

超声波降解油田含聚污水研究进展

王 泉, 祝宏平, 李洁冰, 贾晓春

(新疆油田公司石西油田作业区, 新疆克拉玛依 834000)

摘要: 随着聚合物驱、复合驱等三次采油技术在油田开采中的广泛应用, 我国原油的采收率得到有效提高, 但是伴随产生的含聚污水量也在成倍增加, 油田含聚污水难降解问题也成为污水处理相关领域研究的热点。超声波降解技术具有氧化能力强、降解速率快且无二次污染等优点, 在污水处理中的应用越来越受到重视。介绍了目前油田含聚污水的特性, 并分析了超声波对污水中聚丙烯酰胺的降解机理以及对水包油乳状液的破乳机理, 综述了国内外超声波降解技术在油田含聚污水处理的现状。结合不同类型油田含聚污水的特点, 展望了未来超声波降解技术处理油田污水的发展趋势。

关键词: 超声波技术; 聚合物降解; 破乳机理; 油田污水处理

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-02-0141-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.02.008

Research progress in ultrasonic degradation technique of polymer-bearing oilfield wastewater

WANG Quan, ZHU Hong-ping, LI Jie-bing, JIA Xiao-chun

(Shixi Oilfield Operation Areas of Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, Xinjiang, China)

Abstract: The polymer-flooding and combination-flooding as well as other tertiary oil extraction techniques have been widely used in Chinese oilfields in recent years. Although these techniques are able to enhance the oil recovery, more and more polymer-bearing wastewater as by product is thus fold increased per year, which leads to that the degradation of polymer-bearing oilfield wastewater plays a critical and difficult role in oilfield wastewater treatment. Due to the advantages of the ultrasonic degradation technique in strong oxidizing property, high degradation efficiency and no secondary pollution, more and more attention has been paid to its applications in wastewater treatment. In this article, the microscopic mechanism of the ultrasonic degradation technique and the characteristics of polymer-bearing oilfield wastewater are described. Also, further analysis is conducted about the polymer degradation mechanism of using ultrasonic irradiation for polymer-bearing oilfield wastewater and the demulsification mechanism of oil in water. Furthermore, the ultrasound degradation technique and the combined techniques in polymer-bearing both at home and abroad are summarized, in addition the future development trend of treating oilfield wastewater by ultrasonic irradiation is predicted.

Key words: ultrasonic technique, polymer degradation, demulsification mechanism, oilfield wastewater treatment

0 引言

目前, 聚合物驱作为一种重要的三次采油技术, 可以有效提高原油的采收率, 在油田开采过程中得到大面积推广及应用, 但伴随产生的油田含聚污水量也随之增加^[1]。油田含聚污水是由水溶性聚丙烯酰胺(Hydrolyzed Polyacrylamide, HPAM)高分子胶体、油水乳液以及固体无机物混合在一起而形成的复杂体系, 与注水驱采油污水的水质相比, 含

聚污水的粘度大, 污水中的胶体颗粒稳定性强, 携砂量较高, 而采用常规注水驱采油污水处理工艺处理含聚污水难以达到回注或外排的标准^[2]。因此, 油田含聚污水的降解问题也成为油田污水处理的重点和难点^[3]。

近年来, 除了一些常规含聚污水降解方法(如物理降解法^[4]、化学降解法和过滤法等)外, 一些新型含聚污水处理方法也应运而生, 包括超声波降解法、微波处理法、超滤膜处理法^[5]等。而超声波降解技术具有降解速度快、适用范围广、且无二次污染等优点, 是一种很有发展潜力和应用前景的技术。本文介绍了油田含聚污水的特性, 并重点分析了超声波对污水中聚丙烯酰胺的降解机理以及对水包油乳状液的破乳机理, 综述了国内外采用超声

收稿日期: 2017-12-04; 修回日期: 2018-02-07

作者简介: 王泉(1991—), 男, 山东临沂人, 硕士, 工程师, 研究方向为提高采收率与采油化学。

通讯作者: 王泉, E-mail: quanyun623121@163.com

波降解油田含聚污水研究进展,为油田含聚采油的污水处理提供参考。

1 油田含聚污水的特性

油田含聚污水中不仅含油量高,而且含有大量残余聚合物。由于聚合物的存在,增加了油田含聚污水降解的难度^[6]。与普通采油污水的水质条件相比,油田含聚污水呈现出新的特征:① 污水的粘度大^[7]。由于污水中含有大量的聚合物,会成倍地增加采出水的粘度(通常增加 4~6 倍),从而增加了油水分离的难度。② 污水乳化程度高。污水中的聚合物与表面活性剂一起形成分子排列紧密、弹性良好的复合膜,增加了污水破乳的难度,导致含聚污水中的油含量较高。③ 污水中的油滴粒径小。由于聚合物的存在导致界面电荷增强、界面能增加,小油珠的比表面积更小,油滴粒径中值约为 3~5 μm ,其中粒径小于 10 μm 的占 90%以上,因而增加了含聚污水的后期处理难度^[8]。④ 污水组成复杂。含聚污水不仅含有石油烃类、固体悬浮物颗粒、无机盐、细菌等,而且聚合物具有较强的吸附性,提高了胶体颗粒的稳定性,增加了分离和沉降的时间^[9]。

2 超声波技术在油田含聚污水处理中的应用

超声波降解油田含聚污水受多种因素影响,如介质理化性能(溶液粘度、矿化度和表面张力等)、超声波系统设置(声强、频率和处理时间等)和外界因素(温度、压力等)^[10],根据不同的含聚污水理化性质,选择相应的降解聚合物最优条件下的超声波系统设置。超声波降解油田含聚污水主要依靠对聚合物的降解和对含油乳液破乳两个方面的作用,其次是对含聚污水杀菌和粉碎大分子悬浮固体颗粒的作用。

2.1 超声波降解有机聚合物

2.1.1 超声波降解有机聚合物的机理

污水中的聚合物在超声波辐照下发生大分子断裂的过程中,主要依靠空化作用以及伴随产生的自由基氧化作用对有机聚合物进行降解。

(1) 空化作用。在超声波的波腹形成驻波时,可能生成共振尺度的空穴,长链聚合物分子以相应的共振频率脉动而破裂。同时,在空化泡崩溃的瞬

间(<100 ns),会产生高于 5 000 K 的高温 and $5 \times 10^7 \text{ Pa}$ 的高压,即形成所谓的“热点”;温度变化率达 $10^9 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,并伴有时速高达 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的射流及强烈的冲击波。这些极端条件都可以直接或间接地使水中聚合物大分子链断裂,促使聚合物发生降解^[11]。

(2) 自由基氧化作用。污水溶液中的 H_2O 在超声空化气泡崩溃的瞬间伴随产生的高温、高压裂解生成 $\cdot\text{OH}$ 自由基。随后,自由基会进一步引发聚丙烯酰胺链 α -裂解反应和 β -裂解反应,使主链断裂,引起聚丙烯酰胺分子量迅速下降,从而使溶液的粘度下降,提高聚合物降解的效率^[12]。刘德新等^[13]综述了降解驱油用聚丙烯酰胺的研究进展,他认为超声波降解聚丙烯酰胺具有其独特的机理,超声作用使聚合物优先在链的中点发生断裂,并不像热降解聚合物是随机发生链断裂。

空化作用和自由基氧化作用是超声波降解聚合物的主要机理,但两种作用对于降解反应的贡献度有所不同。叶建忠^[14]利用一定频率的超声波辐照污水中的有机物质,通过分析降解产物演变的过程,认为污水介质中亲水性有机物(如苯系物、聚合物等)的超声波降解主要由自由基或同 H_2O_2 反应完成。Dewulf 等^[15]利用超声降解有机物表明:以毫摩尔浓度的自由基反应对整个降解的贡献几乎可以忽略,降解主要是由高温高压机制完成;但随着自由基浓度的降低,微摩尔浓度的自由基反应对有机物氯苯降解的贡献率达到 48.3%。姜秉辰等^[16]应用高效液相色谱仪可以检测到溶于水中的被自由基氧化的物质分子量;检测结果显示,在相同的时间和频率下,超声波的功率越高,裂解效果越好,分子量降低得越大,自由基氧化作用越大。

2.1.2 超声波降解聚合物的研究进展

目前国内外对聚丙烯酰胺(HPAM)超声波降解技术的报道基本处于实验理论探究阶段,在油田施工现场应用相对较少。Yen 等^[17]探究了部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)溶液超声波降解的影响因素;实验发现,随着超声时间的增加和溶液体系温度的提高,HPAM 的降解程度也提高,且其降解程度与体系温度符合 Arrhenius 定律,超声波降解 HPAM 的活化能达 $43.9 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。陈荣等^[18]对 500 mL 的油田含聚污水分别进行不同作用时间、不同频率和辐射功率的超声波辐照。结果显示,超声波对聚合物具有很好的降解作用,一般处理 20 min 后,降解率就可以达到 90%以上;45℃时的降解率比 25℃时的降解率增加约 40%,高温有助于提高聚合物的降解效率。

超声波降解技术最显著的特点就是能有效降低油田含聚污水的黏度, 不仅为后续水处理过程减少了负荷, 而且提高了对含聚污水中聚合物降解的效率^[19]。刘新亮等^[20]曾开展了超声波降解含聚油田污水的室内研究。实验结果表明, 超声波的空化效果可以将一部分难以生化降解的聚合物转化为黏度较低的易降解的小分子物质, 污水黏度降低达 40% 以上。黄伟莉等^[21]通过处理大庆油田采油一厂的采样含聚污水发现, 超声波可有效地破坏污水中聚合物分子间形成的空间网络结构, 降低污水黏度, 削减中间相的出现。经超声波处理后黏度降低至 1.0~1.1 mPa·s, 污水含油测量值较处理前降低了 2%~14%。杨风华等^[22]测试了大庆油田含聚污水超声波作用前、后的粘度损失率, 并探讨了超声波对降低聚合物溶液粘度的微观机理。实验发现, 超声波的作用可使三元复合驱采出污水的黏度值由 4.3 mPa·s 降至 3.3 mPa·s, 粘度降低率达 23%。

2.2 超声波破乳油田含油污水

2.2.1 超声波破乳含油污水的机理

超声波作为一种弹性机械波在作用于含聚污水介质时, 主要会产生相应的空化作用、自由基氧化作用和机械作用与热作用^[23]。大量理论推导和实验证明^[24], 超声波破乳的声强 I 必须在临界值 I_c (介质空化阈值) 以下, 这时产生的空化效应和相应的自由基氧化作用较小。此时, 超声波破乳主要依靠超声波产生的机械作用和热作用进行, 其破乳机理如下:

(1) 机械振动作用。一方面, 机械振动促进油滴的凝聚, 当超声波通过有悬浮油滴的污水介质时, 造成悬浮油滴与污水介质一起振动, 油滴将相互碰撞、黏合最终发生聚并, 最后实现油水分离。另一方面, 机械振动可使污水介质中的乳化剂分散均匀, 促使乳化剂分子从界面膜上脱离出来, 降低了油水界面的机械强度, 有利于油水相分离。孙宝江等^[24]也应用常微分方程理论推导出超声波作用于乳液状粒子时, 产生的“位移效应”并进行了验证。由于位移效应的存在, 微小的乳化油滴将不断向波腹或波节运动、碰撞并发生聚结, 生成直径较大的油滴, 有利于油水沉降分离;

(2) 热作用。超声波的热作用能够降低油水界面膜的强度和原油黏度。由于边界摩擦引起油水界面处的温度升高, 有利于界面膜的破裂; 当原油吸收部分声能转化成的热能时, 原油的黏度降低, 促进了含油污水的沉降分离^[25]。

2.2.2 超声波破乳含油污水的研究现状

超声波可以在温和的条件下实现原油的破乳, 与破乳剂有良好的协同效应, 可以降低破乳剂的用量且油水分离率高, 因此超声波破乳具有良好的发展前景。潘新建等^[26]以长庆油田姬六联合站油田含聚污水做为处理对象, 通过实验考察了超声波参数对超声辐射油田污水破乳除油率的影响。结果表明, 在适当参数的超声波作用下, 油田采出水的除油率可达 90.2%。同样, Khapaev 等^[27]对超声波的作用时间对破乳效果的影响进行了研究, 通过实验论证超声波的作用时间以 10~15 min 为最佳, 超过 15 min 之后超声波的破乳效果反而有所下降。孙宝江等^[28]利用超声波技术对油田三次采油产生的污水进行了除油实验。实验结果表明, 除油率达到 98%, 污水中的含油量降为 40 mg·L⁻¹, 超声波去除污水中原油的效果显著。夏福军等^[29]针对油田含聚污水黏度大、油滴粒径小、浮升缓慢的问题, 开展了超声波对含聚污水进行预处理影响因素的研究。结果表明, 超声波对聚合物驱含油污水的油珠具有一定的聚结作用, 其除油率比单一沉降对照组提高了 17.9%; 另外, 超声波的强烈空化作用能够粉碎注入水中的机械杂质, 降低固体颗粒的粒径, 从而改善水质。孙先长等^[30]研究发现, 注入水经超声波处理后, 悬浮物总体含量降低, 小粒径的悬浮物所占比例增加, 水的界面张力下降, 腐生菌数量减少, 总含铁量和含油量降低, 水质向有利于注水的方向转化。

2.3 超声波技术协同降解含聚污水

超声波技术用于处理石油工业含聚污水时具有氧化能力强、反应快、去除效率高、处理装置占地面积小等优点。但具有技术条件苛刻、投资高、反应器复杂等缺点, 无法满足大规模处理油田含聚污水的要求^[31]。然而, 将超声波技术与其他降解技术有机结合, 既能降低污水处理成本, 又能充分利用超声波的化学效应和机械效应以及可能产生的协同效应, 使降解体系在含聚污水中能够高效地发挥作用。Fenton(H₂O₂-Fe²⁺)试剂法作为处理油田污水最重要的化学方法, 其产生的·OH 自由基具有较强的氧化性, 而在超声波作用下 Fenton 试剂能生成更多的·OH 自由基, 这些自由基一方面可以与聚合物直接发生氧化还原反应, 另一方面可以与油滴发生反应, 对含聚污水原油进行破乳。赵小青^[32]应用超声波强化 H₂O₂ 试剂降解油田含聚污水中的聚丙烯酰胺(HPAM)。结果表明, 最优化系统参数的超声波对污水中 HPAM 的降解率达到了 99.24%。

张鹏^[33]利用超声-气浮组合装置在长庆油田污水处理站进行了现场实验。结果表明,超声-气浮组合实验装置的除油率达到 94.1%。

目前,油田上应用的超声波介入技术除了将超声波与化学氧化法^[34]相结合,还包括与膜处理法和光催化降解法^[35]等处理方法进行有机结合。其中,冶君妮等^[36]提出了超声波联用超滤膜技术用于油田油水分离及杀菌的思路和施工方案,在短时间内有效降低各种细菌的数量从而达到油田注入水的水质标准。Aarthi 等^[37]开展了超声和紫外线辐照降解水溶性聚合物的研究。研究发现,超声波和紫外线组合降解总速率的增加是由于每条分子链断裂产物的数量增加,而不是由于两者固有降解速率的叠加。郑永哲等^[38]针对大港油田的采出水使用单一紫外线杀菌技术透光率较低,无法有效去除污水中还原菌等问题,引入超声波降解技术。耦合实验表明,在超声波协同紫外线杀菌装置的作用下,硫酸盐还原菌 SRB 数量从 105 个·ml⁻¹减少到 6 个·ml⁻¹,杀菌率达到 99.8%以上。

3 展 望

超声波技术用于处理油田含聚污水时具有氧化能力强、降解速率快、发声装置容易介入等优点。综观国内外对超声波降解油田含聚污水的机理研究与应用,今后超声波降解技术还可以应用在一些油田含聚采油污水的处理中:

(1) 目前,高盐油藏、高凝油油藏采油污水中矿化度高、含油率大、易于结垢和析蜡,严重影响污水处理装置的降解效率;而超声波技术可以有效防止污水中 Ca²⁺的析出,其机械振动和热作用能有效抑制蜡体结晶,超声波在处理该类苛刻油藏污水时具有一定的可行性;

(2) 针对国内外稠油油藏、重质油油藏中的采油污水粘度高、密度大、含油量高和污水处理工艺复杂等问题,可以采用超声波技术对油田污水进行预处理,不仅可以减轻后续污水处理工艺的负担,而且可以替代部分污水处理工艺,提高污水处理效率;

(3) 由于海上含聚污水、污泥对周围环境的污染严重,且海上油田空间有限,作业流程较短,导致污水、污泥的处理难度增大;而超声波发声装置具有体积小、易于介入和无二次污染等优点,可以应用在海上污水、污泥的处理,与其他处理技术联用可以实现海上污水、污泥零排放的要求;

(4) 超声波技术与新型物理降解技术的联用已经成为目前的研究热点,如超声波与电气浮技术、电絮凝技术、无机盐调理技术^[39]和超滤装置等的联用,不仅可有效降低生产成本,而且两者还可产生协同效应。

参 考 文 献

- [1] ZHAO X, ZHONG X, et al. Investigation of steam injection at critical condition and a pilotest in Chao-61[R]. SPE 130968, 2010.
- [2] TAYLOR K C, BURKE R A. Development of a flow injection analysis method for the determination of acrylamide copolymers in brines[J]. *Petrol. Sci. Eng.*, 2012, **21**(8): 129-139.
- [3] 马学勉, 王素芳, 滕厚开. 含聚采油污水处理技术研究进展[C]//2013 年中国水处理技术研讨会暨第 33 届年会论文集, 2013 年. MA Xuemian, WANG Sufang, TENG Houkai. Research Progress on wastewater treatment technology of polymer containing oil[C]//Proceedings of the China Water Treatment Technology Conference and the thirty-third Annual Conference, 2013.
- [4] RICHERAND F, PEYMANI Y. Improving flotation methods to treat EOR polymer rich produced water[R]. SPE1744535, 2015.
- [5] WANG X, LIU R, SHAO Z, et al. A new treatment technique of produced water from polymerflooding[R]. IPTC 17455, 2014.
- [6] ALEJANDRO R, PIERCE D, Al-Mahdy O. Polymer systems on concrete structures in WWTP: overview, problems and solutions in application and inspections[C]//Conference & EXPO, NO. 11370, 2011.
- [7] MATTHIEU J, DEMANGEL A, ALEXANDRE G. Impact of Back Produced Polymer on Tertiary Water Treatment Performances[R]. SPE 174683, 2015.
- [8] 梁伟, 赵修太, 韩有祥, 等. 油田含聚污水处理与利用方法技术探讨[J]. *工业水处理*, 2010, **30**(10): 1-6. LIANG Wei, ZHAO Xiutai, HAN Youxiang, et al. Discussion on the treatment of wastewater containing polymers in oilfields and its utilization[J]. *Industrial Water Treatment*, 2010, **30**(10): 1-6.
- [9] 赵修太, 白英睿, 刘德新, 等. 含聚污水微生物降解研究进展[J]. *工业水处理*, 2012, **32**(5): 10-14. ZHAO Xiutai, BAI Yingrui, LIU Dexin, et al. Research progress on microbial degradation of wastewater containing polymer[J]. *Industrial Water Treatment*, 2012, **32**(5): 10-14.
- [10] 徐力克, 邓慧萍, 史俊. 超声波降解有机物机理及其应用研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(12): 416-500. XU Like, DENG Huiping, SHI Jun. Study on the mechanism and application of ultrasonic degradation of organic compounds[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **33**(12): 416-500.
- [11] SHINOBU K, KIMIHICO T. Effects of frequency and a radical scavenger on ultrasonic degradation of water-soluble polymers[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, **18**(1): 276-281.
- [12] 王增宝, 白英睿, 赵修太, 等. 聚丙烯酰胺化学降解技术研究进展[J]. *油气田环境保护*, 2012, **22**(4): 69-90. WANG Zengbao, BAI Yingrui, ZHAO Xiutai, et al. Research Progress on chemical degradation of polyacrylamide[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2012, **22**(4): 69-90.
- [13] 刘德新, 赵修太, 邱广敏. 驱油用聚丙烯酰胺降解研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2008, **24**(9): 27-31. LIU Dexin, ZHAO Xiutai, QIU Guangmin. Review on the degradation of polyacrylamide used for flooding[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2008, **24**(9): 27-31.
- [14] 叶建忠. 有机废水超声降解动力学研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004. YE Jianzhong. Research on kinetics of ultrasonic degradation to

- organic wastewater[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004.
- [15] DEWULF J, VAN H. Ultrasonic degradation of trichloroethylene and chlorobenzene at micromolar concentrations: kinetics and modeling[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2001, **22**(8): 143-150.
- [16] 姜秉辰, 赵树山. 超声波处理含油污水的物性实验探究[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(5): 112-117.
- JIANG Bingchen, ZHAO Shushan. Study on the physical properties of ultrasonic treatment of oil sewage[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, **37**(5): 112-117.
- [17] YEN H Y, YANG M H. The ultrasonic degradation of polyacrylamide solution[J]. *Polymer Testing*. 2003, **22**(2): 129-131.
- [18] 陈荣, 饶良玉. 油田含聚污水聚合物降解技术室内实验研究[J]. *工业水处理*, 2012, **32**(6): 77-80.
- CHEN Rong, RAO Liangyu. Research on the laboratory experiments concerning the polymer degradation technique of oil field wastewater containing polymer[J]. *Industrial Water Treatment*, 2012, **32**(6): 77-80.
- [19] ASHISH V, PARAG R. Ultrasonic degradation of polymers: Effect of operating parameters and intensification using additives for carboxymethyl cellulose (CMC) and polyvinyl alcohol (PVA)[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, **18**(3): 727-734.
- [20] 刘新亮, 蔺爱国, 尹海亮, 等. 超声波降解含聚油田污水的研究[J]. *工业水处理*, 2014, **34**(3): 71-74.
- LIU Xinliang, LIN Aiguo, YIN Hailiang, et al. Study on ultrasonic degradation of wastewater containing poly oil field[J]. *Industrial Water Treatment*, 2014, **34**(3): 71-74.
- [21] 黄伟莉, 张帮亮, 黄国华. 超声波预处理提高聚驱污水含油测量准确性[J]. *油气田地面工程*, 2010, **29**(7): 25-26.
- HUANG Weili, ZHANG Bangliang, HUANG Guohua. Ultrasonic pretreatment to improve the accuracy of oil measurement in polymer flooding[J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2010, **29**(7): 25-26.
- [22] 杨凤华, 张帮亮, 付冬梅. 超声波降低聚合物溶液粘度初探[J]. *油气田地面工程*, 2005, **24**(9): 2-4.
- YANG Fenhua, ZHANG Bangliang, FU Dongmei. Study on the viscosity of polymer solution by ultrasonic wave[J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2005, **24**(9): 2-4.
- [23] SASIKIRAN P, GIRIDHAR M. Ultrasonic degradation of poly(styrene-co-alkyl methacrylate) copolymers[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, **17**(5): 819-826.
- [24] 孙宝江, 严大椿, 乔文孝. 乳化原油的超声波脱水研究[J]. *声学学报*, 2009(3): 327-331.
- SUN Baojiang, YAN Dachun, QIAO Wenxiao. Study on ultrasonic dehydration of emulsified crude oil[J]. *Acta Acustica*, 2009, (3): 327-331.
- [25] ROBERTS P M, SHARMA M M. Ultrasonic removal of organic deposits and polymer-induced formation damage[R]. SPE 62046, 2000.
- [26] 潘新建, 伏渭娜, 种法国, 等. 油田采出水超声波破乳除油工艺[J]. *油气田地面工程*, 2013, **32**(5): 17-19.
- PAN Xinjian, FU Weina, ZHONG Faguo, et al. Ultrasonic demulsification and degradation process of oilfield produced water[J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2013, **32**(5): 17-19.
- [27] KHAPAEV V M, LUTCHAK V L, et al. Study of the separation of an oil-water emulsion in a sonic vibration field[J]. *Sudovye En-er. Ustanovki*: 21-24.
- [28] 孙宝江, 付静. 三次采油生产中含油污水超声波分离实验[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1999, **23**(5): 115-117.
- SUN Baojiang, FU Jing. Experimental study on separation of oil from sewage of the tertiary recovery with ultrasonic[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1999, **23**(5): 115-117.
- [29] 夏福军, 张宝良, 邓述波. 用超声波法处理聚合物驱含油污水[J]. *油气田地面工程*, 2001, 33-117.
- XIA Fujun, ZHANG Baoliang, DENG Shubo. Treatment of oily wastewater by ultrasonic wave method[J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2011, 33-117.
- [30] 孙先长, 万涛, 罗云. 油田采出水处理新技术与新工艺[J]. *工业水处理*, 2010, **30**(5): 19-23.
- SUN Xianchang, WAN Tao, LUO Yun. New treatment technologies and processes of the oilfield produced water[J]. *Industrial Water Treatment*, 2010, **30**(5): 19-23.
- [31] 周卫东, 佟德水, 李罗鹏. 油田采出水处理方法研究进展[J]. *工业水处理*, 2008, **28**(12): 5-9.
- ZHOU Weidong, TONG Deshui, LI Luopeng. Research and development of oilfield produced water treatment methods[J]. *Industrial Water Treatment*, 2008, **28**(12): 5-9.
- [32] 赵小青. 超声波与生物法协同处理含聚石油污水的实验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2011.
- ZHAO Xiaoqing. Experimental study on the treatment of petroleum wastewater by ultrasonic wave and biological method[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2011.
- [33] 张鹏. 对西峰油田含油污水的超声波技术处理研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2012.
- ZHANG Peng. Study on ultrasonic treatment of oily sewage in Xifeng oil field[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2012.
- [34] DONG H S, LIU J J, YAN P, et al. Study on Demulsification-Fenton to Deal with High Concentrations of Waster Emulsion[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, **8**(4): 2300-2304.
- [35] FARSHID T, WEIGUO L, SUXIN X, et al. Chemical degradation of hpam by oxidization in produced water: experimental study[R]. SPE163751, 2013.
- [36] 冷军妮, 董鹏敏, 吴民生, 等. 超声波-超滤膜技术在油田污水处理中的应用研究[J]. *煤炭技术*, 2010, **29**(12): 178-181.
- YE Junni, DONG Pengmin, WU Minsheng, et al. Uitrasonoud-uitra filtration membrane technology in the field of application of sewage[J]. *Coal Technology*, 2010, **29**(12): 178-181.
- [37] AARTHI T, SHAAMA M S, et al. Degradation of water soluble polymers under combined ultrasonic and ultraviolet radiation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2007, **46**(19): 6204-6210.
- [38] 郑永哲, 王江, 于学良, 等. 超声波协同紫外线提高污水处理杀菌效果研究[J]. *石油仪器*, 2008, **22**(5): 59-63.
- ZHENG Yongzhe, WANG Jiang, YU Xueliang, et al. Using ultrasonic wave combined with ultraviolet ray to improve bactericidal effect in sewage treatment[J]. *Petroleum Instruments*, 2008, **22**(5): 59-63.
- [39] 陈龙俊, 刘佳丽. 油田污水处理工艺研究[C]//2015 油气田勘探与开发国际会议论文集, 2015.
- CHEN Longjun, Liu Jiali. Study on oil field wastewater treatment technology[C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Exploration and Development of Oil and Gas Fields, 2015.