

液体工业规模声处理中空化气泡的测量

徐德龙^{1,2}

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 东北石油大学地球科学学院地球物理学系, 黑龙江大庆 163318)

摘要: 工业规模液体内的声处理应用越来越多地得到国内外声学工作者的关注。一般认为, 液体内声处理的机理是声空化, 因此要扩大声处理的规模, 应把研究的重点放在声空化的优化, 而不是一味提高声能输入。而对声空化优化的前提则需要找到简单易行、生产上可用的空化测量方法。回顾了声空化检测、测量方法, 分析比较后认为: 实时谱分析方法更适用于大规模液体声处理的空化测量, 需加大力度深入研究。

关键词: 声空化; 声化学; 工业声学处理; 空化测量方法; 谱分析

中图分类号: O427.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-01-0082-07

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.01.014

Cavitation bubble measurement in industrial scale acoustic processing of liquid

XU De-long^{1,2}

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Geophysics Department, Geoscience Faculty, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China)

Abstract: Industrial scale acoustic processing of liquid is getting more and more attractive in the area of acoustic chemistry. Generally, the mechanism of acoustic processing of liquid is due to cavitation, therefore, to expand the scale of acoustic processing, the study should be focused on optimizing cavitation, rather than increasing only the input acoustic energy. The premise to the optimization of cavitation is to find a cavitation measurement method, which should be simple and useful in industrial production. By reviewing the detection and measurement methods of acoustic cavitation, this paper points out that the real-time spectrum method is more suitable for cavitation bubble measurement in large-scale acoustic processing of liquid, and needs to be studied further.

Key words: acoustic cavitation; sonochemistry; industrial acoustic processing; cavitation measurement method; spectrum analysis

0 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)。最早关注空化现象的是航海方面的人员。1894年, 英国人发现新建造的军舰远远达不到 27 kn 的设计速度, 并且船桨由于受到侵蚀而剧烈振动。Barnaby 在初期的实验中观察到螺旋桨上不断出现大群气泡, 于是猜测船桨的侵蚀起因于这些水中的气泡^[1]。根据 Froude 的建议, 他们第一次将这种现象命名为“空化”。这个问题虽几经改进设计仍无济于事, 并且船速愈高, 空化现象愈严重, 后来便邀请英国的

名科学家瑞利勋爵来解决这个问题。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, 得到了气泡壁和崩溃时间的解, 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^[2]。同年, 法国科学家 Langevin 在进行超声探测潜艇的试验时发现强超声会灼痛手和损伤槽中的小鱼。当时在场的一位作为军事观察员的美国物理学家 Wood 对此留下了深刻印象。10年后, 他和另一位美国退伍军人 Loomis, 在家里自费进行了大量的超声实验, 观察到许多意料不到的现象, 其中不少是在液体中出现的, 而出现的这些现象又常伴随有空化的发现。此时的空化是液体内的气泡在强超声波的作用下, 经历体积生长、压缩的几次或多次周期性振荡, 最终以高速崩溃。由于是由超声波引起的, 因此称为“声空化”(acoustic cavitation)。

声空化现象发现之后, 化学家们在研究中发现, 对产生化学反应的溶液施加超声场时, 可测量到化

收稿日期: 2011-07-25; 修回日期: 2011-09-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10434070)和国家自然科学基金面上项目(10804118)资助。

作者简介: 徐德龙(1976—), 男, 山东蓬莱人, 博士, 硕士生导师, 研究方向为超声物理与探测等。

通讯作者: 徐德龙, E-mail: xudelong@mail.ioa.ac.cn

学反应速率的增加, 化学产物产量的增多, 化学反应条件的降低, 甚至能得到新的化学产物。由此, 声化学和声处理在超声学中占据很重要的位置, 迄今为止, 已被应用到相当多的领域, 例如食品工业、纳米材料合成、制药工业、化学工业等, 见图 1^[3]。



图 1 声化学和声处理应用领域示意图^[3]

Fig. 1 Schematic diagram of overlaps of sonochemistry and sonoprocessing

但直至今今天, 声处理在实验室中取得的成千上万的科研成果却极少转化为生产力。因此, 液体中的声处理在实际生活中没有受到应有的重视^[4]。一般认为, 液体中声处理的主要机理是声空化^[5], 声处理(声空化)没有得到工业规模应用主要是以下两个原因造成的:

原因之一是空化促进化学反应机理的不确定。

Sehgal et al.^[6]和 Suslick^[7]的研究认为崩溃的气泡在液体中产生“热点”, 声化学或声致发光产生于这些高温高压的区域。Lepoint^[8]发展了对这种现象的电学解释, 认为气泡中携带的电荷在声化学反应机制中起重要作用。气泡崩溃时, 气泡区域的电场产生微观相互作用的电荷交换, 在气泡中产生的微等离子体是声化学和声致发光活动产生的原因。现在人们越来越多地研究声致发光的光谱, 估计在未来的一段时间内, 可从中得到更多关于空化机理的信息。

原因之二是缺乏空化场测量的有效方法和手段。显而易见, 这也是由于空化场内气泡空化特征不同造成的。液体中一旦产生空化, 空化气泡可能做两种完全不同的振动。一种是可以连续非线性振动许多个声波周期的“稳态空化”; 一种是气泡快速生长、破碎、消失的“瞬态空化”, 这时气泡一般只有一次剧烈脉动加上几次小半径反弹。

Neppiras^[9]和 Apfel^[10]认为气泡做哪种振动取决于声压幅度和气泡直径与声波波长的比值, 上述两个参数也一直是空化研究中的重点。尽管可用经过

标定的换能器测量声压的幅度, 但事实上, 在大多数与多泡空化相关的实验工作中, 基本不能区分液体中产生的空化气泡做何种振动。

尽管这两个原因使得工业规模液体中的声处理应用困难重重, 但扩大声处理的规模已得到许多学者的重视^[4,11-13]。为了使声处理得到工业规模应用, 除了要加大处理量、设计大功率的超声换能器和化学反应器以外, 需要在液体中产生的空化场和空化产生的各种效应之间建立关系。因此, 发展一种易于检测、测量空化气泡振动行为和空化气泡在液体中分布情况的方法就成了声空化研究学者迫在眉睫的任务。

1 空化直接测量方法

研究空化最容易的方式就是直接观测空化场, 现在常用的直接观察法有全息成像法和高速摄像法。由于液体中空化气泡一般很小并且快速振动, 因此, 直接观察他们就需要高速摄像设备有较高的时间、空间分辨率。Lauterborn^[14,15], 汪承灏^[16], Wu^[17]等人利用高速摄影或全息成像等方法研究空化泡, 对深入认识空化现象起到了积极的作用, 但这些实验设备太复杂, 成本也很高, 不适合在大规模工业应用中安装使用。

直接观测方法中还有一种是基于粒子图像测速技术(PIV/PTV)的声流可视化方法^[18]。这种方法已用于空化阈下溶液中声流或者是空化气泡崩溃产生声流的研究^[19], 但它不适合空化气泡行为的测量。

由于工业应用中对空化气泡监测设备仪器易于安装、实时监测的要求, 因此, 直接观察空化场的高成本和设备的复杂性使得它们不适用于工业规模空化泡测量。于是, 研究人员就不得不使用间接观察方法研究液体中空化场的分布, 大多数间接方法都是基于对声波和含气液体的相互作用的分析研究。

2 空化间接测量法

2.1 光学测量法

声致发光直接测量单个或少数气泡内部的温度和气泡的振动情况取得了很大成功, 但其对大规模空化场的测量则要受到多泡复杂环境的限制。因此一般对多泡空化的测量是让激光通过含气液体, 然后分析激光的衍射、折射, 由此反应空化气泡的大小、多少、振动以及在液体中的分布情况。

Wu^[17]等人用 PMT 测量光脉冲方法研究空化泡

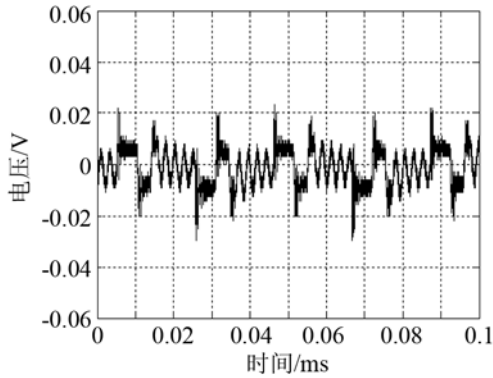


图2 PMT 测干扰信号
Fig.2 Noise signal measured by PMT

情况,但是这种情况用于清洗槽等声处理设备时,PMT 容易受处理设备电信号和振动的影响(见图2,清洗槽工作,PMT 远离工作区域附近,避光)。从图中可看出,PMT 在这种情况下受严重干扰,已不能正常工作。另外,这种设备需要在暗室中测量,在工业应用上不容易做到。

值得一提的是 Keller^[20]曾用光散射方法测量空化核的谱,空化核的多少可影响液体中空化泡的产生。他的研究表明,空化核与液体种类、液体的置放时间、液体中固体微粒大小和多少有关。但是,他没有进一步研究空化核和可能产生的空化气泡的关系。近年来,中国科学院的研究人员发现^[21]:当声压达到一定时,不需要液体中有空化核的存在也可直接在液体中产生空化泡,即“鲜气泡”。

光学方法测量空化场的优点是准确可靠,对气泡的大小、空化场的分布影响小,缺点是产生空化泡的声场也能产生声光效应,因此光学方法测量的是光束、气泡、声光效应相互作用的结果。

2.2 腐蚀法

腐蚀法主要有铝箔腐蚀法^[22,23]和染色法^[24]。

铝箔腐蚀法是将几十微米(通常用的是 10~20 μm)厚的铝箔放在空化场中,过一定时间后取出。或者是测量由于腐蚀而损失的重量,以损失量的大小来衡量空化强度;或者是测量铝箔的透光面积,根据透光面积占铝箔总面积的百分比来衡量空化强度,或者是两者兼有之。

染色法是把阳离子染料,如亚甲基蓝,加入水中,然后对这种溶液加上声场,用纸做记录。然后根据纸上附着染料的多少确定空化泡的分布和空化强度。

这两种方法的优点是方便易行,缺点是测量的主要是空化引起的力学效果,对引起化学反应的极端条件(高温、高压、高密度)不敏感,另外测量结果受铝箔或纸的大小、在声场中的位置影响。

2.3 量热法^[25,26]

量热法是使用热敏探头测量空化场作用下液体温度的升高,根据温度升高的多少来反映空化场的强度。一般认为,温度的升高与声能密度成正比^[27]。这种测量设备需要被测液体满足绝热的条件,而且测量的主要是基频和低阶谐频成分的作用效应^[28]。需要注意的是,在空化作用下的液体的温度升高并不均匀,在探头附近,声场强度大,空化剧烈,液体温度升高的多而快;远离探头处,声场强度小,空化少,液体温度升高的少而慢。

2.4 化学方法

化学方法很多,现在常用的有:碘释放法^[29,30]、化学发光法^[31]、电化学方法和 TA 荧光法^[32]等。

碘释放法是给碘化钾溶液加一声场,碘分子就会从溶液中析出,析出碘的多少是化学反应的产额,由此可反映溶液中空化泡的多少和空化的剧烈程度。这种方法是现在实验室中常用的方法,但它只能反应溶液的整体空化效果,不能区分不同空化气泡的种类和气泡的空间分布,另外这种方法用于工业大规模时也会受到限制。

化学发光法的机理是空化水解产生的自由基通过单电子氧化鲁米诺(luminal)产生不稳定的内过氧化物中间体,此中间体分解产生激发态的 3-氨基邻苯二甲酸盐,当激发态的 3-氨基邻苯二甲酸盐(3-aminophthalate)回到基态时发出 425nm 的蓝光。此方法要求有专业的设备,并且需要在暗室环境下进行。

电化学方法是溶于水中的氮与氧在声空化极端条件(主要是高温高压)作用下发生反应,最终形成硝酸和亚硝酸,使水变成电解液,溶液电导率的变化可反映声空化活度。这种方法适用小规模导电离子纯度高的溶液。

TA 荧光法的原理是基于非荧光物质——对苯二甲酸(TA)——与氢氧自由基相结合可形成羟基对苯二甲酸根离子,后者是较稳定的强荧光性物质(HTA),测量其荧光强度可获得氢氧自由基的数量,由此可得到超声作用下液体中达到空化气泡的空化活度。很明显,这种方法反映的主要是能产生氢氧自由基的空化泡多少,不能反映所有空化气泡的分布情况。

除上述方法外,还有很多化学方法^[33]。这些化学方法的优点是在实验室中测量空化活度取得了很大的成功,缺点是各种方法主要是依赖空化的某一种整体作用效果(如取决于空化产生氢氧自由基的多少),不能反映空化气泡的种类,不能反映空化气泡在液体中分布等,另外其中有些化学方法也不适

合工业规模应用。

2.5 声学方法

声学方法中主要有多普勒气泡检测法^[34]、液体声速和声衰减方法、实时谱分析技术等。

多普勒气泡检测法主要用于医学超声中微小气泡的检测,在此不做过多介绍。

液体的声速和声衰减方法是当液体内有气泡存在时,两者会发生改变,由此可测量空化气泡的大小和分布情况。现在的研究表明,通过对在含气泡液体中低功率声脉冲的衰减^[35-39]和声速度^[40]的测量可以获得气泡场的定量信息。这种方法的前提是假设稳态气泡在平衡半径附近做线性脉动,因此如要将这种方法用于研究空化气泡场的特征,必须考虑非线性脉动以及瞬态气泡的情况。Roy 等人^[41,42]通过对回散射波进行信号处理来监测瞬态空化气泡的空化阈情况,发现主动声学检测(加声场)对测量更敏感,并能使液体的空化阈降低。在理论方面, Van Wijngaarden^[43], Caflish^[44]和 Miksis^[45]等人模拟了声波在含气液体中的传播和散射,为液体声速和声衰减测量空化气泡提供了理论依据。

声学方法中的实时谱分析技术由于其实时性、简便易行性在工业规模空化测量方面可能有很大潜力。郑进鸿^[46]等人提出了基波谱级、谐波总声级、相对谐波总声级、内爆波谱级、总线谱声级和非线性转移效率几个参数的定义,并通过采用实时谱分析和统计平均方法测量计算这些参数来评估空化设备的性能。他的研究偏重讨论各种谱级与输入电功率之间的关系,缺点是测量的主要是低频(几百千赫以下)谱,而且没有深入研究各种谱的物理意义,也没有说明具体各种谱级的测量方法。

中国科学院的科研工作者近期在这方面进行了一些尝试性的工作,得到一些有意思的结果。测量是在清洗槽内(为金星超声波设备技术有限公司生产的 JXD06 型)进行的。清洗槽的电功率 0~600 W 可调,基频 25 kHz,几何尺寸 350×300×200 mm³,体积 20 L。槽内液体为自来水,液面高 180 mm(从探头板上高 130 mm),体积为 15 L。测量开始水温 24.0℃,实验结束水温 32.0℃。从小到大依次调整清洗槽功率。功率大小用表盘刻度表示。图 3~5 是测量的空化场的频谱和功率谱。

由压力信号的频谱曲线可知:基频($f_0=25$ kHz)幅度随清洗槽功率增大变化不大,没有测到明显的分谐波和高次分谐波,高次谐波主要成分是奇次谐波(即 $nf_0/2$, $n=1, 3, 5\cdots$),高次谐波随清洗槽功率增大幅度降低,直至可以忽略。从压力信号的功率谱

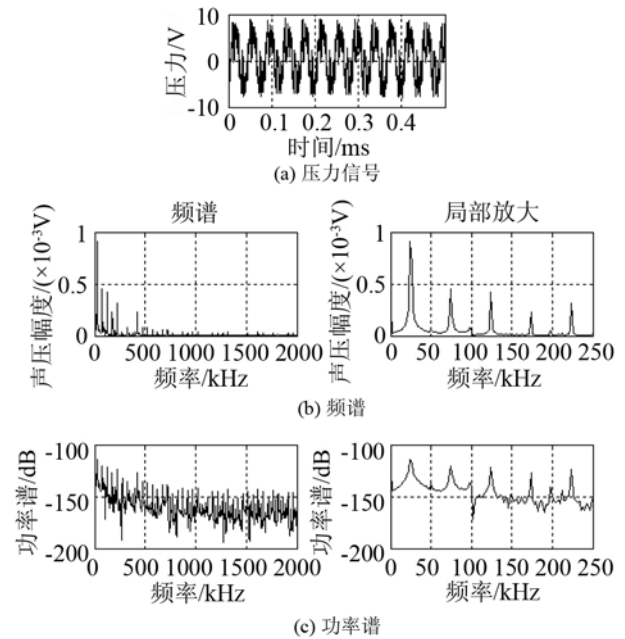


图 3 0.5 档时水听器测的压力信号、频谱和功率谱
Fig.3 The pressure signal, frequency and power spectrum measured by hydrophone at 0.5 gear

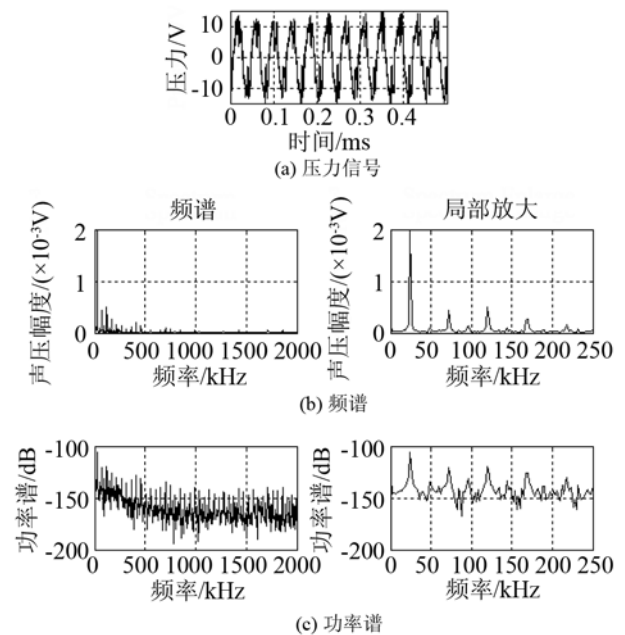


图 4 1.5 档时水听器测的压力信号、频谱和功率谱
Fig.4 The pressure signal, frequency and power spectrum measured by hydrophone at 1.5 gear

曲线可知:随着清洗槽功率提高,所测信号的功率谱曲线没有明显变化。

从上面的测量结果可以看出,不同情况下所测信号的频谱和功率谱的频率成分和它们的幅值是不同的,因此,这种方法是可用于空化气泡的测量,但为了能够定量确定气泡的种类、大小、分布情况,还需进一步分析谱中各频率成分代表的物理意义。

国际上也有一些这方面的研究。Flynn 等人^[47,48]研究了低强度声场空化,研究表明:分谐波也可能

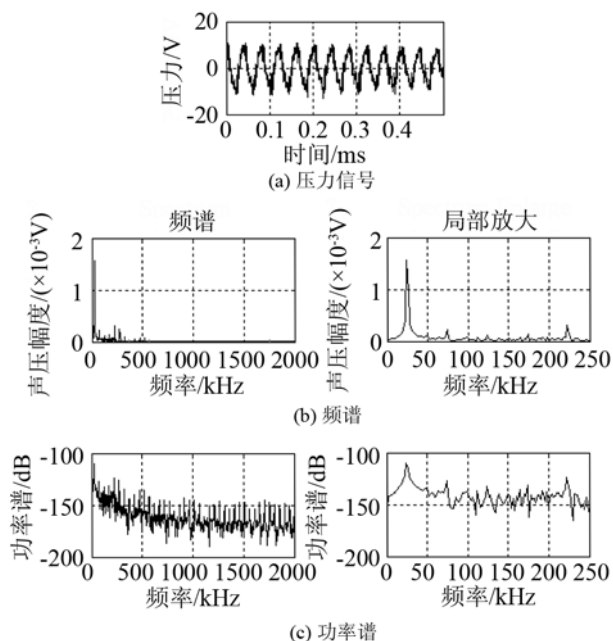


图5 2.7档时水听器测的压力信号、频谱和功率谱

Fig.5 The pressure signal, frequency and power spectrum measured by hydrophone at 2.7 gear

出现在随机分布的空化气泡场中,故噪声谱中 $f_0/2$ 和 $2f_0$ 成分不能作为空化气泡特定活动性的重要参数。Lauterborn^[49]使用混沌物理的方法研究高强度声场中气泡的随机脉动。结果 R-t 曲线谱中含有分谐波和高次谐波的成分,并且声波幅度越高,出现的高次谐波越多。究其原因,这是空化场中的每个气泡都可以视为一个新的声源,因此 R-t 曲线谱中的频率取决于气泡的振动情况,这也说明气泡的振动情况和谱中频率成分是有关系的。Llyichev^[50,51]在理论上研究了气泡振动时发出的压力波以及压力波与驱动声压之间的关系。结果发现压力波的谱中含有驱动频率和气泡振动频率的谐波、分谐波高次谐波。这些理论结果证实了 Neppiras^[52]的实验观察,也为利用实时谱分析技术测量空化气泡提供了依据。

在 Neppiras 之前,Esche^[53]的研究也表明,当声强较低时,空化噪声谱是含有基频、谐波、分谐波、高次谐波的线谱,随声强增大,在这些线谱上迭加了宽带信号,Neppiras^[52]把这些宽带信号称为“白噪声”。“白噪声”的产生原因有两个:气泡剧烈的随机振动和气泡崩溃发生的冲击波。

第一个原因:前面已提到,Llyichev^[50,51]得出高次谐波成分随声强增大而增加的结论;Lauterborn^[54]得出了声强增大,噪声谱的频带增加的结论。

第二个原因:Cordry 和 Crum^[55]提出了噪声谱产生的另一可能性——气泡高速崩溃时在液体中产生的冲击波,这些冲击波在空化谱中产生宽带噪声。

与反映稳态空化气泡振动的非线性参数 $f_0/2, 2f_0$

等频率成分不同,“白噪声”谱可反应瞬态空化和气泡崩溃。对“白噪声”谱的定性研究可以看出其是声强增加到某一个值(空化阈)出现,然后随声强增大,白噪声幅值增大,直至增大到某一最大值。现在人们越来越关注用其来作为瞬态空化的定量指示并希望借助于这一方法在瞬态空化和气泡的崩溃以及空化活度之间建立定量关系。

具体说,有两种评价空化谱的方法,一种是在线性坐标下,如图 3~5 中的频谱曲线;一种是对数坐标(Cavitation Noise Power Indicator, CNP),如图 3~5 中的功率谱曲线。CNP 方法可以增强“白噪声”频率成分的贡献。

使用谱分析技术研究液体中瞬态空化时,有两种现象值得注意——滞后效应(液体中气泡核的稳定性的反映)和水解作用(水中自由基的形成)。Neppiras^[52]认为空化情况和气泡存在成长“历史”过程有关——滞后效应。即液体一旦产生了空化,则只需较低的驱动功率就可以保持这种空化状态,这一点对工业大规模产生空化很有启迪。

最近 Kumar 等人^[56]使用空化活度指示器(IC-3, N. Deznukov, Belarus State University)测量空化。这种指示器的原理与 CNP 相似,就是先测量空化气泡的声压级,然后在一段时间间隔内将测量结果积分,将积分结果称为空化活度,由此反映空化程度。但 IC-3 主要有两个缺点:一是仪器测量带宽较窄(5~150kHz);二是在对谱的分析不是实时的,是在一段时间间隔内积分,因此得到的是空化平均效果的量度,这可能要掩盖一些瞬态空化泡的行为。上面提到的实时谱分析可弥补这一不足。

综上所述,实时谱分析方法具有简单易行的优点,比较适合在工业规模测量气泡的空化行为和空化场。但在应用之前,还需要对上述谱图的各种分谐波、高次分谐波,谐波,高次谐波信号的产生原因进行研究,深入分析谱中不同频率信号的起因以及它们在空化场的分布情况。

3 结论

声处理和声化学的工业规模的应用,现在越来越受到国内外学者的重视。要扩大实验的规模,应当首先能够在大量液体中产生大规模的空化。要做到这一点,不能一味提高声能输入,而应把研究的重点放在声空化的优化。对声空化优化的前提是需要找到简单易行的空化测量方法。本文回顾了诸多方法,分析比较后认为,实时谱分析方法可能会较适用于大规模液体中声处理的空化的测量,有必

要对之加大力度深入研究, 尽快得到切实可行的测量方法。

致谢:

本文的工作是在中国科学院声学研究所空化课题组应崇福先生的指导下, 在邓京军研究员和李超博士的帮助下完成的, 在此深表感谢! 另外, 文中的部分工作得到了大庆油田有限责任公司勘探部研究生基金的资助!

参 考 文 献

- [1] Barnaby S W. On the formation of cavities in water by screw propellers at high speeds. *Trans[J]. Inst. Nav. Arch.*, 1898, **39**: 139-144.
- [2] Rayleigh L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. *Phil. Mag.*, 1917, **34**: 94-98.
- [3] Mason T J. Sonochemistry and sonoprocessing: the link, the trends and (probably) the future[J]. *Ultrason. Sonochem.*, 2003, **10**: 175-179.
- [4] 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 and acoustic cavitation engineering in liquids[J]. *Applied Acoustics*, 2006, **25**(5): 261-264.
- [5] Leighton T G. Bubble population phenomena in acoustic cavitation[J]. *Ultrason. Sonochem.*, 1995, **2**(2): S123-S136.
- [6] Sehgas C, Steer R P, Sutherland R G, Verral R E. Sonoluminescence of argon saturated alkali metal salt solutions as a probe of acoustic cavitation[J]. *J. Chem. Phys.*, 1979, **70**: 2242-2248.
- [7] Suslick K S, Hammerton D A, Cline R E. The sonochemical hot spot[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 1986, **108**: 5641-5642.
- [8] epoint T, Pauw D D, Lepoint-Mullie F, Goldman M, Goldman A. Sonoluminescence, an alternative electrohydrodynamic hypothesis[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1997, **101**: 2012-2030.
- [9] Neppiras E A. Acoustic cavitation[J]. *Phys. Rep.*, 1980, **61**: 159-251.
- [10] Apfel R E. Acoustic cavitation prediction[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1981, **69**: 1624-1633.
- [11] Gogate P R, Pandit A B. Sonochemical reactors: scale up aspects[J]. *Ultrason. Sonochem.*, 2004, **11**: 105-117.
- [12] 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*, 2006, **24**(5): 265-268.
YING Chongfu. Industrial applications of sonochemistry come to their time in China[J]. *Applied Acoustics*, 2006, **24**(5): 265-268.
- [13] 应崇福. 新世纪内声空化声致发光的研究进展[J]. *中国科学(G 辑)*, 2007, **37**(2): 129-136.
YING Chongfu. The new progress of acoustic cavitation and sonoluminescence in 21th century[J]. *Science in China (Series G)*, 2007, **37**(2): 129-136(In Chinese).
- [14] Hentschel W, Lauterborn W. New speed record in long series holographic cinematography[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(19): 3263-3265.
- [15] Lauterborn W, Hentschel W. Cavitation bubble dynamics studies by high speed photography and holography[J]. *II, Ultrasonics*, 1986, **24**: 59-65.
- [16] 汪承灏. 单一空化气泡的电磁辐射和光辐射[J]. *声学学报*, 1964, **1**(2): 59-68.
WANG Chenghao. Electromagnetic and optical radiations of single cavitation bubble[J]. *Acta Acoustica*, 1964, **1**(2): 59-68.
- [17] WU X M, YING C F, Li C. Luminescence of transient single cavitation bubbles in nonaqueous liquids produced by the modified tube-arrest method[J]. *Chin. Phys.*, 2005, **14**: 999-1005.
- [18] Merzkirch W. *Flow Visualization*[M]. (2nd ed.). London: Academic Press, 1987.
- [19] Murata Y, Kimura S, Takei S, Minagawa K, Takimoto J, Koyama K. Generation of an enhanced acoustic streaming in a bounded space[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1997, **102**(5): 2536-2538.
- [20] Keller A. The influence of the cavitation nucleus spectrum on cavitation inception, investigated with a scattered light counting method[J]. *J. Bas. Eng.*, 1972, **12**: 917-925.
- [21] 李超. 剥管法产生空化的原理及其所产生特色声波的一项应用[D]. 中国科学院声学研究所, 2007.
LI Chao. The principle of cavitation by the tube-arrest method and an application of the characteristic acoustic wave produced by the method[D]. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [22] Crawford A E. The measurement of cavitation[J]. *Ultrasonics*, 1964, **3**: 120-123.
- [23] Zeqiri B, Hodnett M, Caroll A J. Studies of a novel sensor for assessing the spatial distribution of cavitation activity within ultrasonic cleaning vessels[J]. *Ultrasonics*, 2006, **44**: 73-82.
- [24] Marangopoulos I P, Martin C J, Hutchison J M S. Measurement of field distributions in ultrasonic cleaning baths: implications for cleaning efficiency[J]. *Phys. Med. Biol.*, 1995, **40**: 1897-1908.
- [25] Kumar A, Gogate P R, Pandit A B. Mapping the efficacy of new designs for large scale sonochemical reactors[J]. *Ultrason. Sonochem.* (2007), doi: 10.1016/j.ultsonch.2006.11.005.
- [26] Romdhane M, Gadri A, Contamine F, Gourdon C, Casamatta G. Experimental study of the ultrasound attenuation in chemical reactors[J]. *Ultrason. Sonochem.*, 1997, **4**: 235-243.
- [27] Martin C J, Law A N R. The use of thermistor probes to measure energy distribution in ultrasound fields[J]. *Ultrasonics*, 1980, **18**: 127-133.
- [28] Hodnett M, Chow R, Zeqiri B. High-frequency acoustic emissions generated by a 20kHz sonochemical horn processor detected using a novel broadband acoustic sensor: a preliminary study[J]. *Ultrason. Sonochem.*, 2004, **11**: 441-454.
- [29] Weissler A, Cooper H W, Snyder S. Chemical effect of ultrasonic waves: oxidation of potassium iodide solution by carbon tetrachloride[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 1950, **72**(3): 1769-1775.
- [30] Gogate P R, Shirgaonkar I Z, Sivakumar M, Senthikumar P, Vichare N P, Pandit A B. Cavitation reactors: efficiency assessment using a model reaction[J]. *AIChE Journal*, 2001, **47**(11): 2526-2538.
- [31] Renaudin V, Gondrexon N, Boldo P, Petrier C, Bernis A, Gonther Y. Method for determining the chemically active zones in a high-frequency ultrasonic reactor[J]. *Ultrason. Sonochem.*, 1994, **1**(2): 81-85.
- [32] 朱昌平, 冯若, 何世传, 单鸣雷, 张红苹. 用三种方法研究双频超声空化增强效应[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2005, **41**(1): 66-70.
ZHU Changping, FENG Ruo, HE Shichuan, SHAN Minglei, ZHANG Hongping. Enhancement effect of cavitation by two-frequency ultrasound irradiation based on three methods[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2005, **41**(1): 66-70 (In Chinese).
- [33] Dahlem O, Reisse J, Halloin V. The radially vibrating horn: A scaling-up possibility for sonochemical reactions[J]. *Chem. Eng. Sci.*, 1999, **54**: 2829-2838.
- [34] Tsochatzidis N A, Guiraud P, Wilhelm A M, Delmas H. Determination of velocity, size and concentration of ultrasonic cavitation bubbles by the phase-Doppler technique[J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2001, **56**: 1831-1840.
- [35] Nishi R Y. The scattering and absorption of sound waves by a gas bubble in a viscous liquid[J]. *Acoustica*, 1975, **33**(2): 65-74.
- [36] Gavrilov L R. Free gas content of a liquid and acoustical techniques for its measurement[J]. *Sov. Phys. Acous.*, 1970, **15**(3): 285-295.
- [37] Medwin H. Counting bubbles acoustically: A review[J]. *Ultrasonics*, 1977, **15**: 7-13.

- [38] Delebarre C, Baquet I, Frohly J, Radziszewski E, Pernod P. Dynamic characterization of high frequency ultrasonic cavitation[J]. Proceedings Ultrasonics Symposium, 1993: 723-726.
- [39] Romdhane M, Gadri A, Contamine F, Gourdon C, Casamatta G. Experimental study of the ultrasound attenuation in chemical reactors[J]. Ultrason. Sonochem., 1997, 4: 235-243.
- [40] Gibson F W. Measurement of the effect of air bubbles on the speed of sound in water[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1970, 48: 1195-1197.
- [41] Roy R A, Madanshetty S I, Apfel R E. An acoustic backscattering technique for the detection of transient cavitation produced by microsecond pulses of ultrasound[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1990, 87: 2451-2458.
- [42] Madanshetty S I, Roy R A, Apfel R E. Acoustic microcavitation: Its active and passive acoustic detection[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 90: 1515-1526.
- [43] Van Wijngaarden L. On the equations of motion for mixtures of liquid and gas bubbles[J]. J. Fluid Mech., 1968, 33: 465-474.
- [44] Caflish R E, Miksis M J, Papanicolaou G S, Ting L. Effective equations for wave propagation in bubbly liquid[J]. J. Fluid Mech., 1985, 153: 259-273.
- [45] Miksis M J, Ting L. Effects of bubbly layers on wave propagation[J]. J. Acous. Soc. Am., 1989, 86: 2349-2358.
- [46] 郑进鸿, 邱永德. 液体中空化声场的统计测量及其在评估空化设备性能中的应用[J]. 应用声学, 1991, 10(1): 18-23.
ZHENG Jinhong, QIU Yongde. Statistical approach to acoustic cavitation measurement in liquid and its application in evaluation of performance of cavitation device[J]. Applied Acoustics, 1991, 10(1): 18-23.
- [47] Flynn H G. Physics of acoustic cavitation in liquids, in Physical Acoustics[M]. Vol. 1B, edited by Mason W. P., Academic, New York, 1964.
- [48] Mei C C, Zhou X. Parametric resonance of spherical bubble[J]. J. Fluid. Mech., 1991, 229: 29-50.
- [49] Lauterborn W, Parlitz U. Methods of chaos physics and their application to acoustics[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1988, 84: 1975-1993.
- [50] Llyichev V I, Koretz L V, Melnikov N P. Spectral characteristics of acoustic cavitation[J]. Ultrasonics, 1989, 27: 357-361.
- [51] Llyichev V I, Koretz L V, Melnikov N P. Emission of sound by a stationary bubble under stochastic oscillations in liquid[J]. Acoust. Phys., 1994, 40(2): 232-236.
- [52] Neppiras E A. Acoustic cavitation[J]. Phys. Rep., 1980, 61: 159-251.
- [53] Esche R. Untersuchung der Schwingungskavitation in Flüssigkeiten [Investigation of vibration-induced cavitation in liquids[J]. Acustica, 2, Akust. Beih., 1952, 4: 208.
- [54] Lauterborn W. Numerical investigation of nonlinear oscillations of gas bubbles in liquids[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1976, 59: 283-293.
- [55] Cordry S M, Crum L A, Roy R A. Temperature-related effects in single-bubble sonoluminescence[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1995, 98: 2921(A).