

## 利用油井压力恢复曲线分析 注水井注水强度变化及工作状态

王 耀 祖

(大庆油田采油二厂地质工艺研究所)

**提要** 在油田动态分析中,利用油井压力恢复曲线分析注水井注水强度变化及工作状态,不仅能帮助我们了解注水井注水强度的变化,计算注采比,还能帮助我们分析水井工作状态,选择合理的注水强度等。这对油田的动态分析或日常生产管理都带来很多益处。本文将介绍作者对这方面的一些认识。

### 一、注水强度与油井压力恢复曲线的关系

设在均质、等厚无限大单层中,有一口井与周围  $n$  口注水井连通,油水井间距离均为  $L$ ,在径向稳定流时,距油井半径  $r$  处的压降,可用迭加原理求得:

$$\Delta P_r = \Delta P_{rH} + \Sigma \Delta P_{rB} \quad (1)$$

$$\text{而} \quad \Delta P_{rH} = \frac{2.3Q_H \mu_H}{2\pi kh(k_H + \mu_0 k_B)} \lg \frac{R_k}{r} \quad (2)$$

$$\Sigma \Delta P_{rB} = \sum_{m=1}^n \left( \frac{2.3Q_B \mu_B}{2\pi kh} \lg \frac{R_k}{L-r} \right) \quad (3)$$

$$\text{令} \quad \bar{R} = \frac{\Sigma Q_B}{Q_H} \quad \frac{\mu_B}{\mu_H} = \mu_0$$

$$\text{则} \quad \Sigma Q_B = Q_H \bar{R} \quad \mu_B = \mu_H \mu_0$$

代入(1)式得:

$$\Delta P_r = \frac{2.3Q_H \mu_H}{2\pi kh(k_H + \mu_0 k_B)} \lg \frac{R_k}{r} - \frac{2.3Q_H \bar{R} \mu_H \mu_0}{2\pi kh} \lg \frac{R_k'}{L-r} \quad (4)$$

$$\text{若令} \quad R_k = R_k' = L \quad \bar{R} = 1$$

则(4)式为:

$$\Delta P_r = \frac{2.3Q_H \mu_H}{2\pi kh} \left[ \frac{1}{(k_H + \mu_0 k_B)} \lg \frac{R_k}{r} - \bar{R} \mu_0 \lg \frac{R_k}{R_k - r} \right] \quad (5)$$

当  $r$  很小时

$$\frac{R_k}{R_k - r} \approx 1 \quad \text{可忽略}$$

$$\therefore \Delta P_r = \frac{2.3 Q_H \mu_H}{2\pi kh(k_H + \mu_0 k_B)} \lg \frac{R_k}{r} \quad (6)$$

$$\Delta P_{rc} = \frac{2.3 Q_H \mu_H}{2\pi kh(k_H + \mu_0 k_B)} \lg \frac{R_k}{r_c} \quad (7)$$

若令  $\bar{R} \neq 1$ , 则  $\Sigma Q_B = Q_H + Q_{\text{水}}(\bar{R} - 1)$  利用前述方法得:

$$\Delta P_{rc} = \frac{2.3 [Q_H + Q_{\text{水}}(\bar{R} - 1)] \mu_H}{2\pi kh(k_H + k_B \mu_0)} \lg \frac{R_k}{r_c} \quad (8)$$

用(8)式减(7)式得:

$$\Delta(\Delta P_{rc}) = \frac{2.3 Q_{\text{水}}(\bar{R} - 1) \mu_H}{2\pi kh(k_H + k_B \mu_0)} \lg \frac{R_k}{r_c} \quad (9)$$

又据压力恢复曲线知:

$$\Delta P = \frac{2.3 Q_H \mu_H}{4\pi kh(k_H + \mu_0 k_B)} \lg \frac{2.25 \alpha e t}{r_c^2} = i \lg \frac{2.25 \alpha e t}{r_c^2}$$

$$\therefore i = \Delta P_{rc} / \lg \frac{2.25 \alpha e t}{r_c^2} \quad (10)$$

$$\Delta i = \Delta(\Delta P_{rc}) / \lg \frac{2.25 \alpha e t}{r_c^2} \quad (11)$$

将(9)式代入(11)式得:

$$\Delta i = \frac{\frac{2.3 Q_{\text{水}}(\bar{R} - 1) \mu_H}{2\pi kh(k_H + k_B \mu_0)} \lg \frac{R_k}{r_c}}{\lg \frac{2.25 \alpha e t}{r_c^2}} \quad (12)$$

简化后得:

$$\Delta i = C(\bar{R} - 1) \quad (13)$$

$$\bar{R} = \frac{\Delta i}{C} + 1 \quad (14)$$

$$\text{而 } C = \frac{2.3 Q_{\text{水}} \mu_H}{2\pi kh(k_H + k_B \mu_0)} \lg \frac{R_k}{r_c} \quad (15)$$

从(13)式看出, 油井压力恢复曲线斜率的变化  $\Delta i$ , 是正比于注采比  $\bar{R}$  的。在油井工作制度不变时,  $i$  上升, 标志着  $\bar{R}$  上升。 $i$  稳定则说明  $\bar{R}$  不变, 水井工作制度稳定不变。因此, 我们可以利用油井压力恢复曲线来了解水井工作状况和注采比。

当油水井间多层连通时, 由于多层压力相当于按单层流动系数的权衡平均值,

$$\text{即 } \Delta(\Delta P_{rc}) = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta(\Delta P_{rc})_j \left(\frac{kh}{\mu}\right)_j}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{kh}{\mu}\right)_j} \quad (16)$$

因此  $\Delta i = C(\bar{R} - 1)$  的关系仍然成立。而此时

$$C = \frac{2.3Q_H \lg \frac{R_k}{r_c}}{2\pi \sum_{j=1}^n \left[ \frac{kh}{\mu} (k_i \mu_o + k_{Hj}) \right]} \quad (17)$$

$$C = \frac{\lg \frac{2.25\alpha t}{r_c^2}}{\lg \frac{2.25\alpha t}{r_c^2}}$$

(15)式和(17)式还可简化为

$$C = \frac{\lg \frac{R_k^2}{r_c^2}}{\lg \frac{0.039Q_H t}{ihr_c^2 \beta^*}} = \frac{2 \lg \frac{R_k}{r_c}}{\lg \frac{0.039Q_H t}{ihr_c^2 \beta^*}} \quad (18)$$

(18)式中单位均为工程单位，时间 $t$ 用分钟； $R_k$ 、 $r_c$ 、 $h$ 用米； $Q_H$ 用吨/日，为井口产量； $\beta^*$ 为综合压缩系数，单位为 $1/\text{大气压}$ 。

## 二、注水强度变化与油井压力恢复曲线形状的关系

据  $i = \Delta P / \lg \frac{2.25\alpha t}{r_c^2}$  分析，即知压力恢复曲线形状与注水强度变化，在相同油

阻条件下有如下关系：

1. 当  $P_c < P_H$  时，压力恢复曲线形状多为续流型或续流直线型。

若： $\bar{R} = 1$ ，则 $i$ 不变，曲线形状不变；

$\bar{R} < 1$ ，则 $i$ 下降，曲线上续流段延长或不动；

$\bar{R} > 1$ ，则 $i$ 上升，曲线上续流段缩短或不动；

2. 当  $P_c > P_H$  时，压力恢复曲线多为直线型。

若：

$\bar{R} = 1$ ， $i$ 不变，图形不变；

$\bar{R} > 1$ ， $i$ 上升，图形不变；

$\bar{R} < 1$ ， $i$ 下降，图形不变。

3. 当油井见水后，随着井筒中含水量的增加，井筒流压上升。当流压上升幅度小于静压上升幅度时，变化规律与1、2条相同。但当流压上升幅度大于静压上升幅度时，

若： $\bar{R} = 1$ ， $i$ 下降；

$\bar{R} > 1$ ， $i$ 下降或稳定；

$\bar{R} < 1$ ， $i$ 下降。

油井放产后一般情况是 $i$ 上升，续流现象增加，此时 $\bar{R} < 1$ 。若油井放产后出现 $i$ 稳定或上升，续流缩短或稳定则此时 $\bar{R} \geq 1$ 。

## 三、利用油井压力恢复曲线分析注采比变化的实例

表1是3-3丁26井自1973年6月投产以来，压力恢复曲线斜率变化较大的几个阶段与此

3-3丁26井压力恢复曲线与注水情况表

表 1

项目	时间 (年·月·日)	油咀 (毫米)	产液 (吨/日)	含水 (%)	流压 (大气压)	静压 (大气压)	生产压差 (吨/日· 大气压)	i	t <sub>i</sub>	曲线形态	R	3-2水26		3-4水26		3-4水25	
												日注量 (方)	强度	日注量 (方)	强度	日注量 (方)	强度
1	75.5.22	7	37	18	70.2	97.7	27.5	15.1	250	续直状	0.98	130	10.3	89	10.9	101	18.4
	75.7.21	7	37	20	67.7	101.7	34.0	22.9	250	续直状	1.25	125	10.0	114	13.9	110	20
	变化				降	升	升	升	稳		升		稳		升		升
2	77.4.6	8	40	43	67.7	98.7	31	22.7	150	续直状	0.98	179	14.2	146	17.8	123	22.4
	77.5.10	8	40	40	78.2	110.8	32	5.0	300	续直状	-1.86	131	10.4	105	12.8	126	22.9
	变化				升	升	稳	降	增		降		降		降		稳
3	77.7.18	8	48	38	80.3	105.4	25.1	13.0	200	续直状	1.46	140	11.1	125	15.2	124	22.1
	变化				升	降	降	升	降		升		升		升		稳
4	77.12.16	9	50	54	77.5	113.0	35.5	14	200	续直状	1.05	158	12.6	134	16.3	116	21.1
	78.4.11	9	51	65	78.1	113.4	35.3	18	200	续直状	1.16	187	14.8	151	18.4	70	12.7
	变化				稳	稳	稳	升	稳		升		升		升		降
5	78.10.21	9	51	52	78.6	113.2	34.6	11.3	200	续直状	0.52	110	8.8	20	2.4	20	3.6
	79.1.19	12	108	73	87.6	135.0	47.4	36.0	10	直 状	1.49	187	14.8	50	6.1	50	9.1
	变化				升	升	升	升	减		升		升		升		升

时注水井日注水强度变化的对照表。表中*i*为斜率，*t<sub>i</sub>*为续流消失时间。注采比 $\bar{R}$ 由(18)式和(14)式算出。

3-3丁26井是合采萨加蓓油层，全井地层系数为3748毫达西·米，有效厚度为14.1米，原始压力为96.4大气压，饱和压力为86大气压；与三口注水井连通，其中与3-2水26井最近，井距只有275米，其余都大于500米。图1a、1b、1c、1d是本井自投产以来所测的24条压力恢复曲线的一部分。

从表1和图1a、1b、1c、1d中可看出如下几点：

1. 当井中流压小于饱和压力时实测压力恢复曲线呈续直型。当流压大于饱和压力时则呈直线状。

2. 压力恢复曲线上斜率的升降，续流影响的增减与注水井注水强度变化成正比。

3. 用本法计算的 $\bar{R}$ 变化规律与水井注水强度变化规律是一致的。

4. 从表1得知，由于静压计算值受仪器下入深度的影响而出现误差，此时若靠压力的升降来分析注水强度变化，有时就会不准确。压力恢复曲线的斜率和形状变化规律确与注水

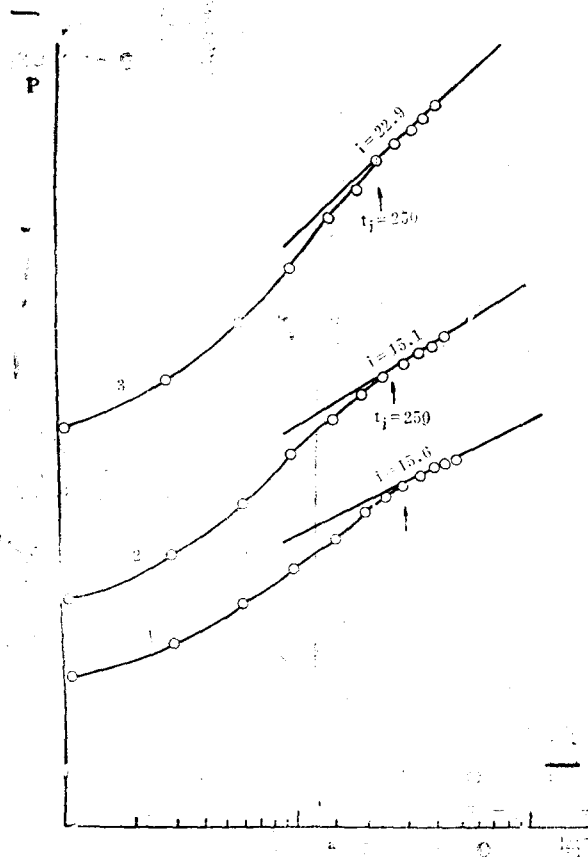


图1a 3-3丁26井

- 1, 74.10.20 油咀7mm,  $Q=35$   $B=18.5$   $P_i=94.5$   $P_c=65.5$
- 2, 75.5.22 油咀7mm,  $\bar{R}=0.98$   $Q=37$   $B=18$   $P_i=97.7$   $P_c=70.2$
- 3, 75.7.21 油咀7mm,  $\bar{R}=1.25$   $Q=37$   $B=20$   $P_i=101.7$   $P_c=67.7$

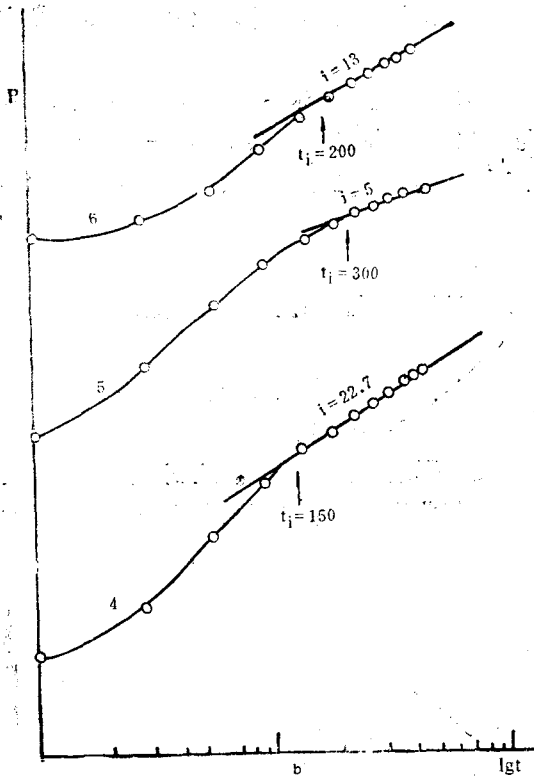


图1b 3-3丁26井

- 4, 77.4.6 油咀8mm,  $\bar{R}=0.98$   $Q=40$   $B=43$   $P_t=98.7$   
 $P_c=67.7$
- 5, 77.5.10 油咀8mm,  $\bar{R}=-1.86$   $Q=40$   $B=40$   
 $P_k=110.8$   $P_c=78.2$
- 6, 77.7.18 油咀 8mm,  $\bar{R}=1.46$   $Q=48$   $B=38$   
 $P_t=105.4$   $P_c=80.3$

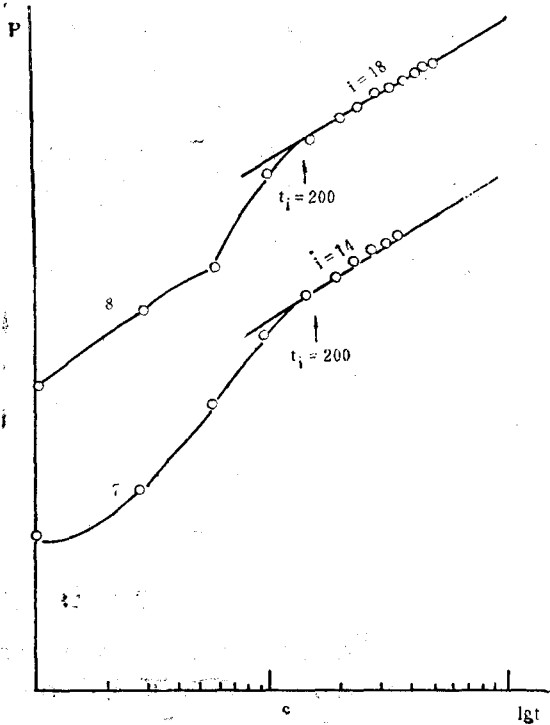


图10 3-3丁26井

- 7, 77.12.16 油咀 9mm  $\bar{R}=1.05$   $Q=50$   $B=54$   
 $P_t=113$   $P_c=77.5$
- 8, 78.4.11 油咀9mm,  $\bar{R}=1.16$   $Q=51$   $B=65$   
 $P_t=113.4$   $P_c=78.1$

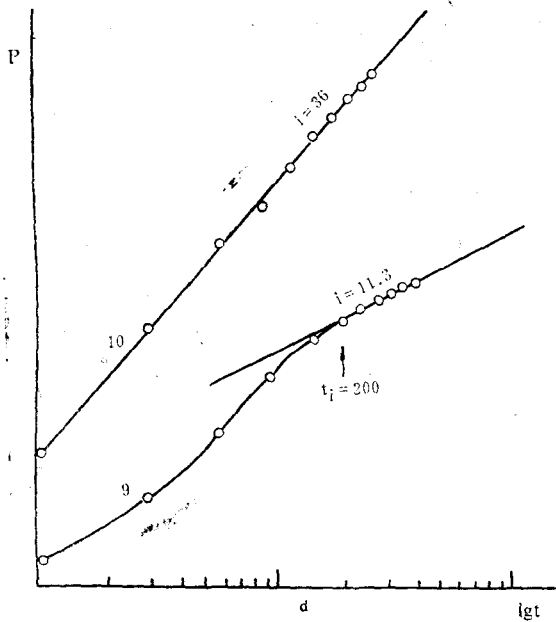


图1d 3-3丁26井

9,78.10.21 油阻9mm,  $\bar{R}=0.52$   $Q=51$   $B=42$

$P_i=113.2$   $P_c=78.6$

10,79.1.19 油阻12mm  $\bar{R}=1.49$   $Q=108$   $B=73$

$P_i=135$   $P_c=87.6$

强度变化吻合，是动态分析的有力佐证。

5. 利用斜率变化与注水强度的关系，可以确定合理的注采比  $\bar{R}$ 。

$$\text{即 } \bar{R} = \frac{i - i_0}{C} + 1$$

式中：

$i$ ——目前压力恢复曲线斜率，

$i_0$ ——使油流动系数保持较高水平时的压力恢复曲线斜率。也可用下式求

$$i_0 = \Delta P / \lg \frac{2.25 \alpha c t}{r_c^2} ;$$

$\Delta P$ ——保持采油指数稳定不变时的压差。

图 2 是 3-3 丁 26 井投产以来的斜率、含水和流动系数关系曲线。从此图中看出，如果

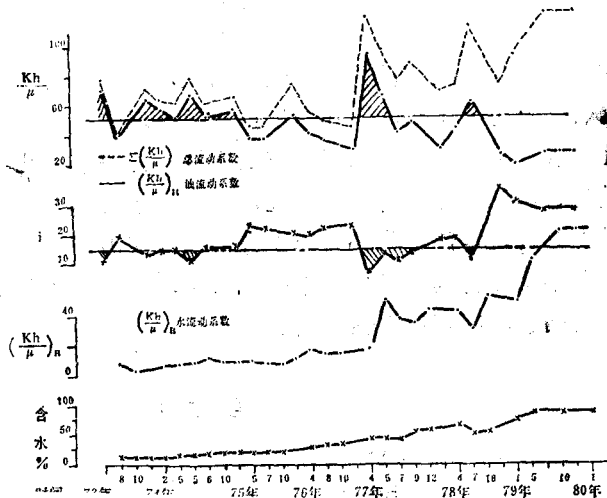


图2

使压力恢复曲线斜率,能够保持在含水20%以前,斜率大小的水平( $i \leq 15$ 左右),则此合采井的油流动系数始终最高(图中阴影区)。据此可以指导我们确定多层合采井的压力界限。

#### 四、利用油井压力恢复曲线分析水井套管变形时间

压力恢复曲线的形状和斜率,与注水井注水强度的变化成正比。据此,我们不仅可以掌握注采比的变化,而且还可判断注水井井下工具的工作状况,注水井封隔器是否失效,套管是否变形、破裂等问题。这是因为当注水井形成笼统注水时,总会使与油井连通好的高渗透层大量超注而形成特高压层。由于水井注入水单层突进,使油井含水上升快,流压升高,其余油层因能量得不到补充压力迅速下降。这样油井所测的压力恢复曲线会突然变成斜率很高的直线状曲线。它主要反映了高压、高含水层的恢复状况。注水井封隔器失效,套管破裂、变形等原因均会造成注水井笼统注水和单层突进。若此时不能立即控制水井注入量,或者未及时发现水井的这些变化情况而仍然强注时,油井中高渗透层水线推进快,压力升得高,油井见水快或含水上升快,井底流压也迅速上升。单层突进与流压突升的结果,必然会使压力恢复曲线形状、斜率发生剧变,掌握住此突变时间,即知水井管柱与井下工具是否正常。

例如3-3丁26井1979年1月19日测出的压力恢复曲线突变为斜率和压力均高的直线状曲线(见图1d曲线10,和表1),说明注水井有封隔器失效及笼统注水的现象。1979年7月9日检查水井3-2水26井的管柱时,发现套管变形并拔断了油管。由于本井距3-2水26井很近,水井日注量也很高,套管变形后极易造成笼统注水,从而证实本井压力恢复曲线的变化是由于水井套管变形引起的。据压力恢复曲线变化时间,可以推断水井套管变形时间在1978年12月左右。

单层突进井的压力恢复曲线有近似于直线状的波浪出现,并呈无限大供给边界的反映。这是油井中某一油层水淹并成为水淹区的一部分的象征。曲线上的波浪是这一高压高含水油层向井中其余油层倒灌、干扰的结果。这些现象又为我们选择堵水井(层),调整挖潜提供了依据。

#### 小 结

通过前述分析看出,利用油井压力恢复曲线,可以分析注水井的情况,计算井组注采比判断注水井的管柱及井下工具的工作状况,选择合理注采强度等。这不仅为动态分析增加了手段,也为生产管理提供了新的依据。特别是目前井组注采比计算比较困难,压力计算方法还不完善的情况下,应用本法计算注采比,了解注水井动态,更有一定优点,再结合其它资料进行单井动态分析,定能使我们为油田稳产挖潜作出新贡献。

本法也存在不足,特别是当斜率下降很大时,计算的注采比有时会出现负值。若经检查确认斜率求法无问题,则可作定性分析。

#### 符号注释

$\Delta P_r$ ——地层中r处的压降 公斤/厘米<sup>2</sup>;

$\Delta P_{rH}$ ——距油井r处的压降 公斤/厘米<sup>2</sup>;



$\Delta P_{\cdot B}$ ——距水井(L-r)处的压降 公斤/厘米<sup>2</sup>;

$Q_H$ ——产液量 厘米<sup>3</sup>/秒 (地下);

$Q_B$ ——注水量 厘米<sup>3</sup>/秒 (地下);

$\mu_H$ ——原油地下粘度 厘泊;

$\mu_B$ ——注入水地下粘度 厘泊;

$\mu_0$ ——地下流体粘度;

$R_k$ ——供油半径 厘米;

$R'_k$ ——注水井控制半径 厘米;

$L$ ——油水井间距离 厘米;

$h$ ——油层有效厚度 厘米;

$r_c$ ——折算半径 厘米;

$k$ ——地层渗透率 达西;

$k_H$ ——油相相对渗透率 %;

$k_B$ ——水相相对渗透率 %;

$\alpha$ ——导压系数 厘米<sup>2</sup>/秒;

$t$ ——关井时间 秒;

$j$ ——小层数,  $j = 1, 2, 3, \dots$ ;

$m$ ——油井数,  $m = 1, 2, 3, \dots$ ;

$i$ ——压力恢复曲线斜率 大气压;

$\Delta i = i_2 - i_1$

$i_1, i_2$ ——相邻前后两条压力恢复曲线斜率;

$\bar{K}$ ——注采比;

$P_H$ ——饱和压力 大气压;

$P_c$ ——流压 大气压;

$P_s$ ——关井t时间压力 大气压;

$B$ ——含水率;

$t_s$ ——续流段消失时间 分。