



页岩气压裂返排液电渗析脱盐处理技术研究

张 傲¹, 王 好¹, 冉 凡¹, 张琳婧², 陈子薇³, 任宏洋^{3,4}

(1. 中国石油西南油气田分公司重庆气矿, 重庆 400030; 2. 浙江油田公司质量健康安全环保部, 浙江杭州 310013; 3. 西南石油大学化学化工学院, 四川成都 610500; 4. 四川省环境保护油气田污染防治与环境安全重点实验室, 四川成都 610500)

[摘要] 页岩气压裂返排液具有高盐、高 COD 的污染特征, 其 TDS 约为 $3.2 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4$ mg/L。采用 GC-MS 对压裂返排液进行分析, 结果表明, 其有机污染物包括烷烃、环烷烃、醇类、卤代烃, 以及少量酮类、酚类、酯类等。烷烃是页岩气压裂压返液的主要污染成分。采用电渗析技术对页岩气压裂返排液进行处理, 研究操作电压、极水质量分数等因素对脱盐率、电导率及 COD 去除率的影响。实验结果表明, 电渗析处理过程中, 随着操作电压的增加(5~20 V 范围内), 压裂返排液的脱盐率和 COD 去除率随之升高; 电压为 20 V 时, TDS 和 COD 的去除率分别达到 99.94%、79.99%。在不同操作电压下, 前 40 min 脱盐速率较快, 60 min 后脱盐速率降低, 随后趋于平缓。极水质量分数为 0.5%~0.75% 时, 压裂返排液的脱盐率、COD 去除率随极水质量分数的增加而提高。此后进一步提高极水质量分数, TDS 和 COD 的去除率均有所降低。电渗析过程中离子价态对各离子的去除率有一定影响。阴离子 SO_4^{2-} 、 Cl^- 的去除率分别为 99.3%、96.6%; 不同阳离子之间的去除率相差不大, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ 的去除率分别达到 99.8%、99.7%、96.9%、99.3%。

[关键词] 电渗析; 页岩气; 压裂返排液; 脱盐

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)08-0102-06

Research on electrodialysis desalination technology for shale gas fracturing flowback fluid

ZHANG Ao¹, WANG Hao¹, RAN Fan¹, ZHANG Linjing², CHEN Ziwei³, REN Hongyang^{3,4}

(1. Chongqing Division, Southwest Oil & Gas Field Co., Ltd., PetroChina, Chongqing 400030, China; 2. QHSE Protection Department, Zhejiang Oilfield Co., Ltd., Hangzhou 310013, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 4. Key Laboratory of Oil and Gas Field Pollution Prevention and Environmental Safety in Sichuan Province, Chengdu 610500, China)

Abstract: The shale gas fracturing flowback fluid has the characteristics of high salt and high COD, and its TDS is about $3.2 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4$ mg/L. GC-MS was used to analyze the fracturing flowback fluid, and the results showed that its organic pollutants included alkanes, cycloalkanes, alcohols, halogenated hydrocarbons, and a small number of ketones, phenols, and esters. Alkanes were the main components of shale gas fracturing flowback fluids. Electrodialysis technology was used to treat shale gas fracturing flowback fluid, and the effects of operating voltage, mass fraction of electrode water and other factors on desalination rate, conductivity and COD removal rate were investigated. The experimental results showed that desalination rate and COD removal rate of the fracturing flowback fluid increased with the increase of operating voltage (in the range of 5~20 V) during the electrodialysis treatment. The removal rates of TDS and COD reached 99.94% and 79.99%, respectively, when the voltage was 20 V. Under different operating voltages, the desalination rate was faster in the first 40 minutes, and then decreased after 60 minutes and leveled off. The desalination rate and COD removal rate of the fracturing flowback fluid increased

[基金项目] 中国石油-西南石油大学创新联合体科技合作项目(2020CX020300); 四川省科技计划项目(2021YFG0116)

with the increase of electrode water mass fraction when the electrode water mass fraction was 0.5%-0.75%. The removal rate of TDS and COD decreased when the mass fraction of electrode water was further increased. In electrodialysis process, ion valence had an effect on the removal rate of ion. The removal rates of anions SO_4^{2-} and Cl^- were 99.3% and 96.6%, respectively. The differences in the removal rates of different cations were not significant, with Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ and K^+ reaching 99.8%, 99.7%, 96.9% and 99.3%, respectively.

Key words: electrodialysis; shale gas; fracturing flowback liquid; desalination

随着我国能源结构的调整,作为典型非常规能源的页岩气成为我国能源战略的重要需求。在页岩气开发过程中,压裂操作后有10%~80%的压裂流体会返回到地表,形成压裂返排液。页岩气压裂返排液包含多种化学添加剂^[1-2](如润滑剂、防腐剂、阻垢剂、破胶剂、交联剂、酸液)、烃类有机化合物、溶解性盐类(钠、钾、钙、镁、铁、锰、氯离子、碳酸盐)及重金属等^[3-7]。页岩气压裂返排液具有COD、盐、油、悬浮物和化学添加剂含量高,污染物种类多、色度高、稳定性高的特点,处理难度较大^[8-9],给开发区域的生态环境带来挑战,成为页岩气开发过程亟待解决的重要问题。笔者采用电渗析技术对页岩气压裂返排液进行处理,研究电渗析过程对有机污染物、盐类的去除机制,为页岩气开发过程中的水环境保护提供一定指导。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验水样取自四川盆地某页岩气平台,呈黄色透明状,有异味,含有少量棕色悬浮物和杂质。

pHS-3C型pH计,上海仪电科学仪器股份有限公司;COM-100 TDS测定仪,韩国HM公司;IC761离子色谱仪,瑞士万通公司;AA-7020原子分光光度计,北京东西分析仪器有限公司;7890A-5925C GC-MS气质联用仪,美国Agilent公司。

电渗析装置采用1组膜堆(20对膜)。电渗析膜材质为聚乙烯,有效膜面积为 1 m^2 ,运行时控制电流 $\leq 10\text{ A}$,电压 $\leq 20\text{ V}$,极水流量 $150\sim 250\text{ L/h}$,三路压力 $\leq 0.1\text{ MPa}$;极水为质量分数为0.5%~1.0%的NaCl水溶液。在浓水箱、淡水箱中分别加入待处理水样,通过离子交换膜对浓淡水进行处理。实验装置见图1。

1.2 实验方法

1.2.1 页岩气压裂返排液电渗析工艺条件优化

(1)操作电压。控制浓水流量为 500 L/h ,进水

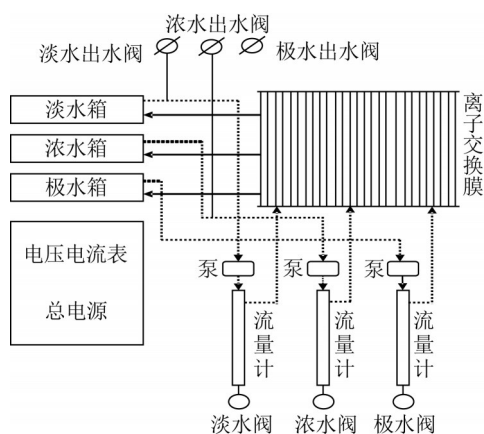


图1 电渗析装置

Fig. 1 Electro dialysis device

流量为 500 L/h ,极水为NaCl水溶液,极水流量 $150\sim 250\text{ L/h}$,改变电渗析的操作电压分别为5、10、15、20 V,在0、20、40、60、80、100、120 min时刻取样,测定出水中的总溶解固体(TDS)、电导率和COD。

(2)极水质量分数。配制质量分数分别为0.5%、0.65%、0.75%、0.85%、1.00%的NaCl溶液作为极水,控制浓水流量为 500 L/h ,进水流量为 500 L/h ,极水流量为 $150\sim 250\text{ L/h}$,操作电压为20 V,在0、20、40、60、80、100、120 min时刻取样,测定出水中的TDS、电导率和COD。

1.2.2 电渗析脱盐

在操作电压为20 V、进水流量为 600 L/h 、极水质量分数为0.75%、极水流量为 $150\sim 250\text{ L/h}$,不调节进水pH的条件下,稳定循环运行装置1 h,间隔5 min取样,测定水样中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 的含量。

1.3 分析方法

COD采用油气田高氯废水测定法测定;pH采用pH计测定;电导率及TDS用TDS测定仪测定;无机阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-})用离子色谱仪测定;阳离子(Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Ca^{2+})用原子分光光度计火焰吸收法测定;水样中的有机污染物用GC-MS气质联用仪测定。

2 结果与讨论

2.1 页岩气压裂返排液的水质特征

页岩气压裂返排液的水质情况如表1所示。

表1 页岩气压裂返排液水质特征

Table 1 Water quality characteristics of shale gas fracturing flowback fluid

| 项目 | pH | COD | TDS | 氯化物 | 硫酸根 |
|----|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------|------------------|
| 数值 | 6.85~7.43 | 150~220 (3.2~4.0)×10 ⁴ | (1.5~2.2)×10 ⁴ | 86~92 | |
| 项目 | Na ⁺ | K ⁺ | Mg ²⁺ | Ca ²⁺ | Sr ²⁺ |
| 数值 | 12 532~13 226 | 164~178 | 2 145~2 238 | 678~712 | 5.62~15.68 |

注:除pH外,其余项目单位均为mg/L。

由表1可知,页岩气压裂返排液中的COD超过《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的一级排放标准限值,但超标倍数不大;盐是该返排液的主要污染物,其水质污染特征与孟宣宇等^[9]的研究结果相近。

用GC-MS对页岩气压裂返排液中的有机污染物进行分析,如图2所示。

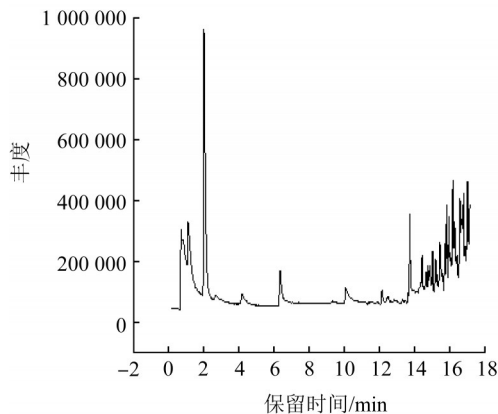


图2 页岩气压裂返排液的GC-MS谱图

Fig. 2 GC-MS spectrum of shale gas fracturing flowback liquid

图2显示,该页岩气压裂返排液中的有机污染物包括烷烃、环烷烃、醇类、卤代烃,以及少量酮类、酚类、酯类等,其中烷烃是主要有机污染成分。其有机污染物组成如表2所示。

由表2可见,压裂返排液中含量较高的有2,6,10-三甲基十五烷、4-甲基十二烷、正十五烷、10-甲基十九烷、正十四烷。王兵等^[10]的研究指出压裂返排液的有机污染物以烷烃为主,但具体组成与本研究有较大差距。

综合分析认为,页岩气压裂返排液的水质受压

表2 页岩气压裂返排液的有机污染物组成

Table 2 Composition of organic pollutants in shale gas fracturing flowback liquid

| 类别 | 名称 |
|-----|---|
| 烷烃 | 正十一烷~正二十烷、2,6,10-三甲基十五烷、4-甲基十二烷、10-甲基十九烷、植烷、1-戊基-2-丙基环戊烷、2,6,10,14-四甲基十五烷 |
| 环烷烃 | 二乙基环戊烷、1,1'-亚丙基双环己烷、环己基环己烷 |
| 醇 | 2-己基-1-癸醇、2-丁基-1-辛醇、2,4-二乙基庚烷-1-醇 |
| 卤代烃 | 硝基氯仿、2-溴十二烷、1-碘十一烷 |
| 酮 | 戊基环戊烯酮、戊基环戊烯酮 |
| 酚 | 2,4-二叔丁基苯酚、2-甲基苯酚、2-乙基苯酚、2,4-双(1,1-二甲基乙基)苯酚、3,5-二甲基苯酚 |

裂液添加剂种类和含量、储层化学组成,及返排到地面的停留时间等因素影响,水质波动较大。

2.2 操作电压对电渗析效果的影响

在浓水、淡水流量为500 L/h,极水进水流量为150~250 L/h的实验条件下,考察操作电压对电渗析效果的影响,结果如图3所示。

图3中,电渗析对压裂返排液中的盐有较高的去除效率,前40 min脱盐速率较高,60 min后速率降低,随后逐渐趋于平缓。电渗析脱盐过程中,阴阳离子的迁移速度取决于膜堆两侧所加的操作电压大小。电压分别为5、10、15、20 V,120 min时,TDS最终去除率分别为80.49%、99.83%、99.89%、99.94%;电压为10 V时的TDS去除率与20 V的差距不显著。TDS去除率与压裂返排液的电导率去除正相关^[11-12],当TDS最终去除率达到99%时,电导率去除也达到99%。

电渗析过程中,页岩气压裂返排液中以酚类为代表的部分有机物发生电离,电离产物和无机离子协同分子态的有机物发生迁移,实现了有机物的去除^[13]。图3(c)显示,前40 min COD的去除速率较快,5、10、15、20 V电压下去除率分别为52.01%、44.71%、68.41%、79.99%,较高的操作电压有利于COD的去除。页岩气压裂返排液中的芳香烃有机物在迁移过程中与基膜存在亲和作用,导致有机物在膜表面发生沉积或堵塞膜孔道,降低了有机物的迁移速率^[14]。操作电压为10 V时,采用未经清洗的膜电渗析过程对COD的去除率较低,而清洗后的膜在20 V下恢复较高的COD去除率。综上,较高的操作电压有利于TDS和COD的去除;COD较高的压裂返排液在电渗析过程中易导致膜污染,降低COD的去除效率。

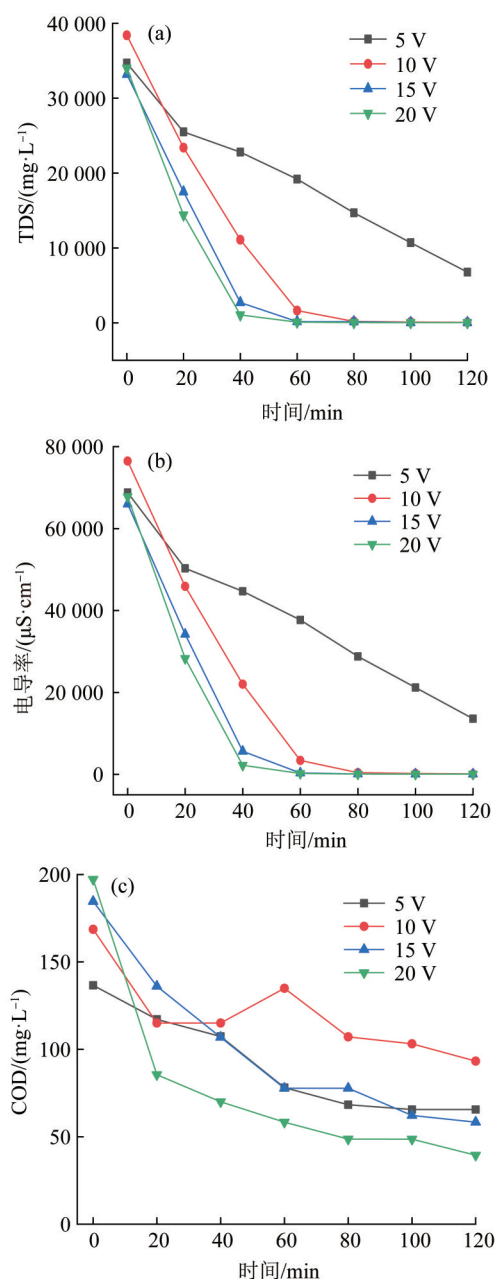


图3 操作电压对TDS(a)、电导率(b)、COD(c)的影响

Fig. 3 Effect of voltage on TDS (a), conductivity (b), COD (c)

2.3 极水质量分数对电渗析效果的影响

电渗析系统中同时存在电子导电和离子导电2种导电形式,并在电子型和离子型之间相互转换。这一过程是极水中的阴阳离子在电极表面发生氧化还原反应造成的。在电渗析过程中,极水起到使电极的电子导电转化为溶液离子导电的作用。反应过程中极水浓度与系统的传质通量和电流呈正相关^[11],同时极水也承担了排除电极反应产物(排气、排垢),冲刷、冷却电极的作用,对电渗析效率有显著影响。

实验分别配备了质量分数为0.5%、0.65%、0.75%、0.85%、1.0%的NaCl溶液作为极水,测定极水质量分数对电渗析效果的影响,结果如图4所示。

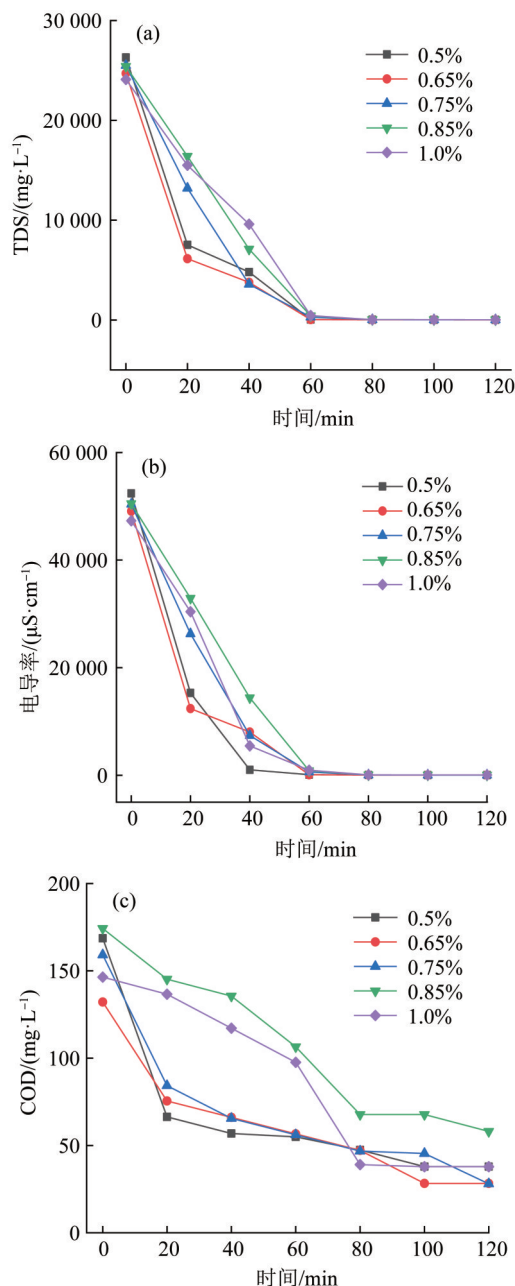


图4 极水质量分数对TDS(a)、电导率(b)、COD(c)的影响

Fig. 4 Effect of electrode water mass fraction on TDS (a), conductivity (b), COD (c)

由图4可见,反应前期(40 min内),当极水质量分数为0.50%~0.75%,TDS的去除率随极水质量分数的增加而升高;但极水质量分数升至0.75%~1.0%时TDS去除率有所降低。当极水的离子浓度

处于较低水平时,极室的导电性大幅减弱,可能形成极化现象,导致电极板结垢,脱盐过程的平均电流密度降低,电流效率下降;增加极水浓度后,一方面可使电极的电子导电转化为溶液离子导电的能力增强,促进电渗析脱盐过程的进行,另一方面极区电阻减小,在操作电压不变的条件下离子迁移速率加快,单膜的传质通量和电流变大;而极水浓度过高时,浓相的浓度也较高,离子无法渗透,一定程度上抑制迁移。因此,在一定范围内提高极水浓度,可以促进并增强溶液的离子导电能力,提高电渗析脱盐效果^[11]。由图4(c)可见,极水质量分数较低有利于提高COD的去除效果。极水质量分数较高时,电渗析反应器的电阻减小,电流增大,无机离子优先通过离子交换膜到达浓室,当浓室的浓度大于淡室,由于浓差极化作用阻碍了有机物的迁移。

综上确定极水质量分数为0.75%时对页岩气压裂返排液的处理效果最佳。对操作电压和极水质量分数进行优化后,出水COD<50 mg/L、Cl⁻约110~160 mg/L,可达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)、《四川省水污染物排放标准》(DB 51/190—1993)对页岩气压裂返排液中COD和氯离子的要求。

2.4 电渗析脱盐过程中不同离子的分离特性

在优化工艺条件(操作电压20 V、进水流量600 L/h、极水质量分数0.75%)下,循环运行电渗析装置1 h,每隔5 min取淡水水样,考察电渗析对不同离子的去除效果,结果如表3所示。

表3 电渗析过程中离子质量浓度随时间的变化

Table 3 Variation of ion mass concentration with time during electrodialysis

| 时间/ min | K ⁺ / (mg·L ⁻¹) | Na ⁺ / (mg·L ⁻¹) | Ca ²⁺ / (mg·L ⁻¹) | Mg ²⁺ / (mg·L ⁻¹) | Cl ⁻ / (mg·L ⁻¹) | SO ₄ ²⁻ / (mg·L ⁻¹) |
|------------|---|--|---|---|--|--|
| 0 | 181.2 | 14 064.0 | 763.4 | 2 245.5 | 14 180.4 | 86.8 |
| 5 | 141.3 | 8 853.6 | 184.2 | 335.2 | 6 846.6 | 7.8 |
| 10 | 81.2 | 6 219.5 | 31.6 | 105.2 | 5 455.2 | 7.2 |
| 15 | 32.6 | 2 021.4 | 8.6 | 42.6 | 3 540.8 | 6.8 |
| 20 | 18.5 | 1 413.2 | 5.5 | 21.5 | 2 130.6 | 5.6 |
| 25 | 4.5 | 551.8 | 4.2 | 18.3 | 812.5 | 4.8 |
| 30 | 3.2 | 468.2 | 3.1 | 15.8 | 525.2 | 3.9 |
| 35 | 2.8 | 444.6 | 2.9 | 12.4 | 517.6 | 3.6 |
| 40 | 2.6 | 441.0 | 2.5 | 11.2 | 478.4 | 2.8 |
| 45 | 2.3 | 436.2 | 2.2 | 8.7 | 476.2 | 2.4 |
| 50 | 2.2 | 435.4 | 1.8 | 7.2 | 482.5 | 1.6 |
| 55 | 1.8 | 434.5 | 1.6 | 6.8 | 478.3 | 0.9 |
| 60 | 1.2 | 434.2 | 1.2 | 6.5 | 482.7 | 0.6 |

由表3可见,电渗析过程对不同形态离子的去除效果差异较大。阴离子中,SO₄²⁻在5 min内基本达到最大去除率,约90%;Cl⁻在5 min内的去除率约为54%,最终SO₄²⁻、Cl⁻的去除率分别达到99.3%、96.6%。尽管页岩气压裂返排液中的Cl⁻含量很高,但未影响电渗析装置对离子的选择透过性,SO₄²⁻体积虽然较大,但其为二价离子,在离子交换膜中的活度较高,离子交换速度较快^[15]。

电渗析处理60 min后,页岩气压裂返排液中的Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺去除率分别可达99.8%、99.7%、96.9%、99.3%,电渗析对页岩气压裂返排液中不同阳离子的去除速度相差不大。总体上二价阳离子的去除速度比一价阳离子的稍快。这主要是由于二价阳离子的离子水化半径较小,活度较高;另外Ca²⁺、Mg²⁺带有2个电荷,无论电场迁移速度还是离子交换膜中的离子交换速度都比Na⁺、K⁺快。

电渗析能有效去除页岩气压裂返排液中的阴离子和阳离子,特别对于二价离子,无论阴离子还是阳离子去除率均较高,由此可见离子价态对电渗析的离子去除有较为显著的影响。

3 结论

(1)对页岩气压裂返排液进行电渗析处理,考察操作电压和极水质量分数对处理效果的影响。结果显示,操作电压在5~20 V范围内时,随着电压的升高,脱盐率、COD去除率随之升高;操作电压为20 V时,TDS和COD的去除率分别达到99.94%、79.99%;操作电压为10 V时TDS最终去除率与20 V时的去除率差距不显著。电渗析过程中,COD较高的污水容易造成膜污染,降低COD的去除率。极水质量分数为0.50%~1.00%范围内,当极水质量分数<0.75%时,TDS和COD的去除率随极水质量分数的增加而升高;进一步提高极水质量分数后,TDS和COD的去除率均有所降低。

(2)电渗析对页岩气压裂返排液中SO₄²⁻、Cl⁻的去除率分别达99.3%、96.6%;不同阳离子之间的去除速度相差不大,Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺和K⁺的去除率分别为99.8%、99.7%、96.9%、99.3%。离子价态对电渗析去除效果有较为显著的影响,二价离子的去除率更高。

参考文献

- [1] 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.
- [2] WANG Bing, XIONG Mingyang, WANG Peijie, et al. Chemical characterization in hydraulic fracturing flowback and produced water (HF-FPW) of shale gas in Sichuan of China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27 (21): 26532-26542.
- [3] 王顺武, 赵晓非, 李子旺, 等. 油田压裂返排液处理技术研究进展 [J]. *化工环保*, 2016, 36(5): 493-499.
- WANG Shunwu, ZHAO Xiaofei, LI Ziwan, et al. Research progresses on treatment technologies of oilfield fracturing flow-back fluid [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2016, 36(5): 493-499.
- [4] KHAIR E M M, ZHANG Shicheng, MOU Shanbo, et al. Performance and application of new anionic D3F-AS05 viscoelastic fracturing fluid [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 78(1): 131-138.
- [5] 王中华. 国内页岩气开采技术进展 [J]. *中外能源*, 2013, 18(2): 23-32.
- WANG Zhonghua. The progress of the exploitation technology of shale gas in China [J]. *Sino-Global Energy*, 2013, 18(2): 23-32.
- [6] BUTKOVSKIY A, BRUNING H, KOOLS S A E, et al. Organic pollutants in shale gas flowback and produced waters: Identification, potential ecological impact, and implications for treatment strategies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(9): 4740-4754.
- [7] ABUALFARAJ N, GURIAN P L, OLSON M S. Characterization of Marcellus shale flowback water [J]. *Environmental Engineering Science*, 2014, 31(9): 514-524.
- [8] 耿翠玉, 乔瑞平, 陈广升, 等. 页岩气压裂返排液处理技术 [J]. *能源环境保护*, 2016, 30(1): 12-16.
- GENG Cuiyu, QIAO Ruiping, CHEN Guangsheng, et al. The treatment technologies of hydraulic fracturing fluid flowback of shale gas [J]. *Energy Environmental Protection*, 2016, 30(1): 12-16.
- [9] 孟宣宇, 朱营莉, 林雯杰, 等. 页岩气压裂返排液电絮凝处理技术研究 [J]. *工业水处理*, 2017, 37(11): 58-61.
- MENG Xuanyu, ZHU Yingli, LIN Wenjie, et al. Research on the electric flocculation treatment of shale gas fracturing flow back fluid [J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(11): 58-61.
- [10] 王兵, 王佩洁, 祝伟, 等. 页岩气开发中压裂返排液的水质污染特征研究 [J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(1): 231-237.
- WANG Bing, WANG Peijie, ZHU Wei, et al. On the organic pollutants and molecular weight distribution in the HFFW of shale gas in Sichuan [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(1): 231-237.
- [11] 王郁. 电渗析-生化组合方法处理高盐废水 [D]. 天津: 天津大学, 2013.
- WANG Yu. Treatment of high-salinity wastewater by electrodialysis-biological method [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [12] CHON K, LEE Y, TRABER J, et al. Quantification and characterization of dissolved organic nitrogen in wastewater effluents by electrodialysis treatment followed by size-exclusion chromatography with nitrogen detection [J]. *Water Research*, 2013, 47(14): 5381-5391.
- [13] 田秉晖, 刘芷源, 李昱含. 基于“趋零排放”的高盐废水电渗析浓缩技术研究进展 [J]. *环境工程学报*, 2020, 14(9): 2394-2405.
- TIAN Binghui, LIU Zhiyuan, LI Yuhuan. Research progress on near-zero discharge of high-salt wastewater using electrodialysis concentration technology [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(9): 2394-2405.
- [14] TANAKA N, NAGASE M, HIGA M. Organic fouling behavior of commercially available hydrocarbon-based anion-exchange membranes by various organic-fouling substances [J]. *Desalination*, 2012, 296: 81-86.
- [15] 程巍. 膜脱盐过程中离子迁移规律及膜改性抗污染研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- CHENG Wei. Mass transport of ions in membrane desalination process and membrane modification to improve antifouling properties [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [作者简介] 张傲(1987—), 本科, E-mail: 46495754@qq.com。通讯作者: 任宏洋, 博士, 教授, E-mail: renhongyang@swpu.edu.cn。
- [收稿日期] 2022-07-12(修改稿)