

# 基于物性及压降速率的新型压力指数研究与应用

张志军,张维易,魏俊,华科良,李芳,徐浩  
(中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司,天津 300452)

**摘要:**针对传统PI决策技术和FD决策技术在调剖选井决策中考虑参数过于简单且区分度小、可比性差等带来的调剖选井误差问题,提出一种新型压力指数以指导调剖选井决策。新型压力指数既考虑了储层及流体物性,又考虑了压降速率,同时规避了关井时间和关井前排量带来的影响,从而有效规避常规压力指数PI、充满度FD及已有成果中的计算复杂性,能够更加准确地指导调剖选井。研究表明:新型压力指数既考虑了储层物性、注入流体黏度,又考虑了注入井压降速率及PI值,能够更加准确地反映注入井的压力传播能力。矿场应用结果表明,新型压力指数的决策结果相较于传统的PI决策和FD决策方法,能更灵活、准确地指导注入井调剖选井,从而提高决策的准确性。该研究成果为油田调剖选井提供了重要的技术支持。

**关键词:**新型压力指数;储层物性;压降速率;调剖选井

中图分类号:TE341 文献标志码:A

## Research and application of a new pressure index based on physical properties and pressure drop rate

ZHANG Zhijun, ZHANG Weiyi, WEI Jun, HUA Keliang, LI Fang, XU Hao  
(CNOOC Ener. Tech. Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of profile control and well selection errors caused by the traditional PI decision-making technology and FD decision-making technology in the decision-making of profile control and selection of wells, a new type of pressure index is proposed to guide the selection decision of profile control well. The new pressure index not only considers the physical properties of the reservoir and fluid, but also the pressure drop rate, while avoiding the impact of shut-in time and displacement before shut-in, thereby effectively avoiding the conventional pressure index PI, fullness FD, and existing computational complexity in the results, so it can more accurately guide profile control and well selection. The research results show that the new pressure index not only considers the physical properties of the reservoir and the viscosity of the injected fluid, but also the injection well pressure drop rate and PI value, and can more accurately reflect the pressure propagation capability of the injection well. Field application results show that compared with the traditional PI and FD decision-making methods, the decision-making results of the new pressure index can guide injection well profile control and selection more flexibly and accurately, thereby improving the accuracy of decision-making. The research results provide important technical support for profile control and well selection in oilfields.

**Key words:** new pressure index; reservoir physical property; pressure drop rate; profile control well selection

我国大多数油田在利用天然能量生产后,转为注水开发,即二次采油。由于地下储层及流体的非均质性,以及生产制度的差异,导致注入水沿着某些高渗通道突进而造成注水利用率低。因此需要针对注入突进的井组开展调剖作业<sup>[1-6]</sup>,封堵高渗通道,扩大注入水的波及效率,进而提高采收率。而如何进行调剖井组筛选,是油藏工作者研究的课题之一,也是决定调剖效果的关键因素之一。

赵福麟<sup>[7]</sup>提出利用压力指数PI、FD来指导调剖选井,该方法虽然简单但存在数值范围小、可比性

差、易引起误判、受测试计算时间影响大等问题。李宜坤等<sup>[8]</sup>提出修正注水井PI与地层参数和流体物性参数方法,但未考虑压降速率对压力指数值的影响,且受选取时间对压力指数的影响。陈存良

收稿日期:2021-02-02;改回日期:2021-03-29。

第一作者简介:张志军(1989—),硕士,工程师,现从事提高采收率技术。E-mail: zhangzhj43@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项示范工程“渤海油田高效开发示范工程”(编号2016ZX05058)。

等<sup>[9-10]</sup>虽完善了压力指数,但并未考虑储层物性及注入流体性质对压力指数的影响。其他学者通过模糊综合评判法<sup>[11]</sup>、数值模拟<sup>[12]</sup>等方法指导调剖选井,虽然选井的准确性增强,但操作复杂,可操作性大大降低。本文综合目前调剖选井决策方法,从常规PI决策技术出发,提出了一种操作简单、考虑因素全面且操作性强的新型压力指数方法,能够更加准确地指导调剖选井。

### 1 常规决策技术存在的问题

PI决策技术<sup>[13]</sup>是指通过测定注水井井口压降曲线来计算注水压力指数,其计算公式为:

$$PI = \frac{\int_0^{t_0} p dt}{t_0} \quad (1)$$

考虑到进行区块整体评估时各井关井前注入参数差异较大,因此对PI决策技术进行修正,修正后的PI计算公式为:

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

FD决策技术是在PI决策技术的基础上进行求解,即

$$FD = \frac{PI}{p_0} \quad (3)$$

式中,PI为压力指数,MPa;p为注入井关井后的井口压力,MPa;t<sub>0</sub>为压降测试时间(通常取90 min),min;PI<sup>G</sup>为修正后的PI值,MPa;h为地层厚度,m;Q为关井前的注水量,m<sup>3</sup>/d;G为区块吸水强

度平均值,m<sup>3</sup>/(d·m);FD为充满度,无量纲;p<sub>0</sub>为关井前井口压力,MPa。

根据FD的计算公式(3)可知,FD<1,即使两个PI值差异较大,FD值的差异也不明显,特别是对低渗透油藏,因此直接利用FD决策技术来调剖选井存在较大误差。

而PI决策法虽然计算值差异较易区分,但没有考虑储层的物性以及压降,很容易造成选井失误。如图1(a)、(b)所示。

当S1=S2时,由图1(a)PI决策法,PI<sub>w1</sub>>PI<sub>w2</sub>,W2井需要调剖,图1(b)中的PI<sub>w1</sub>=PI<sub>w2</sub>,两井或同时调剖。然而实际上根据压降曲线变化趋势,W1井压力降落速度更快,比较而言W1井更需要调剖。

当S1>S2时,W1井压降曲线包围的面积大于W2井,即W1井对应的PI值大于W2井,则W2井需要调剖。但实际上由于W1井的压降曲线变化剧烈,则W1井更应该调剖。

而只有当S1<S2时,W1井压降曲线包围的面积小于W2井,则W1井更需要调剖,与利用PI决策的结论一致。

同时由图1(a)可以看出,选取不同的关井时间对PI值同样有较大影响。

由以上条件分析可知:采用PI决策技术指导调剖选井时,只有在部分情况下才能准确,在其他情况下容易造成选井偏离实际情况而达不到最优的调剖选井结果。因此需要完善PI决策技术,以更好地指导调剖选井工作。

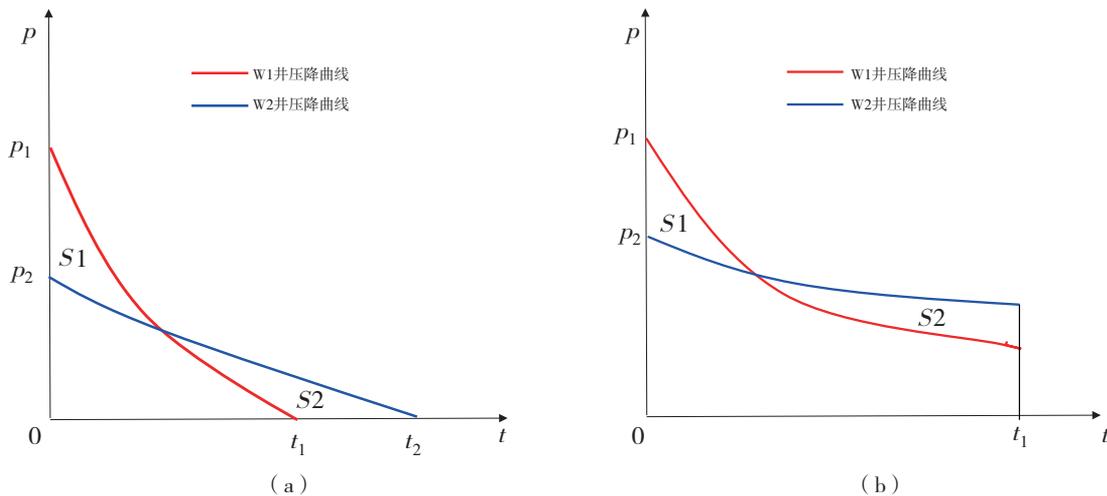


图1 井口压降曲线示意  
(图中S1、S2分别表示W1、W2井压降曲线包围面积)

## 2 新型计算方法的建立

基于前人研究成果可知:PI方法仅考虑了压降曲线包络的面积及测试时间,未考虑压降变化速率,因此需要在新型决策方法上考虑压降速率对决策的影响。

根据前人认识,压力指数或压降曲线形态与储层渗透率呈反比关系,即渗透率越大,压力传播速度越快,压力指数越小;注入流体黏度越大,流动能力越低,压力传播越慢,其压力指数越大;注水强度越大,井口及近井附近压力越高,其压力指数越大;而压降速率变化越快,说明压降曲线越陡,其压力指数越小。

因此结合储层物性、注入流体黏度、注水强度、压降速率及PI决策方法,建立一种新型压力指数NPI:

$$NPI = \frac{Q\mu}{kh} \frac{PI^c}{p_0 - p_c} = \frac{\mu}{k} \frac{\int_0^{t_0} p dt}{p_0 - p_c} G \quad (4)$$

式中, $Q$ 为关井前注入量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $\mu$ 为注入流体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ; $k$ 为吸水段储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; $h$ 为吸水段储层有效厚度, $\text{m}$ ; $p_c$ 为关井至 $t_c$ 时井口压力, $\text{MPa}$ 。

需要说明的是,公式(4)中的渗透率和有效厚度并不是射孔段的全部数据,而是该井实际吸水层位对应的渗透率与有效厚度。若直接采用射孔段的数据,势必会造成计算结果偏大而影响井组筛选。

对于注水井,注入流体黏度即为水的地下黏度;而对于化学驱注入井,注入流体黏度为化学药剂溶液地下黏度,这里采用张志军等<sup>[14]</sup>的聚合物地下黏度求解方法,即

$$\mu_p = \mu_o - 4\pi a k h \quad (5)$$

式中, $\mu_p$ 为化学药剂溶液地下黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ; $\mu_o$ 为地下原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ; $a$ 为 $\frac{P_h}{Q}$ 与 $W_1$ 的对数关系式的斜率。

由此可以得出:对于注水井,新型压力指数NPI为:

$$NPI = \frac{\mu_w}{k} \frac{\int_0^{t_0} p dt}{p_0 - p_c} G \quad (6)$$

对于化学驱注入井,新型压力指数NPI为:

$$NPI = \frac{\mu_o}{k} \frac{\int_0^{t_0} p dt}{p_0 - p_c} G \quad (7)$$

对存在水/化学驱干扰的区块进行调剖选井时,需要根据注入流体的差异选择合适的公式予以计算和筛选。

新型压力指数既考虑了储层及流体物性,又考虑了压降速率,同时规避了测试时间和测试前排量带来的影响,有效规避了常规压力指数PI、充满度FD及已有成果中的计算复杂性,能更加准确地指导调剖选井。

## 3 实例应用

渤海Z油田是河流三角洲沉积复合体,储层非均质严重,地下原油黏度 $80\sim 150 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。由于地下原油黏度较大,常规水驱动用储量较难,因此近年来在部分区域开展化学驱先导试验,通过增大驱替相流度来扩大波及。为提高试验效果,需要对区块内的注入井进行选择性的调剖,以抑制窜流对开发效果的影响,其余区域进行水驱。以下是针对化学驱及水驱区块开展新型压力指数的矿场验证。

### 3.1 水驱区块

Z油田C区块投产早,目前该区块整体高含水,需要稳油控水措施。为筛选出优先实施整体调剖的目标井组,利用C区注入井压降曲线,结合PI、FD决策及新型压力指数方法,筛选出亟需稳油控水的目标井组。区块吸水强度平均值为 $10.57 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 。C区块各评价方法结果见表1。

对比表1中FD评价方法可知,C区块各井FD值差异小,无法利用FD值结论进行井组筛选,这也与前文的论述相一致。

对比表1中PI决策方法与新型压力指数决策方法可知:二者的结论大部分一致,仅C9、C12井结论不一致,现针对C9、C12井进行分析。两口井压降曲线如图2所示。

由图2可知:测试初始阶段,C12井较C9井压力下降速度更快;测试后期C12井压力明显再次下降,而C9井压力趋于稳定。由井组受益井动态可知,C12井组含水85%,且部分受益井含水上升速度明显高于C9井组。因此C12井较C9井更应进行调剖。综上可知,新型压力指数决策方法与现场分析结果一致性更强,说明NPI决策方法更加合理,对矿场的指导性更强。

表1 C区块不同方法调剖选井决策对比

井号	$k/\mu\text{m}^2$	$PI_{90}$	$PI_{90}^G$	结论	$FD$	$NPI$	结论
C4	6.60	2.4	1.7	不调剖	0.2	71.6	不调剖
C9	4.28	1.0	0.8	调剖	0.1	39.6	不调剖
C12	6.44	1.0	1.4	不调剖	0.1	16.8	调剖
C14	7.08	0.2	0.4	调剖	0.0	3.0	调剖
C16	2.10	1.7	1.7	不调剖	0.2	84.9	不调剖
C24	4.10	1.3	1.0	不调剖	0.1	36.5	不调剖
C33	3.42	1.3	1.1	不调剖	0.1	36.1	不调剖
C40	5.31	1.6	1.4	不调剖	0.1	26.7	不调剖
C53	2.98	1.9	2.5	不调剖	0.3	69.4	不调剖
C55	3.13	1.3	2.0	不调剖	0.2	39.7	不调剖
C57	9.95	0.2	0.4	调剖	0.1	2.8	调剖
C58	3.18	0.9	1.4	不调剖	0.1	25.8	不调剖

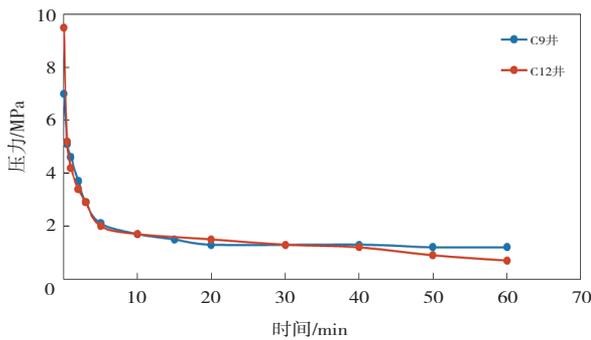


图2 渤海Z油田C9、C12井压降曲线

根据筛选结果,推荐C12、C14、C57三口井进行调剖作业。调剖作业后,调剖前后三口井PI值及NPI值见表2。由表2可知,调剖后封堵效果较好,压力指数均有大幅提高。

表2 调剖前后三口井PI值及NPI值

井号	$PI_{90}$		$NPI$	
	调剖前	调剖后	调剖前	调剖后
C12	1.0	3.2	16.8	97.3
C14	0.2	4.0	3.0	129.9
C57	0.2	0.9	2.8	23.9

三个井组均有降水增油效果,截至目前增油4 775  $\text{m}^3$ ,典型受益井降水幅度5%,日增油幅度8.3  $\text{m}^3/\text{d}$ ,因调剖作业刚完成,调剖最大效果待进一步观察。典型受益井生产曲线如图3所示。

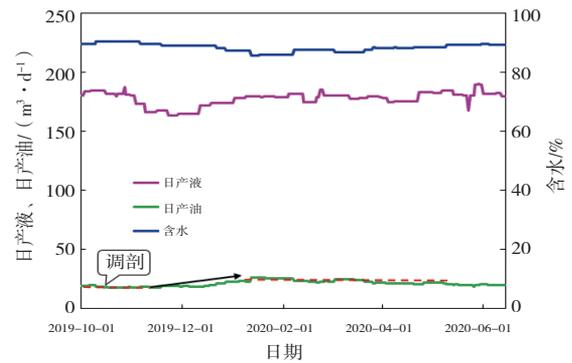


图3 C区调剖典型受益井生产曲线

### 3.2 水/化学驱区块

Z油田D区块自2018年D6、D11井开始进行化学驱技术,但随着作业的继续,区块内已存在含水上升速度过快、产剂浓度过高等现象,因此需要对区块进行选井调剖。区块吸水强度平均值9.81  $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 。由于注入流体的变化,其地下黏度必然存在差异,因此在进行新公式验证前,需求解化学药剂的地下黏度。根据文献<sup>[14]</sup>的方法,以注液量的对数为横坐标,以井口压力与注入量的比值为纵坐标,进行线性拟合,求得D6井注入流体的地下黏度为1.89。

利用试验区块的井口压降曲线,分别利用PI决策技术和新型NPI方法进行了调剖选井决策,各井参数计算结果见表3。

表3 D区域不同方法调剖选井决策对比

井号	$k/\mu\text{m}^2$	$PI$	$PI_{90}^G$	结论	$NPI$	结论
D6	12.31	5.4	3.9	调剖	92.0	调剖
D8	3.53	5.0	4.7	不调剖	171.1	不调剖
D10	5.39	5.5	5.3	不调剖	187.8	不调剖
D11	7.03	4.5	3.7	调剖	108.3	调剖
D13	7.18	4.7	4.3	不调剖	73.9	调剖
D17	6.01	6.4	7.5	不调剖	259.7	不调剖
D19	2.09	6.9	9.1	不调剖	1042.4	不调剖
D22	2.51	4.9	6.6	不调剖	244.3	不调剖

根据决策结论,新型NPI方法与PI决策技术结论基本一致,仅在D13井的评判时存在问题,因此针对D6、D11、D13井进行分析。由图4可知,三口井中D6、D13井压力初始下降速度快,且随着关井的继续,D13井压力降幅更大,直至测试结束,D13井压力仍是三口井中的最低值,因此相对于D6、D11井,D13井更应进行调剖。推荐D13、D6、D11井组开展调剖作业,为保证化学驱效果,结合矿场现状,先对D6井进行调剖,下一步再对D13、D11井调剖。

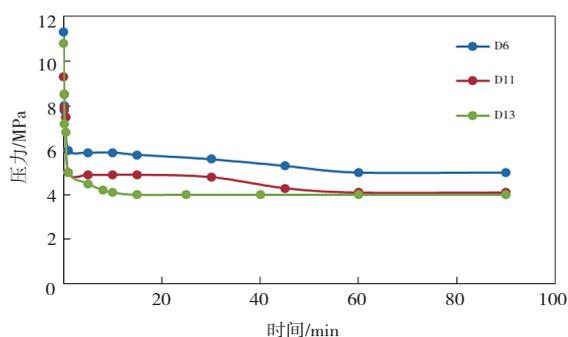


图4 渤海Z油田D6、D11、D13井压降曲线

D6井调剖后视阻力系数为1.4,说明调剖起到封堵效果。井组调剖前后含水保持稳定,部分受益井出现明显的降水增油效果。典型受益井生产曲线如图5所示。该受益井调剖一个月后见效,含水下降2%,日增油 $15\text{ m}^3/\text{d}$ ,调剖效果显著。

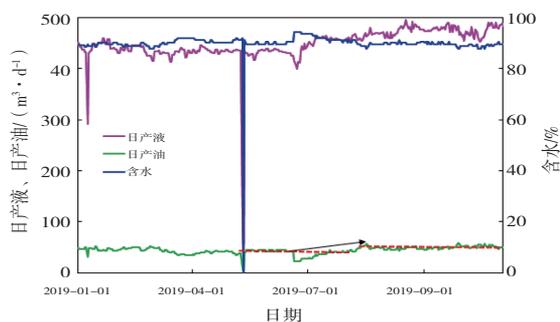


图5 D6井组典型受益井生产曲线

## 4 结论

(1)针对目前调剖选井决策技术的不足,提出一种新型压力指数,该指数既考虑了储层物性和注入流体黏度,又考虑了注入井压降速率及 $PI$ 值,能更加准确地反映注入井的压力传播能力,从而指导调剖选井。

(2)分析该新型压力指数可知:该值越小,越需要进行调剖。同时该指数具有分布范围宽、可比性强、不受选取计算时间影响等性质,能够更加快速、准确、灵敏地判断需要调剖的井组。

(3)矿场应用表明,新型压力指数决策既较全面地考虑了油藏性质及注入井特征,其计算又方便快捷,且优选结果准确度高于常规调剖决策技术,对现场综合治理工作具有重要的指导意义,具有较好的经济效益与社会效益,可以进一步推广应用。

### 参考文献:

- [1] 谢晓庆,冯国智,刘立伟,等.海上油田聚合物驱后提高采收率技术[J].油气地质与采收率,2015,22(1):93-97.
- [2] 赵方剑,王丽娟,夏晞冉.聚驱后油藏提高采收率技术研究进展及发展趋势[J].石油地质与工程,2014,28(2):99-103.
- [3] 梁守成,李强,吕鑫,等.多级调剖调驱技术效果及剩余油分布[J].大庆石油地质与开发,2018,37(6):108-115.
- [4] 田苗,狄贵荣,曾鸣,等.海上油田大孔道识别及调剖调驱技术[J].石油化工应用,2016,35(5):1-4.
- [5] 张保康,张博,徐国瑞,等.海上水平井优势组合调驱技术研究与试验[J].石油化工应用,2018,37(3):44-47.
- [6] 吕鹏,阚亮,王成胜,等.海上油田在线组合调驱提高采收率技术——以渤海C油田E井组为例[J].科学技术与工程,2017,17(9):164-167. (下转第96页)

技术及充气雾化钻井技术交替使用,可以有效解决水源不足地区浅表地层恶性漏失、垮塌的难题。

(3)采用牙轮钻头+空气钻进技术,结合大尺寸钻铤和“进一退三”钻进方式,在复杂地层施工中能有效地防斜打直,同时也具备防卡功能。

(4)从3口井使用跟管钻进情况看,均在中途发生管鞋脱落,被迫中止跟管钻进。因此,需加强管鞋与卷管连接的牢固性和可靠性,以保障钻进施工按设计方案正常进行。

#### 参考文献:

- [1] 天工. 中国石油浙江油田公司实现浅层页岩气领域零的突破[J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 40.
- [2] 梁兴, 徐政语, 张朝, 等. 昭通太阳背斜区浅层页岩气勘探突破及其资源开发意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 11-28.
- [3] 葛鹏飞, 马庆涛, 郭敏. 空气锤钻井技术在元坝区块陆相井的应用[J]. 石油机械, 2013, 41(8): 9-12.
- [4] 邓柯. 国内气体钻井技术发展现状与应用前景浅析[J]. 钻采工艺, 2015, 38(2): 20-22, 7.
- [5] 孟庆昆, 王向东, 于兴胜. KQC系列空气锤在油田气体钻井中的应用[J]. 石油矿场机械, 2007, 36(11): 54-57.
- [6] 牛洪波, 冯光通, 赵洪山, 等. 哈山101井火成岩地层空气锤钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(2): 164-

168.

- [7] 许军富, 赵洪山, 于海叶, 等. 空气锤钻井技术在哈深201井火成岩地层的应用[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(6): 683-687.
- [8] 李斌, 代锋, 张弛, 等. 气体钻井集成技术在元坝地区陆相地层的应用[J]. 天然气工业, 2016, 36(S1): 122-127.
- [9] 曾桂元, 代锋, 荆华, 等. 元坝地区气体钻井井斜控制技术及应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(1): 29-31, 2.
- [10] 冯一璟, 张来斌, 梁伟, 等. 潜孔钻头研究现状及展望[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(25): 38-41, 4.
- [11] 赵建勤, 李子章, 石绍云, 等. 空气潜孔锤跟管钻进技术与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008(7): 55-59.
- [12] 董振涛, 刘天奎. 胜火201井充气钻井技术实践与认识[J]. 吐哈油气, 2006, 11(1): 75-77.
- [13] 施德友, 杨景利, 张斌, 等. 王古1井防漏防溢充气钻井液技术[J]. 天然气勘探与开发, 2005, 28(4): 46-49.
- [14] 徐英, 魏武. 空气充气钻井技术在矿2井的应用[J]. 天然气工业, 2003, 23(Z1): 70-72.
- [15] 周英操, 王广新, 赵德云, 等. 充气钻井技术在大庆油田的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006(9): 51-54.

(编辑 韩 枫)

(上接第78页)

- [7] 赵福麟. 压力指数决策技术及其应用进展[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(1): 82-88.
- [8] 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]. 中国石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(2): 41-44, 118.
- [9] 陈存良, 刘英宪, 周凤军, 等. 基于新型压力指数的调剖选井决策方法研究[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 105-108.
- [10] 冯其红, 王森, 陈存良, 等. 低渗透裂缝性油藏调剖选井无因次压力指数决策方法[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 932-937.

- [11] 房灵太, 陈月明, 闫军, 等. 基于变权的模糊层次分析法在低渗油藏调剖选井中的应用[J]. 特种油气藏, 2007, 14(3): 81-84, 94.
- [12] 靳彦欣, 史树彬, 付玮, 等. 特高含水油藏深部调剖技术界限研究[J]. 特种油气藏, 2015, 22(3): 77-80, 154-155.
- [13] 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.
- [14] 张志军, 李芳, 魏俊, 等. 一种聚合物地下黏度计算新方法[J]. 特种油气藏, 2018, 25(4): 109-111.

(编辑 谢 葵)