

# 我国油田产出水再利用技术现状及展望\*

田建超<sup>1</sup> 李玉涛<sup>1</sup> 修书志<sup>1</sup> 张艺<sup>2</sup> 张陶宁<sup>1</sup> 许正栋<sup>1</sup>

(1. 中国石油华北油田工程技术研究院; 2. 中国石油华北油田经济技术研究院)

**摘要** 随着我国油气田勘探开发力度加大和新环保法的实施,油田开采过程中耗水量大和污水处理问题是我国油气田企业面临的共同难题。从污水余热回收、污水回注、压裂液重复利用、钻井废水再利用四个方面,介绍了国内油田产出水再利用技术研究进展与应用现状,指出目前存在的污水余热再利用应用范围不广、回注污水利用不合理、化工原料未回收利用等主要问题。并通过文献调研,展望了油田污水再利用技术的发展方向,指出需从污染源头防控入手,研发更加经济环保的液体配方,并深入研究从污水中取热、取水及取化工原料的循环再利用技术,因地制宜制定相应的水质及污水配伍性实验评价标准,实现从源头至末端治理相结合的油田污水清洁生产。

**关键词** 油田采出水; 再利用; 现状; 展望

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2021.01.004

文章编号: 1005-3158(2021)01-0015-06

## Present Situation and Prospect of Oilfield Wastewater Reuse Technology in China

Tian Jianchao<sup>1</sup> Li Yutao<sup>1</sup> Xiu Shuzhi<sup>1</sup> Zhang Yi<sup>2</sup> Zhang Taoning<sup>1</sup> Xu Zhengdong<sup>1</sup>

(1. *Engineering Technology Research Institute, PetroChina Huabei Oilfield Company*;

2. *Economic and Technical Research Institute, PetroChina Huabei Oilfield Company*)

**ABSTRACT** With the increase of China's oil and gas exploration and the implementation of the new environmental protection law, the large consumption of water and the problem of sewage treatment had been the major issue for oil and gas enterprises in China. The paper summarized the relevant research and application of domestic wastewater reuse technology, including, waste heat recovery, sewage re-injection, fracturing fluid reuse and drilling wastewater reuse. Pointed out the main problems and the future development direction of current sewage reuse technology. According to literature research, the current sewage reuse technology is in the stage of heat extraction and water intake. The reuse of chemical materials needs further study; the sewage treatment technology is uneven and it is necessary to combine wastewater treatment technology to improve sewage reuse technology; studying environmentally friendly liquid formula to prevent and control pollution from the source; formulating water quality evaluation standards and relevant experimental evaluation standards for compatibility of wastewater based on local conditions.

**KEY WORDS** oilfield wastewater; reuse; present situation; prospect

## 0 引言

近年来,随着我国石油勘探开发力度加大,消耗的水资源及油田产出水量也不断增加,产生的污水主要包括钻井废水、压裂液返排液和地层采出水。如何解决水资源消耗量大和污水处理的问题,是油田企业面临的一大难题。目前国内主要采用的污水再利用包括污水余热回收、污水回注、污水配制压裂液及钻

井废水再利用技术。通过采用这些技术,既可以降低油田开发过程中的水资源消耗,又能节约污水处理成本,有助于油田企业降本增效。

## 1 油田污水再利用技术现状

### 1.1 油田污水余热回收再利用技术

随着我国各主要油田开发进入了中后期,采出液含水率高达70%,有的甚至超过90%,另外我国多数

\*基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“华北油田持续有效稳产勘探开发关键技术研究与应用”(2017E-1505-3)。

田建超,2018年毕业于中国石油大学(北京)油气井工程专业,现在中国石油华北油田工程技术研究院从事水力压裂及砂岩酸化技术研究工作。通信地址:河北省任丘市会战道华北油田工程技术研究院,062550。E-mail:2363760116@qq.com。

超稠油藏使用热采技术进行开采,产出大量温度达30~70℃的污水,余热丰富。若能充分提取并用于供暖、油田生产中的油水分离和原油集输等过程,既能降低油气生产能耗,还能减少对环境的污染。目前国内学者主要采用热泵技术回收油田采出水的低温余热<sup>[1]</sup>。

2011年,朱焕来等<sup>[2]</sup>提出充分利用油田采出水伴生地热资源,并将其定义为油田产出水型地热资源。通过调研分析得出:该地热资源储量大、成本低,在油田生产和周边居民生活应用前景大。

2012年,陈旭<sup>[3]</sup>提出将热泵系统回收油田污水余热用于冬季取暖,以自然清水用于制冷。通过现场试验,表明该技术能够满足生活供暖需求。

2013年,姚尧等<sup>[4]</sup>提出采用热泵技术将油田污水余热进行回收,用于对输送伴热水进行加热。采用Matlab开展仿真模拟研究,结果表明:该工艺可将稠油伴热水加热到75℃,能耗分析结果表明,相对于传统锅炉加热,该工艺系统可节省标煤17 t/a。

2014年,王志国等<sup>[5]</sup>针对热泵系统传热和蒸发提出新的换热计算方法,并利用自主研发的模拟试验装置进行油田采出水低温余热回收可行性分析。结果表明热泵装置回收余热效果显著,但成本较高。

2015年,王冰等<sup>[6]</sup>系统地阐述了污水热泵系统工作原理、构成及分类,调研了热泵系统在各油田应用情况,总结了目前热泵技术应用于回收油田污水余热存在的主要问题。

2016年,吕喜柱<sup>[7]</sup>对大港油田某联合站污水余热进行回收,提出吸收式热泵为主、真空加热炉为辅的改造方案,通过建立的吸收式热泵理论模型,优化各部件运行参数,现场试验数据验证了理论模型,为热泵技术在回收油田污水余热提供了理论基础。

2018年,赵满等<sup>[8]</sup>提出采用蓄能式热泵将油田污水余热进行回收,同时可以根据实际用能情况,实现储能和放能。

## 1.2 油田污水回注技术

注水开发作为油田维持地层压力、提高采收率的一种重要开采方式,已经形成较为完善的工艺技术体系。由于地表水或者浅层地下水具有充足的供给能量、水质稳定等优势,一直是注水开发的主要水源,但过量使用地下水会对生态环境造成严重影响,同时伴随着油田污水产量逐渐增加,造成油田采出水环保处理问题也日益紧迫。而污水回注既可以补偿地层压力,又可以解决油田产出水处理难问题,是油田合理开发和循环利用水资源的正确方向<sup>[9]</sup>。

1996年,张宁生<sup>[10]</sup>进行油田污水回注室内实验研究时,分析了固相颗粒和油珠的物理性质,并发现注入速度对储层渗透率的影响规律。通过网络模型模拟,佐证了实验数据,揭示了污水回注对储层伤害机理。

2002年,杨堃等<sup>[11]</sup>针对魏岗高凝油田采用热水驱成本较大的问题,通过前期模拟研究得出:采用污水回注既能保证高效开发,又能减少污水排放。

2003年,潘世兵等<sup>[12]</sup>根据测井、钻探等资料,借助GIS对辽河油田污水回注层位进行了适宜性评价,在考虑6个评价因素的基础上得出适宜性等级分区图。

2007年,王秀平等<sup>[13]</sup>针对污水回注会影响可动凝胶调驱技术的应用问题,提出利用油田污水配制可动凝胶调驱体系。室内实验表明该体系热稳定性强,满足现场施工要求。李海涛<sup>[14]</sup>等应用正交试验法研究了回注污水中乳化油和悬浮固体颗粒的物理性质对储层渗透率的影响规律,并得出了油滴和颗粒的临界粒径。

2008年,齐梅等<sup>[15]</sup>针对秘鲁1AB/8区块污水回注量大、回注费用高的难题,通过优选污水回注层位、优化回注污水水质、增加局部射孔密度、诱导部分地层破裂等方法,实现了低压大排量污水回注。

2012年,李建山等<sup>[16]</sup>通过ESEM和储层敏感性评价实验,提出了解决大牛地气田污水回注井压力上升较快的方法。并指出由于该储层具有弱速敏、强水敏特点,需要控制污水注入速度和优化注入污水水质。

2013年,肖荣鸽等<sup>[17]</sup>通过室内实验研究得出污水回注系统腐蚀结垢问题的根本原因在于水质不达标,研究筛选出了除铁剂,对现有污水处理技术进行升级改造,有效的控制了腐蚀结垢问题。

2013年,邵智等<sup>[18]</sup>将WAA—4油田采出水样品用清水剂处理后,开展了污水对地层敏感性评价实验。结果表明:污水对地层为弱碱敏、弱温敏,无盐敏损害,并提出回注污水中固相颗粒含量、粒径以及含油量的上限。

2014年,赵子豪<sup>[19]</sup>对现场污水回注水样进行了速敏和水敏实验。结果表明速敏和水敏均为中等偏弱。何芬等针对海上油气生产产出的污水量大和平台处理能力有限问题,提出将污水处理后回注到地层。通过引入摩尔库伦准则得出断层活化的临界压力,结合地质特点和污水回注量,优化布井位置。该方法为海上污水回注提供理论依据。

2015年,刘小兵等<sup>[20]</sup>针对油田各区块注水量和污水量供需不平衡问题,首先采用改性纤维球对污水

进行预处理,使其达到注水水质要求,然后对污水进行深度处理,使污水达到二次分配水质要求。

2015年,杨海博<sup>[21]</sup>针对聚驱油田产出的含聚污水处理难问题,开展污水回注储层可行性研究。通过室内配伍性实验和岩心驱替实验得出清水与污水的最优混合比例,优化回注含聚污水的水质指标。

2015年,山城等<sup>[22]</sup>为解决安塞油田王南寨160区块酸性采出水回注时严重腐蚀地面系统、井筒的问题,利用室内静态腐蚀挂片测试、SEM和XRD分析得出,溶解氧、细菌和碳酸氢根离子是造成腐蚀的主要因素。通过向污水中加入NaOH提高酸性水pH值的方法研究,有效降低腐蚀速率和结垢趋势。

2016年,刘慧<sup>[23]</sup>针对大牛地气田回注污水进行水质分析得出:回注污水易结垢,结垢成分主要是碳酸钙。另外大牛地气田采用注甲醇方法预防水合物生成,因此回注污水中含甲醇量呈现周期性变化,结合岩心渗透率实验和现行气田水回注标准制定了适用于该气田采出污水回注标准。

### 1.3 压裂液重复利用技术

随着常规油气资源逐渐枯竭,非常规油气从幕后转向台前,而水力压裂是非常规储层增产的重要措施。随着非常规油气资源开采力度加大,压裂液用量从几百立方米增长到几千立方米,压裂用水量和压裂废水急剧增加。为解决储层改造需水量大和压裂废水污染问题,国内外众多学者提出将地层采出水和压裂返排液处理后,使用处理液配制压裂液的再利用技术<sup>[24]</sup>。

2011年,李谦定等<sup>[25]</sup>将稠化剂羟丙基胍胶、交联剂硼砂、破胶剂缓释型SS-1配制成基液,与南泥湾采油厂的压裂返排液以1:3混合,通过优化交联剂、破胶剂和交联促进剂的用量,最终确定重复利用压裂液配方。室内评价实验结果表明该压裂液体系性能满足现场施工要求,实现压裂液重复利用。

2011年,张建国等<sup>[26]</sup>提出以油层水为基液配制压裂液。通过室内实验优选有机硼、生物酶为交联剂和破胶剂,最终确定适用于低温储层的压裂液配方。实验证明该压裂液体系满足现场施工要求。

2014年,刘月亮<sup>[27]</sup>利用化学法对大牛地气田压裂返排液进行处理,重复利用处理液配制压裂液,并与蒸馏水所配制的压裂液进行对比评价,结果表明所配制污水压裂液性能良好,满足现场施工要求。

2014年,蒋继辉等<sup>[28]</sup>提出了三种长庆油田压裂废水再利用方式,即处理后回注、用于配制压裂液、用于配制聚合物用水,并对比三种方式的水质要求

和处理方法,为缓解压裂用水带来的环保问题提供了思路。

2015年,高燕等<sup>[29]</sup>提出压裂返排液重复利用技术,通过两级氧化—混凝法处理破胶液,再利用静置过滤后得到的清液配制胍胶压裂体系,实验表明该压裂液体系性能优良,满足现场施工要求。

2015年,刘立宏等<sup>[30]</sup>提出利用自主研发的污水处理装置将返排液过滤后重复配制压裂液。通过室内优化实验确定了BCG-1非交联缔合型压裂液的最佳配方,性能评价结果表明,该压裂液具有携砂性好、耐高温剪切、破胶彻底、残渣含量低等优点。

2016年,邹鹏等<sup>[31]</sup>开展了压裂返排液中高价金属离子对所配制压裂液性能的影响研究。实验结果表明:金属离子对基液黏度影响不大,但HPG完全溶胀时间有所改变,钙镁离子能增加冻胶黏度,缩短其交联时间。为保证压裂液耐温性,得出了钙镁铁离子的安全浓度。

2016年,王改红等<sup>[32]</sup>利用一种由天然酶和分子改造酶组成的破胶剂XYPJ-2对稠化剂XYCQ-1的分子结构进行改变,实现压裂液成胶破胶可逆,通过添加XYTJ-1水质调节剂,螯合高价金属离子,消除其对成胶的影响。现场试验证明该清洁压裂液满足长庆油田压裂施工要求。

2017年,王娟娟等<sup>[33]</sup>提出重复利用地层水配制压裂液,并优化得到BCS分子自缔合压裂液及130℃配方,室内评价实验表明:该压裂液具有耐温抗剪切性能和携砂性能良好、破胶彻底、残渣含量低等优势,将返排液与60%自来水混合后重复配制BCS压裂液,压裂液性能基本能达到原配方标准。

2017年,管保山等<sup>[34]</sup>向返排液中添加自主研发的处理剂(TR-1、TR-2、TR-3),可分别降低返排液中钙镁离子、残余破胶剂和残余硼离子交联剂浓度,使重复用处理液配制的压裂液达到现场施工要求,在长庆油田取得较好应用效果。

2017年,周文胜等<sup>[35]</sup>利用返排液建立了一种表面活性剂驱油体系。室内实验表明:表面活性剂在该体系中的有效质量分数为0.05%~0.30%时,能够极大降低油水界面张力,改变岩石润湿性;同时,该体系动态饱和和吸附量为9.53 mg/g,且水驱后岩心内滞留表面活性剂量很少,仅有25%~33%残留。室内岩心模拟驱油实验反映出该体系能够提高采收率12.5%,为重复利用清洁压裂返排液提供新思路。

### 1.4 钻井液不落地技术

水基钻井废液主要由钻井废水和岩屑组成,完井

后对钻井废液一直采用固化填埋等方法进行集中处理,其处理费用高,占地面积大,容易对土壤和植被造成不良影响。钻井液不落地技术包括水基钻井液重复利用技术和岩屑无害化资源化利用技术<sup>[36-37]</sup>,能够实现钻井废物无害化再利用,本文主要对水基钻井液重复利用技术进行概述。

2009年,李洪兴等<sup>[38]</sup>针对不同钻井阶段的废水进行水质分析,开展了钻井废水回收再利用配制钻井液实验。得出钻井废水适用于配制胶液,但不能用于配制原浆的结论。

2014年,高清华等<sup>[39]</sup>针对王庄油田储层水敏性强的问题,通过将油基泥浆、强抑制泥浆、MEG环保泥浆进行固化对比实验,得出MEG泥浆固化浸出液满足GB 8978—1996《污水综合排放标准》一级排放标准。

2015年,刘光全等<sup>[40]</sup>调研了国内外水基钻井废物处理技术现状,重点总结了国内水基钻井废液处理技术的优点与不足,提出了加快环境友好的钻井液技术及配套装备的研发,丰富、完善钻完井废物无害化与资源化技术体系的建议。

2016年,唐磊<sup>[41]</sup>针对苏北油区钻井产生的废液和钻屑处理问题,提出应用钻井废液随钻不落地处理工艺对钻井废液进行三步法处理,即首先进行钻井废液特性分析,其次是钻井废液处理及综合利用技术,最后是钻井废液处理效果评价,具体流程见图1。现场应用效果表明该工艺满足现场施工要求,实现了钻井废液零排放目的。

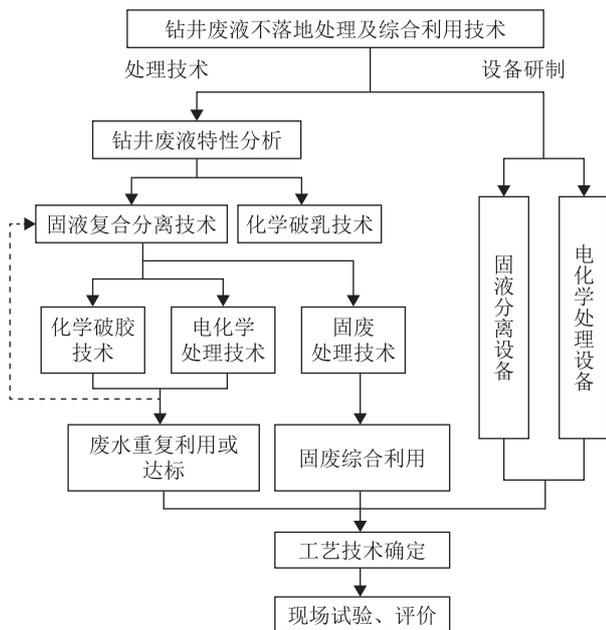


图1 钻井废液不落地技术系统流程

2016年,黄晓霞等<sup>[42]</sup>针对苏里格气田无害化处理后的钻井固相和液相进行检测,结果表明其有机物含量、固相含水率以及液相色度、pH值等均达到GB 8978—1996《污水综合排放标准》一级标准要求,液相COD指标经氧化处理后也达到标准要求。

2016年,程玉生等<sup>[43]</sup>通过调整固控设备参数筛除了粒径64 μm以上的固相颗粒,实现了控制钻井废水中固相含量和粒径,随后进行防腐处理,再向处理液中添加新浆进行稀释,检测得出新配制钻井液性能满足现场施工要求。

2017年,许毓等<sup>[44]</sup>采用物理分离技术将高性能水基钻井废物分离成固、液两相,固相回收用于制成免烧砖和铺路基土,浸出液满足GB 8978—1996《污水综合排放标准》一级排放标准,液相用于重新配制钻井液,能满足现场施工要求。

2018年,谢水祥等<sup>[45]</sup>提出利用电化学吸附法去除钻井废液中粒径10 μm以下的固相颗粒,通过室内实验确定最优吸附条件,现场应用效果显示粒径10 μm以下的固相颗粒去除率达到90%以上。为实现废水基钻井液再生利用提供了新思路。

## 2 油田污水再利用技术存在的问题

### 2.1 油田污水余热回收再利用技术存在问题

虽然各油田进行了很多热泵回收采出污水低温余热先导性试验,取得了一定效果,但受以下因素影响没有实现广泛应用。

1) 热泵技术对水质要求较高。油田污水经过物理化学方法处理后,换热器仍会产生腐蚀和结垢问题。需要研发新型耐腐蚀换热器,并对进入换热器的污水制定严格的水质标准,定期检查、维修换热器。

2) 初期投资额大,导致热泵回收余热项目搁浅。需要加大热泵技术研发力度,降低成本、提高余热利用率,真正实现节能降耗、降本增效。

### 2.2 油田污水回注技术存在问题

1) 回注污水资源利用不合理。各区块污水产出量与注水量不对等,导致有些区块污水剩余量大,有些区块污水产出量少无法满足地层水补充注入量。

2) 含聚污水中聚合物未被利用,造成化工原料的浪费。污水中聚合物一般都被降解到水质标准浓度以下,造成大量化工原料浪费、处理成本高等问题。若能研制聚合物可回收利用技术将节约处理成本。

3) 污水处理技术有待提高。应根据各区块污水特点,分类型存放,避免新污染产生,并研发更加环保经济、有针对性的处理技术,实现对采出污水精细化

处理。

### 2.3 压裂液重复利用技术存在问题

1)目前主要技术是向返排液中添加处理剂,以达到降低返排液中钙镁离子、残余破胶剂和残余硼离子交联剂浓度的目的,需要消耗大量处理剂,且未充分利用返排液中的有用化工原料。

2)目前不同类型压裂返排液集中存放处理较多,会造成新的污染产生,增加了处理成本。应根据压裂液类型,实现分类存放和针对性处理。

3)应从源头上控制污染,研发更经济环保可重复利用的压裂液,实现化工原料的重复利用是今后水基压裂液的发展方向。

### 2.4 钻井液不落地技术存在问题

我国废钻井液无害化处理技术较国外存在集成化水平低、效果不理想、处理结果不稳定等问题,严重影响我国油气田勘探开发。应出台相关政策,鼓励和扶持相关钻井废物不落地处理技术的研发与推广应用。

## 3 结论与建议

1)深入开展油田污水资源多级利用技术研究,形成从污水中取热、取水、取化工材料的一整套多级循环利用技术体系,实现变废为宝、可持续绿色发展。

2)从污染源头进行控制,研发更经济环保的液体配方。钻井液与压裂液体系中需添加大量化学试剂,废液进入地层后会造成污染,钻井废液和返排液处理困难。应研发更环保、易返排、可回收利用的添加剂和处理剂,实现环境污染源头控制。

3)研究并推广无水技术在油气田开采过程中的应用。如高能气体压裂技术、气体钻井技术等,减少水资源消耗和污水处理成本。

### 参考文献

- [1] 唐志伟,刘爱洁.油田污水余热资源开发利用[J].化工进展,2009,28(增刊1):423-425.
- [2] 朱焕来,施尚明.油田产出水型地热资源开发研究[J].科学技术与工程,2011,11(13):3052-3054.
- [3] 陈旭.喇嘛甸油田污水的余热利用[J].油气田地面工程,2012,31(1):18-19.
- [4] 姚尧,吴明,贾冯睿,等.稠油热采过程中余热资源的高效回收与利用[J].辽宁石油化工大学学报,2013,33(1):60-63.
- [5] 王志国,尹柴玲,宋永臣,等.高温热泵回收油气生产低温余热室内模拟试验及应用研究[J].工程热物理学报,2014,35(10):2058-2062.
- [6] 王冰,成庆林,孙巍.热泵技术在回收油田污水余热资源中的应用[J].当代化工,2015,44(8):1839-1841.
- [7] 吕喜柱.吸收式热泵用于回收油田联合站余热的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016:19-38.
- [8] 赵满,宋泓霖,李炜,等.蓄能式热泵在油田联合站中的经济性分析[J].石油石化节能,2018,8(9):55-57.
- [9] 程汉东.低渗油藏污水回注处理工艺技术研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2013:1-4.
- [10] 张宁生.颗粒与油珠造成地层损害的实验与网络模拟研究[J].石油勘探与开发,1996(2):48-51.
- [11] 杨堃,樊中海,朱楠松,等.魏岗高凝油田常规污水回注开发模式探讨[J].石油勘探与开发,2002,29(2):94-96.
- [12] 潘世兵,王忠静,周宏,等.辽河油田污水回注适宜性评价模型[J].石油大学学报(自然科学版),2003,27(3):67-70.
- [13] 王秀平,黄震,刘艳学,等.高温复杂断块油藏中油田污水配液调驱研究[J].断块油气田,2007(6):52-54.
- [14] 李海涛,王永清,谭灿,等.砂岩储层清水和污水混注对储层损害的实验评价[J].石油学报,2007,28(2):137-139.
- [15] 齐梅,郑小武,尹秀玲,等.地层破裂状态下实施大排量污水回注技术研究[J].石油学报,2008(3):455-458.
- [16] 李建山,林安邦,刘宇程,等.大牛地气田污水回注井回注压力过高原因及对策研究[J].钻采工艺,2012,35(3):78-81.
- [17] 肖荣鸽,周加犬,易冬蕊,等.油田污水回注系统防腐蚀结垢工艺改造[J].腐蚀与防护,2013,34(2):147-150.
- [18] 邵智,张峙.WAA—4油田污水回注储层损害评价[J].油气田地面工程,2013,32(9):62-63.
- [19] 赵子豪.油田产出污水回注对储层伤害评价[J].油气田环境保护,2014,24(5):7-8.
- [20] 刘小兵,汪益宁,刘兵.大港油田污水资源化利用技术及评价[J].油气田地面工程,2015,34(11):76-78.
- [21] 杨海博.含聚污水对回注储层的适应性研究—以海上某油田含聚污水回注为例[J].科学技术与工程,2015,15(10):180-184.
- [22] 山城,王瑶,王玉龙,等.安塞油田酸性采出水回注水的腐蚀性及其改性研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2015,30(1):100-104.
- [23] 刘慧.大牛地气田产出污水回注标准的制定[J].长江大学学报(自然科学版),2016,13(34):63-65.
- [24] 王满学,刘建伟,何静,等.水基压裂液重复使用技术的现状及发展趋势[J].断块油气田,2018,25(3):394-397.
- [25] 李谦定,张营,李善建,等.羟丙基胍胺压裂液重复利用技术研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2011,26(5):60-63.
- [26] 张建国,李艳,于洪江.油层水配制压裂液研究及性能评价[J].西安石油大学学报(自然科学版),2011,26(2):60-63.
- [27] 刘月亮.大牛地气田污水配制压裂液研究[D].青岛:中

- 国石油大学(华东), 2014:32-37.
- [28] 蒋继辉, 冀忠伦, 任小荣, 等. 长庆油田压裂废水回收再利用方式探讨[J]. 油气田环境保护, 2014, 24(5):35-36.
- [29] 高燕, 赵建平, 纪冬冬. 2 级氧化—混凝法实现压裂返排液重复利用[J]. 水处理技术, 2015, 41(11):115-118.
- [30] 刘立宏, 陈江明, 刘通义, 等. 东北油气田压裂液返排液重复利用技术[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(4):92-95.
- [31] 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.
- [32] 王改红, 廖乐军, 郭艳平. 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.
- [33] 王娟娟, 刘翰林, 刘通义, 等. 东北油气田可重复利用地层水基压裂液[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(3):338-343.
- [34] 管保山, 梁利, 程芳, 等. 压裂返排液取水应用技术[J]. 石油学报, 2017, 38(1):99-104.
- [35] 周文胜, 王凯, 刘晨, 等. 清洁压裂液返排液再利用驱油体系研究[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(2):160-166.
- [36] 孙海芳, 王长宁, 刘伟, 等. 长宁—威远页岩气清洁生产实践与认识[J]. 天然气工业, 2017, 37(1):105-111.
- [37] 李维斌, 张阳. 大牛地气田钻井液不落地技术与实践[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2016, 18(1):57-59.
- [38] 李洪兴, 安利, 叶林祥, 等. 钻井废水处理及回收利用[J]. 天然气工业, 2009, 29(3):74-76.
- [39] 高清华, 邓清风, 郑晓忠. MEG 环保泥浆在王庄油田强水敏储层的应用[J]. 油气田环境保护, 2014(3):27-29.
- [40] 刘光全, 陈海滨, 胡彬, 等. 水基钻井废弃物“不落地”处理技术发展的分析[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(35):49-54.
- [41] 唐磊. 钻井废液随钻处理技术在苏北油区的应用[J]. 油气田环境保护, 2016, 26(6):15-17.
- [42] 黄晓霞, 岳前升, 吴洪特, 等. 钻井废弃物无害化现场处理结果分析[J]. 长江大学(自然科学版), 2016, 13(19):10-13.
- [43] 程玉生, 张立权, 莫天明, 等. 北部湾水基钻井液固相控制与重复利用技术[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(2):60-63.
- [44] 许毓, 刘光全, 邓皓, 等. 高性能水基钻井液废物不落地处理先导试验[J]. 油气田环境保护, 2017, 27(3):19-20.
- [45] 谢水祥, 任雯, 乔川, 等. 可实现废弃水基钻井液再生利用的电化学吸附法[J]. 天然气工业, 2018, 38(3):76-80.

(收稿日期 2020-03-23)

(编辑 刘晓辉)

(上接第 14 页)

- [5] 韩莉. 应用旋流萃取技术处理电脱盐污水中试研究[J]. 齐鲁石油化工, 2013, 41(4):265-268.
- [6] 张华. 电脱盐装置稳定运行及污染治理问题的研究[J]. 油气田环境保护, 2019, 2(28):14-18.
- [7] 田青, 徐衍柱, 张宁宁, 等. 用于脱盐水生产的反渗透新技术[J]. 石油和化工节能, 2008(1):13-15.
- [8] 常青, 薛锦花. 絮凝沉淀法处理含油废水的絮凝优化复配研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1):54-57.
- [9] 程斌, 周冕, 莫建松. 混凝-Fenton 法预处理模拟电脱盐废水[J]. 环境工程, 2010, 28(6):31-35.
- [10] 解洪梅. 高含盐石化污水处理研究进展[J]. 齐鲁石油化工, 2009, 37(1):64-70.
- [11] 张凤华. 原油电脱盐技术研究进展[J]. 化工科技, 2013, 2(25):71-74.
- [12] 畅显涛, 叶正芳, 高峰, 等. 用含固定化微生物的曝气生物滤池处理炼油厂高浓度废水[J]. 化工环保, 2010, 30(6):516-519.
- [13] 牛丽娜, 周文斌. 无机有机复合絮凝剂[J]. 水资源与水工程学报, 2004(1):59-63.
- [14] 陈家庆, 李汉勇, 常俊英, 等. 原油电脱水(脱盐)的电场设计及关键技术[J]. 石油机械, 2007(1):53-58.
- [15] 丁禄彬. 臭氧和 Fenton 试剂处理石化电脱盐废水研究[J]. 安全、健康和环境, 2015, 15(3):39-41.
- [16] 白志山, 汪华林. 原油旋流脱盐脱水试验研究[J]. 石油学报, 2011, 22(4):56-60.
- [17] 李金玉, 韩巍, 王西奎, 等. 电化学方法处理邻硝基氯苯的研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(4):861-864.

(收稿日期 2020-04-25)

(编辑 刘晓辉)