

海上压裂液体系综合评价方法研究与应用

张启龙^{1,2} 王晓鹏¹ 董平华¹ 张超¹ 包晓敏¹

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司·海洋石油高效开发国家重点实验室, 天津 300459;
2. 中国石油大学(北京)·油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

摘要:压裂液体系的选择是否合理对压裂作业的成功与否至关重要,人为经验选择无法保证选择结果的合理性和客观性,易对压裂作业效果产生负面影响。综合考虑压裂液摩阻性能、携砂性能和储层保护性能,提出了以基液表观黏度、交联时间、滤失系数等9大评价指标为基础的综合评价体系,利用层次分析法得到各个因素对压裂液选择的影响权重,以此为基础利用模糊物元的方法形成了压裂液体系定量评估方法。利用该方法成功指导了渤海X1等7井次压裂液体系的选择,助力X1井产量达到配产的1.5~1.8倍,证明了该选择方法的合理性和可靠性,有望在渤海及其他油田推广应用。

关键词:海上压裂;压裂液体系;综合评价;层次分析;现场应用

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2023.04.011

Research and application of comprehensive evaluation method for offshore fracturing fluid system

ZHANG Qilong^{1,2}, WANG Xiaopeng¹, DONG Pinghua¹, ZHANG Chao¹, BAO Xiaomin¹

1. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, CNOOC China Ltd., Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China;
2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, 102249, China

Abstract: Rational selection of fracturing fluid system was crucial to the success of fracturing operation. The selection of artificial experience could not guarantee the rationality and objectivity of the selection result, which could easily pose a negative impact on the fracturing operation effect. Considering the friction resistance performance, sand carrying performance and reservoir protection performance of the fracturing fluid, a comprehensive evaluation system was proposed based on 9 evaluation indicators such as the apparent viscosity of the base fluid, cross-linking time and filtration coefficient. The weight of each factor in the selection of the fracturing fluid was obtained using the Analytic Hierarchy Process. On this basis, a quantitative evaluation method of the fracturing fluid system was formed by using the fuzzy matter-element method. This method was successfully applied to guide the selection of fracturing fluid system for 7 wells such as Bohai X1, which helped the production of X1 well to reach 1.5 ~ 1.8 times of the allocated production. It successfully proved the rationality and reliability of this selection method, which is expected to be popularized and applied in Bohai oilfield and other oilfields.

收稿日期:2023-02-09

基金项目:国家科技重大专项“渤海油田高效开发示范工程”(2016ZX05058-002);国家自然科学基金“多重耦合下的页岩油气安全优质钻井理论”(51490652)

作者简介:张启龙(1988-),男,山东济南人,工程师,硕士,主要从事海洋石油钻井完井技术研究与应用、防砂完井设计等工作。
E-mail:zhangql40@cnooc.com.cn

Keywords: Offshore fracturing; Fracturing fluid system; Comprehensive evaluation; Analytic Hierarchy Process; Field application

0 前言

随着渤海油田等海上油田开采程度的逐渐加深,调整井加密与老井储层改造逐渐成为油田产量的主要接替方式^[1-3]。受限于海上作业成本,对单井的控制储量与经济门槛有较高要求,如何提高单井产量至关重要,压裂增产方式逐渐成为高效开发海上油田的必要途径^[4-6]。前期经验表明,海上压裂效果受压裂液性能影响较大,选择合适的压裂液体系对压裂作业的重要性日益凸显。目前,压裂液体系的选择主要依据室内评价实验结果进行,重点考虑压裂液的黏度、交联时间、滤失系数、残渣含量等重要性能^[7-10],但目前存在以下问题:重点以个别因素为指标进行选择时,易导致选择结果较为片面而影响压裂效果;缺乏定量综合评估压裂液性能优劣的方法,当各性能结果存在差异时,主要依靠人为经验进行选择,无法保证选择结果的合理性和客观性。

为解决以上问题,本文综合考虑压裂液的摩阻性能、携砂性能和储层保护性能,提出了以基液表观黏度、交联时间、滤失系数等9大评价指标为基础的综合评价体系,利用层次分析法得到各个因素对压裂液选择的影响权重,以此为基础利用模糊物元的方法形成了压裂液体系定量评估方法,为压裂液体系的适合度排序提供依据。

1 压裂液性能综合评价

压裂液作为压裂作业的工作液,其对压裂成功与否至关重要,其主要功能为:传递能量,压开地下储层;将压裂液和支撑剂从井口携带至井下;输送压裂液和支撑剂至储层中已压开的人造裂缝深处,形成高导流能力通道。基于以上功能,重点考虑压裂液的摩阻、携砂和储层保护性能,提出压裂液性能的综合评价体系^[11-13]。

1.1 压裂液摩阻性能

压裂作业时压裂液流经管柱进入地层过程中以及压裂结束后破胶液反排过程中,都会产生较大摩阻,其与流体黏度直接相关,决定这两个过程摩阻的主要因素为基液表观黏度和破胶液黏度。基液表观黏度在满足携砂要求的行业标准 30 ~ 100 mPa · s 基础上,黏度越小摩阻越小,其产生的能量损耗越小,压裂液性能也越优越。而破胶液黏度决定反排液体上返的难易程度,黏度越小越易反排,对储层的污染相对越小。

1.2 压裂液携砂性能

压裂液的主要功能之一为携带支撑剂进入地层,起到支撑地层裂缝的目的,其携砂性能是实现这一作用的

基础。而由于压裂液具有剪切稀释性,在进入地层孔眼时易发生黏度骤降,直接影响压裂液的携砂性能,常加入交联剂以加强压裂液的结构强度,保证其携砂性能,交联时间和剪切后黏度为携砂性能的主要影响因素。交联时间反映压裂液的延时交联特性,通过控制交联时间起到管柱内未交联降低摩阻、进入地层前交联保证携砂的目的,因此最优的交联时间为液体到达压裂层位的时刻 T_0 ,见式(1),当交联时间大于 T_0 时易发生砂堵,因此在保证压裂液交联时间小于 T_0 的基础上,其交联越晚则摩阻损耗越小,则压裂液体系越适合。剪切后黏度则体现压裂液抗剪切能力,常用储层温度、170 s⁻¹ 剪切速度条件下剪切 2 h 后的黏度来表示,该值越大表明压裂液进入地层后的携砂能力越强。

$$T_0 = \frac{47.12 \times D_i^2 \times L}{Q} \quad (1)$$

式中: T_0 为液体到达井下地层的时间, s; D_i 为压裂管柱内径, m; L 为压裂地层的斜深, m; Q 为压裂排量, m³ /min。

1.3 压裂液储层保护性能

压裂液直接与储层接触,其储层保护性能与压后产量密切相关,为评估压裂液时的重要考虑方面,决定该性能的主要因素包括滤失系数、破胶时间、破乳率、残渣含量及防膨率。压裂液的滤失直接影响压裂液对储层的污染情况,常用滤失量与时间方根的比值来表示,即滤失系数,该值越小则表明压裂液抗滤失性越好。破胶时间表征作业结束后压裂液滞留地层中的时间,该值越小则储层污染程度越小、所需关井时间越短。压裂液进入地层后,液体易与地层中的原油形成乳化液,造成渗透率降低且严重影响压裂液反排速度和程度,压裂液中的破乳剂可实现乳化液体的反转,有效提高反排效率,利用破乳率表示压裂液破坏乳化的程度,该值越大则破乳性能越优。压裂液破胶后会在地层残存一些水不溶物,易造成储层的堵塞和污染,利用残渣含量表征压裂液的反排干净程度,该值越小则压裂液的性能越优。利用膨润土在压裂液破胶液、蒸馏水和煤油中的体积膨胀增量来评价压裂液的防膨性能,该值越大表明抑制黏土水化膨胀和分散运移的能力越强,则其性能越优越。

2 压裂液性能评价因素权重计算

压裂液综合性能评价的基础是各因素对压裂液体系选择的影响权重,常用计算方法包括层次分析法、灰色关联系数法、相关性系数法等,考虑到压裂液体系的

影响因素层级明确,推荐采用层次分析法进行研究,基于构建的三层性能评价体系,以各因素相对重要性原则对各因素权重进行量化计算,得到各因素对压裂液综合适合度的影响权重^[14-17]。

2.1 评价体系构建

以第1节构建的影响因素层级为基础,构建压裂液综合性能评价体系,见图1。该评价体系根据层级关系分为三个层次,目标层为压裂液体系优选,第一因素层为影响压裂液综合评价结果的三类性能,即摩阻性能、携砂性能和储层保护性能,第二因素层为影响上层三个性能的九个因素,分别为基液表观黏度、破胶液黏度、交联时间、剪切后黏度、滤失系数、破胶时间、破乳率、残渣含量及防膨率。

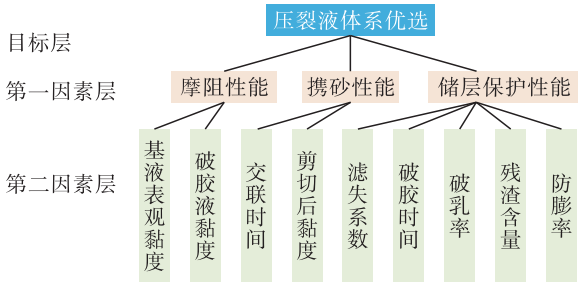


图1 压裂液综合性能评价体系图

Fig.1 Comprehensive performance evaluation system of fracturing fluid

2.2 判断矩阵构建

基于构建的层次评价体系,以相对重要性原则构建两级判断矩阵,采用1~9标度法对判断矩阵进行构建,

表2 海上压裂的主要地质特征与工艺参数范围表

Tab.2 Main geologic Characteristics and process parameters of offshore fracturing

指标	渗透率 / mD	孔隙度	储层埋深 / m	储层温度 / °C	压裂排量 / (m ³ ·min ⁻¹)	单段砂量 / m ³	单段液量 / m ³
范围	10 ~ 50	20% ~ 40%	2 000 ~ 3 500	120 ~ 180	3 ~ 6	20 ~ 50	200 ~ 500

$$R_1 = (r_{ij})_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{2-1} = (r_{ij})_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_{2-2} = (r_{ij})_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_{2-3} = (r_{ij})_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 1/2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 2 & 1/3 & 1 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 1/4 & 1/2 \\ 2 & 3 & 4 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过两两因素比较相对重要性来赋值,数值越大表明前者相对后者的重要性越大,赋值的具体含义见表1。

表1 1~9标度法赋值含义表

Tab.1 1~9 scale method assignment meaning

指标赋值	含义
1	前者与后者的重要性相当
3	前者比后者的重要性稍高
5	前者比后者的重要性较高
7	前者比后者重要性高很多
9	前者比后者重要性绝对高
2,4,6,8	相对重要性位于前、后两个级别之间

压裂液体系性能指标的权重与储层特征、压裂工艺及参数密切相关,目前海上油田压裂作业的主要地质特征和工艺参数范围见表2,其特点为低渗储层渗透率偏高、储层埋深浅、排量规模有限等,此类条件下储层保护性能和携砂性能重要性相对较高,需重点考虑交联时间、压后残渣等因素,综合考虑此类条件下的历史作业经验赋值。基于此构建第一因素层判断矩阵 R_1 ,得到摩阻、携砂、储层保护三大性能对压裂液体系选择的相对重要性,见式(2);同时,构建第二因素层判断矩阵 R_{2-1} 、 R_{2-2} 、 R_{2-3} ,分别表示各自影响因素对上级因素性能影响的相对重要性,见式(3)~(5)。当海上压裂目的层迈向更低渗透率、压裂排量规模大幅提高后,压裂液摩阻性能重要性会显著提高,此时权重需要重新赋值计算。

式中: r_{ij} 为第*i*个因素对于第*j*个因素的相对重要性。

2.3 因素权重计算

根据判断矩阵定义,式(2)~(5)均为正定互反矩阵,利用式(6)、(7)可求出各矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 和特征向量 W ,对特征向量进行归一化处理后可以得到各因素对上一级的影响权重向量 w 。利用以上方法得到第一因素层影响权重向量 $w_1 = (0.16, 0.30, 0.54)^T$,第二因素层的三个影响权重向量分别为: $w_{2-1} = (0.67, 0.33)^T$ 、 $w_{2-2} = (0.75, 0.25)^T$ 、 $w_{2-3} = (0.24, 0.14, 0.08, 0.40, 0.14)^T$ 。

$$W_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n (r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij})} / \sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n (r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij})} \quad (6)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n [(R \times W)_i / (n \times W_i)] \quad (7)$$

式中: n 为矩阵阶数。

2.4 一致性检验

计算各个因素影响权重的基础为判断矩阵的赋值,为排除人为因素影响,对计算结果进行一致性检验,根据计算结果的逻辑性判断构建判断矩阵的合理性^[18],利用式(8)计算一致性比率 CR ,当 $CR < 0.1$ 时,证明计算结果合理,否则需对判断矩阵重新赋值。

$$CR = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)RI} \quad (8)$$

式中: CR 为一致性比率,为判断一致性的主要指标; RI 为一致性参数,其取值与矩阵阶数 n 有关,阶数 n 为 1 ~ 9 时,对应的一致性参数分别为 0、0.58、0.9、1.12、1.24、1.32、1.41、1.45。

利用以上方法对 R 、 R_{2-1} 、 R_{2-2} 、 R_{2-3} 四个判断矩阵进行检验,结果见表 3。根据计算结果,四个矩阵的 CR 值都小于 0.1,证明构建的判断矩阵符合逻辑,计算结果合理。计算第二层因素对压裂液选择的影响权重时,需要乘以其对应的第一层性能所占权重,最终得到第二层各因素的影响权重向量 $p = (0.11、0.05、0.22、0.08、0.13、0.08、0.04、0.21、0.08)^T$ 。

表 3 判断矩阵一致性检验表

Tab.3 Consistency test of judgment matrix

判断矩阵	n	RI	$\lambda_{\max}$	CR
R_1	3	0.58	3.009 2	0.007 9
R_{2-1}	2	0	2.000 0	0
R_{2-2}	2	0	2.000 0	0
R_{2-3}	5	1.12	5.033 1	0.007 4

3 压裂液体系定量选择方法

基于计算得到的各因素对压裂液选择的影响权重,采用模糊物元的方法构建压裂液体系综合适应度计算模型^[19-23],实现压裂液适合度的定量排序计算,结合压裂液行业标准,形成一套压裂液体系综合优选方法流程,提高了压裂液体系选择的合理性。

3.1 压裂液体系综合适应度计算模型

通过室内实验对压裂液体系进行评价,得到影响选择结果的各个因素值,构建初始物元矩阵 X ,见式(9),矩阵由“待评价压裂液体系 M 、考虑因素 C ”构成, x_{ij} 表示第 i 个压裂液体系的第 j 个因素测量值。

$$X = \begin{bmatrix} C_1 & C_1 & \cdots & C_9 \\ M_1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{19} \\ M_2 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{29} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ M_n & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{n9} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由于各个因素的单位 and 影响倾向性不同,对各因素进行无量纲化处理,在满足行业标准的基础上,根据因素值和结果之间的正负相关性,采用以下两种处理公式:当因素结果与压裂液综合适应度呈正相关时,利用式(10)进行处理,呈现负相关时,利用式(11)进行处理。根据第 1 节分析结果,交联时间、剪切后黏度、破乳率及防膨率属于正相关,基液表观黏度、破胶液黏度、滤失系数、破胶时间和残渣含量属于负相关^[24-25]。利用以上公式对初始物元矩阵 X 进行处理,得到复合物元矩阵 U 。

$$u_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (10)$$

$$u_{ij} = \frac{\max_j(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (11)$$

$$U = \begin{bmatrix} C_1 & C_1 & \cdots & C_9 \\ M_1 & u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{19} \\ M_2 & u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{29} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ M_n & u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{n9} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $\min_j(x_{ij})$ 表示所有待选压裂液体系中第 j 个因素的最小值; $\max_j(x_{ij})$ 表示所有待选压裂液体系中第 j 个因素的最大值。

将处理后的复合物元矩阵与各因素权重向量相乘,得到各个待选压裂液体系的综合适合度向量 S ,见式(13),根据各个体系的综合适合度 s_i 大小,得到各个压裂液体系的综合适合度排序,实现压裂液的定量优选。

$$S = U_{n \times 9} \cdot w = \begin{bmatrix} u_{11} \cdot w_1 + u_{12} \cdot w_2 + \cdots u_{19} \cdot w_9 \\ \vdots \\ u_{n1} \cdot w_1 + u_{n2} \cdot w_2 + \cdots u_{n9} \cdot w_9 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.2 压裂液定量选择方法流程

在压裂液体系综合适应度计算方法的基础上,形成一套压裂液体系优选流程,见图 2。

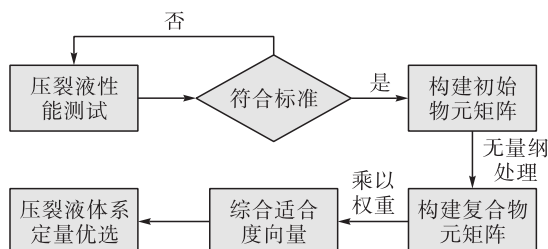


图 2 压裂液体系优选流程图

Fig.2 Optimization process of fracturing fluid system

首先,利用室内实验的方法对待选压裂液体系的 9 个性能参数进行测定;然后将测定结果对照标准进行比

对,见表4,不符合行业标准的需要优化压裂液成分,直至符合行业标准要求;再根据室内测试结果,构建初始物元矩阵^[26-28];结合因素方向性,对初始物元矩阵进行

表4 压裂液性能标准要求表

Tab.4 Standard requirements for fracturing fluid performance

因素	基液表观黏度 / (mPa·s)	破胶液黏度 / (mPa·s)	交联时间 / s	剪切后黏度 / (mPa·s)	滤失系数 / (m·min ^{-1/2})	破胶时间 / min	破乳率	残渣含量 / (mg·L ⁻¹)	防膨率
指标	≥30	≤5	< T ₀	≥50	≤1.0 × 10 ⁻³	≤720	>95%	≤600	≥70%

3.3 现场应用

渤海 X1 井为典型海上低渗油田开发井,平均渗透率 20 mPa·s 以下,考虑到海上作业成本,常规开发方式难以取得经济效益,压裂改造可降低经济门槛,成为高效开发此类井的重要措施。该井作业前需要对压裂液体系 A 和 B 进行选择,两种压裂液各有优势,其中 A 体系性能稳定、储层保护能力强, B 体系滤失小、防膨性能好。

利用 3.2 节方法流程进行定量优选:首先利用室内实验方法,对两种压裂液性能进行测试,结果见表 5,测量指标均符合行业标准;再根据实验结果,构建初始物

元矩阵,得到符合物元矩阵;最后,将物元矩阵与各因素影响权重相乘,得到各个压裂液体系的综合适合度,根据该值大小进行压裂液适合度综合排序。

元矩阵,见式(14);再根据各因素对结果的正、负相关性,利用式(10)、(11)对各因素进行无量纲化处理,得到复合物元矩阵 U ,见式(15);再利用式(13)将处理后的复合物元矩阵与各因素权重向量相乘,计算得到了两种压裂液的综合适合度分别为 0.67、0.21。根据计算结果,优选 A 压裂液体系进行作业,而实际作业表明,X1 井现场压裂作业后,产量达到配产的 1.5 ~ 1.8 倍,较周边井取得更好的压后产量,证明了该压裂液选择方法的合理性,目前该方法已经成功指导渤海油田 7 井次的压裂液优选,取得较好的应用效果,有望在渤海及其他油田推广应用。

表5 两种压裂液性能参数对比表

Tab.5 Comparison of performance parameters of two fracturing fluids

体系	基液表观黏度 / (mPa·s)	破胶液黏度 / (mPa·s)	交联时间 / s	剪切后黏度 / (mPa·s)	滤失系数 / (m·min ^{-1/2})	破胶时间 / min	破乳率	残渣含量 / (mg·L ⁻¹)	防膨率
A	56.4	1.5	240	244	0.92×10^{-3}	120	100%	202	85.2%
B	85.0	2.4	65	118	0.79×10^{-3}	120	100%	361	88.6%

$$X = \begin{bmatrix} 56.4 & 1.5 & 240 & 244 & 0.92 \times 10^{-3} & 120 & 100 & 202 & 85.2 \\ 85 & 2.4 & 65 & 118 & 0.79 \times 10^{-3} & 120 & 100 & 361 & 88.6 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

4 结论

1) 综合考虑压裂液的摩阻性能、携砂性能和储层保护性能,提出了以基液表观黏度、交联时间、滤失系数等 9 大评价指标为基础的压裂液性能综合评价体系。

2) 利用层次分析法得到了基液表观黏度、破胶液黏度、交联时间、剪切后黏度、滤失系数、破胶时间、破乳率、残渣含量及防膨率对压裂液体系选择的影响权重为 0.11、0.05、0.22、0.08、0.13、0.08、0.04、0.21、0.08。

3) 基于各因素对压裂液选择的影响权重,采用模糊物元的方法形成一套压裂液体系综合评价方法,成功指导了渤海 X1 等 7 井次压裂液体系的选择,助力 X1 井产量达到配产的 1.5 ~ 1.8 倍,证明了该选择方法的合理性和可靠性。

参考文献:

- [1] 邓建明. 渤海油田低产低效井综合治理技术体系现状及展望[J]. 中国海上油气, 2020, 32(3): 111-117.
DENG Jianming. Status and prospect of comprehensive treatment technologies for low production and low efficiency wells in Bohai oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(3): 111-117.
- [2] 范白涛. 渤海油田钻完井技术现状及发展趋势[J]. 中国海上油气, 2017, 29(4): 109-117.
FAN Baitao. Current status and developing trend of drilling and completion technologies in Bohai oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(4): 109-117.

- [3] 岳宝林, 石洪福, 解 婷, 等. 渤海油田调整井实施界限研究[J]. 石油化工应用, 2020, 39(11): 28-32.
YUE Baolin, SHI Hongfu, XIE Ting, et al. Research on the implementation limits of adjustment wells in Bohai oilfield [J]. Petrochemical Industry Application, 2020, 39(11): 28-32.
- [4] 汪全林, 邓 琪, 周军良, 等. 海上特低渗油藏压裂水平井开发效果评价——以渤海BZ油田沙三段5井区为例[J]. 复杂油气藏, 2022, 15(3): 74-77.
WANG Quanlin, DENG Qi, ZHOU Junliang, et al. Evaluation of development effect of fracturing horizontal wells in offshore ultra-low permeability reservoirs: A case study of well block 5 of Sha 3 member in BZ Oilfield, Bohai Sea [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2022, 15(3): 74-77.
- [5] 刘 鹏, 徐 刚, 陈 毅, 等. 渤海低渗透储层水平井分段压裂实践与认识[J]. 天然气与石油, 2018, 36(4): 58-63.
LIU Peng, XU Gang, CHEN Yi, et al. Practice and understanding on horizontal well staged fracturing in Bohai low permeability reservoirs [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36(4): 58-63.
- [6] 王绪性, 郭布民, 徐延涛, 等. 海上过筛管压裂工艺研究及应用[J]. 钻采工艺, 2022, 45(2): 56-60.
WANG Xuxing, GUO Bumin, XU Yantao, et al. Research and application on offshore through-screen fracturing technology [J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(2): 56-60.
- [7] 李 平, 王军成, 李本旭, 等. 新型页岩气压裂液降阻剂的研究及应用[J]. 天然气与石油, 2014, 32(1): 72-76.
LI Ping, WANG Juncheng, LI Benxu, et al. Research and application of a new type of shale gas pressure fracturing fluid resistance reducing agent [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32(1): 72-76.
- [8] 肖 博, 张士诚, 肖青香, 等. 耐高温压裂液配方优选与评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(1): 80-84.
XIAO Bo, ZHANG Shicheng, XIAO Qingxiang, et al. Optimization and evaluation of a high-temperature resistance fracturing fluid formula [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science), 2014, 29(1): 80-84.
- [9] 唐洪明, 唐浩轩, 何 江, 等. 水基压裂液对致密砂岩气层的损害机理——基于《水基压裂液性能评价方法: SY/T 5107—2016》的改进[J]. 天然气工业, 2020, 40(9): 55-63.
TANG Hongming, TANG Haoxuan, HE Jiang, et al. Damage mechanism of water-based fracturing fluid to tight sandstone gas reservoirs: Improvement of the evaluation measurement for properties of water-based fracturing fluid: SY/T 5107—2016 [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(9): 55-63.
- [10] 达祺安, 姚传进, 曲晓欢, 等. 低温油气藏胍胶压裂液破胶酶的研制与性能评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(2): 137-144.
DA Qi'an, YAO Chuanjin, QU Xiaohuan, et al. Preparation and performance evaluation of enzyme gel breaker for guar-based fracturing fluid in low-temperature reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(2): 137-144.
- [11] 段国英, 续 静, 白胜伟. 特低渗透气田压裂液体系性能评价及优化——以延长气田盒8段为例[J]. 石化技术, 2021, 28(9): 113-114.
DUAN Guoying, XU Jing, BAI Shengwei. Performance evaluation and optimization of fracturing fluid system in ultra low permeability gas field: A case study of H8 Formation in Yanchang gas field [J]. Petrochemical Industry Technology, 2021, 28(9): 113-114.
- [12] 杨建军, 叶仲斌, 张绍彬, 等. 新型低伤害压裂液性能评价及现场试验[J]. 天然气工业, 2004, 24(6): 61-63.
YANG Jianjun, YE Zhongbin, ZHANG Shaobin, et al. Evaluation and application of new fracturing fluid with low damage [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(6): 61-63.
- [13] 熊俊杰, 赵战江, 安 琦, 等. 硝酸钠加重海水基压裂液性能评价[J]. 油田化学, 2019, 36(1): 43-47.
XIONG Junjie, ZHAO Zhanjiang, AN Qi, et al. Preparation and properties of cmhpg acid fracturing fluid system [J]. Oilfield Chemistry, 2019, 36(1): 43-47.
- [14] 傅 程, 郭 伟, 郭天悦, 等. 基于灰色关联—TOPSIS的优势通道识别方法[J]. 天然气与石油, 2022, 40(3): 68-74.
FU Cheng, GUO Wei, GUO Tianyue, et al. A method to identify the thief zones of water drive sandstone reservoir based on Grey correlation-TOPSIS [J]. Natural Gas and Oil, 2022, 40(3): 68-74.
- [15] 肖永华, 郭川印. 层次分析法在确定炼化设计企业绩效考核指标权重中的应用[J]. 当代化工, 2018, 47(2): 396-399.
XIAO Yonghua, GUO Chuanyin. Application of analytic hierarchy process (AHP) in determining the weights of performance evaluation indexes in refinery and petrochemical enterprises [J]. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(2): 396-399.
- [16] 张启龙, 刘 鹏, 霍宏博, 等. 渤海油田完井液综合优选方法的研究与应用[J]. 天然气与石油, 2021, 39(3): 62-67.
ZHANG Qilong, LIU Peng, HUO Hongbo, et al. Research and application of comprehensive optimization method for completion fluid system in Bohai oil field [J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39(3): 62-67.
- [17] 覃新超, 刘海峰, 陈思羽, 等. 模糊综合评价在天然气长输管道设计中的应用[J]. 天然气与石油, 2017, 35

- (3):109-112.
- QIN Xinchao, LIU Haifeng, CHEN Siyu, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method to long-distance gas pipeline design [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (3): 109-112.
- [18] 邓 雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42 (7):93-100.
- DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of AHP wight vector and its applications [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42 (7): 93-100.
- [19] 张玄奇. 模糊物元精细评价方法在油水井酸化选井选层中的应用[J]. 兰州大学学报, 2004(5):83-86.
- ZHANG Xuanqi. The application of a fuzziness unit fine evaluation method in selecting a well and a layer of acidification [J]. Journal Of Lanzhou University (Natural Sciences), 2004 (5): 83-86.
- [20] 张启龙,许 杰,高 斌,等. 以抑制管柱结垢腐蚀为目标的注水井水源选择方法研究及应用[J]. 表面技术, 2019, 48(11):290-296.
- ZHANG Qilong, XU Jie, GAO Bin, et al. Research and application of water source selection method for water injection well aiming at inhibiting scaling and corrosion of pipe string [J]. Surface Technology, 2019, 48 (11): 290-296.
- [21] 鞠萍华,胡晓波,冉 琰,等. 模糊物元在元动作单元可靠性分析中的应用[J]. 机械科学与技术, 2021, 40 (1):76-83.
- JU Pinghua, HU Xiaobo, RAN yan, et al. Application of fuzzy matter element method in reliability analysis of meta-action unit [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40 (1): 76-83.
- [22] 张昊天,邓虎成,王勃力. 模糊物元分析理论在塔河 2 区老井挖潜的应用[J]. 四川文理学院学报, 2013, 23 (2):53-56.
- ZHANG Haotian, DENG Hucheng, WANG Boli. The application of fuzzy matter element theory to select potential wells in the second area of Tahe Oilfield [J]. Journal of Sichuan University of Arts and Science, 2013, 23 (2): 53-56.
- [23] 曹 洁,陈光耀,贵向泉. 基于模糊物元的熵权法在接地网腐蚀预测中的应用[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36 (11):1067-1071.
- CAO Jie, CHEN Guangyao, GUI Xiangquan. Application of entropy fuzzy matter element method to ground-based network of corrosion prediction [J]. Corrosion and Protection, 2015, 36 (11): 1067-1071.
- [24] 李 平,王军成,李本旭,等. 新型页岩气压裂液降阻剂的研究及应用[J]. 天然气与石油, 2014, 32(1):72-76.
- LI Ping, WANG Juncheng, LI Benxu, et al. Research and application of new shale gas fracturing fluid drag reduction agent [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32 (1): 72-76.
- [25] 熊利军,王 犁,吴 洋,等. 耐高温清洁压裂液的制备及性能评价[J]. 精细化工, 2022, 39(1):204-211.
- XIONG Lijun, WANG Li, WU Yang, et al. Preparation and performance evaluation of high-temperature resistant clean fracturing fluid [J]. Fine Chemicals, 2022, 39 (1): 204-211.
- [26] 徐少葵,左逸帆,章 牧. 基于模糊物元模型的中国旅游生态安全评价及障碍因子诊断研究[J]. 地理科学, 2021, 41(1):33-43.
- XU Shaogui, ZUO Yifan, ZHANG Mu. Evaluation of tourism ecological security and diagnosis of obstacle factors in china based on fuzzy object element model [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41 (1): 33-43.
- [27] 张启龙,韩耀图,陈 毅,等. 海上多元热流体参数优化及选井原则研究[J]. 天然气与石油, 2020, 38(4):71-77.
- ZHANG Qilong, HAN Yaotu, Chen Yi, et al. Study on parameter optimisation and well selection for offshore multi-thermal fluid stimulation [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 (4): 71-77.
- [28] 马荣国,杨申琳. 基于物元分析的 AHP 确定指标权重方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23 (5): 117-119.
- MA Rongguo, YANG Shenlin. AHP confirming weight of index by matter element analysis [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2003, 23 (5): 117-119.