

# 页岩气开发过程中的水处理技术探讨

李玉春<sup>1</sup>

**摘要：**页岩气开发普遍采用水力压裂开采方式，开发过程中会产生大量压裂返排液，压裂返排液中悬浮物、总溶解固体、金属离子和有机物等含量都较高，并且组成成分复杂，这些因素都决定着处理后的水是否能够有效再利用；然而目前压裂返排液回收再利用的基本方法由于没有彻底解决清除盐和其他化学成分的问题，还存在一定局限性。针对压裂返排液进行净化处理的主要方法有过滤法、化学沉淀法、热技术法、膜过滤技术法等。美国的废水管理方法主要包括尽可能降低生产废水量、循环回收利用气井作业过程中的水、在生产场地采用储水罐或储水池、对作业外水进行处理和再利用。相比于美国，我国页岩气起步较晚，经验欠缺，故为了确保我国页岩气的长期开采，不仅要选择合适的水处理方案，而且还应启动相应的监管工作，才能减小其对环境造成的污染和破坏。

**关键词：**页岩气；返排液；水处理技术；水监管

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.1.003

## Discussion on Water Treatment Technology in Shale Gas Development

LI Yuchun

**Abstract:** The hydraulic fracturing method is widely used in shale gas development and huge amounts of fracturing flowback fluid is produced in the development process. The flow-back fluid usually contains high content of suspended particles, total dissolved solids, metallic ions and organic matter and its composition is complex. All of these determine whether the treated water can be reused effectively. However, the basic method so far for fracturing fluid recycling still has some limitations, for it can not completely solve the problem of disposal salt and other chemical constituents. The major purification methods of fracturing fluid are filtering method, chemical precipitation, thermal technology, membrane filtration, etc. The wastewater management methods in America mainly include minimizing wastewater production, recycling water produced in gas well operation process, using storage tanks or reservoirs in production area and recycling operating water. Compared with the United States, the shale gas production in China starts late and is inexperienced. Thus, in order to ensure the long-term exploitation of shale gas in China, not only appropriate water treatment technology should be chosen but also the corresponding supervision work should be started, so as to reduce the pollution and damage caused to environment.

**Key words:** shale gas; fracturing flowback fluid; water treatment technology; water supervision

页岩开发需耗用和产生大量的水。一是在压裂阶段需要大量的水用于压裂，二是页岩气开采产生大量的返排水，可能造成地下水污染。这些都成为页岩气开采中的瓶颈问题，并由此导致最早开发页岩气且技术最成熟的美国一度引起争议，使得全球

的页岩气开发都面临巨大阻力<sup>[1]</sup>。因此，页岩气开发公司认为有必要通过采用新的水处理技术，快速改进水处理方案，进而确保长期有效开采页岩气<sup>[2]</sup>。本文从页岩气开采中返排液的特点出发，分析了水处理技术的特点，并对各技术方案的适用条件进行

<sup>1</sup>大庆油田工程有限公司

了探讨。

## 1 压裂返排液的特点

与其他传统油气不同,页岩层水含量极少。一般而言,从阶段和时间上对水力压裂后返排至地表的大量液体进行区分,包括返排液和采出水两种。“返排液”定义为施工过程中完井所产生的洗井废水,其处理费用可看作完井成本的一部分<sup>[3]</sup>,也指压裂施工完成后从井筒返排出来的液体<sup>[4]</sup>,这里将这两类都视为返排液。

在开发过程中,随着返排液数量的不断累积,其中总溶解固体(TDS)、固体悬浮物、氯离子、Ca、Mg、Ba和Sr盐以及细菌的含量也随之不断增大;特别是产出水期间,返排液在地层内的停留时间比较长,总溶解固体、金属离子和有机物等的含量都相当高。

以美国宾州 Marcellus 和德州 Barnett 页岩气开采为例,压裂返排液悬浮物含量多,总溶解固体含量较高,并且组成成分复杂;但鉴于地质环境条件差异等因素,不同页岩地区水质指标可能有较大差别。即使在同一页岩地区,不同井位的气井返排液也存在一定的差别<sup>[5]</sup>。

## 2 水处理与循环利用

页岩气的水处理和再利用主要包括回灌、回用和外排三种方式,其中以回收利用为重点。回收利用具有减轻供水压力、降低采出水处理量、减少总成本等优点。

对于页岩开发作业者来说,有多种因素决定处理后的水是否能够有效再利用,包括页岩区地质成分和压裂液化学性质等。页岩区的地质成分决定了采出水的特征;而压裂液的化学性质则取决于其可溶性有机物种类、碳氢化合物浓度、悬浮物及铁、钙、硼、镁的含量等,主要表现为盆地TDS或者盐性的显著变化。

页岩气压裂返排液的回收再利用方法一般有三种。第一种方法是将其运输到中央设施进行最简单的处理,除去悬浮固体以后再利用;但此方法因为没有除去TDS浓缩物,所以不仅会影响水的再利用程度,而且还会影响压裂水安全,同时也会带来一些环境问题。第二种方法是在现场进行返排液的处理,此方法可以降低运输成本。第三种方法是在第二种方法的基础上,尽可能清除结垢成分,然后与水混合再利用。为了高效实现水的回收再利用,必须解决TDS和盐度问题,查明返排液使用的化学添

加剂成分及其处理方式。

每进行一次压裂作业,都应对返排液和采出水的再利用适用性进行评估,盐度、TDS等指标对评估结果起决定作用。在页岩气开发早期阶段,如果满足一定的地质条件,返排水可以多次使用。一般经过基本过滤后再与淡水混合,然后再添加压裂化学剂来提高油气产量。但是,随着开发的不断推进,返排液中盐水和化学成分不断积聚,生产成本会越来越高,环保问题也会越来越突出,所以应对返排液进行及时处理。

上述页岩气压裂返排液回收再利用的基本方法由于没有彻底解决清除盐和其他化学成分的问题,将会干扰聚合物的交联。热蒸馏通过采用机械蒸汽再压缩的过程可以较为有效地去除影响循环利用的所有成分(不足 $50 \times 10^{-6}$ ),这是一种在智能水处理、预测井产能、降低成本和减少页岩气开采环境不良影响等方面很有发展前景的方法<sup>[2, 6]</sup>。

## 3 常用水处理技术比较与选择

对页岩气田地面压裂所产生的返排液进行净化处理的主要方法有过滤法、化学沉淀法、热技术和膜过滤技术等<sup>[7]</sup>。

### 3.1 过滤法

废水中的悬浮固体一般应用过滤法去除。过滤的种类和方法繁多,包括类似于家用的简易过滤装置和经过精心设计的价格高昂、性能优良的过滤器。较低端的处理技术主要是指最基本的过滤技术,如筒式过滤器和媒体吸收装置<sup>[8]</sup>。过滤用页岩气作业装置的孔径尺寸从 $0.04 \mu\text{m}$ 到 $3 \mu\text{m}$ 变化不等,尽管如此,过滤也不能有效降低废水中TDS浓度,经过处理后的水常常被运往新井与淡水混合后再用于压裂。

### 3.2 化学沉淀法

化学沉淀法就是通过调节废水pH值或者向返排液废水中投加化学药剂,生成难溶的沉淀物后去除,最后对净化后的水进行再利用或外排。化学沉淀法一般用于去除成垢物质,例如钙、镁、铜、钡、铅、镉、铁和锰,也可以用来去除金属杂质<sup>[9]</sup>。

### 3.3 热技术

要降低TDS浓度水平,过滤和化学沉淀法并不适用。对于TDS含量较高的返排液废水,一般采用热技术进行脱盐处理。热技术主要包括热蒸馏、蒸发以及结晶等<sup>[10]</sup>。热技术是将水加热到接近沸点温度后,生成清洁的蒸馏水、浓盐水或结晶盐,然后将蒸馏水收集再利用或者直接蒸发,从而实现零水

排放(ZWD)的要求。热技术显著降低了TDS浓度水平,符合环保法规所要求的安全处理标准。浓缩盐水平平均只占原有废水的20%,大大降低了将水运送到注入井的运输成本。

### 3.4 膜过滤技术

膜过滤技术一般有正渗透技术和反渗透技术。反渗透技术广泛用于海水淡化、高纯工业用水以及废水处理。反渗透工艺主要利用外界施加压力克服渗透压差,促进水分子向逆渗透压的方向扩散,从而获得纯水<sup>[11]</sup>。膜过滤技术通过膜的传输生成净化水,膜孔很小,可以阻隔比膜孔尺寸大的悬浮颗粒以及溶解颗粒。有文献指出,若TDS浓度水平高于 $40\ 000 \times 10^{-6}$ ,则反渗透膜过滤技术不能达到预期的净化效果<sup>[12]</sup>。

## 4 页岩气开发中的水监管

埃森哲公司发布的《水资源和页岩气开发》报告中指出<sup>[13]</sup>,一般情况下,每口页岩气水平井在进行钻井和压裂作业过程中需要消耗约 $500 \times 10^4$  gal (1 gal=3.785 L)的水,其中,压裂过程用水量所占比重将近90%。美国曾在开发初期对无水压裂液进行研究<sup>[14]</sup>,然而无水压裂液在使用过程中存在问题与隐患。例如,应用液态丙烷时,需在地下使用爆炸性气体,很可能造成严重的安全事故;因此,淡水供应不足成为了制约页岩气行业发展的严重障碍。

除此之外,美国自然资源保护委员会曾指出,页岩气单井的生命周期最长可达40年,其产生的生产废水总量可达数百万升<sup>[14]</sup>。如果对废水排放前的处理不达标,就有可能对地表及地下水造成污染,污水中的化学物质会通过浅层土壤渗透到含水层,在储存和往返于钻井现场的运输过程中水力压裂液及废水有可能发生地表溢漏。美国主要采取以下方法进行废水管理:尽可能降低生产废水量;循环回收利用气井作业过程中的水;在生产场地采用储水罐或储水池;对作业外水进行处理和再利用。

在美国,如采用地下注入方法处理废水,必须按照地下注入控制(UIC)计划由州级机构或州环保署批准,监管机构一般会限制在注入井中进行废水处理的压力。另外,考虑其环境风险很大,美国各方机构也在加强对压裂液的管制。怀俄明、德克萨斯、宾夕法尼亚、阿肯色、印第安纳、路易斯安那、密西根、蒙大拿、新墨西哥、北达科他、俄亥俄和西弗吉尼亚等州相继出台了水力压裂液体化学成分披露条例,开展监管工作的部门通常是负责监

管地下水和地表水源质量的政府机构,例如环保部、水资源部,以及国土资源部<sup>[14]</sup>。

2015年末,我国页岩气计划开采产量将达到 $65 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,2020年产量将有望达到 $600 \times 10^8 \sim 1\ 000 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,这预示着随着页岩气的大规模开发与开采,水监管问题将日益严峻。

页岩气在我国起步较晚,经验欠缺,并且当前的环境保护法只针对石油与天然气的传统领域。2007年,我国颁布的《环境影响评价技术导则:陆地石油天然气开发建设项目》制定了明确的废水排放标准,用以防止因石油和天然气工业废水造成的污染<sup>[15]</sup>。2012年3月,环境保护部门发布报告《石油天然气开采业污染防治技术政策》,强调了废水回收利用的重要性,并对压裂液的使用作出了指导。同时,文件还要求制定地下水监测计划,以证实当前地下注水的工业做法不会导致任何的水质污染。但是,这两份指导性文件并没有明确针对页岩气开采及与之相关的水资源问题。

值得关注的是,在国家发改委制定的《页岩气发展规划2011—2015年》中陈述了一系列有关环保问题的领先实践,其中包括水力压裂的废水回收利用、严格的钻探规定,以及强化废水排放监控计划,同时要求页岩气运营商减少对当地环境的负面影响。

## 5 结论

随着全球页岩气开采规模的不断增大,以返排水为主的水污染问题日益严峻,开发探索合适的水处理技术对页岩气可持续性开发具有重要意义。通过总结返排液的特点,对比各类处理污水的技术特点和优势,并进行页岩气开采中的水处理监管问题的探讨,可为页岩气的良性开发提供技术参考。总而言之,当前的水处理技术各有特点,但又存在不足之处。为了确保页岩气的长期开采,只有把水资源规划和页岩气的资源勘探评估相结合来确定开发的可行性,并选择合适的水处理方案,启动相应的监管工作,才能减轻页岩气开采对环境造成的污染和破坏。

### 参考文献

- [1] ROZELL D J, REAVEN S J. Water pollution risk associated with natural gas extraction from the marcellus shale[J]. Risk Analysis, 2012, 32 (8): 1 382-1 393.
- [2] 张瑜. 针对页岩的水处理技术[J]. 科技信息:石油与装备, 2013 (U05): 96-97.
- [3] RAHM B G, BATES J T, BERTOIA L R, et al. Waste-

- water management and Marcellus shale gas development: trends, drivers, and planning implications[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 120: 105-113.
- [4] ACHARYA H R, HENDERSON C, MATIS H, et al. Cost effective recovery of low-TDS frac flowback water for re-use[R]. Final report to United States Department of Energy National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh, Pennsylvania: United States Department of Energy National Energy Technology Laboratory, 2011.
- [5] 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.
- [6] KOREN A, NADAV N. Mechanical vapour compression to treat oil field produced water[J]. Desalination, 1994, 98 (1-3): 41-48.
- [7] 岑康, 江鑫, 朱远星, 等. 美国页岩气地面集输工艺技术现状及启示[J]. 天然气工业, 2014, 34 (6): 102-110.
- [8] 张海鹏. 提高油田采油注入水水质方法的探索[J]. 中国新技术新产品, 2011 (17): 2-2.
- [9] 郭燕妮, 方增坤, 胡杰华, 等. 化学沉淀法处理重金属废水的研究进展[J]. 工业水处理, 2011, 31 (12): 9-13.
- [10] ALKHU DHIRI A, DARWISH N, HILAL N. Membrane distillation: a comprehensive review[J]. Desalination, 2012, 287: 2-18.
- [11] HOOVER L A, PHILLIP W A, TIRAFERRI A, et al. Forward with osmosis: emerging applications for greater sustainability[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45 (23): 9 824-9 830.
- [12] JIANG Qiyang, RENTSCHLER J, PERRONE R, et al. Application of ceramic membrane and ion-exchange for the treatment of the flow back water from Marcellus shale gas production[J]. Journal of Membrane Science, 2013 (431): 55-61.
- [13] 埃森哲公司. 水资源和页岩气开发[R]. 2013.
- [14] 王尔德, 茅玮涛. 页岩气开发存巨大“水危机”[J]. 中国中小企业, 2013 (7): 46-48.
- [15] 吉林省环境工程评估中心. 环境影响评价技术导则陆地石油天然气开发建设项目: HJ/T 349-2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

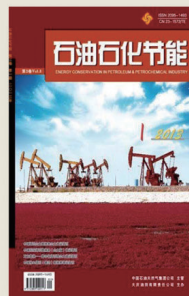
### 作者简介

李玉春: 教授级高工, 博士, 2011年毕业于东北石油大学油气储运工程专业, 研究方向为油气田地面工程设计, 0459-5903788, liyuchun\_dod@petrochina.com.cn, 黑龙江省大庆市让胡路区西苑街46号, 163712。

收稿日期 2015-08-25

(栏目编辑 纪焯杰)

## 看 石油石化节能 掌握节能动态 月刊, 全彩印刷, 公开发行



邮发代号  
14-227

### 主要栏目

【要文·述评】【试验·研究】【技术·应用】【设备·产品】【管理·实践】【节能标准】【环保·安全】【节能经济】  
【人物专栏】【专题】【热点关注】【节能观察】【综合资讯】

### 办刊宗旨

宣传石油石化节能方针政策, 交流推广节能工作经验, 报道石油石化节能领域科研成果及新技术、新工艺、新设备、新材料, 推动石油石化节能减排工作稳步发展

### 联系方式

咨询电话: 0459-5903588, 5392435  
E-mail: youtianjeneng@163.com, gwgc@petrochina.com.cn  
投稿网址: www.syshjn.com

全国各地邮局可订阅或  
直接向本刊编辑部订阅