

# 压裂返排液水质特性评价及回用技术研究\*

同 霄<sup>1,2</sup> 周立辉<sup>1,2</sup> 李 岩<sup>1,2</sup> 任 鹏<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室)

**摘 要** 为了明确压裂返排液中影响回用的突出污染物,从而针对性地研究现场处理技术,采用水质矩阵法对苏里格气田常用的两种体系压裂返排液的水质特性进行评价。结果表明:影响胍胶压裂返排液回用的污染物重要程度排序为钙镁离子、铁离子、悬浮物和 pH 值;影响可回收体系压裂返排液回用的污染物重要程度排序为悬浮物、pH 值、钙镁离子和铁离子,两者差异明显。以此为基础,针对胍胶压裂返排液,提出“化学絮凝、离子控制、金属网过滤”的现场处理工艺,钙镁离子降低了 83.7%,铁离子降低了 79.6%,悬浮物降低了 85.0%;针对可回收体系压裂返排液,提出“重力沉降、金属网过滤”的现场处理工艺,悬浮物降低了 81.0%,处理后水质达到重复配液要求。

**关键词** 压裂返排液; 水质矩阵法; 权重分析; 回收利用

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2021.01.006

文章编号: 1005-3158(2021)01-0027-05

## Study on Water Quality Characteristic Evaluation and Reuse Technology of Fracturing Back-flow Fluids

Tong Xiao<sup>1,2</sup> Zhou Lihui<sup>1,2</sup> Li Yan<sup>1,2</sup> Ren Peng<sup>1,2</sup>

(1. Oil and Gas Technology Research Institute of Changqing Oilfield Company;

2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-permeability Oil and Gas Field)

**ABSTRACT** In order to clarify the key pollutants affecting the reuse of fracturing back-flow fluids, and to study the field treatment technology pertinently, the water quality characteristics of fracturing back-flow fluids of two systems commonly used in Sulige Gas Field were evaluated by water quality matrix method. The results shown that the importance of pollutants affecting the reuse of guanidine gum fracturing back-flow fluids are ranked as calcium and magnesium ions, iron ions, suspended solids and pH value; the importance of pollutants affecting the reuse of fracturing back-flow fluids in recoverable system are ranked as suspended solids, pH value, calcium and magnesium ions and iron ions, the difference between them is obvious. Based on the above evaluation results, a field treatment process of chemical flocculation, ion control and metal mesh filtration was proposed for guar gum fracturing back-flow fluids. The calcium and magnesium ions decreased by 83.7%, iron ions decreased by 79.6% and suspended solids decreased by 85.0%. In view of the fracturing back-flow fluids of recoverable system, a field treatment process of gravity sedimentation and metal mesh filtration was proposed. The content of suspended solids was decreased by 81.0%, and the treated water quality met the requirement of repeated liquid distribution.

**KEY WORDS** fracturing back-flow fluids; water quality matrix; weight analyzing; recycle

\* 基金项目: 中国石油重大科技专项(1602-2-1)“低碳与清洁发展关键技术研究及应用”。

同霄, 2017 年毕业于长安大学环境工程专业, 博士, 现在中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院从事油气田安全环保技术研究工作。通信地址: 陕西省西安市凤城四路苏里格大厦 2312, 710018。E-mail: tonghse@126.com。

## 0 引言

油气田压裂作业过程不断产生大量压裂返排液,目前压裂返排液处理后重复利用已成为油气田研究的重点<sup>[1]</sup>。通过低成本、高效率的现场处理工艺,形成环保的压裂返排液回用技术,对于油气田环境保护和降低生产成本具有重大意义。由于压裂液体系较多,导致压裂返排液的水质特性存在差异,同时重复利用存在多种途径,所以单一的处理方法或固定的处理工艺不能针对性地处理体系各异、回用途径多样的压裂返排液。基于上述原因,为了确定技术可靠、经济合理的压裂返排液处理工艺,首先应对压裂返排液的水质特性进行评价,明确压裂返排液中影响回用的主要污染物,从而为工艺的选择提供基础。目前针对污水特性评价的方法主要为单因子指数评价法、专家打分法、网格法、环境指数法和水质矩阵法等<sup>[2]</sup>,其中,单因子指数评价法计算简单,应用较多,但由于没有考虑指标之间的相对关系,计算结果仅代表单指标的绝对重要性,具有一定的片面性<sup>[3]</sup>;而水质矩阵法将定量分析和定性分析相结合,综合考虑水质的总体污染程度,并计算得到各类污染物在整个污染水平中的贡献,提高了评价结果的准确性。赵红梅等<sup>[4]</sup>采用该方法对西安市城市污水特性进行分析,为城市污水处理工艺的选择提供了参考;金鹏康等<sup>[5]</sup>基于该方法对石油压裂废水的污染物可处理性进行分析,为实际处理工艺的确立提供了理论基础。本文基于水质矩阵法,以压裂返排液处理后重复配液为目标,对苏里格气田常用两种体系的压裂返排液的水质特性进行评价,明确不同体系压裂返排液的突出污染物,并以此为基础,分别研究形成对应的现场处理回用工艺,处理后水质各项指标达到了气田现场回用要求。

## 1 水质矩阵法

20 世纪 70 年代 Tambo 等<sup>[6]</sup>提出水质矩阵的概念,对污水中有机污染物的可处理性进行评价。采用该方法评价污水特性主要分为 4 个步骤:第一步是确定水质指标。水质矩阵的横向坐标一般依据水处理的要求选择综合性的水质指标,如悬浮物、化学需氧量、总氮等;第二步是构造判断矩阵。 $u_i$ 、 $u_j$  为所选的水质指标, $u_{ij}$  表示指标  $u_i$  对指标  $u_j$  的相对重要性数值,取值标准与层次分析法中的 1~9 标度法一致<sup>[7]</sup>。如式(1)所示,构建得到判断矩阵  $P$ ;第三步是计算重要性排序。根据判断矩阵  $P$ ,采用方根法求出最大特

征方根  $\lambda_{\max}$  所对应的特征向量  $W$ ,该向量即为各项水质指标的重要性排序;第四步是检验判断矩阵的一致性,公式为  $CR=CI/RI$ 。

$$P = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & \cdots & u_n \\ u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{matrix} \quad (1)$$

其中,随机一致性比率  $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)$ , $n$  为指标数,平均随机一致性指标  $RI$  值可根据  $n$  的大小查表得到<sup>[4]</sup>。当  $CR<0.1$  时,构建的判断矩阵具有满意的一致性,水质指标重要性权重分配合理,否则说明判断矩阵存在逻辑问题,需要调整取值。

## 2 压裂返排液水质特性评价

### 2.1 水质指标确定

目前苏里格气田使用的压裂液体系主要为胍胶体系和可回收体系两类,所以压裂返排液处理后重复配液的途径也分为以上两种。针对压裂返排液处理后重复配制胍胶压裂液的水质要求,众多学者开展了研究,林雪丽等<sup>[8]</sup>通过分析无机盐离子对胍胶压裂液性能的影响,发现各种离子的影响程度从高至低分别为钙离子>镁离子>碳酸氢根离子>氯离子>硫酸根离子>碳酸根离子,其中钙镁离子是影响胍胶压裂液性能的主要离子,应控制在 10 000 mg/L 以内;蒋继辉等<sup>[9]</sup>提出油田废水处理回注、配制胍胶压裂液、配制聚合物溶液 3 种回用途径的废水水质要求,其中,对钙镁离子、铁离子、氯离子等指标进行了明确规定;袁长忠等<sup>[10]</sup>针对胜利油田胍胶压裂返排液的重复利用,提出了对应的水质控制标准;田培蓉<sup>[11]</sup>通过单因素影响试验,提出 pH 值、钙离子、铁离子、残余交联剂、残余破胶剂和固相颗粒是影响压裂返排液回用的主要因素。本文结合现场配液实际情况和其他学者的研究成果,最终确定压裂返排液处理后配制胍胶体系压裂液的水质控制指标为钙镁离子、铁离子、pH 值和悬浮物,其中,钙镁离子总量 $\leq 150$  mg/L、铁离子 $\leq 20$  mg/L、pH 值在 6.5~7.0(选取均值 6.75)、悬浮物 $\leq 200$  mg/L。

可回收体系压裂液以新型多效表面活性聚合物为主剂,具有可逆变化的分子聚合体结构,重复利用的水质标准较为宽泛。目前针对压裂返排液处理后配制可回收体系压裂液的水质控制标准研究较少,本文选取何明航等<sup>[12]</sup>研究成果,开展进一步的评价计算,见表 1。

表 1 两种体系压裂返排液重复配液的水质指标

| 压裂液体系 | 评价指标                 | $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} /$<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} /$<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $\text{Al}^{3+} /$<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | pH 值    | 悬浮物/<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 细菌/<br>(个 $\cdot \text{mL}^{-1}$ ) | $\text{S}^{2-} /$<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |
|-------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 胍胶体系  | 林雪丽等 <sup>[8]</sup>  | 10 000                                                                     | —                                                                          | —                                                         | —       | —                                           | —                                  | —                                                        |
|       | 蒋继辉等 <sup>[9]</sup>  | 300、150                                                                    | 20                                                                         | 20                                                        | 6~7.5   | 2 000                                       | 100                                | —                                                        |
|       | 袁长忠等 <sup>[10]</sup> | 500                                                                        | 5( $\text{Fe}^{2+}$ )                                                      | —                                                         | 6.5~7.5 | 300                                         | —                                  | 2                                                        |
|       | 田培荣 <sup>[11]</sup>  | 1 500                                                                      | 20                                                                         | —                                                         | 6.0~7.0 | 200                                         | —                                  | —                                                        |
|       | 本文指标                 | 150                                                                        | 20                                                                         | —                                                         | 6.5~7.0 | 200                                         | —                                  | —                                                        |
| 可回收体系 | 本文指标                 | 10 000                                                                     | 200                                                                        | —                                                         | 6.0~7.5 | 200                                         | —                                  | —                                                        |

2.2 权重计算

针对胍胶体系和可回收体系的压裂返排液,在苏里格气田分别选取 5 口井进行水质检测,测试结果见表 2。

表 2 压裂返排液组分性质

| 评价指标                                                                | 胍胶体系  | 可回收体系 | 胍胶体系超标倍数 | 可回收体系超标倍数 |
|---------------------------------------------------------------------|-------|-------|----------|-----------|
| $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 894.2 | 688.1 | 4.96     | —0.93     |
| $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 36.8  | 10.2  | 0.84     | —0.95     |
| pH 值                                                                | 6.8   | 6.8   | 0.01     | 0.01      |
| 悬浮物/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$                              | 235.3 | 239.4 | 0.18     | 0.20      |

在水质评价的计算过程中,需要构造判断矩阵来比较压裂返排液中各项指标的相对重要性。通过计算比较不同体系压裂返排液各项评价指标和对应的回用指标之间超标倍数的大小,构造判断矩阵,完成对苏里格气田两种体系压裂返排液回用水质指标的权重计算和分配。

以胍胶体系为例,比较表 2 中 4 个水质指标的超标倍数,根据倍数的大小确定其中任意两个指标的相对重要性,即压裂返排液中污染物含量对回用的影响程度,构造判断矩阵,并结合标度规则,赋值得到判断矩阵,见式(2)。

钙镁离子 铁离子 pH 值 悬浮物

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 9 & 7 \\ 1/5 & 1 & 5 & 3 \\ 1/9 & 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/7 & 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{钙镁离子} \\ \text{铁离子} \\ \text{pH 值} \\ \text{悬浮物} \end{matrix} \quad (2)$$

计算得到判断矩阵的特征向量  $W = (0.642\ 7, 0.208\ 3, 0.048\ 0, 0.101\ 0)$ ,最大特征值  $\lambda_{\max} = 4.174\ 0$ ,  $CI = (\lambda_{\max} - 4)/(4 - 1) = 0.058\ 0$ ;当  $n = 4$  时,  $RI = 0.9$ ;  $CR = CI/RI = 0.064\ 4 < 0.1$ ,表明判断矩阵具有满意的一致性,权重分配合理,特征向量  $W$  可作为权重向量。

以可回收体系为权重的分配对象,利用相同方法构造判断矩阵,如式(3)所示,计算得到  $CR = 0.064\ 1 < 0.1$ ,判断矩阵具有满意的一致性,特征向量  $W = (0.077\ 3, 0.057\ 2, 0.235\ 2, 0.630\ 3)$ 可作为权重向量。最终两种体系压裂返排液水质特性权重分配计算结果见表 3。

钙镁离子 铁离子 pH 值 悬浮物

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/5 & 1/9 \\ 2 & 1 & 1/4 & 1/8 \\ 5 & 4 & 1 & 1/4 \\ 9 & 8 & 4 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{钙镁离子} \\ \text{铁离子} \\ \text{pH 值} \\ \text{悬浮物} \end{matrix} \quad (3)$$

表 3 压裂返排液水质特性权重分配计算结果

| 评价指标                                                                | 胍胶体系权重  | 可回收体系权重 |
|---------------------------------------------------------------------|---------|---------|
| $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 0.642 7 | 0.077 3 |
| $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 0.208 3 | 0.057 2 |
| pH 值                                                                | 0.048 0 | 0.235 2 |
| 悬浮物/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$                              | 0.101 0 | 0.630 3 |
| 权重合计                                                                | 1       | 1       |

2.3 结果分析

评价结果中评价指标所占权重越大,则该污染物对回用配液的影响程度越大,在水处理工艺设计中的去除优先度应越高。分析基于水质矩阵法计算得到的压裂返排液评价结果可看出,胍胶体系压裂返排液中,钙镁离子所占权重最大,是必须首要去除的污染物,其次要进一步去除铁离子、悬浮物和控制 pH 值,从而达到配制胍胶压裂液的水质要求;可回收体系压裂返排液中,悬浮物是最主要的污染物,其次是 pH 值,钙镁离子和铁离子所占权重较小,所以去除优先度排名最后。由此可见,因为两种体系压裂返排液的水质特征不同,导致污染物去除的优先度有所不同,不宜采用同一种工艺进行处理。在油气田低成本、高效开发的要求下,不同体系压裂返排液处理工艺的选

择应有相应的侧重点,需采用经济、高效的水处理工艺首先去除影响回用的主要污染物。

### 3 压裂返排液回用处理技术

随着苏里格气田多井型、大井丛、多层系、工厂化混合开发模式的不断成熟<sup>[13]</sup>,形成了钻井、压裂、试气的标准化作业流程,加快了施工速度,缩短了投产周期<sup>[14]</sup>,这为压裂返排液的处理带来了新的挑战。在井场将压裂返排液经济、快速处理后立即回用于下一井段的压裂作业,具有重要的工程意义。目前压裂返排液的处理方法主要有3类,一是物理法<sup>[15-16]</sup>,包括气浮、过滤、重力沉降和离心等;二是化学法<sup>[17-19]</sup>,包括化学絮凝、高级氧化、铁碳微电解、电絮凝等;三是生物法<sup>[20]</sup>,利用微生物的代谢功能,降解废水中的有机物。本文在水质特性评价结果的基础上,以处理后重复配液为目的,优选组合经济、高效的水处理技术,通过现场试验,对两种体系的压裂返排液分别提出针对性的现场处理工艺。

#### 3.1 胍胶体系压裂返排液

针对胍胶体系压裂返排液中各类污染物的去除优先度,形成了以“化学絮凝+离子控制+金属网过滤”的现场处理工艺。第一步为化学絮凝。该方法便于现场操作,在搅拌罐中加入混凝剂、助凝剂后等待形成致密絮体,实现初步的固液分离。化学絮凝不仅能降低废水中的悬浮物含量,同时可降低钙镁离子含量。现场测试表明,化学絮凝后上清液中钙镁离子总量从825~950 mg/L降低至450~570 mg/L,降幅为42.5%;第二步采用离子控制工艺,进一步去除废水中的钙、镁、铁等金属离子。常用的离子控制方法有离子交换、化学沉淀、膜分离、萃取等,其中化学沉淀法具有良好的经济性,且操作简便,应用较为广泛,本文选择化学沉淀法中的烧碱-纯碱法,即加入氢氧化钠和碳酸钠,与废水中的钙镁离子结合,形成碳酸钙和氢氧化镁沉淀,从而降低钙镁离子含量。同时氢氧化钠可与废水中的二价铁离子发生反应,形成氢氧化亚铁后迅速氧化为氢氧化铁沉淀,或直接与废水中的三价铁离子发生反应,形成氢氧化铁沉淀,从而达到去除铁离子的目的。由图1钙镁离子去除试验结果可知,当氢氧化钠和碳酸钠的投加量分别为800 mg/L和600 mg/L时,上清液中的钙镁离子去除效果最佳,平均可降低至141.6 mg/L,满足重复配液的水质要求。由图2铁离子去除试验结果可知,当氢氧化钠投加量为300 mg/L时,铁离子含量平均降低至6.4 mg/L,小于水质要求的20 mg/L。

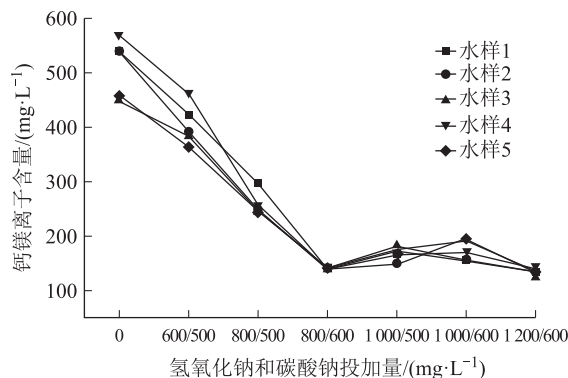


图1 钙镁离子去除试验

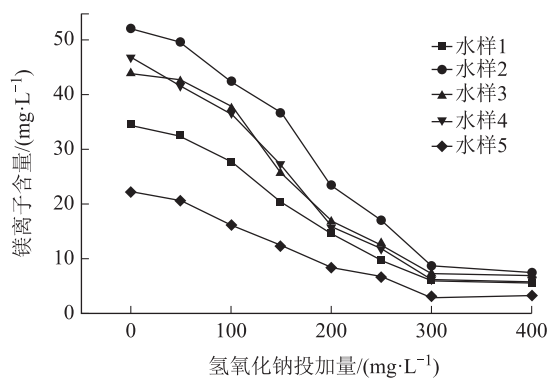


图2 铁离子去除试验

为了缩短水处理时间,提高出水水质,第三步选择过滤工艺。目前油气田废水处理工艺中常用的过滤装置为袋式-滤芯组合过滤器和自清洗过滤器两种,其中,袋式-滤芯过滤器的过滤精度高,滤芯、滤袋结构简单,设备成本低,但过滤介质更换频繁、操作复杂,同时使用后的滤芯、滤袋存在后续处理问题,增加了设备的运行成本;自清洗过滤器虽然设备的一次投入成本较大,但后期无需更换过滤介质,运行稳定,具备反洗功能,排污期间不断流,综合成本较低,所以本文现场过滤设备采用金属网自清洗过滤器,过滤精度为20  $\mu\text{m}$ 。

胍胶压裂返排液通过“化学絮凝+离子控制+金属网过滤”处理后,钙镁离子、铁离子和悬浮物含量均大幅度降低,钙镁离子和铁离子分别降低了83.7%和79.6%,悬浮物降低了85.0%,处理后水质达到重复配制胍胶压裂液的要求。处理前后水质对比见表4。

表4 胍胶体系压裂返排液处理效果对比

| 评价指标                                                                | 处理前   | 处理后   |
|---------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 894.2 | 145.6 |
| $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 36.8  | 7.5   |
| pH 值                                                                | 6.8   | 7.0   |
| 悬浮物 / $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$                             | 235.3 | 35.2  |



### 3.2 可回收体系压裂返排液

根据水质评价结果,可回收体系压裂返排液的处理核心为去除悬浮物,由此形成了“重力沉降+金属网过滤”的现场处理工艺。其中,重力沉降所需要的沉降罐是井场压裂试油作业常见的设备之一。通过该方法可去除压裂返排液中的支撑剂和岩屑等大颗粒物质,处理后上清液经金属网过滤,进一步降低悬浮物含量。现场试验表明,悬浮物含量降低了81.0%,最终的出水在补充适量的稠化剂后便可重复使用,处理前后水质对比见表5。

表5 可回收体系压裂返排液处理效果对比

| 评价指标                                                                | 处理前   | 处理后   |
|---------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 688.1 | 677.5 |
| $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 10.2  | 9.9   |
| pH 值                                                                | 6.8   | 6.8   |
| 悬浮物/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$                              | 239.4 | 45.5  |

## 4 结 论

本文采用水质矩阵法,以压裂返排液处理后重复配液为目标,选择水质评价指标,构建判断矩阵,对苏里格气田常用的两种体系的压裂返排液的水质特性进行评价,以此为基础,分别研究形成对应的现场处理回用工艺,得到以下结论。

1)影响胍胶压裂返排液重复配液的污染物重要程度由高至低分别为钙镁离子、铁离子、悬浮物和pH值;影响可回收体系压裂返排液重复配液的污染物重要程度由高至低分别为悬浮物、pH值、钙镁离子和铁离子,两者差异明显,现场处理工艺选取应各有侧重。

2)针对胍胶压裂返排液,研究形成了“化学絮凝+离子控制+金属网过滤”的现场处理工艺,钙镁离子降低了83.7%,铁离子降低了79.6%,悬浮物降低了85.0%,处理后水质达到重复配制胍胶压裂返排液的要求。

3)针对可回收体系压裂返排液,研究形成了“重力沉降+金属网过滤”的现场处理工艺,悬浮物含量降低了81.0%,处理后液体可通过补充稠化剂达到重复配液的需求。

### 参 考 文 献

- [1] 刘文士,廖仕孟,向启贵,等.美国页岩气压裂返排液处理技术现状及启示[J].天然气工业,2013,33(12):158-162.
- [2] 马太玲,朝伦巴根,高瑞忠,等.水环境质量综合评价方

- 法的比较研究[J].干旱区资源与环境,2006,20(4):138-142.
- [3] 曾永,樊引琴,王丽伟,等.水质模糊综合评价法与因子指数评价法比较[J].人民黄河,2007,29(2):45.
- [4] 赵红梅,彭党聪,王晓昌.基于水质矩阵与权重分析的污水特性评价研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(4):208-212.
- [5] 金鹏康,周立辉,杨毅,等.基于水质矩阵的石油压裂废水处理性评价[J].安全与环境学报,2011,11(5):74-77.
- [6] TAMBO N, KAMEI T. Treatability evaluation of general organic matter. Matrix conception and its application for a regional water and waste water system [J]. Water research, 1978, 12(11):931-950.
- [7] 聂晶,王龙,孙理密,等.膜的化学清洗及综合效应评价[J].水处理技术,2012,38(1):130-133.
- [8] 林雪丽,黄海燕,赵启升,等.返排废液中无机盐离子对压裂液特性的影响[J].钻井液与完井液,2013,30(2):73-76.
- [9] 蒋继辉,冀忠伦,任小荣,等.长庆油田压裂废水回收再利用方式探讨[J].油气田环境保护,2014,24(5):35-36.
- [10] 袁长忠,潘永强,杜春安,等.胜利油田瓜胶压裂液返排液回收利用水质指标[J].钻井液与完井液,2016,33(5):109-113.
- [11] 田培蓉.胍胶压裂返排液重复利用影响因素及消除方法研究[D].西安:西安石油大学,2017:1-53.
- [12] 何明舫,来轩昂,李宁军,等.苏里格气田压裂返排液回收处理方法[J].天然气工业,2015,35(8):114-119.
- [13] 刘社明,张明禄,陈志勇,等.苏里格南合作区工厂化钻完井作业实践[J].天然气工业,2013,33(8):64-69.
- [14] 魏千盛,庞强,江磊,等.苏里格中区奥陶系喀斯特古地貌恢复及其在“大井丛、工厂化”模式中的应用[J].石油化工应用,2017,36(12):98-105.
- [15] 翟怀建,周鑫,汪志臣,等.溶气气浮技术在胍胶压裂返排液处理中的应用[J].新疆石油科技,2018,28(1):48-51.
- [16] 宋磊,张晓飞,王毅琳,等.美国页岩气压裂返排液处理技术进展及前景展望[J].环境工程学报,2014,8(11):4721-4725.
- [17] 高燕,赵建平,纪冬冬.2级氧化-混凝法实现压裂返排液重复利用[J].水处理技术,2015(11):115-118.
- [18] 杨博丽,张冕,徐迎新.电絮凝处理胍胶压裂返排液实验研究[J].水处理技术,2019,45(1):38-41.
- [19] 樊晓丽,于勇勇,姚佐国,等.压裂返排液无害化处理研究[J].环境工程,2016(增刊1):196-199.
- [20] 李冉,潘杰,张丽,等.微藻处理压裂返排液的效果及影响因素[J].水处理技术,2019,45(2):72-75.

(收稿日期 2020-02-24)

(编辑 郎延红)