

文章编号: 0253-2697(2013)05-0932-06 DOI: 10. 7623/syxb201305014

# 低渗透裂缝性油藏调剖选井无因次压力指数决策方法

冯其红<sup>1</sup> 王森<sup>1</sup> 陈存良<sup>1</sup> 徐春梅<sup>2</sup> 陈荣环<sup>2</sup> 刘保彻<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学石油工程学院 山东青岛 266580; 2. 中国石油长庆油田公司油气工艺研究院 陕西西安 710018)

**摘要:**从低渗透裂缝性油藏的特点出发,分析了将压力指数(PI)决策方法用于低渗透裂缝性油藏调剖选井时遇到的问题,并在PI值的基础上提出了一种新的组合参数——无因次PI值。在考虑启动压力梯度和裂缝影响的条件下利用分形几何方法推导了无因次PI值的物理意义,其与储层原始地层系数和当前地层系数的比值成正比,且无因次PI值越小,储层渗流能力增大得越多,存在优势通道的可能性越大,就越需进行调剖。最后在此基础上建立了低渗透裂缝性油藏调剖选井无因次压力指数决策方法,通过将该方法应用于长庆油田五里湾一区,证明了其有效性。

**关键词:**低渗透;裂缝性油藏;调剖;压力指数;分形几何;决策方法

中图分类号: TE357 文献标识码: A

## A new decision method based on dimensionless pressure index for profile control of low-permeability fractured reservoirs

FENG Qihong<sup>1</sup> WANG Sen<sup>1</sup> CHEN Cunliang<sup>1</sup> XU Chunmei<sup>2</sup> CHEN Ronghuan<sup>2</sup> LIU Baoche<sup>2</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Oil & Gas Technology Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of low-permeability fractured reservoir, the problems encountered when applying Pressure Index (PI) decision making technology to profile control of the reservoir are analyzed. And a new parameter—Dimensionless Pressure Index (DPI) is presented on the basis of PI. Moreover, the physical rationale of DPI is deduced with fractal geometry on condition that threshold pressure gradient and fractures are taken into account. DPI is found proportional to the ratio between the initial and present formation conductivities of the reservoir. The smaller the DPI, the greater increment of reservoir seepage capacity, the more likely thief zone exists in the formation, thus the more the profile control is needed. Finally, a decision making technology based on DPI is put forward for low-permeability fractured reservoir, and applied to Wuliwan No. 1 Block in Changqing oilfield.

**Key words:** low-permeability; fractured reservoir; profile control; pressure index; fractal geometry; decision method

低渗透裂缝性油藏易发生暴性水淹,使油藏采收率降低。但通过合理的调剖工艺,可以有效地提高注入水的波及系数、降低受效井的含水率、提高产油量<sup>[1-3]</sup>。然而,现有的调剖技术多集中于调剖剂的研发<sup>[3]</sup>,与其相配套的油藏工程方法则研究甚少。在实际应用中,基本都是采用针对中高渗油藏的调剖选井决策方法、优势通道识别方法和调剖效果预测方法指导低渗透裂缝性油藏的调剖工艺。但由于低渗透裂缝性油藏具有微裂缝普遍发育和存在启动压力梯度等特殊性,采用已有方法会导致调剖措施的失效。因此,有必要对低渗透裂缝性油藏调剖的油藏工程

理论进行研究。笔者等分析了将压力指数(PI)决策方法用于低渗透裂缝性油藏调剖选井遇到的问题,并在PI值的基础上提出了一种新的组合参数——无因次PI值(DPI),并进一步在考虑启动压力梯度和裂缝影响的条件下利用分形几何方法推导了其物理意义,最终建立了低渗透裂缝性油藏调剖选井无因次压力指数决策方法。

### 1 低渗透裂缝性油藏调剖选井中存在的问题

压力指数是由水井井口压降曲线求出的用于调剖

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05013-005,2011ZX0524-002-002),教育部“长江学者和创新团队发展计划”(IRT1294),国家自然科学基金项目(No. 51174222)和中央高校科研业务费专项资金项目(13CX06028A)资助。

第一作者:冯其红,男,1969年6月生,1993年毕业于石油大学(华东)油藏工程专业,2004年获中国石油勘探开发研究院油气田开发工程专业博士学位,现为中国石油大学(华东)教授、博士生导师,主要从事油藏工程方面的教学和科研工作。Email:fengqihong@126.com

通信作者:王森,男,1986年5月生,2009年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,现为中国石油大学(华东)博士研究生,主要从事油气渗流理论与应用等方面的研究工作。Email:wangsenal@126.com

决策的重要参数,其定义为<sup>[4]</sup>

$$I_{PI} = \int_0^{t_c} p(t_c) dt_c / t_c \quad (1)$$

式中: $I_{PI}$ 为水井的压力指数, MPa; $p$ 为随关井时间 $t_c$ 变化的水井井口压力, MPa; $t_c$ 为关井时间, min。

由于水井的 PI 值与地层渗透率反相关,与吸水强度( $q/h$ )成正比,因此 PI 值越小,越须进行调剖<sup>[4]</sup>。此外,为了使水井的 PI 值可与区块中其他水井的 PI 值相比较,须将各水井的 PI 值改正至一个相同的吸水强度值,即 PI 改正值。

$$I_{PI}^G = I_{PI} \frac{h}{q} G \quad (2)$$

式中: $I_{PI}^G$ 为 PI 改正值(在 PI 决策方法中,作为调剖决策参数), MPa; $q$ 为注水井关井前的注入量, m<sup>3</sup>/d; $h$ 为地层厚度, m; $G$ 为区块注水井吸水强度平均值的就近归整值<sup>[5]</sup>, m<sup>3</sup>/(d·m)。

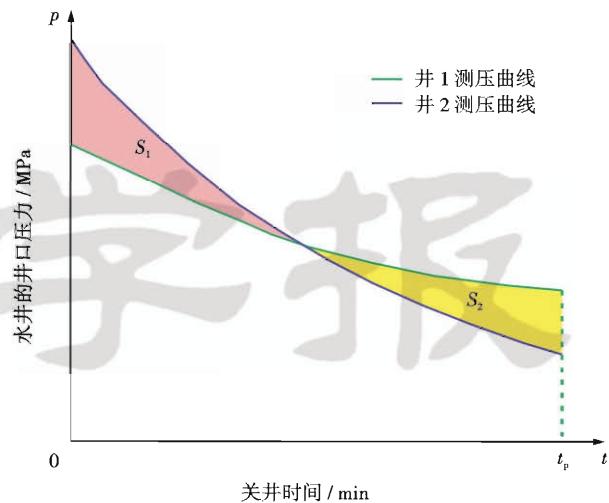
PI 决策方法用于低渗透裂缝性油藏调剖选井主要存在以下问题:

(1) PI 值无法考虑优势通道形成前后储层渗透率的动态变化<sup>[6]</sup>。在油藏开发流体长期的动力地质作用下,储层内微裂缝张开、泥质胶结物溶解、砂粒迁移等使储层孔喉结构逐渐发生变化,部分层位渗透率增大、渗流能力增强,进而形成注入水渗流的优势通道<sup>[7-10]</sup>。然而由 PI 值的定义可知,PI 值仅代表储层目前渗流能力的强弱,无法体现出储层渗透率的变化程度。如果 PI 值比较小,那么可能是储层中已经形成了优势通道,也可能是储层固有的渗流能力较强。虽然 PI 改正值对 PI 值进行了改进,但改进以后得到的数值仍代表储层目前的渗流能力,因此用 PI 改正值进行选井决策可能造成误判。

(2) PI 值存在偏差,在相同的时间内,下降慢的井可能会被误判成需要调剖的井。如图 1 所示,在相同时间内当曲线所围阴影图形的面积  $S_1 = S_2$  时,井 1 和井 2 的 PI 值相等。当  $S_1 > S_2$  时,井 2 的 PI 值大于井 1,如果此时两注水井的吸水强度相同,则井 2 的 PI 改正值大于井 1。若依据 PI 决策方法进行选井,则应对井 1 进行调剖。然而,井 1 的压力降落曲线下降平缓,不需要进行调剖。

对于中高渗油藏,该问题可以通过充满度(FD)<sup>[11]</sup>来辅助解决。但是,对于低渗透裂缝性油藏,FD 却无法解决这一问题。由于低渗透裂缝性储层本身的渗流能力很弱,注水井井口泄压非常慢,泄压幅度就很小。以长庆油田五里湾一区 15 口水井的井口压降测试结果为例,测试 3 h 后的压降幅度一般在 0.1~0.2 MPa,和中高渗油藏几个 MPa 的压降幅度相比很小。因此所有井压降曲线的 FD 数值很大但差别很小,均在

0.984~0.998。由于不同井的充满度数值差别太小,很小的误差都会导致选井结果的错误,因此 FD 无法用于低渗透裂缝性油藏的调剖选井决策。



注: $t_p$  为利用测压曲线进行计算的时刻。

图 1 PI 决策导致选井结果偏差的示意图

Fig. 1 Schematic diagram for erroneous result caused by PI decision making technology

(3) PI 改正值应用于低渗透裂缝性油藏时易于造成混淆和不便。对于低渗透裂缝性油藏,射孔层的吸水层位大多呈尖峰状吸水而且吸水厚度随着注水时间的延长发生明显的偏移。如柳 70-42 井 2 个射孔段的厚度都是 4 m,但测试的吸水厚度分别为 5.8 m 和 3.6 m,已经发生较大变化。那么在对 PI 值进行改正时,如果使用射孔厚度,则与储层目前实际的吸水状况不符;如果使用吸水厚度则还须测试每口井的吸水剖面,大大增加了工作量,限制了 PI 决策方法的应用。

(4) 关井时间的选取不合理。PI 决策中,90 min 的关井时间是针对中高渗油藏的。然而由于低渗透裂缝性油藏渗流能力弱,泄压慢,测试井一般不能在 90 min 内完成主要的压力降落。因此,对于低渗透裂缝性油藏,应当选取更加合理的测试时间。

## 2 无因次压力指数决策方法

### 2.1 无因次压力指数的定义

考虑到 PI 决策方法中所存在的问题,笔者在 PI 值的基础上,提出了一种新的组合参数——无因次 PI 值,其定义为

$$I_{DPI} = \frac{K_i h_i}{1.842 \times 10^{-3} q_w \mu} I_{PI} \quad (3)$$

式中: $I_{DPI}$ 为无因次 PI 值; $K_i$ 为储层原始渗透率,D; $h_i$ 为射孔厚度,m; $q_w$ 为水井关井前的注入量, m<sup>3</sup>/d; $\mu$ 为流体的黏度, mPa·s。

在达西单位制下,无因次 PI 值的定义为

$$I_{\text{DPI}} = \frac{2\pi K_i h_i}{q_w \mu} I_{\text{PI}} \quad (4)$$

## 2.2 无因次压力指数值的物理意义

在低渗透油藏中,储层内流体的渗流呈现低速非达西渗流特征,启动压力梯度的影响不可忽视<sup>[12-13]</sup>,因此可以采用拟启动压力梯度模型<sup>[14]</sup>来描述流体的渗流规律。此外,对于低渗透裂缝性油藏,微裂缝普遍发育对储层内流体的流动和压力传递具有重要影响。利用分形几何学原理研究低渗透裂缝性油藏的孔喉结构和渗流特性已经得到认可<sup>[15-18]</sup>,因此采用分形渗流力学考虑裂缝对注水井井口压降曲线的影响。

令  $\beta = d_f - \theta - 1$ ,  $p_D = \frac{10(p_i - p_w) a V_s m}{q \mu r_w^{1-\beta}}$ ,  $t_D = \frac{10tm}{C_f \mu r_w^{\theta+2}}$ ,  $B = \frac{a V_s m \lambda_B r_w}{q \mu r_w^{1-\beta}}$ ,  $z = \mu^{\frac{\theta+2}{\theta+1}}$ ,  $m_1 = \frac{2}{\theta+2}$ ,  $\delta = \frac{d_f}{\theta+2}$ ,  $v = 1 - \delta$ ,  $M = B \beta (\theta + 2)^{\frac{\beta-2(\theta+1)-1}{\theta+2}} \Gamma\left(\frac{1}{\theta+2}\right) \Gamma\left(\frac{\beta}{\theta+2}\right)$ ,  $H = J_{v-1}^2(m_1 z) + Y_{v-1}^2(m_1 z)$ ,  $N = \sin\left(\frac{d_f + \beta + 1}{2(\theta+2)} \pi\right) J_{v-1}(m_1 z) - \cos\left(\frac{d_f + \beta + 1}{2(\theta+2)} \pi\right) Y_{v-1}(m_1 z)$ 。则低渗透裂缝性油藏井底的无因次压力为<sup>[19]</sup>

$$p_D(1, t_D) = \frac{2(\theta+2)^2}{\pi^2(\beta+1)} \int_0^\infty \left( \frac{1+B}{zH} + \frac{M}{u} \frac{N}{H} \right) \cdot \frac{1 - \exp(-z^2 t_D)}{z^3} u^{\frac{2\theta+3-\beta}{\beta+1}} du \quad (5)$$

式中: $d_f$  为分形维数,是分形体复杂程度的重要标志,复杂程度越高,则  $d_f$  值越大; $\theta$  为分形指数,刻画了分形网络的连通情况,裂缝网络越扭曲,连通性越差, $\theta$  值越大; $p_i$  为地层原始压力,MPa; $p_w$  为井底瞬时压力,MPa; $a$  为单元体密度参数,cm<sup>-d\_f</sup>; $V_s$  为典型单元体体积,cm<sup>3</sup>; $m$  为裂缝网络几何参数,cm<sup>θ+2</sup>; $q$  为流量,cm<sup>3</sup>/s; $r_w$  为井径,cm; $t$  为时间,s; $C_f$  为流体压缩系数,MPa<sup>-1</sup>; $\lambda_B$  为拟启动压力梯度,MPa/dm; $J_{v-1}$ , $Y_{v-1}$  分别为  $v-1$  阶的第一类、第二类 Bessel 函数; $\Gamma(x)$  为伽玛函数。

由式(1)可得

$$I_{\text{PI}} = \frac{1}{t} \int_0^t (p_0 - \Delta p) dt = p_0 - \frac{1}{t} \int_0^t \Delta p dt \quad (6)$$

式中: $p_0$  为水井正常注水时的井口压力,MPa; $\Delta p$  为井口压力降落值(与井底压力降落值相等),MPa。

由式(5)得到低渗透裂缝性油藏井口的压力降落值为

$$\Delta p = \frac{q \mu r_w^{1-\beta}}{10 a V_s m} p_D = \frac{q \mu r_w^{1-\beta}}{10 a V_s m} \frac{2(\theta+2)^2}{\pi^2(\beta+1)} \int_0^\infty \frac{u^{\frac{2\theta+3-\beta}{\beta+1}}}{z^3} \cdot \left( \frac{1+B}{zH} + \frac{M}{u} \frac{N}{H} \right) \left\{ \left[ 1 - \exp(-z^2 \frac{10mt}{C_f \mu r_w^{\theta+2}}) \right] \right\} du \quad (7)$$

因此:

$$\begin{aligned} \frac{1}{t} \int_0^t \Delta p dt &= \frac{q \mu r_w^{1-\beta}}{10 a V_s m} \frac{2(\theta+2)^2}{\pi^2(\beta+1)} \cdot \\ &\quad \frac{1}{t} \int_0^t \int_0^\infty \frac{u^{\frac{2\theta+3-\beta}{\beta+1}}}{z^3} \left( \frac{1+B}{zH} + \frac{M}{u} \frac{N}{H} \right) \cdot \\ &\quad \left\{ \left[ 1 - \exp(-z^2 \frac{10mt}{C_f \mu r_w^{\theta+2}}) \right] \right\} du dt \end{aligned} \quad (8)$$

根据分形油藏的定义

$$K = \frac{a V_s m}{G} r_w^{\beta-1} \quad (9)$$

于是有

$$a V_s m = G K r_w^{1-\beta} \quad (10)$$

再由  $G \phi = a V_s$ ,  $G K r_w^{1-\beta} = a V_s m$  可得

$$m = K r_w^{1-\beta} / \phi \quad (11)$$

式中: $K$  为等效渗透率,D;  $G$  为几何因子,研究对象设定为圆柱对称,因此  $G = 2\pi h'$ <sup>[20]</sup>;  $h'$  为吸水厚度,cm; $\phi$  为孔隙度。

因此,式(8)可化简为

$$\begin{aligned} \frac{1}{t} \int_0^t \Delta p dt &= \frac{q \mu r_w^{1-\beta}}{10 a V_s m} \frac{2(\theta+2)^2}{\pi^2(\beta+1)} \cdot \\ &\quad \frac{1}{t} \int_0^t \int_0^\infty \frac{u^{\frac{2\theta+3-\beta}{\beta+1}}}{z^3} \left( \frac{1+B}{zH} + \frac{M}{u} \frac{N}{H} \right) \cdot \\ &\quad \left\{ \left[ 1 - \exp(-z^2 \frac{\eta t}{r_w^{d_f}}) \right] \right\} du dt \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\eta$  为导压系数, $\eta = \frac{10K}{\phi \mu C_f}$ , cm<sup>2</sup>/s。

由径向流公式可得:

$$\frac{q}{r^\beta} = - \frac{a V_s m}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial r} - \lambda_B \right) \quad (13)$$

$$\int_{r_w}^{r_e} \frac{q}{r^\beta} dr = \frac{a V_s m}{\mu} \int_{r_e}^{r_w} \left( \frac{\partial p}{\partial r} - \lambda_B \right) dr \quad (14)$$

式中: $r$  为距井轴的径向距离,cm; $r_e$  为注水井的控制半径,cm。

当  $\beta \neq 1$  时,由式(14)可得:

$$q \frac{(r_e^{1-\beta} - r_w^{1-\beta})}{1-\beta} = \frac{a V_s m}{\mu} [10 \Delta p_{wh} - \lambda_B (r_w - r_e)] \quad (15)$$

式中: $\Delta p_{wh} = p_w - p_e$ , MPa; $p_e$  为水井控制面积内边界处的压力,MPa。

则

$$\Delta p_{wh} = \frac{\lambda_B}{10} (r_w - r_e) + \frac{qu}{10 a V_s m} \frac{(r_e^{1-\beta} - r_w^{1-\beta})}{1-\beta} \quad (16)$$

因此:

$$p_m = p_w + \frac{\lambda_B}{10} (r_w - r_e) + \frac{q \mu}{10 a V_s m} \frac{(r_e^{1-\beta} - r_w^{1-\beta})}{1-\beta} \quad (17)$$

式中: $p_m$  为地层吸水时井口的启动压力,MPa。

当  $\beta = 1$  时,由式(14)可得:

$$q \ln \frac{r_e}{r_w} = \frac{aV_s m}{\mu} [\Delta p_{wh} - \lambda_B (r_w - r_e)] \quad (18)$$

$$p_0 = p_m + \frac{\lambda_B}{10} (r_w - r_e) + \frac{q\mu}{10aV_s m} \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (19)$$

$$\text{定义 } E = \begin{cases} \frac{1}{10} \frac{r_w^{\beta-1}}{1-\beta} (r_e^{1-\beta} - r_w^{1-\beta}), & \beta \neq 1 \\ \frac{1}{10} r_w^{\beta-1} \ln \frac{r_e}{r_w}, & \beta = 1, \end{cases}$$

$$F = \frac{(\theta+2)^2}{5\pi^2(\beta+1)} \frac{1}{t} \int_0^t \int_0^\infty \left( \frac{1+B}{zH} + \frac{MN}{uH} \right) u^{\frac{2\theta+3-\beta}{\beta+1}} \{ [1 -$$

$\exp(-z^2 \frac{\eta t}{r_w^d})] \} du dt$ , 则由式(17)和式(19)可得:

$$p_0 = p_m + \frac{\lambda_B}{10} (r_w - r_e) + \frac{q\mu}{aV_s m} r_w^{1-\beta} E \quad (20)$$

由式(6)、式(12)和式(20)可得:

$$I_{PI} = p_m + \frac{\lambda_B}{10} (r_w - r_e) + \frac{q\mu r_w^{1-\beta}}{aV_s m} E - \frac{q\mu r_w^{1-\beta}}{aV_s m} F \quad (21)$$

由于  $p_m$  很小, 可以忽略, 因此根据式(10)可将式(21)化简为

$$I_{PI} = \frac{\lambda_B}{10} (r_w - r_e) + \frac{q\mu}{2\pi h' K} (E - F) \quad (22)$$

由无因次 PI 值的定义可得:

$$I_{DPI} = \frac{2\pi K_i h_i}{q\mu} I_{PI} = \frac{\pi K_i h_i}{5q\mu} \lambda_B (r_w - r_e) + \frac{K_i h_i}{Kh} (E - F) \quad (23)$$

由于  $\lambda_B$  很小, 因此式(23)可近似为

$$I_{DPI} \approx \frac{K_i h_i}{Kh} (E - F) \quad (24)$$

由式(24)可得,  $I_{DPI}$  的物理意义近似为储层原始地层系数和目前地层系数之比与常数的乘积。该值越小, 开发过程中水井周围地层渗流能力增大的越多, 存在优势通道的可能性越大, 越需调剖。

对式(22)进行验证, 当  $d_f = 2, \theta = 0$  时, 即不考虑裂缝的情况下, 式(22)可简化为

$$I_{PI} = \frac{\lambda_B}{10} (r_w - r_e) + \frac{q\mu}{20\pi h' K} \cdot \left[ \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{4}{\pi^2 t} \int_0^t \int_0^\infty \frac{1+B - \frac{B}{2}\pi Y_1(u)}{J_1^2(u) + Y_1^2(u)} \frac{1 - \exp(-u^2 t_D)}{u^3} du dt \right] \quad (25)$$

当  $\lambda_B = 0$  时, 即没有启动压力梯度情况下, 可化简为

$$I_{PI} = \frac{q\mu}{20\pi h' K} \left\{ \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{4}{\pi^2 t} \int_0^t \int_0^\infty \frac{1 - \exp(-u^2 t_D)}{[J_1^2(u) + Y_1^2(u)]u^3} du dt \right\},$$

由于存在以下等式<sup>[21]</sup>:

$$\frac{4}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{1 - \exp(-u^2 \frac{\eta t}{r_w^2})}{J_1^2(u) + Y_1^2(u)} \frac{1}{u^3} du = \frac{1}{2} \left[ -Ei\left(-\frac{r_w^2}{4\eta t}\right) \right] \quad (26)$$

且当  $\frac{r_w^2}{4\eta t} \leqslant 0.01$  时, 由

$$-Ei\left(-\frac{r_w^2}{4\eta t}\right) = \ln\left(\frac{4\eta t}{r_w^2}\right) - 0.5772 = \ln\left(\frac{2.25\eta t}{r_w^2}\right) \quad (27)$$

因此:

$$I_{PI} = \frac{q\mu}{20\pi h' K} \left[ \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2t} \int_0^t \ln\left(\frac{2.25\eta t}{r_w^2}\right) dt \right] = \frac{q\mu}{40\pi h' K} \left[ \ln\left(\frac{r_e^2}{0.8277\eta t}\right) \right] \quad (28)$$

式(28)为中高渗油藏 PI 值的物理意义, 转换成工程单位制后即为文献[4]中的式(10), 进一步验证了模型的正确性。

### 2.3 无因次压力指数值的优势

无因次 PI 值考虑了储层的原始渗透率, 消除了储层本身泄压能力对压降曲线的影响。无因次 PI 值还是对储层渗流能力增强程度的度量, 其大小与水井关井前的工作制度, 如注入压力、注入量等无关, 因此同一区块内不同水井的无因次 PI 值之间可以直接进行相互比较。而且 PI 值与无因次 PI 值并不是相互矛盾的, 其分别从两个不同的角度对储层的渗流能力进行了描述。PI 值反映的是储层目前的渗流能力, 而无因次 PI 值则反映的是开发过程中储层渗流能力增强的程度。

在以上数学模型中, 中高渗油藏可作为低渗透裂缝性油藏的特殊情形(启动压力梯度  $\lambda_B = 0$ , 裂缝的分形维数  $d_f = 2$ , 分形指数  $\theta = 0$ )。因此, 对于中高渗油藏, 无因次 PI 值仍与储层原始地层系数和目前地层系数的比值成正比。

无因次 PI 保留了 PI 值简单实用的特性, 仅与计算时间的选取有关。而计算时间选取的原则为在关井时间内, 测试井要完成主要的压力降落幅度, 即曲线信息要能反映出井筒、井壁区以至近井地带一定范围内的地层信息。根据现场测试实践, 推荐使用 3 h 作为低渗透裂缝性油藏压力降落测试的关井时间。

### 2.4 无因次压力指数决策方法

在实际应用中, 可按照以下步骤使用无因次 PI 值进行低渗透裂缝性油藏的调剖选井决策:

(1) 对区块内各水井的井口压力降落曲线进行测试, 应尽量保证测试时间段内邻近各井的工作制度发生变化。对于低渗透裂缝性油藏, 笔者推荐的关井测试时间为 3 h。

(2) 在测试完成后, 绘制注水井井口的压降曲线。

(3) 利用式(1)计算各水井的 PI 值,然后利用式(3)计算各水井的无因次 PI 值。

(4) 选择低于区块平均无因次 PI 值的水井为调剖井,在区块平均无因次 PI 值附近以及高于区块平均无因次 PI 值的水井不予以处理。

### 3 应用实例

五里湾一区位于鄂尔多斯盆地陕北油气叠合富集带,为中国陆上罕见的大面积复合连片特低渗透油气藏。其主产层平均有效厚度为 12.5 m,平均有效孔隙度为 12.69%,平均渗透率为 1.81 mD。五里湾长 6 油藏 1996 年投入开发试验,截至 2007 年 12 月,区块综合含水低于 20%,产量稳定。此后,区块进入中含水开发期,产量进入递减阶段。目前区块综合含水为 38.4%,但单井含水分布差异较大。计划调剖区内综合含水为 44.7%,但高含水井所占比例达到 1/3。经油水井生产动态关系对比分析发现区块内已经发育有明显的优势通道。

对计划调剖区内 15 口水井进行了井口压力降落曲线的测试,并分别利用 PI、FD 和 DPI 进行选井决策(表 1)。由 FD 的计算结果可见,FD 的数值很大但不同井的数值差别很小,因此结合前文的分析可知 FD 不适用于低渗透裂缝性油藏的调剖选井决策。比较 PI 和 DPI 的选井结果可以发现,对于大多数井,两种方法的决策结果相同,但对于极个别井的决策结果不同。如 62-400 井 PI 改正值较大,PI 决策结果不需要调剖,然而可能出现的情况是:储层中已经形成了优势通道,但是由于储层原始渗透率很小,因此优势通道的表现被弱化了。由 DPI 的计算结果可以发现,该井的 DPI 值很小,说明储层目前的吸水能力比原始状态增大了很多,应进行调剖。该结果与现场分析结果一致,说明 DPI 决策方法更合理、更符合实际。根据该决策意见现场施工后,该井吸水剖面得到了明显改善,井组的日产液量增加了 3 m<sup>3</sup>/d,日产油量由 17.9 t/d 上升到了 21.4 t/d,平均含水率下降了 4.15%,取得了较好的增油降水效果。

表 1 PI、FD 和 DPI 选井决策结果

Table 1 Decision making results of PI, FD and DPI

井号	日注入量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	射孔厚度/ m	吸水强度/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> )	渗透率/ mD	PI 值/MPa	PI 改正值/ MPa	PI 决策 结果	FD 值	FD 决策 结果	DPI 值	DPI 决策 结果
62-400	38.5	12.0	3.208	0.6900	6.688	12.508		0.988	调剖	1.562	调剖
63-38	41.4	9.0	4.600	4.0979	5.517	7.196	调剖	0.992		5.336	调剖
64-41	43.0	8.8	4.886	3.7400	7.378	9.060	调剖	0.992		6.132	调剖
65-40	40.8	6.0	6.800	3.4889	7.743	6.832	调剖	0.994		4.314	调剖
67-48	40.1	4.0	10.025	1.5738	9.039	5.410	调剖	0.996		1.541	调剖
69-48	36.5	7.0	5.214	4.2516	11.430	13.152		0.989	调剖	10.119	
70-42	40.1	10.0	4.010	3.3767	10.059	15.051		0.996		9.197	
71-46	39.4	5.5	7.164	3.8784	10.509	8.802	调剖	0.998		6.177	调剖
71-48	44.8	10.0	4.480	3.9173	17.889	23.958		0.997		16.984	
73-46	41.9	10.0	4.190	3.8550	11.605	16.618		0.984	调剖	11.592	
73-48	41.9	11.0	3.809	4.1917	11.371	17.911		0.988	调剖	13.586	
75-43	30.8	6.0	5.133	3.8563	11.509	13.451		0.998		9.387	
75-45	35.9	6.0	5.983	4.6228	11.910	11.943		0.981	调剖	9.991	
77-44	41.0	6.0	6.833	2.1512	10.822	9.502	调剖	0.994		3.699	调剖
77-46	30.8	7.0	4.400	3.0095	10.944	14.923		0.985	调剖	8.127	

### 4 结 论

(1) 对于低渗透裂缝性油藏,PI 决策方法无法考虑优势通道形成前后储层渗透率的动态变化,选井结果存在偏差,测试时间不合理,且由于吸水厚度发生变化因此在应用时易造成混淆和不便。

(2) 在考虑启动压力梯度和裂缝影响的条件下利用分形几何原理推导了无因次 PI 值,其与储层原始地层系数和当前地层系数的比值成正比。无因次 PI 值越小,储层渗流能力越大,越需要进行调剖。并以此为基础提出了低渗透裂缝性油藏调剖选井无因次压力指

数决策方法。该方法在长庆油田五里湾一区取得了较好的增油降水效果,进一步证明了 PI 决策方法的有效性。

### 参 考 文 献

- [1] 刘玉章,熊春明,罗健辉,等.高含水油田深部液流转向技术研究[J].油田化学,2006,23(3):248-251.  
Liu Yuzhang, Xiong Chunming, Luo Jianhui, et al. Studies on in-depth fluid diverting in oil reservoirs at high water cut stages [J]. Oilfield Chemistry, 2006, 23(3): 248-251.
- [2] 郑卫宏,马香丽,宋洪峰,等.“2+3”组合提高采收率技术在濮城低渗透油藏的研究和应用[J].石油地质与工程,2007,21(5):69-72.  
Zheng Weihong, Ma Xiangli, Song Hongfeng, et al. Study and ap-

- plication of the combination technique of secondary oil recovery with tertiary oil recovery in low permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21(5): 69-72.
- [3] 李宪文, 郭方元, 黎晓卉, 等. 陕北低渗透裂缝性油藏调剖试验研究[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(6): 95-98.  
Li Xianwen, Guo Fangyuan, Li Xiaorong, et al. Pilot test effect analysis of profile control for fractured low permeability reservoirs in northern Shanxi [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(6): 95-98.
- [4] 李宜坤, 赵福麟, 刘一江. 区块整体调剖的压力指数决策技术[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1997, 21(2): 39-42.  
Li Yikun, Zhao Fulin, Liu Yijiang. Decision technique for pressure index on profile control in an entire tract [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1997, 21(2): 39-42.
- [5] 赵福麟. EOR 原理[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006.  
Zhao Fulin. Enhanced Oil Recovery Principles [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006.
- [6] Feng Qihong, Wang Sen, Wang Shoulei, et al. Identification of thief zones by dimensionless pressure index in waterfloods [R]. SPE 143926, 2011.
- [7] 宋万超, 孙焕泉, 孙国, 等. 油藏开发流体动力地质作用——以胜坨油田二区为例[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 52-55.  
Song Wanchao, Sun Huanquan, Sun Guo, et al. Dynamical geologic process of development liquid-taking Shengtuo oilfield as an example [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3): 52-55.
- [8] 彭仕宓, 史彦尧, 韩涛, 等. 油田高含水期窜流通道定量描述方法[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 79-84.  
Peng Shimi, Shi Yanyao, Han Tao, et al. A quantitative description method for channeling-path of reservoirs during high water cut period [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 79-84.
- [9] Feng Qihong, Wang Sen, Gao Guoqiang, et al. A new approach to thief zone identification based on interference test[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 75(1/2): 13-18.
- [10] 陈程, 宋新民, 李军. 曲流河点砂坝储层水流优势通道及其对剩余油分布的控制[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 257-263.  
Chen Cheng, Song Xinmin, Li Jun. Dominant flow channels of point-bar reservoirs and their control on the distribution of remaining oils [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 257-263.
- [11] Liu Yuzhang, Bai Baojun, Shuler P J. Application and development of chemical-based conformance control treatments in China oilfields [R]. SPE 99641, 2006.
- [12] 杨仁锋, 姜瑞忠, 刘世华, 等. 特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 299-306.  
Yang Renfeng, Jiang Ruizhong, Liu Shihua, et al. Numerical simulation of nonlinear seepage in ultra-low permeability reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 299-306.
- [13] 徐轩, 刘学伟, 杨正明, 等. 特低渗透砂岩大型露头模型单相渗流特征实验[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 453-458.  
Xu Xuan, Liu Xuewei, Yang Zhengming, et al. An experimental study on single-phase seepage characteristics with a large-scale model made of ultra-low permeability sandstone outcrops [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 453-458.
- [14] 邓英尔, 刘慈群. 低渗透油藏非线性渗流规律数学模型及其应用[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 72-76.  
Deng Yingler, Liu Ciqun. Mathematical model of nonlinear flow law in low permeability porous media and its application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(4): 72-76.
- [15] Hansen J P, Skjeltorp A. Fractal pore space and rock permeability implications [J]. Physical review. B, Condensed matter, 1988, 38(4): 2635-2638.
- [16] Li Kewen. Characterization of rock heterogeneity using fractal geometry[R]. SPE 86975, 2004.
- [17] 张吉昌, 田国清, 刘建中. 储层构造裂缝的分形分析[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(4): 65-67.  
Zhang Jichang, Tian Guoqing, Liu Jianzhong. A fractal analysis on structural fractures of reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(4): 65-67.
- [18] 文慧俭, 闫林, 姜福聪, 等. 低孔低渗储层孔隙结构分形特征[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(1): 15-18.  
Wen Huijian, Yan Lin, Jiang Fucong, et al. The fractal characteristics of the pore texture in low porosity and low permeability reservoir [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007, 31(1): 15-18.
- [19] 同登科, 葛家理. 分形油藏非达西低速渗流模型及其解[J]. 大庆石油地质与开发, 1996, 15(3): 18-23.  
Tong Dengke, Ge Jiali. A seepage flow model with non-Darcy low-velocity for fractal reservoirs and its solution [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1996, 15(3): 18-23.
- [20] 葛家理, 刘月田, 姚约东. 现代油藏渗流力学原理: 下册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.  
Ge Jiali, Liu Yuetian, Yao Yuedong. The modern mechanics of fluids flow in oil reservoir: volume II [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [21] Abramowitz M, Stegun I A. Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs and mathematical tables [M]. New York: Dover Publications Inc., 1965.

(收稿日期 2012-12-15 改回日期 2013-04-01 编辑 王培玺)