

水平井流量分析

郭大立

(基础学科部)

摘要 本文研究水平井在底水或边水油、气藏中的二维稳定渗流问题,利用势函数的镜像迭加原理,得到了水平井的流量公式,并讨论了油层厚度、渗透率各向异性和供水边缘到水平井的距离对水平井产能的影响。

主题词 水平井;流量;渗透率各向异性;产能;镜像迭加原理

中图法分类号 TE 312

前言

水平井是一项有广阔发展前景的新技术。近年来,水平井日益增多,合理地设计水平生产井及正确地计算其生产能力是能否达到预期开发效果的重要技术和经济问题。本文研究水平井在底水或边水油、气藏中的二维稳定渗流问题,利用势函数的镜像迭加原理,得到了水平井的流量公式,并讨论了油层厚度、供水距离和水平渗透率与垂直渗透率的比值对水平井产能的影响。

1 底水油、气藏

水平段长为 L 的水平井,布置在底水油层离上覆不渗透层距离为 h 处,其纵剖面如图 1 所示。

均质液体流向水平井的二维定常渗流控制方程

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式中 $\Phi = \frac{K_H}{U}(P + \gamma Z)$, 势函数;

$\rho = \sqrt{\frac{K_H}{K_V}}$, 各向异性系数。

1993-06-16 收稿

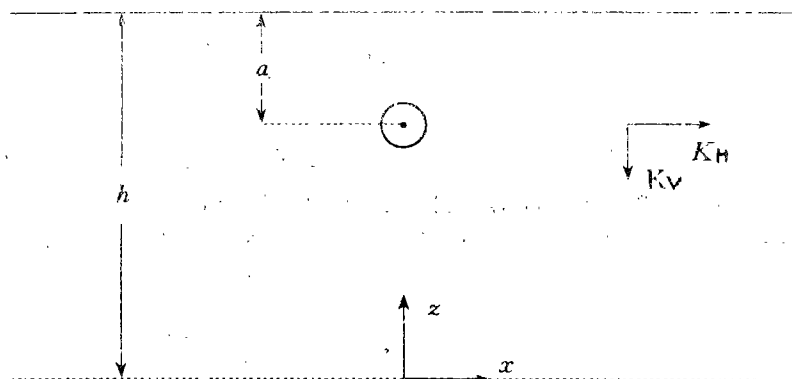


图1 底水油、气藏水平井纵剖面示意图

上覆盖层不渗透边界条件

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Z} = 0, \text{当 } Z = h \quad (2)$$

下部底水等势面条件

$$\Phi = \Phi_0 \quad \text{当 } Z = 0 \quad (3)$$

对于上述各向异性问题,令坐标变换 $Z' = \rho Z$ 即可化成各向同性问题,从而根据势函数的镜像迭加原理(可参见文1),可求得方程(1)~(3)的解为

$$\begin{aligned} \Phi = \Phi_0 + \frac{Q\rho}{4\pi L} \ln \frac{ch \frac{\pi x}{2h\rho} - \cos \frac{\pi(Z-h+a)}{2h}}{ch \frac{\pi x}{2h\rho} \cos \frac{\pi(Z+h-a)}{2h}} \\ + \frac{Q\rho}{4\pi L} \ln \frac{ch \frac{\pi x}{2h\rho} - \cos \frac{\pi(Z-h-a)}{2h}}{ch \frac{\pi x}{2h\rho} - \cos \frac{\pi(Z-3h+a)}{2h}} \end{aligned} \quad (4)$$

结合水平井条件

$$\Phi = \Phi_w, \text{当 } x = 0, Z = h - a + r_w \quad (5)$$

即得水平井的流量公式

$$Q = \frac{2\pi L(\Phi_0 - \Phi_w)}{\Omega} \quad (6)$$

$$\Omega = \rho \left[\ln \operatorname{ctg} \frac{\pi r_w}{4h} + \ln \operatorname{ctg} \frac{\pi(2a - r_w)}{4h} \right] \quad (7)$$

当 $\rho=1$, 且 $a \gg r_w$ 时, 水平井流量公式(6)和(7)便是文[2]的结果。由流量公式(6)和(7)不难看出, 对于底水油、气藏, 影响水平井产能的主要因素是油层厚度和水平渗透率与垂直渗透率的比值, 井的位置 a 虽有影响, 但变化幅度不大, 即井的位置的影响是第二位的。

一般来讲, 地层在沉积过程中不断受到上覆地层的压实作用而变得逐渐致密。从力学观点看, 岩层在地下其垂向所受的力远较水平作用力大。因此垂直方向的层理致密, 岩层的水平渗透率总是大于垂直渗透率, 即 ρ 的值总是大于 1。所以当油层的渗透率存在各向异性时, 水平井的产能会降低, 这是水平井采油存在的主要缺点之一。

2 边水油、气藏

水平段长为 L 的水平井, 布置在油层离上覆不渗透层距离为 a 处, 边水到水平井的垂直距离为 x_e , 其纵剖面如图 2 所示,

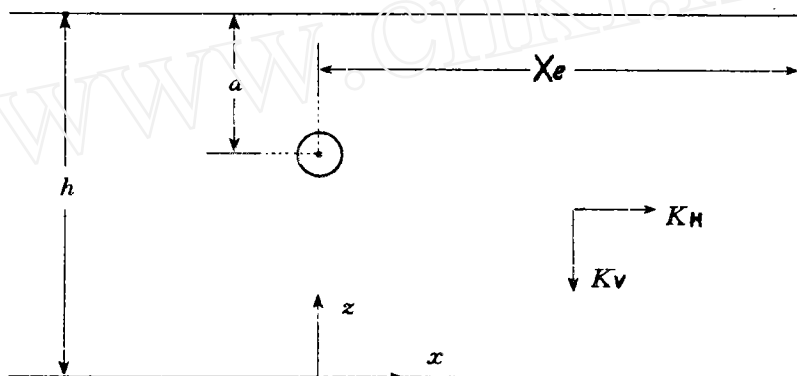


图 2 边水油、气藏水平井纵剖面示意图

描述均质液体流向水平井的二维定常控制方程和上覆盖层不渗透边界条件仍为方程(1)和(2)。

下部底层不渗透边界条件

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \text{ 当 } z = 0 \quad (8)$$

边缘供水等势面条件

$$\Phi = \Phi_e, \text{ 当 } x = x_e \quad (9)$$

类似于上一节,先令坐标变换 $Z'=\rho Z$,把各向异性问题化成各向同性问题,再根据镜像迭加原理,可求得方程(1)、(2)、(8)和(9)的解为

$$\begin{aligned} \Phi = \Phi_e + \frac{Q\rho}{4\pi L} \ln & \frac{ch \frac{\pi x}{h\rho} - \cos \frac{\pi(Z-h+a)}{h}}{ch \frac{\pi(x-2x_e)}{h\rho} - \cos \frac{\pi(Z-h+a)}{h}} \\ & + \frac{Q\rho}{4\pi L} \ln \frac{ch \frac{\pi x}{h\rho} - \cos \frac{\pi(Z-h-a)}{h}}{ch \frac{\pi(x-2x_e)}{h\rho} - \cos \frac{\pi(Z-h-a)}{h}} \end{aligned} \tag{10}$$

结合水平井条件(5),即可得到边水油、气藏中的水平井流量公式

$$Q = \frac{2\pi L(\Phi_e - \Phi_w)}{\Omega} \tag{11}$$

$$\Omega = \rho \ln \frac{\sqrt{[ch \frac{2\pi x_e}{h\rho} - \cos \frac{\pi r_w}{h}][ch \frac{2\pi x_e}{h\rho} - \cos \frac{\pi(2a-r_w)}{h}]}}{2\sin \frac{\pi r_w}{2h} \sin \frac{\pi(2a-r_w)}{2h}} \tag{12}$$

当 x_e 很大时 可得阻力系数 Ω 的近似公式

$$\Omega = \rho \left[\frac{2\pi x_e}{h\rho} + \ln(4\sin \frac{\pi r_w}{2h} \sin \frac{\pi(2a-r_w)}{2h}) \right] \tag{13}$$

表 1 Ω 与 $h, x_e, K_H/K_V$ 的关系

$\frac{K_{fj}}{K_V}$	h=20m				h=40m			h=80m		
	$x_c=50m$	$x_c=100m$	$x_c=200m$	$x_c=50m$	$x_c=100m$	$x_c=200m$	$x_c=50m$	$x_c=100m$	$x_c=200m$	
1	19.71	35.42	66.83	13.19	21.05	36.76	10.60	14.57	22.42	
2	21.37	37.08	68.49	15.40	23.26	38.97	13.25	17.34	25.20	
3	22.64	38.35	69.76	17.07	24.96	40.67	15.19	19.45	27.34	
4	23.71	39.42	70.84	18.45	26.39	42.10	16.77	21.20	29.14	
5	24.66	40.37	71.78	19.66	27.64	43.39	18.12	22.73	30.72	
6	25.51	41.22	72.64	20.73	28.78	44.50	19.31	24.10	32.15	
7	26.29	42.01	73.42	21.70	29.82	45.54	20.38	25.34	33.46	
8	27.01	42.74	74.15	22.59	30.79	46.52	21.35	26.48	34.68	
9	27.70	43.42	74.84	23.42	31.70	47.44	22.25	27.54	35.82	
10	28.34	44.07	75.49	24.19	32.55	48.30	23.09	28.54	36.90	

从(12)式不难看出,影响水平井产能的主要因素是油层厚度 h 、供水距离 x_e 和水平渗透率与垂直渗透率的比值 K_H/K_V . 对于 $r_w=0.1m, a=4m$, 我们就不同的 h, x_e 和 K_H/K_V 将(12)式

计算出的阻力系数数据 Ω 列于表 1 中. 从表 1 可以看出, 水平渗透率与垂直渗透率的比值 K_H/K_V 对于水平井的产能具有不容忽视的影响, 如当 $h=20\text{m}$, $x_e=100\text{m}$ 时, $K_H/K_V=10$ 的流量为储层无各向异性的流量的 80.4%, $K_H/K_V=5$ 的流量为储层无各向异性的流量的 87.7%, 但这种影响与底水油、气藏相比要小得很多, 即对于各向异性严重的油、气藏, 采用边水驱比采用底水驱要好得多, 但各向异性的存在仍然是水平采油效果降低的一个重要的因素.

对于边水油、气藏而言, 油层厚度 h 仍是影响水平井产能的一个重要因素, 但与底水油、气藏不同的是, 它具有两重性. 一方面当 h 增大时, 阻力系数数据 Ω 变小, 水平井流量 Q 增大. 如当 $x_e=100\text{m}$, $K_H/K_V=10$ 时, h 从 20m 增加 40m 再增加到 80m, Ω 从 44.07 减小到 32.55 再减小到 28.54, Q 增加了 35.4% 再增加了 14.1%; 另一方面当 h 增大时, 存在各向异性的流量与不存在各向异性的流量的比值会减小, 如当 $x_e=100\text{m}$ 时, h 从 20m 增加到 40m 再增加到 80m, $K_H/K_V=10$ 的流量与无各向异性的流量的比值从 80.4% 减小到 64.7% 再减小到 51.1%, 即采油效果降低.

由此可见, 水平井在开发薄油层、底水或气顶油藏时具有很大的优越性, 但也有它的双重性. 对于厚油层和渗透率各向异性严重的油藏, 水平井也有其致命的弱点. 因此在应用水平井做开发设计与采油工艺设计时, 必须要从油田的实际情况出发, 对各种方案进行计算和比较, 择优选用. 相比之下, 利用水平井开采厚油层和渗透率各向异性严重的油藏, 采用边水驱比采用底水驱要好得多.

顺便指出, 由 (10) 式不难求得渗流速度 V_x 和 V_z 分别为

$$V_x = -\frac{Q}{4hL} \left[\frac{sh \frac{\pi x}{h\rho}}{ch \frac{\pi x}{h\rho} + \cos \frac{\pi(Z+a)}{h}} + \frac{sh \frac{\pi x}{h\rho}}{ch \frac{\pi x}{h\rho} + \cos \frac{\pi(Z-a)}{h}} - \frac{sh \frac{\pi(x-2x_e)}{h\rho}}{ch \frac{\pi(x-2x_e)}{h\rho} + \cos \frac{\pi(Z+a)}{h}} - \frac{sh \frac{\pi(x-2x_e)}{h\rho}}{ch \frac{\pi(x-2x_e)}{h\rho} + \cos \frac{\pi(Z-a)}{h}} \right] \quad (14)$$

$$V_z = \frac{Q}{4hL\rho} \left[\frac{\sin \frac{\pi(Z+a)}{h}}{ch \frac{\pi x}{h\rho} + \cos \frac{\pi(Z+a)}{h}} + \frac{\sin \frac{\pi(Z+a)}{h}}{ch \frac{\pi x}{h\rho} + \cos \frac{\pi(Z-a)}{h}} - \frac{\sin \frac{\pi(Z+a)}{h}}{ch \frac{\pi(x-2x_e)}{h\rho} + \cos \frac{\pi(Z+a)}{h}} - \frac{\sin \frac{\pi(Z-a)}{h}}{ch \frac{\pi(x-2x_e)}{h\rho} + \cos \frac{\pi(Z-a)}{h}} \right] \quad (15)$$

令 $\rho=1$ 且 $a=0$, 并将所得结果与文[3]比较, 可见文[3]对于边水驱所求得的 V_x 和 V_z 是错误的, 其错在于没有关于供水边缘进行镜像迭加.

3 结 论

(1)、本文研究水平井在底水或边水油、气藏中的稳定渗流问题,利用势函数的镜像迭加原理,得到了水平井的流量公式。

(2)、对于底水油、气藏,油层厚度 h 和水平渗透率与垂直渗透率的比值 K_H/K_V 是影响水平井产能的两个主要因素。

(3)、对于边水油、气藏,油层厚度 h 、供水距离 x_e 和水平渗透率与垂直渗透率的比值 K_H/K_V 是影响水平井产能的主要因素,其中 h 具有两重性, K_H/K_V 对水平井产能的影响不容忽视,仍是水平井采油效果降低的一个重要因素,但这种影响与底水油、气藏相比要小得多。

感谢石油天然气总公司、中科院渗流力学所刘慈群先生的热情鼓励和指导。

参 考 文 献

- 1 姜礼尚,陈钟祥.试井分析理论基础.石油工业出版社,1985
- 2 刘慈群.水平井流量公式.石油钻采工艺,1991,13(1)
- 3 刘慈群.水平井两相渗流.力学与实践,1993,15(2)

Flow Rate Analysis of a Horizontal Well

Guo Dali

(Department of Basic Sciences)

Abstract

In this paper we studied the two-dimensional steady state flow problem of a horizontal well in a reservoir with bottom water or edge water, and obtained the flow rate formula of a horizontal well by using mirror image superposition principle of the potential function. We also discussed the effects of the thickness and permeability anisotropy of a reservoir, and the distance between edge water and well, on the productivity of the horizontal well.

Key Words: Horizontal well; Flow rate; Permeability anisotropy; Productivity; Method of mirror image