

# 基于 Matlab 的超声空化场测量与可视化分析

郭璇,杨艳玲\*,李星,周志伟,冀思扬,韩星航,王帅,曾庆品,张浩 (北京工业大学建筑工程学院,北京 100124)

**摘要:** 为探究超声空化机理、明确超声条件对空化效应的影响,采用铝箔腐蚀法,测量了不同条件下槽式与探头式超声装置中空化场分布,在 Matlab 平台实现了超声空化场的二维可视化,并通过超声基础试验进行分析验证,结果表明:槽式超声场分布不均匀,随着超声频率的增加,铝箔腐蚀面积减小,空化效应减弱;空化效应在波腹处最明显,高效区面积最大.探头式超声空化场的高效区主要分布在探头轴线附近,随着铝箔与探头距离的增加,空化效应逐渐减弱,低效区面积增加;空化效应随超声波声能密度的增加而增强,声能密度 5W/mL 时,腐蚀面积可达 80%以上.相同条件下,槽式超声波反应器中超声空化效应较强.超声波声能密度越大,处理后的污泥上清液 SCOD 越高,破解效果好;随着超声频率的增加,污泥破解程度下降,空化效应减弱.

**关键词:** 超声; 空化效应; 铝箔腐蚀; 声场分布

中图分类号: X703,TU991.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2016)03-0719-08

**Measurement and visualization of ultrasonic cavitation field based on Matlab.** GUO Xuan, YANG Yan-ling\*, LI Xing, ZHOU Zhi-wei, JI Si-yang, HAN Xing-hang, WANG Shuai, ZENG Qing-ping, ZHAN Hao (College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). *China Environmental Science*, 2016,36(3): 719~726

**Abstract:** Aluminum foil erosion was used to measure the distribution of the ultrasonic field in both bath and probe sonoreactors under varied sonication conditions, to explore the ultrasonic cavitation mechanism and to clarify the impact of sonication conditions on cavitation effect. Two-dimension ultrasonic cavitation field was visualized based on Matlab software. Then it was analyzed and verified through ultrasonic experimental. The distribution of ultrasonic cavitation field in bath sonoreactor was uneven. In addition, the erosion areas decreased with the increasing of ultrasonic frequency, accompanying a worse cavitation effect. The strongest cavitation effect occurred at the antinode, which responded to the largest effective areas. As to the probe sonoreactor, the effective areas were mainly distributed in the vicinity of the axis of the probe. The cavitation effect gradually became weakened while the inefficient areas increased when the distance between aluminum foil and probe became further. The increasing of ultrasonic density contributed to a stronger cavitation effect, the erosion areas could reach up to 80% at 5W/mL. It was also indicated that under the same conditions, ultrasonic cavitation effect in bath sonoreactor was stronger compared to the probe one. The increase of ultrasonic density led to the enhancement of the concentration of soluble chemical oxygen demand (SCOD), indicating well sludge disintegration effect. The disintegration of sludge and cavitation effect decreased as the ultrasonic frequency increased.

**Key words:** ultrasound; cavitation effect; aluminum foil erosion; ultrasonic field distribution

超声技术是近几年兴起的一种新型技术,在水处理及污泥预处理领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>.超声作用的主要机理为空化效应,即液体中的细微气泡被超声波激活、震荡、生长、收缩、破裂的过程<sup>[2]</sup>.空化效应产生的局部高温、高压引发一系列化学变化可以降解水中有机物、灭活病原体,超声技术可能成为无害化污泥回流的有效措施之一<sup>[3]</sup>.空化作用受超声波频率、超声时间、反应

器内空间分布等多种因素影响<sup>[4-5]</sup>.有研究表明<sup>[6-7]</sup>,随着超声频率的增加,空化作用难以进行;声能密度的增加有利于超声空化<sup>[2]</sup>;另外,反应器中超声波声场的分布不均匀,存在高效区与低效

收稿日期: 2015-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278005);北京市自然科学基金项目(8132007);北京工业大学研究生科技基金(ykj-2014-10681)

\* 责任作者, 研究员, yangyanling@bjut.edu.cn

区<sup>[8]</sup>,对处理效果造成一定影响.因此,有必要研究不同条件下超声空化场的分布,以便于更深入理解超声机理,评价超声效能.超声场的测量方法有铝箔腐蚀法、染色法、水听器法、热电偶探头法等,其中铝箔腐蚀法相较于其他方法更加廉价易得,且较为简便易行,常被应用于实验室中的研究<sup>[9-10]</sup>.然而,铝箔腐蚀法普遍存在定量性差的特点.近年来,随着计算机技术的不断发展,一些学者应用 Matlab 强大的图像处理技术,有效实现了铝箔腐蚀法的量化分析:刘丽艳<sup>[11]</sup>采用 Matlab 软件研究了超声场的可视化,实现了超声场的定量表达;闻精精研究了多相体系内超声空化场的分布特性.基于此,本文采用铝箔腐蚀法进行不同频率、不同声能密度条件下超声场的测量,用 Matlab 软件处理铝箔腐蚀图像,提取图像信息,实现超声场的二维定量表征,探究空化机理,同时通过超声基础试验进行分析验证

## 1 实验材料与方法

### 1.1 试验污泥

试验污泥为北京市某净水厂沉淀污泥,主要特性指标为温度:28.4℃;pH 值:7.60;固体浓度(TS):3.61g/L;悬浮固体浓度(SS):2.73g/L;污泥絮体平均粒径:29.241μm;密度:991kg/m<sup>3</sup>.

### 1.2 超声装置

超声装置为槽式超声波反应器与探头式超声波反应器.取 15L 反应液体(去离子或水污泥)至槽式装置的反应槽中(长×宽×高=250mm×250mm×300mm),输入功率为 450W,因反应槽体积较大,有效声能密度较小(0.03W/mL),但是超声频率可调范围较宽,因此采用槽式超声装置考察超声频率的对超声空化场的影响.考察频率为 25、40、80 和 125kHz.每次试验后更换槽中液体.污泥取样时间为超声 10min 后.

探头式超声装置的频率为 25kHz 钛合金探头直径 18mm,电功率 0~1500W 可调,其反应容器较小(100mm×100mm×50mm),声能密度较大,但是超声频率可调范围有限,因此使用探头超声装置考察声能密度的影响.试验时将 300mL 反应液体注入反应容器,本试验采用 9、300、900 和 1500W

的功率,对应的声能密度为 0.03、1、3 和 5W/mL.将超声探头垂直伸入液面 10mm 下,保持每次位置一致,作用过程中不控温.每次试验后更换反应容器中液体.污泥取样时间为反应 10min 后.

### 1.3 铝箔腐蚀试验

槽式装置的超声波换能器在反应槽的四周,其中,25kHz 与 40kHz 的换能器分别在反应槽左右两侧,80kHz 与 125kHz 的换能器在反应槽前后两侧.试验时,将 15mL 去离子水注入反应槽中,将表面平整、厚度为 20μm 的铝箔固定在加工好的框架上,垂直于换能器放置在反应槽中(如图 1(a)所示),在距换能器 0~250mm 范围内每隔 50mm 设一个测量平面,试验过程中铝箔位置保持不变.超声场中的铝箔会被空化效应腐蚀出现凹孔,为避免腐蚀时间过长导致铝箔大块脱落,腐蚀时间设置为 60s.

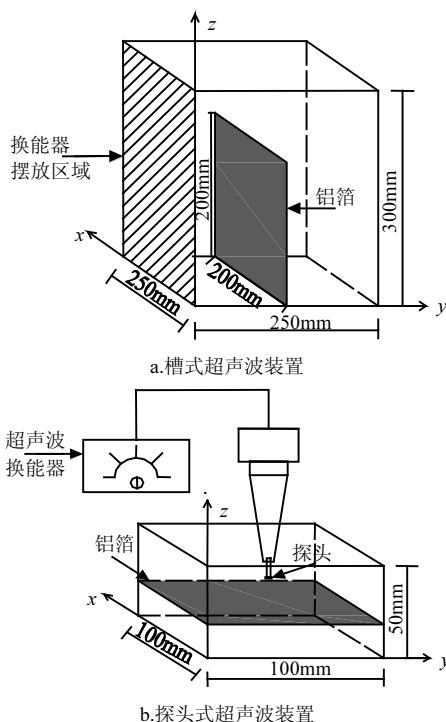


图 1 槽式和探头式超声波装置中铝箔放置位置示意  
Fig.1 Position of the aluminum foil in bath sonoreactor and in probe sonoreactor

将 300mL 去离子水注入探头超声装置的反应容器中,将铝箔固定在加工好的框架上,水平放

置在反应容器中(图 1b).在距探头 5~20mm 的范围内,每隔 5mm 设置一个测量平面,实验过程中铝箔位置不变.超声腐蚀时间为 60s.

#### 1.4 超声场的二维实现

将腐蚀后的铝箔烘干后,用扫描仪(cannon, 日本)对图像进行扫描.使用 Matlab 软件对扫描图像进行处理,具体过程如下:

用 `imread` 函数读入图像,并选取有效区域,图像大小设定为  $500 \times 500$  像素(如图 2a 所示);

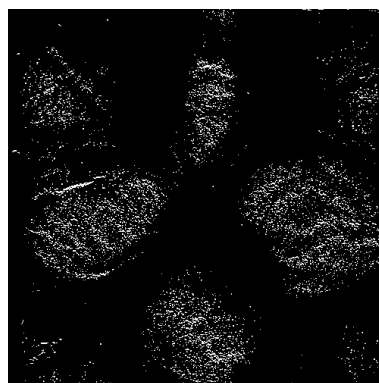
选取合理阈值(本实验选 0.5),用 `im2bw` 函数对图像进行二值化处理(如图 2b 所示),将二值图像数据存储在矩阵中;

将二值图像分为 400 块,每一小块均为边长为 25 像素的小正方形;

计算每一小块图像的矩阵中数值 1 的个数(即腐蚀部分的面积),并计算出腐蚀面积比,存储于新矩阵中,选取合适的腐蚀强度范围,绘制等高线图,完成超声场的二维表征.



a.原图



b.二值化图

图2 频率为 25kHz 的槽式装置中距换能器 15cm 位置的铝箔腐蚀图

Fig.2 Aluminum foil corrosion picture at 15cm away from the transducers at 25kHz in bath sonoreactor

#### 1.5 污泥 SCOD 检测方法

超声后污泥上清液中溶解性化学需氧量(SCOD)浓度变化可以反映超声波破解效果.取超声 10min 后的污泥样品置于离心机中,以 4000r/min 转速离心 10min 后取上清液,用 COD 快速测定仪(5B-3(B),北京)检测.

## 2 结果与讨论

#### 2.1 超声频率对空化场二维分布的影响

采用槽式超声装置考察超声频率的影响.在如图 1a 所示的坐标系下,以不同颜色代表不同空化强度,绘制同一平面内不同坐标处的强度数值,得到槽式空化场的二维分布图.

超声频率为 25kHz、距换能器 5、10、15 和 20cm 位置的超声场二维分布结果如图 3 所示,槽式超声装置中铝箔腐蚀点分布不均匀.槽式装置中有四个换能器,换能器对应位置的腐蚀面积

较大,空化效应较强.超声波波长和频率的关系如式(1)所示.

$$\lambda = c/f \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为超声波波长,m; $c$  为波速,m/s; $f$  为超声波频率,Hz.

由式(1)可得,频率为 25kHz 的超声波在水中的波长为 6.0cm,波长较短,因此超声波有较好的指向性,超声场中能量的集中程度较高,主要集中在以换能器轴线为中心的区域,这些区域形状与振源形状相似且空化效应较强,为高效区.靠近铝箔中心及四角的位置腐蚀面积普遍较小,为超声低效区,空化效果较差,甚至出现零空化现象.

距换能器 15cm 的平面,空化效应最强,超声波在介质中传播时发生干涉及衍射,超声波在固液界面传播时发生全反射,形成驻波.驻波方程为<sup>[12]</sup>

$$y = 2A \cos(2\pi x/\lambda) \sin(2\pi t/T) \quad (2)$$

式中, $y$  为驻波振幅, $m$ ;  $A$  为超声波振幅,超声能量一定时为常量, $m$ ;  $\lambda$  为波长, $m$ ;  $x$  为距振源位置, $m$ ;  $t$  为超声时间, $s$ ;  $T$  为超声波传播周期, $s$ .

轴线上每个固定的点均作振幅不同的简谐运动.质点振幅为零处为波节,振幅最大处为波腹<sup>[13]</sup>.由式(2)可知,在  $\lambda/4$  的偶数倍位置  $y$  值最大,为波腹, $\lambda/4$  奇数倍的位置为波节.试验中超声波波长为  $6.0\text{cm}$ , $\lambda/4=1.5\text{cm}$ ,图 3c 中,距换能器  $15\text{cm}$

的位置为  $\lambda/4$  的 10 倍,振幅最大,空化效应最剧烈;同时发现,铝箔的四角位置均有不同程度的腐蚀,且与换能器轴线附近的空化场有明显的界限,出现这种现象主要是因为反应器结构的影响,实际的超声场较为复杂,四个换能器紧贴于反应器左端布置,可能会引起反应器的侧壁反射或者共振形成驻波,从而在反应器壁面附近产生空化作用,形成图 3c 中的超声场.

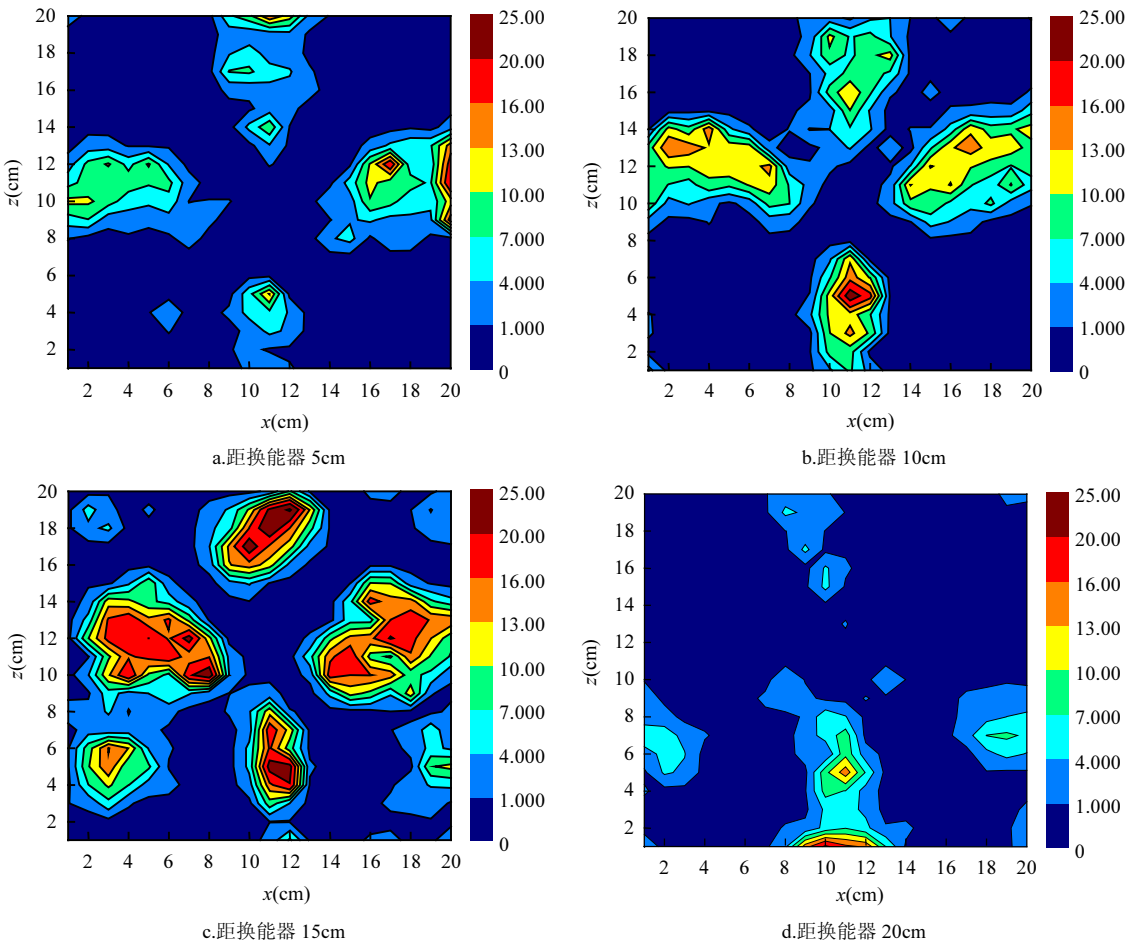


图 3 25kHz 超声空化场二维分布

Fig.3 Two-dimension visualization of ultrasonic cavitation field within 25kHz

图 4 反映了超声频率为  $40\text{kHz}$  时,距超声换能器  $5$ 、 $10$ 、 $15$  和  $20\text{cm}$  的位置的超声空化场的二维分布.对比图 3 中  $25\text{kHz}$  的腐蚀图片发现,随着超声频率的增加,铝箔腐蚀程度减弱.图 4 中,各位

置平面上以换能器轴线为中心的区域均未出现大面积腐蚀,不存在超声高效区,超声波指向性变差.当声波的频率小于气泡的谐振频率时发生空化效应,因此,超声频率的增加不利于空化效应.

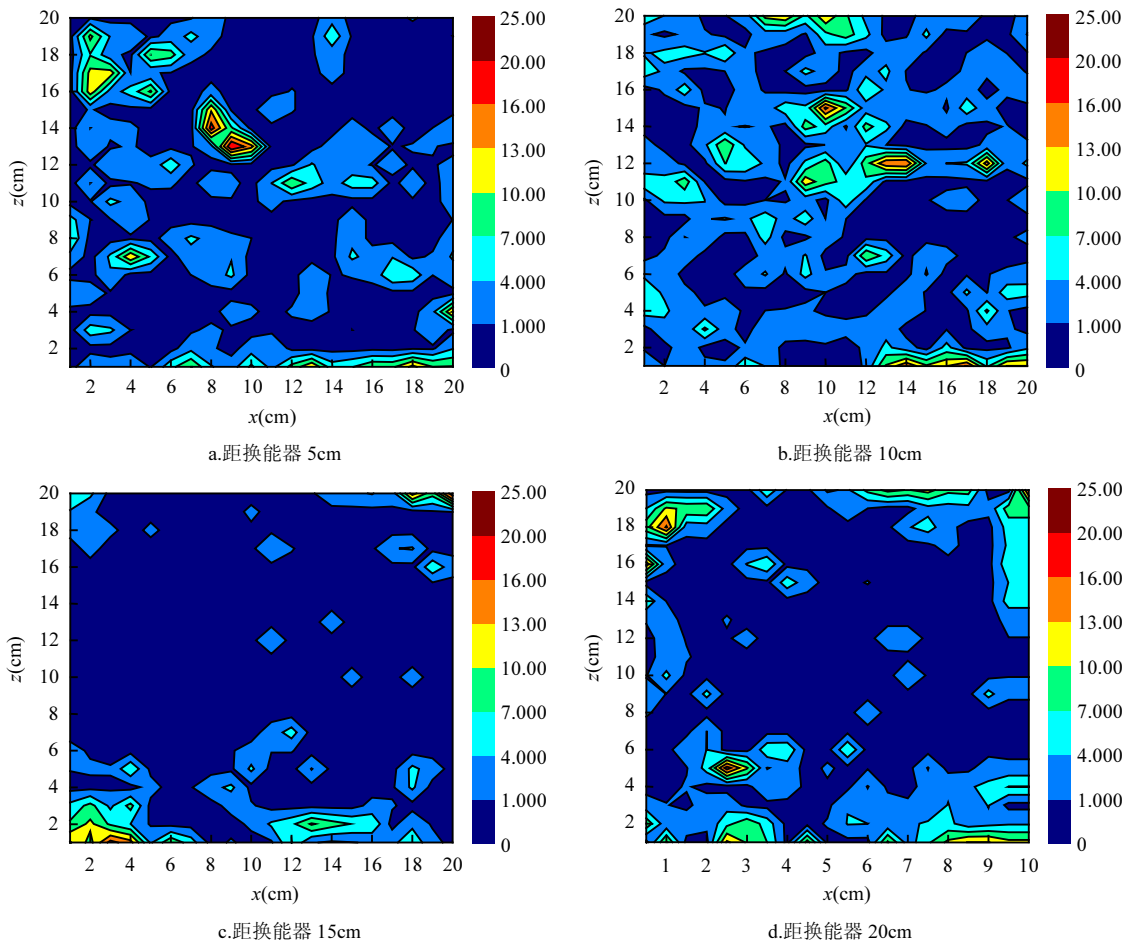


图 4 40kHz 超声空化场二维分布

Fig.4 Two-dimension visualization of ultrasonic cavitation field at 40kHz

图 4a、图 4b 距换能器 5、10cm 的平面上, 腐蚀面积分布较为均匀, 二维场中靠近中心与边缘的位置有若干块腐蚀强度相对大的区域, 可能是超声波在反应器的侧壁反射或者共振形成驻波的结果. 图 4b 中距换能器 10cm 的平面上腐蚀面积大于其他位置平面. 由式(1)可得, 40kHz 的超声波在水中的波长为 3.75cm,  $1/4$  波长约为 0.94cm, 图 4b 中位置约为  $1/4$  波长的 10 倍, 离波腹距离较近, 空化作用较强. 同理可得, 距换能器 20cm 的平面上空化效应较强, 但是由于距换能器较远, 超声波在介质中传播时发生衰减, 造成能量损耗, 图 4d 中的铝箔腐蚀面积小于图 4b 中情况. 对比 25kHz 反应槽内腐蚀情况, 40kHz 的腐蚀场较为均匀. 高频超声波指向性减弱, 驻波对空化

作用的影响较大, 驻波较为复杂, 包括固体—液体、液体—空气界面驻波等, 多种驻波的叠加降低了波腹与波结处的声压差的不均匀度, 使二维声场趋于均匀.

试验还研究了超声频率为 80、125kHz 的铝箔腐蚀试验, 发现这两种条件下, 不同位置的铝箔上几乎没有空化腐蚀点, 反应槽内空化气泡运动情况远远弱于频率为 25kHz 的情况.

综上可得, 距离为影响空化效应的主要因素. 低频超声波指向性强, 声源能量聚焦性好, 空化效应较强且利于形成换能器轴线附近的空化场; 声波在界面处发生反射折射, 形成驻波, 波腹处空化效应明显. 超声频率升高, 膨胀相和压缩相时间缩短, 空化气泡在膨胀相来不及生

长成可以溃灭的空化泡,或者在压缩相来不及溃灭,空化难以进行;高频超声空化场分布较为均匀。

## 2.2 探头式超声波反应器内空化场的二维分布

本研究采用探头式超声波发生装置,研究了频率为 25kHz,声能密度为 0.03、1、3 和 5W/mL 的超声空化场,在如图 1b 所示的坐标系下,绘制探头式空化场的二维分布图。

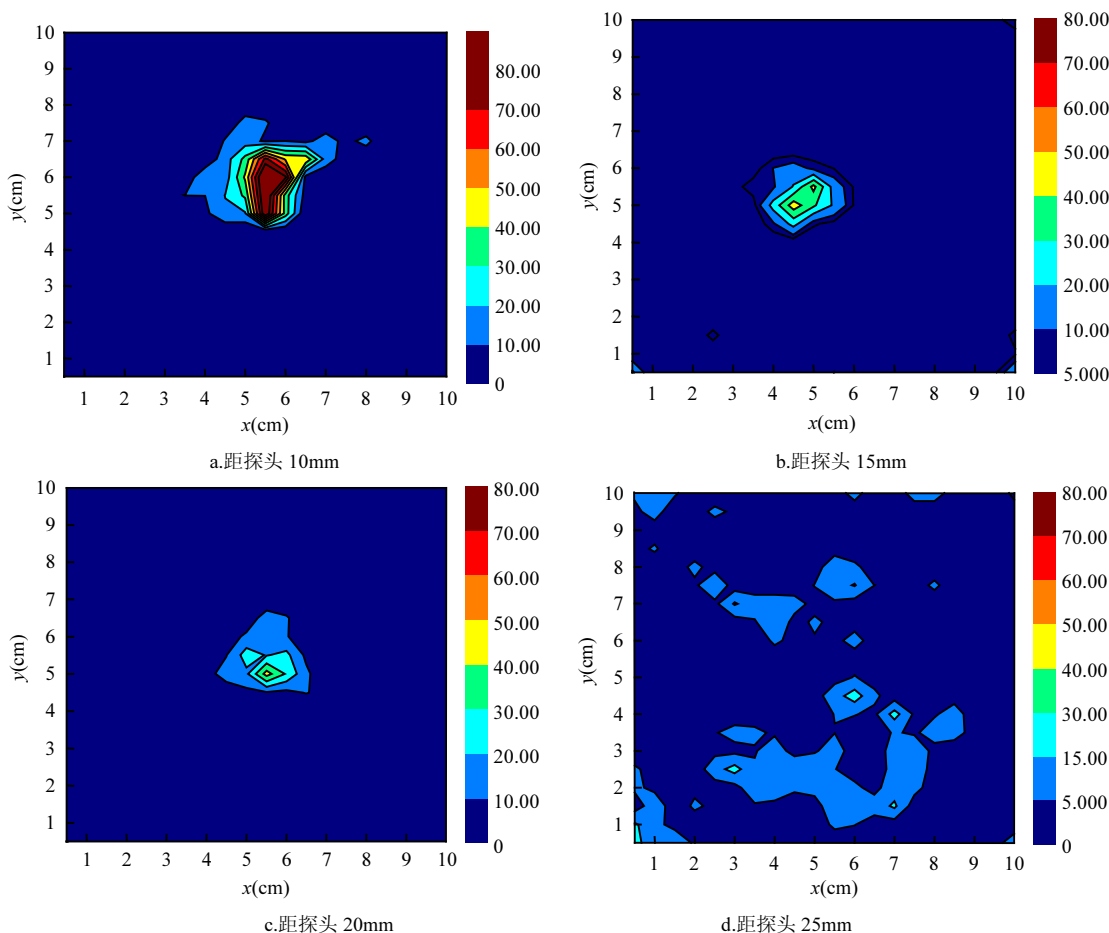


图 5 3W/mL 超声空化场二维分布

Fig.5 Two-dimension visualization of ultrasonic cavitation field with 3W/mL

试验发现,声能密度为 0.03 与 1W/mL 时,几乎不发生铝箔腐蚀,反应容器内空化效应较弱,试验过程中反应容器内几乎看不到空化气泡。同条件 (0.03W/mL、25kHz) 下,槽式超声波反应器中超声空化场较强。槽式反应器中,超声波大范围均匀传递;而探头式反应器的探头直接浸入反应容器中,而超声波传递范围较小,能量仅集中在探头附近,当声能密度较小 (0.03、1W/mL) 时,超声波能量较小,声场内空化强度较低。图 5 为声能密度为 3W/mL 时,距探头 10、15、20 和 25mm 的位置的

超声空化场的二维分布。由图 5 可知,铝箔腐蚀点分布不均匀,由于超声波探头的振动形成的超声波场较为复杂,在水平方向上横向传播,导致能量分布不均。距探头 10、15、20mm 的平面,空化腐蚀点主要集中在探头轴线附近;而距探头 25mm 的平面上,超声场分布范围较广,在边界附近也出现空化腐蚀场。实际超声场较为复杂,一方面,探头直接浸入水中,探头附近空化作用强烈,引起反应器中水的波动;另一方面,在超声波在容器壁上发生折射、反射、共振等现象,形成驻波;这两方面共同作

用,影响超声空化场的分布.距探头 10mm 与 15mm 的平面,空化腐蚀场范围较大,距探头 10mm 处腐

蚀面积可达 80%以上,高效区面积较大.距探头 25mm 的平面上,低效区面积增大,空化效应减弱.

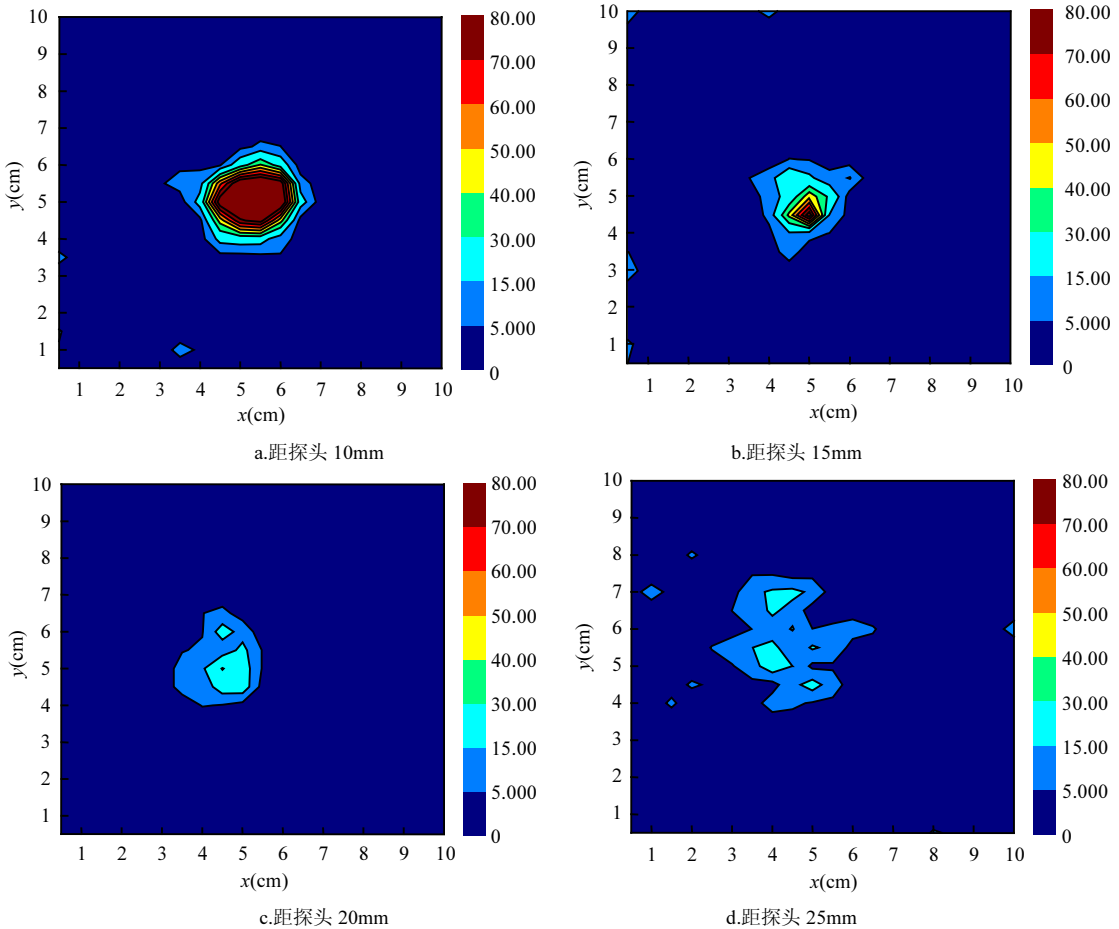


图 6 5W/mL 超声空化场二维分布

Fig.6 Two-dimension visualization of ultrasonic cavitation field with 5W/mL

图 6 为声能密度为 5W/mL 时,距探头 10、15、20 和 25mm 的位置的超声空化场的二维分布.距探头不同位置的超声空化场分布均不均匀,超声波指向性较强,腐蚀点集中在探头轴线附近.铝箔与探头距离的越远,空化效应越弱,可能是由于介质对超声能量的吸收所致.探头附近的区域为高效区.随着超声波声能密度的增加,各位置平面上铝箔腐蚀点增加,腐蚀面积增大,超声空化辐射场增强.

影响探头式超声场的主要因素为声能密度和质点距探头距离,声能密度增大,介质中超声波能量增加,负压区拉伸作用加强,空化泡生长迅速;正压区的挤压作用加剧,空化气泡迅速溃灭,气泡运动剧烈,利于空化效应.探头超声波指向性好,质点

距探头越近,获得的超声能量越大,空化效应强.

### 2.3 超声波破解污泥试验结果

图 7 反映了超声作用对污泥上清液 SCOD 的影响.图 7a 为探头式反应器中超声频率 25KHz 时,SCOD 随声能密度的变化,从图中可以看出,声能密度越大,上清液 SCOD 溶出率越高,污泥破解效果好;5W/mL 处理 10min 后为 4.18mg/L,远高于 0.03W/mL 的情况,与 2.2 节研究结果相符.图 7b 反映了声能密度为 0.03W/mL 时槽式超声波对污泥上清液 SCOD 的影响.25kHz 的超声波破解效果最好,上清液 SCOD 可达 13.6mg/L,超声频率继续增加,上清液 SCOD 呈减小趋势;超声频率由 40kHz 增至 80kHz 时,SCOD 大幅度减小,减幅



达 28%,说明频率的增加不利于超声破解,与 2.1 结果相符.对比图 7a、图 7b 不难发现,槽式反应器中上清液 SCOD 值较大,污泥破解程度高.可能是由于槽式反应器的振源呈矩阵形式排列,能量分布较为均匀,而探头式超声波能量范围小,偏远地区的污泥破解程度低导致的.

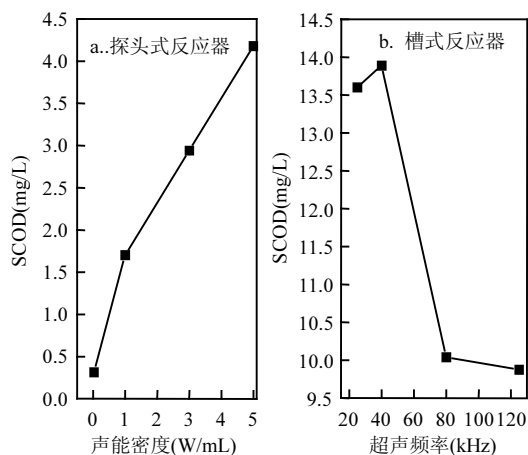


图 7 超声作用对污泥 SCOD 的影响

Fig.7 Effects of ultrasound frequency on SCOD

### 3 结论

**3.1** 在铝箔腐蚀试验的基础上,应用 Matlab 程序实现了槽式与探头式超声空化场的二维定量表征,分析得到了不同试验条件下超声场中的高效区与低效区,探究了超声机理与影响因素,并通过超声波破解污泥试验进行验证.槽式反应器中二维场的分布结果表明:低频率超声波(25kHz)指向性强,高效区集中在以换能器轴线为中心的区域,随着超声频率的增加,铝箔腐蚀程度减弱;超声波波腹处铝箔腐蚀最严重,空化效应强,高效区面积大.

**3.2** 探头式反应器中二维场的分布结果表明:探头式反应器内超声能量较为集中,声能密度 5W/mL 时,高效区腐蚀面积可达 80%以上;空化效果随超声波声能密度的增加而增强;空化场分布不均匀,高效区主要集中在探头轴线附近,随着铝箔与探头距离的增加,空化作用逐渐减弱,低效区面积增加.

**3.3** 超声波指向性强的特征及超声场内驻波的存在是空化场分布不均匀的主要原因.在应用槽式与

探头式超声装置处理污水或污泥时应加以搅拌,避免超声低效区的存在对处理效果造成不利影响.

**3.4** 超声波处理污泥结果表明:上清液 SCOD 随声能密度的增加而增大,声能密度越高污泥破解程度越大;超声频率的增加不利于污泥破碎.槽式反应器破解污泥的效果优于探头式,与铝箔腐蚀试验结果相符.

### 参考文献:

- [1] Pilli S, Bhunia P, Yan S, et al. Ultrasonic pretreatment of sludge: A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011,18(1):1-18.
- [2] Show K Y, Mao T H, Lee D J. Optimisation of sludge disruption by sonication [J]. Water Research, 2007(41):4741-4747.
- [3] 郭 璇,杨艳玲,李 星,等.超声作用对净水沉淀污泥絮体特性的影响 [J]. 中国环境科学, 2014,34(5):259-265.
- [4] Chang T C, You S J, Damodar R A, et al. Ultrasound pre-treatment step for performance enhancement in an aerobic sludge digestion process [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2011,42(5):801-808.
- [5] 郭 璇,杨艳玲,李 星,等.超声空化及絮体破碎过程的模拟与试验分析 [J]. 中国环境科学, 2015,35(5):1429-1435.
- [6] 张 红,丁述理,徐博会,等.超声空化气泡运动的数值模拟 [J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2013,30(4):103-107.
- [7] 胡健龙,冉治霖,李绍峰,等.超声灭活饮用水中隐孢子虫研究 [J]. 中国环境科学, 2014,34(2):431-436.
- [8] Crawford A E. The measurement of cavitation [J]. Ultrasonics, 1964,2(3):120-123.
- [9] Hodnett M, Zeqiri B. A strategy for the development and standardisation of measurement methods for high power/cavitating ultrasonic fields: Review of high power field measurement techniques [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1997, 4(4):273-288.
- [10] Gogate P R, Tatake P A, Kanthale P M, et al. Map-ping of sonochemical reactors Review analysis and experimental verification [J]. American Institute of Chemical Engineers Journal, 2002,487:1542-560.
- [11] 刘丽艳,闻精精,杨 洋,等.基于 MATLAB 的超声空化场表征与三维可视化 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 46(12):1133-1138.
- [12] 张光明,常爱敏,张盼月.超声波水处理技术 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006:4-5.
- [13] Young H D, Freedman R A, Ford A L. Sears and zemansky's university physics [M]. America: Benjamin-Cummings Pub Co, 2005:630-631.

**作者简介:** 郭 璇(1991-),女,北京人,北京工业大学建筑工程学院硕士研究生,主要从事饮用水安全研究.