



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405783

引用格式:肖曾利,康凯杰,朱子昂,等.基于模糊综合评价法的多级暂堵压裂工艺适应性分析[J].科学技术与工程,2025,25(18):7590-7596.

Xiao Zengli, Kang Kaijie, Zhu Ziang, et al. Adaptability analysis of multi-stage temporary plugging and fracturing technology based on fuzzy comprehensive evaluation methods[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(18): 7590-7596.

基于模糊综合评价法的多级暂堵压裂 工艺适应性分析

肖曾利,康凯杰*,朱子昂,曹一凡

(西安石油大学石油工程学院,西安710065)

摘要 为分析绥靖油田某区块三叠系长6油藏多级暂堵压裂的施工参数和工艺适应性,以该区块地质和工程设计等资料为基础,采用组合赋权法从储层特性、工艺参数和施工效果三个方面定量地分析了多级暂堵压裂工艺影响因素的大小。根据模糊变换原理和最大隶属度原则建立了基于模糊综合评价法的多级暂堵压裂模糊综合评价模型,将传统的单指标、定性开发效果评价转化为多因素、定量的开发效果评价。应用该模型对绥靖油田某区块三叠系长6油藏进行实例评价分析。结果表明,该评价模型的结果与现场实际效果数据进行对比适应率达到了89.13%,能够有效地评价研究区油井实施暂堵压裂措施的效果好坏;评价体系可为研究区下一步实施暂堵压裂措施、乃至为同类型储层实施多级暂堵压裂改造优化参数提供有益的参考。

关键词 模糊综合评价;长6油藏;多级暂堵压裂;工艺适应性

中图分类号 TE348;

文献标志码 A

Adaptability Analysis of Multi-stage Temporary Plugging and Fracturing Technology Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Methods

XIAO Zeng-li, KANG Kai-jie*, ZHU Zi-ang, CAO Yi-fan

(College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

[Abstract] In order to analyze the design parameters and technology adaptability of multi-stage temporary plugging and fracturing in the Triassic Chang-6 reservoir of a block in Suijing Oilfield. Based on the geological and engineering design data of the block, the influencing factors of multi-stage temporary plugging and fracturing were quantitatively analyzed in terms of reservoir characteristics, technology parameters, and construction effect. The combined weighting method was used to determine the weights of each parameter, and the ridge-type membership function was used to determine the membership degree of each factor. Based on the principles of fuzzy transformation and maximum membership degree, a fuzzy comprehensive evaluation model for multi-stage temporary plugging and fracturing was established. This model transforms the traditional single-index qualitative development effect evaluation into multi-factor quantitative evaluation. The model was applied to evaluate and analyze the Triassic Chang-6 reservoir in a block of Suijing Oilfield. The results show that this evaluation model results have an adaptation rate of 89.13% when compared to the actual effect data in the field, which can effectively evaluate the effectiveness of the implementation of temporary plugging and fracturing measures in the oil wells of the study area. The evaluation system can provide valuable references for the next implementation of temporary plugging and fracturing measures in the study area, and even optimize parameters for multi-stage temporary plugging and fracturing transformation in similar reservoirs.

[Keywords] fuzzy comprehensive evaluation; Chang-6 reservoir; multi-stage temporary plugging and fracturing; technology adaptability

低渗透油藏在加大常规压裂改造规模后,仍存在提液幅度有限、含水上升幅度大、增油效果不明

显等问题。近年来许多学者对暂堵压裂工艺进行了不断研究。谢新秋等^[1]通过井底压力及井下微

收稿日期:2024-08-01 修订日期:2025-03-31

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51704235);陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(面上)(2023-JC-YB-344);西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划(YCS23214209)

第一作者:肖曾利(1979—),男,汉族,陕西西安人,博士,副教授。研究方向:油气田开发。E-mail:xzli@xsyu.edu.cn。

*通信作者:康凯杰(1997—),男,汉族,甘肃天水人,硕士研究生。研究方向:油气田开发。E-mail:kaijie kang@163.com。

地震监测证明暂堵压裂可实现裂缝转向和微裂缝开启。达引朋等^[2]提出了“前置调堵控含水、动态多级暂堵压裂提单产”的重复裂技术思路;该调堵压裂技术为特低渗透油藏中高含水井重复改造提供了新的技术途径。李朝^[3]通过对比常规转向压裂,得出缝内多级暂堵压裂工艺具有更好的增油效果,尤其适合3次以上重复压裂井改造;缝口转向与缝内转向相结合可有效实现对厚油层的改造。王司琪^[4]提出了基于SHAP分析法对暂堵参数对产量的影响进行更细化的定量评价;分析评价了水平井段内多簇暂堵压裂的效果。蒋廷学等^[5]提出了基于多级双暂堵技术形成的“长段差异化极限布缝和多级双暂堵”工艺技术。推动水平井压裂由“多段少簇”到“少段多簇”的新压裂模式。孔祥伟等^[6]提出了暂堵炮眼和近井带的暂堵剂加量计算方法,利用数值模拟软件优化了射孔段长、排量及加砂量等参数;形成了低渗透薄互层油藏动态多级暂堵压裂技术;该技术在薄互层砂岩油藏取得了显著的压裂改造效果。

绥靖油田属于典型的特低、超低渗透油藏。为了提高储层动用程度、控制含水上升幅度,并优化增油效果,引入了层间层内多级暂堵压裂技术。近两年的试验表明,初期增油效果良好,但产量递减快,且部分井的含水上升幅度仍然较大。为评价分析低产井的暂堵压裂工艺适应性,现通过优选暂堵剂类型、优化暂堵级数、调整投加时机等参数,完善绥靖油田三叠系长6油藏多级暂堵压裂工艺体系。针对各因素参数影响的模糊性,采用组合赋权法、模糊变换原理和最大隶属度原则建立多级暂堵压裂模糊综合评价模型,对46口井从储层特性、工艺参数和施工效果3个方面分析多级暂堵压裂工艺影响因素的大小;储层特性包括地层压力、破裂压力,工艺参数包括加砂量、排量、砂比、液量、暂堵剂量;施工效果包括日产油相对变化率、含水率相对变化率;其中日产油相变化率指压裂施工前后年度平均日产油量的变化百分比,含水率相对变化率指压裂施工前后年度平均含水率的变化百分比。对以上这9个参数进行评估,旨在为绥靖油田的多级暂堵压裂工艺体系提供有益的参考,并为今后类似储层的改造优化参数提供指导。

1 多级暂堵压裂模糊综合评价模型

结合绥靖油田长6油藏研究区65口井次的暂堵压裂实施井的地质和工程设计及总结资料,整理出暂堵层位的储层物性参数、生产动态参数以及暂堵压裂的施工工艺参数。根据参数资料的完整性,

选择了46口井的9个参数进行模糊综合评价,分别为地层压力、加砂量、排量、砂比、液量、暂堵剂量、破裂压力、日产油相对变化率、含水率相对变化率,利用各参数进行模糊综合评价的流程如图1所示。

在研究区所选46口井中选取典型井20口,这20口井基础数据如表1所示。

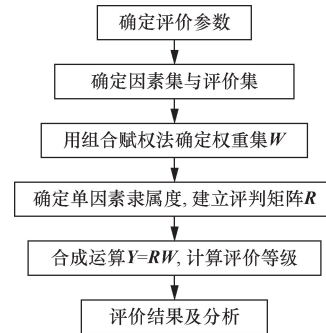


图1 模糊综合评价法流程图

Fig. 1 Flow chart of fuzzy comprehensive evaluation method

1.1 因素集与评价集的确定

结合油井资料的完整情况,确定了9个影响暂堵压裂效果的主要因素,其集合为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_9\}$, 分别是地层压力、加砂量、排量、砂比、液量、暂堵剂量、破裂压力、日产油相对变化率、含水率相对变化率。对油井的暂堵压裂评判结果分为好、较好、中等、较差、差5个评价等级,即 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ ^[7]。

1.2 权重集的确定

权重即单个因素在所有评价因素中所起作用的大小^[8]。为了反映各因素的重要程度,对各因素应赋予相应的权数,由各权数所组成的集合 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_9\}$ 称为因素权重集^[9]。本文研究中结合层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和熵权法形成的组合赋权方法来确定权重^[10-12],既发挥了两种方法各自的优势,又有效减少了主观因素对赋权结果的影响,使计算得到的参数权重更加符合实际情况。采用AHP计算主观权重,得到权重集 W_A ;采用熵权法计算客观权重,得到权重集 W_B 。最后采用加权法^[13]计算最终的权重,得到最终权重集 W 。根据表1,利用组合赋权法确定各参数在综合评价中的权重值如表2所示。在油田实际应用中,日产油相对变化率和含水率相对变化率是最能直观体现某口油井压裂施工前后产量变化的参数,是反映该油井压裂施工是否成功的关键参数。

1.3 评判矩阵的建立

评判矩阵选用5等级评价集(好、较好、中等、较差、差)^[14],通过资料分析^[15-19],确定评价集量化等级如表3所示。

表1 研究区20口典型井的基础数据表

Table 1 Base data table of 20 typical study area wells

井号	地层压力/ MPa	加砂量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)	排量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	砂比/ %	液量/ m^3	暂堵剂/ kg	破裂压力/ MPa	日产油相对 变化率/%	含水率相对 变化率/%
1#	10.28	10.00	3.0	15.0	245.3	165	30.9	148.78	-14.72
2#	10.28	7.50	3.0	20.3	192.4	540	38.1	69.15	-9.03
3#	11.75	3.33	2.5	24.9	97.7	600	35.0	330.77	31.64
4#	12.50	10.00	3.0	26.2	128.5	600	34.1	1 712.50	-34.18
5#	6.41	6.67	3.0	15.8	142.4	480	40.9	488.89	11.33
6#	7.80	6.25	3.5	29.0	105.9	800	39.5	52.63	47.50
7#	7.80	3.33	3.0	29.5	84.4	400	38.0	2.00	65.30
8#	12.85	7.00	3.0	30.9	137.7	210	32.1	912.05	2.74
9#	8.20	5.00	3.0	15.0	158.8	450	27.5	44.44	0.88
10#	8.20	7.50	3.0	26.1	230.2	1035	38.7	8.33	84.29
11#	12.52	6.25	3.5	26.5	117.9	225	36.2	35.71	16.55
12#	12.52	6.25	3.5	29.3	105.3	510	41.7	133.33	58.79
13#	11.60	7.50	2.6	27.7	131.5	435	36.9	-52.00	477.19
14#	11.60	6.00	2.4	29.5	125.8	210	30.2	1 336.25	131.14
15#	6.41	4.17	3.5	29.9	104.2	150	36.2	93.18	98.33
16#	10.30	5.00	3.0	30.0	103.2	180	32.1	160.60	101.40
17#	11.51	4.17	3.0	21.4	164.1	800	43.5	302.94	8.57
18#	7.34	3.33	3.0	20.2	129.0	350	35.2	-20.24	17.01
19#	7.34	4.17	3.0	20.3	129.2	360	37.7	5.66	-7.58
20#	9.20	3.33	3.0	23.0	110.0	450	36.1	378.13	144.13

表2 评价参数权重表

Table 2 Evaluation parameter weighting table

评价参数	地层压力/ MPa	加砂量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)	排量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	砂比/%	液量/ m^3	暂堵剂 量/kg	破裂压 力/MPa	日产油相对 变化率/%	含水率相对 变化率/%
权重	0.077 4	0.097 1	0.021 8	0.078 5	0.071 9	0.102 3	0.082 3	0.376 2	0.092 5

表3 评价集量化等级表

Table 3 Quantitative rating scale of evaluation set

评语	地层压力/ MPa	加砂量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)	排量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	砂比/%	液量/ m^3	暂堵剂 量/kg	破裂 压力/MPa	日产油相对 变化率/%	含水率相对 变化率/%
差	<7	<3	<2	<16	<110	<160	>40	<10	>130
较差	7~8.5	3~4.5	2~2.5	16~20	110~150	160~280	37~40	10~50	80~130
中等	8.5~10	4.5~6	2.5~3	20~24	150~190	280~400	33~37	50~150	30~80
较好	10~11.5	6~7.5	3~3.5	24~28	190~230	400~450	30~33	150~300	1~30
好	>11.5	>7.5	>3.5	>28	>230	>450	<30	>300	<1

由于各因素量纲不同^[20],不能直接进行矩阵计算,首先应该建立各因素隶属度函数^[21],对各因素进行归一化^[22]。经过反复试算并借鉴专家经验,论文采用岭型隶属函数计算方法^[23-26]。对照表3,根据岭型隶属函数,确定出每个单因素的隶属度后^[27],通过计算可得各暂堵压裂井的模糊综合评判矩阵 R ^[28]。以1#井为例,该井的模糊综合评判矩阵如表4所示。

1.4 模糊综合评价等级的计算

在得到了模糊综合评判矩阵 R 和权重集 W 后^[29],根据模糊变换原理 $Y = RW$ 进行模糊综合评价等级的合成运算^[30],最后得到模糊综合评价等级 Y 。对表4给出的模糊综合评判矩阵进行合成运算,可得1#井的综合评判结果如表5所示,根据最大隶属度原则,可确定1#井的模糊综合评价结果为好。

表4 1#井模糊综合评判矩阵表

Table 4 Fuzzy comprehensive evaluation matrix of 1# well

评价参数	参数值	单参数隶属度				
		差	较差	中等	较好	好
地层压力/MPa	10.28	—	—	0.265 3	0.734 7	—
加砂量/(m ³ ·m ⁻¹)	10	—	—	—	—	1.0
排量/(m ³ ·min ⁻¹)	3	—	—	0.5	0.5	—
砂比/%	15	0.886 9	0.113 1	—	—	—
液量/m ³	245.3	—	—	—	0.421 5	0.578 5
暂堵剂量/kg	165	0.316 2	0.683 8	—	—	—
破裂压力/MPa	30.9	—	—	—	0.904 5	0.095 5
日产油相对变化率/%	148.78	—	—	0.267 6	0.732 4	—
含水率相对变化率/%	-14.72	—	—	—	—	1.0

表5 1#井暂堵压裂模糊综合评价表

Table 5 Fuzzy comprehensive evaluation table for temporary plugging and fracturing of 1# well

评价井	隶属度				
	差	较差	中等	较好	好
1#	0.107 2	0.073 6	0.133 8	0.236 4	0.449 0

2 实例分析

2.1 研究区具体油井实际效果

该油田研究区1#井、2#井从储层特征、渗流特征和开采产量特征等方面极具代表性。1#井在2020年4月20日—5月1日期间实施了暂堵压裂措施。1#井暂堵压裂措施前后日产液、日产油和含水率变化曲线如图2所示。该井措施之前日产液量0.6 m³/d、日产油量0.4 t/d、含水率45%；实施暂堵压裂措施之后,该井日产液量保持在1.5 m³/d左右,日产油量1.0 t/d左右,含水率降低至25%左右。2#井在2020年6月5—15日实施了暂堵压裂措施。

2#井暂堵压裂措施前后日产液、日产油和含水率变化曲线如图3所示。该井措施之前日产液量0.7 m³/d、日产油量0.45 t/d、含水率40%；实施暂堵压裂措施之后,该井日产液量保持在1.6 m³/d左右,日产油量1.0 t/d左右,含水率降低至25%左右。从产液量、产油量和含水率变化情况可以看出,这两口井暂堵压裂取得了较好的效果。

2.2 模型评价结果与实际效果对比

按照相同步骤,对所选46口暂堵压裂井进行模糊综合评价,并将其与油田现场提供的油井数据进行对比。其中20口典型井的评价结果和油田实际对比结果如表6所示。

根据模糊综合评价结果,参与评价的46口井中,综合评价结果为“好”的有15口井,占比为32.61%；综合评价结果为“较好”的有7口井,占比为15.22%；综合评价结果为“中等”的有13口井,占比为28.26%；综合评价结果为“较差”的有6口井,占比为13.04%；综合评价结果为“差”的有5口

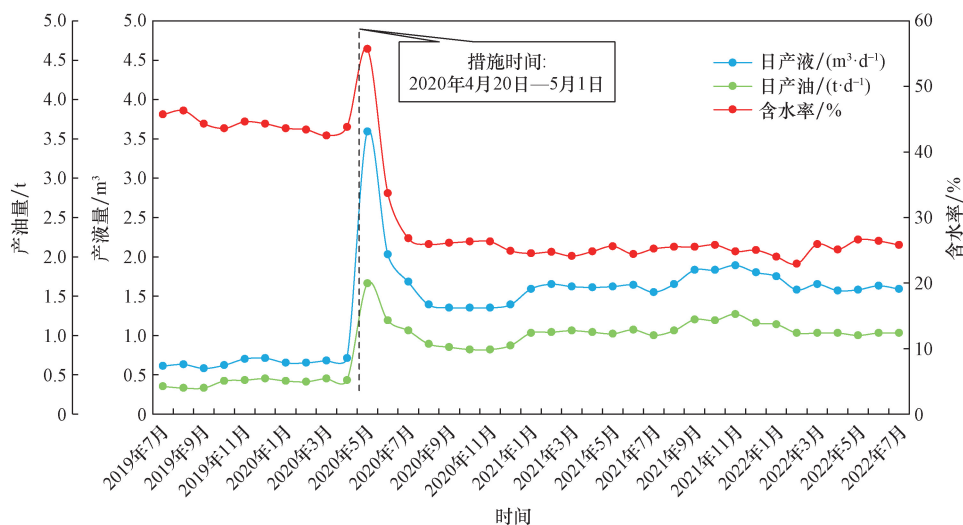


图2 1#井暂堵压裂措施前后日产液、日产油和含水率变化曲线图

Fig. 2 Curves of daily fluid production, daily oil production and water cut change before and after temporary plugging and fracturing measures in 1# well

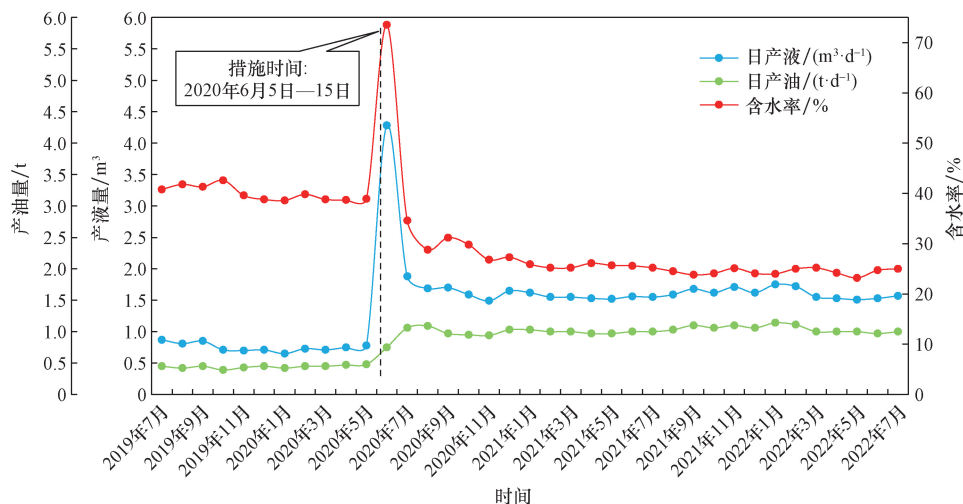


图3 2#井暂堵压裂措施前后日产液、日产油和含水率变化曲线图

Fig. 3 Curves of daily fluid production, daily oil production and water cut change before and after temporary plugging and fracturing measures in 2# well

表6 所选20口典型井模糊综合评价结果与实际效果对比表

Table 6 Comparison table between the fuzzy comprehensive evaluation results of the selected 20 typical wells and the actual effects

井号	隶属度					评价结果	是否适应实际效果
	差	较差	中等	较好	好		
1#	0.107 2	0.073 6	0.133 8	0.236 4	0.449 0	好	是
2#	0.021 3	0.261 0	0.303 9	0.013 4	0.400 4	好	是
3#	0	0.002 1	0.222 0	0.506 8	0.269 0	较好	否
4#	0.096 1	0.125 9	0.131 0	0.495 1	0.152 0	较好	是
5#	0.103 9	0.173 2	0.200 7	0.512 3	0.009 8	较好	否
6#	0.063 6	0.208 5	0.020 7	0.257 5	0.449 7	好	是
7#	0.255 0	0.139 2	0.503 5	0.069 4	0.032 7	中等	是
8#	0.012 3	0.641 5	0.045 9	0.155 9	0.144 5	较差	是
9#	0.048 6	0.172 4	0.474 4	0.279 7	0.025 0	中等	否
10#	0	0.090 9	0.021 2	0.267 6	0.620 4	好	是
11#	0.008 7	0.673 8	0.056 7	0.212 6	0.048 3	较差	是
12#	0.082 9	0.132 7	0.068 7	0.635 5	0.080 2	较好	是
13#	0	0.183 7	0.391 9	0.304 0	0.120 4	中等	是
14#	0.389 2	0.490 9	0.036 0	0.034 1	0.049 7	较差	否
15#	0.569 1	0.111 5	0.050 7	0.176 7	0.091 9	差	是
16#	0.174 8	0.576 4	0.105 0	0.109 1	0.034 7	较差	是
17#	0.061 9	0.185 0	0.178 2	0.162 6	0.412 2	好	是
18#	0.145 9	0.513 4	0.324 9	0.015 8	0	较差	是
19#	0.063 0	0.390 0	0.531 6	0.015 4	0	中等	否
20#	0.155 2	0.219 6	0.015 4	0.079 6	0.530 2	好	是

井,占比为 10.87%,综合评价结果分布如图 4 所示。通过模糊综合评价结果与油田现场提供的实际效果数据进行对比,参与评价的 46 口井中有 41 口井与研究区实际效果相适应,适应率达到了 89.13%;该评价体系能够对长 6 油藏暂堵压裂的工艺参数适应性进行较为准确地判定,具有较高的实用性和可行性,可为同类型储层实施多级暂堵压裂工艺优化参数提供有益的参考。

3 结论

(1) 从储层特性、工艺参数、施工效果 3 个方面展开分析,采用组合赋权法确定各参数的权重、利用岭型隶属函数确定单因素隶属度,建立了多级暂堵压裂模糊综合评价模型,根据最大隶属度原则确定综合评价结果。

(2) 应用所建立的模糊综合评价模型,对绥靖油

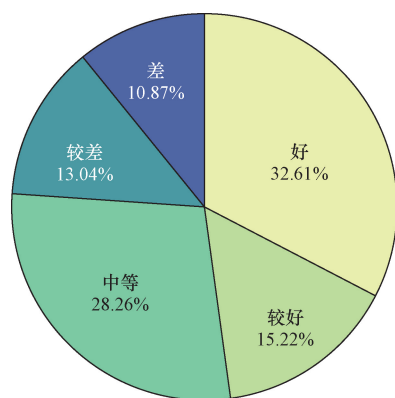


图4 模糊综合评价结果分布图

Fig. 4 Distribution of the results of the fuzzy comprehensive evaluation

田某区块三叠系长6油藏暂堵压裂井进行了综合评价。该评价模型的结果与现场实际效果数据进行对比适应率达到了89.13%，验证了所建立的模糊综合评价模型的可行性。

(3) 实例分析表明,评价结果能较准确地反映研究区块油井实施暂堵压裂措施的效果好坏;评价体系可为研究区下一步实施暂堵压裂措施,乃至为同类型储层实施多级暂堵压裂改造优化参数提供有益的参考。

参 考 文 献

- [1] 谢新秋, 邹鸿江, 武龙, 等. 暂堵压裂在低渗透油田的研究与应用[J]. 钻采工艺, 2017, 40(3): 65-67, 11.
Xie Xinqiu, Zou Hongjiang, Wu Long, et al. Research and application of temporary plugging fracturing in low permeability oilfield [J]. Drilling Process, 2017, 40(3): 65-67, 11.
- [2] 达引朋, 李建辉, 王飞, 等. 长庆油田特低渗透油藏中高含水井调堵压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(3): 74-79.
Da Yinpeng, Li Jianhui, Wang Fei, et al. Adjustment plugging and fracturing technology of high water content wells in extra low permeability reservoirs in Changqing Oilfield[J]. Oil Drilling Technology, 2022, 50(3): 74-79.
- [3] 李朝. 缝内多级暂堵压裂工艺技术在油田的应用[J]. 化学工程与装备, 2022(12): 118-120.
Li Zhao. Application of in-seam multi-stage temporary plugging and fracturing technology in oilfield [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2022(12): 118-120.
- [4] 王司琪. 玛湖水平井段内多簇暂堵压裂效果评价[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
Wang Siqi. Evaluation of fracturing effect of multi-cluster temporary plugging in Mahu horizontal well section[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [5] 蒋廷学, 王海涛, 赵金洲, 等. 深层页岩气水平井多级双暂堵压裂关键工艺优化[J]. 天然气工业, 2023, 43(11): 100-108.
Jiang Tingxue, Wang Haitao, Zhao Jinzhou. Optimization of key process of multi-stage double temporary plug fracturing in deep shale gas horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(11): 100-108.
- [6] 孔祥伟, 万雄, 郭照越, 等. 致密砂岩油藏体积压裂技术适应性评价及压裂参数优化[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(2): 81-86.
Kong Xiangwei, Wan Xiong, Guo Zhaoyue, et al. Evaluation of the adaptability of volumetric fracturing technology and optimization of fracturing parameters in tight sandstone reservoirs[J]. Oil and Gas Chemistry, 2023, 52(2): 81-86.
- [7] 吴奇兵, 张士超, 曹义威, 等. 基于模糊综合评价法的海上采油树安全分级[J]. 石油机械, 2021, 49(10): 65-70.
Wu Qibing, Zhang Shichao, Cao Yiwei, et al. Safety grading of off-shore oil recovery tree based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(10): 65-70.
- [8] 孙玉学, 肖昌, 刘雪雪. 基于层次分析和模糊评价的井壁稳定预测方法[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(5): 16-20, 96.
Sun Yuxue, Xiao Chang, Liu Xuexue. Well wall stability prediction method based on hierarchical analysis and fuzzy evaluation[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012, 29(5): 16-20, 96.
- [9] 贾志超, 黄华州, 黄绍博, 等. 基于AHP-熵权法的采动区煤层气开发潜力评价[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 117-124.
Jia Zhichao, Huang Huazhou, Huang Shaobo, et al. Evaluation of coalbed methane development potential in mining areas based on AHP-entropy weight method [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 117-124.
- [10] 陈光波, 李元. 基于组合赋权的煤矿透水应急救援能力评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(6): 2353-2361.
Chen Guangbo, Li Yuan. Evaluation of coal mine water permeable emergency rescue capability based on combined weighting [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(6): 2353-2361.
- [11] 王莉, 马街青, 王涛, 等. 基于IAHP-熵权法和模糊综合评价法的市政有限空间气体安全风险评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 1319-1325.
Wang Li, Ma Xianqing, Wang Tao, et al. Gas safety risk assessment in municipal limited space based on IAHP-entropy weight method and fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(3): 1319-1325.
- [12] 张佳薇, 郑岳涵, 李明宝. 组合赋权-模糊综合评价的安全驾驶行为分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(23): 10255-10261.
Zhang Jiawei, Zheng Yuehan, Li Mingbao. Analysis of safe driving behavior based on combination weighting and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(23): 10255-10261.
- [13] 张智勇, 邵越, 黄鑫灿, 等. 基于模糊综合评判法的自行车骑行环境评价——以北京市为例[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(16): 6711-6718.
Zhang Zhiyong, Shao Yue, Huang Xincan, et al. Evaluation of bicycle riding environment based on fuzzy synthetic evaluation method: a case study in Beijing [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(16): 6711-6718.
- [14] 郭磊, 项卫东, 刘英男, 等. 基于熵权法的新建长输天然气管道易损性评价[J]. 油气储运, 2015, 34(4): 373-376.
Guo Lei, Xiang Weidong, Liu Yingnan, et al. Evaluation of vulnerability of new long-distance natural gas pipeline based on entropy weight method [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(4): 373-376.

- [15] 李琴, 邓波, 蒲凯伦, 等. 基于 AHP-模糊综合评价法的含油钻屑锤磨式热解析处理系统经济性评价研究[J]. 现代化工, 2019, 39(S1): 177-183.
Li Qin, Deng Bo, Pu Kailun, et al. Research on the economic evaluation of oil-bearing drill cuttings hammer mill thermal analysis treatment system based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39 (S1): 177-183.
- [16] 胡伟, 杨胜来, 李斯鸣, 等. 基于多层次模糊综合评价的剩余油分布研究方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(4): 22-28.
Hu Wei, Yang Shenglai, Li Siming, et al. Residual oil distribution research method based on multilevel fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2015, 37(4): 22-28.
- [17] 肖仕红, 唐鹏, 孙传轩, 等. 基于 AHP 的水下采油树海试模糊综合评价[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(3): 335-340.
Xiao Shihong, Tang Peng, Sun Chuanxuan, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of underwater oil recovery tree sea trial based on AHP[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(3): 335-340.
- [18] 王帆, 廉旭刚, 蔡音飞. 基于模糊层次分析法的采动地裂缝发育等级评价——以沁水煤田为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 129-136.
Wang Fan, Lian Xugang, Cai Yinfei. Evaluation of the development level of mining cracks based on fuzzy hierarchical analysis: a case study of Qinshui Coalfield[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(1): 129-136.
- [19] 张刚. 基于模糊综合评价法的煤矿废弃油井风险分类及灾害防治技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 3964-3971.
Zhang Gang. Risk classification and disaster prevention technology of coal mine abandoned oil wells based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 3964-3971.
- [20] 解凤强. 基于模糊数学方法的压裂井优选[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(7): 1768-1771.
Xie Fengqiang. Optimization of fracturing wells based on fuzzy mathematical methods[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(7): 1768-1771.
- [21] 邓万友. 基于模糊综合评判法的储层评价[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(12): 3460-3463, 3471.
Deng Wanyou. Reservoir evaluation based on fuzzy comprehensive judgment method [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(12): 3460-3463, 3471.
- [22] 赵小龙, 刘向君, 刘洪, 等. 压裂酸化井层模糊综合评价模型的改进与应用[J]. 特种油气藏, 2012, 19(3): 128-131, 157.
Zhao Xiaolong, Liu Xiangjun, Liu Hong, et al. Improvement and application of fuzzy comprehensive evaluation model for fractured and acidized well formation [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(3): 128-131, 157.
- [23] 王文涛, 刘鹏超, 李标, 等. 特低渗储层产能模糊综合评价方法研究[J]. 特种油气藏, 2019, 26(2): 127-131.
Wang Wentao, Liu Pengchao, Li Biao, et al. Research on fuzzy comprehensive evaluation method of production capacity of extra-low-permeability reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 127-131.
- [24] 任垒, 窦斌, 刘国良, 等. 基于模糊综合评价法的四川盆地地下侏罗统陆相页岩气地质选区[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(9): 177-180, 3.
Ren Lei, Dou Bin, Liu Guoliang, et al. Geological zoning of Lower Jurassic terrestrial shale gas in Sichuan Basin based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(9): 177-180, 3.
- [25] 苏永华, 何满潮, 孙晓明. 岩体模糊分类中隶属函数的等效性[J]. 北京科技大学学报, 2007(7): 670-675.
Su Yonghua, He Manchao, Sun Xiaoming. Equivalence of affiliation functions in fuzzy classification of rock masses [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007(7): 670-675.
- [26] 何利民, 李静娜, 赵雪雯. 基于层次分析-模糊综合评价的油库衍生灾害分级研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(1): 33-41.
He Limin, Li Jingna, Zhao Xuewen. A study on the classification of oil depot-derived disasters based on hierarchical analysis and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(1): 33-41.
- [27] 张思兰, 张春, 王丹, 等. 基于模糊综合评价的钻井岩屑土壤化利用可行性分析[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(5): 1924-1931.
Zhang Silan, Zhang Chun, Wang Dan, et al. Feasibility analysis of soil utilization of drilling rock cuttings based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(5): 1924-1931.
- [28] 张士超, 李建伟, 陈小伟, 等. 海洋钻修机井架安全等级模糊综合评价[J]. 船舶工程, 2023, 45(8): 148-153.
Zhang Shichao, Li Jianwei, Chen Xiaowei, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of safety level of offshore drilling and repairing rig derrick [J]. Marine Engineering, 2023, 45(8): 148-153.
- [29] 王军防, 矫捷, 李皓, 等. 基于 AHP-EWM-模糊综合评价的智能油库成熟度评价[J]. 油气与新能源, 2024, 36(1): 41-47.
Wang Junfang, Jiao Jie, Li Hao, et al. Maturity evaluation of smart tank farms based on AHP-EWM-fuzzy comprehensive evaluation [J]. Petroleum and New Energy, 2024, 36(1): 41-47.
- [30] 刘金玉, 王殿生, 胡玉琴. 基于层次分析的油库区静电风险模糊综合评价方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 120-126.
Liu Jinyu, Wang Diansheng, Hu Yuqin. Fuzzy comprehensive evaluation method of static electricity risk in oil depot area based on hierarchical analysis [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2019, 34(1): 120-126.