

文章编号:1000-4092(2023)03-534-09

# 碳中和愿景下页岩气压裂返排液处理技术思考\*

董沅武<sup>1,2</sup>, 荣家洛<sup>1</sup>, 李晓煜<sup>1</sup>, 唐善法<sup>1,2</sup>

(1. 长江大学石油工程学院, 湖北 武汉 430100; 2. 油气钻采工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430100)

**摘要:**随着中国碳中和目标的推进,石油领域作为碳排放大户,面临着较大的碳减排压力。以页岩气压裂返排液低碳处理为目标,分析了页岩气压裂返排液水质特点及潜在影响,介绍了现有处理技术及原理,指出页岩气压裂返排液处理应从减少污染物排放总量、能源回收与利用、节能降耗3个方面着手,应大力发展和推广少水或无水压裂技术、清洁压裂液工艺技术、新型微生物处理技术、压裂返排液节能处理技术、新能源替代技术、智能设备节能技术在油气田开发过程中的应用,以确保页岩气的合理开发与可持续发展。

**关键词:**碳中和;碳排放;页岩气;压裂返排液;节能降耗;综述

**文献标识码:**A DOI:10.19346/j.cnki.1000-4092.2023.03.023

**中图分类号:**TE992

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 前言

非常规油气藏在全球资源开发中占有重要的地位<sup>[1-6]</sup>。鉴于当前全球能源市场的紧张政治局势,为确保国家能源安全,国内外大部分石油企业加大了对非常规油气藏的开采力度,其中页岩气作为清洁能源在缓解能源危机方面展现出了巨大的潜力<sup>[7-8]</sup>。页岩气主要赋存于富有机质页岩储层中,因其独特的生-储-盖三位一体和低孔低渗物性特征<sup>[9-10]</sup>,需进行大规模体积压裂改造,才能获得工业气流。采用水力压裂开采页岩气使天然气产量有了突飞猛进的增长<sup>[11-13]</sup>,但同时也带来了压裂返排液处理问题<sup>[14-17]</sup>。如何低碳、高效、经济地处理页岩气压裂返排液已经成为了当下页岩气开发的重点。

目前,页岩气返排液处置方式主要有深井回注、处理后回用及处理达标后外排3种<sup>[18]</sup>。考虑到深井回注受基础设施和地理位置限制,且存在诱发

地震的潜在风险<sup>[19-21]</sup>,同时从节约水资源和降低成本方面出发,业界更倾向于处理后回用或处理达标后外排。针对页岩气压裂返排液中存在大量可回收利用的潜在能源,有序开展页岩气压裂返排液处理工作对提升压裂返排液处理效率、质量和经济效益有着重要意义。本文分析了页岩气压裂返排液水质特点及潜在影响,并对现有处理技术及原理进行了简要综述;同时基于碳中和目标,提出几种能显著降低页岩气压裂返排液处理中能耗和物耗的技术,以期压裂返排液处理工艺资源化、能源化、低碳化发展提供一定的参考和借鉴。

## 1 页岩气压裂返排液水质特点及潜在影响

### 1.1 页岩气压裂返排液水质特点

在配制压裂液时,为满足压裂作业施工过程中携砂、造缝、配伍、返排等要求,往往加入多种化学

\* 收稿日期:2022-09-07;修回日期:2023-02-02。

**基金项目:**国家自然科学基金“阴离子双子表面活性剂粘弹流体提高非常规油藏采收率基础研究”(项目编号51774049)、“阴离子双子表面活性剂-纳米粒子构筑耐高温清洁压裂液基础研究”(项目编号51474035)。

**作者简介:**董沅武(1997—),男,长江大学油气田应用化学专业博士研究生(2021—),研究方向为油田化学,E-mail:2823244938@qq.com。唐善法(1965—),男,教授,博士生导师,本文通讯联系人,研究方向为油田化学,通讯地址:430100 湖北省武汉市长江大学石油工程学院,E-mail:Tangsf2005@126.com。

添加剂,如稠化剂、交联剂、减阻剂、破胶剂、缓释剂、配伍性添加剂等<sup>[22-26]</sup>,待作业结束后,通常会有30%~60%的压裂液随着地层水及少量地层脱落的岩屑返排回地面形成压裂返排液<sup>[27]</sup>。由于其与储层充分接触,往往会溶解储层中大量的无机盐、金属离子及其他放射性物质<sup>[28-29]</sup>。页岩气开发井的主力压裂液体系为滑溜水体系,其添加剂含量通常小于1%,有机物含量虽相对于其他措施传统压裂液有所减少,但由于页岩气开发井压裂多采用水平井多级分段、高排量和超大液量的压裂技术模式,开采耗水量和返排液量远高于传统水力压裂井。以中国四川盆地为例,页岩气单井开采耗水量就达到了 $1.0 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ <sup>[30-32]</sup>。因压裂液配方、工艺及储层差异等,不同地区的页岩气压裂返排液水质会有显著差异,但均呈现出高化学需氧量(COD)、高悬浮颗粒物(TSS)、高矿化度(TDS)、组分复杂及水质变化范围宽等特点<sup>[33-34]</sup>。

## 1.2 潜在影响

未经处理的页岩气压裂返排液具有较大的水生生态毒性,直接回用或外排会造成很大的环境污染风险<sup>[35-37]</sup>,并且水质对其回用效果也存在相当大的影响。

### 1.2.1 有机物

压裂返排液中含有有机物。一方面,一些高分子聚合物(如聚丙烯酰胺)易与水中的各种离子发生反应,生成难溶的胶状物质,并对水中的悬浮颗粒物及分散油表现出很强的吸附性<sup>[38]</sup>,直接回注回用会造成孔隙堵塞,导致地层物性变差;另一方面,有机物质给细菌繁殖提供了温床,容易造成细菌滋生,常见的有硫酸盐还原菌(SRB)、腐生菌(TGB)、铁细菌(FB)等<sup>[39]</sup>。

### 1.2.2 悬浮颗粒物

在返排液回用时,悬浮物会随压裂液进入压裂形成的导流通道中,产生微粒运移堵塞,严重影响页岩气储层的导流能力<sup>[39]</sup>,使压裂作业施工效果大打折扣。此外,悬浮颗粒物与高分子降阻剂之间存在较强的吸附性,易形成絮状物质,不仅降低高分子降阻剂的有效浓度<sup>[40]</sup>,而且增加页岩气储层的堵塞伤害,导致储层物性变差。

### 1.2.3 可溶性盐

在返排液回用时,可溶性盐在处理或输送过程中容易结垢、堵塞,导致储层物性变差; $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、

$\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{B}^{3+}$ 等高价离子对压裂液基液的性能有很大的影响,会缩短冻胶的交联时间,增加基液黏度。其中, $\text{B}^{3+}$ 是制约返排液回用的关键因素,因其在碱性环境下主要以 $\text{B}(\text{OH})_4^-$ 的形式存在,重配压裂液时,由于pH发生变化,在尚未加入新的交联剂前即提前交联。同时,高价金属离子易导致聚合物的成胶性能显著下降,如耐温性能变差、降阻性能减弱等<sup>[41-42]</sup>。另外,高盐水排入生态环境后,存在土壤盐渍化和下渗污染地下水的隐患<sup>[43]</sup>。

综上所述,页岩气压裂返排液具备量大、组分复杂、污染物浓度高、水质特征区别大等特点,因而在探索返排液处理技术时,需具有一定的针对性。

## 2 页岩气压裂返排液处理技术研究现状

根据回用或达标排放水质指标要求,页岩气压裂返排液处理技术可以分为物理、化学、生物处理技术。

### 2.1 物理处理技术

对于组分复杂的页岩气压裂返排液而言,简单的沉降、溶解气浮、过滤、固化等物理处理技术主要对返排液起到固液分离的预处理作用,操作简单、处理成本低,但处理效果不能达到回用或外排的要求。吸附法可以针对返排液中特定的污染物进行深度处理,使其指标能达到回用或外排的要求。膜分离和蒸馏技术是页岩气压裂返排液脱盐处理首选的物理处理技术。

何焕杰等<sup>[44]</sup>研究页岩气压裂返排液回用技术时发现,通过复合混凝-精密过滤工艺净化处理后,硼离子质量浓度处于3.85~5.23 mg/L,未能达到回用水质指标( $\leq 1 \text{ mg/L}$ ),需再进行一道吸附工艺来降低硼离子质量浓度。经硼选择性离子交换树脂处理后,硼离子质量浓度处于0.22~0.42 mg/L,处理后水质满足中国石化企业标准Q/SH 0444—2011《非常规油气井压裂液配制和返排液回收处理推荐作法》的要求。长宁区块页岩气压裂返排液的TDS为 $3.4 \times 10^4 \sim 4.1 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 、COD为102~227 mg/L。熊颖等<sup>[45]</sup>采用水质软化、絮凝沉降及多级过滤进行预处理,然后再进行超滤和两级反渗透膜脱盐处理,返排液处理后的水质指标满足国家标准GB 8978—1996《污水综合排放标准》的一级指标。机械蒸汽再压缩技术(MVR)与膜蒸馏技术是蒸馏技术应用于页岩气压裂返排液处理的典型代表。在

美国 Barnett 地区,采用 MVR 处理 TDS 最高含量为  $5 \times 10^4$  mg/L 的页岩气压裂返排液,处理后约有 72.5% 的蒸馏水可以重复利用<sup>[46]</sup>。膜蒸馏技术将膜技术和蒸馏技术相结合,相比于单一处理技术具有更好的环境适应性<sup>[47-49]</sup>,可以在更低的温度(30~90 °C)、压力下运行<sup>[50]</sup>,处理更宽范围 TDS( $3 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^4$  mg/L)的返排液<sup>[25,51]</sup>。

总体而言,吸附、膜分离和蒸馏技术处理效率高,但使用成本相对较高。利用再生吸附剂进行吸附处理时存在吸附剂损失及循环反应过程中吸附性能下降等问题;膜分离处理过程中,因半透膜对温度和矿化度具有一定的耐受性,使用范围受限,当膜面受到污染时会导致膜性能的下降;蒸馏处理过程中存在热结垢等问题。

## 2.2 化学处理技术

在页岩气压裂返排液处理中,化学处理技术是应用最为广泛也是最有效的预处理工艺。通过向返排液中投加混凝剂等化学添加剂,利用混凝或氧化降解等原理有效去除返排液中的悬浮颗粒物、COD、高价离子等,主要方法为混凝法、电絮凝法、微电解法、化学氧化法(初级氧化法、高级氧化法)等。

王兵等<sup>[52]</sup>选用聚合氯化铝对长宁区块页岩气压裂返排液(COD 为 580 mg/L、浊度为 22.8 NTU)进行混凝处理,投加量为 2 g/L 时,COD 和浊度去除率分别可达到 33.0%、63.6%,可有效减少有机负荷,降低返排液后续处理难度。孟宣宇等<sup>[53]</sup>以重庆涪陵区块页岩气返排液(COD 为 650 mg/L、浊度为 40~50 NTU)为研究对象,比较了电絮凝和化学絮凝技术的处理效果。结果表明,电絮凝在 COD 和浊度方面的去除效果均优于化学絮凝,在适当 pH 值下的 COD 去除率可达 82.0% 以上。Sari 等<sup>[54]</sup>分析了电絮凝在返排液除硼中的机理,认为电絮凝法可作为实现压裂返排液达标排放处理组合工艺的一个重要处理单元。周佰刚等<sup>[55]</sup>对 COD 含量为 9960 mg/L 的返排液实施铁碳微电解法处理,在最佳工艺条件下的 COD 平均去除率可达 58.5%。Tang 等<sup>[56]</sup>评估了臭氧和高铁酸盐(Fe VI)在页岩气压裂返排液中的预处理能力,COD 去除率可达 9.2%~11.8%,分析认为预氧化可以改变有机质的特性,与其他氧化剂( $H_2O_2$ )或电氧化结合可以进一步提高氧

化效率。

化学处理技术能显著改善返排液水质,提高其可生化性,但在处理过程中也暴露出一些问题。混凝法处理过程中,需通过重力沉降或其他固液分离措施进行污染物分离,设备结构较为复杂;电絮凝法处理过程中,溶解性阳极材料消耗极大,成本高;传统微电解法反应过程中容易形成隔离层使反应不能继续进行,适用范围偏窄,且成本高;初级氧化法存在设备腐蚀和盐沉积,而高级氧化法对设备和处理条件要求高。

## 2.3 生物处理技术

基于高含盐量的页岩气压裂返排液不仅具备较大的水生生态毒性,而且可生化性较差,不能直接使用生物处理法对其净化处理,通常需要通过物理化学预处理提高水质可生化性后,生物处理法才能发挥效果,起到对水质的净化作用。

刘军等<sup>[57]</sup>以天津大港油田港深 11-8 井压裂返排液为研究对象,先用混凝-微电解-吸附工艺进行预处理,再用生物法进行深度处理,可以达到国家标准 GB 8978—1996 中的一级指标。Yang 等<sup>[58]</sup>采用絮凝-Fenton 氧化-序批式活性污泥反应器(SBR)联合处理工艺对压裂返排液进行净化处理,COD 去除率可达 97.1%,出水 COD 降至 92 mg/L,其中 SBR 处理可将 COD 从 730 mg/L 降至 92 mg/L。生物处理法去除 COD 是较为有效的方法,但现阶段该处理工艺不成熟,菌种培育周期长,且由于菌种的高度选择性和不稳定性,适用范围窄。

综上所述,因页岩气压裂返排液的水质复杂,单一方法对返排液水质处理的作用有限,仅能去除返排液中的部分污染物质,需要集成多个技术单元的工艺处理,才能达到回用或外排水质标准。目前,常用的压裂返排液组合处理工艺有:(1)氧化-絮凝-过滤/吸附;(2)氧化-絮凝-电解-过滤/吸附;(3)氧化-絮凝-电解-过滤/吸附-生化等<sup>[59]</sup>。结合压裂返排液处理技术研究来看,当下处理模式多为“以能消能”,具有不可持续的特征,并且压裂返排液处理时将直接或间接产生大量的  $CO_2$ ,如处理过程中有机物降解、各种化学添加剂的生产、处理设备运行中消耗的电力或热能等,这显然与碳中和目标相违背。因此,在碳中和的大背景下,一方面要尽可能对页岩气压裂返排液进行高效、低能耗、低碳排量

的处理,另一方面要降低页岩气压裂返排液的产出量或处理难度。

### 3 碳中和趋势下的几种压裂液及返排液处理技术

为促进碳中和目标的实现,从减少污染物排放总量、能源回收与利用、节能降耗等方面出发,形成了多种处理技术,主要包括少水或无水压裂技术、清洁压裂液工艺技术、新型微生物处理技术、压裂返排液节能处理技术等。

#### 3.1 少水或无水压裂技术

少水或无水压裂技术相较常规水力压裂来说,无需无害化处理便可循环利用,可大幅减少对水资源的需求,不仅可以缓解供水压力<sup>[60]</sup>,还能减轻大量压裂返排液所带来的环境污染治理问题。目前,少水或无水压裂技术主要包括泡沫压裂技术<sup>[61]</sup>、液态/超临界态CO<sub>2</sub>压裂技术<sup>[31]</sup>、液氮压裂<sup>[63]</sup>、液化石油气(LPG)压裂技术<sup>[64]</sup>等。其中,液态/超临界CO<sub>2</sub>压裂技术在实现储层改造的同时,还能对CO<sub>2</sub>进行永久埋存,表现出良好的社会经济效应<sup>[65]</sup>,被认为是一种极具应用前景的压裂技术。

但是,超临界CO<sub>2</sub>压裂技术仍存在黏度低、支撑剂承载能力差、建设初期及CO<sub>2</sub>运输成本高等缺点,因此,需要进一步研发高效、低成本、环保型的CO<sub>2</sub>增黏剂及超低密度的支撑剂用以改善超临界CO<sub>2</sub>对支撑剂的承载能力,同时推进地面和井下设备升级,加快形成成熟的CO<sub>2</sub>供应体系以降低生产成本。

#### 3.2 清洁压裂液工艺技术

相较常规聚合物压裂液体系,清洁压裂液体系组分多为低污染或无污染的化学添加剂,具备降解性好、毒性低、处理工艺简单及重复配液性能好等特点,可大幅减轻压裂返排液所带来的环境污染治理问题,并且能不同程度的降低压裂施工成本<sup>[66-67]</sup>。

葛海江等<sup>[68]</sup>研制出一种能实现“直接混配,连续施工”的新型可回收清洁压裂液体系。现场应用结果表明,该压裂液体系能实现“提速增效,降本增效”的作业目标。王改红等<sup>[69]</sup>在长庆油田某区域水平井压裂施工过程中,采用蔗糖经微生物培育、发酵而制备得到的微生物多糖稠化剂、天然酶和分子改造酶混合形成的破胶剂制得一种可回收清洁压裂液体系。压裂返排液仅需经过分离沉砂等简单

工序即可复配,多达10次的现场回用后,其性能仍满足现场多级压裂施工的要求。

清洁压裂液工艺技术通过大幅减少压裂施工过程中产生污染物的排放总量,降低处理剂和水的用量,从而达到碳排放总量下降的目的。但现有常规清洁压裂液耐温性能差、成本高,在一定程度上限制了其在压裂施工中的应用。因此,需要着手研发低成本、耐温性能强、适用范围广的清洁压裂液体系,以期减轻压裂返排液处理的环保压力。

#### 3.3 新型微生物处理技术

微生物技术在污水治理领域呈现出多元化特征。微生物在处理压裂返排液的过程中,多利用微生物自身的新陈代谢及吸附能力对返排液中的污染物进行去除,尚未充分结合微生物的多样性特征及污染物资源化利用。目前,新型微生物技术主要包括生物燃料电池技术<sup>[70]</sup>、生物柴油生产技术<sup>[59,71-72]</sup>、生物增效技术<sup>[73]</sup>和生物膜技术<sup>[74]</sup>等。

##### 3.3.1 生物燃料电池技术

生物燃料电池技术是一种对页岩气压裂返排液中的废弃资源进行回收利用的技术,在有效去除有机物、重金属及硫酸盐等污染物的同时,还能将有机物中的化学能转化为电能。Monzon<sup>[75]</sup>以Barnett地区的页岩气压裂返排液[COD为(10 520±1340) mg/L]作为细菌和营养物质的唯一来源,使用微生物燃料电池(MFC)后可以产生电能,以此筛选出能耐受极端盐碱条件的海杆菌属产电菌。Shrestha等<sup>[76]</sup>以经去离子水稀释的Bakken页岩气压裂返排液(COD为10 g/L)为研究对象,比较了微生物燃料电池(MFC)和微生物电容去离子电池(MCDC)的处理效果。MFC和MCDC对COD的去除率分别为88%和76%,MCDC对TDS的去除率优于MFC。Zhang等<sup>[77]</sup>采用以硫循环为介导的微生物燃料电池处理页岩气压裂返排液[Fe<sup>3+</sup>含量为(27.2±4.2) mg/L]。该方法能有效去除返排液中的COD和总铁,去除效率分别达到72%±6%和90.6%±7%,产电量为(2636±476) mW/m<sup>2</sup>。Mohanakrishna等<sup>[78]</sup>评估了单室和双室微生物电池在采出水中的处理效果。两者均能有效去除废水中的COD和硫酸盐,并可回收电能;双室可实现更高的污染物去除率及产电量,其中COD和硫酸盐的去除率分别为60.2%、93.9%,产电量为1089 mW/m<sup>2</sup>。

### 3.3.2 生物柴油生产技术

生物柴油生产技术主要是利用微生物对压裂返排液的净化处理与生物柴油生产耦合,从而实现页岩气压裂返排液的资源化处理。Racharaks等<sup>[79]</sup>利用页岩气返排液中的污染物作为营养物质成功培育出了杜氏盐藻,表明微藻利用压裂返排液生产生物柴油具备可行性。Hopkins等<sup>[80]</sup>研究了矿化度和氮源含量对返排液培养基中微藻的生长和产脂性能的影响。在TDS为60 g/L时,低的氮源含量可以得到更高的产酯性能,在生物柴油生产过程中可以通过维持一个低的氮源含量从而最大限度地提高产酯率。Li等<sup>[81]</sup>用小球藻与芽孢杆菌共生体系处理模拟压裂废水。研究发现,芽孢杆菌可以促进小球藻的生长和有机污染物的降解,对废水中COD的去除率可达40%~45%。

### 3.3.3 生物增效技术

生物增效技术是指在传统生物处理所用的土著菌群内引入新的功能菌,通过增加有效浓度、调控运行条件来增强或维持污染物的降解效率,从而提高对污染物的去除率。目前,已有生物增效技术用于处理石化废水、纺织废水、焦化废水和市政废水等的相关报道<sup>[82]</sup>。生物强化技术能改善微生物群落结构,提高对有机物和总氮的去除效率,还能提高废水脱色效果等,在页岩气压裂返排液处理中具有很高的潜在效应。王为为<sup>[83]</sup>以某石油化工企业污水(COD为600 mg/L)为研究对象,比较了在石油化工污水处理系统中应用生物增效技术前后污水的处理效果。应用生物增效技术可增强原有生化系统对污染物的处理能力,在很大程度上改善污水处理效果,可将原系统处理的COD(205 mg/L)降至124 mg/L。Zhou等<sup>[84]</sup>从压裂返排液中分离提取了一种可生产生物表面活性剂的菌株Y2(不动菌属),引入原有生化处理系统中可增强COD和石油烃去除率。此外,Zeng等<sup>[85]</sup>从油泥污染物中分离提取了一种能耐受极端盐碱条件,并能生产生物絮凝剂和生物表面活性剂的菌株SS15(芽孢杆菌属),通过生物降解和絮凝作用能有效降低压裂返排液中的TDS和COD。

### 3.3.4 生物膜技术

生物膜技术属于一项组合技术,兼具传统生物处理法和膜分离法的优点,不仅可以借助微生物对

各类污染物进行降解,还能省去泥水分离系统,具备更高的处理效率和分离效果。同时,生物膜技术可以更好的与其他处理工艺相结合,有利于处理装置撬装化、一体化、模块化。冯栩等<sup>[86]</sup>采用序批式活性污泥反应器(SBR)和生物膜反应器(SBBR)处理页岩气压裂返排液。结果表明,SBBR能有效去除返排液中的COD、高价金属离子及油类,处理后返排液中的COD由654 mg/L降至47.9 mg/L、 $\text{Fe}^{3+}$ 由11.8 mg/L降至0.02 mg/L、油类由39.6 mg/L降至0.16 mg/L。Liu等<sup>[87]</sup>将移动床生物膜反应器(MBBR)和浸没式膜生物反应器(SMBR)相结合,用于处理臭氧预氧化后的页岩气压裂返排液。与传统的SMBR相比,MBBR-SMBR中的功能细菌含量更多,对有机物的去除率更高。菌种的高度选择性和不稳定性决定了其应用范围有限,需要进一步筛选和驯化功能菌种,增加页岩气压裂返排液生物处理的适用范围。

### 3.4 压裂返排液节能处理技术

基于单一的声、光、电、磁原理开发的压裂返排液处理技术通常具备高效节能的特性,利用其协同作用可进一步提高处理效率,降低能耗,实现1+1 $\geq$ 2的效果<sup>[88-90]</sup>。

肖波<sup>[34]</sup>利用电催化氧化复合磁分离技术处理页岩气压裂返排液,处理后返排液水质的主要指标(COD、悬浮物浓度、色度、含油等)均能达到国家标准GB 8978—1996一级排放要求,其中对COD、悬浮物、油类的去除效率均达到了92.5%以上。Zielińska等<sup>[90]</sup>利用磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ 纳米复合光催化剂处理页岩气压裂返排液。 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ 纳米复合光催化剂同时具备较高的光催化活性和磁分离特性,随着光催化时间的增加,返排液中COD的去除效率越好;当光照时长达到8 h,返排液中的COD被完全去除,在循环回用4次后,光催化效果并未显著降低,仍能达到第1次的80%以上。李肖琳等<sup>[91]</sup>采用光电催化氧化工艺对经超滤膜预处理后的含聚采油废水生化出水进行深度处理。随着光催化时间的延长、电流密度的增大,出水水质变好,在pH值为6.0~8.5、电流密度为10 mA/cm<sup>2</sup>、光催化时间为50 min的处理条件下,出水的COD和油类浓度均能达到辽宁省地方标准DB 21/1627—2008《辽宁省污水综合排放标准》的排放要求。李桂英等<sup>[92]</sup>发现光电

催化降解高含氯采油废水时能产生氯类活性物质,对废水间接氧化,从而进一步提升处理效率。超声波作为一种高级氧化处理工艺,一般无法满足废水污染物降解的全部能量需求,通常需要与其他处理工艺结合使用。研究较多的有超声波辅助电化学技术,该法具备易操作、反应速度快、适用范围广等优点,在废水处理领域表现出较好的应用前景<sup>[93]</sup>。

与其他返排液处理技术相比,压裂返排液节能处理技术存在处理量小、初期投入成本高等问题,需要进一步优化工艺参数、改进反应器结构、加强磁性复合材料性能,以期进一步提高返排液处理效率,降低成本。

## 4 页岩气压裂返排液处理碳中和技术策略展望

### 4.1 持续推进返排液处理技术节能降耗

持续推进页岩气压裂返排液处理技术节能降耗是实现返排液处理低碳运行的关键,只要能降低对能源的消耗,就是对碳中和目标的积极响应。返排液处理技术节能降耗在减少污染物排放总量的前提下,还可以从以下3个方面着手:新能源替代、智能设备节能、处理工艺集成优化。(1)新能源替代。通过绿色能源替代,因地制宜,利用风能、太阳能、地热能、水能等可再生资源进行清洁发电,应用于页岩气压裂返排液的处理,实现返排液处理低碳运行。(2)智能设备节能。采用高效节能设备,结合水质水量在线监测,通过精细化智能控制系统对回流、药剂投加等进行精准控制,提高工作效率,从而达到节能降耗的目的,实现返排液处理低碳运行。(3)处理工艺集成优化。加大技术研发,大力推广声、光、电、磁能利用相关技术联合使用。如:超声强化臭氧氧化技术、光电催化氧化技术、光磁耦合技术、光催化产电协同技术、电磁协同处理技术等。还需促进页岩气压裂返排液处理装置模块化和标准化,在提升处理效率的同时,增加能源利用率。

### 4.2 加速革新返排液资源化能源化技术

页岩气压裂返排液中含有大量的废弃资源,可以通过相关处理技术使其资源与能源得到回收,抵消碳排,处理方式应以“达标排放”向“能源和资源回收”革新转变。除返排液回用处理技术外,还可

以从返排液中回收可再生清洁能源(如电能、生物柴油等)。由于当下技术水平和生产成本的限制,页岩气压裂返排液产业化微生物燃料电池技术和微藻固碳技术仍处于发展阶段,为加快其资源化和能源化利用,需要对现有技术进行革新。一方面,需要进一步筛选和驯化环境耐受性强的功能菌种,或通过基因工程技术对菌种进行改良;另一方面,通过更深入地了解微生物代谢机制,提高其资源化利用率。

### 4.3 着力发展节水压裂液技术

水力压裂开采页岩气耗水量大,这与我国页岩储量较丰富的地区多为水资源匮乏地区相矛盾,因此亟需开展节水压裂液技术的研究。考虑到不同地区地质条件不同,需研究页岩-压裂液之间的作用机制,针对性的开展适配压裂液体系和压裂返排液处理筛选研究,同时需要研发新型压裂液体系以更好地适应气藏开发,并对施工工艺进行精细优化。基于超临界CO<sub>2</sub>压裂技术即可实现页岩气的高效开发,又能实现节能减排,达到“封存与利用相融、减排与效应双赢”的目的。建议积极开展超临界CO<sub>2</sub>压裂、置换、封存等方面的理论研究,着力解决超临界CO<sub>2</sub>黏度低、支撑剂承载能力差等技术性挑战问题,为该技术的产业化发展铺平道路。

### 4.4 大力开发压裂-采气一体化工作液

压裂-采气一体化工作液兼具压裂、采气双重功效,并能显著降低环境污染风险,实现“提速增效,降本增效”的作业目标,对页岩气的高效开采意义重大。目前,增效性清洁压裂液是最具潜力的压裂-采气一体化工作液。考虑到增效性清洁压裂液的耐温性能有待提升,且成本高,建议着手研发低成本、耐温性能强、适用范围广的清洁压裂液体系,以期减轻返排液处理的环保压力。此外,纳米技术能有效改善清洁压裂液的耐温性能,可以借鉴纳米颗粒改性清洁压裂液的应用。

## 5 结语

在压裂返排液多次回用后处理成本上升或回用需求降低时,页岩气处理达标外排已成为页岩气开发企业的现实选择。因压裂返排液水质的独特性(高COD、高TSS、高TDS)决定了其处理难度大、能耗高,且当下处理模式多为“以能消能”,具有不

可持续的特征。随着碳中和目标的推进,页岩气压裂返排液处理技术应以“达标排放”向“能源和资源回收”革新转变,秉承节水优先、资源可持续利用及低碳发展理念,不断开创和完善碳中和运行技术,确保页岩气合理开发与可持续发展,促进碳中和目标的实现。

#### 参考文献:

- [1] 刘合,曹刚.新时期采油采气工程科技创新发展的挑战与机遇[J].石油钻采工艺,2022,44(5):529-539.
- [2] 贾承造.论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J].石油勘探与开发,2017,44(1):1-11.
- [3] 邹才能,张国生,杨智,等.非常规油气概念、特征、潜力及技术:兼论非常规油气地质学[J].石油勘探与开发,2013,40(4):385-399.
- [4] 赵金洲,任岚,蒋廷学,等.中国页岩气压裂十年:回顾与展望[J].天然气工业,2021,41(8):121-142.
- [5] 姚兰,李还向,焦炜,等.压裂返排液重复利用技术现状及展望[J].油田化学,2022,39(3):548-553.
- [6] 李刚,王宁,张凯逊,等.西巴伦支海盆地含油气系统分析与资源评价[J].地质力学学报,2023,29(2):174-187.
- [7] BELLANI J, VERMA H K, KHATRI D, et al. Shale gas: A step toward sustainable energy future [J]. J Pet Explor Prod Technol, 2021, 11(5): 2127-2141.
- [8] ESTRADA J M, BHAMIDIMARRI R. A review of the issues and treatment options for wastewater from shale gas extraction by hydraulic fracturing [J]. Fuel, 2016, 182(10): 292-303.
- [9] 姚健欢,侯冬冬,景建明,等.储层参数对页岩气水平井产能的影响[J].非常规油气,2015,2(1):50-53.
- [10] 陈桂华,祝彦贺,徐强.页岩气成藏的四性特征及对下扬子地区页岩气勘探的启示[J].中国石油勘探,2012,17(5):63-70.
- [11] ZHANG L, HASCAKIR B. A review of issues, characteristics, and management for wastewater due to hydraulic fracturing in the US [J]. J Pet Sci Eng, 2021, 202(7): 108536.
- [12] MIDDLETON R S, CAREY J W, CURRIER R P, et al. Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO<sub>2</sub> [J]. Appl Energy, 2015, 147(11): 500-509.
- [13] 唐颖,唐玄,王广源,等.页岩气开发水力压裂技术综述[J].地质通报,2011,30(Z1):393-399.
- [14] 江丽,刘春艳,王红娟,等.国内外页岩气开发环境管理现状及对比[J].天然气工业,2021,41(12):146-155.
- [15] 申金伟,袁文奎,赵健,等.用返排液作基液的压裂液配方研究[J].钻井液与完井液,2022,39(2):241-247.
- [16] 夏军,吴霞.页岩气开发的水资源与绿色发展面临的机遇与挑战[J].地球科学与环境学报,2021,43(2):205-214.
- [17] 张东晓,杨婷云.美国页岩气水力压裂开发对环境的影响[J].石油勘探与开发,2015,42(6):801-807.
- [18] 李静,陈天欣,周微,等.页岩气压裂返排液外排处理技术研究现状及展望[J].工业水处理,2022,42(5):34-40.
- [19] GREGORY K B, VIDIC R D, DZOMBAK D A. Water management challenges associated with the production of shale gas by hydraulic fracturing [J]. Elements, 2011, 7(3): 181-186.
- [20] LUTZ B D, LEWIS A N, DOYLE M W. Generation, transport, and disposal of wastewater associated with Marcellus Shale gas development [J]. Water Resour Res, 2013, 49(2): 647-656.
- [21] ELLSWORTH W L. Injection-induced earthquakes [J]. Science, 2013, 341(6142): 1225942.
- [22] 范劲,李俊材,邵平.威远地区页岩气压裂返排液配制钻井液技术研究[J].钻采工艺,2021,44(2):94-97.
- [23] 刘子源.一种压裂返排液模块化处理方法[D].成都:西南石油大学,2017:1-2.
- [24] 林雯杰.页岩气开发水力压裂返排液外排处理技术研究[D].北京:中国石油大学(北京),2016:1-2.
- [25] 黄靓,李慧强,杨平.页岩气压裂返排液的组成及处理技术[J].环境科学与技术,2016,39(S2):166-171.
- [26] 陈学忠,鲁友常,吴易一,等.中美页岩气开采压裂返排液处置政策分析及启示[J].西南石油大学学报(自然科学版),2021,43(5):212-219.
- [27] 石升委.页岩气压裂返排液再利用处理技术研究[D].西安:西安石油大学,2019:1-2.
- [28] HORNER P, HALLDORSON B, SLUTZ J. Shale gas water treatment value chain—a review of technologies, including case studies [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro, 2011.
- [29] O'DONNELL M C, GILFILLAN S M V, EDLMANN K, et al. Wastewater from hydraulic fracturing in the UK: Assessing the viability and cost of management [J]. Environ Sci: Water Res Technol, 2018, 4(2): 325-335.
- [30] 钟显康,李浩男,扈俊颖.页岩气开采与集输过程中腐蚀问题与现状分析[J].西南石油大学学报(自然科学版),2022,44(6):162-174.
- [31] 孟宣宇.页岩气开发压裂返排液水质特征及其处理技术研究[D].北京:中国石油大学(北京),2017:1-4.
- [32] 何敏,王丹,张思兰,等.浅谈页岩气开发对水环境的影响[J].油气田环境保护,2016,26(2):33-37.
- [33] 范红良.国外页岩气压裂返排液处理新技术综述[J].资源节约与环保,2016,22(4):16.
- [34] 肖波.电催化氧化复合磁分离处理页岩气压裂返排液室内研究[J].石油与天然气化工,2017,46(4):109-114.
- [35] 贺美,陈文杰,田磊,等.页岩气压裂返排液的水生生态毒性效应研究[J].生态毒理学报,2017,12(2):108-119.
- [36] 熊颖,周厚安,熊钢.基于臭氧与超声氧化降低页岩气压裂

- 返排液COD[J]. 化工进展, 2022, 41(4): 1834-1839.
- [37] FOLKERTS E J, GOSS G G, BLEWETT T A. Investigating the potential toxicity of hydraulic fracturing flowback and produced water spills to aquatic animals in freshwater environments: A North American perspective [J]. *Rev Environ Contam Toxicol*, 2020, 254: 1-56.
- [38] 赵小青. 超声波与生物法协同处理含聚石油污水的试验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2011: 2-3.
- [39] 屈海清. 页岩气压裂返排液回用处理技术研究与应用[J]. 云南化工, 2019, 46(4): 154-155.
- [40] 熊颖, 刘雨舟, 刘友权, 等. 长宁-威远地区页岩气压裂返排液处理技术与应用[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(5): 51-55.
- [41] 杜燕, 张淑侠, 杨志刚, 等. 非常规油气藏压裂返排液回用除砷室内研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(3): 105-109.
- [42] 吴俊奇, 吴文熙, 颜懿柔, 等. 压裂返排液处理现状及难点研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(8): 12-16.
- [43] 邹鹏, 王林, 张建华, 等. 高价金属离子对压裂返排液循环利用的影响及其室内处理研究[J]. 石油化工应用, 2016, 35(6): 135-138.
- [44] 何焕杰, 位华, 郑泽旭, 等. 页岩气压裂返排液重复利用技术[J]. 工业水处理, 2017, 37(2): 91-94.
- [45] 熊颖, 宋彬, 唐永帆, 等. 基于多级反渗透的页岩气压裂返排液处理技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7814-7819.
- [46] HAYES T D, HALLDORSON B, HORNER P H, et al. Mechanical vapor recompression for the treatment of shale-gas flowback water [J]. *Oil Gas Facil*, 2014, 3(4): 54-62.
- [47] ZHANG Z, DU X, 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(6): 82-90.
- [48] ROBBINS C A, GRAUBERGER B M, GARLAND S D, et al. On-site treatment capacity of membrane distillation powered by waste heat or natural gas for unconventional oil and gas wastewater in the Denver-Julesburg Basin [J]. *Environ Int*, 2020, 145(6): 106142.
- [49] TAVAKKOLI S, LOKARE O R, VIDIC R D, et al. A techno-economic assessment of membrane distillation for treatment of Marcellus shale produced water [J]. *Desalination*, 2017, 416(16): 24-34.
- [50] CAMACHO L M, DUMÉE L, ZHANG J, et al. Advances in membrane distillation for water desalination and purification applications [J]. *Water*, 2013, 5(1): 94-196.
- [51] MINIER-MATAR J, HUSSAIN A, JANSON A, et al. Treatment of produced water from unconventional resources by membrane distillation [C]//International Petroleum Technology Conference. OnePetro, 2014.
- [52] 王兵, 王佩洁, 祝伟, 等. 混凝-吸附联用预处理页岩气压裂返排液[J]. 环境工程学报, 2019, 13(10): 2475-2481.
- [53] 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.
- [54] SARI M A, CHELLAM S. Mechanisms of boron removal from hydraulic fracturing wastewater by aluminum electrocoagulation [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2015, 458(21): 103-111.
- [55] 周佰刚, 吴双, 栾家翠, 等. 铁碳微电解-超声Fenton协同处理压裂返排液技术研究[J]. 油气田地面工程, 2022, 41(5): 40-45.
- [56] TANG P, XIE W, TIRAFERRI A, et al. Organics removal from shale gas wastewater by pre-oxidation combined with biologically active filtration [J]. *Water Res*, 2021, 196: 117041.
- [57] 刘军, 赵立志, 李健, 等. 生物法处理压裂返排液实验研究[J]. 石油与天然气化工, 2002, 31(5): 281-282.
- [58] YANG J, HONG L, LIU Y H, et al. Treatment of oilfield fracturing wastewater by a sequential combination of flocculation, Fenton oxidation and SBR process [J]. *Environ Technol*, 2014, 35(22): 2878-2884.
- [59] 贺美, 邵波, 刘勇, 等. 页岩气压裂返排液及排放废液的研究现状及微藻资源化处理应用前景综述[J]. 生态科学, 2018, 37(5): 195-202.
- [60] 侯向前, 卢拥军, 张福祥, 等. CO<sub>2</sub>在非常规油气增产领域应用研究进展[J]. 油田化学, 2023, 40(2): 356-362.
- [61] 蒋廷学, 左罗, 黄静. 少水压裂技术及展望[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(5): 1-8.
- [62] 王海柱, 李根生, 郑永, 等. 超临界CO<sub>2</sub>压裂技术现状与展望[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 116-126.
- [63] 蔡承政, 李根生, 黄中伟, 等. 液氮对页岩的致裂效应及在压裂中应用分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 79-85.
- [64] LEBLANC D, MARTEL T, GRAVES D, et al. Application of propane (LPG) based hydraulic fracturing in the McCully Gas Field, New Brunswick, Canada [C]//North American Unconventional Gas Conference and Exhibition. OnePetro, 2011.
- [65] MOJID M R, NEGASH B M, ABDULELAH H, et al. A state-of-art review on waterless gas shale fracturing technologies [J]. *J Pet Sci Eng*, 2021, 196: 108048.
- [66] 左建平, 马广华, 喻翔, 等. 自破胶中低温清洁压裂液制备及性能评价[J]. 油田化学, 2018, 35(1): 36-40.
- [67] 任洪达, 许成军, 孙锡泽, 等. 渗吸采油用非交联缔合型清洁压裂液体系[J]. 油田化学, 2022, 39(2): 246-251.
- [68] 葛海江, 李文彬, 徐洋, 等. 新型可回收清洁压裂液在陇东油区水平井的应用[J]. 钻采工艺, 2014, 37(4): 107-109.
- [69] 王改红, 廖乐军, 郭艳萍. 一种可回收清洁压裂液的研制和应用[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(6): 101-105.

- [70] FENG Q, XU L, LIU C, et al. Treatment of shale gas fracturing wastewater using microbial fuel cells: Mixture of aging landfill leachate and traditional aerobic sludge as catholyte [J]. *J Cleaner Prod*, 2020, 269: 121776.
- [71] KLIGERMAN D C, BOUWER E J. Prospects for biodiesel production from algae-based wastewater treatment in Brazil: A review [J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2015, 52: 1834–1846.
- [72] WANG S, ZHAO S, UZOEJINWA B B, et al. A state-of-the-art review on dual purpose seaweeds utilization for wastewater treatment and crude bio-oil production [J]. *Energy Convers Manage*, 2020, 222: 113253.
- [73] 王亚军, 蔡文娟, 王惠. 生物强化技术及其在污水处理中应用研究评述[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(5): 1062–1070.
- [74] SUN Y, HUANG L, LAI C, et al. Removal of organics from shale gas fracturing flowback fluid using expanded granular sludge bed and moving bed biofilm reactor [J]. *Environ Technol*, 2021, 42(24): 3736–3746.
- [75] MONZON DEL OLMO O. *Microbial Fuel Cells under Extreme Salinity* [D]. Houston: Rice University, 2016: 109–122.
- [76] SHRESTHA N, CHILKOOR G, WILDER J, et al. Comparative performances of microbial capacitive deionization cell and microbial fuel cell fed with produced water from the Bakken shale [J]. *Bioelectrochemistry*, 2018, 121(3): 56–64.
- [77] ZHANG X, ZHANG D, HUANG Y, et al. Simultaneous removal of organic matter and iron from hydraulic fracturing flowback water through sulfur cycling in a microbial fuel cell [J]. *Water Res*, 2018, 147(12): 461–471.
- [78] MOHANAKRISHNA G, AL-RAOUSH R I, ABU-REESH I M, et al. Removal of petroleum hydrocarbons and sulfates from produced water using different bioelectrochemical reactor configurations [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 665 (10) : 820–827.
- [79] RACHARAKS R, GE X, LI Y. Cultivation of marine microalgae using shale gas flowback water and anaerobic digestion effluent as the cultivation medium [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 191 (17): 146–156.
- [80] HOPKINS T C, GRAHAM E J S, SCHWILLING J, et al. Effects of salinity and nitrogen source on growth and lipid production for a wild algal polyculture in produced water media [J]. *Algal Res*, 2019, 38(2): 101406.
- [81] LI R, PAN J, YAN M, et al. Treatment of fracturing wastewater using microalgae-bacteria consortium [J]. *Can J Chem Eng*, 2020, 98(2): 484–490.
- [82] JEMLI M, ZAGHDEN H, REZGI F, et al. Biotreatment of petrochemical wastewater: A case study from northern Tunisia [J]. *Water Environ Res*, 2017, 89(3): 228–237.
- [83] 王为为. 石油化工污水处理中生物增效技术的作用探究[J]. *化工管理*, 2018, 493(22): 98.
- [84] ZHOU H, HUANG X, LIANG Y, et al. Enhanced bioremediation of hydraulic fracturing flowback and produced water using an indigenous biosurfactant-producing bacteria *Acinetobacter* sp. Y2 [J]. *Chem Eng J*, 2020, 397: 125348.
- [85] ZENG F, ZHOU H, LIN X, et al. Enhanced remediation of fracturing flowback fluids by the combined application of a bioflocculant/biosurfactant-producing *Bacillus* sp. SS15 and its metabolites [J]. *Chemosphere*, 2022, 302: 134870.
- [86] 冯栩, 鲍晋, 苟杰, 等. 页岩气压裂返排液的序批式生物膜处理研究[J]. *工业水处理*, 2018, 38(6): 50–53.
- [87] LIU X, TANG P, LIU Y, et al. Efficient removal of organic compounds from shale gas wastewater by coupled ozonation and moving-bed-biofilm submerged membrane bioreactor [J]. *Bioresour Technol*, 2022, 344: 126191.
- [88] COHA M, FARINELLI G, TIRAFERRI A, et al. Advanced oxidation processes in the removal of organic substances from produced water: Potential, configurations, and research needs [J]. *Chem Eng J*, 2021, 414: 128668.
- [89] ABDULGANI I, ESCALONA-DURÁN F, DE ARAÚJO D M, et al. The role of saline-related species in the electrochemical treatment of produced water using Ti/IrO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> anode [J]. *J Electroanal Chem*, 2022, 910: 116163.
- [90] ZIELIŃSKA-JUREK A, BIELAN Z, WYSOCKA I, et al. Magnetic semiconductor photocatalysts for the degradation of recalcitrant chemicals from flow back water [J]. *J Environ Manage*, 2017, 195(12): 157–165.
- [91] 李肖琳, 谢陈鑫, 秦微, 等. 膜分离-光电催化深度处理高盐含聚污水[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(8): 4141–4146.
- [92] 李桂英, 安太成, 陈嘉鑫, 等. 光电催化氧化处理高含氯采油废水的研究[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(1): 30–34.
- [93] HASSANI A, MALHOTRA M, KARIM A V, et al. Recent progress on ultrasound-assisted electrochemical processes: A review on mechanism, reactor strategies, and applications for wastewater treatment [J]. *Environ Res*, 2022, 205(4): 112463.

(下转第570页。to be continued on p.570)

- [66] 季晓红, 张浩, 单锋, 等. 连续管氮气泡沫洗井技术在超深高温碳酸盐岩水平井中的应用[J]. 油气井测试, 2015, 24(5): 45-48.
- [67] 贾虎, 杨欣雨, 李三喜, 等. 双交联型泡沫凝胶的制备及其暂堵压井防漏机理[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(3): 384-390.

### New Progress in Theory and Technology of Foam Fluid for Oil and Gas Fields Development

XU Xingguang<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, ZHANG Xu<sup>2</sup>, ZHANG Xiwen<sup>3</sup>, WANG Chao<sup>3</sup>

(1. School of Earth Resources in China University of Geosciences(Wuhan), Hubei, Wuhan 430074, P R of China; 2. CNODC, Beijing 100034, P R of China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, P R of China)

**Abstract:** As reservoir types and wellbore structures become more diverse and complex, advanced, efficient, and stable EOR techniques and stimulation are critical to achieving cost-effective production of oil and gas resources in complex reservoirs and wells. With its low density, high viscosity, effective protection of oil and gas reservoirs, strong profile control and water plugging ability and perfect oil displacement mechanism, foam has achieved good field application results in drilling and completion, cementing, reservoir protection, reservoir transformation and enhanced oil recovery. Based on the introduction of foam theory, the laboratory studies and field tests of foam fluid in various fields of unconventional oil and gas reservoir development in recent years was summarized, the advantages and disadvantages of enhanced oil recovery and stimulation measures was analyzed, and its future development direction was forecasted.

**Keywords:** foam fluid; foam drilling fluid; foam acid; fracturing; profile control and displacement; review

(上接第542页。continued from p. 542)

### Thinking on Shale Gas Fracturing Flowback Fluid Treatment Technology under Carbon Neutral Vision

DONG Yuanwu<sup>1,2</sup>, RONG Jialuo<sup>1</sup>, LI Xiaoyu<sup>1</sup>, TANG Shanfa<sup>1,2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, P R of China; 2. Province Key Laboratory of Drilling and Production Engineering for Oil and Gas, Wuhan, Hubei 430100, P R of China)

**Abstract:** With the development of carbon neutral goals in China, petroleum is facing a lot of pressure to reduce carbon emission. Taking low carbon treatment of shale gas fracturing fluid flowback as the goal, the characteristics and potential impact on water quality of shale gas fracturing fluid flowback were analyzed. The existing processing technology and principle were introduced. It was pointed out that the shale gas fracturing fluid flowback process should proceed from three aspects, such as reducing the pollutant emissions, energy recovery and utilization, saving energy and reducing consumption. Furthermore, it was suggested that these technologies, such as less or no water fracturing technology, clean fracturing fluid technology, new microbial treatment technology, energy saving treatment technology of fracturing flowback fluid, new energy replacement technology and energy saving technology of intelligent equipment, should be vigorously developed and promoted in the development of oil and gas fields, which ensured the reasonable development and sustainable development of shale gas.

**Keywords:** carbon neutral; carbon emission; shale gas; fracturing flowback fluid; saving energy and reducing consumption; review