

of float-serve. In: The proceeding of BICSC, 1992

[3] 孙宝亭. 仿真技术在飘球动力学研究中的应用. 计算机仿真, 1992, (1)

[4] 易大义等. 计算方法. 杭州: 浙大出版社, 1985

[5] 李岳生等. 样条函数方法. 北京: 科学出版社, 1979

(本文于1991年10月14日收到,

1992年7月5日收到修改稿)

水平井两相渗流

刘慈群

(中国科学院, 渗流流体力学研究所, 河北廊坊 102801)

摘要 研究了水平井两相渗流问题. 在流线不变的假定下, 给出了水驱油饱和度的二维分布和见水时间公式. 两相渗流的见水时间比活塞式驱替的时间快 $f(s)$ 倍, $f(s)$ 是含水百分数在前沿处的导数值.

关键词 水平井, 两相渗流

1. 前言

水平井是一项有广阔发展前景的油、气、水田开发增产新技术. 它的基础是水、油两相垂直二维 ($x-z$ 方向) 渗流. 直井平面二维 ($x-y$ 方向) 渗流文献[1]作了较系统的研究, 在流线不变的假定下得出了垂直并列系统油田开发设计的计算方法. 文献[2]讨论了水平井二维渗流极限产量问题. 本文在此基础上, 进一步给出水平井两相垂直平面二维渗流及见水时间公式.

2. 两相二维渗流方程的近似解

不考虑毛细管力和重力作用时, 描述不互溶、不可压缩的两相(水、油)二维渗流方程是^[4]

$$\phi \frac{\partial s}{\partial t} + v_x \frac{\partial f(s)}{\partial x} + v_z \frac{\partial f(s)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ϕ 是介质孔隙度, s 是含水饱和度,

$$f(s) = \left[1 + \frac{\mu_w K_{rH}(s)}{\mu_o K_{rW}(s)} \right]^{-1}$$

是液流中含水百分数或分流函数, μ_o 、 μ_w 是油、水粘度, v_x 、 v_z 分别是液体渗流速度在垂直平面 x 、 z 方向的分量, 在流线不变的假定下(在给定量条件下), 可按势流原理求得.

式(1)的解是, 沿特征线

$$\frac{dt}{\phi} = \frac{dx}{f(s) \cdot v_x} \quad (2a)$$

$$\frac{dz}{v_z} = \frac{dx}{v_x} \quad (2b)$$

$$s = \text{常数} \quad (3)$$

式中 $f(s) = df/ds$. 式(2b)为流线方程,

$$f(s) = 1$$

表示活塞式水驱油情况.

3. 边水驱渗流

水平段长为 L 的水平井, 布置在含油层顶部, 其纵剖面如图1所示,

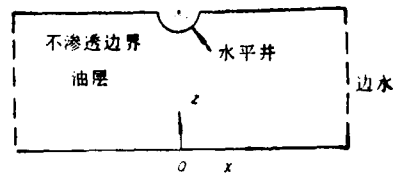


图1 水平井纵剖面示意图

当水平井流量为 Q 时, 根据势流原理其稳定二维渗流速度为

$$v_x = -\frac{q}{2h} \frac{\text{sh}(\pi x/h)}{\text{ch}(\pi x/h) + \cos(\pi z/h)} \quad (4a)$$

$$v_z = \frac{q}{2h} \cdot \frac{\sin(\pi z/h)}{\text{ch}(\pi x/h) + \cos(\pi z/h)} \quad (4b)$$

式中: $q = \frac{Q}{L}$ 是水平井单位长度流量, h 是含油层厚度, $\text{sh}(\cdot)$ 、 $\text{ch}(\cdot)$ 分别是双曲线正弦和余弦函数, $\sin(\cdot)$ 、 $\cos(\cdot)$ 分别是正弦和余弦函数.

式(4)满足不渗透边界条件和连续性方

程。其流函数为

$$\phi = \frac{q}{2\pi} \cdot \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{\operatorname{tg}(\pi z/2h)}{\operatorname{cth}(\pi x/2h)} \right] \quad (5)$$

式中: $\operatorname{tg}(\cdot)$ 是正切函数, $\operatorname{cth}(\cdot)$ 是双曲线余切函数。

令 $x = h$, 从式(4a)得沿主流线渗流速度

$$v_x(\cdot, x, h) = -\frac{q}{2h} \cdot \frac{\operatorname{sh}(\pi x/h)}{\operatorname{ch}(\pi x/h) - 1} \quad (6)$$

将式(6)代入式(2a), 从边水处 x_0 积分得沿主流线的饱和度分布

$$s_0 = \frac{\pi Q \cdot s}{\phi h^2 L} = \frac{4}{f(s)} \left[\ln \operatorname{ch} \frac{\pi x_0}{2h} - \ln \operatorname{ch} \frac{\pi x}{2h} \right] \quad (7)$$

令 $s = s_0$, $x \rightarrow 0$; 得见水时间公式

$$t_{CD} = \frac{\pi Q \cdot s_0}{\phi h^2 L} = \frac{4}{f(s_0)} \ln \operatorname{ch} \frac{\pi x_0}{2h} \quad (8)$$

式中: s_0 是两相渗流前沿饱和度; $\ln(\cdot)$ 是自然对数符号。

令 $f(s_0) = 1$, 从式(8)得活塞式驱油见水时间

$$t_{CD} = 4 \ln \operatorname{ch} \frac{\pi x_0}{2h} \quad (9)$$

由上得: 见水时间与油层厚度 h 的平方成正比, 与流量 Q 成反比; 两相驱油见水时间比活塞式驱油见水时间快 $f(s_0)$ 倍。根据文献[1]的两相渗流实验数据, $f(s_0) = 3.67$ 。

4. 底水驱渗流

水平井在底水油田布置纵剖面如图2所示。

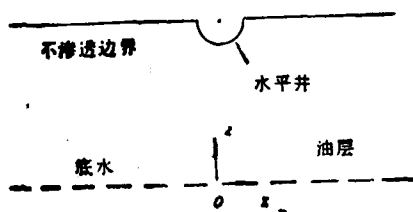


图2 水平井在底水油田纵剖面图

示。当其流量为 Q 时, 根据势流叠加原理, 其渗流速度为

$$v_x = \frac{-q}{2h} \frac{\operatorname{sh}(\pi x/2h) \sin(\pi z/2h)}{\operatorname{ch}^2(\pi x/2h) - \sin^2(\pi z/2h)} \quad (10a)$$

$$v_z = \frac{q}{2h} \frac{\operatorname{ch}(\pi x/2h) \cdot \cos(\pi z/2h)}{\operatorname{ch}^2(\pi x/2h) - \sin^2(\pi z/2h)} \quad (10b)$$

从式(10)得流函数

$$\phi = \frac{q}{2\pi} \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{\cos(\pi z/2h)}{\operatorname{sh}(\pi x/2h)} \right] \quad (11)$$

式(10)满足边界条件和连续性方程

令 $x = 0$, 从式(10b)得沿主流线渗流速度。

$$v_x(0, z) = \frac{q}{2h} \frac{\cos(\pi z/2h)}{1 - \sin^2(\pi z/2h)} \quad (12)$$

将式(12)代入式(2a), 从底水处 $z = 0$ 积分得, 沿主流线的饱和度分布

$$s_D = \frac{\pi Q \cdot s}{\phi h^2 \cdot L} = \frac{4}{f(s)} \sin \frac{\pi z}{2h} \quad (13)$$

令 $s = s_0$, $z = h$, 得见水时间公式

$$t_{CD} = \frac{4}{f(s_0)} \quad (14)$$

比较式(7)、(8)和式(13)、(14)可知: 边水驱和底水驱饱和度分布和见水时间的差异, 仅在于几何位置不同而已; 即两相驱的影响是相同的。

5. 小结

(1) 在流线不变的假定下, 根据二维势流速度求得了描述不可压两相流体渗流的双曲型拟线性微分方程的解析解。

(2) 求得了边水驱和底水驱, 水平井饱和度分布公式。

(3) 见水时间与含油高度的平方成正比, 与产量成反比。两相流见水时间比活塞式驱的快 $f(s_0)$ 倍。

参 考 文 献

- [1] 刘慈群等. 并列系统二相渗流的近似计算方法. 见第二届全国流体力学学术会议论文集, 北京: 科学出版社 1983, 213—219
- [2] Liu Ciqun et al. Critical rate of horizontal well for water Creat Proc In: Proceedings of Fifth Asian Cong of Fluid Mechanics, Korea, 1992

(本文于1992年5月7日收到,
1992年8月9日收到修改稿)