

## 中美页岩气水力压裂返排液环境影响与治理\*

竹 涛<sup>1</sup> 薛泽宇<sup>1</sup> 牛文凤<sup>1</sup> 侯益铭<sup>3</sup> 叶泽甫<sup>3</sup> 薛 明<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)大气环境管理与污染控制研究所; 2. 石油石化污染物控制与处理国家重点实验室;

3. 格盟国际能源有限公司)

**摘 要** 对比分析中美页岩气水力压裂返排液,发现两者均具有产生量大、成分复杂、难生物降解、高 COD、高 TSS、高 TDS 等特点,若压裂返排液进入到地表水及土壤中,可能造成不利影响,甚至对人类健康造成影响。目前常用的处理压裂返排液的技术有深井回注法、处理后回用法及处理后排放法。我国页岩气水力压裂返排液处理技术尚不成熟,部分地区仍沿用石油行业处理采出水的方法;部分页岩气田以借鉴国外压裂返排液处理技术为主,结合自身返排液情况制定处理流程;返排液回收后重新用于水力压裂的水处理技术还不成熟,应积极开展压裂返排液处理技术的研究。

**关键词** 页岩气; 水力压裂; 返排液; 环境影响

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2019.05.018

文章编号:1005-3158(2019)05-0065-06

## 0 引 言

根据美国环保署统计结果<sup>[1]</sup>,页岩气开采过程中,开采一口井的耗水量为 8 700~14 000 m<sup>3</sup>,其中的 20%~80%可以返排,其余水可短暂存在于地层中。美国各地区返排液现状各不相同,Barnett 地区和 Marcellus 地区产生的压裂液分别为 14 383, 20 817 m<sup>3</sup>,返排率分别为 324%和 22%<sup>[2]</sup>。

四川盆地页岩气储量丰富,开采过程中单井需水量 20 000~30 000 m<sup>3</sup>。龙马溪组的涪陵区块完钻层返排率只有 3%,而长宁区块完钻层返排率为 20%;在另一个地区,奥陶系下统马家沟组的延长区块完钻层返排率为 50%。由于上述区块处在不同地区,每个区域地层含水率不同,地质条件不同,所以其返排率也不同<sup>[3]</sup>。

随着水力压裂技术的成熟,页岩气开发力度将逐渐增加。鉴于压裂返排液产量大、成分复杂、处理困难,势必成为页岩气规模化发展的瓶颈之一。因此,本文通过中美页岩气开采过程中压裂返排液水质和治理现状的对比分析,提出符合我国国情的监管建议,希望能够为压裂返排液的管理提供参考。

## 1 压裂返排液水质特点与治理现状

压裂返排液水质受很多因素的影响,压裂返排液成分、地层特点及地区的不同都会对其造成影响。

为了保证开采设备正常运行,同时诱导储层裂

缝,在水力压裂过程中会用到压裂液。压裂液中除含水外,还含有盐、胶凝剂以及其他含量各异的黏土稳定剂等,见表 1<sup>[4]</sup>。仅在 2005 年之后的 4 年内,就有多

表 1 典型压裂液的成分及含量

| 成分     | 常用物质       | 体积分数/% | 作用         |
|--------|------------|--------|------------|
| 水和沙    | 沙悬浮液       | 99.510 | 支撑裂缝开口     |
| 酸      | 盐酸         | 0.123  | 溶解矿物、破开裂缝  |
| 降阻剂    | 聚丙烯酰胺、矿物油  | 0.088  | 减小液体和管道间阻力 |
| 表面活性剂  | 异丙醇        | 0.085  | 增加压裂液黏度    |
| 盐      | 氯化钾        | 0.060  | 卤载体液       |
| 胶凝剂    | 磷酸酯铝盐      | 0.056  | 提高压裂液耐温性能  |
| 阻垢剂    | 乙二醇        | 0.043  | 避免管道结垢     |
| pH 调节剂 | 碳酸钠、碳酸钾    | 0.011  | 确保化学添加剂的效用 |
| 分解剂    | 硫酸盐        | 0.010  | 促使压裂液破胶返排  |
| 交联剂    | 硼酸钠、三氯化铝   | 0.007  | 促进胶联增稠     |
| 铁控制剂   | 柠檬酸        | 0.004  | 防止金属氧化物沉淀  |
| 阻蚀剂    | N,N-二甲基甲酰胺 | 0.002  | 防止管道腐蚀     |
| 生物杀灭剂  | 戊二醛        | 0.001  | 抑制细菌生长     |

\* 基金项目:石油石化污染物控制与处理国家重点实验室开放课题(PPC2017010);山西省科技重大专项(20181102017)。

竹涛,2009年毕业于北京工业大学环境工程专业,博士,教授/博导/所长,现在中国矿业大学(北京)大气环境管理与污染控制研究所从事大气污染控制与固废资源化研究工作。通信地址:北京市海淀区学院路丁11号,100083。E-mail:bamboozt@cumtb.edu.cn。

达 750 种的化学试剂被用于压裂返排液。在这些化学试剂中,既含有无毒组分,也含有有毒物质,且有毒物质的种类多、范围广,共涵盖 29 种<sup>[5]</sup>。

1.1 美国页岩气压裂返排液水质特点与治理现状

1.1.1 水质特点

水力压裂液由多种成分混合而成,通常包括水、支撑剂以及多达 750 种的化学添加剂。在不同矿区,压裂液所包含的化学物质的量值、种类和浓度都有差异。化学添加剂是否具有毒性,不同专家有不同的看法,目前还没有定论。由公开数据可知<sup>[6]</sup>,美国在页岩气水力压裂液中添加了 81 种化学添加剂,其中 55 种有机物中只有 27 种可降解。如果返排时间逐步增加,对应的累积压裂返排液量会逐步上升,其中的氯根、总溶解固体(TDS)、金属离子(总钙、总镁、总钡、总锶等)含量也会发生变化。当处于产出水过程时,因压裂液和地层接触的时间久, $TDS>1.0\times10^5\text{ mg/L}$ ,同时有机物与金属离子含量较高。表 2 为美国 Marcellus 页岩区和 Barnett 页岩区压裂返排液主要水质指标<sup>[7]</sup>,有机物所占的比例很高,金属离子也占了很大比例。

表 2 美国不同页岩区压裂返排液主要水质指标  
mg/L,pH 值除外

| 水质指标  | Marcellus 页岩区<br>第 14 d 压裂返排液 |         | Barnett 页岩区<br>第 10~12 d 压裂返排液 |        |
|-------|-------------------------------|---------|--------------------------------|--------|
|       | 范围                            | 中位值     | 范围                             | 中位值    |
| pH 值  | 4.9~6.8                       | 6.2     | 6.5~7.2                        | 7.1    |
| 总碱度   | 26.1~121                      | 85.2    | 215~1 240                      | 725    |
| 总悬浮固体 | 17~1 150                      | 209     | 120~535                        | 242    |
| 氯根    | 1 670~181 000                 | 78 100  | 9 600~60 800                   | 34 700 |
| TDS   | 3 010~261 000                 | 120 000 | 16 400~97 800                  | 50 550 |
| 总有机碳  | 1.2~509                       | 38.7    | 6.2~36.2                       | 9.75   |
| 油脂    | 7.4~103                       | 30.8    | 88.2~1 430                     | 163.5  |
| 硫化物   | 1.6~3.2                       | 2       | 未测得                            | 未测得    |
| 硫酸盐   | 0.078~89.3                    | 40      | 120~1 260                      | 709    |
| 总钡    | 133~4 220                     | 1 440   | 0.93~17.9                      | 3.6    |
| 总锶    | 1 220~8 020                   | 3 480   | 48~1 550                       | 529    |
| 总钙    | 8 500~24 000                  | 18 300  | 1 110~6 730                    | 1 600  |
| 总镁    | 933~1 790                     | 1 710   | 149~755                        | 255    |
| 总铁    | 69.7~158                      | 93      | 12.1~93.8                      | 24.9   |
| 总锰    | 2.13~9.77                     | 4.72    | 0.25~2.20                      | 0.86   |
| 总硼    | 13~145                        | 25.3    | 7.0~31.9                       | 30.3   |

由表 2 可知,页岩气压裂返排液具有成分复杂、TDS 高、悬浮物多等特性。部分水质指标存在很大差异,这些差异可能是由于不同页岩区地质条件不同造成的。例如:Marcellus 页岩区的压裂返排液相比于 Barnett 页岩区,总锶、总钡及 TDS 含量较高,硫酸盐含量较低。同时根据水质指标的变化幅度可以看出,同一页岩区不同气井的压裂返排液也存在一定差异。

表 3 为科罗拉多州丹佛-朱尔斯堡盆地(DJ)气井压裂返排液的化学成分<sup>[8]</sup>。

表 3 DJ 气井压裂返排液的化学成分

| 参数                                                   | 数值      | 分析方法        |
|------------------------------------------------------|---------|-------------|
| pH 值                                                 | 6.8     |             |
| 可溶性有机碳/(mg·L <sup>-1</sup> )                         | 590     | SM 5310B    |
| 碱度/(mmol·L <sup>-1</sup> )                           | 150     | HACH 8203   |
| TDS/(mg·L <sup>-1</sup> )                            | 22 500  | SM 2540C    |
| COD/(mg·L <sup>-1</sup> )                            | 1 218   | EPA 5220D   |
| BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )              | 1 100   | SM 5210B    |
| 石油类/(mg·L <sup>-1</sup> )                            | 59      | EPA 1664A   |
| TSS/(mg·L <sup>-1</sup> )                            | 360     | SM 2540D    |
| Cl <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )               | 13 600  | IC          |
| Br <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )               | 87.2    | IC          |
| S <sup>2-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )               | 0.31    | SM 4500 S2D |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> ) | 1.3     | IC          |
| Al <sup>3+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )              | 0.064   |             |
| As/(mg·L <sup>-1</sup> )                             | 0.067   |             |
| Ba <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )              | 8.542   |             |
| Ca <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )              | 524.1   |             |
| 总 Fe/(mg·L <sup>-1</sup> )                           | 81.42   |             |
| Mg <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )              | 106.4   |             |
| Sr <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )              | 60.25   |             |
| Na <sup>+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )               | 6 943.9 |             |
| 二甲苯/(ug·L <sup>-1</sup> )                            | 30      |             |

由表 3 可知,压裂返排液成分复杂,排放量较大且间歇性排放。压裂返排液中的悬浮物含量会变高,是由于破胶返排后的液体中含有残杂物以及悬浮油颗粒,他们是导致高悬浮物的主要因素。同时废液中的 COD 很高,一般在 2 000~20 000 mg/L。这主要是由于破胶返排后的液体中含有很多水溶性聚合物,包括胍胶及其他有机添加剂(包括苯系衍生化合物和多环芳烃类化合物)。这些聚合物稳定性强,很难被

去除,且有很大的毒性,从而导致 COD 变高。在压裂返排液中,还含有很大数量的浮油,浓度在 100~500 mg/L。同时氯离子和一些重金属离子含量也很高,其中重金属离子以铁离子为主。

综上,美国压裂返排液具有产生量大、难生物降解、成分复杂,以及 COD、TSS、TDS 高等特点。

### 1.1.2 处置方式

#### 1) 深井灌注

经地下灌注控制计划法规允许后,同石油和天然气开发过程中产生的伴生水一样,页岩气压裂返排液也可以深井灌注的方式进行处置。根据美国环保署规定,能够接纳上述废水的灌注井为第二类灌注井,相关法律对灌注井的选址、施工、运行及法律责任等有非常系统且明确的规定。根据 Tosello 等的研究<sup>[9]</sup>,有 3 种方法可以将水力压裂返排液注入地下进行永久处置。

(1) 废水注入盐洞。被选用的盐洞需要满足两个关键因素,一是合适的盐洞构造;二是考虑到运输距离所耗费的成本,盐洞需有足够的体积处理大量的废水,使得成本合理。

(2) 在原井堵塞和弃井时注入。如德克萨斯州、俄克拉何马州和怀俄明州等允许在弃井之前将钻井废料注入原井中。需要注意的是,注入压力必须大于压裂压力。

(3) 潜在裂缝注入。在特定的地质条件下,废水可在低于地层断裂压力的压力下注入地层。在一些情况下,废物在真空中会被吸入地层。

Tosello 等<sup>[9]</sup>统计,截至 2008 年底,得克萨斯州经美国环保署批准的第二类灌注井的数量为 11 000 口,略多于产气井的数量,有利于 Barnett 区块页岩气开发产生的压裂返排液的处置。相反,宾夕法尼亚州符合要求的灌注井数量只有 7 口,过剩的压裂返排液需要送到其他州进行处置,提升了 Marcellus 页岩区压裂返排液的灌注成本,该州的油气开发公司只能寻找其他的压裂返排液处置方法。虽然深井灌注可能是一种处理压裂返排液的方式,但也并非万无一失。问题之一是溢出或泄漏可导致污染注入区域的水资源和土壤。此外,存在于压裂返排液中的金属、放射性物质和沉积物的累积在注入处理后可能引发长期问题。

#### 2) 市政污水处理厂处理后外排

根据美国《清洁水法案》中的国家污染物排放消除系统(NPDES)许可程序,压裂返排液可以通过工业或城市废水处理设施进行处理。具体到各气田,还应符合各州压裂返排液排放相关法规。据 Lutz 等<sup>[5]</sup>

统计,2008 年 Marcellus 页岩区共有  $4.0 \times 10^5 \text{ m}^3$  气田废水经市政污水处理厂外排,其中以压裂返排液为主。在 Monongahela 流域的部分地表水体中曾短暂检测出高盐分,这是由于污水处理场的工艺流程对存在于水中的 TDS 几乎没有去除效果导致的,所以宾夕法尼亚州采取了比其他地区更加严格的污水排放标准以及管理要求。

#### 3) 现场或中心建厂处理后回用

压裂返排液再利用是克服供水供应有限和处置废液存在问题时的良好替代方案。有时根据条件,压裂返排液经处理后在另一个压裂过程中重复使用更加实用,而不是处理后将其排放到地表。根据 Lutz 等<sup>[5]</sup>的统计,Marcellus 页岩区压裂返排液的回用比例在 2008—2011 年从 10% 提升到了 71% 以上。这是由于开发规模不断扩大以及环保要求更加严格而形成的。在该区域,Range Resource、Anadarko、Atlas Energy 和 Chesapeake Energy 等油气开发公司都将压裂返排液全部回用作为目标。例如:Range Resource 公司 2009 年所用的  $6.0 \times 10^5 \text{ m}^3$  压裂液中 28% 作为回用,17% 以上的页岩气井压裂施工过程中进行了返排液回用。该公司共拥有 25 口高产井,有近一半的高产井参与回用,且并未出现影响产气效果的情况<sup>[10]</sup>。

#### 4) 现场或中心建厂处理后外排

对于多次回用后水质不再适合继续回用的压裂返排液以及回用成本较高等现实问题,现有水处理服务技术能够达到外排标准要求。目前已开展对“零排放”处理技术的研究,并且回收氯化钠等副产品。分析美国页岩气压裂气返排液处置现状可知,压裂返排液处理技术路线的建立要对某些因素进行综合评估和系统分析,这些因素包括政策法规、水质特点、开发现状、地质条件和技术经济性等。考虑到水力压裂液成分的复杂性,返排液须在几个不同的过程中进行组合处理。图 1 为压裂返排液处置的可能路线,可根据实际情况对①~⑥种路线进行适当选择及设计,即返排液管理技术路线。

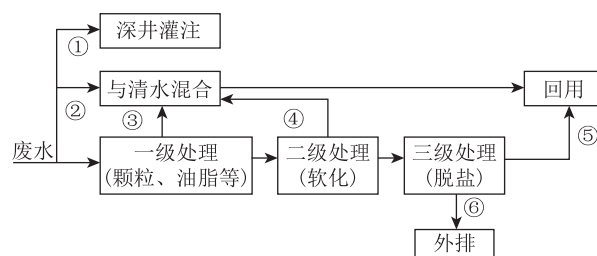


图 1 压裂返排液处置的可能路线



## 1.2 中国页岩气压裂返排液水质特点与治理现状

### 1.2.1 水质特点

我国不同页岩区具有不同的地质条件,由于地区差异等原因,可能对水质指标产生影响,造成一定差异,即使是同一页岩区,不同气井的压裂返排液也会有差异。国内使用的压裂液兼有国外和国内自主研发配方,但是各大生产商均对压裂液成分保密,我国未对这部分进行强制披露。本文选取国内典型页岩气田压裂返排液污染特征进行分析。

#### 1) 涪陵地区页岩气井压裂返排液主要污染指标

我国第一个千亿方大型页岩气田是涪陵页岩气田焦石坝龙马溪组页岩气田。页岩气大部分在上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组形成,埋深 2 300~2 800 m。涪陵页岩气田区域岩性具有良好的稳定性,总体孔隙密度约为 4.61%,岩性基本分为 3 类,主要包括灰黑色泥岩、灰黑色碳质泥岩和灰黑色粉砂质泥岩,渗透率在  $2.363\ 3\times 10^{-4}\ \mu\text{m}^2$  左右。在开发目的层段,厚度能够达到 80~114 m。页岩气储层的孔隙度和渗透率都较低,所以在后期使用套管生产,通过生产气体的临界携液速度进行排水采气。此方法能够稳定的产气产水,从而稳定生产页岩气。目前四川盆地涪陵焦石坝页岩气田采用的回收与循环利用方法有可能减少 80% 需要处理或处置的压裂返排液。统计报告表明,37.85 万 L 水中大概含有 20 t 的化学物质(苯、甲醇等),而且其中的盐度会发生变化。回流水是海水的十倍,每开采一口页岩气井就需要 37.85 万~302.8 万 L 水。大量的回流水若不及时进行处理造成泄漏,对水质和生态环境造成的影响不可预估<sup>[11]</sup>。通过分析涪陵焦石坝区块多个平台的压裂返排液,了解污水中悬浮物浓度、水型、矿化度、细菌浓度等情况,见表 4。

由表 4 可知,压裂返排液总矿化度较高,水体为棕褐色,水型为  $\text{NaHCO}_3$  型,pH 值大部分呈中性,3 种细菌浓度较高,悬浮物含量较高,意味着减阻剂溶解性能较差,同时减阻水压裂液性能不达标,出现沉淀或者絮状物。因其存在 COD、细菌类等污染物,为防止污染农作物和地表水质,必须要将这些污染物进行处理后才能排放。在形成针对性政策时需要考虑这些因素。

#### 2) 长宁-威远地区页岩气井压裂返排液主要污染指标

威远气田是以震旦系为主要产气层的致密白云岩裂缝-孔洞型气藏。震旦系气藏含气高度 244 m,探明含气面积约 216  $\text{km}^2$ ,原始地层压力 29.533 MPa,

表 4 涪陵焦石坝区块压裂返排液分析结果

| 项目                                                           | 1 井                    | 2 井              | 3 井                    |
|--------------------------------------------------------------|------------------------|------------------|------------------------|
| $\text{K}^+ + \text{Na}^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 2 242                  | 6 757.94         | 5 478.99               |
| $\text{Ca}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$           | 49.26                  | 186.97           | 112.18                 |
| $\text{Mg}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$           | 22.41                  | 22.69            | 68.07                  |
| $\text{Cl}^- / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$              | 2 501.6                | 9 124.83         | 7 106.84               |
| $\text{SO}_4^{2-} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$         | 360                    | 716.99           | 896.24                 |
| $\text{CO}_3^{2-} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$         | 0                      | 0                | 22.5                   |
| $\text{HCO}_3^- / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$           | 1 447.7                | 2 002.65         | 1 808.1                |
| 总矿化度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$                      | 66 230                 | 18 812.47        | 15 492.93              |
| 水型                                                           | $\text{NaHCO}_3$       | $\text{NaHCO}_3$ | $\text{NaHCO}_3$       |
| 悬浮物含量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$                     | 269                    | 952              | 18                     |
| pH 值                                                         | 6.8                    | 7                | 6.5                    |
| SBR 细菌/ $(\text{个} \cdot \text{mL}^{-1})$                    | 25                     | 0                | $\geq 2.5 \times 10^5$ |
| TGB 细菌/ $(\text{个} \cdot \text{mL}^{-1})$                    | $\geq 2.5 \times 10^5$ | 2.5              | $\geq 2.5 \times 10^5$ |
| FB 细菌/ $(\text{个} \cdot \text{mL}^{-1})$                     | $\geq 2.5 \times 10^5$ | 2.5              | 4.5                    |
| 总铁/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$                        | 6                      | 25               | —                      |

地层温度 120℃,硫化氢含量 16~20  $\text{g}/\text{m}^3$ ,气藏探明天然气地质储量  $4 \times 10^{10}\ \text{m}^3$ 。长宁-威远区块单井用水量在 25 000  $\text{m}^3$  以上,压裂作业结束后,10%~70% 的返排液到达地面。表 5 为长宁-威远地区页岩气井压裂返排液成分分析<sup>[12]</sup>。

表 5 威远-长宁地区页岩气压裂返排液成分分析

| 检测指标                                                 | 威远地区         | 长宁地区          |
|------------------------------------------------------|--------------|---------------|
| pH 值                                                 | 6.0~7.5      | 6.0~7.8       |
| COD/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$               | 521~1 130    | 235~897       |
| 悬浮物/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$               | 317~853      | 256~765       |
| $\text{Cl}^- / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$      | 5 290~10 600 | 6 500~11 600  |
| TDS/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$               | 9 650~26 800 | 11 300~20 755 |
| $\text{K}^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$       | 83~164       | 177~449       |
| $\text{Na}^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$      | 2 840~6 780  | 3 900~9 980   |
| $\text{Ca}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$   | 379~398      | 71~438        |
| $\text{Mg}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$   | 290~340      | 22~310        |
| $\text{Ba}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$   | 35~40        | 24~36         |
| $\text{Si}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$   | 3~24         | 20~96         |
| 总铁/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$                | 38~60        | 10~40         |
| $\text{SO}_4^{2-} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 6~48         | 2~60          |

从表5可知,不同地区的页岩气井压裂返排液成分含量区别很大,但是主要成分没有质的区别,两个区域的储层矿物化学成分也基本没有不同。所以该地区压裂返排液回用技术可作为代表性技术在不同地区进行推广。在后期处理时需要注意到其中含有COD、悬浮物等,不能让这些物质直接排放到环境中,应制定相应对策。

### 1.2.2 治理现状

随着《页岩气发展规划(2011—2015年)》和《页岩气产业政策》(国家能源局公告2013年第5号)的发布,我国加快了页岩气开发脚步,但同时也出现了环境问题,其中压裂返排液的处理问题尤其显著。美国页岩气压裂返排液的处理方法主要是重复利用,例如:Marcellus页岩矿压裂返排液的20%是回收与循环利用的。我国页岩气压裂返排液的主要处理方法是深井回注和重复利用。

国内对压裂返排液的处理主要是通过沉降、气浮选、水力旋流等方法进行油水初级分离,然后进行自然风干和化学处理。

自然风干是将置于专门的返排液池中的压裂返排液通过自然蒸发的方式干化后填埋。这种处理方法有很多缺点,时间需求长,填埋处理后部分醛、重金属等依然会从污泥块中渗出,造成二次污染。

化学处理是将压裂返排液统一进行加药絮凝及过滤等预处理,然后将其回注到地层。这种方法亦有工艺复杂、应用范围小等不足。国内页岩气开采地区大多为新开发区块,附近没有合适的回注井,需要将压裂返排液输送到较远的井场进行处理,这一过程增加了处理成本。若对产生的污泥进行自然风干、化学处理或者焚烧,不仅耗费资源,而且重金属、放射性物质等有害物质会对环境造成污染。目前国内绝大部分压裂返排液贮存过程中未实施防护,若处理不当,会使地面处理系统内部结垢严重,井下套管遭到一定程度的腐蚀。必须采取相关措施对地面处理系统实施保护或者对回用压裂返排液严格处理,使其达标。

以成分较为复杂的涪陵焦石坝区块为例,其在产能建设期间产生大量压裂返排液,每口井压裂返排液量达到1 000~2 000 m<sup>3</sup>。这些压裂返排液的处理一般是经过pH值调节、脱稳反应、气浮、絮凝沉降、过滤等流程。因涪陵山地貌特殊,分三级处理才能够达到较好的处理效果。首先调节pH值,之后进行杀菌处理,进一步絮凝沉降,最后将清水与污水混合,对外排放或重复利用<sup>[13]</sup>。

## 2 总结与建议

页岩气在美国大规模开发帮助了相关产业的复苏,改写了能源版图,也带来了长久的环境争论。页岩气开发采用的主要储层改造手段为水力压裂技术。据美国环保署统计,每一口页岩气水平井消耗7 600~19 000 m<sup>3</sup>的水,每次压裂作业完成后,约15%~80%的返排液排至地面。因压裂返排液曾与地层接触,若处置不慎,其中含有的有机质、氯根及含量较高的金属离子等会带来环境风险。所以,如何减少水资源消耗、合理处置页岩气开发过程中产生的大量返排液已成为目前页岩气规模化开发的瓶颈问题之一。

通过对比中美页岩气开采过程中水力压裂返排液的水质特点和治理现状,可以看出压裂返排液的主要特征在于产生量大、成分复杂、难生物降解、高COD、高TSS、高TDS等,极有可能对地表水和土壤,甚至人类的健康造成影响。我国CJ 343—2010《污水排入城镇下水道水质标准》中规定市政污水处理厂TDS≤2 000 mg/L,GB 8978—1996《污水综合排放标准》虽未规定排水TDS指标,但北京和上海地方标准中提出排水TDS≤2 000 mg/L,未来一定会对压裂返排液中TDS及相关指标进行限值。另外,页岩气开采的当地地层岩性必然与压裂返排液水质特点正相关,压裂返排液中悬浮物、油类、Ca<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>等易结垢离子及原压裂液中的黏土稳定剂、杀菌剂、减阻剂、表面活性剂与阻垢剂等聚合物添加剂都需要进行相应处理后才可实现回用。当前,压裂返排液处理最常用的方法为深井回注法、处理后排放法和处理后回用法。国内页岩气水力压裂返排液处理技术相对落后,并且处理简单,一些地区仍沿用石油行业处理采出水的方法。部分页岩气田以借鉴国外压裂返排液处理技术为主,结合自身返排液情况制定处理流程。

我国在压裂返排液处理技术及应用上总体处于起步阶段,考虑到成本和环保,压裂返排液循环处理利用是页岩气开采技术的未来发展趋势。因此,在页岩气开采过程中,必须把对水环境质量的影响降低到最低程度,以保护生态环境。政府要加强监管,尤其是压裂过程,同时要加强对压裂返排液的处理,以降低影响程度。当前保护生态环境形势日益严峻,同时为了降低气田经济成本以及让页岩气行业更好更快的发展,对压裂返排液处理技术的研究势在必行。

### 参考文献

- [1] 董志立.页岩气开发过程中的压裂用水处理工艺进展[J].中国石油和化工标准与质量,2014(5):140-141.

- [2] HAYES T, SEVERIN B F. Barnett and appalachian shale water management and reuse technologies[R]//Final report to research partnership to secure energy for America. Pittsburgh, Pennsylvania: United States Department of Energy National Energy Technology Laboratory, 2012.
- [3] 史聆聆, 李小敏, 马建锋, 等. 页岩气开发压裂返排液环境监管及对策建议[J]. 环境与可持续发展, 2015, 40(4): 39-42.
- [4] 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.
- [5] LUTZ B D, LEWIS A N, DOYLE M W. Generation, transport, and disposal of waste water associated with marcellus shale gas development[J]. Water resources research, 2013, 49(2): 647-656.
- [6] U.S. Environmental Protection Agency. Hydraulic fracturing fluids, in: evaluation of impacts to underground sources of drinking water by hydraulic fracturing of coal-bed methane reservoirs [R]. Washington, D. C. : U. S. Environmental Protection Agency, 2004.
- [7] STRINGFELLOW W T, DOMEN J K, CAMARILLO M K, et al. Physical, chemical, and biological characteristics of compounds used in hydraulic fracturing[J]. Journal of hazardous materials, 2014, 275(6): 37-54.
- [8] YAAL LESTER, IMMA FERRER E, MICHAEL THURMAN, et al. Characterization of hydraulic fracturing flow-back water in Colorado: Implications for water treatment [J]. Science of the total environment, 2015, 512/513: 637-644.
- [9] TOSELLO G, GAVA A, HANSEN H N, et al. Influence of process parameters on the weld lines of a micro injection molded component[C]. Annual technical conference-ANTEC, conference proceedings. Cincinnati, 2007.
- [10] 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.
- [11] 梅绪东, 张思兰, 熊德明, 等. 涪陵页岩气开发的生态环境影响及保护对策[J]. 西南石油大学学报(社会科学版), 2016, 18(6): 7-12.
- [12] 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.
- [13] 杨长军, 田庆华, 张悦. 页岩气开采水环境压力与污染防治技术探讨[J]. 四川环境, 2015, 34(4): 146-151.

(收稿日期 2019-02-24)

(编辑 郎延红)

## 中国石油首届环境监测专业竞赛鸣金

2019年9月11日,首届中国石油环境监测专业竞赛鸣金收兵,最终决出个人项目3金、13银、19铜。抚顺石化邹喆、新疆油田张珍珠、冀东油田王陈琬摘得个人项目金奖;冀东油田、塔里木油田、大连石化等4支代表队获得团队“一等奖”;大港油田获优秀组织奖。

本次竞赛是中国石油首个面向环境监测专业的技能竞赛,共有37家地区公司代表队的795人参加。竞赛分为预赛和决赛两个环节,竞赛内容包括理论考试和实际操作。为了保证竞赛的公平性,在理论考试环节,各参赛单位互派督考员交叉监考;在实际操作环节,聘请生态环境部环境监测站首席专家张颖为裁判长、100多名相关企业环境监测技术专家现场交叉督考。

生态环境监测是生态环境保护的重要基础,是生态文明建设的重要支撑,生态环境监测队伍是生态环保铁军中的先锋队。通过开展监测专业竞赛,有利于提升中国石油生态环境监测整体技术水平,培育科学严谨的工匠精神,打造生态环保铁军,为打好打赢污染防治攻坚战提供坚强支撑。

多年来,中国石油立足石油石化行业特点,严守生态环境检测数据质量“生命线”,不断提高生态环境监测工作科学化、标准化、规范化水平,积极推进保护中开发,开发中保护发展战略,出台了中国石油绿色低碳转型的1+3体系,建立了环境监测三级体系、1+8自动环境应急监测网和中石油自动在线检测中心,模范遵守环境保护法律、法规,实现了395个排放口的自动检测连线,确保监测数据“真、准、全”,做到可申报、可考察、可追溯,使环境保护成为集团公司的发展动力,为建设青山常在、绿水常流、空气常新的美丽祖国做出了积极的贡献。

(摘编自 中国石油安全环保技术研究院有限公司院网 2019-10-22)