

网格对超声清洗槽内声场的影响

王秋萍^{1,2}, 刘汉臣¹, 于长丰¹, 严祥安¹, 蒋学芳¹

(1. 西安工程大学理学院, 西安 710048; 2. 陕西师范大学应用声学所, 西安 710062)

摘要: 用网篮盛放待清洗工件是最常用的一种清洗方法, 影响清洗效果的一个关键因素是清洗槽内的声场分布, 而网篮的存在会影响超声清洗槽内声场的分布。从实用的角度研究了清洗网篮对超声清洗槽内声场的影响。在用驻波场理论对清洗槽内声场分布情况进行分析之后, 实验上用水听器法和染色法分别测量了放入网格前后超声清洗槽内声场的分布特点。结果表明, 当丝径远小于 1/4 波长时, 网格的存在对声场分布的影响很小, 只是引起声波传播能量不同程度的衰减。这项研究对使用清洗网篮的超声清洗具有一定的参考价值。

关键词: 超声清洗槽; 声场分布; 网格; 影响

中图法分类号: TB551

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-03-0369-06

The effect of grids on ultrasonic field in cleaning tank

WANG Qiu-ping^{1,2}, LIU Han-chen¹, YU Chang-feng¹, YAN Xiang-an¹, JIANG Xue-fang¹

(1. School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048;

2. Applied Acoustics Institute, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: In ultrasonic cleaning, which is performed by laying the objects to be cleaned on the grids, the distribution of the ultrasonic field in the cleaning tank is one of the basic facts affecting the cleaning result. The existence of the grids can cause the change of ultrasonic field in the ultrasonic cleaning tank. Thus a study of the effect of grids on ultrasonic field in cleaning tank has specially been made. After analyzing the acoustic field by standing wave theory, the acoustic pressure distribution in the cleaning tank and the effects of different grids on the ultrasonic field are experimentally studied with hydrophone and dyeing methods. The results indicate that the existence of the grids results in the loss of the ultrasonic energy, but has little effect on the distribution of the ultrasonic field when the wire diameter of the grids is far smaller than a quarter wave length.

Key words: ultrasonic cleaning tank; distribution of ultrasonic field; grids; effect

1 引言

超声清洗是功率超声最重要的用途之一。影响清洗效果的一个关键因素是清洗槽内的声场分布, 而用网篮盛放待清洗工件又是最常用的清洗方法。这样一则使被清洗物不直接压在清洗槽底而抑制超

收稿日期: 2007-05-17; 修回日期: 2007-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19974022)

作者简介: 王秋萍(1978-), 女, 宁夏人, 硕士, 助教, 研究方向为功率超声、无损探伤。

通讯作者: 王秋萍, E-mail:wangjup@163.com

声波的辐射; 二则可以保护清洗槽底面不被尖利的清洗物件划伤而由于空化腐蚀缩短其使用寿命; 三则有利于被清洗物的取放而使操作人员不必在每次清洗中将手伸入清洗液中。因此, 网篮的网格对清洗槽中声场的影响一直以来都是功率超声研究的一个热点问题^[1,2]。网格对声场影响的研究工作不但对使用网篮的超声清洗具有一定的应用价值, 而且对超声清洗的理论研究也有一定的实际意义, 对于功率超声有关液体处理技术中的应用也具有一定的学术价值及应用价值。

实验中用的是尺寸为 200mm×200mm×200mm

的正方形的超声清洗槽,槽底面粘接的换能器振子由九个相同的半径为 $a=29\text{mm}$ 的喇叭形换能器分三排均匀排布而成,相邻的两个换能器中心间距为 $2a$,换能器布局如图 1 所示。

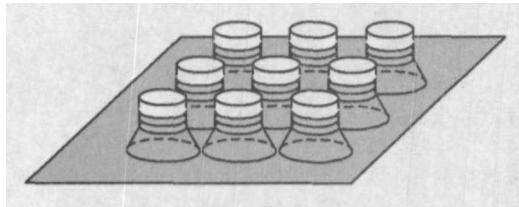


图 1 超声波换能器布阵
Fig1 Array of ultrasonic transducers

2 声场分布的一维近似理论

因为圆形活塞声源均匀地粘接在清洗槽的底板上,并沿其法线方向来回振动,这时所产生的声场是平面声波^[3]。讨论这种声场,归结为求一维波动方程

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

设声压 $p(z, t)$ 随时间的变化是正弦函数,则方程(1)解的形式可表达为

$$p(z, t) = p(z) \exp(j\omega t) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),即可得到关于空间部分 $p(z)$ 的常微分方程

$$\frac{d^2 p}{dz^2} + k^2 p(z) = 0 \quad (3)$$

设方程(3)的解为

$$p(z) = A \sin(kz) + B \cos(kz) \quad (4)$$

其中 A 和 B 为两个任意常数,由边界条件决定。

在超声清洗的过程中,清洗槽内的声压是由振动板的辐射声波和液面或刚性壁的反射波组成,在清洗液中形成驻波^[4-10]。对于自由面(液面)反射的情况,在 $z=0$ 的底面由正弦声压 $p(0, t) = p_0 \exp(j\omega t)$ 激发,在 $z=l$ 的另一面自由。结合边界条件

$$\begin{cases} p(0) = p_0 \\ p(l) = 0 \end{cases}$$

解得方程(4)的解为

$$p(z) = \frac{p_0}{\sin(kl)} \sin(kl) \sin(kz) \quad (5)$$

代入方程(2)得:

$$p(z, t) = \frac{p_0}{\sin(kl)} \sin(kl) \sin(kz) \exp(j\omega t) \quad (6)$$

因为方程(6)中的 $\exp(j\omega t)$ 在 -1 和 $+1$ 之间变化,所以由方程(6)所表达的声压表现为正弦波所形成的驻波形式,声压分布如图 2 所示,图中波峰代表声压

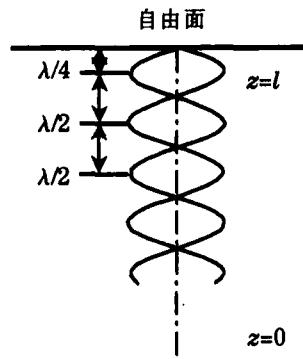


图 2 一维平面波传播模式
Fig.2 One-dimensional model of plane wave propagation

振幅最大处,也就是空化最强处,而波谷则代表声压振幅最小处,即空化最弱处。声压的极大值和极小值等间距的重复出现,重复的间距为 $\lambda/2$ 。

3 超声清洗槽内声场分布的测量

3.1 水听器法^[11-13]

水听器是把水下声压信号转换为电信号的电声转换器件,它能将作用在其上面的声压信号转换成相同频率及波形的交流电压信号,此电压信号与声压成正比。水听器测量超声清洗槽中声压相对值的实验原理如图 3 所示,用具有频率自动跟踪、振幅自动控制的 ACQ-600W 型超声波发生器给换能器振子供电,用频率计检测换能器振子的共振频率,用 EMB10K250 型电功率计监测加至换能器的电功率。用水听器对清洗槽内的声场分布情况进行相对测量,测量时将信号经放大器后用 YB4243 型示波器监控水听器的输出信号。实验过程中保持超声波发生器的输出电功率不变。

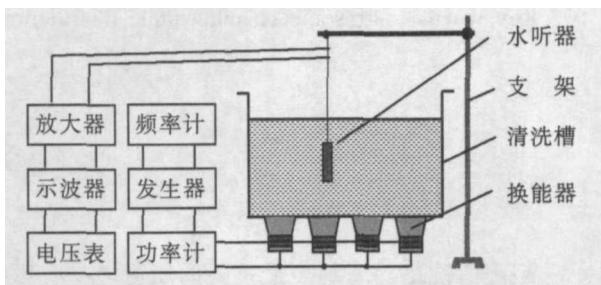


图 3 水听器测量声压的原理图
Fig.3 Diagram of acoustic pressure measurement by hydrophone

实验中将水位加至 148mm,取水中的声速为 $c=1480\text{m/s}$,则频率为 20kHz 时波长 $\lambda=74\text{mm}$,水深为二倍的波长。为了对清洗槽中声压分布在空间上有比较全面的了解,在水平方向上分别测量了同

一面面上沿X、Y及对角线三个不同方向上的声压相对值,在垂直方向上沿清洗槽的中心轴线方向从底面向上逐点测量。图4为清洗槽内距离槽底55mm处液面水平方向上的声压分布情况,图中横坐标为各测点相对于清洗槽中心的位置,各测点间距为10mm,纵坐标为用放大器的输出电压表示所测点声压的相对值。图5为清洗槽内垂直方向上的声压分布情况,图中横坐标为各测点相对于清洗槽底的位置,各测点间距为5mm,纵坐标为用放大器的输出电压表示所测点声压的相对值。

从图4和图5可以看出,清洗槽内液面水平方向上的声压分布比较均匀,且有比较小的起伏,这可能是由于声场的指向特性引起的;而在垂直方向上声压分布呈现出驻波特性,总体上有逐渐减小的趋势,这说明了声波在传播过程中有一定的衰减。而且从图4中可以看出声压在 $\lambda/4$ 的奇数倍的地方附近较大,而在 $\lambda/4$ 的偶数倍的地方附近较小。

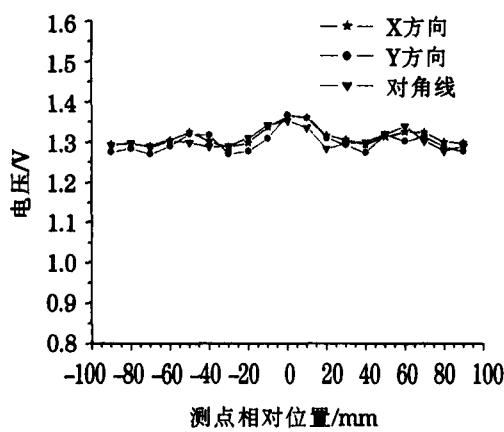


图4 水平液面的声场分布

Fig.4 The distribution of the acoustic field in horizontal direction

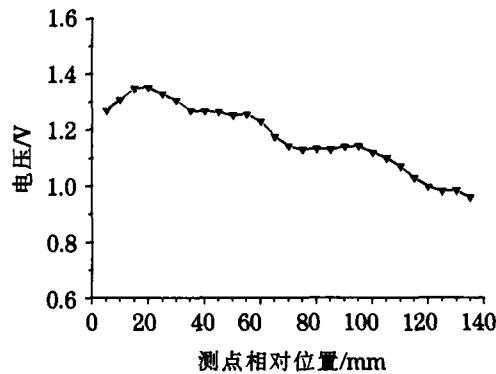


图5 垂直方向上的声场分布

Fig.5 The distribution of the acoustic field in vertical direction

3.2 染色法^[14-16]

为了直观地了解超声清洗槽内声场的分布情

况,采用染色法在铜板纸上直接记录槽内空化腐蚀分布情况。在清洗槽内注入4mg/L的亚甲基蓝染料水溶液,将铜板纸固定在事先做好的不锈钢框架上,浸入亚甲基蓝染料水溶液中,超声作用30秒后,取出铜板纸,晾干、整平后,用扫描仪复制出染料图案。图6(a)、6(b)、6(c)、6(d)分别为铜板纸水平放置于距离槽底 $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 、 $3\lambda/4$ 、 λ 处的染料图案,图7为铜板纸垂直于液面放置在染料水溶液中的染料图案。

从图6和图7中可以看出,铜板纸上沉积的染料图案由浅蓝色背景和许多离散的斑点组成,而这些离散的斑点正好是铜板纸表面被空化腐蚀的结果。图6所示铜板纸在 $\lambda/4$ 和 $3\lambda/4$ 处的染料斑点较多且分布比较均匀,而在 $\lambda/2$ 和 λ 处的染料斑点很少。处于不同深度平面上的斑点的这种分布特性说明了清洗槽内超声波空化在 $\lambda/4$ 和 $3\lambda/4$ 附近比较强,而在 $\lambda/2$ 和 λ 附近比较弱。图7所示铜板纸上斑点的分布则表现出驻波场的特性,而从槽底向上铜板纸上有斑点的地方斑点的数量也在逐渐减少。从图7中还可以看出铜板纸上和槽底紧挨的地方染料斑点并非是最多的,斑点最多的地方出现在较之向上的部位,经测量这个地方正好在 $\lambda/4$ 附近。这些现象都说明了槽底的空化并非是最强的,而且空化强度由槽底向上逐渐减弱,这也反映了声波能量在逐渐衰减。

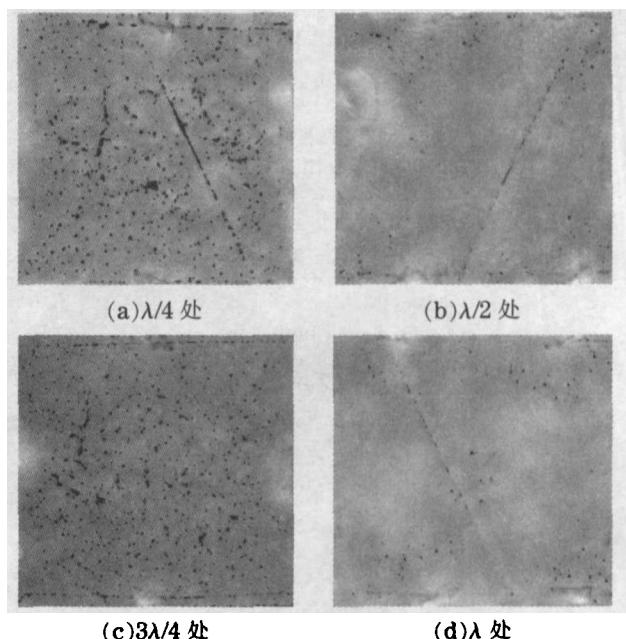


图6 液面水平方向上的染料图案

Fig.6 Dyeing pattern of the acoustic field in horizontal direction

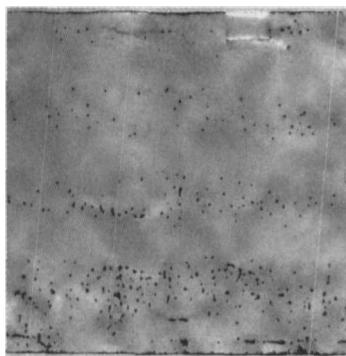


图 7 垂直方向上的染料图案

Fig.7 Dyeing pattern of the acoustic field in vertical direction

4 网格对清洗槽内声场分布影响的研究

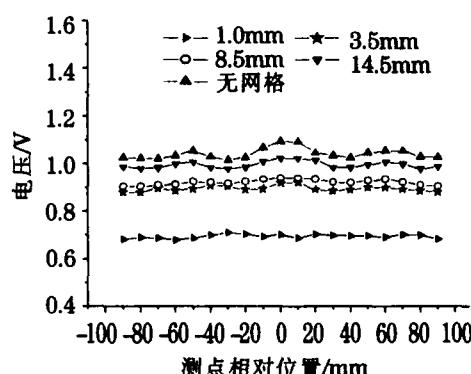
4.1 用水听器对放入网格后超声清洗槽中的声压进行相对测量

实验中保持水位为 148mm。为了比较全面的了解网格对清洗槽内声场的影响,将网格放入清洗槽内的待定高度,对其正上方某一水平面测量了沿 X 方向上的声压相对值,在垂直方向上沿清洗槽的中心轴线方向从网格位置开始向上逐点测量。在测试过程中测点取向方式和无网格时的相同。实验中将网格固定在事先做好的网格支架上,并保证网格所在面与液面平行,网格的高度可调。每次实验前先把待实验的网格固定于支架的预定高度,然后将支架连同网格一起放进清洗槽内并固定好支架。

图 8 为丝径和孔径大小都不同的正方形不锈钢丝网格位于距离槽底 $\lambda/4$ 时测得 $3\lambda/4$ 水平液面相对于无网格时的声压分布。网格的规格见表 1 所示。

表 1 网格的规格
Table 1 Specification of grids

丝径/mm	0.3	0.6	1.2	2.5
孔径/mm	1.0×1.0	3.5×3.5	8.5×8.5	14.5×14.5

图 8 网格位于离底 $\lambda/4$ 时 $3\lambda/4$ 处水平液面的声场分布Fig.8 The effects of different grids at $\lambda/4$ from bottom on the distribution of the acoustic field in horizontal direction

从图 8 可以看出:网格的存在使得同一水平面的声压值减小了,没有局部增大的现象,而且网孔越小声压值越小。

图 9(a)、9(b)分别为孔径均为 $8.5\text{mm} \times 8.5\text{mm}$,而丝径分别为 0.8mm 和 1.2mm 的正方形不锈钢丝网格分别位于距离槽底 $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ 时测得 $3\lambda/4$ 水平液面相对于无网格时的声压分布。

从图 9 可以看出:在孔径相同的情况下,网格的丝径越大其声压值越小;相对于同一液面,网格位于距离槽底 $\lambda/2$ 时的声压值比位于距离槽底 $\lambda/4$ 时的小,说明同样情况下网格位于 $\lambda/2$ 时对声波的传播影响较大。

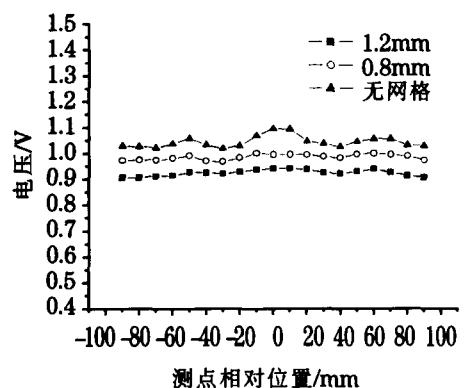
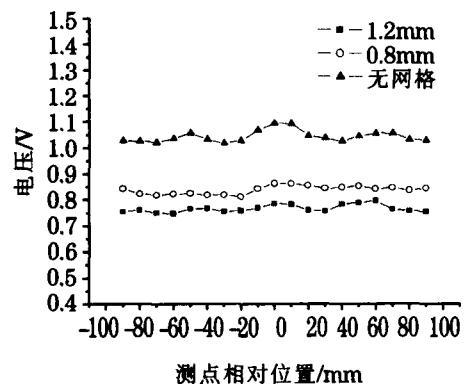
(a) 网格位于离底 $\lambda/4$ 时 $3\lambda/4$ 处的声场分布(b) 网格位于离底 $\lambda/2$ 时 $3\lambda/4$ 处的声场分布

图 9 网格位于不同位置处时液面水平方向上的声场分布

Fig.9 The effects of two grids at $\lambda/4$ and $\lambda/2$ from bottom on the distribution of the acoustic field in horizontal direction

图 10 是孔径为 $3.5\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 、丝径为 1.2mm 的正方形不锈钢丝网格位于距离槽底 15mm 和 35mm 时测得清洗槽内垂直方向上相对于无网格时的声压分布。

从图 10 可以看出:网格的存在使得同一位置的声压值减小了;对于同一位置,网格位于 35mm(接近 $\lambda/2$)处时对声波传播的影响比位于 15mm(接近 $\lambda/4$)处时的大。

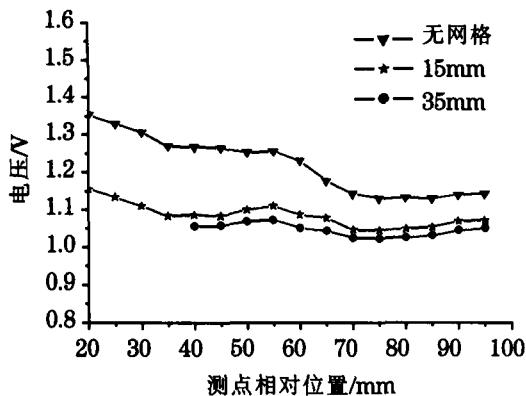


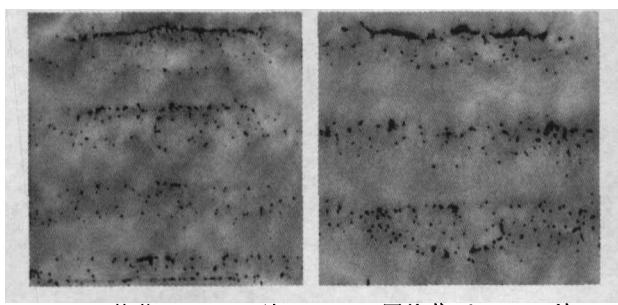
图 10 同一网格位于不同处液面垂直方向的声场分布

Fig.10 The effect of the grid on the distribution of the acoustic field in vertical direction

4.2 用染色法观察网格对超声清洗槽中声场分布的影响

4.1.1 网格位于 18mm 和 35mm 处液面垂直方向上的染色图案的比较

图 11(a)、11(b) 分别是丝径为 2.5mm、孔径为 14.5mm×14.5mm 的正方形不锈钢丝网格位于距离槽底 18mm 和 35mm 处液面垂直方向上的染色图案, 实验中保持纸面与槽底垂直且与网格接触。从图中可以清楚的看出当网格位于 18mm 处时, 网格上方紧挨网格的地方染料斑点多, 说明这种情况下网格正上方的空化强, 如果把被清洗物件直接放于网格上面有利于清洗。而当网格位于 35mm 处时, 网格上方紧挨网格的地方几乎没有染料斑点, 说明这种情况下网格正上方的空化很弱, 如果把被清洗物件直接放于网格上面将使之正好处于清洗盲区而不利于清洗。由此可见, 网格位于二分之一波长及其整数倍附近时对清洗不利。



(a)网格位于 18mm 处 (b)网格位于 35mm 处

图 11 垂直方向上的染色图案

Fig.11 Dyeing pattern of the acoustic field in vertical direction

4.2.2 网格位于不同位置时液面水平方向上染色图案的比较

图 12(a)、12(b)、12(c) 和图 13(a)、13(b)、13(c) 分别为丝径为 2.5mm、孔径为 14.5mm×14.5mm 的

正方形网格位于距离槽底 $\lambda/4$ 处时水平液面 $\lambda/2$ 、 $3\lambda/4$ 及 λ 处水平液面的染色图案和位于距离槽底 $\lambda/2$ 处时水平液面 $3\lambda/4$ 、 λ 及 $5\lambda/4$ 处的染色图案。实验中保持网格放置于清洗槽内不同深度时与液面平行。

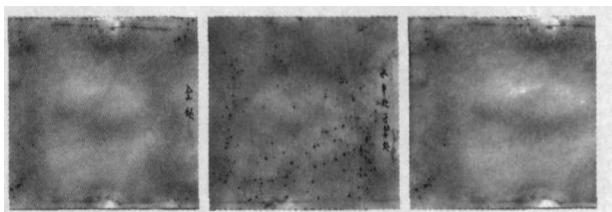
(a) $\lambda/2$ 处 (b) $3\lambda/4$ 处 (c) λ 处图 12 网格位于 $\lambda/4$ 处时水平方向不同液面的染色图案

Fig.12 Dyeing pattern of the acoustic field in horizontal direction

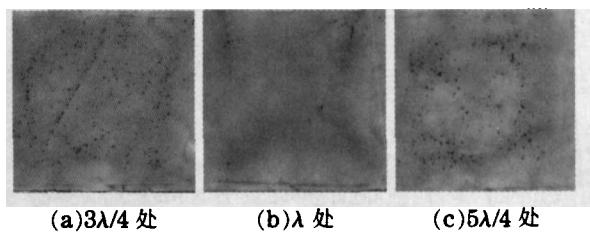
(a) $3\lambda/4$ 处 (b) λ 处 (c) $5\lambda/4$ 处图 13 网格位于 $\lambda/2$ 处时水平方向不同液面的染色图案

Fig.13 Dyeing pattern of the acoustic field in horizontal direction

从图 12 和图 13 中可以看出, 无论网格放于距离槽底 $\lambda/4$ 处还是 $\lambda/2$ 处时, 铜板纸在距离槽底四分之一波长的奇数倍处染料斑点多而且分布较均匀, 而在偶数倍处染料斑点很少。这说明了在四分之一波长的奇数倍附近超声空化强, 在偶数倍附近超声空化弱。这种染料图案所显示的声场分布和前面无网格时的比较一致, 这说明在网格丝径比波长小很多的情况下, 网格放于不同位置时对声场分布的影响很小, 只是引起声波传播能量有不同程度的衰减。

5 总 结

本章从理论和实验两方面研究了超声清洗槽中的声场分布特性及网格对声场的影响, 得到以下结论:

(1) 超声清洗槽内液面水平方向声压分布比较均匀, 但也有很小的起伏变化。

(2) 在清洗槽内液面垂直方向的声压分布显示了驻波特性, 而且从槽底向液面声压有逐渐减小的趋势。这说明了声波在传播过程中有一定的衰减。

(3) 水听器测量的结果和染色图案显示的结果都表明, 网格的存在并没有破坏声场在水平方向上分布比较均匀, 而在垂直方向上呈现出驻波形式的分布特性, 而且没有改变声场强度在四分之一波长

奇数倍的地方附近较强,而在偶数倍的地方附近较弱的分布规律。这就说明了当网格的丝径远小于声波波长时网格的存在对声场分布的影响比较小,只是引起声传播能量一定程度的衰减。

(4)网格位于二分之一波长及其整数倍附近时对清洗不利。

致谢:本文得到了陕西师范大学应用声学所牛勇、任金莲、张明铎等老师的悉心指导和大力帮助,在此表示衷心地感谢!

参 考 文 献

- [1] 贺西平, 程存弟. 栅的散射场研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 1991, 19(2): 32-36.
HE Xipin, CHEN Cundi. A study of the scatter fields of the gratings[J]. Journal of Shaanxi Normal University Science Edition, 1991, 19(2): 32-36.
- [2] 全杰, 董彦武, 尚志远, 等. 超声水槽中网孔透声效果实验研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 1992, 20(4): 30-32.
TONG Jie, DONGYanwu, SHANG Zhiyuan, et al. Experimental study on the effect of ultrasonic washing through a metal net[J]. Journal of Shaanxi Normal University Science Edition, 1992, 20(4): 30-32.
- [3] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京大学出版社, 2001.
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufeng. Basic of acoustics[M]. Nanjing University Press, 2001. 3.
- [4] Jin O Kim, Sunghoon Choi, Jung Ho Kim. Vibroacoustic characteristics of ultrasonic cleaners[J]. Applied acoustics, 1999, 58(2): 211-228.
- [5] 任金莲, 张明铎, 牛勇, 等. 改善大功率超声清洗声场均匀性的一种方法[J]. 压电与声光, 2003, 25(4): 347-350.
REN Jinlian, ZHANG Mingduo, NIU Yong, et al. Method for improving sound field distribution of high-power ultra sonic cleaning [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2003, 25(4): 347-350.
- [6] 张镜澄. 超声清洗槽中的驻波声场及其消除方法[J]. 声学技术, 1994, 13(04): 173.
ZHANG Jingcheng. The standing-wave field and its eliminating methods in ultrasonic cleaning tank [J]. Technical Acoustics, 1994, 13(04): 173.
- [7] 林书玉, 张福成, 郭孝武. 关于改善超声清洗声场均匀性的研究[J]. 应用声学, 1993, 12(2): 34-38.
LIN Shuyu, ZHANG Fucheng, GUO Xiaowu. Researches on improving the uniformity of ultrasonic cleaning field [J]. Applied Acoustics, 1993, 12(2): 34-38.
- [8] 陈元平. 混响场中强声场的测定及应用[J]. 声学技术, 1996, 15(4): 179-181.
CHEN Yuanping. The measurement and application of strong ultrasonic field in reverberationg field [J]. Technical Acoustics, 1996, 15(4): 179-181.
- [9] 梁召峰, 周光平. 低频超声清洗声场强度的测量[J]. 洗净技术, 2004, 2(10): 15-19.
LIANG Zhao Feng, ZHOU Guangping. Measurement methods of the low-frequency ultrasonic fields in the ultrasonic cleaning[J]. Cleaning Technology, 2004, 2(10): 15-19.
- [10] 颜忠余, 林仲茂. 双频超声清洗器[J]. 声学技术, 1994, 13(4): 171-172.
YAN Zhongyu, LIN Zhongmao. Double frequency ultrasonic cleaner[J]. Technical Acoustic, 1994, 13(4): 171-172.
- [11] L Gaete-Garretón, Y Vargas-Hernández, S Pino-Dubreuil, et al. Ultrasonic detectors for high-intensity acoustic fields [J]. Sensors and Actuators A, 1993, 37-38: 410-414.
- [12] Soudagar S R, Samant S D. Seniquantitative characterization of ultrasonic cleaner using a novel piezoelectric pressure intensity measurement probe[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1995, 2(1): 49-53.
- [13] 贾志富. 测量超声场声强用组合式水听器的设计方案[J]. 声学技术, 2001, 20(2): 92-94.
JIA Zhifu. Design schemes of combined hydrophones used for acoustic intensity mesurements of ultrasonic field[J]. Technical Acoustics, 2001, 20(2): 92-94.
- [14] 方启平, 颜忠余, 黄金兰, 等. 用染色法记录液体中大功率超声场的分布[J]. 声学技术, 1996, 15(4): 177-179.
FANG Qiping, YAN Zhongyu, HUANG Jinlan, et al. Recording of high power ultrasonic field distribution in a liquid with dyeing method[J]. Technical Acoustic, 1996, 15(4): 177-179.
- [15] Sarvazyan A P, Pashovkin T N, Shilnikov G V. An extremely simple and rapid method of registration of ultrasonic field patterns[J]. Proceedings of Ultrasonics International, London: Butterworths, 1985, 324-328.
- [16] Shiran M B, Quan K M, Watmough D J, et al. Some of the factors involved in the Sarvazyan method for recording ultrasound field distributions with special reference to the application of ultrasound in physiotherapy [J]. Ultrasonics, 1990, 28(6): 411-414.