

基于大数据的定量措施选层技术

王孝超

中国石油华北油田分公司勘探部 河北任丘 062552

通讯作者:Email:cyy_wxc@petrochina. com. cn

项目支持:中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司“2021 年华北探区测试工程关键技术研究”(HBYT-2021-JS-41)

引用:王孝超. 基于大数据的定量措施选层技术[J]. 油气井测试,2022,31(5):58-63.

Cite: WANG Xiaochao. Quantitative stimulation layer selection technology based on big data[J]. Well Testing,2022,31(5):58-63.

摘要 为减少措施选层的主观性、盲目性和风险性,提高措施改造效果,提出了基于大数据的定量措施选层技术。通过对目标区储层措施前静态参数、动态参数、措施改造参数与措施改造效果关系的统计分析,优选出影响目标区域措施改造效果的敏感因子,运用模糊数学方法建立敏感因子与措施效果之间的关系模型,采用模型计算的欧氏贴近度值判断目标井层压裂的可行性。在乌里雅斯太凹陷优选出了 11 项影响压裂效果的敏感因子,确定了判断是否压裂的欧式贴近度值为 0.425。经太 27-1X 井和太 67 井实例验证,预测结果与实际相符率达到了 100%。该技术为同类砂岩储层措施选层的可行性提供了理论依据。

关键词 大数据;措施选层;模糊数学;敏感因子;欧式贴近度;定量判断;应用效果

中图分类号:TE357 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.05.012

Quantitative stimulation layer selection technology based on big data

WANG Xiaochao

Exploration Department of PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China

Abstract: In order to reduce the subjectivity, blindness and risks in selecting stimulation layers and improve the effect of stimulation, a quantitative stimulation layer selection technology based on big data was proposed. Through statistical analysis on the relationship between the static parameters, dynamic parameters, stimulation parameters and the stimulation effect in the target reservoirs, the sensitive factors affecting the stimulation effect were selected. Then, a relation model between the sensitive factors and the stimulation effect was established by using fuzzy mathematics method, and the feasibility of fracturing in the target layer was judged by using Euclidean proximity value calculated by the model. Eleven sensitive factors affecting the fracturing effect were selected in the Uliastai sag, and the Euclidean proximity value for judging whether fracturing was needed was 0.425. Field application in Well Tai 27-1X and Well Tai 67 verifies that the prediction results are 100% consistent with the actual results. This technology provides a theoretical basis for the feasibility of stimulation layer selection in similar sandstone reservoirs.

Keywords: big data; stimulation layer selection; fuzzy mathematics; sensitive factor; European proximity; quantitative judgment; application effect

措施改造层选择的好坏,直接影响着措施改造后的增油效果。近年来,随着低渗特低渗储层开发比例的增高,压裂选层工作越来越受到油田开发者的重视,在此过程中从各个专业角度均形成了相应的方法。王发现等^[1]根据压前测试及试井曲线形态,提出若地层均质无限大,则压裂后求产期间产量稳定,若压前试井曲线见边界反映,则必须结合边界形状和距离预测压裂后的产量递减规律,慎重考虑是否具有改造价值。该方法将试井曲线与压裂选层初步建立关系,但划分种类单一。刘艳梅^[2]

针对海拉尔地区布达特群无法从岩心资料进行低压低渗储层压裂选层的现状,对该类油层测试压力曲线类型及其反映的储层性质进行分析,结合近几年的压裂效果,总结出海拉尔布达特群油层压裂选层原则:若压力早期恢复速度大于 0.05 MPa/h,应当进行压裂;否则,不宜压裂。但该方法仅应用了一个动态参数进行压裂选层,准确性难以把握。王广林等^[3]充分运用压力导数比压力本身更敏感的突出特点,通过对压力及其导数双对数曲线的过渡段、径向流动段起始时间的统计分析,并利用压力

及其导数双对数曲线主要阶段特征,与储层静态参数紧密结合对储层作出正确分析,提出了低渗储层压裂选层的原则及条件,该方法从动态曲线角度实现定性压裂选层。杜成良等^[4]对塔木查格盆地不同测试曲线形态、压力特征以及储层导流能力进行分类和数理统计研究,分析测试成果及录井测井资料与压裂效果之间的内在关系,确定了压裂选层原则,建立了以电测解释参数为基础的措施效果预测方法,为压裂选层提供了依据。该方法虽然试图从静态资料、动态资料两个角度进行压裂选层,但该方法对于人的经验较为依赖。方锡贤等^[5]针对泌阳凹陷王集油田西南缘储集层物性总体较差,须经过压裂改造才能获得工业油流的地质特点,提出了从录井角度进行压裂选层的方法,并建立了Ⅳ油层和Ⅶ油层的地化-气测一体化解释评价图板,确保准确、可靠选择压裂改造层。但此方法仅考虑静态资料中录井数据对压裂效果的影响。鞠玮艳^[6]利用试井曲线指导乾安地区油气井压裂选层工作,但从压裂改造效果看,由于强非均质性的存在,效果不理想,说明单从某一方面难以提高储层压裂选层准确性。蒋艳芳^[7]从中途测试资料中反映的污染、产水以及压裂衰竭三个极端方面进行是否可压的判断,考虑敏感因素少,难以定量描述。王鑫鑫等^[8]根据低渗透砂岩储层地层测试压力曲线及双对数诊断曲线的特点,确定了该类储层压裂选层的八项原则,但是也仅考虑了动态资料一个因素,且只能做出定性判断。

针对上述压裂选层方法存在的问题及局限性,提出了从影响压裂改造效果的静态资料(测井、录井资料)、动态资料(试油、地层测试资料)以及压裂改造规模等多个角度出发,采用逐步判别法进行几个方面敏感因子的筛选,后采用模糊数学法建立敏感因子与压裂改造效果的关系矩阵,并赋值计算欧式贴近度进行储层能否压裂的判断依据的方法,该方法具有因素考虑全面,能够进行量化选层的优势。

1 目标储层措施选层的影响因素

目标储层的措施选层效果影响因素众多,主要应考虑目标储层的储量和能量、增产工艺及施工参数的选取、目标储层的井筒条件等。

1.1 目标储层必须具备一定的储量和能量

(1)首先待措施的目标储层要有足够的可采储量,油气层的厚度、含油饱和度、供油面积要尽可能

的大。此为物质基础,若该基础不具备的井肯定不宜进行改造。反映这一因素的地层参数有:孔隙度、渗透率、含油饱和度、压裂井段厚度、泥质含量等;

(2)待措施的目标层要有足够的地层能量,此为能量基础,存在能量衰竭的井不宜进行压裂改造,反映这一因素的地层参数有:原始地层压力、目前地层压力、原始地层压力系数、目前地层压力系数、水动力系统级别等。

1.2 目标储层的增产工艺及施工参数选取必须正确

增产措施是指采用各种方法来扩大地层的原油孔道或建立新的通道。由于石油通常储存在砂岩的孔隙或灰岩的缝隙中,扩大原油通道或建立新的通道可使油气更容易流入井筒中。虽然现代试验中也使用核爆炸,但最常用的两种增产方法是压裂和酸化。

压裂是指用压力将地层压开一条或几条水平的或垂直的裂缝,用支撑剂将裂缝支撑起来,减小油、气、水的流动阻力,沟通油、气、水的流动通道,从而达到增产增注的效果。压裂措施的施工参数主要包括压裂液量大小、支撑剂类型及大小、泵排量、平均砂比、总用液量等。压裂施工参数的正确选取也是压裂施工成败的重要前提^[9-11]。

1.3 目标储层的井筒条件必须满足措施要求

措施选井时还要注意压裂施工工程制约条件^[12]。比如:压裂井的井身条件、套管程序、套管直径、强度、固井质量和完井方式等必须符合施工要求,压裂井施工所需场地面积、交通、地面条件等都要利于施工。

1.4 待措施井必须远离水层

对于与水井相邻的油井,还要考虑油水的接触状况及防止措施过程中裂缝穿透阻挡层。

2 敏感因子筛选方法

措施选层的各个影响因素之间都是相互影响,相互作用的,不是单一对压裂改造效果产生影响的,它们之间的关系复杂,且各影响因素本身具有模糊性^[13],其在不同区块中的影响程度也发生着变化,如某一影响因素在这个区块是主因,但是到了另一个区块又变成了次因,故需要根据储层各个影响因子与压裂效果的关系进行筛选,最终确定敏感因子。因为影响压裂改造效果的因素关系存在复杂性,故无法采用线性关系或者人为经验判断的方

法完成敏感因子的筛选。数理统计学上的逐步判别法进行敏感因子的筛选,可以达到降低人为因素干扰,避免相互影响的因素重复使用。

2.1 逐步判别分析法基本原理

逐步判别分析法是多元统计学中的一类重要方法。逐步判别是先从所有因子中挑选一个具有最显著判别能力的因子,然后再挑选第二个因子,这个因子是在第一因子的基础上具有最显著判别能力的因子,即第一个和第二个因子联合起来有显著判别能力的因子;接着挑选第三个因子,这个因子是在第一、第二因子的基础上具有最显著判别能力的因子。由于因子之间的相互关系,当引入第三个因子之后就要先检验一下各已经引入的因子是否还具有显著判别能力,如果有就要剔除这个不显著的因子,接着再继续引入,直到再没有显著能力的因子可剔除为止。用这样挑选出来的因子建立的判别函数进行判别,就能得到较高的判别准确率。

2.2 判别模型的建立

根据资料的性质采用定性资料的 Fisher 判别分析(亦称典则判别)方法。该方法是将原来在高维的 R 维空间的自变量组合投影到维度较低的 D 维空间去,然后在 D 维空间中再进行分类。投影的原则是使得每一类内的离差尽可能小,而不同类间投影的离差尽可能大。具体在操作上, Fisher 判别和主成分分析与典型相关分析有关,首先提取出与各组有最大可能多重相关的变量的线性组合(第一典型变量),然后再提取第二典型变量(最多可以有 $n-1$ 个,即 $n-1$ 个判别函数),每个典型变量代表了各类别在该维度上的区分信息,然后使用典型变量计算出各类别在低维空间的重心坐标,给出的判别式用于计算各样品的坐标值,最后用各观测点离各类别重心距离的远近来做出所属类别的判别。

判别分析通常设法建立一个判别函数,利用此函数进行判别。判别函数的一般形式如下

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \cdots + a_n X_n \quad (1)$$

式中: Y 为判别的指标; X_1, X_2 等为反映研究对象特征的变量; a_1, a_2 等为各变量的系数,也称判别系数。

考虑到参与分析的参数多达数十个,其对判别效果的影响程度不同,采用逐步判别分析将这数十个参数依次引入,计算每一个参数对措施效果判别的影响程度,不满足既定标准的参数从模型中剔

除,最终形成一个较为稳健的判别方程。

3 敏感因子筛选方法

要想实现优选出的敏感因子与压裂效果建立定量的关系,需要采用到模糊数学方法。当存在多种参数影响时,模糊识别可以作为压裂选井选层可靠的方法^[14]。

模糊识别也即模糊模式识别是模糊集合论应用的重要方面之一,其主要目的是让计算机仿照人的思维方式对客观事物进行识别、判断与归类^[15]。所谓模式识别,简单地说,就是指把要辨别的对象与已知的模式进行比较,确定它与哪个模式类同的过程。而所研究的对象和模式有的是清晰的,大多数却是不分明的,对带有模糊性的事物进行识别就称为模糊模式识别。应用模糊识别方法进行压裂选井选层的原理如图 1 所示^[16]。

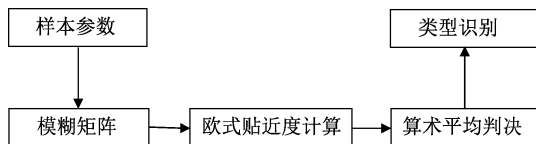


图 1 模糊数学理论措施改造选井选层原理
Fig. 1 Principle of stimulation layer selection with fuzzy mathematics

设 A 是由 $n-1$ 个压裂待选井层 $\{A_1, A_2, \cdots, A_{n-1}\}$ 及理想的压裂井层组成的集合, P 是对应于压裂待选井层 $\{A_1, A_2, \cdots, A_{n-1}\}$ 及理想的压裂井层 A_n^* 的 m 个特征参数 $\{P_1, P_2, \cdots, P_m\}$ 组成的集合。记集合 A 到集合 P 的一个模糊关系为 R , 因 A, P 都为有限论域, 故 R 可用矩阵表示为

$$\begin{cases} R = (r_{ij})_{n \times m} \\ r_{ij} \in (0, 1) \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \cdots, n \quad j = 1, 2, 3, \cdots, m \quad (2)$$

式中: r_{ij} 表示压裂待选井层或理想压裂井层 A_i 具有参数 P_j 特征的隶属度。

可采用不同的方法来建立模糊相似矩阵, 这个过程称为标定。标定的方法很多, 除最大最小法外最常用的还有算术平均法, 几何平均法, 绝对值减数法等, 一般都由实际工作者根据专业内容来确定, 从而得到其模糊相似矩阵。这里按最大最小法求集合 A 到集合 P 之间的模糊关系 R

$$r_{ij} = \mu(x) = \begin{cases} (x - a_{\min}) / (a_{\max} - a_{\min}) & a_{\min} < x < a_{\max} \\ 0 & x \leq a_{\min} \\ 1 & x \geq a_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 为压裂待选井层或理想压裂井层的任一特

征参数; a_{\min} 为压裂待选井层或理想的压裂井层任一特征参数的最小值; a_{\max} 为压裂待选井层或理想的压裂井层任一特征参数的最大值。

将模糊矩阵 R 划分为 n 个次级模糊矩阵 $R_1, R_2, \cdots R_{n-1}$ 及 R_n^* ($R_1, R_2, \cdots R_{n-1}$ 及 R_n^* 分别表示压裂待选井层及理想压裂井层与其各自特征间的模糊关系)。求解 $R_j(j=1,2,\cdots n-1)$ 与 R_n^* 的接近程度,常使用距离定义贴近度,贴近度也有很多种,这里采用欧氏贴近度的办法,计算 R_j 与 R_n^* 的欧氏贴近度的公式如下

$$\rho(R_j,R_n^*)=1-\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m[R_j(P_i)-R_n^*(P_i)]^2}$$

(4)

根据欧氏贴近度的计算结果,就可判断哪些井

层适合压裂。

4 实例应用

以乌里雅斯太凹陷南洼漕油藏为例,采用逐步判别分析法筛选出三类共 11 项参数为压裂选层的敏感因子,包括有效孔隙度、含油饱和度、电阻率、全烃/基值、甲烷最大值共 5 项静态参数,渗透率、流动系数、表皮系数共 3 项动态参数,以及压裂液总量、加砂量、砂比共 3 项压裂参数,在参数收集时应尽量保证这些参数准确。

按照 11 项敏感因子的分布范围,确定各个因子的最大及最小值,在这些范围内选择压后产量递增的 4 口井并采用模糊数学法建立矩阵关系(见表 1),并计算压裂有效层的欧氏贴近度值。

表 1 4 口井压裂样井各项特征参数
Table 1 Characteristic parameters of 4 sample wells

井号	有效孔隙度/%	含油饱和度/%	电阻率/ ($\Omega\cdot\text{m}$)	全烃/ 基值	甲烷最大/%	渗透率/ mD	流动系数/[mD $\cdot\text{m}(\text{mPa}\cdot\text{s})^{-1}$]	表皮系数	压裂总量/ m^3	加砂量/ m^3	砂比/%
最大值	8.20	43.00	50.00	2.12	75.00	0.01	0.05	2.00	180.00	29.00	0.135
最小值	12.20	58.00	150.00	25.16	88.00	4.00	45.00	17.00	250.00	52.00	0.165
太 29	8.30	57.60	312.70	8.09	75.49	2.90	28.60	16.00	204.66	30.00	0.15
太 43	9.27	44.08	134.23	2.12	83.92	3.90	43.31	15.76	218.56	30.01	0.14
太 53	8.60	47.80	86.90	7.61	84.82	0.01	0.06	7.74	320.00	50.00	0.16
太 59	10.74	15.32	13.46	5.93	88.83	0.35	13.43	-0.88	416.26	70.70	0.17

理想的压裂井层,其各项特征参数分别取最低和最高界限两个值作为第一行,分别按式(2)和

式(3)计算出集合 A 到集合 P 之间的模糊关系 R 为

$$R_{\min}=\left\{\begin{array}{cccccccccccc}0.03 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.04 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.35 & 0.00 & 0.00 \\0.03 & 0.97 & 1.00 & 0.26 & 0.04 & 0.72 & 0.64 & 0.93 & 0.35 & 0.00 & 0.33 \\0.27 & 0.07 & 0.84 & 0.00 & 0.69 & 0.97 & 0.96 & 0.92 & 0.55 & 0.00 & 0.00 \\0.10 & 0.32 & 0.37 & 0.24 & 0.76 & 0.00 & 0.00 & 0.38 & 1.00 & 1.00 & 0.81 \\0.64 & 0.00 & 0.00 & 0.17 & 1.00 & 0.09 & 0.30 & 0.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00\end{array}\right.$$
$$R_{\max}=\left\{\begin{array}{cccccccccccc}0.64 & 0.97 & 1.00 & 0.26 & 1.00 & 0.97 & 0.96 & 0.93 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\0.03 & 0.97 & 1.00 & 0.26 & 0.04 & 0.72 & 0.64 & 0.93 & 0.35 & 0.00 & 0.33 \\0.27 & 0.07 & 0.84 & 0.00 & 0.69 & 0.97 & 0.96 & 0.92 & 0.55 & 0.00 & 0.00 \\0.10 & 0.32 & 0.37 & 0.24 & 0.76 & 0.00 & 0.00 & 0.38 & 1.00 & 1.00 & 0.81 \\0.64 & 0.00 & 0.00 & 0.17 & 1.00 & 0.09 & 0.30 & 0.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00\end{array}\right.$$

按式(4)分别计算 $R_j(j=2,3,4,5,6)$ 与 R_{\min}^*, R_{\max}^* 之间的欧氏贴近度值得

$$\rho_{\min}(R_j,R_{\min}^*)=0.402\ 9\ 0.400\ 7\ 0.474\ 1\ 0.409\ 0$$
$$\rho_{\max}(R_j,R_{\max}^*)=0.449\ 1\ 0.448\ 9\ 0.445\ 1\ 0.392\ 5$$

对每口井取两个欧氏贴近度的算术平均值为

该井对应的欧氏贴近度值,计算结果及压裂后的增产效果见表 2。从表 2 可以看出,压裂增产基本上与欧氏贴近度大小成比例。结合式样井的实际压裂效果,选择欧氏贴近度值大于 0.425 的井层作为该区块压裂的首选井层。

表 2 4 口式样井压裂后增产效果对比

Table 2 Comparison of stimulation effects after fracturing in 4 sample wells

井号	$\bar{\rho}$ (欧氏贴 近度值)	压前日产油/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	压后日产油/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	增油/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
太 29	0.426 0	5.35	53.2	47.85
太 43	0.424 8	14.82	22.01	7.19
太 53	0.459 6	0.015	40.00	39.985
太 59	0.400 8	0.01	0.43	0.42

表 3 太 67 井和太 27-1X 井特征参数统计表

Table 3 Characteristic parameters of well Tai 67 and well Tai 27-1X

井号	有效孔 隙度/%	含油饱 和度/%	电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$	全烃/ 基值	甲烷 最大值	渗透率/ mD	流动系数/ ($\text{mD} \cdot \text{m}$) $\cdot \text{cp}^{-1}$	表皮 系数	压裂总量/ m^3	加砂量/ m^3	砂比/ %
太 67	13.14	26.43	18.25	2.70	68.54	0.07	0.05	-0.99	210.70	34.69	0.16
太 27-1X	11.78	28.54	50.02	9.18	74.05	0.02	0.13	-0.51	196.62	30.11	0.15

表 4 太 67 井和太 27-1X 井模糊数学法计算的欧式贴近度值
Table 4 Euclidean proximity values calculated by fuzzy mathematics in well Tai 67 and well Tai 27-1X

井号	ρ_{\min}	ρ_{\max}	$\bar{\rho}$	措施选层建议
太 27-1x	0.658 6	0.210 7	0.434 6	压裂
太 67	0.572 1	0.249 7	0.410 9	不压裂

表 5 太 67 井和太 27-1X 井实际措施改造效果统计表
Table 5 Actual stimulation effects of well Tai 67 and well Tai 27-1X

井号	压前 日产油/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	压后 日产油/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	增油量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	压后是否达到 工业油流	压裂 效果
太 27-1x	0.48	34.84	34.36	高产工业油流	有效
太 67	0.08	0.70	0.62	低产油层	无效

结果显示,建议压裂的太 27-1X 井压后增油量
大,属于高产工业油流井,改造措施效果明显,而不
建议措施的太 67 井压裂后仍为低产油层,未达到工
业油流标准,表明模糊数学方法建立的欧式贴近度
值能够预判储层措施改造的效果。

5 结论

(1)基于大数据的定量措施选层方法,综合考
虑了影响措施改造效果的各类影响因子,结合研究
区以往压裂资料,优选针对研究区的敏感因子,并
通过模糊数学识别方式建立了措施选层定量评价
方法。

(2)该技术在乌里雅斯太凹陷进行了应用,优
选出 11 项影响压裂有效性敏感因子,确定了判断是
否可压的欧式贴近度值大于 0.425,两口新井预测
结果与实际相符率达到了 100%。

统计两口新井太 27-1X 井和太 67 井的 11 项敏
感参数值(见表 3),并分别计算其欧式贴近度值为
0.434 6 和 0.410 9,按照可压裂层的选层要求,太
27-1X 井的欧式贴近度值大于 0.425,属于可压范
围,太 67 井欧式贴近度值小于 0.425,属于不可压
范畴,故建议对太 27-1X 井进行压裂,对太 67 井不
进行压裂(见表 4)。为了验证该预测方法的准确
性,追踪了两口井后期压裂改造后实际增油量(见
表 5)。

(3)该技术理论基础扎实,简单实用,可操作性
强,准确性高,可用于同类砂岩储层的压裂选层。

致谢:在论文撰写过程中,感谢渤海钻探工程有限公
司油气井测试分公司徐凤兰、李琳琳、陈燕等试井专业人
员提供的技术支持。

参考文献

[1] 王发现,张松革,高萍. 试井资料在压裂选层中的作用
[J]. 油气井测试,2005,15(3):21-22,24.
WANG Faxian, ZHANG Songge, GAO Ping. Application of
testing data for selecting layer in fravture [J]. Well
Testing, 2005,15(3):21-22,24.

[2] 王广林,王秋爱,郭丽,等. 应用压力导数曲线优化压裂
选层[J]. 油气井测试,2011,20(3):23-24.
WANG Guanglin, WANG Qiuai, GUO Li, et al. Applying
pressure derivative curve to optimize the selecting fractured
layer [J]. Well Testing, 2011,20(3):23-24.

[3] 刘艳梅. 压力曲线在布达特群油层压裂选层中的应用
[J]. 油气井测试,2007,16(2):25-26,31.
LIU Yanmei. Application of pressure curve for selecting
fractured oil layer in budatequn [J]. Well Testing, 2007,
16(2):25-26,31.

[4] 杜成良,郭建春,吕传炳. 利用试油资料进行压裂选层与
措施效果预测[J]. 石油钻采工艺,2011,33(4):91-94.
DU Chengliang, GUO Jianchun, LYU Chuanbing. Fracturing
layer selection and measurement effect prediction using oil
testing data [J]. Oil Drilling and Production Technology,
2011,33(4):91-94.

[5] 方锡贤,周长春,耿学旺. 录井资料在王集油田西南缘压
裂选层中的应用[J]. 录井工程,2012,23(1):34-
36,45.
FANG Xixian, ZHOU Changchun, GENG Xuewang. The
application of mud logging data in fracturing and layer

- selection in the southwest edge of Wangji Oilfield [J]. Mud Logging Engineering, 2012, 23 (1): 34-36, 45.
- [6] 鞠玮艳. 利用试井曲线进行乾安地区油气井压裂选层及压裂效果评价[J]. 化工管理, 2015, (2): 80.
- JU Weiyang. Fracturing layer selection and fracturing effect evaluation of oil and gas wells in Qian'an area by using well test curves [J]. Chemical Management, 2015, (2): 80.
- [7] 蒋艳芳. 中途测试资料在压裂选层中的应用——以鄂北气田为例[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2019, 21(1): 59-62.
- JIANG Yanfang. Application of drill-stem testing data in fracturing selection: taking ebei gas field as an example [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition), 2019, 21 (1): 59-62.
- [8] 王鑫鑫, 霍丽丽, 张辉, 等. 利用地层测试资料指导低渗透砂岩储层压裂改造选层[J]. 油气井测试, 2020, 29(5): 54-60.
- WANG Xinxin, HUO Lili, ZHANG Hui, et al. Application of formation test data to guide fracturing candidate for low-permeability sandstone reservoirs [J]. Well Testing, 2020, 29 (5): 54-60.
- [9] 徐凤兰, 李琳琳, 王永军, 等. 动静因素双重约束下储层压裂综合决策方法[J]. 油气井测试, 2019, 28(5): 67-73.
- XU Fenglan, LI Linlin, WANG Yongjun, et al. Comprehensive decision-making method for reservoir fracturing under dual constraints of dynamic and static factors [J]. Well Testing, 2019, 28 (5): 67-73.
- [10] 姜在炳, 李浩哲, 许耀波, 等. 煤层顶板分段压裂水平井地质适应性分析与施工参数优化[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 183-192.
- JIANG Zaibing, LI Haozhe, XU Yaobo, et al. Geological adaptability analysis and operational parameter optimization for staged fracturing horizontal wells in coal seam roof[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 183-192.
- [11] 卢聪, 郭建春, 王建, 等. 义 104-1 侧井砂砾岩储层大型压裂技术研究与应用[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19 (4): 103-105.
- LU Cong, GUO Jianchun, WANG Jian, et al. Study and application of massive hydraulic fracturing technique in Y104-1C well conglomerate formation [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19 (4): 103-105.
- [12] 孟祥灿. 大情字井油田 A 区块重复压裂增产技术[J]. 油气井测试, 2020, 29(05): 44-49.
- MENG Xiangcan. Repeated fracturing stimulation to block A in Daqingzijing oilfield [J]. Well Testing, 2020, 29 (5): 44-49.
- [13] 龚杨, 张秦汶, 王楠. 模糊识别方法在压裂选井选层中的应用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2013, 15(6): 59-61, 74.
- GONG Yang, ZHANG Qinwen, WANG Nan. Application of well selection for fracturing by fuzzy recognition method [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition), 2013, 15 (6): 59-61, 74.
- [14] 蒋廷学. 重复压裂选井选层的模糊识别方法[J]. 石油钻采工艺, 1997, (3): 60-62, 80.
- JIANG Tingxue. A fuzzy method for selecting well and formation in refracting [J]. Oil Drilling and Production Technology, 1997, (3): 60-62, 80.
- [15] 李洪兴, 汪群, 段钦治, 等编. 工程模糊数学方法及应用[D]. 天津, 天津科学技术出版社, 1993, 10.
- LI Hongxing, WANG Qun, DUAN Qinzi, et al. Engineering fuzzy mathematics method and its application [D]. Tianjin, Tianjin Science and Technology Press, 1993, 10.
- [16] 刘长印. 不同类型油气井压裂选井选层影响因素分析[J]. 油气井测试, 2009, 18(3): 32-35.
- LIU Changyin. Analysis of influencing factors on fracturing well selection and layer selection of different types of oil and gas wells [J]. Well Testing, 2009, 18 (3): 32-35.

编辑 穆立婷

第一作者简介:王孝超,男,1985年出生,2011年毕业于西安石油大学油气田开发工程专业,现主要从事试油及储层改造工作。电话:0317-2721613, 18631777308; Email: cyy_wxc@petrochina. con. cn。通信地址:河北省任丘市华北油田机关大楼, 邮政编码:062552。