kh(p_i - p)}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B} \quad (6)$$

$$t_D = \frac{3.6Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} \quad (7)$$

$$r_D = \frac{r}{r_w e^{-S}} \quad (8)$$

$$C_D = \frac{0.1592C}{\phi h C_t r_w^2} \quad (9)$$

基于  $t_D/C_D$ , 对式(1)~式(5)作 Laplace 变换,进行求解可得 Laplace 空间无因次井底压力解为:

$$\bar{p}_{wD} = \frac{K_0(b)}{z[zK_0(b) + bK_1(b)]} \quad (10)$$

其中:

$$b = \sqrt{\frac{z}{C_D e^{2S}}} \quad (11)$$

## 1.2 考虑启动压力梯度的均质油藏非达西流模型

储层中流体满足低速非达西流动,其余与1.1节中假设条件相同。根据假设,基于有效井径模型建立考虑启动压力梯度的均质油藏非达西流无因次模型<sup>[38]</sup>:

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} + \frac{\lambda_D e^{-S}}{r_D} = \frac{1}{C_D e^{2S}} \frac{\partial p_D}{\partial (t_D/C_D)} \quad (12)$$

$$p_D(r_D, t_D/C_D = 0) = 0 \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial p_{wD}}{\partial (t_D/C_D)} - r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = 1 + \lambda_D e^{-S} \quad (14)$$

$$p_{wD} = p_D(r_D = 1, t_D/C_D) \quad (15)$$

$$p_D(r_D = \infty, t_D/C_D) = 0 \quad (16)$$

其中,无因次启动压力梯度定义为:

$$\lambda_D = \frac{Khr_w}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B} \lambda \quad (17)$$

其余无因次变量定义与式(6)一式(9)相同。

基于  $t_D/C_D$ ,对式(12)一式(16)作 Laplace 变换,进行求解可得 Laplace 空间无因次井底压力解为:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{wD} &= \lambda_D e^{-S} \cdot \\ &\frac{\pi[b^{-1} - L_{-1}(b)K_0(b) - L_0(b)K_1(b)] + 2K_0(b)}{2z[zK_0(b) + bK_1(b)]} + \\ &\frac{K_0(b)}{z[zK_0(b) + bK_1(b)]} \end{aligned} \quad (18)$$

## 1.3 利用均质达西流模型短时渐近解构造新图版

由 Laplace 变换的性质可知,当  $t_D/C_D \rightarrow \infty$  时, Laplace 变量  $z \rightarrow \infty$ ,同时  $b = \sqrt{\frac{z}{C_D e^{2S}}} \rightarrow \infty$ 。  $K_0(b)$  和  $K_1(b)$  在  $z = \infty$  点渐近展开可得<sup>[39]</sup>:

$$K_0(b) = \sqrt{\frac{\pi}{2b}} e^{-b} \left[ 1 - \frac{1}{8b} + O(z^{-1}) \right] \quad (19)$$

$$K_1(b) = \sqrt{\frac{\pi}{2b}} e^{-b} \left[ 1 + \frac{3}{8b} + O(z^{-1}) \right] \quad (20)$$

将式(19)、式(20)代入式(18),有:

$$\bar{p}_{wD} = z^{-2} - \frac{1}{\sqrt{C_D e^{2S}}} z^{-5/2} + O(z^{-3}) \quad (21)$$

对式(21)基于  $t_D/C_D$  作 Laplace 逆变换可得:

$$p_{wD} = \frac{t_D}{C_D} - \frac{4}{3\sqrt{\pi C_D e^{2S}}} (t_D/C_D)^{3/2} + O[(t_D/C_D)^2] \quad (22)$$

舍去  $t_D/C_D$  的高阶项,式(22)可近似地表示为:

$$p_{wD} \approx \frac{t_D}{C_D} - \frac{4}{3\sqrt{\pi C_D e^{2S}}} (t_D/C_D)^{3/2} \quad (23)$$

可得:

$$C_D e^{2S} \approx \frac{16(t_D/C_D)^3}{9\pi(t_D/C_D - p_{wD})^2} \quad (24)$$

实空间的井底压力  $p_{wD}$  采用 Stehfest 数值反演算法对 Laplace 空间井底压力式(10)和式(18)进行反演获取。

记:

$$\zeta = \frac{16(t_D/C_D)^3}{9\pi(t_D/C_D - p_{wD})^2} \quad (25)$$

结合不同试井模型无因次井底压力  $p_{wD}$ ,以  $t_D/C_D$  为横轴、 $\zeta$  为纵轴绘制  $(t_D/C_D, \zeta)$  曲线的双对数图,将构成不同试井解释模型对应的早期试井解释新图版。为方便描述,简称  $(t_D/C_D, \zeta)$  曲线为  $\zeta$  函数曲线。

由式(24)可知,当时间较小时,对于不同的  $C_D e^{2S}$ ,  $\zeta$  函数曲线前端是分开的。图1和图2是结合 Gringarten-Bourdet 复合图版给出的新复合图版,其中图1是针对均质模型,图2是针对考虑启动压力梯度的均质模型。

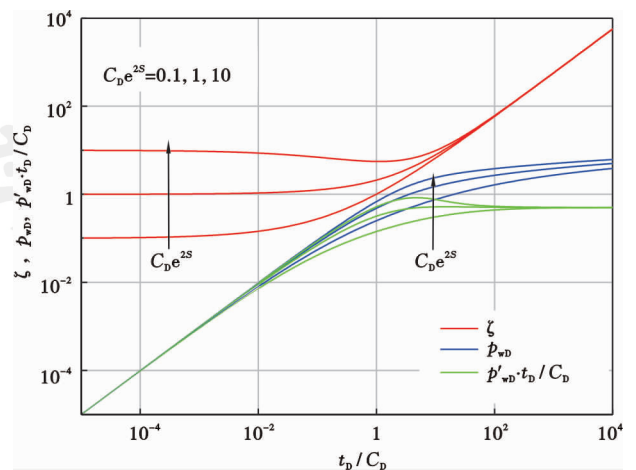


图1 均质达西流模型复合图版

Fig. 1 Type curve for homogeneous Darcy flow model

从图1和图2可以看出,在时间较大时,  $\zeta$  函数曲线末端均呈斜率为1的直线,该特征不因模型参数值的改变而发生变化,因而该图版不适合晚期试井资料分析。而在时间较小时,  $\zeta$  函数曲线的前端随模型及相应参数值的不同而不同,说明  $\zeta$  函数曲线对模型及参数具有较强的敏感性。在试井模型选定的前提下,该方法针对早期试井资料能够更有效地确定地层参数。

文献[33]讨论了均质达西流模型所对应的1-PTR曲线以及1-DTR曲线典型图版特征。其中,1-PTR曲线的横坐标为  $t_D/C_D$ ,纵坐标为  $1 - p_{wD}/(t_D/C_D)$ ; 1-DTR曲线的横坐标为  $t_D/C_D$ ,纵坐标为  $1 - p'_{wD}$ 。但并未研究考虑启动压力梯度的均质油藏非达西流模型在上述2种曲线中的典型图版特征。

笔者通过理论推导给出了均质油藏达西流模型所对应的  $\zeta$  函数曲线、1-PTR曲线以及1-DTR曲线的渐近性质见表1。另外,笔者在研究考虑启动压力梯度的均质油藏非达西流模型时发现,在时间较小时,1-PTR曲线和1-DTR曲线会出现负值。因此,对1-PTR和1-DTR的表达式取绝对值,并给出相应的渐近性质见表2。

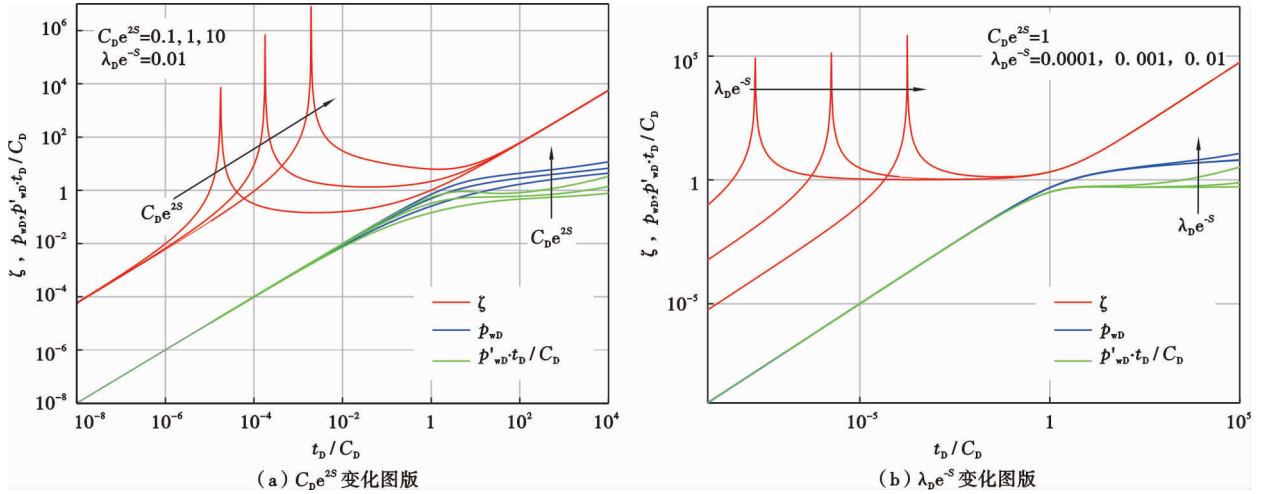


图 2 均质非达西流模型复合图版

Fig. 2 Type curve for homogeneous non-Darcy flow model

表 1 均质达西流模型渐近性对比

Table 1 Comparison in asymptotics for homogeneous Darcy flow model

渐近展开点	$\zeta$	1 - PTR	1 - DTR
$t_D/C_D = 0$	$C_D e^{2S}$	$\frac{4}{3\sqrt{\pi C_D e^{2S}}} \sqrt{\frac{t_D}{C_D}}$	$\frac{2}{\sqrt{\pi C_D e^{2S}}} \sqrt{\frac{t_D}{C_D}}$
$t_D/C_D = \infty$	$\frac{16 t_D}{9\pi C_D}$	1	1

表 2 均质非达西流模型渐近性对比

Table 2 Comparison in asymptotics for homogeneous non-Darcy flow model

渐近展开点	$\zeta$	1 - PTR	1 - DTR
$t_D/C_D = 0$	$\frac{16}{9\pi(\lambda_b e^{-S})^2} \frac{t_D}{C_D}$	$\lambda_b e^{-S}$	$\lambda_b e^{-S}$
$t_D/C_D = \infty$	$\frac{16 t_D}{9\pi C_D}$	1	1

版。图 4 给出了考虑启动压力梯度均质油藏非达西流模型所对应的  $\zeta$  曲线典型图版、|1 - PTR| 曲线典型图

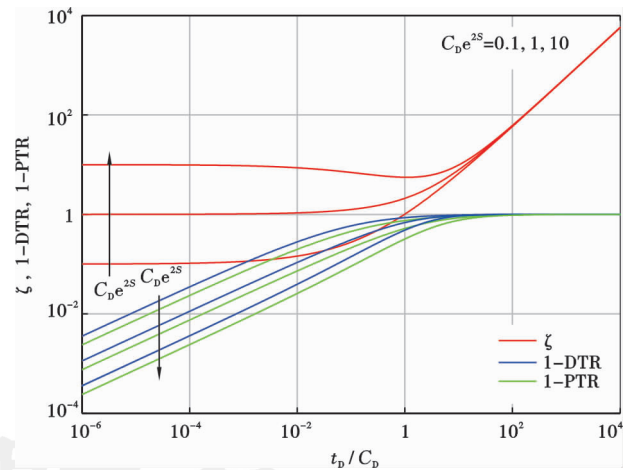


图 3 均质达西流模型图版对比

Fig. 3 Comparison curve for homogeneous Darcy flow model

图 3 为均质油藏达西流模型所对应的  $\zeta$  曲线典型图版、|1 - PTR| 曲线典型图版、|1 - DTR| 曲线典型图

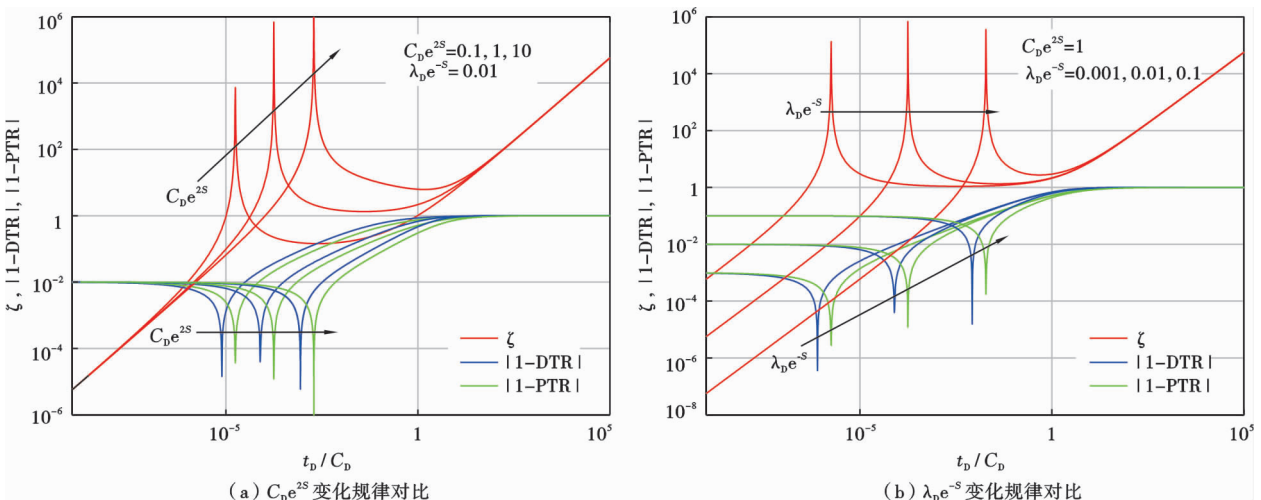


图 4 均质非达西流模型图版对比

Fig. 4 Comparison curve for homogeneous non-Darcy flow model

版,  $|1 - \text{DTR}|$  曲线典型图版。

均质达西流模型  $C_D e^{2S}$  增大或减小一个对数周期,  $\zeta$  函数曲线前端升高或降低一个对数周期,  $1 - \text{PTR}$  曲线和  $1 - \text{DTR}$  曲线前端降低或升高半个对数周期。早期  $\zeta$  函数曲线呈高度为  $C_D e^{2S}$  的水平线,  $1 - \text{PTR}$  曲线和  $1 - \text{DTR}$  曲线呈斜率为 1 的直线。晚期  $\zeta$  函数曲线呈斜率为 1 的直线,  $1 - \text{PTR}$  曲线和  $1 - \text{DTR}$  曲线呈高度为 1 的水平线。

考虑启动压力梯度的均质油藏非达西流模型  $\lambda_D e^{-S}$  增大或减小一个对数周期,  $\zeta$  函数曲线前端降低或升高两个对数周期,  $|1 - \text{PTR}|$  曲线和  $|1 - \text{DTR}|$  曲线前端升高或降低一个对数周期。  $C_D e^{2S}$  增大或减小,  $\zeta$  函数曲线中部变化幅度较  $|1 - \text{PTR}|$  曲线和  $|1 - \text{DTR}|$  曲线更加剧烈。  $\zeta$  函数曲线与  $|1 - \text{PTR}|$  曲线出现奇异点的时间相同 ( $t_D/C_D = p_{wD}$ )。  $\zeta$  函数曲线与  $|1 - \text{PTR}|$  曲线出现奇异的原因是考虑启动压力梯度的均质非达西流模型, 当  $t_D/C_D$  较小时,  $t_D/C_D < p_{wD}$ ; 而  $|1 - \text{DTR}|$  曲线出现奇异的原因是考虑启动压力梯度的均质非达西流模型, 当  $t_D/C_D$  较小时,  $p'_{wD} > 1$ 。考虑启动压力梯度的均质非达西流模型早期曲线出现这种奇异现象, 而在常规 Gringarten-Bourdet 复合图版中不会出现。这从另一个方面也说明早期试井解释图版对模型参数更加敏感, 因而可以有效地降低模型的多解性。

## 2 新复合图版法

新复合图版由压力曲线和  $\zeta$  函数曲线构成, 笔者将新复合图版分析方法称为  $\zeta$  函数法。其实质是将 Gringarten-Bourdet 复合图版分析法中的压力导数曲线替换为本文的  $\zeta$  函数曲线。以均质油藏达西流模型为例, 该图版分析法的具体步骤为:

(1) 绘制压力差  $\Delta p$  与时间  $\Delta t$  的双对数图, 选取早期斜率为 1 直线段的数据进行直线拟合获取直线段的截距  $d$ , 计算井筒储集系数:

$$C = \frac{qB}{24} 10^{-d} \quad (\lg \Delta p = \lg \Delta t + \lg \frac{qB}{24C}) \quad (26)$$

(2) 利用步骤 1 中计算的井筒储集系数  $C$  绘制  $\Delta \zeta = \frac{0.0235776(qB\Delta t)^3}{C(qB\Delta t - 24.0009C\Delta p)^2}$  与时间  $\Delta t$  的双对数图, 其中,  $\Delta \zeta$  为  $\zeta$  对应的有因次表达式:

$$\Delta \zeta = \frac{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \zeta = \frac{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \cdot \frac{16(t_D/C_D)^3}{9\pi(t_D/C_D - p_{wD})^2} \quad (27)$$

$$p_{wD} = Kh \Delta p / (1.842 \times 10^{-3} q\mu B) \quad (28)$$

$$t_D = 3.6K\Delta t / (\phi\mu C_r r_w^2) \quad (29)$$

将式(9)、式(28)和式(29)代入式(27)化简即可得到:

$$\Delta \zeta = [0.0235776(qB\Delta t)^3] / [C(qB\Delta t - 24.0009C\Delta p)^2] \quad (30)$$

(3) 将步骤 1—步骤 2 中的  $(\Delta t, \Delta p)$  曲线和  $(\Delta t, \Delta \zeta)$  曲线双对数图在由  $(t_D/C_D, p_{wD})$  及  $(t_D/C_D, \zeta)$  曲线构成的理论图版上进行拟合, 获取  $C_D e^{2S}$  的值, 进而计算表皮因子:

$$S = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{C_D e^{2S}}{C_D} \right) \quad (31)$$

其中,  $C_D$  同式(9), 参数  $C$  由步骤 1 给出。

(4) 在  $(\Delta t, \Delta p)$  曲线 [或  $(\Delta t, \Delta \zeta)$  曲线] 上任取一点  $M$ , 记录该点的  $(\Delta p)_M$  值或  $\Delta \zeta_M$  值, 同时查出该点在不因次图版上的  $(p_{wD})_M$  值或  $\zeta_M$  值, 从而计算渗透率:

$$K = \frac{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}{h} \frac{(p_{wD})_M}{(\Delta p)_M} \quad (32)$$

或

$$K = \frac{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}{h} \frac{\zeta_M}{\Delta \zeta_M} \quad (33)$$

采用手工实现上述分析步骤时, 由于理论图版中样板曲线的条数有限, 未必能够找到理想的  $C_D e^{2S}$  值。如只有  $C_D e^{2S} = 20$  和  $C_D e^{2S} = 30$  的样板曲线, 而没有  $20 < C_D e^{2S} < 30$  的样板曲线。当  $C_D e^{2S}$  的值在约 25 时, 此时通过理论图版中样板曲线不能得到  $C_D e^{2S}$  的理想值。因此, 建议使用计算机实现上述方法, 计算机可以对  $C_D e^{2S}$  的值进行细化以便获取更准确的参数。

## 3 数值实验及应用实例

选用均质达西流模型无限大外边界, 并设定储层、井筒及流体基本参数分别为: 渗透率  $K = 1 \text{ mD}$ , 储层厚度  $h = 10 \text{ m}$ , 孔隙度  $\phi = 16\%$ , 综合压缩系数  $C_t = 0.000873 \text{ MPa}^{-1}$ , 表皮因子  $S = 3$ , 井筒储集系数  $C = 0.5 \text{ m}^3/\text{MPa}$ , 井筒半径  $r_w = 0.1 \text{ m}$ , 流体黏度  $\mu = 2.71 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , 流体体积系数  $B = 1.21 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。测试井在以定流量  $q = 5 \text{ m}^3/\text{d}$  注入 2000 h 后关井测试。

首先利用计算机模拟生成测试时间为 1066.92 h (出现明显径向流) 的压降数据, 并绘制 Gringarten-Bourdet 复合曲线 [图 5(a)]。分别截取时间为 18.54 h、233.42 h、1066.92 h 之前的压力降落数据, 绘制相应的压力、 $\zeta$  函数曲线复合图 (图 6 中散点)。采用 Swift V3.0 试井分析软件 [40] 中的广泛搜索算法对上述模拟数据集进行曲线拟合解释 (图 6), 其中实线为拟合的理论曲线。

由以上模拟实验结果可以看出, 对于理论数据  $\zeta$  函数法随着测试时间的缩短, 解释结果与真实值几乎完全一样。这说明缩短测试时间对  $\zeta$  函数法的解释结果影响不大, 因此  $\zeta$  函数法适用于早期试井资料解释。

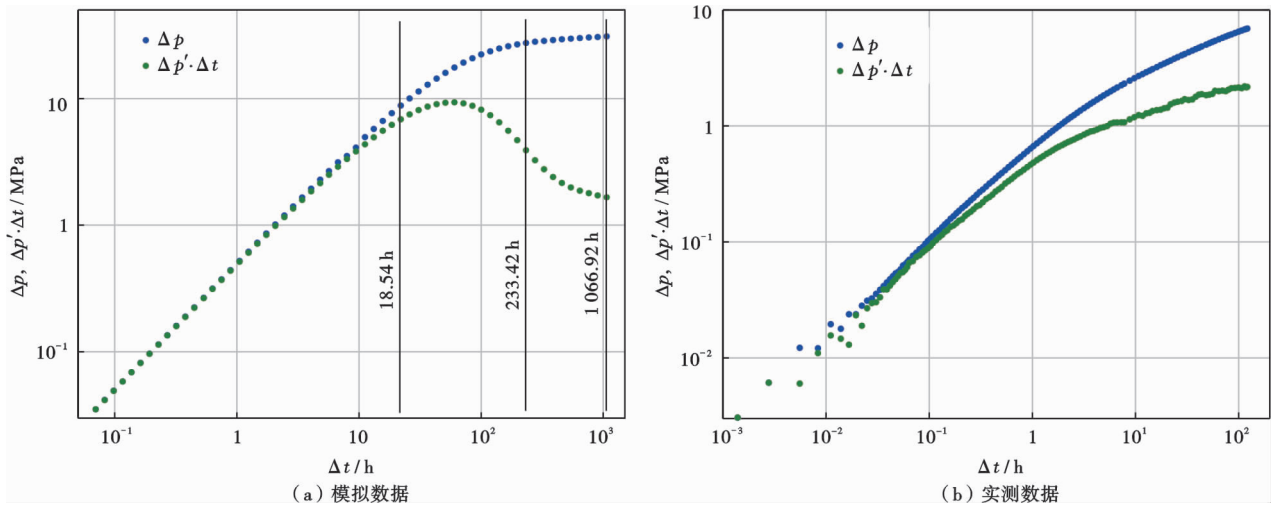


图 5 双对数数据关系

Fig. 5 Double logarithmic data relation

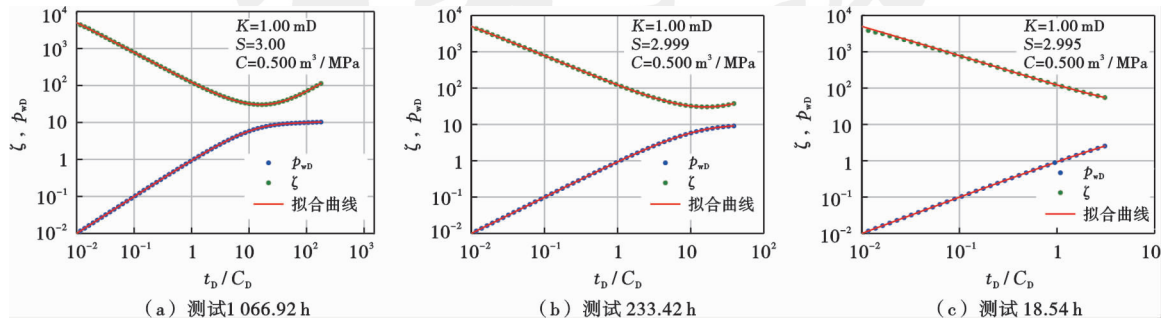


图 6 模拟数据拟合结果

Fig. 6 Matching results of simulated data

图 5(b)为准东油田一口注水井实测资料的 Gringarten-Bourdet 双对数复合曲线。该井关井测试前以  $q = -11.7$  m<sup>3</sup>/d 持续注水 1000 h, 关井测试 138.02 h 后仍处于早期过渡段。其中井筒半径  $r_w = 0.062$  m, 储层厚度  $h = 13$  m, 流体黏度  $\mu = 0.45$  mPa·s,

体积系数  $B = 1$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, 孔隙度  $\phi = 18\%$ , 综合压缩系数  $C_t = 0.00153$  MPa<sup>-1</sup>, 关井前末点压力为 43.45 MPa, 关井后末点压力为 36.53 MPa。图 7(a)为  $\zeta$  函数法拟合解释结果, 图 7(b)为压力历史拟合。可以看出, 解释结果与实际情况吻合。

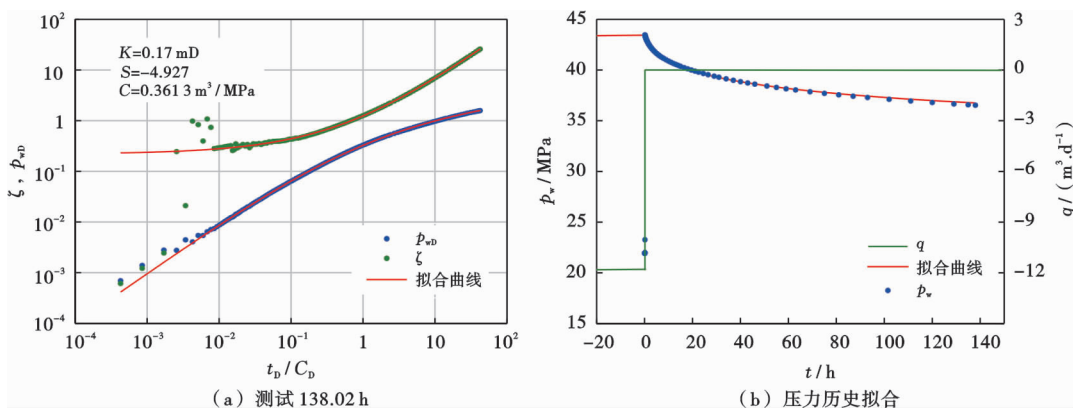


图 7 实测数据拟合结果

Fig. 7 Matching results of real data

## 4 结论

(1) 利用均质油藏达西流模型短时渐近解,建立了早期试井资料解释分析方法,该方法能够有效地降低不出现径向流早期试井资料解释的多解性。

(2) 建立了均质油藏达西流模型和考虑启动压力梯度的均质油藏非达西流模型早期试井资料解释典型图版。通过与已有早期试井分析方法中的两类图版对比发现,新的早期试井解释图版在均质油藏达西流模型和考虑启动压力梯度的均质油藏非达西流模型中,模型参数变化对典型曲线的影响都更加敏感,更有利于降低试井解释的多解性。

(3) 通过模拟数据及实际数据验证了新方法的可靠性。

**符号注释:**  $b$ —中间变量;  $B$ —体积系数,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $C$ —井筒储集系数,  $\text{m}^3/\text{MPa}$ ;  $C_D$ —无因次井筒储集系数;  $C_1$ —综合压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $d$ —纯井筒储集段斜率为1直线的截距;  $h$ —油层厚度,  $\text{m}$ ;  $K$ —渗透率,  $\text{D}$ ;  $K_0$ —零阶第二类修正贝塞尔函数;  $K_1$ —一阶第二类修正贝塞尔函数;  $L_{-1}$ —负一阶变形斯特鲁夫函数;  $L_0$ —零阶变形斯特鲁夫函数;  $M$ —拟合曲线上的任意一点;  $O$ —同阶无穷小量;  $p$ —地层中任意一点的压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_i$ —原始地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_{\text{wd}}$ —无因次井底压力;  $p'_{\text{wd}}$ —无因次井底压力导数;  $\bar{p}_{\text{wd}}$ —Laplace空间无因次井底压力;  $(p_{\text{wd}})_M$ —无因次井底压力拟合点;  $q$ —产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $r_w$ —井筒半径,  $\text{m}$ ;  $S$ —表皮因子, 无因次;  $t$ —时间,  $\text{h}$ ;  $z$ —无因次时间/无因次井储所对应的 Laplace 变量;  $\Delta p$ —压力差,  $\text{MPa}$ ;  $(\Delta p)_M$ —压力差拟合点,  $\text{MPa}$ ;  $\Delta p'$ —压力差导数,  $\text{MPa}/\text{h}$ ;  $\Delta t$ —关井时间,  $\text{h}$ ;  $\Delta \zeta$ — $\zeta$  函数对应的有因次函数,  $\text{MPa}$ ;  $\Delta \zeta_M$ — $\Delta \zeta$  函数拟合点,  $\text{MPa}$ ;  $\lambda$ —启动压力梯度,  $\text{MPa}/\text{m}$ ;  $\lambda_D$ —无因次启动压力梯度;  $\phi$ —孔隙度;  $\mu$ —流体黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $\zeta$ —新理论图版函数, 无因次;  $\zeta_M$ — $\zeta$  函数拟合点, 无因次。

### 参 考 文 献

- [1] AGARWAL R G, AL-HUSSAINY R. An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow: I. Analytical treatment[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1970, 10(3): 279-290.
- [2] RAMEY JR H J. Practical use of modern well test analysis[R]. SPE 5878, 1976.
- [3] MCKINLEY R M. Wellbore transmissibility from after flow-dominated pressure buildup data[J]. Journal of Petroleum Technology, 1971, 23(7): 863-872.
- [4] EARLOUGH JR R C, KERSCH K M. Analysis of short-time transient test data by type-curve matching[J]. Journal of Petroleum Technology, 1974, 26(7): 793-800.
- [5] GRINGARTEN A C, BOURDET D P, LANDEL P A, et al. A comparison between different skin and wellbore storage type-curves for early-time transient analysis[R]. SPE 8205, 1979.
- [6] BOURDET D, WHITTLE T M, DOUGLAS A A, et al. A new set of type curves simplifies well test analysis[J]. World Oil, 1983, 196(6): 95-106.
- [7] KAMAL M M. Transient well testing[M]. Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [8] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 5版. 北京: 石油工业出版社, 2008.  
LIU Nengqiang. Practical modern well test interpretation methods[M]. 5th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [9] 罗晓容, 王忠楠, 雷裕红, 等. 特超低渗砂岩油藏储层非均质性特征与成藏模式—以鄂尔多斯盆地西部延长组下组合为例[J]. 石油学报, 2016, 37(S1): 87-98.  
LUO Xiaorong, WANG Zhongnan, LEI Yuhong, et al. Heterogeneity characteristics and accumulation model of ultra-low permeability sandstone reservoirs: a case study of the lower part of Yanchang Formation in the western Ordos Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S1): 87-98.
- [10] 杨朝蓬, 李星民, 刘尚奇, 等. 苏里格低渗致密气藏阈值效应[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 347-354.  
YANG Zhaopeng, LI Xingmin, LIU Shangqi, et al. Threshold pressure effect of low permeability tight gas reservoirs in Sulige gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 347-354.
- [11] 杨正明, 刘学伟, 张仲宏, 等. 致密油藏分段压裂水平井注二氧化碳吞吐物理模拟[J]. 石油学报, 2015, 36(6): 724-729.  
YANG Zhengming, LIU Xuewei, ZHANG Zhonghong, et al. Physical simulation of staged-fracturing horizontal wells using CO<sub>2</sub> huff and puff in tight oil reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 724-729.
- [12] TIAB D. Analysis of pressure and pressure derivatives without type-curve matching: I-skin and wellbore storage [R]. SPE 25426, 1993.
- [13] 徐苏欣, 林加恩, 成绥民. 压裂井压力恢复试井的典型曲线直接综合分析技术[J]. 油气井测试, 2000, 9(2): 9-14.  
XU Suxin, LIN Jia'en, CHENG Suimin. Direct comprehensive analysis technique for pressure build-up well testing type curve of fractured wells[J]. Well Testing, 2000, 9(2): 9-14.
- [14] 张洪, 李得信, 邱金权, 等. 低渗透油藏早期试井解释方法研究与应用[J]. 油气井测试, 2015, 24(3): 15-20.  
ZHANG Hong, LI Dexin, QIU Jinqian, et al. Research of well testing interpretation method for early stage data in low permeability reservoir and its application[J]. Well Testing, 2015, 24(3): 15-20.
- [15] 李勇, 李保柱, 胡永乐, 等. 反褶积法在气井早期地层测试解释中的应用[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 298-301.  
LI Yong, LI Baozhu, HU Yongle, et al. Application of deconvolution algorithm to early formation interpretation of gas wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 298-301.
- [16] 胡小虎, 郑世毅. 试井早期流态恢复及参数解释[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(4): 87-91.

- HU Xiaohu, ZHENG Shiyi. The early recovery of flow pattern and parameter interpretation in well test[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2010, 32(4): 87-91.
- [17] 王飞, 潘子晴. 致密气藏压裂水平井反卷积试井模型[J]. 石油学报, 2016, 37(7): 898-902.
- WANG Fei, PAN Ziqing. Deconvolution-based well test model for the fractured horizontal wells in tight gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(7): 898-902.
- [18] DASTKHAN Z, ZOLALEMIN A, RAZMINIA K, et al. Minimization and removal of wellbore storage effect by direct deconvolution of well test data[R]. SPE 175595, 2015.
- [19] GRINGARTEN A C. Practical use of well-test deconvolution [R]. SPE 134534, 2010.
- [20] CUMMING J A, WOUFF D A, WHITTLE T, et al. Assessing the non-uniqueness of the well test interpretation model using deconvolution[R]. SPE 164870, 2013.
- [21] GRINGARTEN A C. From straight lines to deconvolution; the evolution of the state of the art in well test analysis[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2008, 11(1): 41-62.
- [22] STEWART G. Well test design & analysis[M]. Tulsa, Okla: PennWell Books, 2011.
- [23] 孙贺东, 周芳德, 林加恩. 气井试井早期资料解释的模拟反卷积方法[J]. 天然气工业, 2002, 22(5): 75-77.
- SUN Hedong, ZHOU Fangde, LIN Jia'en. Analog deconvolution method of interpreting gas well test early data[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(5): 75-77.
- [24] EHLIG-ECONOMIDES C. Use of the pressure derivative for diagnosing pressure-transient behavior[J]. Journal of Petroleum Technology, 1988, 40(10): 1280-1282.
- [25] ONUR M, REYNOLDS A C. A new approach for constructing derivative type curves for well test analysis[J]. SPE Formation Evaluation, 1988, 3(1): 197-206.
- [26] ONUR M, YEH N, REYNOLDS A C. New applications of the pressure derivative in well-test analysis[J]. SPE Formation Evaluation, 1989, 4(3): 429-437.
- [27] DUONG A N. A new set of type curves for well-test interpretation with the pressure/pressure-derivative ratio[J]. SPE Formation Evaluation, 1989, 4(2): 264-272.
- [28] BLASINGAME T A, JOHNSTON J L, LEE W J. Type curve analysis using the pressure integral method[R]. SPE 18799, 1989.
- [29] ONUR M, PERES A M M, REYNOLDS A C. New pressure functions for well test analysis[R]. SPE 19819, 1989.
- [30] AMINIAN K, AMERI S, GAINES T E, et al. Semilog type curve for interpretation of well test data[R]. SPE 21271, 1990.
- [31] 马强. 不稳定试井分析新版[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(3): 58-61.
- MA Qiang. A new typical curve for pressure transient test analysis [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(3): 58-61.
- [32] BAHRAMI H, REZAEE R, KABIR A H, et al. Using second derivative of transient pressure in welltest analysis of low permeability gas reservoirs[R]. SPE 132475, 2010.
- [33] 卢德唐, 郭冀义, 孔祥言. 一种分析不稳定试井早期数据的图版[J]. 油气井测试, 1993, 2(1): 33-40.
- LU Detang, GUO Jiyi, KONG Xiangyan. An analysis curve of early unstable test[J]. Well Testing, 1993, 2(1): 33-40.
- [34] 刘淑芬, 杨景海, 卢德唐. 基于小信号放大理论的早期试井分析方法应用研究[J]. 油气井测试, 2008, 17(6): 25-28.
- LIU Shufen, YANG Jinghai, LU Detang. Study on application of well analysis method at early time based on small-signal amplification theory[J]. Well Testing, 2008, 17(6): 25-28.
- [35] 陈永兰, 康汝坤, 孙丽慧, 等. 早期试井分析技术的应用[J]. 油气井测试, 2010, 19(4): 20-23.
- CHEN Yonglan, KANG Rukun, SUN Lihui, et al. Application of well test analysis technique for early time regime data[J]. Well Testing, 2010, 19(4): 20-23.
- [36] 董晓芳. 早期试井资料解释方法在低渗透地层的应用[J]. 国外测井技术, 2009(3): 40-43.
- DONG Xiaofang. Application of early well testing data interpretation method in low permeability formation [J]. World Well Logging Technology, 2009(3): 40-43.
- [37] 陈璐, 李坪东, 冯立勇, 等. 低渗油藏早期试井技术研究与应用[J]. 石油化工应用, 2010, 29(8): 50-54.
- CHEN Jun, LI Pingdong, FENG Liyong, et al. Research and application of low permeability early well test technology reservoir [J]. Petrochemical Industry Application, 2010, 29(8): 50-54.
- [38] 程时清, 徐论勋, 张德超. 低速非达西渗流试井典型曲线拟合法[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(4): 50-53.
- CHENG Shiqing, XU Lunxun, ZHANG Dechao. Type curve matching of well test data for non-darcy flow at low velocity[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(4): 50-53.
- [39] ABRAMOWITZ M, STEGUN I A. Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables[M]. New York: Dover Publications Inc., 1966.
- [40] 华线 Swift 试井分析软件 V3.0 [CP/DK]. 著作权登记号: 2012SR079557.
- Sinoline Swift MWT analysis software V3.0 [CP/DK]. Copyright Registration Number: 2012SR079557.

(收稿日期 2016-10-05 改回日期 2017-01-24 编辑 王培玺)