

# 美国油气田采出水的处置与利用\*

袁波<sup>1</sup> 管硕<sup>2</sup> 马霄慧<sup>1</sup>

(1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司; 2. 中国石油国际勘探开发有限公司)

**摘 要** 美国油气田采出水除回注外, 主要还有地下灌注、地表排放、农业灌溉等方式, 多途径实现采出水的资源化利用, 但同时也带来了地下处置可能引发地震、浅层处置可能影响含水层、浅层处置导致地层压力增大的风险。通过对美国油气田采出水管理方式的研究, 为国内油气田采出水的处置及资源化利用提供借鉴。

**关键词** 油气田采出水; 地下灌注; 同层回注; 采出水再利用

DOI: 10.3969/j.issn.1005-3158.2019.02.003

文章编号: 1005-3158(2019)02-0008-04

## 0 引 言

美国是全球最大的产油国, 原油产量达到  $2.08 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ , 占全球原油产量的 14.1%; 天然气产量达到 7 345 亿  $\text{m}^3/\text{d}$ , 占全球天然气产量的 20.0%。随着油气田事业的发展, 油气田采出水(以下简称采出水)的排放量逐年上升。采出水的处置与利用是石油工业的一大难题, 一般而言, 采出水未经处理禁止排放。采出水只有经过处理, 其中的污染物去除到一定程度才可进行排放或再利用。美国是采出水处置与利用比较好的国家, 采用地下灌注、同层回注、地表外排及其他再利用方式。本文探讨美国对采出水的管理以及存在的风险, 为国内采出水的处置及资源化利用提供借鉴, 促进我国油气田事业的可持续发展。

## 1 美国油气田采出水概况

油气田开发过程中伴随着产生大量采出水。这些采出水大部分通过油气井随产品一起来到地面, 这部分水在产品外运和外输前必须加以脱除, 脱除的污水中含有原油, 因此, 被称为油气田采出水。注水采油过程中采出液为油水混合物, 含水率高达 90% 以上, 采出水量较大且组成复杂, 不仅每个油气产区采出水成分差异大, 即使同一个水处理站, 不同时段处理的采出水成分也各不相同。一般采出水 SS 含量高、颗粒粒径小、细菌含量高、油水密度差小、有机物含量高。在美国, 常规和非常规油藏平均生产  $1 \text{ m}^3$  油需要注入  $10 \text{ m}^3$  水, 国内开采  $1 \text{ m}^3$  原油约注入  $7.19 \text{ m}^3$  水。大多数的采出水被注入地下, 以提高常规油藏的采

收率, 或者使用盐水处置井进行处置。但这些处理方法存在一定环境风险与地质风险, 如何管理这些采出水, 将其合理利用, 是油气田企业需要思考的问题。

### 1.1 采出水水质特点

采出水随着地理位置的变化成分也有很大变化, 即使在相同的地层内, 这些组分的浓度也有数量级的变化。表 1 为美国 Marcellus 页岩区和 Barnett 页岩区压裂返排液主要水质指标, 由于地质条件差异等原因, 两个页岩区的某些水质指标存在较大差别。两者相比较, Marcellus 页岩区压裂返排液中具有较高的总铁、总镍、总钙和总镁含量, 较低的硫酸盐含量等<sup>[1]</sup>。所以, 对于每口井的采出水都要经过严格的水质检测和分析, 才能保证后续处理的达标。

### 1.2 采出水量的问题

目前, 仅在美国就有大约 110 万口油气生产井, 并且还以每年 13 000 口油井的速度增长。据平均计算,  $1 \text{ m}^3$  油可产出  $3 \sim 5 \text{ m}^3$  水, 采出水量巨大。根据美国 2012 年采出水量分布情况, 最大水量可达约 5.57 亿  $\text{m}^3$ 。在油气藏丰富的德克萨斯州, 采出水量可达  $0.795 \sim 1.1766$  亿  $\text{m}^3$ , 约占总体水量的五分之一。油气藏同样丰富的加州和俄克拉荷马州等地区的采出水量仅次于德克萨斯地区。新墨西哥州在 2015 年前的过去 6 年中, 每年平均产出 1.18 亿  $\text{m}^3$  水, 仅在新墨西哥州东南部, 2008—2013 年产水量为 6.47 亿  $\text{m}^3$ , 平均为  $1.078 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ <sup>[2]</sup>。

\* 基金项目: 国家油气开发科技重大专项“十三五”重点项目《页岩气等非常规油气开发环境检测与保护关键技术》课题一“页岩气等非常规油气开发环境影响评估与环境效益综合评价技术”, 课题编号: 2016ZX05040-001。

袁波, 2006 年毕业于吉林大学环境科学专业, 硕士, 高级工程师, 现在中国石油集团安全环保技术研究院有限公司主要从事环保政策与标准研究工作。通信地址: 北京市昌平区黄河北街 1 号院 1 号楼, 102206。E-mail: yuan-bo@cnpcc.com.cn。

表1 美国 Marcellus 页岩区和 Barnett 页岩区压裂返排液主要水质指标 (mg · L<sup>-1</sup>, pH 值除外)

水质指标	Marcellus 页岩区第 14 d 压裂返排液		Barnett 页岩区第 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	6.5~8.2	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
总溶解固体	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
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

页岩气开发、油田增产和一些低渗油田开采都需要利用水力压裂。美国已有 60 多年的水力压裂技术应用历史,采用该技术获得的原油量达 30%。如今,95%的新油井应用水力压裂法开采。美国是全球唯一实现页岩气商业化开发和规模利用的国家,近年其页岩气开采量不断上升,因而需水量非常大。一次水力压裂作业水耗约 10 000 m<sup>3</sup>。

以 Permian 盆地为例,其所在的油气田水力压裂用水量逐年上涨,见图 1。从图 1 可看出,2009—2017 年当地油气田用水量从平均每口井不到 3.18 × 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> 涨至 6.36 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 左右,最高用水量可达 1.03 × 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup> 左右。

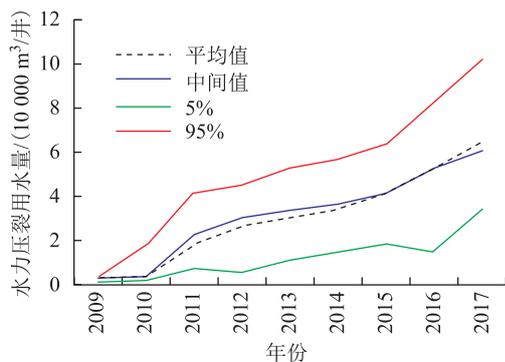


图1 Permian 盆地近年水力压裂用水量变化情况

## 2 美国油气田采出水处置与利用途径

当前,美国采出水处置与利用方式主要包括地下灌注、同层回注、地表外排、农业灌溉和市政用水。美国采出水用途见图 2。

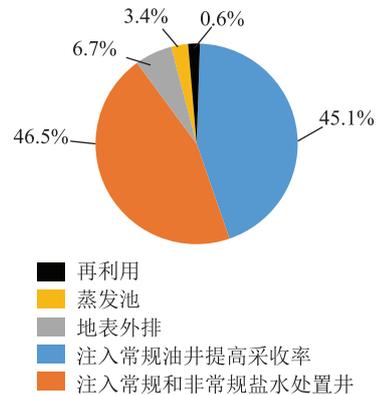


图2 美国采出水用途

### 2.1 地下灌注

地下灌注是美国采出水处置最主要的方式,约占 46.5%。

图 2 中占比约 46.5% 的采出水用于注入常规和非常规盐水处置井。其过程是将灌注液从盐水处置井注入到地下多孔的岩石或土壤地层,排放至地下饮用水资源下面一段距离的深地质层。由于有岩石层

隔离,一般不会对饮用水资源造成破坏。和其他技术相比,地下灌注的优点是污染风险相对小,并且处理成本低,可以达到隔离处理的目的。

## 2.2 同层回注

采出水回注是为了充分利用水资源,化害为利,提高原油采收率。美国采出水回注占比约 45.1%。

图 2 中占比约 45.1%的采出水用于常规油田的注水开采。用设备将水从注水井注入油层后,可以保持地层压力,也可以驱替孔隙中的原油,提高采收率。二次采油除了注水以外,还可以注蒸汽。蒸汽吞吐和蒸汽驱是目前稠油开采的主要方法,将产出水回用于锅炉,变为蒸汽注入井中,实现稠油采收率的提高。

## 2.3 地表外排

目前,美国采出水外排水占比约 6.7%。

美国采出水的外排区域主要集中在墨西哥湾与西部地区,而且对于外排到地表水的采出水成分有非常严格的标准规定。美国环保署规定,靠近海岸并拥有国家污染物排放削减制度(NPDES)许可证的油气井采出水在处理达标后可排放至海洋,仅允许在深水排放(距海岸 4.83 km),并且水中原油月平均含量为 29 mg/L,不得超过 42 mg/L。对于内陆,除特殊情况外,美国环保署禁止任何采出水排放<sup>[3]</sup>。因此,外排标准的限制使得大部分油气田选择将采出水回注地下。

## 2.4 蒸发池

除了排放到河流,约 3.4%的采出水排入蒸发池。

## 2.5 再利用途径

美国只有约 0.6%的采出水处理后进行再利用,方式主要为农业灌溉、市政道路洒水等。

在加州克恩河油田的 Bakersfield 区块,原本有三分之一的采出水进行地下灌注,但考虑到加利福尼亚某县年平均降雨量极少,农田灌溉供水日趋困难,因此,考虑将一部分采出水经一系列工艺处理后用于农田灌溉。到 2015 年,采出水的农业用途仅限于特定区域,如加利福尼亚州和怀俄明州。还有一部分采出水被用于市政,如道路洒水等。早在 90 年代,宾西法尼亚州为了减轻油气田废水对环境的负面影响,当地环保局专门制定了采油废水用于道路泼洒的实施细则,规范了采油废水从产生到运输再到使用的全过程,并在道路两边进行取水检测和分析,证明了只要水质达到导则标准,环境风险可以接受<sup>[4]</sup>。除了这些已有案例,其他行业包括采矿、畜牧等需水量都很大,

尤其在缺水的干旱地区,采出水处理达标后可以补充这些用水,减轻当地的水资源负担。

## 3 美国油气田采出水处置与利用存在的风险

### 3.1 地下处置引发地震的风险

美国采出水通常是地下处置或运往污水处理厂处理后排放。对于油田,大部分是将采出水回注,以维持地层压力和提高采收率,少部分进行地下灌注;对于气田,通常采用地下灌注方式,将采出水注入地下多孔的岩石或土壤中,以解决有水气藏开发过程中采出水的处理问题,从而减少采出水引起的环境污染。目前,按照注入液体类型和注入地层的不同,美国环保署将灌注井分成 6 大类,其中 II 类井用于灌注与油气生产相关的液体,主要是油气开采过程中伴生的盐水。截至 2010 年,美国 II 类灌注井共计 150 851 口,其中 80%用于注水、注蒸汽等,其余大部分井用于灌注石油天然气工业高盐废水,少部分井用于为地下储气库注气。油井回注和地下灌注都会产生一些负面影响,比如诱发地震。研究发现,美国发生中等、大型地震(震级大于 3 级)的次数从 20 世纪 70 年代的年均 21 次增加到了 2008 年的 151 次。

美国地质调查局(USGS)1973 年以来对德克萨斯州附近的地震监测数据显示,其中大多数是人为地震,与油气工业废水注入密切相关。有报道指出,美国俄克拉荷马州近十年内地震频发。自 2011 年以来,俄克拉荷马州的地震次数每年增加了近 800 倍,给当地居民的生活带来了极大的影响。此外,当地的油井经营者每年平均注入  $3.657 \times 10^8 \text{ m}^3$  液体。废水处理通常位于地表以下 1~2 km 深处,远深于淡水供应层。当沿断层面或在断层面附近注入压裂液时,很可能引发地震。因为地壳下几千米深处所承受的重压已使该处岩石接近破裂,废水(压裂液)的注入迫使流体压力上升,断层因此开始滑动,进而引发地震<sup>[5]</sup>。

根据美国地质调查局(USGS)的地震监测数据,俄克拉荷马州油气田附近地震频率非常高,且震级多为 2.5~3.5 级。此外,位于其他区域的油气田,如德克萨斯州的 Eagle Ford、Cogdell、Delaware 盆地,以及位于新墨西哥州的 Dagger Draw,都出现了由于采出水地下处置引发的地震。所以,将油气采出水大量注入地下的高风险是毋庸置疑的。

### 3.2 浅层处置带来的问题

研究小组发现,采出水地下灌注的深度和体积的联合作用至关重要,而注入量在层状沉积岩与结晶基

岩相遇的深度更有可能引发地震。同时还发现,如果将注入井的深度提高到关键区域的基岩之上,则可以显著减少每年地震所释放的能量,从而相对减少较大破坏性地震发生的可能性。因此,目前的监管干预措施要求经营者要么减少注入量,要么将注入井提升至基岩以上。而在基岩之上进行浅层处置,一是若这些废水外泄,对井筒附近的浅层地下水将产生一定的影响,严重时污染含水层;二是会导致地层压力增大,因超压而引起喷溢。

#### 4 结束语

美国采出水处置与利用方式主要包括地下灌注、同层回注、地表外排、农业灌溉和市政用水。其中地下灌注与同层回注是其采出水处置与利用最主要的两种方式。

对于国内油气田企业而言,采出水如何处置与利用是目前亟待需要思考与解决的问题。应借鉴美国采出水的多途径管理方式,因地制宜开展国内采出水合规、合理及安全处置与利用的研究及应用。可从以下方面着手:①一般采出水用于农业灌溉及绿化、市政用水的处理技术研究;②高矿化度采出水用于沙漠灌溉应用研究;③采出水满足地表排放与地下灌注要求等各种处置途径的经济技术界限研究;④采出水处理配套关键技术、设备、化学药剂研究<sup>[6]</sup>。国内相关企业与环保机构应围绕制约国内采出水处理的瓶颈

技术,加强科技创新和技术交流,加大新技术、新设备的推广应用力度,优化采出水处理工艺,全面提升采出水处理技术和管理水平,争取较大的经济效益和社会效益,满足油气田的可持续开发需求。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] SULLIVAN GRAHAM E J, JAKLE A C, MARTIN F D. Reuse of oil and gas produced water in south-eastern New Mexico: resource assessment, treatment processes, and policy. [J]. Water international, 2015, 40(5/6): 809-823.
- [3] VEIL J A. Regulatory issues affecting management of produced water from coal bed methane wells[R]. Chicago: argonne national laboratory, 2002.
- [4] 任磊.一种采油废水回用技术——道路泼洒[J].油气田环境保护,2007(6):4.
- [5] 赵纪东.俄克拉荷马州地震与废水注入深度密切相关[J].国际地震动态,2018(3):1.
- [6] 张维智,李冰,孙铁明.油田采出水处理的发展及展望[J].石油规划设计,2008,19(5):3-4.

(收稿日期 2019-01-03)

(编辑 郎延红)

## 国家重点研发计划“典型危险化学品储存设施安全预警与防护一体化 关键技术研究与应用示范”项目示范现场施工顺利完成

2016年7月,中国石油集团安全环保技术研究院有限公司与清华大学等共同承担的国家重点研发计划项目“典型危险化学品储存设施安全预警与防护一体化关键技术研究与应用示范”顺利通过国家科技部立项。其中,中国石油集团安全环保技术研究院有限公司负责“大型储罐地基沉降结构灾变模拟与强度评估技术研究”课题。该研究主要是防止储罐沉降引发罐体开裂导致的油品污染环境,有助于从根本上避免环境污染恶性事故的发生。此课题开展两年多来,项目研究人员通过多次开展现场调研、开专家评估会议、实验室试验等多种手段,取得了丰硕的成果,建立了10万m<sup>3</sup>原油储罐有限元模型,完成了典型储罐地基沉降结构强度评估方法研究。为更深入推进课题研究工作的开展,2019年4月9日,项目课题负责人赵永涛带领技术人员开展了某商业储备库205号罐沉降监测施工。施工内容包括储罐的结构强度测试软、硬件的布置与调试工作,目前已顺利完成罐壁应变传感器的安装、主机安装、光缆布设、软件调试的工作,为下一步避免大型储罐失效引起的环境污染提供支持,也为中国石油集团安全环保技术研究院有限公司以后争取罐区环境治理方面的研究立项提供技术支持。

(供稿:中国石油集团安全环保技术研究院有限公司 赵永涛)