

国外水平井开发油气田技术专题调研系列

水平井试井分析方法

刘 慰 宁

(石油大学)

中国石油天然气总公司情报研究所

一九九一年三月



47279

47279



00271431

“于水平井开发油气田技术”专题调研的说明



200433799

张朝琛

石油上游工业具有变革性的水平井开发油气田技术，已普遍引起国际社会的注意，美国的“新闻周刊”和“美国新闻与世界报导”等以报道国际性重大社会经济新闻的刊物在1989年就开始象报导超导和冷聚变一样，评述了水平井技术，强调了它的前景和潜力在增加石油可采储量上的战略意义，以及增加产量、减少开采成本稳定油价的现实效益；对于这一技术，形象地评价是“水平井技术对于石油工业，犹如半导体之出现对于电子工业”，是一次革命性的飞跃，是“五十年来石油技术进展的代表性象征”，不难想象，没有机械电子工业，计算机工业和新材料工业的成就；没有石油地球物理测井，钻井完井技术多年的发展和经验积累，就不可能有80年代末“应运而生”的水平井技术的突破和推广。

事实上，自80年代初以来，钻成和投产的水平井，其数量不断递增，初期限于工艺作业的研究改进，随后是先导性试验，而现在则已广泛用于全面开发海上油气田；80年代的水平井大多数钻于海上油田，主要是因为海上油田的开发，出于经济原因，必须少井高产才有开发价值及经济效益；而海上油气田长期采用定向斜井，也为钻水平井提供了基础设施及发展基础。

水平井技术之所以对石油上游工业具有变革意义，可以理解为水平井技术已从海上“登陆”，其钻井成本对于陆上一般为多井低产（相对于海域油井来说）的油田来说，已具有实用价值；反之，正是陆上众多油气田对水平井技术的召唤和需要，才使得水平井技术身份倍增，前途无量。

水平井技术之所以对油田开发具有变革意义，可以理解为，以往用垂向井开发油田，钻开油藏的部位仅限于油藏的厚度范畴，而从油藏的平面上看，一口垂直井只不过是一个“井点”，注采进程只在各井点之间运行，注采井底流动阻力显然较大，遇有淤塞时，驱替能量耗损更甚，注采量受到抑制；人们曾经力图用压裂等方法予以改善，但影响范围毕竟有限，效果不一；所谓的“井网，”从平面上看有点无线，注采过程出现形形色色的“绕流”和“死角”而构成各种难以动用的死油区，严重地影响了波及范围和可采储量的利用程度。水平井技术的出现，使“井网”有了现实意义，水平井段相当于井网的联络线，所以人们认为，水平井段的“长度决定一切，”水平井段越长，开采效益越高；这对多垂向裂缝系统油藏，低渗油藏，薄层油藏，多层油藏，底水油藏，单井小断块油藏，稠油油藏，构造油藏的边翼部，水平井都各有用武之地。随着利用垂向老井侧向开窗钻成水平井技术的日趋成熟，更为老油田挖潜创造了条件，横竖结合，运用水平井进行开发的方式及其适用的范围正日新月异，方兴未艾。

但是，水平井段的长度，受技术和经济的诸多因素的制约，需要根据储层地质条件，钻井工程设计及油田开发设计和油藏工程要求而定。

应该说，目前水平钻井技术已趋成熟，1990年国际石油界的水平井热，已证明了这一事实。然而，相关的、后续的水平井开发油气田的技术系列却尚未配套成型，在油气田开发的理论和实践上都面临着需要更新观念，制订新的开发格局，采用新的工艺手段的问题。需要以系統工程观点统筹规划水平井技术出现后的储层研究，可采储量的评估，打开油藏的二维及三维方案，完井、测井、试井、修井、增产、采油技术和装备和提高采收率方法等的革新以及所引起的连锁变化。

水平井技术的出现，进一步改善了油藏勘探和开发质量，使油藏的储层描述及油藏的特征鉴定能建立在更多信息源的可靠的基础上，例如检波器在地表的地震勘探，已发展到检波器在垂直井内的垂直地震剖面（VSP）测量，现在又进展到检波器置入水平井段的“水平地震”（HORSEIS）系统。

技术的发展是无止境的，尽管有些时候，钻成水平井只需将现成钻井工艺精心设计和运用就可奏效；如若要使这一技术臻于得心应手的使用境地，仍然需要仰仗各种新技术途径的介入。

例如，顶部驱动及聚晶金刚石复合片（PDC）钻头工艺在钻水平井时基本上已经掌握实用，但导向马达，可调节的井眼稳定器，紧靠钻头的MWD随钻测量技术，专用的泥浆调配技术，井眼稳定化技术都还需要加深研究和继续革新。

靠钻杆及挠性油管送入的用于水平环境的测井工艺现在已臻实用，在水平井段探寻裂缝方位的图象技术也已经成功。但是LWD随钻测井尚不够成熟则还要加速开发。发展LWD技术以便确定水平井段在油藏构造上的相对位置，也许是水平井技术革新系列中最引人入胜的领域。

完井技术还需要改善，要使水平井都能担负起若干口常规直井的产能，势必要对水平井段进行强化增产作业，要能够完善地封隔和选择性开采预定层系。所以需要能在水平段套管固井时可以消除窜槽的胶乳基水泥浆。

在油藏监测和管理上也面临技术挑战。如生产测试，新仪器设计和测试结果的解释，都需要克服水平井眼中各相重力分异的问题。水平井的试井方法更必需全力开拓。

水平井技术毕竟是一个新事物，技术的发展和完善是多方面的，这里不可能缕述。

回顾水平井技术的发展历程，从1891年第一个水平井技术专利问世以来，经过近一个世纪的努力到1989年全世界已完成的水平井累计约1000口，仅1989年一年就钻成130口；1990年钻成300口，预期到1995年将完成2000口左右；到2000年预期每年钻成水平井将以千计，本世纪内水平井总数将剧增至15000口以上。美国1990年钻成水平井数占总钻井数的5%以上，陆上水平井数比例增大，预期到2000年水平井数将占钻井总数的33%左右。北海地区和印尼海域的水平井加速发展。这些都激励我们需要尽快掌握和发展这一新技术。

我国60年代曾在四川地区钻成一口水平井，但完井工艺未及时跟上而功亏一篑；1989年南海东部流花11-1油田钻成了第一口海上水平井，使边际油田开始具有可采的经济价值；1990年在总公司领导的及时决策和规划下加速准备，1991年初，胜利油田已

钻成了陆上水平油井，并显示了可喜的经济效益，华北、新疆、大庆、辽河等油田也已钻成或正在钻水平井；研究部门及院校也正在从事水平井技术的研究和开发，这都表明水平井技术在我国将蓬勃发展。

在总公司开发生产局的支持下，为配合水平井开发技术的发展和应用，情报研究所在钻采情报协作组等的协同下，组织各方面专家教授及技术干部，拟在今明两年内，对水平井技术系列进行专题调研，分册出版；供领导及有关人员参考。

目 录

一、前言	(1)
二、水平井试井分析的物理模式与数学模型	(2)
三、井筒及油层参数对水平井压力响应的影响	(8)
四、均质各向异性油藏水平井常规试井分析方法	(13)
五、均质各向异性油藏水平井现代试井分析方法	(23)
六、双重介质油藏水平井试井分析	(31)
七、应用实例	(36)
八、结论	(41)
参考文献	(43)

一、前 言

不稳定试井技术是进行油藏评价、提供油田开发参数、判断增产增注措施效果的重要方法。迄今、对直井来说,已有一套在计算机辅助下进行试井分析的应用软件,包括均质、双重介质等多种油藏模型,能快速准确地确定储层渗透率、油层压力、井筒储存系数及表皮因子等参数。水平井钻井在美国始自30~40年代,1980年以后钻水平井700多口,仅1988年就钻水平井200口。随着水平井钻井的发展,必然提出利用水平井压力响应数据进行油藏评价,确定油藏参数等试井技术问题。国外主要从1985年以后陆续发表水平井试井分析的论文二十多篇,分析了地层中微可压缩液体向水平井的流动场,建立液体向水平井流动的基本物理模式与数学模型,分析不同阶段的渗流特征,提出压力响应的分析方法。

在国内,南海东部石油公司利用流花11-1油田第一口水平井的实测资料,在国外研究的基础上,研制出一套进行试井分析的程序。目前,南海东部石油公司与石油大学合作,进行均质与双重介质油藏水平井试井分析软件包的研究工作。

本文将结合国内外水平井试井分析研究现状进行系统的介绍,以满足水平井开发日益增长的需要。

二、水平井试井分析的物理 模式与数学模型

国外文献及油田实践认为，在以下储层采用水平井开采能提高油井产能：1. 天然裂缝性油藏；2. 存在气顶和底水的油藏；3. 低渗、薄油层；4. 具有较高垂向渗透率油藏。

为了进行试井分析，必须对储层建立简化的物理模式，Daviau^[2]，Goode^[1]，Kuchuk^[12]及 Ozkan^[5]提出的三种典型模式都是在以下假设条件下：

1. 压缩系数和粘度不变的微可压缩液体；
2. 水平井段长度为 L ，位于厚度 h 的油层中任意位置 z_w ；
3. 水平井段平行于油藏的顶部和底部边界；
4. 水平渗透率 K_h 与垂向渗透率 K_v 不等，或油层为各向异性 ($K_x \neq K_y \neq K_z$) ；
5. 忽略重力影响；
6. 油层在水平方向上可为无限大或侧面有界；
7. 水平井段为无限传导性（水平段没有压降）或水平井段为均匀流（单位长度井段的流量为常数）。

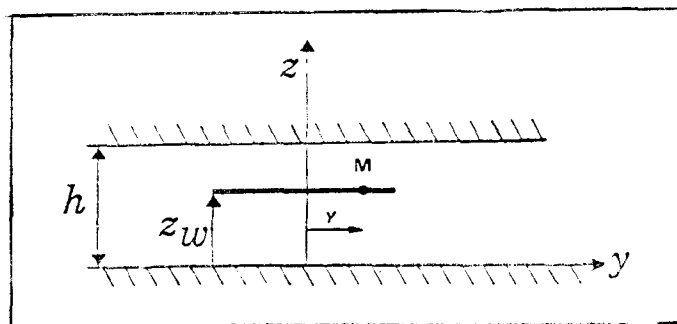


图 1 水平井的 Daviau 模式

这三种典型的物理模式与数学模型分别为：

1, 不渗透边界模式：指顶部盖层及底层均为不渗透层的储层，根据储层水平延伸状况，又可分为下述两类模式。

(1) Daviau模式：由Daviau^[2]于1985年提出，主要特点是储层在水平方向无限大，并将油层简化为各向同性，如图1所示。Daviau分析了向井流的渗流特征，将渗流场分为近井的早期径向流、和远离井的晚期拟径向流，如图2所示。

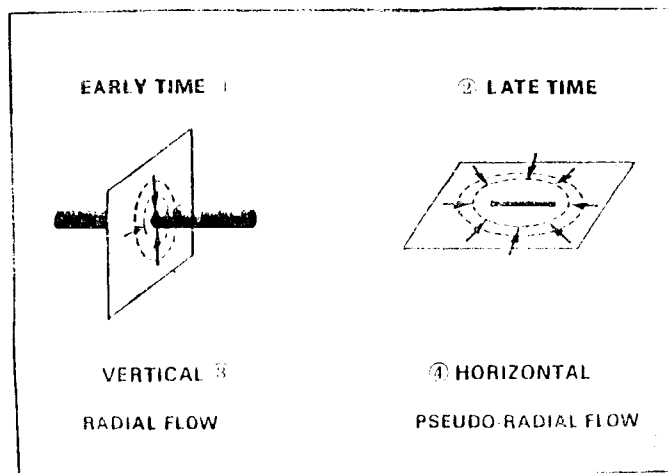


图2 Daviau水平井渗流的早期及晚期型式

①早期；②晚期；③垂向径向流；④水平拟径向流

(2) Goode模式：与Daviau模式区别之处是认为储层各向异性 ($K_x \neq K_y \neq K_z$)，半无限延伸，即储层两侧面不渗透，如图3所示。

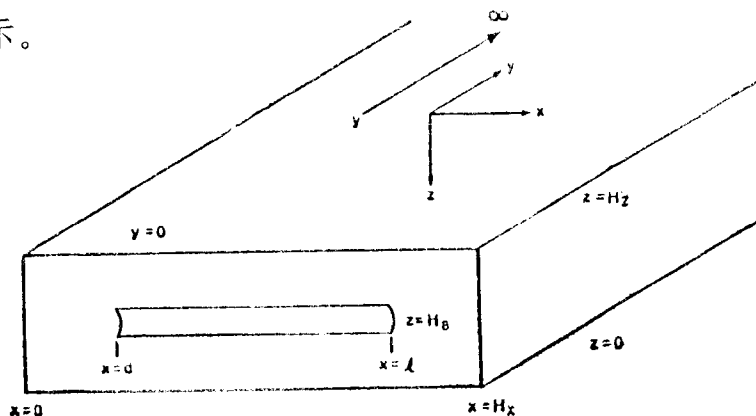
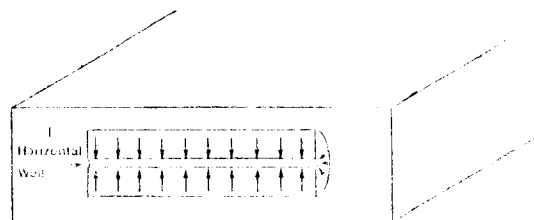


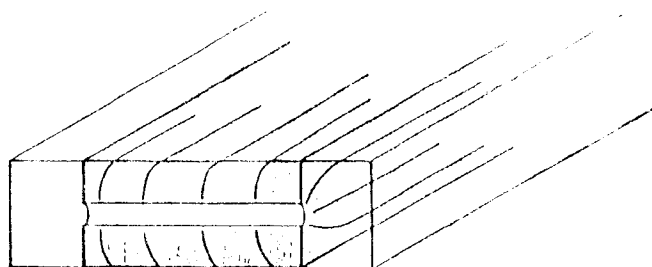
图3 水平井的 Goode 模式

Goode^[1]分析了向井流的渗流状况，将渗流场分为四个时期：

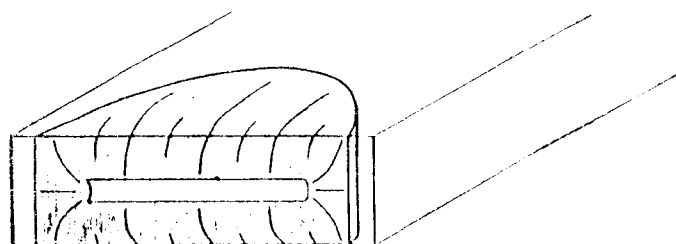
(1) 早期径向流



(2) 中期线性流



(3) 中晚期径向流



(4) 晚期线性流

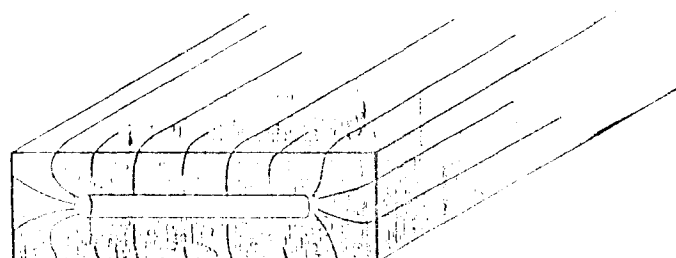


图 4 Goode水平井渗流的分期型式

① 水平井

1. 早期径向流; 2. 中期线性流; 3. 中晚期径向流; 及4. 晚期线性流, 如图4所示。

Goode并建立了各向异性地层中的渗流方程及水平井开采的定解条件:

数学模型:

$$\left[\frac{\phi \mu c}{k_y} \right] \frac{\partial P}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) + \frac{k_z}{k_y} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) + \frac{k_x}{k_y} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

定解条件:

$$(1) P = P_i \quad t = 0 \quad \text{任意 } x, y, z \text{ 处}$$

$$(2) P = P_i \quad y \rightarrow \infty \quad \text{任意 } x, z \text{ 及 } t$$

$$\lim_{y \rightarrow 0} \int_a^b \int_d^E \left[\frac{\partial P}{\partial y} \right] dx dz = \begin{cases} 0 & 0 \leq z \leq a & 0 \leq x \leq d \\ -\frac{\alpha \mu}{2k_y} & a \leq z \leq b \\ 0 & b < z \leq H_z \end{cases} \begin{cases} d \leq x \leq 1 \\ 1 \leq x \leq H_x \end{cases} \quad t > t_c$$

式中设水平井为宽 $(b-a)$ 、长 $(1-d)$ 的柱源, 压降过程中液流沿井筒长度为均匀流 (存在压降)

(3) 上下盖层无液流通过

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad \text{在 } Z=0 \text{ 及 } Z=H_z \text{ 处}$$

(4) 油层侧面无液流通过

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad \text{在 } X=0 \text{ 及 } X=H_x \text{ 处}$$

2. 不渗透/恒压混合边界模式: Kuchuk^[12]于1988年提出, 主要考虑储层中存在气顶或活跃底水, 其中一个边界是不渗透的, 另一个边界保持恒压, 如图5所示, 盖层为恒压边界, 相当于储层存在气顶。如果不存在气顶, 底部存在水层, 这一模式也适用。

引入无因次变量

$$P_D = \frac{\sqrt{K_h K_v} L_w}{q \mu} [P_i - P_w(t)]$$

$$t_D = \frac{K_h t}{\phi \mu c_i L_w^2}$$

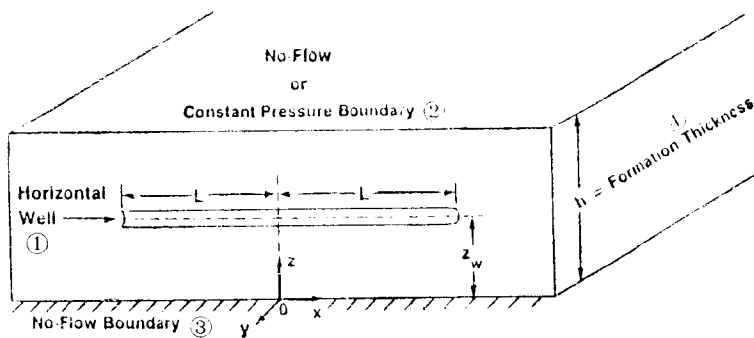


图 5 水平井的 Kuchuk 模式

①水平井；②无液流或恒压边界；③无液流边界；④地层厚度

$$h_D = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \frac{h}{L_w}$$

$$Z_{WD} = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \frac{Z_w}{L_w}$$

$$\gamma_{WD} = \frac{\gamma_w}{2L_w} \left(1 + \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \right)$$

如若

$$K_h = K_x = K_y$$

$$K_v = K_z$$

那么，各向异性储层的渗流方程可以简化为均质储层的一般渗流方程，即

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}$$

式中表示无因次量纲的角码D已省略。

相应的边界条件如下：

$$Z=h \quad \frac{\partial p}{\partial Z} = -\lambda p \quad \begin{array}{ll} \text{封闭边界} & \lambda=0 \\ \text{恒压边界} & \lambda \rightarrow \infty \end{array}$$

$$Z=0 \quad \lambda=0$$

(i) $p=0$, 当 $t=0$ 对任何 x, y 和 z 的组合,

(ii) $p=0$, 如 $y \rightarrow \infty$ 对任何 x, z 和 t 的组合,

$$(iii) \lim_{y \rightarrow 0} \frac{(z_b - z_a)}{\pi} \frac{\partial p}{\partial y} = \begin{cases} 0 & 0 \leq z < z_a \\ 1 & z_a \leq z \leq z_b \\ 0 & z_b < z \leq h \end{cases} \quad \begin{array}{l} 0 \leq x \leq 1 \\ 1 < x < \infty \end{array}$$

$$(iv) \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad z=0$$

$$(v) \quad \frac{\partial p}{\partial z} = -\lambda p \quad z=h$$

$$(vi) \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad x=0 \text{ 及 } x \rightarrow \infty .$$

Kuchuk将渗流期分为：(1) 早期径向流；(2) 中期线性流；
(3) 稳态流动期。

3, 恒压边界模式：系指储层既存在气顶又存在底水的油藏模式。

这三种不同外边界条件的物理模式中, 储层可以是均质油藏, 也可以是双重介质油藏。

三、井筒及油层参数对水平井压力响应的影响

1985年 Daviau 就井筒及油层参数对水平井压力响应的影响进行了研究, 这些影响因素中包括水平井长度 L ; 测压点的位置 Y ; 水平井距底部边界距离 Z_w ; 井筒储存系数 C_D ; 封闭及恒压外边界效应等。

1. 水平井段长度的影响

如图6所示, 图中 $L_{D3} = \frac{L}{h}$, 为无因次水平井段长;

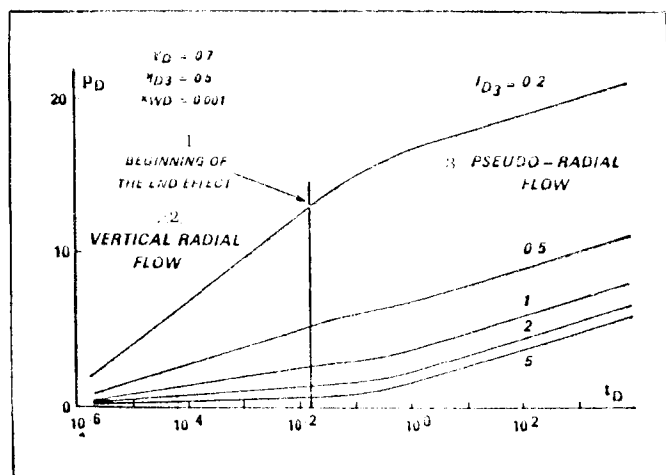


图6 水平井段长度对压力响应的影响

①终端效应开始; ②垂向径向流; ③拟径向流

$y_D = \frac{Y}{L}$, 为测压点无因次 M 的坐标; $e_{D3} = \frac{Z_w}{h}$, 为底部边界的无因

次距离; $x_{WD} = \frac{r_w}{L}$, 为无因次井半径。图6中固定 $y_D = 0.7$, $e_{D3} = 0.5$

(相当于水平井在储层中部) 及 $x_{wD}=0.001$ 时, 取不同水平井段长度所做的理论压力响应曲线。水平井段长度不同, 则早期径向流段具有不同的斜率, 但对拟径向流段影响不大, 基本上是一组平行的直线。从早期径向流到拟径向流的转变时间大体相同。

2. 测压点位置的影响

图7表示图1中的M点位置不同时对水平井的压力响应, $y_D=1$ 表示测压点M在水平井的端点, 除去此点外, 当 $y_D=0\sim 0.95$ 时, 各早期径向流段基本重合, 拟径向流段仍为一组平行的直线。

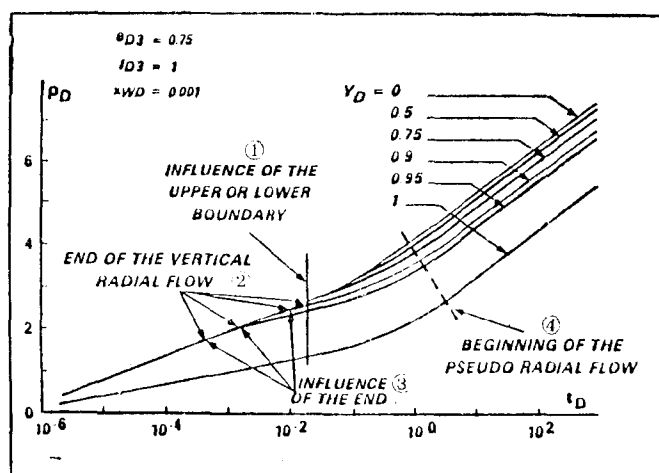


图7 测压点位置对压力响应的影响

①上下边界影响; ②垂向的径向流终止; ③终端影响; ④拟径向流开始

3. 水平井段与油藏底部层面距离 Z_w 的影响

如图8所示, 不同 $e_{D3} = \frac{Z_w}{h}$ 影响下的压力响应曲线, $e_{D3}=0.995$

表示水平井已接近储层顶部, $e_{D3}=0.5$ 表示水平井位于油层中部, 不同的 Z_w 值主要影响早期径向流, 而在 $e_{D3}=0.5\sim 0.9$ 之间时, 对早期径向流不产生影响, 压力响应直线重合, 但拟径向流段压力响应线则为一组平行的直线。

4. 井筒储存系数 C_D 及表皮因子 S 的影响

如图 9 所示, $C_D = 0$ 时, 早期径向流的半对数压力响应为直

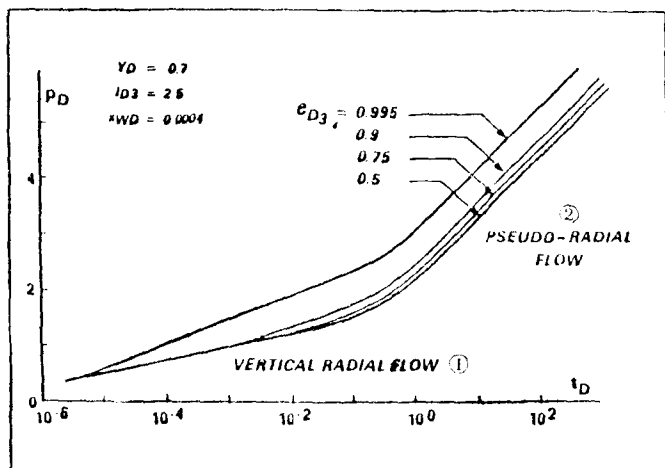


图 8 水平井位置 Z_w 对压力响应的影响

①垂向径向流；②拟径向流

线；当 $C_D = 500$ 及 5000 时, 早期半对数压力响应受到明显的影响。表皮因子 $S = 0$ 及 $S = 5$ 都干扰了早期压力响应曲线。晚期拟径向流段则不受 C_D 及 S 的影响。

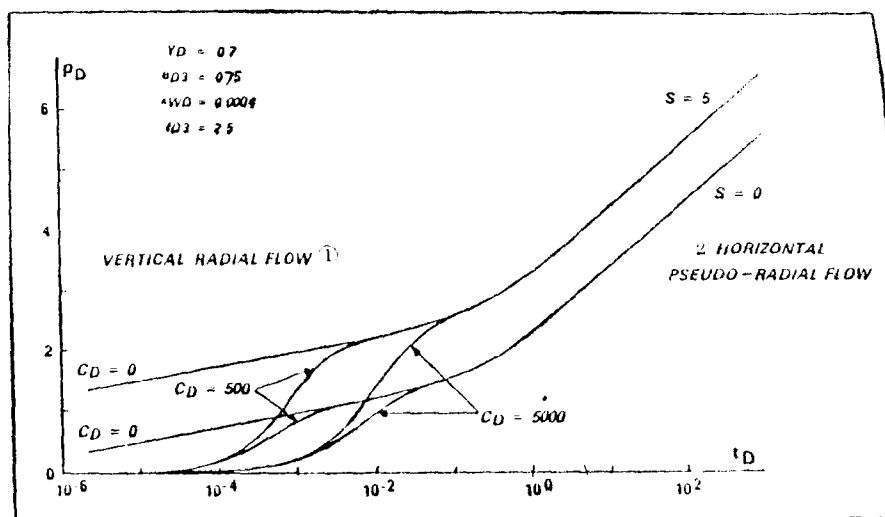


图 9 井筒效应 C_D 及 S 对压力响应的影响

①垂向径向流；②水平拟径向流

5. 封闭外边界的影响

图10所示为油藏封闭外边界的影响。当无限大油藏时，拟径向流半对数压力响应为直线；存在封闭外边界时，压力响应曲线上翘。

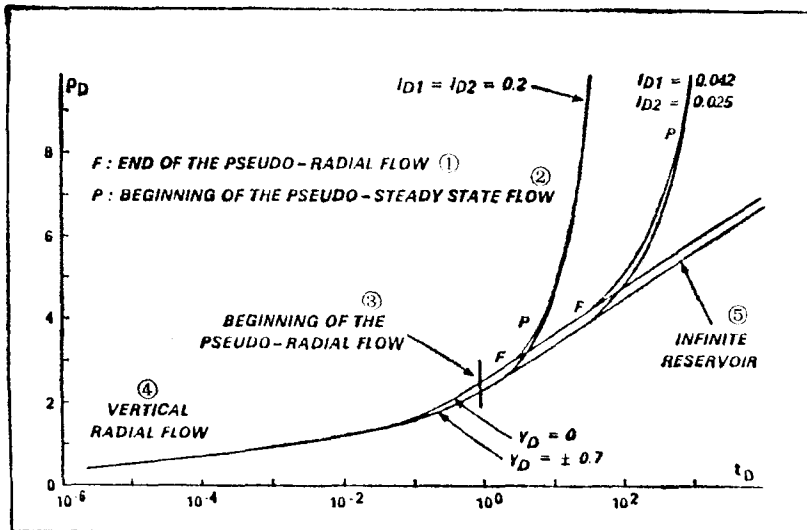


图 10 封闭外边界对压力响应的影响

- ①拟径向流终止；②拟稳态流开始；③拟径向流开始；
④垂向径向流；⑤无限大油藏

$$L_{D1} = L/x_e \quad L_{D2} = L/y_e \quad x_e, y_e \text{ 为油藏外边界坐标距离}$$

6. 恒压外边界的影响

图11所示为油藏水平外边界为恒压（边水）时的压力响应曲线，曲线末期变平缓。

小结

分析上述图形，可以看出水平井段长度、井筒效应、测压点位置都对早期径向流存在明显影响；而压力响应的早期径向流段又是唯一确定垂向渗透率的数据。因而获得不失真的早期径向流压力响应数据，并将各种影响因素计入的分析方法应是水平井试井分析的研究重点。晚期径向流的压力曲线除去外边界效应外，基本上不受井筒效应等因素的影响，能提供比较准确的储层水平

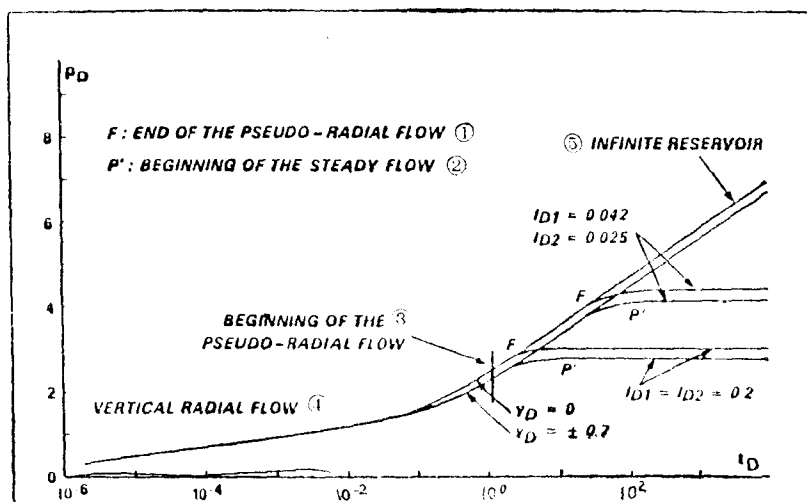


图 11 恒压外边界对压力响应的影响

- ① 拟径向流终止；② 稳态流开始；③ 拟径向流开始；
④ 垂向径向流；⑤ 无限大油藏

渗透率。因此，对小断块油藏，或水平井距边水较近时，必须注意边界对拟径向流压力响应的影响。

测压点位置的影响必须引起重视，因为现在压力计还只能下入直井段进行测压。