

染色法测量超声空化场研究

张 涛¹, 张永元¹, 马宏伟², 梁召峰³, 周凤梅⁴

(1 西安科技大学理学院, 陕西 西安, 710054)

(2 西安科技大学机械工程学院, 陕西 西安, 710054)

(3 深圳职业技术学院电子工程系, 广东 深圳 518055)

(4 南京大学声学研究所, 江苏 南京 210093)

[摘要] 简易、形象地评定声空化强度与分布是功率超声技术应用中的重要技术. 本文利用染色法测量侧置换能器清洗水槽中声空化场, 通过改变功率, 对多种染色载板的染色效果加以比较, 给出 3 种适合不同功率情形使用的染色载板, 并提出染色法最佳观测时间和最佳观测方法. 同时, 研究了变频条件下清洗水槽中的空化分布. 结果表明, 连续变频下获得均匀的空化场. 染色法能形象描述超声清洗设备和声化学反应器中的声空化分布, 并且具有简单、直观、经济、可信度高的优点, 是一种实际可行的声空化定性评价方法.

[关键词] 染色法, 声空化, 超声清洗

[中图分类号] O 427. 4 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2009)01-0039-04

Research on Acoustic Cavitation Field by a Dyeing Method

Zhang Tao¹, Zhang Yongyuan¹, Ma Hongwei², Liang Zhao Feng³, Zhou Fengmei⁴

(1. School of Science Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(2. School of Mechanical Engineering Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(3. Department of Electronic Engineering Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

(4. Institute of Acoustics Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract It is necessary to easily and directly evaluate the intensity and the distribution of acoustic cavitation in the power ultrasound technology. In this paper, the cavitation field of the ultrasonic cleaning bath with the transducer placed on the sidewall is measured by a dyeing method and the distributions of the acoustic cavitation are studied. Different dyeing papers are adopted in this measurement and three kinds of papers suitable for dyeing are given, additionally, the best time and the best method for evaluating the dyed papers are given. The results show that the dyeing method is an easy, visualized, economic and exact method to evaluate the intensities and distributions of the acoustic cavitation in the ultrasonic cleaning devices and sonochemical reactors, and especially, it is a practical method to qualitatively evaluate the acoustic cavitation.

Key words dyeing method, acoustic cavitation, ultrasonic cleaning

随着超声学发展, 超声技术已经广泛应用于军事、医疗、通信和卫生等行业, 如功率超声清洗机械、医疗设备和进行医学治疗 (HIFU) 等^[1, 2], 尤其是利用功率超声的声化学技术近几年得到迅猛发展. 直接影响高强超声治疗、超声清洗和声化学反应的关键因素是声致空化效应^[3], 声空化的强度及空化场分布成为上述超声应用中的重要问题. 近几年对声空化的研究更侧重于空化微观机制和测量的精确度^[4, 5], 而对于大、中型超声清洗槽和声化学反应器, 宏观的声空化强度和空化场分布与清洗效率^[6, 7]和化学反应速率的关系^[8]是研究者最感兴趣的问题. 因而要求确定一种方便易行、经济可靠和适宜于宏观评价的空化测量方法. 染色法^[9, 10]、碘释放法^[3]、电化学法^[3]、声致发光法^[11]、水听器法^[12]等诸多声空化测量技术中, 染色法满足上述要求, 能够方便、形象地评定超声液容仪器中的空化强度和分布.

收稿日期: 2008-03-12

基金项目: 国家自然科学基金 (50674075, 10474061) 资助项目.

通讯联系人: 张 涛, 博士, 研究方向: 声学微器件与声学测量. E-mail: zhang@xust.edu.cn

1 实验仪器与目的

为避免清洗水槽中出现明显驻波, 换能器黏结在水槽的侧壁上, 远离换能器一侧加有厚度约 10 cm 的尖劈吸声块, 利用水槽长度可在不同位置处设置不规则反射面来减少或消除驻波现象, 实验设备见图 1 所示, 换能器在侧壁的黏结位置如图 2 水槽用不锈钢材料制作, 钢板厚度及水槽尺寸见表 1.

换能器激发频率为 27.69 kHz 多功能表和瓦特计同时监测频率和换能器电功率. 用亚甲基蓝作染色剂, 溶液浓度取为 5 mg/L, 染色板采用铜版纸, 染色时间为 1 min, 染色纸采用沿换能器轴向和垂直换能器轴向 2 种放置方法. 实验中采用 12 种不同规格的白卡和铜版纸作染色板进行对比研究, 使用高分辨率数码相机对染色结果进行拍照录入.

表 1 清洗水槽参数 (mm)

| Table 1 Sizes of cleaning trough (mm) | | | |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|
| 钢板厚度 | 长度 | 宽度 | 高度 |
| 2 | 800 | 200 | 200 |

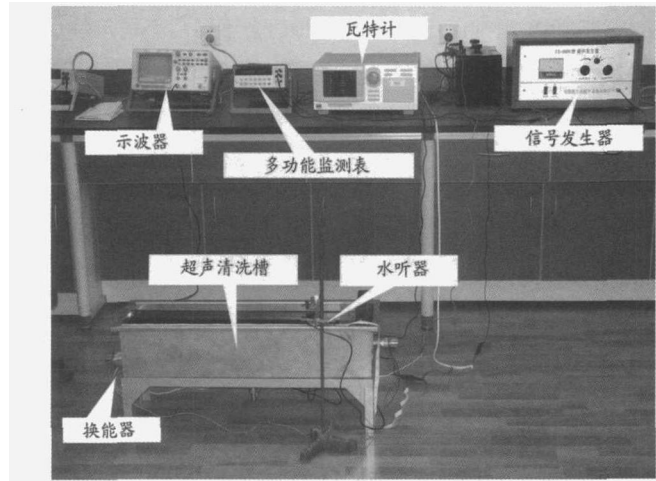


图 1 实验装置图

Fig.1 Diagrammatic sketch of experiment equipments

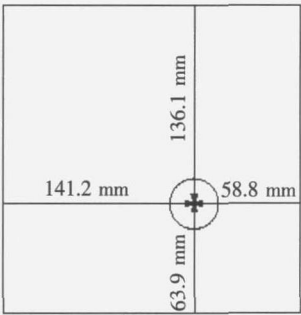


图 2 换能器黏结位置

Fig.2 Position of transducer

2 声空化测量

2.1 不同染色纸染色效果比较

实验中对不同厚度的国产白卡、荷兰白卡、国产铜版纸和韩国铜版纸 12 种规格的载体纸进行染色对比, 以确定其中最适合染色法使用的纸张, 将相同条件下的染色结果进行对比发现, 175 g/m² 国产铜版纸, 200 g/m² 进口韩国铜版纸和 250 g/m² 国产白卡的染色效果比其它 9 种染色纸染色效果好, 其中, 200 g/m² 进口韩国铜版纸染色效果与 175 g/m² 国产铜版纸相似, 但因其质地更致密, 染色点较少, 适合电功率为 70W ~ 120W 范围内使用, 图 3 和图 4 是在换能器轴线上距离换能器 1 cm ~ 22.3 cm 范围内 2 种染色纸染色效果比较.

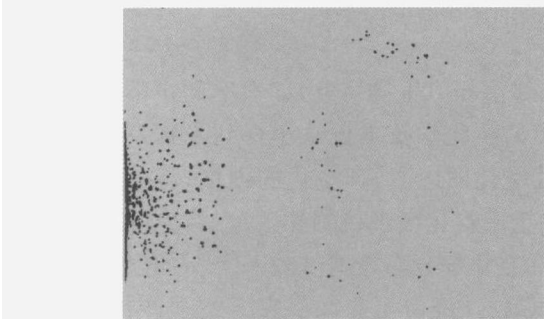


图 3 175 g/m² 国产铜版纸

Fig.3 Cavitation on homemade dyeing papers

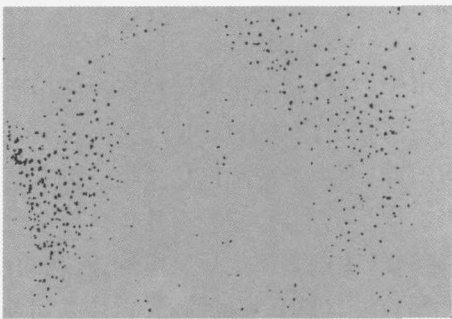


图 4 250 g/m² 国产白卡

Fig.4 Cavitation on homemade white cards

图 3 和图 4 是在电功率为 41W 时在相同位置上测量到的空化场分布, 图 4 中的空化染色点明显多于图 3, 对空化场的描绘更细致, 导致这个现象的原因是因为国产白卡质地较疏, 既有的气泡核更容易导致

空化产生.然而对于实际测量来说,过多的染色点会干扰对空化强弱区域的判断,因而,该规格的国产白卡比较适合电功率小于 40W 的空化场测试.本文中所用电功率主要为 41W,该条件下最适合用来染色的染色纸是 175 g/m^2 国产铜版纸,这种染色纸在电功率 40W ~ 80W 以内能有效染色.

2.2 染色机理以及染色纸的最佳观查时间和方法

染色法是表征声场还是表征空化,一般认为既表征声场,也表征空化,在实验中我们发现,主要是因为空化泡爆裂时产生的微区域高压同时伴有激流产生,使染料沉淀附着,从而出现染色点,这一点可以从图 5 中染色点周围的爆破晕(A 标注区)看出,所以,空化是染色的主要原因.

染色法的最佳观测时间是染色结束后第一时间,因为有些空化点因为空化的强度不够高,能在染色纸上留下爆破晕但却无法有效染色,而这些爆破晕只有在刚出溶液时在背景光的投射下清楚显现,染色纸风干后,这些空化现象不再可见(B 标注区).图 5 是在染色纸出溶液第一时间,以日光为背景光,利用高分辨率数码相机拍下的染色图片,其中泛白但没有染色点的圆晕是没有染上色的空化区域,如果用专业作图的背景光桌面观察,效果会更清晰.

2.3 41 w 电功率下清洗槽中空化分布

采用垂直换能器轴向方向,以距离换能器辐射面不同距离处测量该处二维空间上的声空化强度,测量间隔为 1 cm ~ 2 cm,从染色纸上染色点的大小与多少可以判断出在该位置处的空化强度和分布,距离换能器 2 cm、8 cm 和 10 cm 位置处的空化测量结果如图 6 图 7 和图 8 所示.

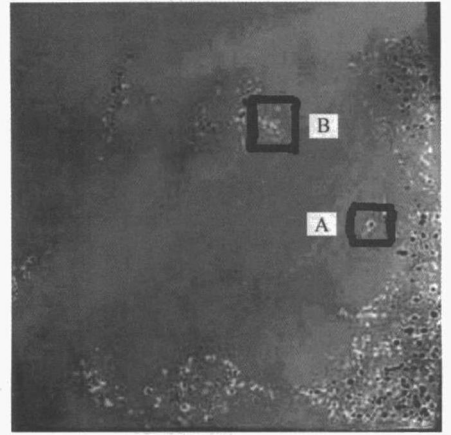


图 5 背景光投射下染色图片拍照

Fig.5 Cavitation phenomena with background light

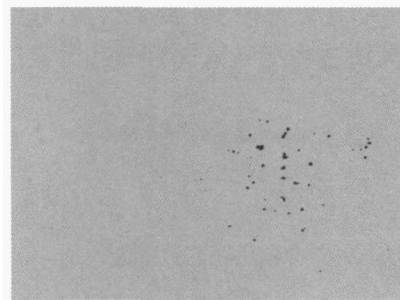


图 6 2 cm 处空化场

Fig.6 Cavitation at 2 cm

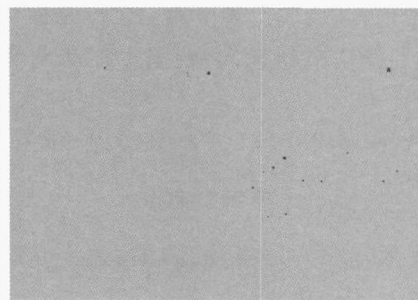


图 7 8 cm 处空化场

Fig.7 Cavitation at 8 cm



图 8 12 cm 处空化场

Fig.8 Cavitation at 12 cm

对比图 6 图 7 和图 8 并结合其它位置处的染色图片可以看出,沿着轴向方向空化场发生强弱变化,空化场强度的三维分布类似葫芦状^[4],随着距离换能器的距离增加,声波更接近于球面波传播,强空化区域偏离轴线以圆弧状向外扩散,这是声场指向性的结果.声场中 0 cm ~ 20 cm, 45 cm ~ 60 cm 2 个区域有有明空化,后一区域空化较强的原因是因为吸声尖劈的声反射,用水听器测得这个区域的声场明显比中段的声场强,由此结论可知,换能器对端放置不规则反射界面能有效避免驻波形成,因而侧置换能器比底置换能器清洗水槽更有利于避免驻波出现,沿轴向在轴线上放置染色板测量到空化场如图 3 和图 9 所示,从中仍然能看出在轴线位置上有规律的强弱区域出现,但这个强弱间隔与文献 [10] 中 20 kHz 超声声场下测量的声场强弱间隔相似,因而仍能看出驻波现象存在.

综合反射面对空化场的影响以及水槽中空化场的分布,在实际清洗操作或声化学反应中,可以考虑在不同位置处添加不规则反射面来避免驻波形成,以提高水槽中声空化场的均匀性.

2.4 连续变频下空化场测量

在 27.7 kHz ~ 32.7 kHz 之间往返连续变化激励频率,得到强度和均匀性都比恒定的 27.69 kHz 激励频率下强的空化场,如图 9 是恒定频率下测得的空化场,图 10 是在相同位置处连续变化激励频率下测得的空化场.当激励频率在换能器谐振频率附近变化时,由于偏离谐振频率会导致换能器声功率下降,激发

声场强度减弱, 电声转换效率降低, 然而比较图 9 和图 10 空化场分布, 连续变频下的空化场非常均匀, 平均强度比恒定频率下空化场要强, 由此可见变频条件下空化气泡爆破几率增加, 冲激强度增大. 虽然连续变频还存在着有关换能器设计以及能耗方面的问题, 但这个结论对于要求声场均匀性的超声清洗设备来说有很大参考价值, 并且频率的变化更有利于被清洗物品上灰垢或附着颗粒脱落. 随着宽频换能器研究的进展, 连续变频清洗设备有望得到推广和应用.

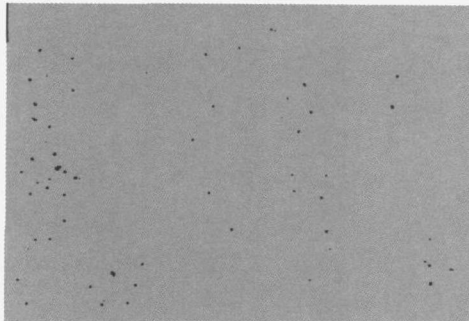


图 9 40 cm~58 cm 轴线上空化场
Fig.9 Cavitation along 40 cm~58 cm

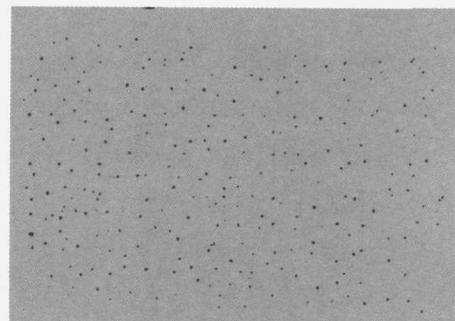


图 10 连续变频下空化场
Fig.10 Cavitation with variable frequency

3 结果与讨论

由本文结果可知, 染色法是一种简便易行而且直观形象的评价声空化分布的方法, 适宜于超声清洗水槽或声化学反应器中声空化场强度与分布定性评价中. 对不同强度空化场应采用不同的染色载体, 本文给出了使用于不同功率范围的 3 种染色载体, 染色完成后应在第一时间在背景光的照射下进行空化效果观察和拍照录入. 实验用侧置换能器清洗水槽中的空化场呈现葫芦状分布, 并且轴线上出现强弱变化区域, 但强弱区域分布与理想驻波分布相差很大. 连续变频下的空化场强度与分布比恒定频率下要强很多, 并且分布非常均匀, 如果忽略变频对换能器产生的机械影响, 这个结果对多频清洗和提高清洗效率有借鉴价值.

致谢: 感谢西安科技大学博士启动基金 (No A503095) 和西安科技大学培育基金 (No 200839) 的支持.

[参考文献]

- [1] Andreas Blana Bernhard Walter High-intensity focused ultrasound for the treatment of localized prostate cancer 5-year experience [J]. Urology, 2004, 63(2): 297-300
- [2] 张永元, 张涛, 吴胜举, 等. 纵弯复合模式超声换能器设计 [J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2007, 30(1): 49-52
- [3] 冯若, 赵逸云. 声化学主动力——声空化及其检测技术 [J]. 声学技术, 1994, 13(2): 56-61.
- [4] Alexei Moussatov, Christian Ganger, Bertrand Dubus Cone-like bubble formation in ultrasonic cavitation field [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2003, 10(4): 191-195.
- [5] Chen W S, Matula T J, Cum L A. The disappearance of ultrasound contrast bubbles: observations of bubble dissolution and cavitation nucleation [J]. Ultrasound in Med & Biol, 2002, 28(6): 793-803.
- [6] Managopoulos IP, Martin C J, Hutchison JM S Measurement of field distributions in ultrasonic cleaning baths: implications for cleaning efficiency [J]. Phys Med Biol, 1995, 40(11): 1897-1908.
- [7] Wainough D J. Role of ultrasonic cleaning in control of cross-infection in dentistry [J]. Ultrasonics, 1994, 32(4): 315-317.
- [8] Servant G, Laborde J L, et al. On the interaction between ultrasound waves and bubble clouds in mono- and dual-frequency sonoreactors [J]. Ultrasonics, 2003, 10(6): 347-355.
- [9] Wainough D J, Managopoulos IP, Lee W L, et al. A new method of recording cavitation events [J]. Acoustic Bulletin, 1993, 18(2): 15-19.
- [10] 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.
- [11] 刘岩, 王志刚. 用声致发光记录脉冲声场中的空化峰 [J]. 声学技术, 2000, 19(3): 144-145.
- [12] 梁召峰, 周光平, 林书玉. 大功率低频超声场测量研究进展 [J]. 声学技术, 2004, 23(1): 61-66.

[责任编辑: 顾晓天]