



# 压裂返排液高效回用处理技术研究与应用

杨 杰<sup>1,2</sup>, 李 静<sup>1,2</sup>, 林 冬<sup>1,2</sup>, 赵成君<sup>1</sup>

(1. 中国石油西南油气田分公司 安全环保与技术监督研究院, 四川成都 610041;

2. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 四川成都 610041)

**[摘要]** 系统分析了四川地区不同页岩气压裂返排液的水质情况, 明确了返排液中超出回用水质标准的关键指标, 通过室内实验系统研究不同工艺对压裂返排液的处理效果, 提出了能适应不同水质返排液的回用处理技术, 并在现场开展应用。研究结果表明, 返排液经软化-混凝-絮凝-杀菌处理后出水达到回用水质标准, 其最优条件为: 升高 pH 至 10, 混凝剂投加量( $Y_1$ )满足  $Y_1=0.46X_1+39$  ( $X_1$  为混凝前悬浮物浓度), 絮凝剂投加量( $Y_2$ )满足  $Y_2=0.004\ 1X_2-0.9$  ( $X_2$  为絮凝前悬浮物浓度), 杀菌剂投加量、杀菌 pH 和时间分别为 200 mg/L、6 和 30 min。根据最优条件制造了能自动加药的回用处理装置。应用结果表明, 自动加药处理出水水质比手动加药的出水水质更优且能达到回用水质标准, 其药剂费比手动加药低 35%, 自动加药处理出水配成的滑溜水性能优于原水及手动加药处理出水配成的滑溜水性能, 且能达到滑溜水性能要求。

**[关键词]** 页岩气; 压裂返排液; 回用处理

**[中图分类号]** X741 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)09-0175-10

## Research and application of the high efficiency recycling technology for fracturing flowback fluid

YANG Jie<sup>1,2</sup>, LI Jing<sup>1,2</sup>, LIN Dong<sup>1,2</sup>, ZHAO Chengjun<sup>1</sup>

(1. *Safety, Environment, and Technology Supervision Research Institute of Petrochina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610041, China*; 2. *Sichuan Key Laboratory of Evaluation and Exploitation of Shale Gas, Chengdu 610041, China*)

**Abstract:** The water qualities of different shale gas fracturing flowback fluids in Sichuan systematically analyzed and the water quality which exceeded the requirements of reused water was ascertained. According to the effect of treatment techniques on dealing with flowback fluids, the recycling treatment techniques adopted to flowback fluids with different water qualities was proposed and was applied in the shale gas field. The results showed that the quality of effluent treated by softening-coagulation-flocculation-sterilization process met the requirements of reused water, the optimal parameters were: the pH 10, the dosage of coagulant ( $Y_1$ ) meeting the equation  $Y_1=0.46X_1+39$  ( $X_1$  was the total suspended solid of the flowback fluids which was not coagulated), the dosage of flocculant ( $Y_2$ ) meeting the equation  $Y_2=0.004\ 1X_2-0.9$  ( $X_2$  was the total suspended solid of the flowback fluids which was not flocculated), the dosage of bactericide 200 mg/L, pH 6 and time 30 min respectively. A set of skid-mounted device for recycling was designed according to the optimal parameters and was applied in shale gas field. The results showed that comparing to manual dosing, the quality of effluent treated by automatic dosing was better and met the requirements of reused water, and the cost of automatic dosing treatment was 35% lower than that of manual dosing treatment. Moreover, the water quality of slick water prepared by the effluent was better than that of slick water prepared by flowback water and effluent treated by manual dosing and can meet the requirements.

**Key words:** shale gas; flowback fluid; recycling technology

**[基金项目]** 中国石油西南油气田分公司科研计划项目(20200307-03)

压裂返排液因具有成分复杂、高有机物、高盐等特征,处理难度较大<sup>[1-2]</sup>。早期返排液处置主要是深井灌注,由于其处置成本高,且存在诱导地震发生的潜在风险等问题,导致其可行性越来越低。目前,为了减轻水资源的压力并节约成本,将返排液处理后用于配压裂液成为返排液的主要处置方式<sup>[3-5]</sup>。

D. L. SHAFFER等<sup>[6]</sup>通过总结美国各州现有的页岩气压裂返排液内部回用情况及管理办法,认为返排液中常含有较高浓度的悬浮物(包含地层颗粒等)、无机垢、细菌等,若直接回用,这些组分会对压裂液的降阻性、黏度等性能产生不利影响。L. O. HALUSZCZAK等<sup>[7]</sup>研究发现,返排液中的无机组分( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$ 等)随返排时间的增加而增多,其最高浓度能达到海水中浓度的5~10倍,内部回用时,水中无机垢离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$ )能通过结垢堵塞地层孔隙从而影响页岩气产气量。杨德敏等<sup>[8]</sup>提出媒介过滤+离子交换软化+双向反渗透能有效去除返排液中的特征污染物(碳酸钙、悬浮物等),从而降低清水用量,提高返排液回用率。Zuoyou ZHANG等<sup>[9]</sup>通过研究发现,投加氢氧化钠结合核桃壳活性炭过滤能去除返排液中大量颗粒、有机物及无机垢,从而减轻回用水的结垢趋势。J. HUTCHERSON等<sup>[10]</sup>研究发现,电絮凝能有效降低返排液中的颗粒浓度及TOC。华萍等<sup>[11]</sup>研究了投加杀菌剂与催化电解杀菌效果,认为催化电解与投加杀菌剂均能有效去除油田废水中的细菌[硫酸盐还原菌(SRB)、腐生菌(TGB)等]。

目前,返排液回用处理研究思路大多是先分析某种返排液水质,再针对该返排液的某些指标(如悬浮物等)进行化学加药处理实验研究,最终提出该种返排液的回用处理技术及最优加药参数(包括药剂种类、投加量等)。尧君<sup>[12]</sup>根据苏里格气田返排液水质分析,提出了返排液中悬浮物、高价金属离子、微生物会对再配压裂液产生不利影响,通过分析返排液经絮凝-抑菌处理后出水水质并评价其再配液性能,提出了絮凝-抑菌是一种较好的回用处理技术,在最优絮凝剂投加量(60 mg/L)下,返排液浊度去除率高达99%,絮凝后投加0.2%醛类抑菌剂使处理出水配压裂液的黏度能保持较好的稳定性。张太亮等<sup>[13]</sup>通过研究破胶-凝处理某井压裂返排液的效果,提出了最优工艺参数为先投加2 000 mg/L破

胶剂反应30 min,再投加500 mg/L的FS型混凝剂,通过该工艺能使处理出水再配压裂液性能达到压裂要求。陈文娟等<sup>[14]</sup>提出絮凝预处理结合电化学处理返排液后出水能达到回用要求,其最优工艺参数:FG-1型絮凝剂投加量为350 mg/L、电极板间距为6.0 cm、电流为4.5 A、电解时间为60 min,返排液经该最优工艺处理后出水石油类减少至0 mg/L,悬浮物降低至12 mg/L。但是,在压裂现场,不同页岩气井及返排时间的返排液水质差别较大,如重庆涪陵页岩气49-3号井压裂返排液总硬度仅为该区块10-4号井压裂返排液总硬度的10%,49-3号井返排液悬浮物是10-4号井的2.7倍,West Virginia区块不同的页岩气井压裂返排液COD相差4.6倍,总硬度相差达到近300倍<sup>[15-16]</sup>,若将某种返排液的实验最优参数(药剂种类及投加量等)直接用于现场返排液回用处理,则会存在较大问题,即各目标油气田实验研究成果推广应用性不强。

针对上述问题,笔者通过系统分析四川地区不同页岩气压裂返排液的水质情况,明确返排液中超出回用水质标准的关键指标,通过室内实验系统研究不同工艺对压裂返排液的处理效果,明确最优工艺组合及不同水质返排液与水处理药剂的最优加药量关系,使处理出水达到回用水质指标,最终提出四川地区页岩气压裂返排液的高效回用处理技术,并在现场考察其应用效果。

## 1 页岩气压裂返排液水质特征

四川地区8口典型页岩气井压裂返排液水质分析结果见表1。

由表1可知,该区块返排液总矿化度普遍较高,均在 $1.70 \times 10^4$  mg/L以上,最高达到 $5.98 \times 10^4$  mg/L(某6井),总硬度在 $1.0 \times 10^3 \sim 2.9 \times 10^3$  mg/L之间,总铁在0.15~30.3 mg/L之间,悬浮物质量浓度较高,最高达到162 mg/L(某2井),该区块返排液均处于中性( $\text{pH} \approx 7$ ),SRB数量均远高于 $25 \text{ mL}^{-1}$ ,TGB数量在 $250 \sim 6.0 \times 10^4 \text{ mL}^{-1}$ 之间,铁细菌(FB)数量在 $13 \sim 6.0 \times 10^4 \text{ mL}^{-1}$ 之间。总体而言,该区块返排液的总矿化度、总硬度、细菌、结垢趋势、配伍性均超出回用水质标准,部分井返排液总铁超出回用水质标准<sup>[17]</sup>。

因四川页岩气田滑溜水压裂液耐盐量较高,当矿化度为 $1 \times 10^5$  mg/L时,滑溜水降阻率仍能达到73%<sup>[18]</sup>,所以返排液的回用处理无需考虑降低矿化

表1 四川地区8口页岩气井压裂返排液水质特征

Table 1 Water quality of fracturing flowback water from 8 shale gas wells in Sichuan

| 测试项目                                         | 某1井               | 某2井               | 某3井               | 某4井               | 某5井               | 某6井               | 某7井               | 某8井               | 四川地区                                  | 回用水推荐<br>水质指标(NB/T<br>14002.3—2015) |
|----------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 总矿化度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )       | $1.70\times 10^4$ | $2.47\times 10^4$ | $3.95\times 10^4$ | $2.48\times 10^4$ | $3.88\times 10^4$ | $5.98\times 10^4$ | $2.63\times 10^4$ | $3.48\times 10^4$ | $1.70\times 10^4\sim 5.98\times 10^4$ | $\leq 20\ 000$                      |
| 总硬度(以碳酸钙计)/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | $1.3\times 10^3$  | $2.7\times 10^3$  | $2.9\times 10^3$  | $1.7\times 10^3$  | $2.0\times 10^3$  | $1.0\times 10^3$  | $1.1\times 10^3$  | $1.4\times 10^3$  | $1.0\times 10^3\sim 2.9\times 10^3$   | $\leq 800$                          |
| 总铁/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )         | 2.34              | 30.3              | 19.6              | 3.02              | 3.14              | 19.5              | 2.42              | 0.15              | 0.15~30.3                             | $\leq 10$                           |
| 悬浮物/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )        | 130               | 162               | 51                | 48                | 25                | 23                | 65                | 16                | 25~162                                | $\leq 1\ 000$                       |
| pH                                           | 6.7               | 6.8               | 6.5               | 7.1               | 7.54              | 7.1               | 7.06              | 6.98              | 6.5~7.54                              | 6~9                                 |
| SRB数量/ $\text{mL}^{-1}$                      | $6.0\times 10^4$  | $2.5\times 10^3$  | $6.0\times 10^4$  | $2.5\times 10^4$  | $6.0\times 10^3$  | $2.5\times 10^3$  | $2.5\times 10^4$  | $6.0\times 10^4$  | $2.5\times 10^3\sim 6.0\times 10^4$   | $\leq 25$                           |
| TGB数量/ $\text{mL}^{-1}$                      | $6.0\times 10^3$  | $1.3\times 10^3$  | $1.3\times 10^4$  | 600               | $6.0\times 10^4$  | 250               | 250               | $6.0\times 10^4$  | $250\sim 6.0\times 10^4$              | $\leq 10^4$                         |
| FB数量/ $\text{mL}^{-1}$                       | $2.5\times 10^4$  | 60                | 60                | 250               | $6.0\times 10^4$  | 250               | 13                | 13                | $13\sim 6.0\times 10^4$               | $\leq 10^4$                         |
| 结垢趋势                                         | 有                 | 有                 | 有                 | 有                 | 有                 | 有                 | 有                 | 有                 | 有                                     | 无                                   |
| 配伍性                                          | 有沉淀               | 有沉淀               | 有沉淀               | 有沉淀               | 有沉淀               | 有沉淀               | 有沉淀               | 有沉淀               | 有沉淀                                   | 无沉淀、无絮凝                             |

度。研究表明,返排液的结垢趋势与其总硬度紧密相关,配伍性与水中的无机垢离子、悬浮物、铁离子等密切相关<sup>[19-20]</sup>。所以,在返排液回用处理过程中,需要研究能有效降低返排液硬度、铁、悬浮物及细菌的处理技术。

相关研究表明,向返排液中投加碱升高pH,能使返排液中的铁离子生成氢氧化铁等沉淀,达到去除的目的<sup>[21]</sup>,总硬度也能通过投加碱降低其含量,达到软化的目的<sup>[9]</sup>,悬浮物能通过投加混凝剂、絮凝剂得到有效控制<sup>[22]</sup>,细菌则可以通过投加杀菌剂处理<sup>[23]</sup>。所以,本研究主要针对四川页岩气压裂返排液中超出回用水质指标的总硬度、总铁、细菌、结垢趋势及配伍性系统开展加碱软化、混凝、絮凝及杀菌技术研究。

## 2 实验研究方法

### 2.1 实验材料

实验水样:以四川页岩气田8口典型页岩气井压裂返排液为研究对象,所取得的水样浑浊,黏度较低,有异味,含有悬浮物和杂质。

水处理药剂:混凝剂聚合氯化铝(PAC),絮凝剂阳离子聚丙烯酰胺(PAM,相对分子质量800万),杀菌剂NaClO,软化剂 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,pH调节剂NaOH及HCl,以上药剂均购于成都科隆化学用品有限公司。

### 2.2 实验及检测方法

#### 2.2.1 软化-混凝

将返排液等量地分配在烧杯中,投加 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ (投加量与硬度相等),再投加NaOH使pH分别达到

8、9、10、11,充分反应后用 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤,检测滤液硬度、总铁,明确最优pH。

之后再取返排液,将其等量地分配在烧杯中,在最优pH下软化,搅拌均匀后检测悬浮物浓度,再分别投加不同质量浓度(50~800 mg/L)的混凝剂,在100 r/min下搅拌10 min后静置沉降30 min,取上清液调pH回中性并测悬浮物浓度,明确混凝前悬浮物浓度对应的最优混凝剂投加量,并根据回用水质标准全面分析其水质情况。

#### 2.2.2 软化-混凝-絮凝

将返排液等量地分配在烧杯中,在最优pH及混凝剂投加量下反应,然后检测悬浮物浓度,再分别投加不同质量浓度(0.1~10 mg/L)的絮凝剂,在100 r/min下搅拌10 min后静置沉降30 min,取上清液调pH回中性并测悬浮物浓度,明确絮凝前悬浮物浓度对应的最优絮凝剂投加量,并根据回用水质标准全面分析其水质情况。

#### 2.2.3 软化-混凝-絮凝-杀菌

将返排液在最优pH、混凝剂及絮凝剂投加量下反应后取上清液开展NaClO杀菌研究,采用单因素实验方式考察不同pH(固定杀菌剂投加量50 mg/L,反应时间30 min)、不同杀菌剂投加量(固定pH=6,反应时间30 min)、不同反应时间(固定杀菌剂投加量200 mg/L,pH=6)对SRB、TGB、FB的去除效果,明确最优杀菌条件(时间、pH、投加量),并根据回用水质标准全面分析其水质情况。

按照上述方法分别考察四川8口页岩气井返排液最优pH、混凝剂投加量、絮凝剂投加量,最优杀菌

条件及处理后的水质情况。

水中总矿化度的测定参照《水和废水监测分析方法》(第4版),在103~105℃烘干可滤残渣;总硬度的测定参照《水质 钙与镁总量的测定 EDTA滴定法》;悬浮物的测定参照《水质 悬浮物的测定 重量法》;细菌的测定参照《碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法》中绝迹稀释法;结垢趋势参照《油田水结垢趋势预测方法》<sup>[24-28]</sup>进行测定;水中总铁通过 Agilent 7700 型电感耦合等离子体质谱仪测定;pH 通过 PHS-3C 型 pH 计测定;粒径通过 zeta PALS 190 Plus 型粒度分析仪测定。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 软化-混凝

去除废水中的铁是水处理中一个重要研究领域,在除铁技术中,影响其去除效果的因素有很多,其中通过加碱升高 pH 除铁因效果较好而被广泛关注<sup>[21]</sup>。本节首先研究了投加 NaOH 升高 pH 对返排液的除铁效果,实验结果见图 1。

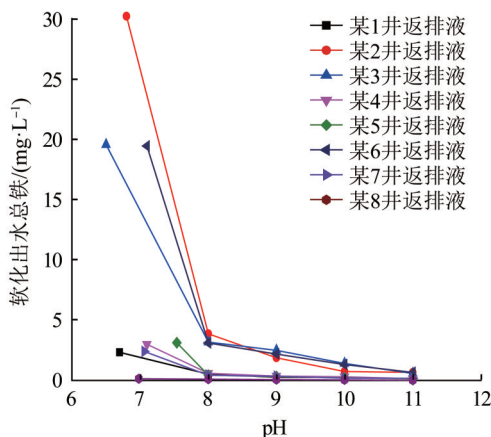
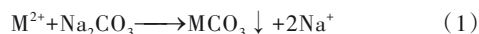


图1 pH对返排液软化出水总铁的影响

Fig. 1 Effect of pH on total iron concentration of effluent treated by softening

由图1可知,返排液的总铁去除率与pH呈正相关,即pH越高,铁的去除率越高,当pH升高到8时,返排液中总铁均显著降低,最大质量浓度不超过4 mg/L,如总铁质量浓度最高的某2井,pH升高至8,返排液总铁由30.3 mg/L降低至3.89 mg/L,继续升高pH至11,返排液总铁均小于0.7 mg/L。回用标准中总铁要求在10 mg/L以下,所以,对于总铁的处理,向返排液中加NaOH升高pH至8即可达到要求。

另一方面,加碱也能有效去除返排液中的无机垢离子<sup>[13]</sup>。研究表明,加入纯碱( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )能使结垢离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ )形成碳酸盐沉淀而被除去<sup>[29]</sup>,具体反应见式(1)。



式中 $\text{M}^{2+}$ 代表二价结垢离子,式(1)表明,要想有效降低返排液中二价结垢离子浓度,需加入与返排液中结垢离子同等摩尔数的 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 。另外,测量水中总硬度(以碳酸钙计,mg/L)的国家标准<sup>[25]</sup>表明,水中1 mmol/L的结垢离子总量相当于100.1 mg/L以 $\text{CaCO}_3$ 表示的硬度。所以,当国家标准测定的返排液总硬度值为TH(Total Hardness, mg/L)时,想要有效降低返排液硬度, $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 投加量应为 $\text{TH}/100.1 \times 106 \approx \text{TH}(\text{mg/L})$ ,其中106表示碳酸钠相对分子质量。所以理论分析表明,当 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 投加量(mg/L)与返排液总硬度(TH, mg/L)相等时,结垢离子浓度能有效降低。研究表明,pH对游离碳酸、重碳酸根和碳酸根在整个碳酸中的分配影响较大,即pH越大,碳酸根比例越大<sup>[30]</sup>。所以,pH对软化效果有重大影响。

pH对返排液软化出水总硬度的影响见图2。

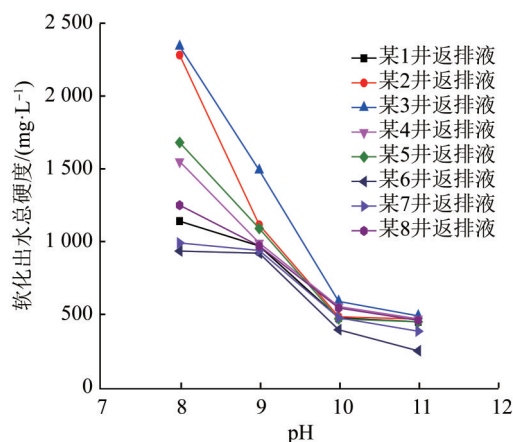


图2 pH对返排液软化出水总硬度的影响

Fig. 2 Effect of pH on total hardness of effluent treated by softening

由图2可知,pH升高,处理出水硬度先迅速降低后趋于平缓,当pH升高至9时,软化后硬度在1 000 mg/L左右,超出回用水质标准(硬度 $\leq 800$  mg/L),升高pH至10,出水硬度在405~600 mg/L之间,满足回用水质标准,但继续升高pH不能显著降低硬度。所以,综合分析投加NaOH升高pH对返排

液中总铁及硬度的处理效果,确定软化最优 pH 为 10。

为了加速废水中大颗粒、胶体物质、无机垢等的沉降,提升出水水质,投加混凝剂是常用做法<sup>[31]</sup>。混凝剂投加量对返排液软化-混凝上清液悬浮物的影响见图 3。

由图 3 可知,增加混凝剂投加量,返排液经软化-混凝后上清液悬浮物浓度呈先减小后增大的趋势,这是因为,混凝剂投加过少,没有足量混凝剂通过架桥、卷扫等作用沉淀无机垢;投加过多,则导致残余混凝剂增多,这些均使上清液悬浮物浓度增大。将悬浮物浓度最低时对应的混凝剂投加量确定为最优投加量(图 3 中虚线方框),结果表明,不同水质返排液最优投加量差别较大,某 3 井返排液的最优 PAC 投加量为 700 mg/L,而某 6 井返排液最优 PAC 投加量只有 100 mg/L。将混凝剂投加前返排液悬浮物浓度与其对应的最优混凝剂投加量进行拟

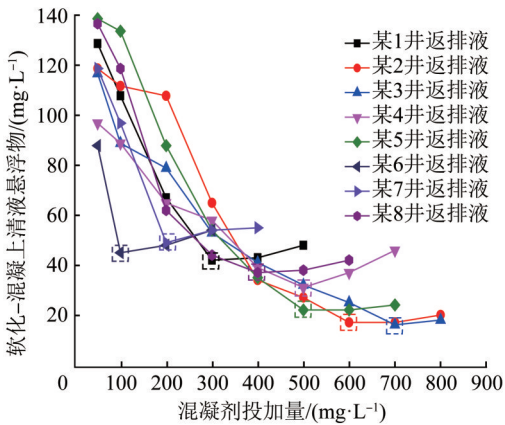


图3 混凝剂投加量对返排液软化-混凝上清液悬浮物的影响

Fig. 3 Effect of coagulant dosage on TSS of supernatant treated by softening-coagulation process

合,明确混凝前悬浮物质量浓度( $X_1$ , mg/L)与最优混凝剂投加量( $Y_1$ , mg/L)的关系为  $Y_1=0.46X_1+39$  ( $R^2=0.911$ )。

将四川地区返排液经最优软化-混凝处理后,出水水质与回用水水质指标进行对比,结果见表 2。

表 2 四川地区 8 口页岩气井压裂返排液经不同最优预处理后的出水水质

| Table 2 Water quality of effluent treated by different optimal pretreatments from 8 shale gas wells in Sichuan |                                        |                                          |               |                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|---------------|------------------------------|
| 测试项目                                                                                                           | 软化-混凝出水                                | 软化-混凝-絮凝出水                               | 软化-混凝-絮凝-杀菌出水 | 回用水推荐水质指标 (NB/T14002.3—2015) |
| 总硬度(以碳酸钙计)/(mg·L <sup>-1</sup> )                                                                               | 430~680                                | 390~590                                  | 378~575       | ≤800                         |
| 总铁/(mg·L <sup>-1</sup> )                                                                                       | 0.1~2.56                               | 0.05~1.38                                | 0.03~1.3      | ≤10                          |
| 悬浮物/(mg·L <sup>-1</sup> )                                                                                      | 19~52                                  | 7~34                                     | 2~15          | ≤1 000                       |
| pH                                                                                                             | 6.98~7.01                              | 6.97~7                                   | 6~6.02        | 6~9                          |
| SRB 数量/mL <sup>-1</sup>                                                                                        | 2.0×10 <sup>3</sup> ~4×10 <sup>4</sup> | 2.0×10 <sup>3</sup> ~3.5×10 <sup>4</sup> | 0~25          | ≤25                          |
| TGB 数量/mL <sup>-1</sup>                                                                                        | 200~4.5×10 <sup>4</sup>                | 200~4.5×10 <sup>4</sup>                  | 0~140         | ≤10 <sup>4</sup>             |
| FB 数量/mL <sup>-1</sup>                                                                                         | 7~4.5×10 <sup>4</sup>                  | 6~3.0×10 <sup>4</sup>                    | 0~25          | ≤10 <sup>4</sup>             |
| 结垢趋势                                                                                                           | 无                                      | 无                                        | 无             | 无                            |
| 配伍性                                                                                                            | 无沉淀、无絮凝~少量沉淀、絮凝                        | 无沉淀、无絮凝                                  | 无沉淀、无絮凝       | 无沉淀、无絮凝                      |

由表 2 可知,软化-混凝能明显降低返排液中的悬浮物、总铁、总硬度,同时减缓结垢趋势,使其达到回用水质标准,但是软化-混凝去除悬浮物、颗粒能力有限,导致软化-混凝出水配伍性存在少量沉淀、絮凝现象,此外,软化-混凝对细菌去除能力较差,处理出水 SRB、TGB、FB 均存在超出回用水质标准的风险,所以还需进一步研究软化-混凝后对悬浮物及细菌的处理技术。

有研究表明,混凝后投加絮凝剂能使混凝后的小絮体形成大絮体快速沉降,进一步降低水中的悬浮物、浊度,从而提升出水水质<sup>[32]</sup>,所以,接下来将

研究软化-混凝-絮凝对返排液的处理效果。

3.2 软化-混凝-絮凝

絮凝剂投加量对返排液软化-混凝-絮凝后上清液悬浮物的影响见图 4。

由图 4 可知,增加絮凝剂投加量,返排液经软化-混凝-絮凝后上清液悬浮物浓度呈先减小后增大的趋势,这是因为,絮凝剂投加过少,没有足量的絮凝剂通过架桥、卷扫等作用沉淀混凝形成小絮体;投加过多,则导致残余絮凝剂增多,这些均使上清液悬浮物浓度增大,将悬浮物浓度最低时对应的絮凝剂投加量确定为最优投加量(图 4 中虚线方框),与

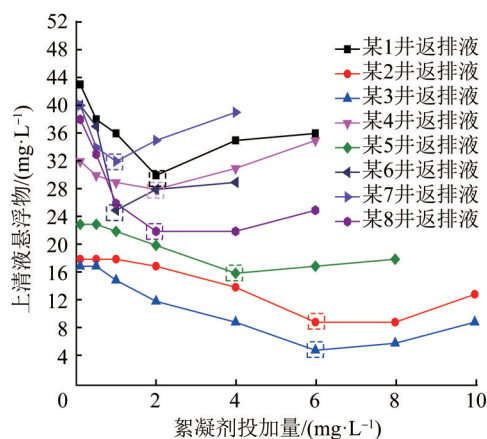


图4 絮凝剂投加量对返排液软化-混凝-絮凝后上清液悬浮物浓度的影响

Fig. 4 Effect of flocculant dosage on TSS of supernatant treated by softening-coagulation-flocculation process

混凝剂类似,不同水质返排液的最优絮凝剂投加量差别也较大。将絮凝剂投加前返排液悬浮物浓度与其对应的最优絮凝剂投加量进行拟合,明确絮凝前悬浮物质量浓度( $X_2$ , mg/L)与最优投加量( $Y_2$ , mg/L)的关系为  $Y_2 = 0.0041X_2 - 0.9$  ( $R^2 = 0.915$ )。

返排液经软化-混凝-絮凝处理后出水水质分析结果如表2所示,软化-混凝后投加絮凝剂能进一步降低返排液中的总铁、总硬度、悬浮物(最低能达到7 mg/L),从而使处理出水配伍性达到标准(无沉淀、无絮凝)要求,但是投加絮凝剂同样对细菌的去除效果欠佳,SRB、TGB、FB浓度虽然略有降低,但是仍然存在超出回用水质标准的风险,所以,还需进一步研究软化-混凝-絮凝技术结合杀菌工艺对细菌的处理效果。研究表明,投加NaClO能有效去除水中的细菌含量<sup>[33]</sup>,所以接下来将研究软化-混凝-絮凝结合NaClO杀菌对返排液的处理效果。

### 3.3 软化-混凝-絮凝-杀菌

主要研究返排液经软化-混凝-絮凝处理后再投加杀菌剂NaClO的杀菌效果。水中pH、杀菌时间以及投加量对NaClO的杀菌效果影响较大。笔者研究了pH对NaClO杀菌效果的影响,结果见图5。

由图5可知,随着pH升高,杀菌后返排液中3种细菌浓度均呈先降低后逐渐升高的趋势。当pH为6时,返排液中细菌浓度均最低,在中性偏弱酸性(pH为5~7)时,水中细菌浓度差别较小,而强酸(pH=3)或

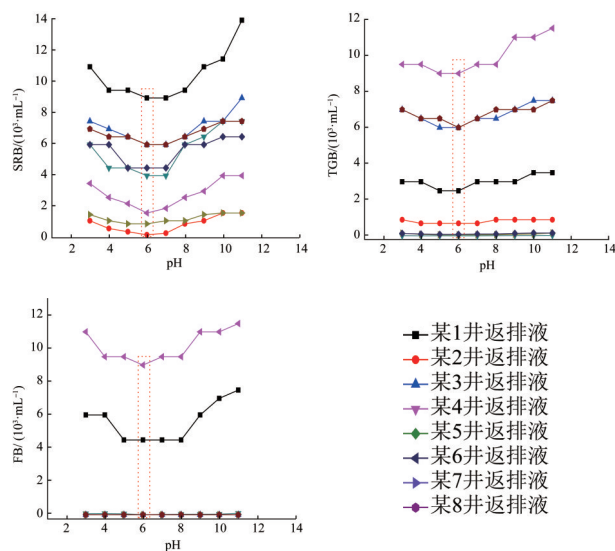
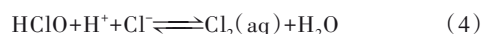


图5 pH对NaClO杀菌效果的影响

Fig. 5 Effect of pH on sterilization

者强碱(pH=11)条件均使返排液中细菌浓度升高较多,比如pH为11时杀菌后3种细菌浓度均明显高于pH为6时3种细菌浓度。这是因为NaClO在水中受pH的影响主要发生如式(2)~(4)反应<sup>[33]</sup>。



式中:HClO是一种弱酸( $\text{pK}_a = 7.5$ , 25 °C),强碱性条件下,反应式(2)平衡向右移,水中主要以 $\text{ClO}^-$ 形式存在,随着pH降低,反应式(3)平衡向右移,水中HClO有效浓度增大,研究表明,当pH为7.5时,有效氯中45%为次氯酸,而当pH为6.5时,有效氯中95%为次氯酸,但是pH过小时,反应式(4)平衡向右移,溶液中有效氯的降解速度将加快<sup>[33-34]</sup>。

水中次氯酸钠溶液的杀菌活性主要取决于HClO浓度,HClO的杀菌效果是 $\text{ClO}^-$ 的80~100倍<sup>[35]</sup>,这是因为HClO可以穿透微生物的细胞壁和细胞膜从而达到杀菌的目的,而 $\text{ClO}^-$ 不能<sup>[33]</sup>。所以,当pH为6时,溶液中HClO有效浓度最大,其杀菌效果最好。

考察了杀菌时间对杀菌效果的影响,结果见图6。

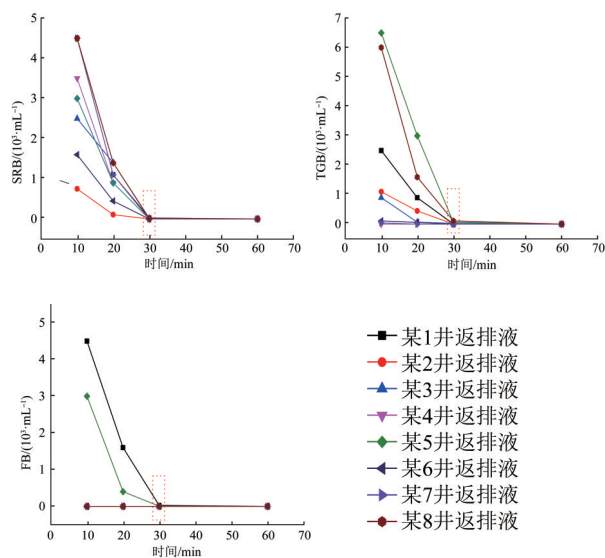


图6 时间对NaClO杀菌效果的影响

Fig. 6 Effect of time on sterilization

由图6可知,随着时间增加,杀菌后3种细菌浓度均呈先迅速降低后趋于平缓的趋势。当杀菌时间为30 min时,返排液中细菌的去除率均在90%以上,继续增加反应时间,细菌去除率不能明显增加,所以确定30 min为最优反应时间。

考察了NaClO投加量对杀菌效果的影响,结果见图7。

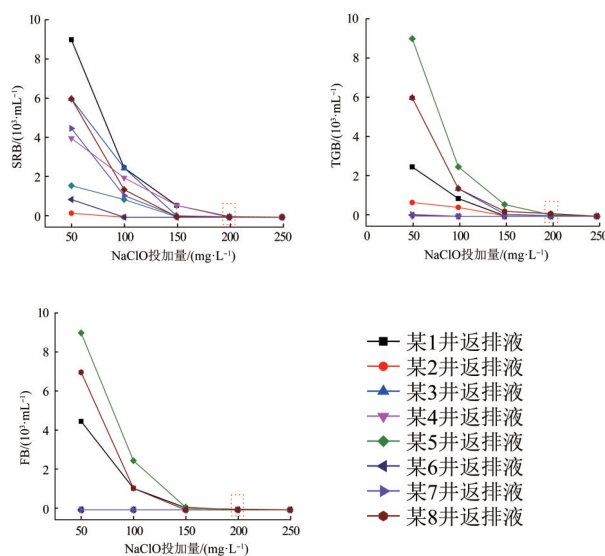


图7 NaClO投加量对杀菌效果的影响

Fig. 7 Effect of NaClO dosage on sterilization

由图7可知,整体来说,NaClO投加量越大,对

细菌的去除效果越好,当投加量达到150 mg/L时,返排液中SRB、FB、TGB浓度显著降低,水中残余TGB、FB浓度均在回用水质标准范围内( $\leq 10^4$ ),而SRB浓度普遍超出回用水质标准(其中某1、3、4、7、8井返排液杀菌出水SRB数量分别为600、70、600、60、25  $\text{mL}^{-1}$ ),继续增大杀菌剂质量浓度至200 mg/L将使返排液中所有细菌浓度均达到回用水质标准。所以确定NaClO最优投加量为200 mg/L。

综上所述,与软化-混凝,软化-混凝-絮凝相比,返排液经软化-混凝-絮凝-杀菌处理后出水水质最佳,用该技术处理四川地区返排液后出水水质均能达到回用水质标准。

#### 4 现场应用效果

根据室内实验确定的工艺,制造了一套处理量为30  $\text{m}^3/\text{h}$ 的回用处理装置,该装置可手动及自动投加药剂处理,自动加药处理工艺流程见图8。

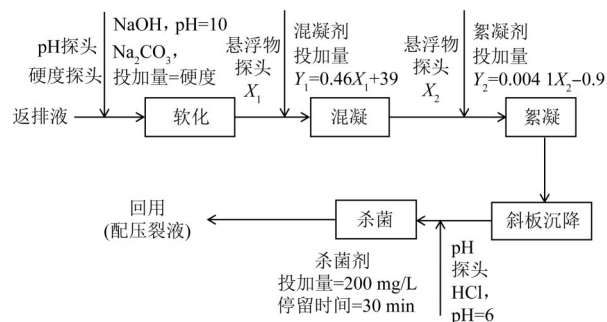


图8 现场装置工艺流程

Fig. 8 Process flow diagram of field device

该装置自动加药流程为:(1)软化单元。在软化池进口分别安装硬度、pH探头并通过中控系统分别连接 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaOH}$ 加药箱,中控系统中设定 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 投加量为硬度探头监测值,设定pH为实验最优值。(2)混凝单元。在混凝池进口安装悬浮物探头并通过中控系统连接混凝剂加药箱,中控系统中设定加药量为实验最优加药量。(3)絮凝单元。在絮凝池进口安装悬浮物探头并通过中控系统连接絮凝剂加药箱,中控系统中设定加药量为实验最优加药量。(4)杀菌单元。在进口安装pH探头并通过中控系统连接HCl及杀菌剂加药箱,中控系统设定pH及杀菌剂投加量为实验最优值。手动加药为通过操作人员凭经验人为调节药剂投加量。

该装置用于四川页岩气田某9井现场页岩气压裂返排液的回用处理,手动、自动加药处理量均为5 000 m<sup>3</sup>,对比分析某9井返排液原液、手动及自

动加药处理出水水质,并评价其配成滑溜水的性能<sup>[36]</sup>,返排液经该装置处理前后的水质见表3。

表3 四川气田某9井压裂返排液及预处理出水水质

Table 3 Water quality of fracturing flowback water from a 9 well in Sichuan and the effluent after pretreatment

| 测试项目                       | 返排液原液(某9井)           |                      |                      | 手动加药出水水质             |                      |                      | 自动加药出水水质             |                      |                      | 回用水推荐水质指标(NB/T 14002.3—2015) |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|
|                            | 样1                   | 样2                   | 样3                   | 样1                   | 样2                   | 样3                   | 样1                   | 样2                   | 样3                   |                              |
| 总矿化度/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 1.91×10 <sup>4</sup> | 1.80×10 <sup>4</sup> | 1.77×10 <sup>4</sup> | 1.81×10 <sup>4</sup> | 1.68×10 <sup>4</sup> | 1.57×10 <sup>4</sup> | 1.78×10 <sup>4</sup> | 1.71×10 <sup>4</sup> | 1.56×10 <sup>4</sup> | ≤20 000                      |
| 总硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )  | 1.83×10 <sup>3</sup> | 1.0×10 <sup>3</sup>  | 1.1×10 <sup>3</sup>  | 1.08×10 <sup>3</sup> | 699                  | 284                  | 212                  | 259                  | 146                  | ≤800                         |
| 总铁/(mg·L <sup>-1</sup> )   | 14.5                 | 7.38                 | 24.1                 | 3.95                 | 1.01                 | 0.32                 | 0.27                 | 0.06                 | 0.18                 | ≤10                          |
| 悬浮物/(mg·L <sup>-1</sup> )  | 158                  | 32                   | 27                   | 108                  | 50                   | 11                   | 13                   | 6                    | 11                   | ≤1 000                       |
| pH                         | 7.31                 | 7.23                 | 7.14                 | 7.08                 | 7.02                 | 6.89                 | 7.1                  | 6.83                 | 6.92                 | 6~9                          |
| SRB数量/mL <sup>-1</sup>     | 2.5×10 <sup>3</sup>  | 1.1×10 <sup>4</sup>  | 2.5×10 <sup>3</sup>  | 0.0                  | 60.0                 | 0.0                  | 25.0                 | 0.0                  | 0.0                  | ≤25                          |
| TGB数量/mL <sup>-1</sup>     | 6.0×10 <sup>3</sup>  | 700.0                | 2.5×10 <sup>3</sup>  | 250                  | 60.0                 | 120.0                | 130.0                | 50.0                 | 0.6                  | ≤10 <sup>4</sup>             |
| FB数量/mL <sup>-1</sup>      | 2.5×10 <sup>3</sup>  | 110.0                | 2.5×10 <sup>3</sup>  | 25.0                 | 2.5                  | 25.0                 | 25.0                 | 0.0                  | 6.0                  | ≤10 <sup>4</sup>             |
| 结垢趋势                       | 有                    | 有                    | 有                    | 无                    | 无                    | 无                    | 无                    | 无                    | 无                    | 无                            |
| 配伍性                        | 有沉淀                  | 有沉淀                  | 有沉淀                  | 无沉淀、无絮凝              | 无沉淀、无絮凝              | 无沉淀、无絮凝              | 无沉淀、无絮凝              | 无沉淀、无絮凝              | 无沉淀、无絮凝              | 无沉淀、无絮凝                      |

由表3可知,某9井返排液水质在实验水质范围内,理论上表明可用该装置处理9井返排液。该9井返排液总硬度较高(1.0×10<sup>3</sup>~2.0×10<sup>3</sup> mg/L),悬浮物波动较大(27~158 mg/L),SRB数量普遍较高(≥2.5×10<sup>3</sup> mL<sup>-1</sup>),总体来说,总硬度、总铁、悬浮物、细菌、结垢趋势、配伍性均存在超出回用水质标准的风险。手动加药处理后,出水水质波动较大,样1与样3悬浮物浓度相差近10倍,样1总硬度(1.08×10<sup>3</sup> mg/L)及样2 SRB数

量(60 mL<sup>-1</sup>)均超出回用水质标准,自动加药处理后,总硬度在140~260 mg/L之间,细菌SRB数量小于25 mL<sup>-1</sup>,出水水质均能稳定达到回用水质标准。

对比分析手动、自动加药药剂费发现,自动的比手动的低35%。分别将返排液原液样2、手动加药出水样2、自动加药出水样2配成水基压裂液中的滑溜水型压裂液(0.1%聚丙烯酰胺类稠化剂+0.2%表面活性剂),对比3种滑溜水性能,结果见表4。

表4 四川气田某9井压裂返排液及其处理出水配成滑溜水的性能评价

Table 4 The evaluation of slick water prepared by the fracturing flowback water from a 9 well in Sichuan and treated effluents

| 测试项目                                     | 返排液原液样2<br>配滑溜水     | 手动加药出水样2<br>配滑溜水 | 自动加药出水样2<br>配滑溜水 | 《滑溜水性能指标及评价方法》<br>(NBT 14003.1—2015) |
|------------------------------------------|---------------------|------------------|------------------|--------------------------------------|
| pH                                       | 7.23                | 7.02             | 6.83             | 6~9                                  |
| 运动黏度/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 4.3                 | 2.5              | 2.14             | ≤5                                   |
| 表面张力/(mN·m <sup>-1</sup> )               | 30.2                | 25.8             | 23.9             | <28                                  |
| 结垢趋势                                     | 有                   | 无                | 无                | 无                                    |
| SRB数量/mL <sup>-1</sup>                   | 1.1×10 <sup>4</sup> | 60.0             | 0.0              | <25                                  |
| TGB数量/mL <sup>-1</sup>                   | 700.0               | 60.0             | 50.0             | <10 <sup>4</sup>                     |
| FB数量/mL <sup>-1</sup>                    | 110.0               | 2.5              | 0.0              | <10 <sup>4</sup>                     |
| 配伍性                                      | 有沉淀                 | 无絮凝、无沉淀          | 无絮凝、无沉淀          | 无絮凝、无沉淀                              |
| 降阻率/%                                    | 69.1                | 70.8             | 72.8             | ≥70                                  |
| CST比值                                    | 1.3                 | 1.2              | 1.2              | <1.5                                 |

由表4可知,返排液原水配成滑溜水的表面张力、配伍性、结垢趋势、SRB数量及降阻率均超出滑溜水性能要求,手动加药处理出水配成滑溜水的SRB数量超出滑溜水性能要求,而自动加药处理出

水配成的滑溜水均满足各项指标要求,且其运动黏度、表面张力、降阻率均优于手动加药处理出水配成的滑溜水,这是因为手动加药处理出水中二价结垢离子、总铁及SRB浓度相对较高,从而影响其滑溜

水的指标。

现场应用结果表明,该装置对返排液处理效果较好,与手动加药处理出水相比,自动加药处理出水水质更稳定且满足回用水质标准,其处理出水配成的滑溜水性能达到滑溜水技术指标要求,自动加药药剂成本明显低于手动加药成本。

## 5 结论

(1)通过系统分析四川盆地页岩气压裂返排液水质特征,首次明确了四川盆地页岩气压裂返排液在总硬度、细菌、结垢趋势、配伍性上均超出回用水质标准,部分压裂返排液总铁超出回用水质标准。

(2)实验研究结果表明,与软化-混凝,软化-混凝-絮凝相比,软化-混凝-絮凝-杀菌处理效果最佳,经该技术处理后出水水质达到回用水质标准,其最优工艺条件为:投加 NaOH 升高 pH 至 10,混凝剂投加量( $Y_1$ )满足  $Y_1=0.46X_1+39$ ,絮凝剂投加量( $Y_2$ )满足  $Y_2=0.0041X_2-0.9$ ,杀菌剂投加量、pH、杀菌时间分别为 200 mg/L、6、30 min。

(3)根据实验最优工艺条件制造的回用处理装置应用结果表明,自动加药处理出水水质优于手动处理出水,且能稳定达到回用水质标准,自动加药药剂成本比手动的低 35%。自动加药处理出水配成的滑溜水性能优于手动的,且能达到滑溜水技术指标要求。

## 参考文献

- [1] WARNER N R, JACKSON R B, DARRAH T H, et al. Geochemical evidence for possible natural migration of Marcellus Formation brine to shallow aquifers in Pennsylvania[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(30): 11961-11966.
- [2] KARGBO D M, WILHELM R G, CAMPBELL D J. Natural gas plays in the Marcellus Shale: Challenges and potential opportunities[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(15): 5679-5684.
- [3] THEODORI G L, LULOFF A E, WILLITS F K, et al. Hydraulic fracturing and the management, disposal, and reuse of frac flowback waters: Views from the public in the Marcellus shale[J]. Energy Research & Social Science, 2014, 2: 66-74.
- [4] ELLSWORTH W L. Injection-induced earthquakes[J]. Science, 2013, 341(6142): 1225942.
- [5] JACKSON R B, VENGOSH A, CAREY J W, et al. The environmental costs and benefits of fracking[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2014, 39: 327-362.
- [6] SHAFFER D L, ARIAS CHAVEZ L H, BEN-SASSON M, et al. Desalination and reuse of high-salinity shale gas produced water: Drivers, technologies, and future directions[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(17): 9569-9583.
- [7] HALUSZCZAK L O, ROSE A W, KUMP L R. Geochemical evaluation of flowback brine from Marcellus gas wells in Pennsylvania, USA[J]. Applied Geochemistry, 2013, 28: 55-61.
- [8] 杨德敏, 夏宏, 袁建梅, 等. 页岩气压裂返排液废水处理技术探讨[J]. 环境工程, 2013, 31(6): 31-36.
- [9] YANG Demin, XIA Hong, YUAN Jianmei, et al. Discussion on treatment methods of fracturing recovery wastewater from shale gas field[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(6): 31-36.
- [10] ZHANG Zuoyou, DU Xuewei, CARLSON K H, et al. Effective treatment of shale oil and gas produced water by membrane distillation coupled with precipitative softening and walnut shell filtration[J]. Desalination, 2019, 454: 82-90.
- [11] HUTCHERSON J. A comparison of electrocoagulation and chemical coagulation treatment effectiveness on frac flowback and produced water[D]. Colorado: Colorado State University, 2015.
- [12] 华萍, 傅绍斌, 刘泽强, 等. 催化电解杀菌与次氯酸钠杀菌的对比[J]. 地质科技情报, 2005, 24(4): 91-93.
- [13] HUA Ping, FU Shaobin, LIU Zeqiang, et al. Comparison of catalytic electrolysis disinfection and hypochlorite disinfection[J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(4): 91-93.
- [14] 尧君. 压裂返排液再配液技术的研究应用[J]. 工业水处理, 2017, 37(8): 89-92.
- [15] YAO Jun. Research and application of fracturing back flow & reusing fluid technology[J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(8): 89-92.
- [16] 张太亮, 李泽锋, 徐俊, 等. 非常规油气藏压裂返排液资源化利用研究[J]. 工业水处理, 2014, 34(12): 78-81.
- [17] ZHANG Tailiang, LI Zefeng, XU Jun, et al. Research on the resource utilization of fracturing flow-back fluid from unconventional oil and gas reservoirs[J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34(12): 78-81.
- [18] 陈文娟, 张健, 檀国荣, 等. 压裂返排液快速高效处理方法研究[J]. 工业水处理, 2015, 35(12): 77-82.
- [19] CHEN Wenjuan, ZHANG Jian, TAN Guorong, et al. Research on the rapid and efficient treatment method for fracturing wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(12): 77-82.
- [20] 何启平, 尹丛彬, 李嘉, 等. 威远-长宁地区页岩气压裂返排液回用技术研究与应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39(1): 118-121.
- [21] HE Qiping, YIN Congbin, LI Jia, et al. Research and application of fracturing fluid flowback technologies for shale gas exploration in Wei Yuan-Chang Ning block[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(1): 118-121.

- [16] ZIEMKIEWICZ P F, HE Y T. Evolution of water chemistry during Marcellus Shale gas development: A case study in West Virginia[J]. *Chemosphere*, 2015, 134: 224-231.
- [17] 国家能源局. 页岩气 储层改造 第3部分: 压裂返排液回收和处理方法 NB/T 14002.3—2015[S].
- [18] 熊颖, 刘友权, 梅志宏, 等. 四川页岩气开发用耐高矿化度滑溜水技术研究[J]. *石油与天然气化工*, 2019, 48(3): 62-65.
- XIONG Ying, LIU Youquan, MEI Zhihong, et al. Slick water technology of high salinity resistance for shale gas development in Sichuan[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2019, 48(3): 62-65.
- [19] 宋薇. 低渗油藏注入水与储层配伍性影响因素研究[D]. 荆州: 长江大学, 2017.
- SONG Wei. Research on compatibility influence factors of injection water with reservoir on low permeability oilfield[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2017.
- [20] 杨博丽, 徐迎新, 张冕. 压裂返排液中悬浮物去除的室内研究[J]. *油气田环境保护*, 2015, 25(4): 31-33.
- YANG Boli, XU Yingxin, ZHANG Mian. Experimental research on the removal of suspended solids in fracturing flowback fluids[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2015, 25(4): 31-33.
- [21] 陈宇辉, 陶涛, 余健. pH值对地下水除铁除锰影响机理的研究[J]. *工业用水与废水*, 2005, 36(5): 17-19.
- CHEN Yuhui, TAO Tao, YU Jian. Effects of pH value on removal of iron and manganese from groundwater[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2005, 36(5): 17-19.
- [22] 屈璇. 酸化压裂返排液处理技术及其应用研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- QU Xuan. Study on treatment technology and application of acidizing fracturing flowback fluid[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020.
- [23] LIU Dan, LI Jian, ZOU Caineng, et al. Recycling flowback water for hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China: Implications for gas production, water footprint, and water quality of regenerated flowback water[J]. *Fuel*, 2020, 272: 117621.
- [24] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 106-107.
- [25] 国家环境保护局. 水质 钙和镁总量的测定 EDTA滴定法 GB 7477—1987[S].
- [26] 国家环境保护局. 水质 悬浮物的测定 重量法 GB 11901—1989[S].
- [27] 国家能源局. 碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法 SY/T 5329—2012[S].
- [28] 国家能源局. 油田水结垢趋势预测方法: SY/T 0600—2016[S].
- [29] 徐文博, 王东升, 段晋明, 等. 高硬度富锶地下水的软化沉淀—超滤膜联用工艺[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(10): 3443-3448.
- XU Wenbo, WANG Dongsheng, DUAN Jinming, et al. Treatment of high hardness and strontium-rich groundwater by chemical softening-ultrafiltration process[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(10): 3443-3448.
- [30] 闫志为, 刘辉利, 陶宗涛. 温度对水中碳酸平衡的影响浅析[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(2): 128-131.
- YAN Zhiwei, LIU Huili, TAO Zongtao. Temperature effect on carbonic acid balance in water[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(2): 128-131.
- [31] 杨忠莲. 铝盐混凝剂在给水处理中残留铝含量、组分及影响机制研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- YANG Zhonglian. Content, speciation and influencing mechanism of residual Al during drinking water treatment using Al-based coagulants[D]. Ji'nan: Shandong University, 2013.
- [32] HUANG Li, FAN Hongliang, XIE Haitao, et al. Experimental study of treatment processes for shale gas fracturing flowback fluid in the eastern Sichuan Basin[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(51): 24299-24312.
- [33] FUKUZAKI S. Mechanisms of actions of sodium hypochlorite in cleaning and disinfection processes[J]. *Biocontrol Science*, 2006, 11(4): 147-157.
- [34] 顾泽平, 孙水裕, 肖华花. 用次氯酸钠法处理选矿废水[J]. *化工环保*, 2006, 26(1): 35-37.
- GU Zeping, SUN Shuiyu, XIAO Huahua. Treatment of flotation wastewater by NaClO process[J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2006, 26(1): 35-37.
- [35] Bremer P J, Monk I, Butler R. Inactivation of *Listeria monocytogenes/Flavobacterium* spp. biofilms using chlorine: Impact of substrate, pH, time and concentration[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2002, 35(4): 321-325.
- [36] 国家能源局. 页岩气 压裂液 第1部分: 滑溜水性指标及评价方法 NB/T 14003.1—2015[S].

[作者简介] 杨杰(1987— ), 博士, 高工。电话: 18280284221, E-mail: yangjie\_cup@163.com。

[收稿日期] 2022-07-14(修改稿)