

垂向与球形渗流的测定及应用

陈平中 夏位荣 王新海

(江汉石油学院, 湖北荆沙 434102)

通过垂向干扰测试, 表明塔里木盆地东河砂岩油藏存在垂向渗流。在有垂向渗流且打开程度不完善的油井中, 流体的流态表现为球形渗流, 它是平面渗流和垂向渗流的总和。在地层测试解释中, 若仍用平面径向流方法, 则必然造成渗透率解释的严重偏差。对于这类油藏, 打水平井或斜井能有效地提高产能。水平井提高产能的幅度随 K_v/K_h 的增大而增大; 斜井在任何渗透率比值下都能提高产能, 以井斜大于 40° 时最为明显。二者相较水平井比斜井更优。

关键词 垂向渗流 球形渗流 垂向干扰 测试 水平井 斜井 产能

第一作者简介 陈平中 男 25岁 硕士生 开发地质

垂向和球形渗透率是现代试井分析中不可缺少的参数。对其测试方法国内外均做过研究^[1~7], 但实际应用和成功解释则未见文献报道。本文以塔里木盆地东河砂岩油藏为例, 侧重于垂向干扰测试技术在垂向渗流测定和提高油井产能方面的应用研究。

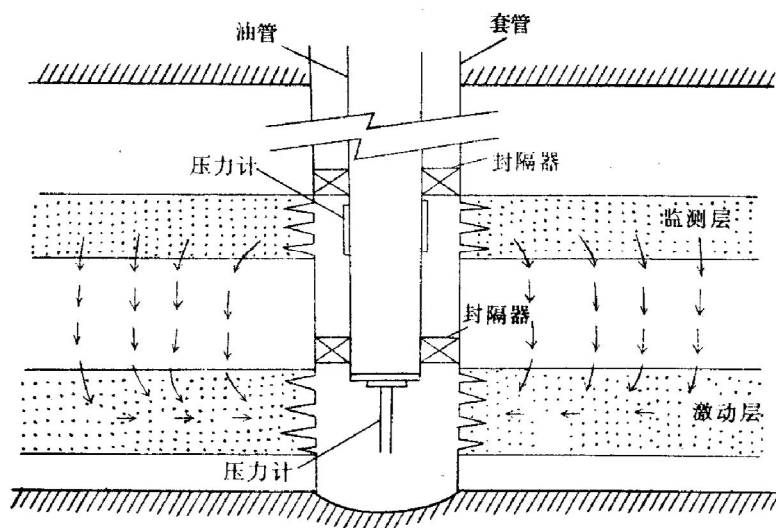


图1 垂向干扰测试示意图

1 垂向干扰测试及资料分析

垂向渗流是指流体在垂向上的流动。垂向干扰测试是研究垂向渗流的主要试井方法之一。它所采用的完井方式为：一部分井段生产或开关井以改变工作制度（即激动井段）；另一部分井段观察相应的压力变化，即监测井段（图1）。

通过 TZA 井东河砂岩油藏内 634 块岩芯的分析, 统计出垂向渗透率值平均为 $0.1591\mu\text{m}^2$, 最小为 $0.0658\mu\text{m}^2$, 最大为 $0.338\mu\text{m}^2$, 垂向

和水平渗透率的比值为 $0.23\sim 0.877$, 平均为 0.562 , 证明该砂岩层在垂向上具有液体通过的能力。利用地层测试器对 TZB 井进行了四次垂向干扰测试, 证实该东河砂岩油藏内存在垂向

渗流 (表 1)。

表 1 TZB 井垂向干扰测试情况

次序	测试时间	激动层段/m	监测层段/m	图号	结论
1	1994-02-03-15:18	3570.5~3575.0	3556.0~3559.0	图 2a	有干扰
2	1994-02-03-18:37	3570.5~3575.0	3556.0~3559.0	图 2b	有干扰
3	1994-02-03-20:06	3478.5~3494.0	3556.0~3559.0	图 2c	无干扰
4	1994-02-20-19:16	3556.0~3559.0	3570.5~3575.0	图 2d	有干扰

图示四次垂向干扰测试的实测压力曲线变化 (图 2)。每图的四条测试曲线 (实线、虚线、点线和实点) 分别代表三支压力计记录的结果。其中两支压力计记录同一层段, 另一支记录另一层段。不论是监测层还是激动层, 凡两支压力计所测同一层段的压力曲线均变化一致, 表明仪器工作正常。采用上部井段 (3556.0~3559.0m) 为监测层, 下部井段 (3570.5~3575.0m) 为激动层测定的压力变化 (图 2a, b) 表明: 虽然两层相隔 11.5m, 但由于垂向渗流的存在 (并没有裂缝发育), 激动层工作制度的改变 (如开关井或改变油嘴大小), 都影响到监测层的压力。当激动层开井生产时, 监测层压力随之下降; 当激动层关井恢复时, 监测层压力也随之趋于平缓, 最后达到稳定。图 2b 两条平稳线之间的压力差正好等于两个测试点高度差所产生的压力。采用相反的完井方式, 若存在垂向渗流, 也得到同样的结果 (图 2d)。但层间无垂向渗流时, 不管激动层的工作制度如何变化, 监测层的压力始终不变 (图 2c)。

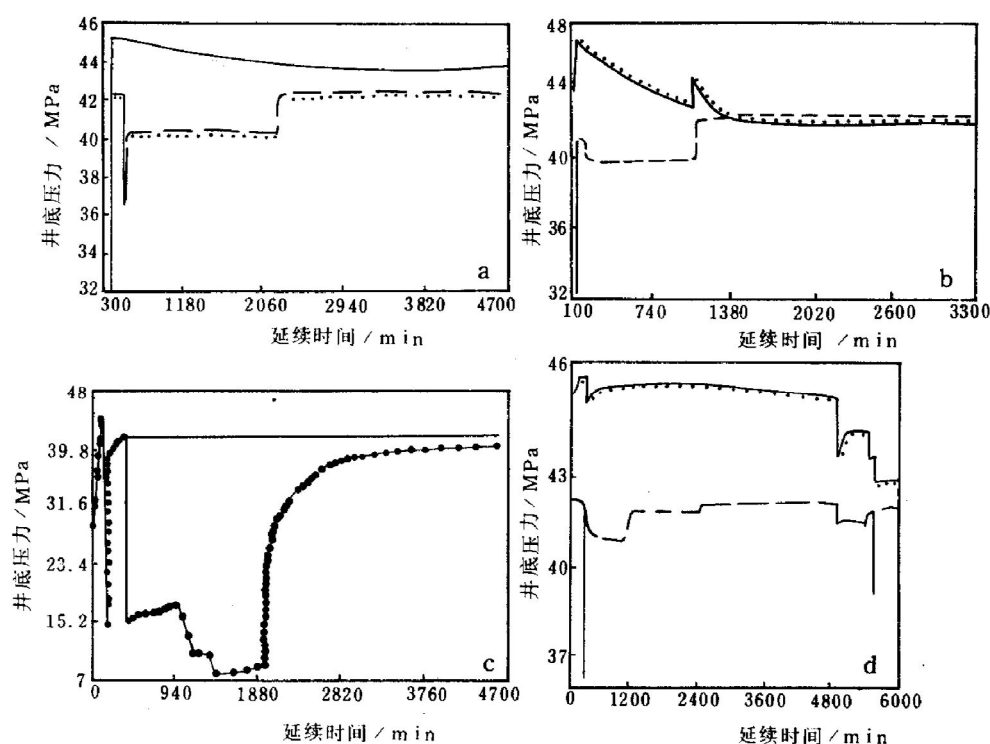


图 2 垂向干扰测试实测压力历史图

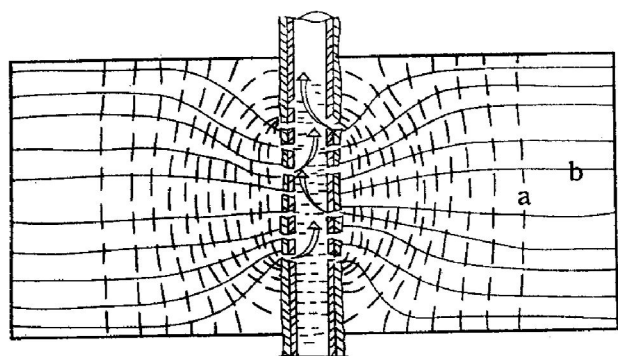


图3 有垂向渗流井的流态

a—等压线, b—流线

2 垂向和球形渗透率的计算

一般来说,地层内总存在着一定的垂向渗透率。当垂向渗透率较大时,则为油层具有垂向渗流提供条件。在有垂向渗流且打开程度不完善的油井中,流体的流态为球形渗流(图3),它是平面渗流和垂向渗流的总和。打开程度不完善有两个含意:(1)指仅射开(或钻开)油层的部分厚度;(2)指有时虽然全部射开油层,但由于地层中局部出现溶洞或特高渗透率井段,在这些井段的

上下位置,井壁处的渗透率趋于零或极小。在有球形渗流的地层测试解释中,若仍用平面径向流方法,则造成渗透率解释的严重偏差。为此,需要研究垂向和球形渗透率的计算方法。

微可压缩液体在均质无限大多孔介质中,球对称不稳定渗流的连续点汇解为^[8]:

$$P(r, t_p) = P_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi K_s r} \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sqrt{14.4\eta t_p}}\right) \quad (1)$$

若生产井以稳定产量生产 t_p 时间后关井,则井壁处($r=r_w$)的流动压力为:

$$P_{wf} = P_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi r_w K_s} \operatorname{erf}\left[\frac{r_w}{\sqrt{14.4\eta t_p}}\right] \quad (2)$$

按叠加原理得关井后的压力为:

$$P_t = P_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi K_s r_w} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{r_w}{\sqrt{14.4\eta(t_p+t)}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{r_w}{\sqrt{14.4\eta t}}\right) \right] \quad (3)$$

$$\text{当 } x \leq 0.1 \text{ 时, 有 } \operatorname{erfc}(x) \approx 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} x \quad (4)$$

$$\text{所以 } P_t - P_{wf} = \left(\frac{q\mu B}{345.6\pi K_s r_w} - m' \frac{1}{\sqrt{t_p}} \right) - m' \left(\frac{1}{\sqrt{t}} - \frac{1}{\sqrt{t_p+t}} \right) \quad (5)$$

试油测试时 t_p 一般不太大,当 $t \rightarrow \infty$ 时,上式右边第二个括号内的和趋于零。于是球形渗透率为:

$$K_s = \frac{Aq\mu B}{\sqrt{r_{wi}h} \left(m' \frac{1}{\sqrt{t_p}} + \Delta P_\infty \right)} \quad (6)$$

式中截距:

$$\Delta P_\infty = P_\infty - P_{wf} = P_i - P_{wf} \quad (7)$$

球形渗透率、垂向渗透率和水平渗透率之间的关系为^[7]:

$$K_v = \frac{-K_s K_h}{2K_s - 3K_h} \quad (8)$$

式中 r_w = 点汇球半径; r_{wi} = 井半径; h = 油层射开厚度; q = 稳定产量; μ = 流体粘度; t_p = 生产时间; t = 关井时间; η = 导压系数; K_s = 球形渗透率; K_v = 垂向渗透率; K_h = 水平渗

透率; A = 换算系数; $m' = \frac{q\mu B}{655.73\pi^{3/2}K_v\eta^{1/2}}$ 。

TZB 井 3570.5 ~ 3575.0 m 井段于 1994 年 2 月进行垂向干扰测试时, 在无因次压力导数图上出现 $-\frac{1}{2}$ 斜率的曲线特征 (图 4), 表明存在球形渗流*。测得的压力数据按 (5) 式在直角坐标系中作图 (图 5), 压差 $(P_i - P_{wi})$ 与时间 $(\frac{1}{\sqrt{t}} - \frac{1}{\sqrt{t_p + t}})$ 的关系曲线必然出现直线段。

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 得到 ΔP_∞ 值, 再将 ΔP_∞ 和直线段斜率代入公式 (6)、(8), 可得球形渗透率为 $0.667 \mu\text{m}^2$, 垂向渗透率为 $0.339 \mu\text{m}^2$ 。用同样的方法, 对该地区 6 口井的东河砂岩油层分别计算垂向和球形渗透率, 结果见表 2。

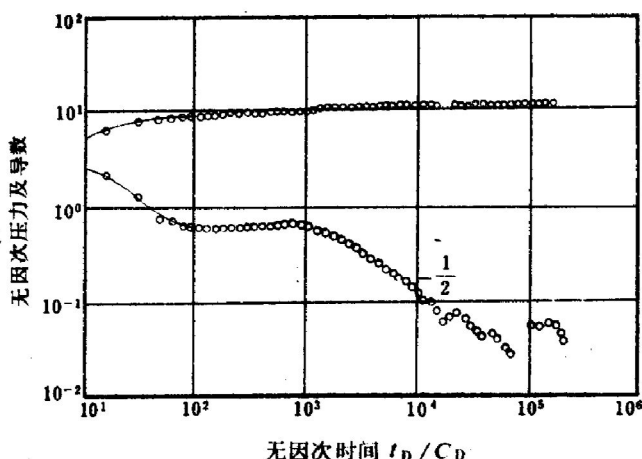


图 4 TZB 井无因次双对数图

3 提高油井产能的途径

东河砂岩油藏普遍为具有较大垂向渗透率的底水块状油藏, 有的还具有气顶。对于这样的油藏, 打水平井或斜井能有效提高油井产能和整体开发效果。

水平井和直井的产能指数比为^[9]:

$$\frac{J_h}{J_v} = \frac{\ln \frac{r_{eh}}{r_w}}{\ln[a + (a^2 - 1)^{1/2}] + \frac{\beta h}{L} (\ln \frac{\beta h}{2r_w})} \quad (9)$$

式中 $a = \{0.5 + [0.25 + (\frac{2r_{eh}}{L})^4]^{1/2}\}^{1/2}$, $\beta = (\frac{K_h}{K_v})^{1/2}$;

斜井和直井的产能指数比为:

$$\frac{J_s}{J_v} = \frac{\ln \frac{r_{eh}}{r_w}}{\ln \frac{r_{eh}}{r_{w0}}} \quad (10)$$

式中 $r_{w0} = r_w e^{-S_0}$; $S_0 = -(\frac{\theta_w}{41})^{2.06} - (\frac{\theta_w}{56})^{1.865} \lg(\frac{h}{100r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}})$; $\theta_w' = \arctg(\sqrt{\frac{K_v}{K_h}} \tan \theta_w)$;
 r_{eh} = 水平井泄油半径。

* 引自 Gringarten 先生 1993 年在北京的演讲稿

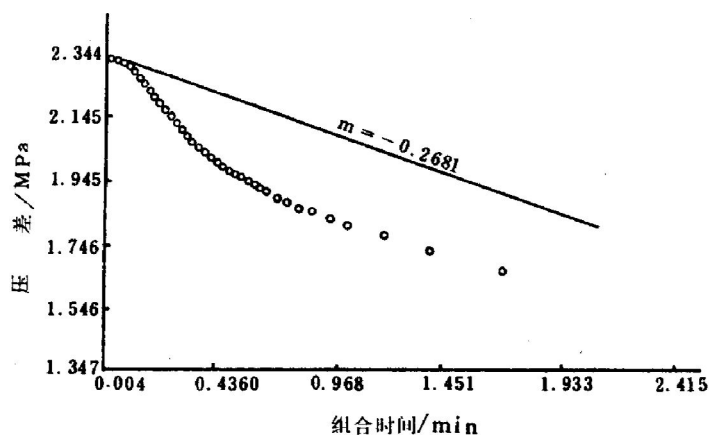


图 5 TZB 井压差与时间的关系曲线图

表 2 六口井渗透率值的比较

井号	层位	井段/m	岩芯分析渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$		测试解释渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$		
			水平	垂向	水平	球形	垂向
TZA	CⅡ ₁	3613.0~3628.0	360.04	315.96	2450	313.1	114.1
		3643.0~3653.0	319.6	192.96	1250	105	37.1
	CⅡ ₂	3705.5~3708.0	127.3	66.8	120	56.6	27.5
		3718.0~3722.0	102.3	74.5	4.4	3.8	2.9
TZC	CⅡ ₁	3685.0~3703.0			23.4	10.6	5.1
TZB	CⅡ ₁	3556.0~3559.0			94.4	30.1	12.7
		3570.5~3575.0			1286	667	339
TZD	CⅡ ₂	3631.0~3634.0			3460	232.6	81.1
TZE	CⅡ ₁	3720.0~3723.0			325.9	98.3	41
DHA	CⅡ	5726.0~5800.0	47.5~119.7		80.6	11.7 (半球)	4.3
						8.3 (全球)	3

根据公式 (9) 和 (10) 可分别得图 6 和图 7。水平井提高产能的幅度随 $\frac{K_v}{K_h}$ 的增大而增大

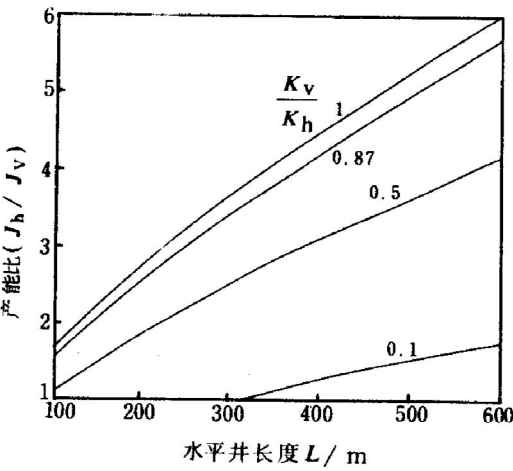


图 6 水平井与直井的产能对比

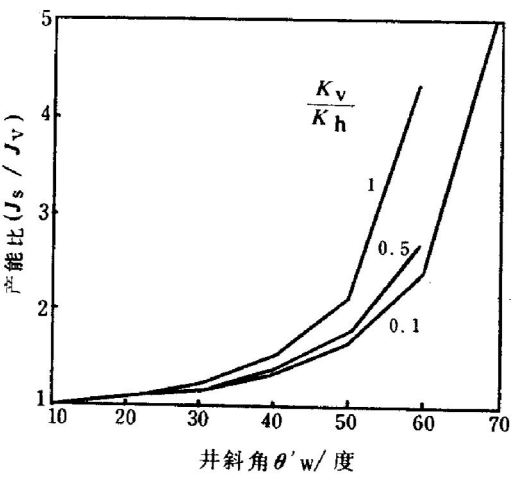


图 7 斜井与直井的产能对比

(图 6),当地层垂向渗透率接近水平渗透率时,水平井能显著提高油井产能;当 $\frac{K_v}{K_h}$ 很小时,水平井提高产能的幅度很小,若水平井长度不够长时,水平井不仅不能提高产能,甚至比直井产能还低。斜井在任何渗透率比值下都能提高油井产能(图 7),当井斜角大于 40° 时,提高产能的幅度才比较明显,但 $\frac{K_v}{K_h}$ 相同时,斜井提高产能的幅度没有水平井大。

4 几点认识

(1) 垂向干扰测试是研究油层内是否存在垂向渗流的有效试井方法。

(2) 垂向干扰测试的成功运用, 改变了以往只研究油层物性平面变化的现状, 而向三维空间发展。

(3) 在具有垂向渗流且打开程度不完善的地层中, 要考虑球形渗流的存在; 同时在描述该类流态特征时应该用球形渗透率, 而不能简单地用水平或垂向渗透率。

(4) 对于具有底水和垂向渗流的油藏, 可选择水平井或斜井来提高油井产能和油田整体开发效果。

参 考 文 献

- 1 Burns W A Jr. New single - well test for determining vertical permeability. *J. Pet. Tech.*, 1969, 21 (7): 743~752
- 2 Raghavan R, Clark K K. Vertical permeability from limited entry flow tests in thick formation. *Soc. Pet. Eng. J.*, 1975, (2): 65~73
- 3 Barnum R S, Frederick K A. Vertical permeability determination from pressure buildup tests in partially perforated well. In: The Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference. Texas: Editorial Committee of the Society of Petroleum Engineers, 1990. 237~246
- 4 Bremer R E, Willnston H, Vela S. Analytical model for vertical interference tests across a low - permeability zone. *Soc. Pet. Eng. J.*, 1983, (6): 407~418
- 5 Wijesinghe A M, Kecicioglu I. Vertical interference pressure testing across a low - permeability zone with unsteady cross-flow. In: The 61st Annual Technical Conference. New Orleans: Editorial Committee of the Society of Petroleum Engineers, 1986. 1~15
- 6 高承泰. 串漏垂向干扰试井的特征及解释方法. 石油学报, 1994, (2): 65~75
- 7 朱亚东. 球形流试井分析方法. 油气井测试, 1990, (1): 26~33
- 8 谢兴礼. 打开程度不完善井压力恢复曲线整理方法. 石油勘探与开发, 1978, (4): 31~43
- 9 Joshi S D. Augumentation of well production using slant and horizontal wells. In: The 61st Annual Technical Conference. New Orleans: Editorial Committee of the Society of Petroleum Engineers, 1986. 1~15

DETERMINATION AND APPLICATION OF VERTICAL AND SPHERICAL VADOS FLOWS

Chen Pingzhong Xia Weirong Wang Xinhai

(Jiangnan Petroleum Institute, Jingsha, Hubei)

Abstract

The result of vertical interference test shows that vados flow exists in Donghe sandstone reservoir. In incompletely opened oil wells with vertical vados flow, the flowing shape of fluid appears to be spherical vados flow, and it is the sum of planar and vertical vados flow. In formation test interpretation, plane radial flow method would result in serious deviation of permeability interpretation. But horizontal well and deflecting well could effeciently improve the productivity of this kind of reservoir. The amount of improved productivity would increase with the increasing of K_v/K_h ; deflecting well could improve the productivity at any permeability ratia, and the result would be more favourable when inclination is greater than 40° . In comparason, the horizontal well is much better than the deflecting well.