

纪念应崇福院士诞辰 100 周年

声空化工程初步*

徐德龙^{1,2,3†} 李 超^{1,2} 林伟军^{1,2,3} 邓京军^{1,2} 白立新^{1,2}

(1 中国科学院声学研究所超声技术中心 北京 100190)

(2 北京市海洋深部钻探测量工程技术研究中心 北京 100190)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 声空化气泡内的高温、高压和高密度是声空化工程的机理和基础。该文简要回顾了国内外声空化理论和实验研究的进展,针对当前在液体中进行工业规模声处理等声能应用方面的现状和存在的问题,提出了扩大声能应用的一种可能途径——声空化空间分布控制并在实验室内进行了实验研究。结果表明该方法具有可行性。在此基础上,文中给出了基于空化空间分布控制方法在稠油井口辅助降黏和高固污泥预处理方面取得声空化工程初步应用的两个例子。现场的试验结果表明,这两种声空化工程化样机在实际现场工况条件下,均取得了较好的应用效果。最后,对当前声空化工程应用前景进行了初步探讨。

关键词 声空化工程,超声处理,声化学,稠油降黏,高固污泥预处理

中图法分类号: O429 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2018)05-0825-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.05.031

An exploratory application of acoustic cavitation engineering

XU Delong^{1,2,3} LI Chao^{1,2} LIN Weijun^{1,2,3} DENG Jingjun^{1,2} BAI Lixin^{1,2}

(1 Research Center for Ultrasonics and Technologies, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 Beijing Deep Sea Drilling Measurement Engineering Technology Research Center, Beijing 100190, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The high temperature, high pressure and high density inside an acoustic cavitation bubble are the mechanism and foundation of acoustic cavitation engineering. The development of acoustic cavitation in theory and in experiment at home and abroad is reviewed briefly in this paper. To overcome the bottleneck problem of ultrasonic treatments in liquid on the industry scale, a possible way to enlarge the application of acoustic energy—optimizing the spatial distribution of acoustic cavitation is proposed and investigated. The experiments show that it is feasible. Based on the experiments, two examples of the exploratory application of acoustic cavitation engineering in viscosity reduction for heavy oil and pretreatment of high-solid sludge are given. The pilot tests show that both of the prototypes for the acoustic cavitation engineering can operate very well. At last, the perspective of the acoustic cavitation engineering on the industry scale is discussed.

Key words Acoustic cavitation engineering, Ultrasonic treatment, Sonochemistry, Viscosity reduction for heavy oil, Pretreatment of high-solid sludge

2018-05-25 收稿; 2018-07-03 定稿

*国家自然科学基金项目 (11474305), 国家科技重大专项课题项目 (2011ZX05032-003), 国家重大科研装备研制项目 (ZDYZ2012-1-07-01), 中石化重大科技项目 (ZDP17005)

作者简介: 徐德龙 (1976-), 男, 山东蓬莱人, 博士, 研究员, 研究方向: 声空化工程和深部钻测。

†通讯作者 E-mail: xudelong@mail.ioa.ac.cn

1 引言

空化 (Cavitation) 指的是在液体或固体中气泡的形成和活动现象, 这些气泡常称为空腔 (Cavity)。1917年瑞利发表了题为“液体中球形空腔崩溃时产生的压力”的理论论文, 首次建立了描述不可压缩液体中气泡动力学的理论模型, 阐述了高速水流中气泡剧烈闭合时会在水中产生极高的压强。

1934年, 科伦大学的 Frenzel 和 Schultes 做了超声波加速了卤化银的分解的实验。1937年, 他们第一次将这种现象命名为“声致发光”(Sonoluminescence)。现在这个词已经不仅仅表示声场引起的发光现象, 而用来泛指所有的空化发光现象。1990年, Gaitan 等^[1]在实验室里产生了悬浮在驻波声场中连续脉动的单一空化气泡, 为声空化的研究开拓了宽阔的道路。在声场作用下, 这个气泡能像时钟一样精确地在每个崩溃时刻发出能被人看见的光, 由于气泡能在液体中停留一段时间, 因此也称之为稳态单气泡声致发光。由于气泡太小而无法进行直接的测量, 因此稳态单气泡的声致发光就成为研究气泡内部状态的一个重要途径。Putterman 领导的实验组在这方面做了一系列非常出色的实验工作, 为理论工作的开展提供了大量的实验依据。Young 及其合作者设法把稳态单气泡声致发光变弱, 然后连续几天测量光谱, 发现极弱的单泡声致发光的连续光谱也包含 OH 线谱, 这一点和多泡声致发光一样。2005年, Suslick 及其合作者首次在浓硫酸中测到多种离子的线谱, 同时也获得了迄今为止最强的发光。这是首次在实验中测量到线谱, 而且发现了声致发光中等离子核的存在。根据声致发光实验测量的光谱, Suslick 等推断出空化泡发光时内部温度不低于 5000 K, 大气压不低于几十兆帕。虽然对于单泡声致发光的机制尚无明确的定论, 但是已经明确的是空化泡内的温度压力已经足以促进化学反应发生。在声化学实验效果不断扩大的十几年里, 声化学的作用机理一般认为是空化的“热点说”。

早在 1964 年, 中科院声学所的研究人员在实验中产生了瞬态单气泡。所谓瞬态, 指的是气泡在液体中只存在一个周期, 并且在这一过程中半径增大到初始半径的至少两倍 (通常是很多倍) 以上。与稳态单气泡能重复亿万次脉冲不同的是, 瞬态气泡在液体中存在一个周期加上几次小半径反弹之后崩

溃消失, 并且直径最大可达几厘米。相同的是, 瞬态单气泡也有一个长大、收缩、崩溃的过程, 并在崩溃时发光。2000 年以来, 中科院声学所重新开展刹管法瞬态单一气泡的研究工作, 并取得一些新颖的结果。与稳态单气泡相比, 瞬态单气泡在实验过的十几种不同液体中, 均能产生“声致发光”, 因此可能更接近实际应用中多泡的状态。

2 声空化工程

一般说来, 声空化是声空化工程的机理。尽管对于声致发光等机理问题尚未解决, 但并没有影响声空化应用研究的开展。按作用介质的不同可分为固体中、液体中、气体中和生物体中的声能应用。其中, 在液体中的声能利用按照声源产生方式分为流体动力式和压电换能器式。流体动力式是以流体作动力源, 常见的有各种哨、旋笛、孔板等, 图 1 给出了 Hartmann 哨的例子。压电换能器式是建立在晶体的压电效应的基础上的, 常见的装置有超声变幅杆、清洗槽等。

声能在液体中的应用, 在实验室里, 在相当广泛的领域表现不凡, 以至于兴盛一个独立的学科分支, 称为声化学。声化学在声能利用方面占据很重要的位置, 迄今为止, 已被应用到相当多的领域, 例如食品、纳米材料合成、制药、化学等。但直至今天, 液体中的声处理在实际生活中没有受到应有的重视。为此, 应崇福院士^[2]在 2005 年提出在这方面应尽快大力开展实用化工作, 分析了其中的原因, 指出导致这一现象的原因部分是因为没有在大范围产生声空化。在 2006 年和 2008 年, 应崇福院士明确提出“声空化工程”的概念, 将声空化工程与声空化物理的研究范畴进行了区分, 指出了声空化工程其中的几个关键问题, 建议加大力度开展声空化工程研究, 而其中扩大声空化试验规模的重点是声空化的优化, 即“要识别和控制工作液体中所产生空化气泡的一些比较宏观的参量和一些气泡比较宏观的行为, 例如气泡的品种、数量、大小分布、空间分布、时间分布 (就是它们的运动、传输), 以及品种转换、结成簇团、逸散消灭等情况”^[3-4]。

在国际上, Mason 等对声化学在工业方面的潜能和实用性进行了初步探讨, 认为声化学在工业上应用的前提是能够有效地扩大实验室中声化学反应器的规模。扩大声能利用反应器规模的一般做法

是加大换能器的声功率,但功率增大,空化只产生在换能器壁附近,而不在液体的广大体积里。如随着变幅杆声强的增大,气泡主要形成在变幅杆顶端的附近,最后形成所谓的“空化屏蔽”。这时增加的声能不能有效地输入液体中并在液体的广大范围内产生空化。因此,单纯地加大功率,简单地“放大”现有的声处理装置及其声功率未必能得到所期望的结果。另外,很大声功率的输入以及很大功率的电声换能设备成本高、运转费多、维护难;风险大、不利于节能,在现有的换能器技术条件下很难得到大规模的实用。

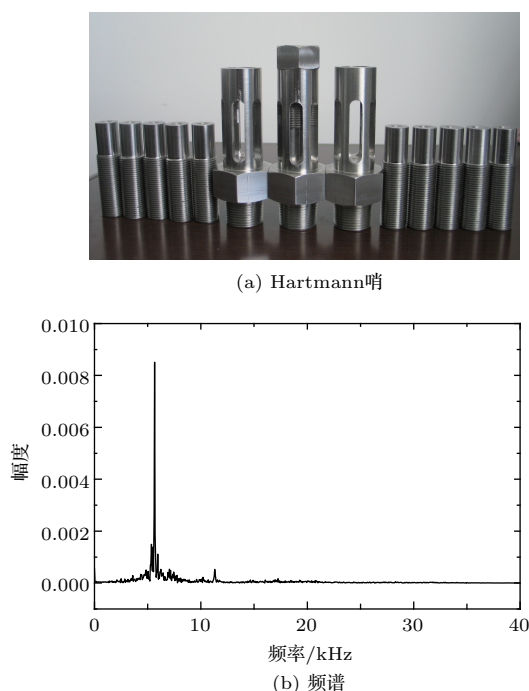


图1 Hartmann 哨及其频谱

Fig. 1 The Hartmann oscillator and its frequency spectrum

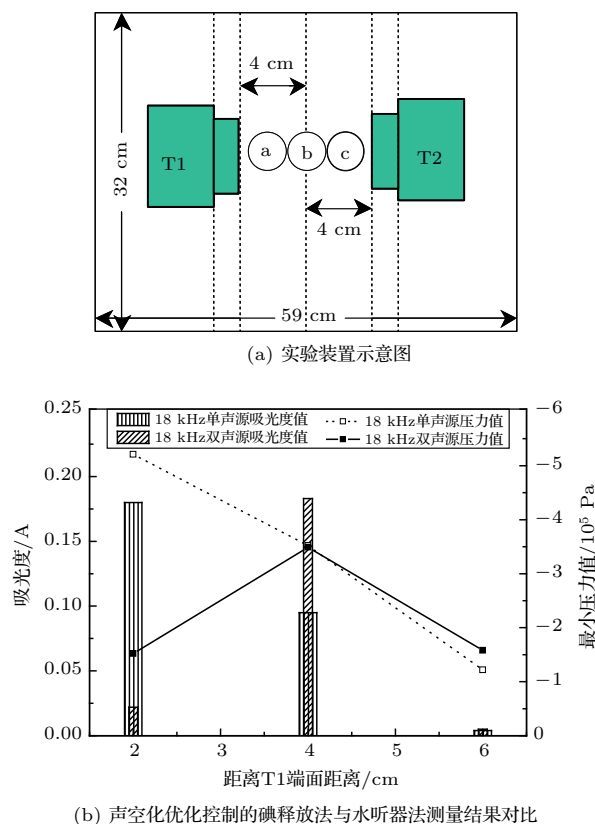
3 声空化空间分布的优化控制

近年来,人们一直在努力寻求大规模液体内的声处理方法,即“声空化工程”。在声空化工程中,需要识别和控制工作液体中所产生空化气泡的一些比较宏观的参量和一些气泡比较宏观的行为:如大反应器中的声空化产生、传播、分布、品种转换等声空化场的控制问题。现在人们逐渐了解到,声空化是声处理和声化学的作用基础,要提高声处理和声化学的功能和效率,需要提供有效的空化场,例如至少要在大范围空间提供声空化的存在,而这并不是

单纯加大声功率所能保证的。

在理论方面, Moholkar 等^[5]通过计算双频声源作用下的气泡的行为,得出了一些很有意义的结果。在他们的模型中,通过调整两个声源的参数在理论上实现了气泡主要产生在远离声源换能器的液体中。

在实验方面,徐德龙^[6]对双源声反应器内液体中大规模产生的声空化气泡的多少、空间分布、气泡的行为,双声源的分布和频率组合对空化效果影响等基础问题的研究,取得了初步的效果,见图2。



(b) 声空化优化控制的碘释放法与水听器法测量结果对比

图2 声空化空间分布的优化控制装置和实验结果

Fig. 2 The optimization control of spatial distribution of acoustic cavitation

在图2(a)中,试管a、b、c放在两个换能器的轴线上,碘化钾试管中心之间相距2 cm,试管a、c中心分别距换能器T1、T2距离相等,为2 cm。声场作用时间为15 min。在实验过程中,为了对比,同时将水听器分别放入试管a、b、c中测得声压最小值。声源输入的总电功率均为50 W。双声源声源工作时两个声源的相位是相同的。从图2(b)可知,碘释放法的测量结果与水听器法在趋势上具有一致性、单个换能器工作时,在T1换能器的附近碘的释放量多

(空化作用强),随着离开换能器距离的增大,碘的释放量迅速减少(空化作用迅速减弱);而在两个换能器同时工作时,在两个换能器的附近处碘的释放量少(空化作用弱),在两个换能器的中间的区域,碘的释放量明显加强(空化作用强)。从这一点上看,实现了声空化空间分布的优化控制的实验预期:即在远离换能器表面的区域产生强空化,而在换能器的表面不产生强空化。在此基础上,研究人员提出了相互交叉的声源产生的空化场空间分布控制的方案并对可行性进行了实验检验,结果表明方案不仅是可行的,而且将进一步提高声空化空间分布控制的范围^[6]。

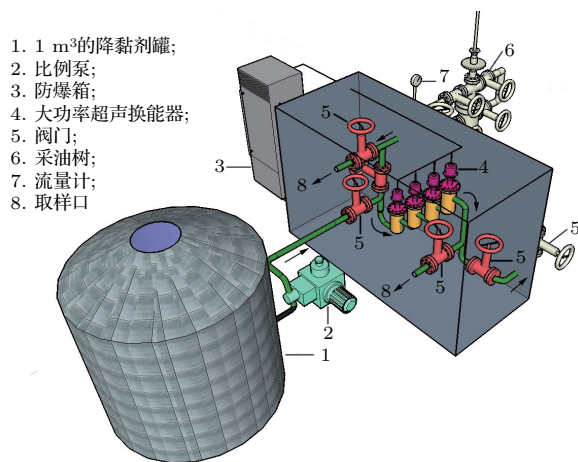
4 声空化工程应用的两个实例

4.1 实例1:超声稠油井口辅助降黏

近十年来,随着经济的发展,对石油天然气的需求量每年以1.8%速率增加。这使得占可采储量

70%以上的重油、超重油的开发利用越来越得到人们的重视。但是,由于超重油和高凝油的高黏度、高密度、高凝点、流动性差等特征使得开采难度大,原油采收率较低,在工业生产期限内难以获得更多的石油资源。

超声降黏就是利用声空化产生的高温高压和冲击波等物理效应来加速或改变化学反应过程这一原理进行物理降黏的技术。这种技术的可行性在实验方面已经得到验证^[7]。但可应用于工业生产线的样机还比较少,主要的原因是换能器不耐高温、不能长时间连续工作及批量处理规模小等。针对新疆油田试验现场稠油井口采出液温度较高(约90℃)而且要求在线连续处理等现场要求,徐德龙等研发了可用于重油降黏的大功率换能器,并根据空化空间分布优化的要求,对换能器处理液体腔体的几何尺寸、浸入液体的深度等参数进行了优化。在此基础上,设计了可用于稠油井口辅助降黏的现场应用样机,见图3。样机总输入的电功率为4 kW。



(a) 样机示意图



(b) 安装在新疆油田现场的样机

图3 超声稠油井口辅助降黏样机

Fig. 3 The ultrasonic prototype of viscosity reduction for heavy oil at the wellhead

迄今为止,超声井口辅助降黏样机已顺利在现场连续试验近一年,在2017年9月~10月和10月~11月分别完成两口油井连续一个月的取样测试,试验井平均单井产量10~20 m³/天,集输距离200~1000 m、正常集输时间小于5 h。其中井1处理前黏度为6731 mPa·s,处理后黏度为272 mPa·s;井2处理前黏度为10831 mPa·s,处理后黏度为530 mPa·s,实现超稠油的管线输送。在正常生产条

件下,化学降黏与超声作用可将井口特稠油黏度降至小于600 mPa·s,并在流动条件下保持稳定分散状态,温度下降至40°左右时,降黏体系表观黏度仍小于800 mPa·s,在运动条件下可稳定超过5 h,可满足井口到简易站的短距离集输要求。井口超声辅助降黏后,降黏体系可满足管道集输要求;静止0.5~24 h后,发生油、水分层现象,继续搅拌运动后,降黏体系仍可回复到“水包油”状态,可保证管道集

输安全性,同时不会增加后期破乳脱水难度。

4.2 实例2:超声耦合碱解高固污泥^[8]

随着全球经济和工业的不断发展,对水资源的需求也逐渐增加,世界各地建设了越来越多的污水处理厂,以处理在生产生活过程中产生的大量污水,获得可回用的水资源。作为污水处理的副产物,剩余污泥的产量也不断增加。根据住建部的统计和预测,未来三年内中国污水处理厂剩余污泥的产量将超过6000万吨/年。剩余污泥中含有大量的多种有机组分,包括碳水化合物、蛋白质、脂肪等物质,若处理处置不当,极易腐败变质并产生恶臭,此外还包括重金属、难降解有机物、病原微生物等,如果不进行妥善处置,会对环境带来极大的污染隐患。

针对高固污泥超声耦合碱解的需求,中科院声学所声能应用课题组开发出一种新型、高效、低能耗的密集多探头槽式超声耦合碱解预处理反应器,反应器体积为250 L,总功率为10 kW,污泥处理量可达5 m³/h,能耗为2 kWh/m³,见图4。

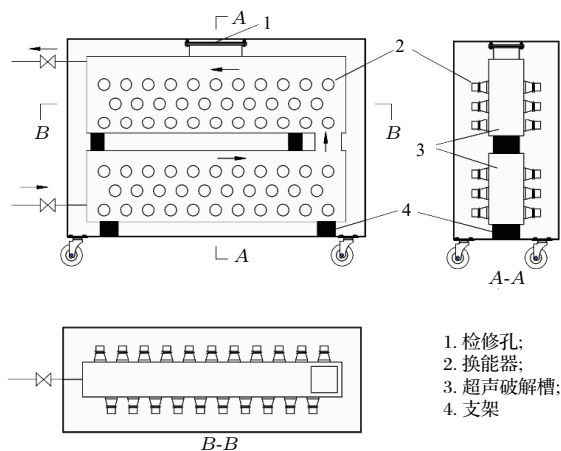


图4 密集多探头槽式超声反应器^[8]

Fig. 4 Multiple-transducer ultrasonic bath reactor^[8]

超声耦合碱解预处理反应器不同运行方式对甲烷产率的影响如图5所示。相比未处理的污泥,单独碱解后,甲烷产率增加了19.2%。超声耦合碱解时,序批式试验中,超声处理6 min、18 min条件下,24天累积甲烷产率相比未处理污泥分别提高了26.5%和52.0%。连续试验中,超声处理6 min和18 min时,24天累积甲烷产率相比未处理污泥分别提高了41.1%和44.5%。在中试试验中,出于方便操作的考虑,最终选定连续式超声破解6 min破解条件。此时,污泥流量为5 m³/h,能耗为2 kWh/m³,

相比国际上同类型的研究,处理量有2~5倍的提升,且能耗降低了50%。

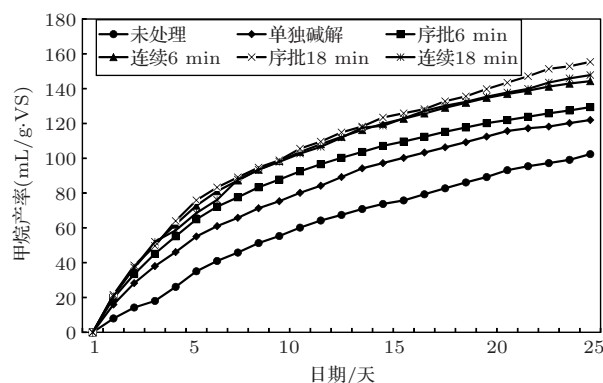


图5 不同运行方式超声耦合碱解预处理对甲烷产率的影响^[8]

Fig. 5 Effect of different operating modes by combined ultrasonic and alkaline pretreatment on cumulative methane yield^[8]

超声耦合碱解高固污泥时存在协同作用,可以提高污泥中微生物胞外聚合物的破解程度,并在低碱量条件下,也可以破解细胞壁和细胞膜,溶出更多的有机物,使甲烷产率明显增加。超声耦合碱解高固污泥厌氧消化工艺系统生产性试验的过程中能量平衡分析如图6所示。超声波耦合碱解污泥在总固体物浓度(TS)为3%时,基本可以达到能量平衡,但难有结余,当TS为5%和8%时可以实现电能结余。其中当污泥TS为8%时,超声耦合碱解预处理-厌氧消化系统每日产沼气折合电能

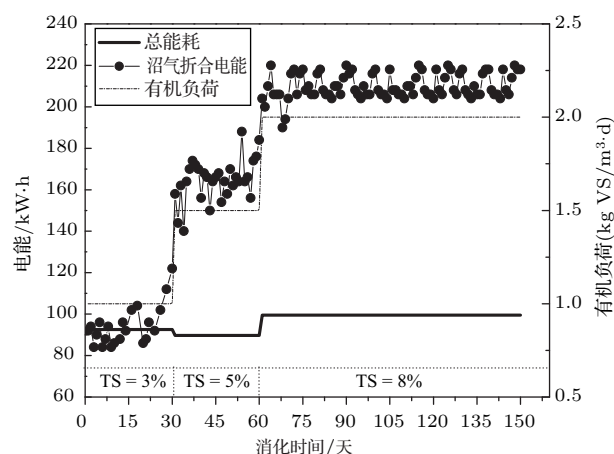


图6 厌氧消化过程中设备能耗及沼气折合电能^[8]

Fig. 6 Equipment energy consumption and energy equivalent of biogas production during anaerobic digestion process^[8]

为190~220 kWh, 减掉设备能耗后每日可以净产电能90.5~120.5 kWh, 即该系统每处理1 m³污泥可以净产电能9.1~12.1 kWh。能量平衡结果表明, 超声耦合碱解预处理-厌氧消化系统不仅在技术上是可行的, 在经济上也是可行的。

5 结论和讨论

本文主要对声空化工程的研究进展进行了概述, 分析了声能工程利用的现状和难点, 探索了通过对声空化空间分布的优化控制来解决扩大声能应用规模, 解决声空化工程中的大规模化的瓶颈问题, 最后介绍了课题组在超声稠油井口辅助降黏和超声耦合碱解高固污泥工程化应用的实例, 初步探讨了声能利用的大规模化和实用化问题。从应用实例可以看出, 声空化工程的开展有几点需要注意: 一是在掌握超声大功率产生手段的前提下, 还需注意空化和声能空间分布优化控制问题; 二是要选择国民经济领域中适合声空化工程开展的切合点; 三是要考虑经济效益和难度的问题^[3]; 四是要尽量考虑超声技术和其他技术的交叉使用; 五是要从实验室可行到工业规模工程应用稳步推进, 充分论证, 不可操之过急。

致谢 感谢中国科学院声学研究所王秀明特聘研究员对本文的指导! 感谢天津大学张博博士提供的现场测试数据!

参考文献

- [1] Gaitan D F, Crum L A, Roy R A, et al. Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable, cavitation bubble[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1992, 91(6): 3166-3183.
- [2] 应崇福. 我国的声化学应尽快大力开展实用化工作[J]. 应用声学, 2005, 24(5): 265-268.
Ying Chongfu. The practical work of sonochemistry in China should be carried out as soon as possible[J]. J. Appl. Acoust., 2005, 24(5): 265-268.
- [3] 应崇福. 液体中的声处理应用和声空化工程[J]. 应用声学, 2006, 25(5): 261-264.
Ying Chongfu. Acoustic processing in liquids and acoustic cavitation engineering[J]. J. Appl. Acoust., 2006, 25(5): 261-264.
- [4] 应崇福. 关于液体内大规模声处理中空化研究的几点思考——再论声空化工程[J]. 应用声学, 2008, 27(5): 333-337.
Ying Chongfu. Some thoughts on the behaviors of cavitation used in large-scale ultrasonic treatment in liquids—A second discussion of cavitation engineering[J]. J. Appl. Acoust., 2008, 27(5): 333-337.
- [5] Moholkar V S, Rekveld S, Warmoeskerken M M C G. Modeling of the acoustic pressure fields and the distribution of the cavitation phenomena in a dual frequency sonic processor[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1-8): 666-670.
- [6] 徐德龙. 声空化空间分布的控制[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- [7] 贺丽鹏, 丁彬, 耿向飞, 等. 新疆油田九7区超稠油超声波辅助化学降黏[J]. 石油化工, 2016, 45(1): 97-101.
He Lipeng, Ding Bin, Geng Xiangfei, et al. Ultrasonic-assisted chemical viscosity reduction for Xinjiang block 9-7 ultra heavy oil[J]. Petrochemical Technology, 2016, 45(1): 97-101.
- [8] 张博. 超声耦合碱解预处理促进高固污泥厌氧消化的工艺特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.