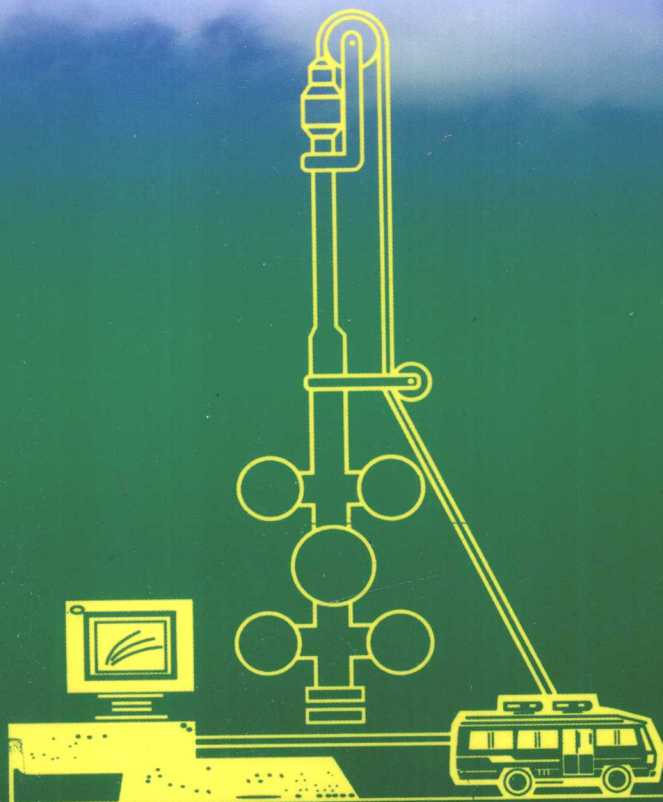




油气水井井筒动态分析方法

(上册)

赵智勇 黄在友 王承毅 韩旭东 张宗亮 主编



 海洋出版社

油气水井井筒动态分析方法

(上册)

赵智勇 黄在友 王承毅 韩旭东 张宗亮 主编

海洋出版社

2009年·北京

内 容 提 要

本套书(上、下册)比较系统地介绍了国内外油田油气水井井筒动态分析理论与实践研究的进展情况,详细地论述了油气水井试井中受井筒相重新分布影响的压力恢复数据的分析方法。

书中给出了我国油田具有井筒动态影响的油气水井测试分析实例。因此,本套书可供我国油田从事地层测试、试井、生产测井和油藏工程方面的地质和工程技术人员以及大专院校师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气水井井筒动态分析方法. 上册 / 赵智勇等主编.
北京:海洋出版社,2009. 8

ISBN 978 - 7 - 5027 - 7523 - 0

I. 油… II. 赵… III. 石油开采 - 文集 IV. TE35 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 122873 号

责任编辑:方 菁

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

(100081 北京市海淀区大慧路 8 号)

北京海洋印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2009 年 8 月北京第 1 版 2009 年 8 月北京第 1 次印刷

开本:787mm × 1092mm 1/16 印张:13.5

字数:340 千字 定价:55 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

《 油气水井井筒动态分析方法(上册) 》

编 委 会

名誉的主任:吴永平

名誉副主任:赵平起 史明栋

主	编:	赵智勇	黄在友	王承毅	韩旭东	张宗亮
编	委:	廖前进	王大兴	何 鲜	陈智宇	程远忠
		陈建平	刘存林	高云才	任宝生	朱文春
		秦宝艳	杨永昌	郭宝健	要克军	李玉平
		陈连才	吴希柱	王鸿钧	赵万优	李晓彤
		胡茂升	王宝臣	王松伟	张家兵	贾 岩
		赵立安	蒋 华	酉素娟	申海华	袁文红
		尤立忠	王志愿	修春红	刘立志	张进平
		张 庆	褚冠求	胡玲妹	肖津芝	亓 博
		杨 玲	黄淑荣	黄芳蓉	杨士荣	

目 次

上 册

具有井筒相重新分布的压力恢复分析	(1)
受井筒相重新分布影响的压力恢复数据的分析	(19)
应用物理方法认识井筒相重新分布问题	(45)
具有表皮效应和井筒储集及相分离的层状和双孔隙油藏压力动态的研究	(57)
有限油藏中有限导流水力压裂井的一种新型解析模型	(77)
相分离对气井压力恢复测试数据的影响	(94)
相分离使井测试数据异常的判别和解释	(109)
用自动历史拟合方法分析被井筒相分离影响的压力恢复数据:实例研究	(120)
油田注水井测试中井筒的影响	(137)
不稳定压力分析中井筒的影响综述	(144)
不稳定压力分析前的数据严格评价和处理	(153)
有井筒动态影响的压力不稳定分析	(164)
一阶压力导数(PPD):试井解释中的一种新的诊断工具	(175)
具有变井筒储集的井测试分析	(185)
关井测试期间的变井筒储集模型	(193)
附录1 英文字母、希腊字母和常用单位及其换算	(203)
附录2 油气水井井筒动态分析方法英汉词汇索引	(204)

具有井筒相重新分布的压力恢复分析

【摘要】 介绍了井筒相重新分布对压力恢复数据分析的影响。井筒相重新分布说明是井筒的影响,并且给出了扩散方程的数学新解。在无限大径向油藏无因次压力的基础上,提供分析井筒相重新分布影响的压力恢复测试的典型曲线拟合,并且介绍实际现场数据的实例分析,还将为影响井筒相重新分布和气体“驼峰”的参数提供资料。这些资料可使许多异常的、以前不能被定量分析的压力恢复测试进行分析提供了可行性。

0 引言

许多年以来,压力恢复测试以及其他类型的不稳定测试,用于评价油藏流体特性和完井效率。用于这些测试分析的基本理论和方程已做了很多的论证。人们已经研究了影响不稳定流动条件的压力响应的许多因素,这些因素是:油藏边界、非均质、裂缝、流体井筒储集、各种类型的井损伤、表皮效应、完井方式以及与井筒中气液相重新分布有关影响的少量资料。

井筒相重新分布的现象,出现在关井后气-液同时在油管里流动的井中,就像由 Stegemier 和 Matthews 所说明的那样,当这种井在地面关井时,重力影响引起液体下降,气体往地面上升。由于在封闭系统液体相对的不可压缩性和气体不能膨胀,使这种相重新分布净增井筒压力。压力恢复测试有这种现象出现时,在井筒中增加的压力通过地层释放,最后,在井筒和邻近地层之间将达到平衡。然而,在早期或许增至地层压力以上,造成异常驼峰而不能用常规的方法分析恢复的压力。在个别情况下,井筒压力或许不能充分地上升达到最大的恢复压力。

Stegemier 和 Matthews 以及 Pitzer 等人报道过井筒相重新分布的综合分析,这些研究表明了压力恢复的驼峰与相重新分布的关系以及驼峰的大小与油管中自喷气量的关系。Stegemier 和 Matthews 也考虑在出现“驼峰”时,估算气体上升速度与时间之间的近似关系。

Earlougher 也注意到了(在压力恢复测试数据的 $\lg \Delta P$ 与 $\lg \Delta t$ 图的形态基础上)相重新分布似乎是有关井筒储集的问题,其他的作者也认识到了井筒相重新分布的重要性。然而,被介绍的这种现象还没有成熟的分析方法,受井筒相重新分布影响的压力恢复数据,其分析的一般方法没有适用的。

1 相重新分布的原理分析

如果我们认为有井筒相重新分布的井存在,那么必然会出现井筒储存。如果井筒不能储存有限压缩的流体,对相重新分布的处理可以:(1)实际上没有出现;(2)与零点压力增加有

关。由 Stegemier 和 Matthews 以及 Pitzer 等人叙述的技术方法注意到,通过减小井筒相重新分布,也即减小了井筒储存效应。

对有井筒储存出现的井,井筒储存的影响可以由方程(1)描述。变化砂面流量的影响也可根据方程(2)获得

$$\frac{q_{sf}}{q} = 1 - C_D \frac{dp_{wD}}{dt_D} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dp_{wD}}{dt_D} \frac{1}{C_D} \left(1 - \frac{q_{sf}}{q}\right) \dots\dots\dots (2)$$

要说明井筒相重新分布的影响,注意不是井筒中所有压力变化都是井筒储集流量的影响,某些压力变化是由于相重新分布产生的。

因而,方程(2)加上一组由相重新分布产生的压力变化,可以写成方程(3),它经过整理表明了砂面流量取决于方程(4)

$$\frac{dp_{wD}}{dt_D} = \frac{1}{C_D} \left(1 - \frac{q_{sf}}{q}\right) + \frac{dp_{\phi D}}{dt_D} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{q_{sf}}{q} = 1 - C_D \left(\frac{dp_{wD}}{dt_D} - \frac{dp_{\phi D}}{dt_D}\right) \dots\dots\dots (4)$$

方程(4)也可以写成方程(1)的形式,根据视井筒储集系数的定义,在方程(5)中给出:

$$C_{eD} = C_D \left(1 - \frac{dp_{\phi D}}{dt_D} / \frac{dp_{wD}}{dt_D}\right) \dots\dots\dots (5)$$

在这种情况下,井筒相重新分布是井筒储集的近似形式,因为当

$$\frac{dp_{\phi D}}{dt_D} \geq 0, C_{eD} \leq C_D$$

时,这意味着相重新分布的影响必定会产生由方程(5)给定的井筒储集系数近似的较小值,另外,当

$$\frac{dp_{\phi D}}{dt_D} > \frac{dp_{wD}}{dt_D}$$

视井筒储集系数成为负值,说明流动方向相反。当出现这种情况时,压力恢复测试变得更像压力衰减测试,产生气体“驼峰”结果。

考虑相重新分布的实际过程,某些相重新分布的压力函数 $p_{\phi D}$ 的特性可以被推导,给出的几组数据表明,这种函数关系是适用的,如果井筒的气相和液相关井前以均匀流体的形态出现(即这口井不是间歇出油),要求压力函数在关井时必须有一个零值($t=0$),即在长时间下,相重新分布必定停止,所以它的导数就时间而论应接近于0。如果假定,气体没有进一步溶解在液体中,那么,它可表示压力函数单调增加至它的最大值,这些条件由方程(6)表述

$$\lim_{t \rightarrow 0} p_{\phi} = 0 \dots\dots\dots (6a)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p_{\phi} = C_{\phi}, \text{为一常数} \dots\dots\dots (6b)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dp_{\phi}}{dt} = 0 \dots\dots\dots (6c)$$

进一步说,考虑通过液柱的气泡或段塞上升的影响,注意在关井后,当第一个气泡或段塞到达

地面时,井筒中的压力必定有一定量的增加。这种压力增加引起体积减小和其他气泡或段塞的密度增加。这些影响使所有余下的气体的上升速度降低,所以压力的变化量值因此必定减小。对气泡或段塞在后来到达地面可进行相同的讨论。另外,由于实际井筒中的气泡和段塞的尺寸可能变化很大,因此,它们上升速度的分布要考虑其他范围值。

预计相重新分布的原始压力将迅速上升,然后缓慢接近它的最大值 C_ϕ 。这一研究产生了方程的指数函数,该方程满足方程(6)的约束。有一组未公布的室内数据对相重新分布的适用性似乎证明了以下函数的关系式:

$$p_\phi = C_\phi (1 - e^{-t/\alpha}) \dots\dots\dots (7)$$

在方程(7)中,参数 C_ϕ 代表最大的相重新分布的压力变化, α 代表出现总变化约 63% 时的时间,由井筒中的气体将上升到地面与总的气体余留常数的记录可以估算 C_ϕ ;这是由于假设井筒中液体的不可压缩性产生的。当①假设井筒中气/油比恒定;②忽略温度的影响;③假设液体是不可压缩的,气体是理想的并且没有重量;④井筒压力随深度的增加而线性增加, C_ϕ 可以由方程(8)进行估算,估算 C_ϕ 的一般方法,可以根据有关参考文献推导:

$$C_\phi = \frac{p_{gef} - p_{whf}}{\ln(p_{gef}/p_{whf})} \dots\dots\dots (8)$$

而 α 不容易被确定,已认识到它主要取决于一口井中控制气泡或段塞上升时间的那些因素,最后保持无因次参数恒定,用方程(9)定义无因次相重新分布的压力函数:

$$p_{\phi D} = C_{\phi D} (1 - e^{-t_D/\alpha_D}) \dots\dots\dots (9)$$

式中

$$p_{\phi D} = khp_\phi/141.2qB\mu, t_D = 0.000264kt/\phi\mu c_i r_w^2$$

$$C_{\phi D} = khp_\phi/141.2qB\mu, \alpha_D = 0.000264k\alpha/\phi\mu c_i r_w^2$$

在 SPE 介绍的 SI 单位制中,用 $7.2\pi \times 10^{-6}$ 代替 $1/141.2$; 用 3.6×10^{-6} 代替 0.000264 。

2 无因次井筒压力的确定

在压力恢复测试的分析中,要取得无因次压力解,就需要把井筒中相重新分布的影响包括在扩散方程中。对于无限作用、均质、各向同性油藏的微可压缩流体径向流动,这个问题用无因次变量做如下表达。扩散方程是:

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} = \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \dots\dots\dots (10)$$

$$p_D(r_D, 0) = 0 \dots\dots\dots (11)$$

边界条件是

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} p_D(r_D, t_D) = 0 \dots\dots\dots (12)$$

$$-\left(\frac{\partial p_D}{\partial r_D}\right)_{r_D=1} = 1 - C_D \left(\frac{dp_{wD}}{dt_D} - \frac{dp_{\phi D}}{dt_D}\right) \dots\dots\dots (13)$$

$$p_{wD} = \left[p_D - S \left(\frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right) \right]_{r_D=1} \dots\dots\dots (14)$$

有的研究者认为,这个问题考虑井筒储集后,也可以用褶积形式近似,产生方程(15):

$$p_{wD}(t_D) = \int_0^{t_D} \left\{ 1 - C_D \left[\frac{dp_{wD}(\tau)}{d\tau} - \frac{dp_{\phi D}(\tau)}{d\tau} \right] \right\} \cdot \frac{dp_D(t_D - \tau)}{dt_D} d\tau \\ + S \left\{ 1 - C_D \cdot \left[\frac{dp_D(t_D)}{dt_D} - \frac{dp_{\phi D}(t_D)}{dt_D} \right] \right\} \dots\dots\dots (15)$$

方程(15)可以解出 $\mathcal{L}(p_{wD})$,为预期的压力函数的拉普拉斯变换。这就产生了方程(16)(s 代表拉普拉斯变量)。

$$\mathcal{L}(p_{wD}) = \frac{[s\mathcal{L}(p_D) + S[1 + C_D s^2 \mathcal{L}(p_{\phi D})]]}{s[1 + C_D s(s\mathcal{L}(p_D) + S)]} \dots\dots\dots (16)$$

注意,这个解完全是通用的,除了存在这种函数关系并且是拉普拉斯变换以外, p_D 或 $p_{\phi D}$ 没有置于约束条件之下。因而如果 p_D 代表任意形式的油藏条件,那些条件需要的压力解可以在原理上确定,这种论点也可以应用于相重新分布压力。

在本研究中,方程(9)用于相重新分布的影响,它的拉普拉斯变换是:

$$\mathcal{L}(p_{\phi D}) = (C_{\phi D}/S) - C_{\phi D}/(s + 1/\alpha_D) \dots\dots\dots (17)$$

$\mathcal{L}(p_D)$ 要求的表达式是由 Everdigen 和 Hurst 提出的,即方程(18),这里 K_0 、 K_1 是修正的贝塞尔函数,

$$\mathcal{L}(P_D) = K_0 \sqrt{s}/s^{3/2} K_1 \sqrt{s} \dots\dots\dots (18)$$

它也说明,在长时间的情况下,可化简成方程(19)的线源解,因为当 $S \rightarrow 0$ 或 $t_D \rightarrow \infty$ 时, $\sqrt{s} K_1(\sqrt{s}) \rightarrow 1$

$$\mathcal{L}(P_D) = \frac{1}{s} K_0(\sqrt{s}) \dots\dots\dots (19)$$

时间更长时, $\mathcal{L}(P_D)$ 近似值可以趋近于0, $t_D \rightarrow \infty$, $s \rightarrow 0$ 并且获得

$$K_0(\sqrt{s}) \rightarrow -[\ln(\sqrt{s}/2) + \gamma]$$

这里 $\gamma = 0.577\ 215\ 664\ 901\ 52\dots$ 代表欧拉常数,这样就给出了方程(20),

$$\mathcal{L}(P_D) = -\frac{1}{s} \left[\ln\left(\frac{\sqrt{s}}{2}\right) + \gamma \right] \dots\dots\dots (20)$$

方程(17) $\mathcal{L}(P_D)$ 的确定结合方程(18)、方程(19)和方程(20)的 $\mathcal{L}(P_D)$ 各种变化形式,便得出了 $\mathcal{L}(P_D)$ 要求的表达式。

2.1 状源井

$$\mathcal{L}(P_{wD}) = \frac{\left[\frac{K_0(\sqrt{s})}{sK_1(\sqrt{s})} + S \right] \left[1 + C_D C_{\phi D} s^2 \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + 1/\partial_D} \right) \right]}{s \left\{ 1 + C_D s \left[\frac{K_0(\sqrt{s})}{sK_1(\sqrt{s})} + S \right] \right\}} \dots\dots\dots (21)$$

2.2 线源井

$$\mathcal{L}(P_{wD}) = [K_0(\sqrt{s}) + S] \left[C_D C_{\phi D} s^2 \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + 1/\partial_D} \right) \right] / \\ s \{ 1 + C_D s [K_0(\sqrt{s}) + S] \} \dots\dots\dots (22)$$

2.3 线源井长时间近似值

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(P_{wD}) = & \left\{ \left[S - \ln\left(\frac{\sqrt{s}}{2}\right) - \gamma \right] \left[1 + C_D C_{\phi D} s^2 \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + 1/\alpha_D} \right) \right] \right\} / \\ & s \left\{ 1 + C_D s \left[S - \ln\left(\frac{\sqrt{s}}{2}\right) - \gamma \right] \right\} \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

P_{wD} 函数长时间的近似形式可以根据方程(21)、方程(22)或方程(23)为 0 时推导,

$$\text{当 } s \rightarrow 0 (t_D \rightarrow \infty) \text{ 时, } s^2 \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + 1/\alpha_D} \right) \rightarrow 0$$

因此,这些方程降低了由 Agarwal 等人给定的等式精度,进一步近似成方程(24),

$$P_{wD} \approx P_D + S \dots\dots\dots (24)$$

短时近似值也可根据方程(21)为 0 时获得,让 $C_{\phi D} = 0$ 获得的井筒储集系数减小到:

$$\mathcal{L}(P_{wD \text{ 储集}}) = 1/s^2 C_D \dots\dots\dots (25)$$

同样,因为在 s 较大时, $s^2 \{ 1/s - [1/(s + 1)/(\alpha_D)] \} \rightarrow 1/\alpha_D$, $\mathcal{L}(P_{wD})$ 应近似成

$$\mathcal{L}(P_D) \approx 1/s^2 C_D + C_{\phi D}/\alpha_D S^2 \dots\dots\dots (26)$$

p_{wD} 近似成 $p_{wD} = t_D/C_{aD}$, 式中

$$1/C_{aD} = 1/C_D + C_{\phi D}/\alpha_D \dots\dots\dots (27)$$

注意:方程(27)说明是很类似于井筒储集将出现在早期的表达式,这与早期 Earlougher 的论述是一致的。

在分析具有井筒相重新分布的压力恢复测试中,要获得适用的无因次压力,必须反演方程(21)、方程(22)或方程(23)。由于这些表达式对解析解反演太复杂,使用 Stestedhfest 方法配合使用 TI-59 程序计算器介绍的反演技术,进行反演的拉普拉斯变换。典型曲线如图 1 至图 6 所示,说明压力函数可以显示趋向的衰减计算。根据 Stestedhfest 方法,除了遇到用计算波长的某些条件以外,这种计算可提供数值方法。然而,它说明了本研究获得的函数关系不是脉动的,因为拉普拉斯变换可被写成三种条件的总和形式。这些条件的两个代表单位函数,而保留条件的反演变换具有一个单一的最大值。因而,函数“磨光”的 Stestedhfest 方法判别式满足每个条件,根据拉普拉斯变换和数值方法的线性特点,使用这些函数的数值方法是有效的。

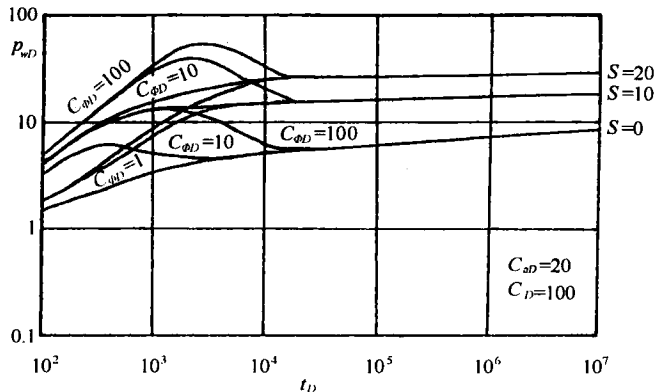


图 1 具有井筒相重新分布的典型曲线 ($C_{aD} = 20, C_D = 100$)

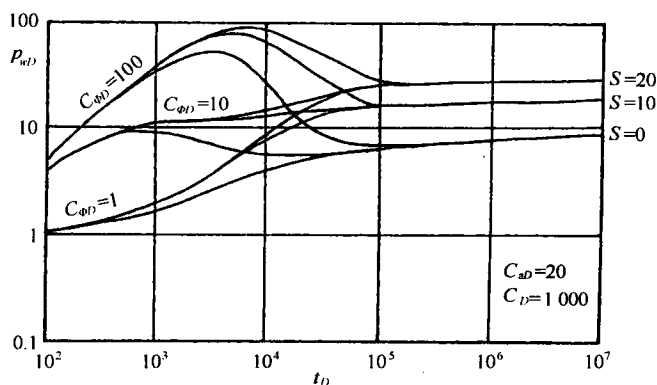


图2 具有井筒相重新分布的典型曲线 ($C_{aD}=20, C_D=1000$)

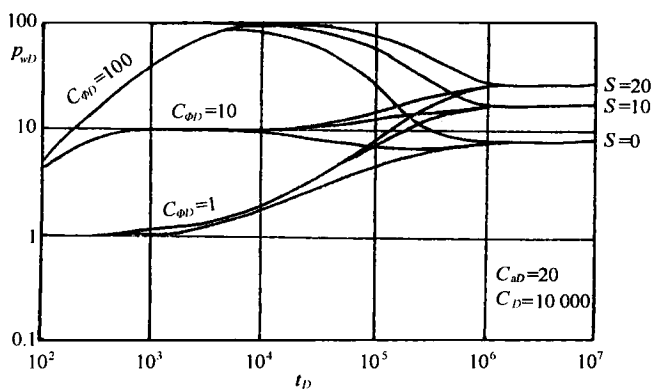


图3 具有井筒相重新分布的典型曲线 ($C_{aD}=20, C_D=10000$)

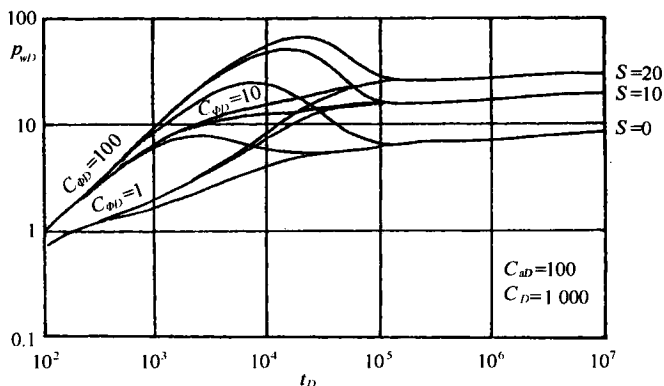


图4 具有井筒相重新分布的典型曲线 ($C_{aD}=100, C_D=1000$)

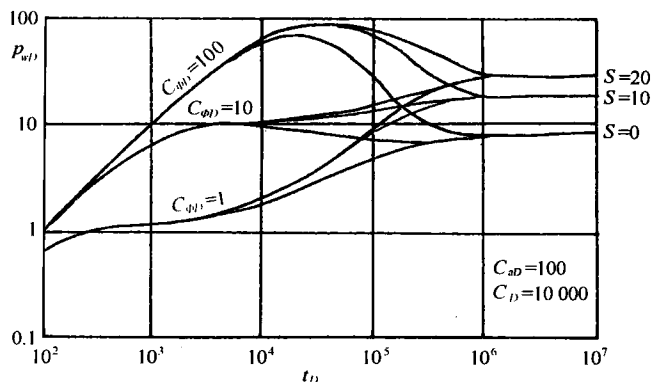


图 5 具有井筒相重新分布的典型曲线 ($C_{aD} = 100, C_D = 10\ 000$)

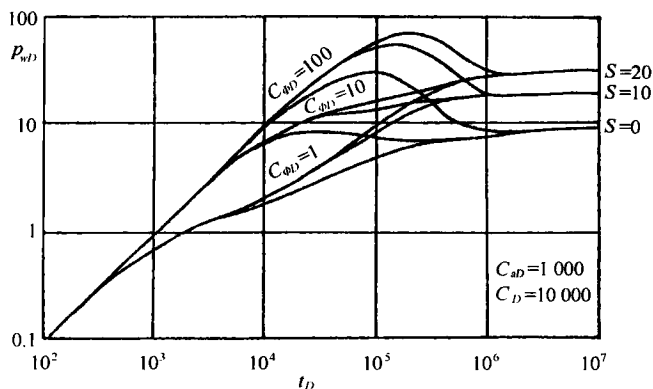


图 6 具有井筒相重新分布的典型曲线 ($C_{aD} = 1\ 000, C_D = 10\ 000$)

方程(21)设计并反演了几种井筒储集系数 C_D 和表皮系数 S 的值,上述使用的数据结果请与 Agarwal 等人的报告比较(表 1)。这说明了数值方法有很适宜的计算精度。方程(22)同样设计和反演了 C_D 和 S 的几种值,再一次表明与 Agarwal 等人的线源解的结果一致(表 2)。最后,方程(23)反演,表 3 和表 4 显示的结果仍然与前面的结果一致。因此,方程(23)可用于这种研究的残数定理。

表 1 计算的 p_{wD} 对比(柱状源井, $C_{\phi D} = 0$)

t_D	① p_{wD}	② p_{wD}	t_D	① p_{wD}	② p_{wD}
$C_D = 100, S = 0$			$C_D = 100, S = 0$		
100	0.797 5	0.797 5	100	0.977 7	0.977 7
1 000	3.268 0	3.268 0	1 000	8.122 0	8.122 0
10 000	4.956 6	4.956 6	10 000	24.242	24.241
100 000	6.154 8	6.154 8	100 000	26.134	26.134
1 000 000	7.311 6	7.311 6	1 000 000	27.310	27.310
10 000 000	8.463 5	8.463 5	10 000 000	28.463	28.463

续表

t_D	① p_{wD}	② p_{wD}	t_D	① p_{wD}	② p_{wD}
$C_D = 10\,000, S = 0$			$C_D = 10\,000, S = 20$		
100	0.009 98	0.009 98	100	0.010 00	0.010 00
1 000	0.098 4	0.098 4	1 000	0.099 8	0.099 8
10 000	0.892 5	0.892 5	10 000	0.979 7	0.979 7
100 000	4.677 2	4.677 3	100 000	8.269 8	8.269 8
1 000 000	7.230 8	7.230 9	1 000 000	26.286	26.286
10 000 000	8.455 0	8.455 0	10 000 000	28.434	28.434

表 2 计算的 p_{wD} 对比 (线源井, $C_{\phi D} = 0$)

t_D	① p_{wD}	② p_{wD}	t_D	① p_{wD}	② p_{wD}
$C_D = 100, S = 0$			$C_D = 100, S = 0$		
100	0.793 8	0.793 8	100	0.977 6	0.977 6
1 000	3.263 9	3.264 0	1 000	8.121 2	8.121 2
10 000	4.956 3	4.956 4	10 000	24.242	24.241
100 000	6.154 8	6.154 8	100 000	26.134	26.134
1 000 000	7.311 6	7.311 6	1 000 000	27.310	27.310
10 000 000	8.463 5	8.463 5	10 000 000	28.463	28.463
$C_D = 10\,000, S = 0$			$C_D = 10\,000, S = 20$		
100	0.009 98	0.009 98	100	0.010 00	0.010 00
1 000	0.098 4	0.098 4	1 000	0.099 8	0.099 8
10 000	0.892 5	0.892 5	10 000	0.979 7	0.979 7
100 000	4.677 1	4.677 2	100 000	8.269 8	8.269 8
1 000 000	7.230 7	7.230 9	1 000 000	26.286	26.286
10 000 000	8.455 0	8.455 0	10 000 000	28.434	28.434

表 3 P_{wD} 计算值的对比 ($C_{\phi D} = 0$)

t_D	P_{wD} 柱状源井	P_{wD} 线源井	P_{wD} 近似值	t_D	P_{wD} 柱状源井	P_{wD} 线源井	P_{wD} 近似值
$C_D = 100, S = 0$				$C_D = 100, S = 0$			
100	0.797 5	0.793 8	0.792 9	100	0.977 7	0.977 6	0.977 6
1 000	3.268 0	3.263 9	3.263 4	1 000	8.122 0	8.121 2	8.121 1
10 000	4.956 6	4.956 3	4.956 3	10 000	24.242	24.242	24.242
100 000	6.154 8	6.154 8	6.154 8	100 000	26.134	26.134	26.134
1 000 000	7.311 6	7.311 6	7.316 6	1 000 000	27.310	27.310	27.310
10 000 000	8.463 5	8.463 5	8.463 5	10 000 000	28.463	28.463	27.463

续表

t_D	P_{wD} 柱状源井	P_{wD} 线源井	P_{wD} 近似值	t_D	P_{wD} 柱状源井	P_{wD} 线源井	P_{wD} 近似值
$C_D = 10\ 000, S = 0$				$C_D = 10\ 000, S = 20$			
100	0.009 98	0.009 98	0.009 98	100	0.010 0	0.010 0	0.010 0
1 000	0.098 4	0.098 4	0.098 4	1 000	0.099 8	0.099 8	0.099 8
10 000	0.892 5	0.892 5	0.892 5	10 000	0.979 7	0.979 7	0.979 7
100 000	4.677 1	4.677 1	4.677 1	100 000	8.269 8	8.269 8	8.269 8
1 000 000	7.230 8	7.230 7	7.230 7	1 000 000	26.286	26.286	26.286
10 000 000	8.455 0	8.455 0	8.455 0	10 000 000	28.434	28.434	28.434

表 4 p_{wD} 计算值的对比 ($C_{\phi D} = 0$)

t_D	P_{wD} 柱状源井	P_{wD} 线源井	P_{wD} 近似值	t_D	P_{wD} 柱状源井	P_{wD} 线源井	P_{wD} 近似值
$C_D = 100, C_{\phi D} = 10, \alpha_D = 1\ 000$				$C_D = 10\ 000, C_{\phi D} = 100, \alpha_D = 1\ 000$			
100	1.554 1	1.546 8	1.545 0	100	9.503 1	9.502 5	9.502 3
1 000	5.001 3	4.996 2	4.995 7	1 000	62.179 4	62.175 9	62.175 3
10 000	5.019 9	5.019 6	5.019 6	10 000	82.972 7	82.969 1	82.968 9
100 000	6.160 0	6.159 9	6.159 9	100 000	25.404 2	25.404 5	25.404 4
1 000 000	7.312 1	7.312 0	7.312 1	1 000 000	7.819 7	7.819 5	7.819 6
10 000 000	8.463 5	8.463 5	8.463 5	10 000 000	8.505 9	8.505 8	8.505 9
$C_D = 100, C_{\phi D} = 10, \alpha_D = 100$				$C_D = 10\ 000, C_{\phi D} = 100, \alpha_D = 100$			
100	5.683 2	5.657 5	5.651 9	100	63.050 4	63.046 6	63.045 6
1 000	4.558 8	4.558 1	4.558 3	1 000	97.458 4	97.452 8	97.452 0
10 000	5.012 3	5.012 1	5.012 0	10 000	81.548 3	81.544 9	81.544 9
100 000	6.159 9	6.159 9	6.159 8	100 000	25.163 4	25.163 8	25.163 6
1 000 000	7.312 1	7.312 0	7.312 0	1 000 000	7.819 1	7.818 8	7.819 0
10 000 000	8.463 5	8.463 5	8.463 5	10 000 000	8.505 9	8.505 9	8.505 9

要简化在压力恢复分析中使用的无因次压力,根据方程(27)取得的 C_{ad} 值用作变量而不是 A_D ,这比确定 α_D 更困难。反演结果显示在表 5 和表 6 中,对数 p_{wD} 与 t_D 典型曲线在图 1 至图 6 中给出,其精度为 $\pm 0.1\%$ 。

表 5 具有相重新分布的无因次井筒压力

t_D	$C_{aD} = 20, C_D = 100$			$C_{aD} = 20, C_D = 1\ 000$			$C_{aD} = 20, C_D = 10\ 000$		
	$S = 0$	$S = 10$	$S = 20$	$S = 0$	$S = 10$	$S = 20$	$S = 0$	$S = 10$	$S = 20$
	$C_{\phi D} = 1$			$C_{\phi D} = 1$			$C_{\phi D} = 1$		
100	1.496	1.881	1.962	1.055	1.086	1.089	0.999 7	1.003	1.003
200	1.900	2.216	2.838	1.125	1.184	1.191	1.013	1.018	1.019
500	2.639	4.836	5.303	1.315	1.454	1.474	1.034	1.046	1.048
1 000	3.378	7.500	8.781	1.613	1.892	1.938	1.070	1.092	1.096
2 000	3.967	10.74	13.92	2.131	2.724	2.837	1.143	1.184	1.191
5 000	4.570	13.90	21.24	3.220	4.908	5.327	1.359	1.457	1.474
10 000	4.962	14.81	24.27	4.187	7.709	8.865	1.698	1.899	1.940
20 000	5.331	15.27	25.19	4.987	11.23	14.16	1.298	2.744	2.844
50 000	5.804	15.78	25.76	5.689	14.86	21.93	2.623	4.980	5.355
100 000	6.155	16.15	26.13	6.100	15.93	25.30	3.882	7.900	8.948
200 000	6.505	16.50	26.49	6.476	16.41	26.33	4.956	11.68	14.39
500 000	6.964	16.96	26.96	6.953	16.93	26.91	5.804	15.80	22.60
1 000 000	7.312	17.31	27.31	7.305	17.30	27.28	7.237	17.04	26.32
2 000 000	7.659	17.66	27.66	7.655	17.65	27.65	7.621	17.56	27.47
5 000 000	8.117	18.12	28.12	8.115	18.11	28.11	8.101	18.08	28.06
10 000 000	8.463	18.46	28.46	8.463	18.46	28.46	8.456	18.45	28.43
	$C_{\phi D} = 10$			$C_{\phi D} = 10$			$C_{\phi D} = 10$		
100	3.374	4.114	4.195	3.871	3.956	3.964	3.928	3.937	3.938
200	4.968	6.877	7.150	6.148	6.387	6.414	6.303	6.328	6.331
500	5.828	10.88	11.99	8.597	9.387	9.495	9.116	9.199	9.210
1 000	4.991	12.62	15.21	8.698	10.31	10.57	9.794	9.973	9.999
2 000	4.447	13.41	18.31	7.804	10.63	11.19	9.721	10.07	10.12
5 000	4.688	14.35	22.59	6.371	11.35	12.72	9.394	10.16	10.30
10 000	5.013	14.89	24.51	5.622	12.34	14.92	8.974	10.31	10.59
20 000	5.355	15.30	25.23	5.467	13.70	18.25	8.359	10.62	11.16
50 000	5.813	15.79	25.77	5.808	15.33	23.26	7.341	11.50	12.75
100 000	6.160	16.15	26.14	6.151	16.01	25.55	6.728	12.70	15.06
200 000	6.507	16.50	26.50	6.500	16.44	26.37	6.580	14.34	18.59
500 000	6.965	16.96	26.96	6.962	16.94	26.92	6.932	16.35	24.03
1 000 000	7.312	17.31	27.31	7.310	17.30	27.29	7.290	17.13	26.60
2 000 000	7.659	17.66	27.66	7.658	17.65	27.65	7.645	17.59	27.50
5 000 000	8.117	18.12	28.12	8.116	18.11	28.11	8.111	18.09	28.07
10 000 000	8.464	18.46	28.46	8.463	18.46	28.46	8.460	18.45	28.44

续表

t_D	$C_{aD} = 20, C_D = 100$			$C_{aD} = 20, C_D = 1\ 000$			$C_{aD} = 20, C_D = 10\ 000$		
	$S = 0$	$S = 10$	$S = 20$	$S = 0$	$S = 10$	$S = 20$	$S = 0$	$S = 10$	$S = 20$
	$C_{\phi D} = 100$			$C_{\phi D} = 100$			$C_{\phi D} = 100$		
100	3.898	4.720	4.810	4.762	4.861	4.871	4.865	4.876	4.876
200	6.594	8.936	9.263	9.137	9.457	9.492	9.477	9.510	9.514
500	11.05	19.05	20.71	20.13	21.78	21.98	21.93	22.09	22.11
1 000	13.30	29.58	34.52	33.73	38.75	38.82	38.72	39.22	39.29
2 000	12.77	36.81	48.60	47.43	59.24	61.40	61.30	62.80	63.03
5 000	8.531	28.39	47.47	45.83	76.10	83.84	84.81	90.01	90.93
10 000	6.104	18.03	31.98	25.87	64.91	79.94	84.01	94.91	97.09
20 000	5.646	15.66	25.82	11.14	41.91	62.65	71.18	90.45	94.92
50 000	5.912	15.90	25.89	7.067	20.58	37.63	45.70	77.47	87.29
100 000	6.206	16.20	26.19	6.678	16.87	28.23	25.68	61.24	76.63
200 000	6.530	16.52	26.52	6.742	16.73	26.73	12.39	41.30	60.94
500 000	6.974	16.97	26.97	7.055	17.04	27.02	8.225	21.89	38.42
1 000 000	7.317	17.32	27.31	7.356	17.35	27.34	7.820	18.05	29.44
2 000 000	7.661	17.66	27.66	7.680	17.68	27.67	7.888	17.87	27.88
5 000 000	8.118	18.12	28.12	8.125	18.12	28.12	8.204	18.19	28.17
10 000 000	8.464	18.46	28.46	8.468	18.47	28.47	8.506	18.50	28.49

表 6 具有相重新分布的无因次井筒压力

t_D	$C_{aD} = 20, C_D = 100$			$C_{aD} = 20, C_D = 1\ 000$			$C_{aD} = 20, C_D = 10\ 000$		
	$S = 0$	$S = 10$	$S = 20$	$S = 0$	$S = 10$	$S = 20$	$S = 0$	$S = 10$	$S = 20$
	$C_{\phi D} = 1$			$C_{\phi D} = 1$			$C_{\phi D} = 1$		
100	0.674 8	0.690 2	0.691 7	0.636 6	0.638 1	0.638 3	0.095 83	0.096 03	0.096 05
200	0.984 1	1.024	1.029	0.877 2	0.880 9	0.881 4	0.183 9	0.184 6	0.184 6
500	1.326	1.450	1.467	1.029	1.040	1.041	0.408 5	0.411 5	0.411 9
1 000	1.630	1.898	1.941	1.072	1.093	1.096	0.681 3	0.690 5	0.691 8
2 000	2.143	2.730	2.841	1.145	1.185	1.191	0.999 7	1.025	1.029
5 000	3.225	4.912	5.330	1.360	1.457	1.475	1.369	1.453	1.468
10 000	4.189	7.712	8.868	1.699	1.900	1.940	1.715	1.906	1.944
20 000	4.988	11.23	14.16	2.299	2.744	2.844	2.312	2.750	2.848
50 000	5.689	14.86	21.93	3.623	4.980	5.355	3.630	4.985	5.358
100 000	6.100	15.93	25.30	4.882	7.900	8.949	4.885	7.904	8.951
200 000	6.476	16.41	26.33	5.956	11.68	14.39	5.957	11.68	14.39
500 000	6.953	16.93	26.91	6.804	15.80	22.60	6.804	15.80	22.60
1 000 000	7.305	17.30	27.28	7.237	17.04	26.32	7.237	17.04	26.32
2 000 000	7.655	17.65	27.64	7.621	17.56	27.47	7.621	17.56	27.47
5 000 000	8.115	18.11	28.11	8.102	18.08	28.06	8.102	18.08	28.06
10 000 000	8.463	18.46	28.46	8.456	18.45	28.43	8.456	18.45	28.43

续表

t_D	$C_{aD} = 20, C_D = 100$			$C_{aD} = 20, C_D = 1\ 000$			$C_{aD} = 20, C_D = 10\ 000$		
	$S = 0$	$S = 10$	$S = 20$	$S = 0$	$S = 10$	$S = 20$	$S = 0$	$S = 10$	$S = 20$
	$C_{\phi D} = 10$			$C_{\phi D} = 10$			$C_{\phi D} = 10$		
100	0.937 0	0.956 6	0.958 5	0.950 2	0.952 2	0.952 4	0.099 35	0.995 5	0.999 57
200	1.769	1.832	1.839	1.808	1.815	1.815	0.197 6	0.198 2	0.198 3
500	3.760	4.309	4.076	3.917	3.946	3.950	0.485 7	0.489 1	0.489 5
1 000	5.847	6.646	6.768	6.270	6.356	6.368	0.945 4	0.957 0	0.958 6
2 000	7.474	9.457	9.823	8.505	8.734	8.770	1.794	1.833	1.839
5 000	7.018	11.70	12.92	9.482	10.14	10.26	3.859	4.046	4.078
10 000	5.876	12.66	15.17	9.102	10.36	10.62	6.107	6.668	6.776
20 000	5.514	13.86	18.42	8.475	10.67	11.19	8.049	9.523	9.846
50 000	5.811	15.36	23.31	7.393	11.53	12.78	8.097	11.91	13.00
100 000	6.152	16.01	25.56	6.750	12.72	15.08	7.081	13.07	15.35
200 000	6.500	16.44	26.37	6.585	14.36	18.61	6.659	14.54	18.79
500 000	6.962	16.94	26.92	6.933	16.35	24.03	6.938	16.38	24.09
1 000 000	7.310	17.30	27.29	7.290	17.13	26.60	7.290	17.14	26.61
2 000 000	7.658	17.65	27.65	7.646	17.59	27.50	7.646	17.59	27.50
5 000 000	8.116	18.11	28.11	8.111	18.09	28.07	8.111	18.09	28.07
10 000 000	8.463	18.46	28.46	8.460	18.45	28.44	8.460	18.45	28.44
	$C_{\phi D} = 100$			$C_{\phi D} = 100$			$C_{\phi D} = 100$		
100	0.971 6	0.991 8	0.993 7	0.992 7	0.994 8	0.995 0	0.099 73	0.999 4	0.999 96
200	1.902	1.968	1.975	1.972	1.979	1.980	0.198 9	0.199 6	0.199 7
500	4.488	4.805	4.846	4.836	4.870	4.874	0.494 6	0.498 1	0.498 5
1 000	8.227	9.245	9.399	9.374	9.489	9.505	0.980 2	0.992 2	0.993 8
2 000	14.03	17.13	17.69	17.64	18.02	18.08	1.928	1.969	1.976
5 000	22.96	34.27	36.96	36.97	38.79	39.10	4.601	4.813	4.849
10 000	24.93	47.84	55.41	56.03	61.32	62.34	8.562	9.274	9.409
20 000	18.37	48.72	64.66	67.61	80.77	83.68	14.95	17.24	17.72
50 000	8.313	25.81	45.04	51.54	80.74	89.27	25.74	34.74	37.15
100 000	6.765	17.26	29.57	28.32	64.05	78.81	29.39	49.09	55.95
200 000	6.763	16.76	26.77	13.52	42.78	62.40	22.55	51.13	65.94
500 000	7.056	17.04	27.03	8.263	22.14	38.89	9.931	28.12	47.05
1 000 000	7.356	17.35	27.34	7.826	18.07	29.52	7.928	18.57	31.09
2 000 000	7.680	17.68	27.67	7.889	17.87	27.88	7.914	17.91	27.94
5 000 000	8.125	18.12	28.12	8.204	18.19	28.17	8.205	18.19	28.18
10 000 000	8.468	18.47	28.47	8.506	18.50	28.49	8.506	18.50	28.49