

水平井开采 技术译文集



中 册

石油工业出版社

53

水平井开采技术译文集

中 册

罗英俊等译 崔耀南等校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书精选了近年来有关水平井开发油气田的最新技术论文。上册的主要内容是水平井技术综述、水平井与现有直井网的最优化井网、水平井动态预测及其压力分析。中册的主要内容是水平井采油工艺技术、热采技术和增产工艺。下册是上述内容的最新补充。本书的特点是一篇文章对应阐述的一个问题，它具有广泛的可读性和实用性，它是现场开发、采油工程技术人员以及管理设计人员的技术参考书，也可作为大专院校师生学习新技术、新工艺的参考书。

水平井开采技术译文集

中 册

罗英俊等译 崔耀南等校

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京顺义燕华印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米16开本25³/₄ 印张 648 千字 印1—2000

1991年9月北京第1版 1991年9月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0539-5/TE·515

定价：7.95元

目 录

第五部分 水平井采油工艺

水平井的产能	(1)
利用斜井和水平井提高油井产能	(14)
水平井最佳采油速度	(34)
水平泄流井在EMPIRE ABO单元的应用	(38)
非均质油藏水平井采油技术	(47)
用水平井提高CO ₂ 驱油效率的室内研究	(56)
定向井气举采油	(63)
斜井的砾石充填设计	(69)
加利福尼亚近海油田用一个单滤管预制砾石衬管对水平井和大斜度裸眼井进行 砾石充填完井	(80)
改善斜井冲砂效果的研究	(94)
挠性油管在水平井中的应用	(99)

第六部分 水平井热采工艺

水平井蒸汽驱的三维热力学模拟	(111)
水平井注蒸汽开采稠油的模拟	(124)
水平井热力采油的实验室研究	(136)
在竖井和坑道中实验水平井技术的地下试验设施	(149)
应用坑道和水平井开采重油的研究	(163)
克恩河水平井蒸汽驱先导试验	(169)
受蒸汽加热的重油向平行水平井中的重力泄流	(185)
水平井的蒸汽辅助重力泄液	(195)
稠油开采方法及设备	(204)
水平井蒸汽驱油的方法评价	(211)

第七部分 水平井的增产措施

水平井的动态和压裂处理	(227)
改善斜井垂向水力压裂效果的方法	(237)
斜井压裂	(239)
斜井压裂设计	(252)
水平井的压裂	(264)
水平井的多裂缝同时压裂作业	(278)
天然裂缝油藏水平井水力压裂：多次压裂设计举例研究	(294)

从水平井诱发复合水力压裂裂缝	(306)
水平井基岩处理方法	(322)
从水平井诱发人工裂缝的几何形状的实验研究	(333)
2000ft水平井多次压裂后生产和增产情况分析	(349)
对天然裂缝油层中水平井水力压裂的认识	(361)
下套管水平井的压裂工具选择	(376)
在水平管中输送水力压裂砂浆	(391)

第五部分 水平井采油工艺

水平井的产能

D. K. Babu A. S. Odeh 林长海 译

摘 要

本文将提出水平井拟稳定态流(即产能)的计算方程。这个方程容易使用,在形式上与已知的直井产能方程相同。它是从一个相当复杂的普通解中导出的。用时需要首先确定两个参数。第一个参数是说明渗透率各向异性、井位和泄油体积相对尺寸的影响作用的几何因子;第二个参数是限制流入,它说明生产井长度对表皮因子的影响作用。本文将给出计算这两个参数的简单方程。用方程来研究井的长度、井位、井的穿透深度、水平及垂直渗透率和泄油体积的长度对井产能的影响。可以推论,虽然每个变量都有比较大的影响,但井长和穿透深度的影响最大。

一、引 言

目前,水平钻井提高产能的技术已引起世界范围内的广泛兴趣。由于水平井具有较大的泄流面积,在相同的泄油体积下,水平井产能是直井产能的几倍。但是,钻水平井要比钻直井成本高。所以,为在经济上确定钻水平井的可行性,工程上需要一个可靠的方法来计算所预期的产能。同时,还有一些钻水平井的其它原因,即水平井可连通地层内的天然裂缝系统,并且更有效地泄流,本文不作讨论。

描述水平井流动状态并保持物理特性的偏微分方程的解相当复杂。为此,往往引入一些简化假设,诸如泄油体积在一维或二维方向上无限地延伸和有限范围上的边界压力恒定等。虽然有这些简化假设,但有些解具有相当复杂的结构,不适于常规应用。近来,几位研究者^[1,2,3]根据不同的假设,发表了近似计算水平井产能的公式。在本文中,对于有限大储集层来说,我们将提出一个偏微分方程的解。我们把复杂的解简化为易使用的产能计算方程。这个方程在形式上与已知的一个直井方程相同。在我们的处理中,我们只要求把泄油体积近似为“箱形”的。另外,泄油体积可以是任何尺寸的, x 、 y 和 z 方向的渗透率可以相同或不同,井可以是任何长度的,井位于泄油体积的任何部位。因此,我们的方程相当通用。

因为我们的简单方程是推导自复杂的表达式,故不够精确。但是,在大多数情况下,如果不是所有的感兴趣情况,井的渗透率小于5%,计算产能的误差小于3%。当渗透率降低时,这个误差将会增加到约6%。我们认为它相当适合于工程计算。

本文我们将通过实例来说明方程的应用,并表明计算水平井和直井的产能比。我们还将讨论有些临界参数对水平井产能的影响,并说明这些影响的图解。

二、理论分析

1. 物理模型

由图1可知,物理模型是由一口半径为 r_w 、长为 L 的井组成。这口井钻在箱形泄油体积上,井的方向与 y 方向平行。泄油体积为:厚度为 h 、长度(x 方向)为 a 和宽度(y 方向)为 b 。井的长度 $L \leq b$,在 y_1 和 y_2 之间伸展。它的 x 和 z 坐标分别由 x_0 和 z_0 示出。它以恒定产量 q (流量均布型)①生产。 x 、 y 和 z 方向的渗透率分别是 k_x 、 k_y 和 k_z 。孔隙度 ϕ 为常数,流体轻微可压缩。所有泄油体积边界是封闭的。在开始开采之前,即 $t=0$ 时,泄油体积内的压力是均匀的,并等于 p_i 。在时间 $t=0^+$ 时,我们开始以产量 q 从井中采出一些流体。我们想找到当 $t>0$ 时,压力降 $\Delta p = p_i - p$ 与时间和空间的函数关系。

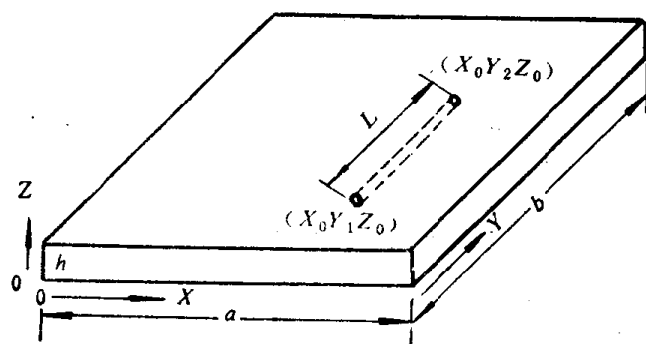


图 1 物理模型

2. 数学表示

在数学上,这个问题可通过求出下列偏微分方程的一个解来表示:

$$k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \phi \mu c_t \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

可用上述确定的边界条件和初始条件求解方程1。可用分离变量法和傅里叶级数导出解,并由附录A的方程($A_1 \sim A_3$)给出。

3. 数学处理和解的确认

附录A给出的解包含具有单重、双重及三重和的无穷级数项,对于计算目标来说,它的收敛速度太慢了。如附A和B●所示,通过利用几个具有闭型表达式的归约公式和充分利用泄油体积的纵横尺寸比的级数必然重新排列,可以克服收敛速度极端慢的问题。这些方法最终导致较快的收敛和,可通过利用简单计算机代码的简明方式计算这个收敛和。

只要水平井和直井的泄油体积相似,并且一般公认水平井平行 y 方向,而直井平行 z 方向,那么一口完全穿透的水平井($L=b$)动态与一口完全穿透的直井动态应该相同。对于非均质和各向异性地层的直井来说,通过比较由程序解计算的 Δp 值和由熟知的 E_i 函数解计算出的 Δp 值,使解(方程 A_3)的瞬时部分生效^[4,5]。吻合得很好,两个值的误差小于0.1%。作为另外一个证据,也计算了相当短($L \ll b$)的、产生瞬时球面流的生产井的第二种限制情况。与Erfc解进行了很好的比较。

●在附录A中讨论了流量均布型边界条件。

●本文包括两个附录A和B。附录A大概说明了数学方法。附录B作了详细说明,由于篇幅所限,本文没有附上这两个附录。但是它们都发表在SPE18334上,这篇文章是SPE办公室要求的。

对于非稳定流和拟稳态流来说, 程序计算 $\Delta p = p_i - p$ 。应用物质平衡方程的配合程序计算 $\Delta p = p_i - \bar{p}_R$ 与时间的函数关系。式中 $\bar{p}_R$ 是泄油体积内的平均压力。 $r = r_w$ 时计算的 Δp 与 $\Delta \bar{p}$ 的差等于 $(\bar{p}_R - p_{wf})$ 。对于相同产量和相似的泄油体积, 对比由程序计算出的 $(\bar{p}_R - p_{wf})$ 值和完全穿透的直井的一些值, 又一次吻合的很好。

4. 拟稳态流方程 (即产能方程)

我们的目的是为工程提供一个容易使用的水平井产能计算方程。一般把这个方程称作流入方程, 它给出了拟稳定态流下的流量与压降的关系。我们选择保持这个最为熟悉的直井流动方程的形式。因此, 由下式代表水平井的流入方程。

$$q = \frac{7.08 \times 10^{-3} b \sqrt{k_x k_z} (\bar{p}_R - p_{wf})}{B\mu \left[\ln \frac{A^{1/2}}{r_w} + \ln C_H - 0.75 + s_R \right]} \quad (2)$$

式中 q ——流量, STB/d;

b ——泄油体积的宽度, ft;

k_x, k_z ——分别为 x, z 方向的渗透率, mD;

$\bar{p}_R$ ——泄油体积内的平均压力, psi;

B ——地层体积系数, RB/STB;

μ ——粘度, cP;

C_H ——几何因子, 无量纲;

r_w ——井筒半径, ft;

s_R ——当井的长度 $L < b$ 时, 由于局部穿透的表皮因子。

方程2的条件是假设地层无损害或未进行过增产处理。否则, s_R 应变为 $(s_R + s_i)$, 式中 s_i 是由于井筒周围地层渗透率变化的表皮因子。

对于各向异性储层 ($k_x \neq k_z$), 在外围井周围的井筒压力是变化的。为方 便地应用方程2, 我们需要一个代表值, 即需要井筒压力 p_{wf} 的平均值 (常数)。经证实, 在获此值方面, 有两个平均的方法较为有效。一种情况是平均外围井的最高压力和最低压力即得平均压力。另一种情况是考虑几何系数 C_H 平方的平均值。附录B给出了详细的平均方法。在本文的剩余部分中, 应当清楚, 用得是圆周平均值 p_{wf} 。

采油指数 J 的单位是 STB/(d · psi)。由方程2得:

$$J = \frac{7.08 \times 10^{-3} b \sqrt{k_x k_z}}{B\mu \left[\ln \left(\frac{C_H A^{1/2}}{r_w} \right) - 0.75 + s_R \right]} \quad (3)$$

方程2和3中包含有两个参数 C_H 和 s_R 。这两个参数都是标度尺寸纵横比 $\left[\frac{a \sqrt{k_z}}{h \sqrt{k_x}} \right]$ 、 k_x 、 k_y 、 k_z 和井位的函数。另外, s_R 也是一个依赖于井的长度 (L) 的函数。当 $L = b$ (完全穿透情况) 时 $s_R = 0$ 。

5. 计算 $\ln C_H$

在附录A中, 对于各向同性和各向异性多孔介质, 从原始解 (方程 $A_1 \sim A_3$) 导出 $\ln C_H$ 和 s_R 的解析表达式 (方程 $A_{12} \sim A_{13}$), 这些表达式不适于通常计算。如附录A和B所示, 我们把复杂的公式简化为如下表达式:

$$\ln C_H = 6.28 \frac{a}{h} \sqrt{\frac{k_z}{k_x}} \left[\frac{1}{3} - \frac{x_0}{a} + \left(\frac{x_0}{a} \right)^2 \right] - \ln \left[\sin \frac{180^\circ z_0}{h} \right]$$

$$-0.51\ln\left[\frac{a}{h}\sqrt{\frac{k_z}{k_x}}\right]-1.088 \quad (4)$$

式中 x_0 和 z_0 是井筒中心线的纵坐标, 见图1。

方程4是方程A38或B19。它要求 $a \geq 0.75h\sqrt{k_z/k_x}$ 和井到边界具有最小距离: $[\min(x_0, a-x_0) \geq 0.75h \cdot \sqrt{k_z/k_x}]$ 。实际上, 因为 $h \ll a$, 所以一般能够满足这些关系式。由方程4计算的 $\ln C_H$ 误差小于1%。当 $(a/h)\sqrt{k_z/k_x}$ 即标度尺寸纵横比增加时, 误差趋于0。表1列出了一些值的比较结果。如下所述, 解析表达式是有效的。在拟稳定态流条件下, 我们由原始解(方程A5~A13及其简化式)求得了 $(p_R - p_{wf})$ 值。在所有情况下, 即井完全穿透 $s_R = 0$, 把这些值代入方程2, 并一起输入其它参数, 可计算出 $\ln C_H$ 值。这个值与从精确表达式计算的值相同, 并与方程4给出的近似解析值吻合得很好。

表 1 $\ln C_H$ 精确值与其由方程4计算的值的对比

各种情况的比值 ($(a/h) \sqrt{k_z/k_x}$)	$\ln C_H$ (精确值)	$\ln C_H$ (由方程4计算)
1	-0.5605	-0.5646
5	0.7254	0.7239
10	2.9970	2.9940
20	7.8860	7.8810
50	23.1400	23.1200
100	48.9700	48.9400

6. 计算 s_R

用类似于推导方程4的方法推导适于通常工程计算的 s_R 表达式。

我们考虑了两种重要的实际情况:

$$\frac{a}{\sqrt{k_x}} \geq \frac{0.75b}{\sqrt{k_y}} > \frac{0.75h}{\sqrt{k_z}},$$

和

$$\frac{b}{\sqrt{k_y}} > \frac{1.33a}{\sqrt{k_x}} > \frac{h}{\sqrt{k_z}}$$

假定 a 和 b 的值大于 h , 所以 $\left[\frac{h}{\sqrt{k_z}}\right]$ 总是小于 $\left[\frac{a}{\sqrt{k_x}}\right]$ 和 $\left[\frac{b}{\sqrt{k_y}}\right]$ 。如果不这样做, 精确解表明钻水平井代替直井没有提高产能。

7. 实例1

$$\frac{a}{\sqrt{k_x}} \geq \frac{0.75b}{\sqrt{k_y}} > \frac{0.75h}{\sqrt{k_z}}$$

按照前面的说明, 当 $L=b$ 时 $s_R=0$, 如果 $L < b$, 那么:

$$s_R = PXYZ + PXY' \quad (5)$$

方程5是附录A中的方程A39。

式中 $PXYZ$ 分量取决于穿透程度, 即对于 L/b 的值, PXY' 分量取决于井在 $X-Y$ 平面上的位置。表皮因子分量取决于微小的 z 值, 故可以忽略。

$PXYZ$ 分量, 方程A35:

$$PXYZ = \left[\frac{b}{L} - 1\right] \left[\ln \frac{h}{r_w} + 0.25 \ln \frac{k_z}{k_x} - 1.05\right] \quad (6)$$

PXY' 分量, 方程A40:

$$PXY' = \frac{2b^2}{Lh} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \left[F\left(\frac{L}{2b}\right) + 0.5 \left[F\left(\frac{4y_0+L}{2b}\right) - F\left(\frac{4y_0-L}{2b}\right) \right] \right] \quad (7)$$

式中在 $y_0 = 0.5 (y_1 + y_2)$ 即水平井长度的中点时求出的压力计算式。

和

$$F\left(\frac{L}{2b}\right) = -\left(\frac{L}{2b}\right) \left[0.145 + \ln\left(\frac{L}{2b}\right) - 0.137\left(\frac{L}{2b}\right)^2 \right] \quad (8)$$

$F\left(\frac{4y_0+L}{2b}\right)$ 和 $F\left(\frac{4y_0-L}{2b}\right)$ 的计算取决于它们的自变量, 即 $\left(\frac{4y_0+L}{2b}\right)$ 和 $\left(\frac{4y_0-L}{2b}\right)$ 。

如果自变量 ≤ 1 , 可用方程8。在这种情况下, 由 $\left(\frac{4y_0-L}{2b}\right)$ 和/或 $\left(\frac{4y_0+L}{2b}\right)$ 代替 $\left(\frac{L}{2b}\right)$ 。另一

方面, 如果自变量 > 1 , 那么, 对于 $\left(\frac{4y_0+L}{2b}\right) > 1.0$ 时, 可以计算 (方程A25):

$$F\left(\frac{4y_0+L}{2b}\right) = \left(2 - \frac{4y_0+L}{2b}\right) \left[0.145 + \ln\left(2 - \frac{4y_0+L}{2b}\right) - 0.137 \left(2 - \frac{4y_0+L}{2b}\right)^2 \right] \quad (9a)$$

对于 $\left(\frac{4y_0-L}{2b}\right) > 1.0$ 时,

$$F\left(\frac{4y_0-L}{2b}\right) = \left(2 - \frac{4y_0-L}{2b}\right) \left[0.145 + \ln\left(2 - \frac{4y_0-L}{2b}\right) - 0.137 \left(2 - \frac{4y_0-L}{2b}\right)^2 \right] \quad (9b)$$

方程7的 (PXY') 表达式对于绝大多数实际问题比较有效。误差取决于井位, 若为中心井 ($x_0 = a/2$), 则误差最小。(PXY') 相对误差的上界由下式给出:

$$\left[\exp(-2\pi x_0 \sqrt{k_y/b\sqrt{k_x}}) + \exp(-2\pi(a-x_0) \sqrt{k_y/b\sqrt{k_x}}) \right]$$

这是一个相当保守的计算, 实际误差要小得多。

在任何情况下, 对于表皮因子 s_R 的整体计算来说, 误差的影响可以忽略。详见附录A和B。

8. 实例2

$$\frac{b}{\sqrt{k_y}} > \frac{1.33a}{\sqrt{k_x}} > \frac{h}{\sqrt{k_x}}$$

对于这种情况, 方程A41给出:

$$s_R = PXYZ + PY + PXY \quad (10)$$

PXYZ分量, 方程A35。

如前所述, 方程6给出了PXYZ分量。

PY分量, 方程A23。

$$PY = \frac{6.28b^2 \sqrt{k_x k_z}}{ah} \left[\left(\frac{1}{3} - \frac{y_0}{b} + \frac{y_0^2}{b^2} \right) + \frac{L}{24b} \left(\frac{L}{b} - 3 \right) \right] \quad (11)$$

式中 y_0 是井的中点坐标。

PXY分量, 方程A27和A27a。

对于 $\{\min(x_0, a-x_0) \geq 0.25a,$

$$PXY = \left(\frac{b}{L} - 1\right) \left[\frac{6.28a}{h} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \right] \left[\frac{1}{3} - \frac{x_0}{a} + \frac{x_0^2}{a^2} \right], \quad (12)$$

方程12给出的 (PXY) 表达式是个近似式, 适用于大多数实际情况。采用这个计算式的误差与 $\{\exp(-\pi nL \sqrt{k_x}/2a \sqrt{k_y})\}$ (式中 $n=1$ 或 2) 的值成正比。

在实际情况中, 因为 (L/a) 一般不会太小, 故计算式的误差可以忽略不计, 该近似式满足精度要求。如果 (L/a) 比值相当小, 并且要求高精度, 若能包含在方程 12 中省略掉的无穷级数的1个或2个首项, 就可提高精确度。该近似式过高估算了 PXY 值, 导致过高估算表皮因子 s_R 值和过低估算采油指数。详见附录B (方程B10~B10f)。 PXY 分量的相对误差明显地变小, 与总表皮因子 s_R 的关系不大。附录B中给出了方程5~12的完整推导, 附录A给出了简要的推导。

方程5~12是相当复杂公式的简化表达式。因此, 它们都是近似的。但是, 对于大多数井位不太接近边界的情况, 它的穿透率 >0.25 。对于给定的 q 值, 利用这些 s_R 值, 我们发现 $(\bar{p}_R - p_{wf})$ 计算值的误差小于3%。对于井位靠近边界的情况, 穿透率比较小, 误差将接近6%。在每一情况中, 我们认为在工程应用方面, 可以接受因利用这些 s_R 值而带来的误差。

如下所述, 我们证实了方程 5~12 的适用性。对于一个输入参数组, 我们可利用原始无穷级数解 (它的简化形式具有快速收敛特性) 求得精确的 $(\bar{p}_R - p_{wf})$ 值。并比较这些值和由方程2计算的值。对于这些情况, 用方程4计算 $\ln C_H$, 用方程5~12计算 s_R 。一些 $(\bar{p}_R - p_{wf})$ 值的比较结果示于表2中。

表 2 $(\bar{p}_R - p_{wf})$ 精确值与其近似值的对比

各种情况的比较 [(a/h)√k _y /k _x]	穿 透 率 z (L/b)	X 方 位 (x_0/a)	z 方 位 (z_0/h)	$\bar{p}_R - p_{wf}$ (精确) . psi	$\bar{p}_R - p_{wf}$ (近似) . psi	误 差 z
50	50	0.5 (中心的)	5	22.29	22.59	1.3
20	40	0.25	0.25	28.25	28.83	2.0
4	25	0.25	0.25	45.9	48.60	5.9

三、方程4~12的应用举例

1. 例1

已知数据: 水平井长度为1000ft, 钻在箱形泄油体积上, 泄油体积的长为 4000ft, 宽为 2000ft 和厚为 100ft, 井位于 $y_1=750$ ft 和 $y_2=1750$ ft 之间, 井的 x_0, z_0 坐标分别为3000ft和50ft, x, y 和 z 方向的渗透率分别为200、200和50mD, 井的半径为0.25ft, 计算采油指数。

解:

用方程4计算 $\ln C_H$ 。因为 $\frac{a}{\sqrt{k_x}} > \frac{0.75b}{\sqrt{k_y}}$, 所以用方程5~9计算 s_R 。

因此

$$\begin{aligned} \ln C_H &= 6.28x \frac{4000}{100} \sqrt{\frac{50}{200}} \left[\frac{1}{3} - \frac{3000}{4000} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{3000}{4000} \right)^2 \right] - \ln \left[\sin \left(\frac{180^\circ x 50}{100} \right) \right] \\ &\quad - 0.51 \ln \left(\frac{4000}{100} \sqrt{\frac{50}{200}} \right) - 1.088 = 15.73 \end{aligned}$$

$$s_R (\text{方程5}) = PXYZ + PXY'$$

$$PXYZ (\text{方程6}) = (2-1) \left(\ln \frac{100}{0.25} + 0.25 \ln \frac{200}{50} - 1.05 \right) = 5.29$$

由方程7~9得 PXY' 。我们首先计算这三个函数的自变量，它们是 $\left(\frac{L}{2b}\right)$ 、 $\left(\frac{4Y_0+L}{2b}\right)$ 和 $\left(\frac{4Y_0-L}{2b}\right)$ 。

$$\frac{L}{2b} = \frac{1000}{4000} = 0.25$$

$$y_0 = \frac{750+1750}{2} = 1250.$$

$$\left(\frac{4y_0+L}{2b}\right) = \frac{4 \times 1250 + 1000}{4000} = 1.5$$

$$\left(\frac{4y_0-L}{2b}\right) = 1.0$$

因为 $\left(\frac{4y_0-L}{2b}\right) = 1$ ，所以用方程8计算函数值，又因为 $\left(\frac{4y_0+L}{2b}\right) > 1$ ，用方程9评价函数。

$$F\left(\frac{L}{2b}\right) \equiv F(0.25) = -0.25(0.145$$

$$+ \ln 0.25 - 0.137 \times 0.25^2) = 0.312$$

$$F\left(\frac{4y_0-L}{2b}\right) \equiv F(1.00) = -1(0.145 + \ln 1 - 0.137)$$

$$= -0.008$$

$$F\left(\frac{4y_0+L}{2b}\right) \equiv F(1.50) = (2-1.5)$$

$$(0.145 + \ln(2-1.5)$$

$$- 0.137(2-1.5)^2) = -0.291$$

$$PXY' = \frac{2 \times (2000)^2}{1000 \times 100} \sqrt{\frac{50}{200}} (0.312$$

$$+ 0.5(-0.291 + 0.008)) = 6.82$$

所以

$$s_R = PXYZ + PXY' = 5.29 + 6.82 = 12.1$$

因此，由近似公式求出了 $\ln C_H$ 和 s_R 分别为 15.73 和 12.1。由无穷级数解求得的 $\ln C_H$ 和 s_R 的精确值分别为 15.74 和 12.1。在这种情况下，应用近似公式没有带来误差。

流入方程2变为：

$$q = \frac{7.08 \times 10^{-3} \times 2000 \sqrt{200 \times 50} (\bar{p}_R - p_{wi})}{B\mu \left[\ln \left(\frac{(ah)^{1/2}}{r_w} \right) + 15.73 - 0.75 + 12.1 \right]}$$

式中

$$\ln \left[\frac{C_H A^{1/2}}{r_w} \right] \text{ 写作 } \left[\ln \frac{A^{1/2}}{r_w} + \ln C_H \right]$$

和

$$\ln \frac{A^{1/2}}{r_w} = \ln \frac{(100 \times 4000)^{1/2}}{r_w} = 7.836$$

$$q = \frac{7.08 \times 10^{-3} \times 2000 \times 100 (\Delta p)}{B\mu \times 34.92}$$

采油指数

$$J_H = \frac{q}{\Delta p} = \frac{40.55}{B\mu}$$

让我们比较一下这口井的采油指数和相同泄油体积时的直井的采油指数 $J_v^{[6]}$ 为:

$$J_v = \frac{7.08 \times 10^{-3} \times 100 \times 200}{\mu B \left[\ln \left(\frac{0.565 A^{1/2}}{r_w} \right) - 0.75 \right]}$$

$$A = ab = 4000 \times 2000,$$

故给出

$$J_v = \frac{7.08 \times 10^{-3} \times 20000}{\mu B \times 8.013} = \frac{17.67}{\mu B}$$

因此

$$\frac{J_H}{J_v} = \frac{40.55}{17.67} = 2.4.$$

这意味着水平井的产量为直井的2.4倍。

2. 例2

已知数据: 长1000ft的水平井钻在长2000ft、宽4000ft和厚200ft 的泄油体积上, 这口井位于 $y_1 = 1000\text{ft}$ 和 $y_2 = 2000\text{ft}$ 之间, x_0 和 z_0 的坐标分别为1000ft和150ft, k_x 、 k_y 和 k_z 的值分别为100、100和20mD, 井筒半径为0.25ft, 计算该井比相同泄油体积时直井的采油指数增量。

解:

$$\frac{1.33a}{\sqrt{k_x}} = \frac{2660}{\sqrt{k_x}}, \quad \frac{b}{\sqrt{k_y}} = \frac{4000}{\sqrt{k_y}}$$

因为 $\frac{b}{\sqrt{k_y}} > \frac{1.33a}{\sqrt{k_x}}$, 所以用实例2的方程。

$$\begin{aligned} \ln C_H \text{ (方程4)} &= 6.28 \left[\frac{2000}{200} \sqrt{\frac{20}{100}} \right] \left(\frac{1}{3} - 0.5 + 0.25 \right) \\ &\quad - \ln \left[\left(\sin \frac{180^\circ \times 150}{200} \right) \right] - 0.5 \ln \left(\frac{2000}{200} \sqrt{\frac{20}{100}} \right) - 1.088 \\ &= 0.85 \end{aligned}$$

因此 (方程10):

$$\begin{aligned} s_R &= PXYZ + PY + PXY \\ PXYZ \text{ (方程6)} &= \left(\frac{4000}{1000} - 1 \right) \left[\ln \frac{200}{0.25} + 0.25 \ln \frac{100}{20} - 1.05 \right] \\ &= 18.1 \\ PY \text{ (方程11)} &= \frac{6.28 \times (4000)^2}{200 \times 2000} \frac{\sqrt{20 \times 100}}{100} \\ &\quad \left[\frac{1}{3} - \frac{1500}{4000} + \left(\frac{1500}{4000} \right)^2 + \frac{1000}{24 \times 1000} \left(\frac{1000}{4000} - 3 \right) \right] = 7.9 \end{aligned}$$

$$PXY \text{ (方程12)} = \left(\frac{4000}{1000} - 1 \right) \left(\frac{6.28 \times 2000}{200} \sqrt{\frac{20}{100}} \right) \left[\frac{1}{3} - \frac{1000}{2000} + \left(\frac{1000}{2000} \right)^2 \right] = 7.0$$

所以

$$s_R = 18.1 + 7.9 + 7.0 = 33.0$$

由无穷级数解求出的 s_R 精确值为 30.4。下式给出采油指数

$$J_H = \frac{q}{\Delta p} = \frac{7.08 \times 10^{-3} \sqrt{k_x k_z b}}{B\mu \left(\ln \frac{A^{1/2}}{r_w} + \ln C_H - 0.75 + s_R \right)}$$

$$= \frac{7.08 \times 10^{-3} \sqrt{100 \times 20 \times 4000}}{B\mu \left(\ln \frac{(2000 \times 200)^{1/2}}{r_w} + 0.85 - 0.75 + 33 \right)} = \frac{30.9}{B\mu}$$

如果应用表皮因子的精确值 30.4，求得 J_H 为 33.0，则完全穿透砂岩的直井的采油指数 J_v 为^[6]：

$$J_v = \frac{7.08 \times 10^{-3} \times 100 \times 200}{B\mu \left(\ln \left(\frac{0.565 \times (4000 \times 2000)^{1/2}}{0.25} \right) - 0.75 \right)}$$

$$= \frac{17.7}{B\mu}$$

采油指数的增加倍数是

$$\frac{J_H}{J_v} = \frac{30.9}{17.7} = 1.75$$

四、一些临界参数对水平井产能的影响

1. 井的长度 L 和穿透度 (L/b) 的影响

如果井是完全穿透的，即 $L/b=1$ ，由于限流，所以方程 2 和 3 的表皮因子为 0，采油指数 J 直接随 L 或 b 而变化。另一方面，如果 $(L/b) < 1$ ， J 不仅是 (L/b) 的函数，而且也是 L 和 b 值的独立函数。图 2 说明了这两种情况。对于第一种情况， b 是常数为 2000ft， L 降低；对于第二种情况， L 是常数为 2000ft， b 降低。由图可知， J 随 (L/b) 的变化不同于这两种情况。当 $(L/b) > 0.3$ 时， b 数值大时， J 值也高，当 $(L/b) < 0.3$ 时， J 值收敛。

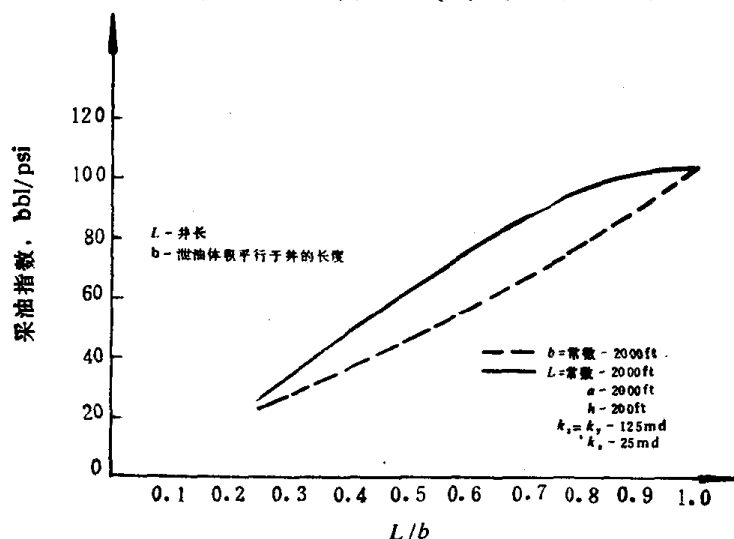


图 2 L/b 对采油指数的影响

2. 垂直渗透率 k_z 的影响

其中有三个参数(方程2和3)影响井的产能,它们是 $\sqrt{k_x k_z}$ 、 $\ln C_H$ 和 s_R 。 $\ln C_H$ 和 s_R 是 k_z 的弱函数。因此,可以说产能近似地随 $\sqrt{k_z}$ 的变化而变化。图3说明这个变化关系。

k_z 降低4倍时,若 $L/b=1$,则 J 降低1.8倍;若 $L/b=0.5$,则 J 降低1.7倍。

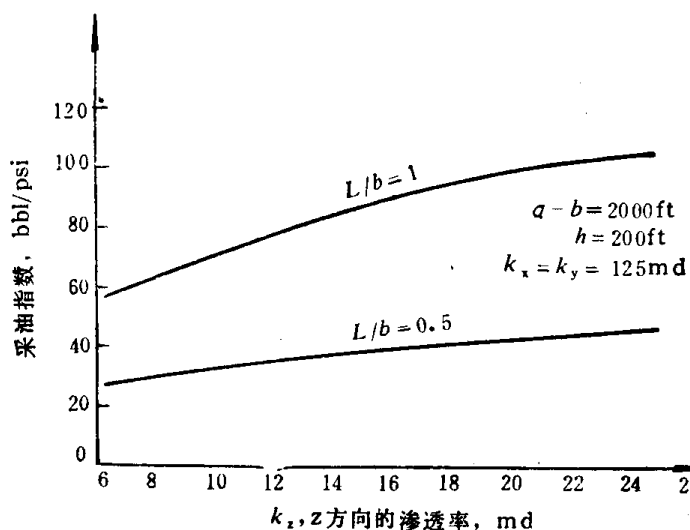


图3 k_z 对采油指数的影响

3. x方向渗透率 k_x 的影响

图4示出了 J 随 k_x 的变化关系。它类似于 J 随 k_z 的变化关系。采油指数近似地与 $\sqrt{k_x}$ 成正比。由图可知, k_x 降低4倍时,若 $L/b=1$, J 降低2.2倍;若 $L/b=0.5$, J 降低1.9倍。

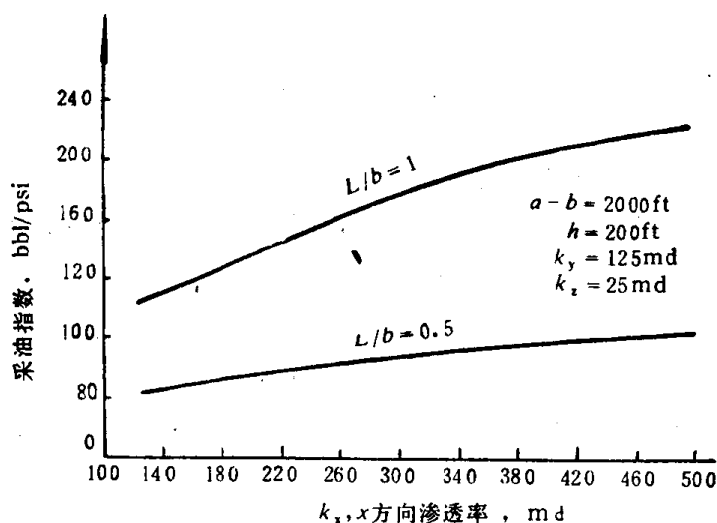


图4 k_x 对采油指数的影响

4. y方向渗透率 k_y 的影响

如果 $L/b=1$, $s_R=0$,则 k_y 对产能无影响。随着 (L/b) 值降低, k_y 的影响作用增大,因为 s_R 变为 k_y 的强函数。图5说明了 J 与 k_y 的依赖关系。它表明在 k_y 降低4倍时,若 $L/b=0.5$,则 J 降低1.8倍,若 $L/b=0.25$,则 J 降低2.8倍。

5. 泄油体积长度 a 的影响

在方程2和3的分母中,其中的一个因子就是泄油面积 A ,它等于 (ah) 。当 $(L/b)=1$, $s_R=0$ 时,则 $\ln(A^{1/2}/r_w)$ 在分母中成为一个重要的分量。但是,因为泄油面积的影响表现为自然对数,所以 J 随泄油面积的变化关系是平缓的。当 (L/b) 降低时, s_R 增高时,它们最终成为一步降低 a 影响的主要因素。由图6可知,当 a 值提高4倍时,若 $L/b=1$,则 J 降低1.9

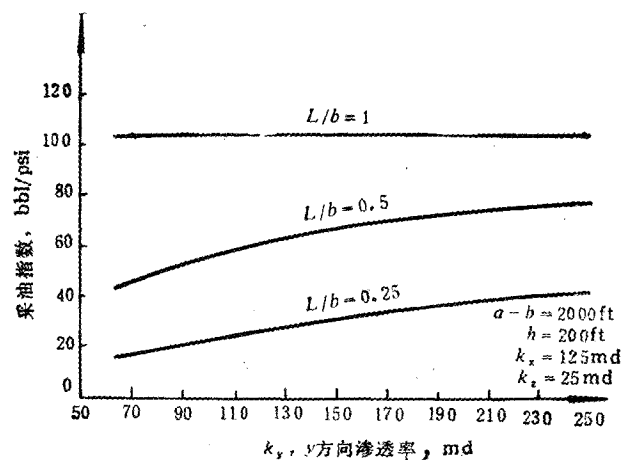


图 5 k_y 对采油指数的影响

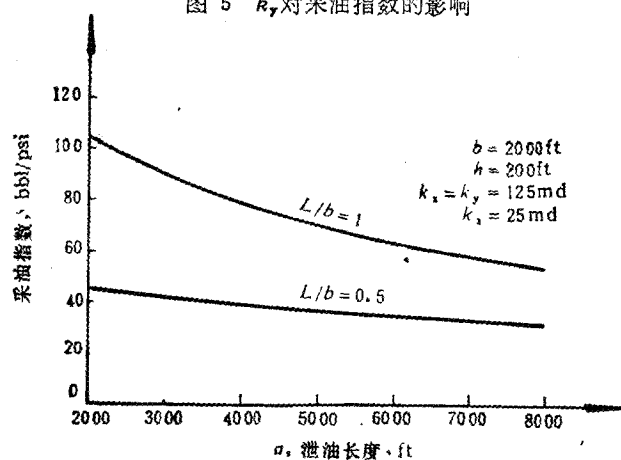


图 6 泄油体积长度对采油指数的影响

倍，若 $L/b=1$ ，则 J 降低 1.4 倍。这个差别是由于当 $L/b=1$ 时， $s_x=0$ ；当 $L/b=0.5$ 时， $s_x>0$ 的结果。

6. 井位的影响

井位通过几何因子 $\ln C_H$ (方程 2 和 3) 影响产能。当 $(L/b)=1$ ，即 $s_x=0$ 时，它的影响最大。如图 7 所示，随着 (L/b) 的降低， J 也有降低的变化。图中示出了 J 随 x 方向的规范化

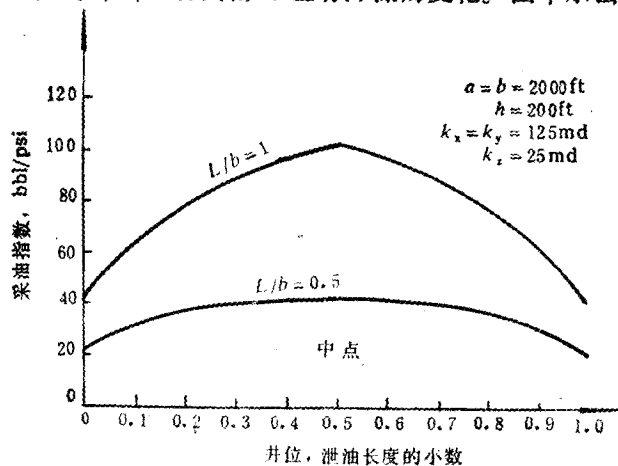


图 7 井位对采油指数的影响

井位的变化关系。 z 方向井位变化的影响比较小, 这里不再说明。砂岩厚度要比泄油面积的长度小几个数量级。所以, 相对于地层厚度来说, 即使井位远离中心, 但相对于泄油体积来说, 井位并不远离中心。

y 方向的井位与 x 方向的井位对产能的影响程度相同。为获得最大的 J 值, 井应位于泄油体积中心。

五、结 论

(1) 水平井拟稳定态流的势能, 即产能可由下式计算:

$$q = \frac{7.08 \times 10^{-3} b \sqrt{k_x k_z} (\bar{p}_R - p_{wi})}{B \mu \left(\ln \frac{A^{1/2}}{r_w} + \ln C_H - 0.75 + S_R \right)}$$

(2) 这个方程是从一个相当复杂的解中提炼出来。在大多数甚至所有的感兴趣情况下, 应用该简化方程的误差小于 3%。

(3) 这个方程是通用的, 它可用于任意泄油体积尺寸、任意渗透率各向异性和任意水平井长度、井位的情况。

(4) C_H 和 S_R 是几个变量的函数。本文给出了计算两个未知数的易于使用的方程。

(5) 有许多变量对水平井产能起影响作用, 但水平井的长度、穿透程度起最大的影响作用。

符 号 说 明

A ——水平井的泄油面积, ah ;	r_w ——井筒半径;
a ——水平井的泄油体积在 x 方向的延伸长度;	S_R ——局部穿透的表皮因子;
B ——地层体积系数, RB/STB ;	t ——时间;
b ——水平井的泄油体积在 y 方向的延伸长度;	x_0 ——井中心的 x 坐标;
C_H ——由方程 4 定义的几何因子;	y_1 ——井开钻点的 y 坐标;
C_t ——总压缩系数;	y_2 ——井底的 y 坐标;
h ——水平井的泄油体积在 z 方向的延伸长度;	$y_0 = \frac{y_1 + y_2}{2}$, 沿井长方向的中点 y 坐标;
J ——采油指数, $STB/(d \cdot psi)$;	y_1 ——井的普通 y 坐标, 管是推导普通公式 A1~A3 的积分变量;
k_x —— x 方向的渗透率;	z_0 ——井中心的 z 坐标;
k_z —— z 方向的渗透率;	(x, y, z) ——油藏中某一点的直角坐标;
L ——水平井的长度 ($=y_2 - y_1$);	$\alpha = 157.952 \phi \mu c_t$;
p ——压力;	ϕ ——孔隙度;
p_i ——油藏原始均匀压力;	μ ——粘度。
$\bar{p}_R$ ——水平井的泄油体积的平均压力;	
p_{wi} ——井底流动压力;	
q ——流量;	