

# 矿场评价注水井伤害程度的试井方法

丛洪良 (中国科学院力学所, 北京 100080; 胜利油田有限公司临盘采油厂, 山东 临邑 251507)

韩 炜, 黄 茗 (胜利油田有限公司临盘采油厂, 山东 临邑 251507)

刘 炜 (胜利油田胜利化工有限责任公司临盘分公司, 山东 临邑 251507)

刘 斌 (武汉科技大学中南分校, 湖北 武汉 430015)

[摘要] 注水井试井是评价注水层伤害程度的有效手段。通过压力落差试井, 可以测得注水井停注后压力随时间的变化, 所得压力与时间关系的资料通过应用注水井不稳定试井解释方法, 可以求得注水井的表皮因子, 并通过表皮因子分析判断注水井伤害的主要原因。建立了试井评价模型, 确定了压力落差试井表皮因子, 现场应用后可以指出注水井伤害的程度和主要原因。

[关键词] 注水井; 不稳定试井; 地层损害; 表皮因子; 试井解释

[中图分类号] TE353

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-9752(2005)03-0361-03

注水井试井是评价注水层伤害程度的有效手段。通过压力落差试井, 可以测得注水井停注后压力随时间的变化, 所得压力与时间关系的资料通过应用注水井不稳定试井解释方法, 可以求得注水井的表皮因子, 通过表皮因子判断注水井伤害程度。

## 1 试井评价模型的建立

为了得到压力落差试井解释方法, 首先需要研究注水井注入过程的不稳定压力特性, 然后应用压降迭加原理获得压力落差试井解释方法。

假设无限大地层中心有一口注水井, 经过一段时间注水后, 注水井周围地层形成 3 个区: 水淹区(水带)、水未侵入区(油带)以及过渡区(水带与油带的交界处)。由于过渡区与其他两个区相比要小得多, 所以可以把三区模型近似转化为二区模型<sup>[1]</sup>。对于水带可用稳定渗流来表征, 由达西公式得:

$$P_{wf} - P_i = \frac{1.842 \times 10^{-3} q_{inj} B_w}{Kh r_f} \left[ \ln \left( \frac{r}{r_w} \right) + S \right] \quad (1)$$

式中,  $P_{wf}$  为注入井井底流压, MPa;  $P_i$  为驱替前缘压力, MPa;  $q_{inj}$  为注水量,  $m^3/d$ ;  $B_w$  为注入水体积系数;  $K$  为地层渗透率,  $\mu m^2$ ;  $h$  为油层厚度, m;  $r_f$  为靠近驱替前缘流量,  $\mu m^2/(mPa \cdot s)$ ;  $r$  为驱替前缘半径, m;  $r_w$  为井半径, m;  $S$  为表皮因子。

驱替前缘位置可由物质守恒关系得到:

$$\frac{q_{inj} B_w t}{24} = 2 h \int_{r_w}^{r_f(t)} [S_w(r, t) - S_{wi}] r dr \quad (2)$$

式中,  $t$  为注水时间, h;  $r$  为径向距离, m;  $\phi$  为孔隙度, 小数;  $S_w(r, t)$  为在时间  $t$  时半径  $r$  处的含水饱和度, 小数;  $S_{wi}$  为束缚水饱和度, 小数。

如果忽略  $r_w$  项, 则由式(2)可得:

$$r_f = \sqrt{t} \quad (3)$$
$$= \sqrt{\frac{q_{inj} B_w}{24 h (S_w - S_{wi})}} \quad (4)$$

式中,  $\bar{S}_w$  为从井眼半径到驱替前缘(水侵入区)区内平均含水饱和度, 小数。

[收稿日期] 2005-01-24

[作者简介] 丛洪良(1965-), 男, 1987年大学毕业, 高级工程师, 博士生, 现主要从事采油工程工作。

由 Buckley-Leverett 理论<sup>[2]</sup>可知,水驱前缘后的平均含水饱和度为定值。因此,由式(4)所得的  $P_f$  应为定值。对于水未侵入区,可用不稳定渗流表征该区压差与流量间关系:

$$P_f - P_i = \frac{1.842 \times 10^{-3} q_{mi} B_w}{Kh_o} \frac{1}{2} (\ln t_D + 0.80907) \tag{5}$$

$$t_D = \frac{3.6 K_o t}{C_{to} r_w^2} \tag{6}$$

$$C_{to} = C_f + C_o (1 - S_{wi}) + C_w S_{wi} \tag{7}$$

式中,  $q_{mi}$  为油区流度,  $\mu m^2 / (mPa \cdot s)$ ;  $C_{to}$  为油区总压缩系数,  $MPa^{-1}$ ;  $C_f$  为岩石压缩系数,  $MPa^{-1}$ ;  $C_o$  为油的压缩系数,  $MPa^{-1}$ ;  $C_w$  为水的压缩系数,  $MPa^{-1}$ 。

将式(1)与式(7)合并,并通过式(3)和式(6)变形得:

$$P_{wf} - P_i = \frac{2.121 \times 10^{-3} q_{mi} B_w}{Kh_f} \left[ \lg(t) + \frac{0.9077 r_f}{C_{to}} + \frac{r_f}{C_{to}} \lg\left(\frac{K_o}{C_{to}^2}\right) + \lg\left(\frac{2}{r_w^2}\right) + 0.86859 S \right] \tag{8}$$

式(8)说明在定流量注入过程中,注水压力与时间在半对数图中呈直线关系,其斜率为:

$$m = \frac{2.121 \times 10^{-3} q_{mi} B_w}{Kh_f} \tag{9}$$

由式(8)可得真实机械堵塞表皮因子:

$$S = 1.151 \left\{ \frac{P_{1h}}{m} - \lg\left(\frac{2}{r_w^2}\right) - \frac{r_f}{C_{to}} \left[ \lg\left(\frac{K_o}{C_{to}^2}\right) - \frac{0.9077 r_f}{C_{to}} \right] \right\} \tag{10}$$

式中,  $P_{1h} = P_{wf} - P_i$ 。在这里,为了区别两相流与单相流表皮因子,将以往的单相流的表皮因子<sup>[2]</sup>称为拟表皮因子,用  $S_{app}$  表示为:

$$S_{app} = 1.151 \left[ \frac{P_{1h}}{m} - \lg\left(\frac{K_f}{C_t r_w^2}\right) - 0.9077 \right] \tag{11}$$

$C_t$  是已经驱替的区域总压缩系数:

$$C_t = C_f + S_{or} C_o + (1 - S_{or}) C_w \tag{12}$$

式中,  $S_{or}$  为残余油饱和度,小数。对比式(10)和式(11),则最后表皮因子为:

$$S = S_{app} + 1.151 \left[ \lg\left(\frac{K_f}{C_{to}^2}\right) - \frac{r_f}{C_{to}} \lg\left(\frac{K_o}{C_{to}^2}\right) - 0.9077 \left(\frac{r_f}{C_{to}} - 1\right) \right] \tag{13}$$

## 2 压力落差试井表皮因子确定

注水井注入过程不稳定压力试井类同于油井生产的不稳定压力降落试井,而压力落差试井类同于油井的关井恢复试井。因此,根据压降迭加原理<sup>[3]</sup>得:

$$P_{ws}(t_s) - P_{ws}(t_s = 0) = m \left[ \lg(t_s) + \lg\left(\frac{K_f}{C_t r_w^2}\right) + 0.9077 + 0.86859 S_{app} \right] \tag{14}$$

由式(14)得拟表皮因子:

$$S_{app} = 1.151 \left[ \frac{P_{1h}}{m} - \lg\left(\frac{K_f}{C_t r_w^2}\right) - 0.9077 \right] \tag{15}$$

在简化的二区模型中,从井点至驱替前缘区域,可用稳定渗流表示,由广义达西公式得:

$$P_f - P_{wf} = \frac{1.842 \times 10^{-3} q_{mi} B_w}{Kh} \left( \int_{r_w}^{r_t} \frac{dr}{r} + S \right) = \frac{1.842 \times 10^{-3} q_{mi} B_w}{Kh_t} \left( \ln\left(\frac{r_t}{r_w}\right) + S \right) \tag{16}$$

式中,  $\bar{q}_t$  指驱替区域平均流度,  $\mu m^2 / (mPa \cdot s)$ 。

如果井筒至驱替前缘区域内由原来油藏流体所饱和且无伤害时,则压降应为:

$$P_f - P_{wf} = \frac{1.842 \times 10^{-3} q_{mi} B_w}{Kh_o} \ln\left(\frac{r_t}{r_w}\right) \tag{17}$$

式中,  $P_{wf}$  为当井筒至驱替前缘区域内由原来油藏流体所饱和、且无伤害时的井底流压(又称理想流压),  $MPa$ 。对比式(16)与式(17),得到拟表皮因子所引起的附加压降:

$$P_{wf} - P_{wf} = \frac{1.842 \times 10^{-3} q_{mi} B_w}{Kh_o} S_{app} \tag{18}$$

式中,拟表皮因子  $S_{app}$  为:

$$S_{app} = S \frac{\omega}{t} + \left( \frac{\omega}{t} - 1 \right) \ln \left( \frac{r}{r_w} \right) \tag{19}$$

拟表皮因子包括机械堵塞和注入流体带含水饱和度的影响。

### 3 应 用

表 1 给出了临盘采油厂部分注水井应用上述解释方法所得的结果。由表 1 可知,真实表皮因子大于零,地层有堵塞,注水井吸水能力降低。通过室内实验以及地质资料、生产资料分析,认为引起临南油田、商二区、商三区和大芦家注水井伤害的主要原因是注入水固相颗粒和注入水细菌堵塞,其次是无机垢或者有机垢堵塞。这一结论已经得到了注水井解堵措施的验证。

表 1 注水井伤害程度解释结果

油 田	井 号	层 位	配注 / $m^3 \cdot d^{-1}$	层段/层数	注水强度 / $m^3 \cdot (d \cdot m)^{-1}$	表皮因子 (无因次)	吸收能力 降低程度/%	
临南油田	夏 32	沙二段	150	4. 0m/ 2	37. 5	2. 72	26. 1	
	夏 32-28		100	3. 4m/ 1	29. 4	2. 49	24. 4	
	夏 32-39		120	15. 2m/ 4	7. 89	1. 47	16. 0	
	夏 32-504	沙三上亚段	50	1. 4m/ 1	35. 7	2. 67	25. 7	
	夏 32-103		100	4. 0m/ 1	25	2. 34	23. 3	
	夏 32-405		60	7. 4m/ 3	8. 00	1. 49	16. 2	
	夏 52-斜 49		沙三中亚段	150	3. 6m/ 3	41. 67	2. 82	26. 8
	夏 52-402			150	8. 0m/ 4	18. 75	2. 10	21. 4
夏 52-斜 30	30	10. 2m/ 7	2. 94	0. 93	10. 7			
商 二 区	商 8-22	沙二上亚段	30	3. 0m/ 2	10	1. 76	18. 6	
	商 8-90		60	10. 5m/ 5	5. 71	1. 39	15. 3	
	商 8-74	沙二下亚段	20	28m/ 13	0. 71	0. 49	5. 9	
	商 8-298		100	11. 1m/ 2	9. 01	1. 55	16. 7	
	商 8-侧 32		40	17. 4m/ 6	2. 29	0. 82	9. 6	
	商 25-46		沙三上亚段	60	13. 8m/ 8	4. 35	1. 24	13. 8
	商 25-21			30	20. 8m/ 9	1. 44	0. 72	8. 5
商 三 区	商 13-443	沙二上亚段	40	13. 2m/ 8	3. 03	0. 94	10. 8	
	商 13-41		30	18. 8m/ 11	1. 59	0. 67	8. 0	
	商 13-540	沙二下亚段	50	12. 2m/ 6	4. 1	1. 13	12. 8	
	商 13-25		40	54. 6m/ 20	0. 73	0. 45	5. 5	
	商 13-16		沙三上亚段	40	10. 3m/ 4	3. 88	1. 03	11. 8
商 13-108	40	37. 0m/ 1		1. 08	0. 58	7. 0		
大 芦 家	临 45-29	沙二上亚段	30	12. 7m/ 5	2. 36	0. 87	10. 1	
	临 45-斜 21	沙二下亚段	40	26. 7m/ 8	1. 5	0. 68	8. 1	
	临 45-23	沙三上亚段	50	28. 2m/ 5	1. 77	0. 75	8. 8	

### 4 结 论

- 1) 注水井压力落差试井可以确定注水井污染表皮因子。
- 2) 利用注水井试井分析软件,结合注水井伤害室内实验及现场生产资料,可以判断注水井伤害的程度和原因。

#### [参考文献]

[1] Abbaszadeh M, Kamal M M. Pressure transient testing of water injection wells [J]. SPE 16744, 1987.  
 [2] 廖新维, 沈平平. 现代试井分析 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.  
 [3] Levitan M M. Application of water injection/falloff test for reservoir appraisal: new analytical solution method for two-phase variable rate problems [J]. SPE 77532, 2002.

[编辑] 萧 雨