

文章编号:1673-5005(2011)01-0082-07

压力指数决策技术及其应用进展

赵福麟

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266555)

摘要:压力指数(PI)决策技术是以决策参数 PI_i^G 值决定区块整体调剖重大问题的技术。 PI_i^G 值是通过注水井井口压降曲线和 PI_i 值定义式首先算得 PI_i 值,然后用区块注水井注水强度平均值的归整值 G 将 PI_i 值改正值(PI_i^G)算出。 PI_i^G 值可用作区块整体调剖的选块、选井、选调剂及计算其用量、评价调剖效果和决定重复施工时间的决策参数。近年来, PI_i 值和 PI_i^G 值分别在判别调剖的充分程度、识别优势渗流通道、油井堵水的选井和指导调剖施工的应用中取得进展。

关键词:PI 决策技术; 调剖; 堵水

中图分类号:TE 37 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2011.01.016

Pressure index decision-making technique and its application progresses

ZHAO Fu-lin

(College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: The pressure index(PI) decision-making technique is a decision-making technique by the parameter PI_i^G value for determining the major issues of injectors profile control on the block wide. PI_i^G value can be obtained first by the PI_i value calculated based on the pressure drop curve at the wellhead of injector and the definition formula of PI_i value, and then by the PI_i value correction based on the round average of the injection strength of injectors on the block wide. PI_i^G value can be used for determining the necessity of profile control on block wide, determining the wells for profile control, selecting the agents used in profile control, calculating the amount of the profile control agents, evaluating the effects and deciding the repeated construction time. In recent years, the applications of PI_i value and PI_i^G value have made some progresses respectively in distinguishing the full degree of profile control, judging the dominant permeable pathway, selecting the water shutoff wells and guiding profile control construction.

Key words: pressure index decision-making technique; profile control; water shutoff

压力指数(PI)决策技术是一项以决策参数 PI_i^G 值决定区块整体调剖重大问题的技术^[1-2],自 1992 年建立以来已为油田广泛采用^[3-19],但在应用中也反映出一些问题,如注水井井口压降曲线取点太少, PI_i 值未经改正即用于区块整体调剖决策,不注意 PI 决策技术重要参数(用量系数)的积累,在可用 PI 决策的地方未充分利用等,因此有必要在这里再介绍一下 PI 决策技术,同时介绍其应用的一些进展。

1 注水井井口压降曲线与 PI_i 值

注水井井口压降曲线是指突然关井后注水井井口压力随时间的降落曲线。 PI_i 值是由注水井井口

压降曲线和 PI_i 值的定义式算得。为了取得注水井井口压降曲线,可在正常的注水条件下突然关井,记录井口压力随时间变化,然后以压力为纵坐标,以时间为横坐标,画出注水井的井口压降曲线。图 1 为 3 条典型的注水井井口压降曲线。从图 1 可以看到,曲线 I、曲线 II 和曲线 III 是注水井分别与高渗透层、中渗透层和低渗透层连通得到的。

为将注水井井口压降曲线量化为一个决策参数,可将关井时间为 t 时曲线下的面积积分 $\int_0^t p(t) dt$ 算出(图 2),再由 PI_i 值定义式算出 PI_i 值,即

$$PI_i = \int_0^t p(t) dt / t. \quad (1)$$

收稿日期:2010-10-10

作者简介:赵福麟(1933-),男(汉族),广东广州人,教授,博士生导师,长期从事油田化学教学和科研工作。

式中, PI_t 为注水井关井时间为 t 时的压力指数值, MPa; $p(t)$ 为注水井关井时间为 t 时的压力, MPa; t 为注水井的关井时间, min。

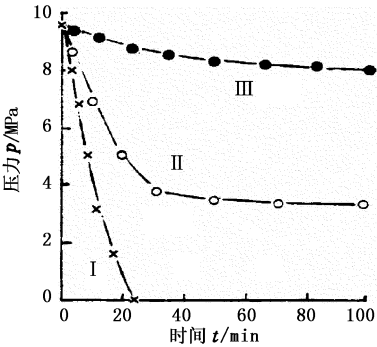


图 1 典型的注水井井口压降曲线

Fig.1 Typical pressure drop curves at wellhead of injectors

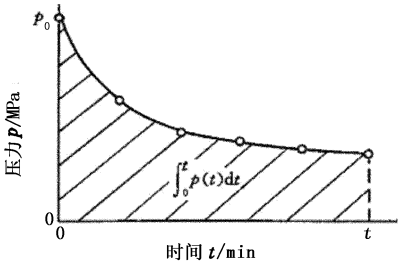


图 2 $\int_0^t p(t) dt$ 的计算

Fig.2 Calculation of $\int_0^t p(t) dt$

从式(1)和图1可以看出,在相同关井时间 t 的条件下, PI_t 越小,注水地层的渗透率越高。

2 PI_t 值的理论基础与 PI_t^G 值

由注水井试井公式推导的注水井 PI_t 值与地层参数和流体物性参数的关系式^[20]为

$$PI_t = \frac{q\mu}{15kh} \ln \frac{12 \cdot 5r_e^2 \varphi \mu C}{kt} \tag{2}$$

式中, q 为注水井的日注量, $m^3 \cdot d^{-1}$; μ 为流体的黏度, $mPa \cdot s$; k 为地层渗透率, μm^2 ; h 为地层厚度, m ; r_e 为注水井控制半径, m ; φ 为地层孔隙度; C 为综合压缩系数, Pa^{-1} ; t 为注水井关井时间, s 。

从式(2)可以看出,注水井的 PI_t 值与地层渗透率反相关,与注水井注水强度(q/h)成正比。

为使注水井的 PI_t 值可与区块中其他注水井的 PI_t 值相比较,从而得到注水井各自连通地层的渗透率,应将各注水井的 PI_t 值改正至一个相同的 q/h 值。这个相同的 q/h 值可选区块注水井的 q/h 平均值的就近归整值。由式(2)可得 PI_t 值改正值的计

算公式为

$$PI_t^G = \frac{PI_t q}{q/h} G. \tag{3}$$

式中, PI_t^G 为 PI_t 值改正值, MPa; q/h 为注水井注水强度, $m^3 \cdot d^{-1} \cdot m^{-1}$; G 为区块注水井 q/h 平均值的就近归整值, $m^3 \cdot d^{-1} \cdot m^{-1}$ 。

能作为区块整体调剖决策参数的是 PI_t^G 值而不是 PI_t 值。

3 PI 决策技术的应用

PI 决策技术以 PI_t^G 值作为决策参数。由于注水井关井时间为 90 min 时井口压降曲线的特征已充分表现出来,因此规定用 90 min 井口压降曲线计算 PI_t 值,记为 PI_{90} 值,相应地 PI_t^G 值记为 PI_{90}^G 值,即 PI 决策技术通常是以 PI_{90}^G 值作为决策参数。

3.1 区块调剖必要性的判断

地层越不均质,越需要调剖。地层的不均质性可用渗透率级差表示。渗透率级差是指地层渗透率最大值与最小值的比值,其值越大,地层越不均质。为了保证水驱油藏的采收率,渗透率级差超过 3 的地层就需要调剖。

为了求出区块地层渗透率的级差,可通过测定区块上所有注水井的井口压降曲线,算出这些注水井的 PI_{90} 值,由区块注水井 q/h 平均值的就近归整值 G ,改正 PI_{90} 值,得 PI_{90}^G 值。由于地层渗透率与 PI_{90}^G 值反相关,因此该区块地层的渗透率级差为区块上注水井最大 PI_{90}^G 值与最小 PI_{90}^G 值的比值。

图 3 为曙光油田曙 2-6-6 块注水井的井口压降曲线。

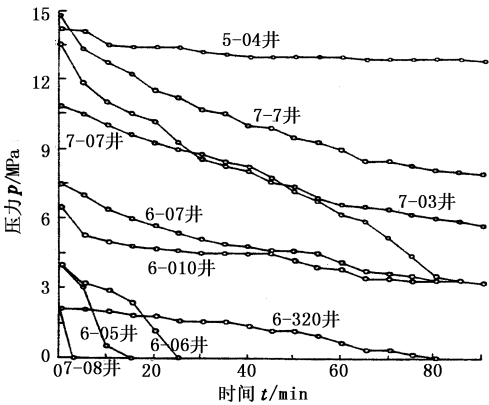


图 3 曙 2-6-6 块注水井井口压降曲线

Fig.3 Pressure drop curves at wellhead of injectors in Shu2-6-6 block

表 1 为该区块注水井按 PI_{90}^G 值的排序。由于区

块 q/h 平均值为 $0.89\text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,所以就近取归整值(G)为 $1\text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,因此将 PI_{90}^C 记为 PI_{90}^I 。

表 1 曙 2-6-6 块注水井按 PI_{90}^I 值排列

Table 1 Arrangement of injectors in Shu2-6-6 block according to PI_{90}^I value

序号	井号	$q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	h/m	$\frac{q}{h}$ 值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	$PI_{90}/$ MPa	$PI_{90}^I/$ MPa	说明
1	7-08	25.0	70.6	0.35	0.03	0.09	调剖井
2	6-05	46.0	99.0	0.46	0.31	0.67	
3	6-06	92.0	99.6	0.92	0.65	0.71	
4	6-320	55.0	121.8	0.45	1.11	2.47	
5	7-7	276.0	90.0	3.07	10.09	3.29	
6	6-07	45.0	61.0	0.74	4.98	6.73	不处理井
7	7-03	83.0	76.0	1.09	8.19	7.51	
8	7-07	52.0	75.0	0.69	7.32	10.61	增注井
9	5-04	68.0	79.8	0.85	13.16	15.48	
10	6-010	30.0	116.4	0.26	4.21	16.19	
平均		77.2	88.9	0.89	5.01	6.38	

由表 1 的数据可以算出曙 2-6-6 块渗透率的级差为 180,其值远大于 3,说明该区块很需要调剖。

3.2 调剖井的选择

区块整体调剖并不需要每口注水井都调剖。 PI 决策技术是按照区块注水井 PI_{90}^C 平均值与注水井的 PI_{90}^C 值选择调剖井。通常是 PI_{90}^C 值低于区块注水井 PI_{90}^C 平均值的井为调剖井, PI_{90}^C 值高于区块注水井 PI_{90}^C 平均值的注水井为增注井(增注也是调剖), PI_{90}^C 值略高于或略低于区块注水井 PI_{90}^C 平均值的注水井为不处理井。区块整体调剖后可使地层的渗透率趋于均质,有利于提高区块水驱的波及系数和采收率。

3.3 调剖剂的选择

注水井调剖剂按 4 个标准选择,即地层温度、地层水矿化度、注水井的 PI_{90}^C 值和成本。选择调剖剂时,可从表 2 和表 3 按注水井的地层温度、地层水矿化度和 PI_{90}^C 值选择可用的调剖剂,再按成本最后选定调剖用的调剖剂。

表 2 单液法调剖剂

Table 2 Profile control agents for single-fluid method

序号	调剖剂	地层温度 $\theta/^\circ\text{C}$	地层水 矿化度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$PI_{90}^C/$ MPa
1	铬冻胶	30 ~ 70	0 ~ 60	1 ~ 18
2	酚醛树脂冻胶	60 ~ 130	0 ~ 180	1 ~ 18
3	胶态分散体冻胶(CDG)	30 ~ 80	0 ~ 40	6 ~ 24
4	冻胶微球(MG)	30 ~ 130	0 ~ 180	4 ~ 18
5	水膨体悬浮体	30 ~ 130	0 ~ 180	0 ~ 6
6	黏土悬浮体	30 ~ 360	0 ~ 300	0 ~ 8
7	水基水泥	30 ~ 120	0 ~ 300	0 ~ 3
8	黏土/水泥悬浮体	30 ~ 120	0 ~ 300	0 ~ 6
9	石灰乳	30 ~ 360	0 ~ 300	0 ~ 4
10	水玻璃	80 ~ 360	80 ~ 300	6 ~ 18
11	硅酸凝胶	30 ~ 90	0 ~ 60	1 ~ 18
12	硫酸亚铁	30 ~ 150	0 ~ 300	12 ~ 18

注: G 值为 $1 \sim 6\text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

表 3 双液法调剖剂

Table 3 Profile control agents for double-fluid method

序号	调剖剂	地层温度 $\theta/^\circ\text{C}$	地层水 矿化度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$PI_{90}^C/$ MPa
1	水玻璃-氯化钙	30 ~ 360	0 ~ 300	2 ~ 14
2	水玻璃-盐酸	30 ~ 150	0 ~ 300	8 ~ 20
3	水玻璃-硫酸亚铁	30 ~ 360	0 ~ 300	3 ~ 16
4	水玻璃-钙土	30 ~ 360	0 ~ 300	0 ~ 8
5	铬冻胶双液法调剖剂	30 ~ 70	0 ~ 60	3 ~ 20
6	黏土-聚丙烯酰胺	30 ~ 150	0 ~ 300	0 ~ 8
7	黏土-铬冻胶	30 ~ 70	0 ~ 60	0 ~ 4
8	黏土-酚醛树脂冻胶	60 ~ 130	0 ~ 180	0 ~ 4

注: G 值为 $1 \sim 6\text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

3.4 调剖剂用量计算

按 PI 决策技术,调剖剂用量由下式计算:
$$V = \beta h \Delta PI_{90}^C. \tag{4}$$

式中, V 为调剖剂的用量, m^3 ; β 为用量系数, $\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; h 为注水地层厚度, m ; ΔPI_{90}^C 为调剖前后 PI_{90}^C 值预期提高值,MPa。

为了取得区块第一口调剖井的 β 值,按下式估算调剖剂的用量:

$$V' = \pi(R_2^2 - R_1^2)h\varphi\alpha\gamma. \tag{5}$$

式中, V' 为调剖剂的估算用量, m^3 ; R_2 为调剖剂在高渗透层外沿半径, m ; R_1 为调剖剂在高渗透层内沿半径, m ; α 为高渗透层厚度占注水地层厚度的份数,取 10% ~ 15%; γ 为调剖剂注入的方向系数,取 0.7 ~ 0.8。

将估算的调剖剂用量注入注水地层,实测 PI_{90}^C 值的增值(ΔPI_{90}^C),再将 V' 、 h 和 ΔPI_{90}^C 代入式(4),算得 β 值。该区块相同注水地层的其他注水井均可用此 β 值计算调剖剂的用量。此后,每一注水井的调剖施工都可算出一个 β 值。这些 β 值可用于该井下

一轮次调剖的调剖剂用量计算。应重视对这些数据的积累,以提高多轮次调剖施工设计的水平。

3.5 调剖效果的评价

调剖后,注水井的注入压力提高,井口压降曲线下降变缓(图4),使注水井的 PI_{90}^C 值提高。因此,可用调剖前后的注水井井口压降曲线的变化和 PI_{90}^C 值的提高评价调剖效果^[21-22]。

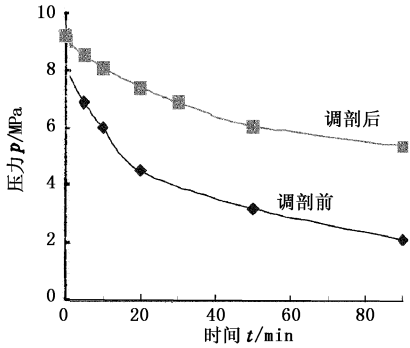


图4 调剖前后注水井井口压降曲线的变化
Fig.4 Change of pressure drop curve at wellhead of injector before and after profile control

3.6 重复施工时间的决定

调剖后,定期测定注水井井口压降曲线,算出 PI_{90}^C 值,就可得到 PI_{90}^C 值随时间的变化曲线(图5,该井的 G 值为 $6\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)。当 PI_{90}^C 值下降至原来数值附近时,就应进行下一次调剖施工。

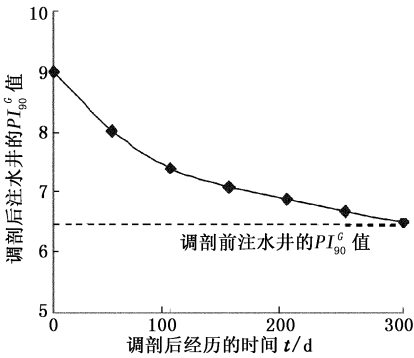


图5 调剖后注水井的 PI_{90}^C 值
随时间变化曲线
Fig.5 Change of injector PI_{90}^C value
with time after profile control

PI_{90}^C 值随时间推移而降低的原因是由调剖剂被推至地层远处和(或)新的二次通道被冲刷形成所引起的。

4 应用进展

4.1 调剖充分程度的判断

调剖的充分程度可用注水井井口压降曲线算出

的充满度判断。图6是用于说明注水井井口压降曲线充满度的概念图。

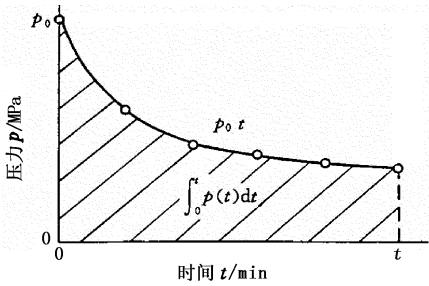


图6 注水井井口压降曲线充满度的概念图
Fig.6 Concept of full degree of pressure
drop curve at wellhead of injector

充满度定义为

$$FD = \frac{\int_0^t p(t) dt}{p_0 t} = \frac{PI_t}{p_0} \tag{6}$$

式中, FD 为充满度; p_0 为关井前注水井的注水压力,MPa。

从式(6)可以看出,充满度可由 PI_t 值和关井前注水井的注水压力 p_0 算出。从图6可以看到,充满度等于注水井井口压降曲线下的面积 $\int_0^t p(t) dt$ 占 $p_0 t$ 面积的份数。若 $FD = 0$,即 $PI_t = 0$,表示地层为优势渗流通道控制,关井后井口压力立即降至0;若 $FD = 1$,即 $PI_t = p_0$,表示地层无渗透性,关井后井口压力一点不变。对一般地层,调剖井调剖前 FD 值均小于0.65,而调剖后 FD 值一般为0.65~0.95。因此,注水井井口压降曲线的充满度可作为注水井调剖充分程度的判断。

表4为蒙古林油田试验区注水井调剖前后井口压降曲线充满度的变化。

表4 蒙古林油田试验区注水井井口
压降曲线的充满度

Table 4 Full degree of pressure drop curve at wellhead of injectors in pilot of Menggulin Oilfield

井号	调剖前(1999年7月24日)			调剖后(1999年10月30日)		
	$PI_{90}/$ MPa	$p_0/$ MPa	FD	$PI_{90}/$ MPa	$p_0/$ MPa	FD
M13-7井	2.72	5.99	0.46	6.57	7.61	0.86
M12-8井	2.90	5.80	0.50	8.14	8.75	0.93
M11-6井	3.40	6.07	0.56	9.37	11.00	0.85

从表4可以看到,蒙古林油田试验区注水井已达到充分调剖的要求。

4.2 优势渗流通道的识别

若将区块上由注水井井口压降曲线算得的 PI_{90}^C 值标在区块的井位图上,就可画出 PI_{90}^C 值等值图(图

7(a)) 和 PI_{90}^G 值等值图的立面图(图 7(b)), 图中的虚线为优势渗流通道的轨迹)。从图 7 可以识别优势渗流通道的存在和它的轨迹。

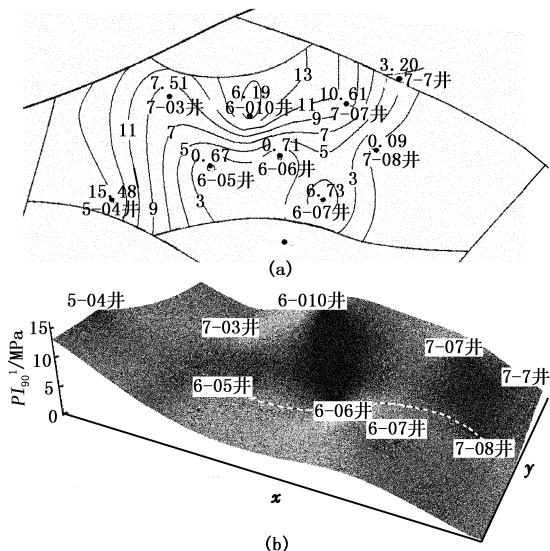


图 7 曙 2-6-6 块 PI_{90}^I 等值图及其立面图

Fig. 7 Contour diagram of PI_{90}^I value and its stereogram of Shu2-6-6 block

4.3 堵水油井的选择

堵水油井的选井有 3 个决策参数。

(1) 含水上升率指数。其定义式为

$$WI = \frac{\int_{t_1}^{t_2} w(t) dt}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

式中, WI 为含水率上升指数; $w(t)$ 为油井产液中的含水率随时间的变化曲线; $t_2 - t_1$ 为统计含水率的时间间隔。 WI 值越大的油井越需要堵水。

(2) 油井所处位置剩余油饱和度。其值越大, 油井越需要堵水。

(3) 油井所处位置的 PI_{90}^G 值。由区块的 PI_{90}^G 值等值图读出, 其值越小, 油井越需要堵水。

可用模糊评判的方法, 由上面 3 个决策参数, 通过加权, 产生一个称为堵水油井遴选值的决策参数, 用于堵水油井的选井^[23]。该方法已在濮城油田 53 块一类层 18 口油井整体堵水中应用, 所选堵水油井与地质动态分析所选油井的符合率超过 85%。

4.4 指导调剖施工

施工时, 可定时测定施工井的井口压降曲线并计算其 PI_{90}^G 值, 了解施工过程 PI_{90}^G 值的变化, 为动态调整调剖剂的配方、调剖剂的剂型以及调剖剂的用量提供依据。

测定施工井井口压降曲线前, 必须注 2 倍井筒

体积的水将工作液推离井筒。测定时, 应将注入水的注入速度与工作液注入速度保持一致, 再由 q/h 值下的 PI_{90} 值改正至 G 值下的 PI_{90}^G 值。施工时, 此值也以升高 2 ~ 4 MPa 为宜, 可通过调整调剖剂配方、调剖剂的剂型和调剖剂用量达到此目的。

5 结 论

(1) PI 决策技术是以决策参数 PI_i^G 值决定区块整体调剖重大问题的技术。

(2) 决策参数 PI_i^G 值是先由注水井井口压降曲线和 PI_i 值的定义式算得 PI_i 值再经区块注水井 q/h 平均值的归整值 G 改正后得到。

(3) PI 决策技术可对区块调剖必要性、调剖井和调剖剂的选择、调剖剂用量的计算、调剖效果的评价和重复施工时间做出决策。

(4) PI 决策技术在调剖充分程度的判断、优势渗流通道的识别、堵水油井的选井和指导调剖施工的应用中取得了进展。

参考文献:

- [1] 李宜坤. 区块整体调剖的 PI 决策技术研究[D]. 东营: 石油大学(华东)开发系, 1993.
LI Yi-kun. Studies on the PI decision-making technique for profile control on the block wide[D]. Dongying: Department of Development, Petroleum University (East China), 1993.
- [2] 赵福麟. EOR 原理[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 56-59.
- [3] 赵福麟, 周洪涛, 林伟民, 等. 注水井井口压降曲线在黏土调剖中的应用[J]. 石油钻采工艺, 1994, 16(2): 73-76.
ZHAO Fu-lin, ZHOU Hong-tao, LIN Wei-min, et al. Application of surface pressure drawdown curves of injection wells in profile modification using clay[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1994, 16(2): 73-76.
- [4] 李科生, 余慕岳, 秦涛. 濮城油田沙二上 2+3 油藏深部调剖试验[J]. 断块油气田, 1997, 4(3): 42-47.
LI Ke-sheng, YU Mu-yue, QIN Tao. The further profile control experiment of the upper S_2^{2+3} reservoir in Pucheng west area[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1997, 4(3): 42-47.
- [5] 叶显军, 钟永洪, 黄文峰, 等. 濮城油田区块调剖中 PI 决策的应用[J]. 断块油气田, 1998, 5(5): 37-39.
YE Xian-jun, ZHONG Yong-hong, HUANG Wen-feng, et al. An application of PI technology to control profile in Pucheng Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1998,

- 5(5):37-39.
- [6] 王元胜. PI决策技术在中原油田的应用[J]. 石油勘探与开发, 1999,26(6):81-83.
- WANG Yuan-sheng. Application of PI decision making technology in Zhongyuan Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999,26(6):81-83.
- [7] 张旭升,路秀广,王远坤. PI决策技术在胜坨二区7⁴-8¹单元的应用[J]. 胜利油田职工大学学报, 1999,13(2):11-14.
- ZHANG Xu-sheng, LU Xiu-guang, WANG Yuan-kun. The application of PI decision making technique in the unit 7⁴-8¹ of Shengtu second region[J]. Journal of Shengli Oilfield Staff University, 1999,13(2):11-14.
- [8] 乔二伟,李宜坤,刘平良,等. 油田区块整体调剖压力指数决策技术及应用[J]. 钻采工艺, 2000,23(5):28-31.
- QIAO Er-wei, LI Yi-kun, LIU Ping-liang, et al. Application of PI decision technique in Pucheng Oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2000,23(5):28-31.
- [9] 郭志东,权培丰,付长春. PI决策技术及其在复杂断块油田调剖中的应用[J]. 油气井测试, 2000,9(3):50-53,92-93.
- GUO Zhi-dong, QUAN Pei-feng, FU Chang-chun. PI decision technique and its applications in the profile control of complicated blocks oilfield[J]. Well Testing, 2000,9(3):50-53,92-93.
- [10] 熊显忠,杨永超,李乔林,等. PI决策技术在断块油田调剖中的应用[J]. 河南石油, 2001,15(4):22-23,27.
- XIONG Xian-zhong, YANG Yong-chao, LI Qiao-lin, et al. PI decision-making technique and its application to profile correction in a fault block oilfield[J]. Henan Petroleum, 2001,15(4):22-23,27.
- [11] 石彦,谢建勇,高卫,等. PI决策技术在油田调剖堵水技术中的应用[J]. 新疆石油学院学报, 2002,14(4):50-52.
- SHI Yan, XIE Jian-yong, GAO Wei, et al. The application of PI decision technology on water plugging and profile control in oilfield[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2002,14(4):50-52.
- [12] 马玉花,杨清玉,周军刚,等. PI决策技术在吐哈油田陵二东区的应用[J]. 新疆石油科技, 2003,13(2):4-8.
- MA Yu-hua, YANG Qing-yu, ZHOU Jun-gang, et al. The application of PI decision-making technique in Ling'er eastern region of Tuha Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2003,13(2):4-8.
- [13] 王树军,罗建新,李文洪. 化学调剖PI决策技术在吐哈低渗透油田的应用[J]. 吐哈油气, 2004,9(2):160-162.
- WANG Shu-jun, LUO Jian-xin, LI Wen-hong. Application of PI decision-making method in profile control in Tuha Oilfield[J]. Tuha Oil & Gas, 2004,9(2):160-162.
- [14] 秦国伟,潘攀,陶洪辉,等. PI决策技术分析原理及其应用[J]. 内蒙古石油化工, 2005(8):120-123.
- QIN Guo-wei, PAN Pan, TAO Hong-hui, et al. The analysis and application of PI decision making technology[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2005(8):120-123.
- [15] 赵彧. PI决策技术在孤东油田的应用[J]. 小型油气藏, 2005,10(2):39-41.
- ZHAO Yu. Application of PI decision technique in Gudong Oilfield[J]. Small Hydrocarbon Reservoirs, 2005,10(2):39-41.
- [16] 安毓卿. 压力指数决策技术在胜利油田的应用[J]. 石化技术, 2005,12(1):25-27.
- AN Yu-qing. The application of pressure index decision technology in Shengli Oilfield[J]. Petrochemical Industry Technology, 2005,12(1):25-27.
- [17] 赵福麟,戴彩丽,王业飞. 海上油田提高采收率的控水技术[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2006,30(2):53-58.
- ZHAO Fu-lin, DAI Cai-li, WANG Ye-fei. Water control technique of enhanced oil recovery for offshore oil field[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2006,30(2):53-58.
- [18] 张岩,杨社红,宋岱峰,等. 孤岛油田中二北Ng₃₄注聚前整体调剖技术应用[J]. 海洋石油, 2007,27(1):41-44.
- ZHANG Yan, YANG She-hong, SONG Dai-feng, et al. The application of profile control technology before polymer injection in Ng₃₄ cell of the north of central region 2 of Gudao Oilfield[J]. Offshore Oil, 2007,27(1):41-44.
- [19] 张顺林,王玫玫,冯兆伟,等. 雁木西第三系油藏调剖技术研究与应用[J]. 吐哈油气, 2010,15(1):60-63.
- ZHANG Shun-lin, WANG Mei-mei, FENG Zhao-wei, et al. Study and application of profile control technology for tertiary reservoir in Yanmuxi Oilfield[J]. Tuha Oil & Gas, 2010,15(1):60-63.
- [20] 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 Yi-kun, ZHAO Fu-lin, LIU Yi-jiang. Decision tech-

- nique 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.
- [21] 孙宝京. 滩海油田水井调剖效果的数理统计分析[J]. 中外能源, 2008,13(4):61-65.
SUN Bao-jing. Statistical analysis on effect of profile control for water injection well in Shengli offshore oilfield [J]. Sino-Global Energy, 2008,13(4):61-65.
- [22] 孙晓军,段生发,刘文岭. 喇嘛甸油田葡 I 1-2 油层黏土调剖试验[J]. 大庆石油地质与开发, 2000,19(1):27-29.
- SUN Xiao-jun, DUAN Sheng-fa, LIU Wen-ling. Profile control experiment of the clay in Pu I 1-2 reservoir in Lamadian Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2000,19(1):27-29.
- [23] 戴彩丽,赵小明,秦涛,等. 区块整体油井堵水的决策技术研究[J]. 断块油气田, 2006,13(4):21-23.
DAI Cai-li, ZHAO Xiao-ming, QIN Tao, et al. Study on decision-making technique of oil well water shutoff in integral tract[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2006,13(4):21-23.

(编辑 刘为清)

(上接第 81 页)

- [3] 张景富,徐明,朱健军,等. 二氧化碳对油井水泥石的腐蚀[J]. 硅酸盐学报,2007,35(12):1651-1655.
ZHANG Jing-fu, XU Ming, ZHU Jian-jun, et al. Corrosion of oilwell cement by carbon dioxide[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007,35(12):1651-1655.
- [4] 马开华,周仕明,初永涛,等. 高温下 H_2S 气体腐蚀水泥石机理研究[J]. 石油钻探技术,2008,36(6):4-8.
MA Kai-hua, ZHOU Shi-ming, CHU Yong-tao, et al. Corrosion to cement stone caused by H_2S at high temperature[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008,36(6):4-8.
- [5] 万伟,陈大钧. 水泥石防 CO_2 、 H_2S 腐蚀性能的室内研究[J]. 钻井液与完井液,2009,26(5):57-59.
WAN Wei, CHEN Da-jun. Laboratory studies on the resistance of set cement to corrosion caused by CO_2 and H_2S [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009,26(5):57-59.
- [6] KRILOV Z, LONCARIC B, MIKSA Z. Investigation of a long-term cement deterioration under a high-temperature, sour gas downhole environment[R]. SPE 58771, 2000.
- [7] SHAARI N EI, SCOTT H Myers, RAGIB Dajani, et al. Applications of ultra low density, operationally simple, non-foamed cement slurries-case histories [R]. SPE 114143, 2008.
- [8] PHIL Rae, GINO Di Lullo. Lightweight cement formulations for deep water cementing: fact and fiction[R]. SPE 91002, 2004.
- [9] LAWS M, RIYAMI A, SOEK H, et al. Special cement system and cementing techniques improve zonal isolation in south Oman fields[R]. SPE 102414, 2006.
- [10] 郭志勤,赵庆. 抗腐蚀水泥浆体系研究[J]. 石油钻采工艺,2005,27(增刊):26-29.
GUO Zhi-qin, ZHAO Qing. Research on corrosion proof cement system[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005,27(sup):26-29.
- [11] MURRAY J R, ROBERT L D, RAMY N E. Transition time of cement slurries, definitions and misconceptions, related to annular fluid migration [R]. SPE 90829, 2004.

(编辑 韩国良)