

超声空化泡运动特性的研究进展*

吴晓霞 张华余 马空军[†]

(新疆大学化学化工学院 乌鲁木齐 830046)

摘要 超声空化是一个极其复杂的物理现象, 超声空化泡运动是影响超声空化效应的重要因素, 研究超声空化泡的运动特性已受到学术界的极大重视。本文研究了近几年国内外学者基于超声作用下的空化泡运动特性的工作, 从空化泡运动方程、数值模拟、实验研究等方面介绍了超声空化泡运动特性的研究进展。最后指出了研究中需解决的关键问题, 同时对超声空化泡的研究趋势进行了展望。

关键词 超声空化泡, 数值模拟, 实验研究, 空泡群

中图分类号: O6-1

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2012)06-0416-07

Research progresses of movement characteristics of ultrasonic cavitation bubbles

WU Xiaoxia ZHANG Huayu MA Kongjun

(School of Chemistry and Chemistry Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830046)

Abstract Ultrasonic cavitation is an extremely complex phenomenon, and ultrasonic cavitation bubble movement was an important factor affecting the ultrasonic cavitation, so it has been paid great attention to studying the motion characteristics of ultrasonic cavitation bubble. The work on this subject contributed by domestic and overseas scholars is studied in this paper and the progress of researches on ultrasonic cavitation bubble movement is introduced through cavitation equation of motion, numerical simulation, and experimental research. Finally, crucial problems to be solved in the study is point out. The future research trend about ultrasonic cavitation bubble is also discussed.

Key words Ultrasonic gas cavitations, Numerical simulation, Experimental research, Vacuoles group

1 引言

超声空化是在超声辐射下, 液体中的微小气泡核经历振荡、生长、收缩乃至崩溃破灭的现象。空化引起的热效应、机械效应等已被人们应用于众多

领域, 如医学治疗、工业污水处理、纳米材料的制备等^[1]。但是另一方面, 空化泡崩溃产生的冲击力, 造成化工设备不同程度的受损, 严重影响化工的生产和加工。为了更好的合理利用超声空化, 人们进行了大量研究, 发现超声空化泡的运动特征是影响

2012-04-24 收稿; 2012-09-21 定稿

*国家自然科学基金项目(21166023)

作者简介: 吴晓霞 (1987-), 女, 山西人, 硕士研究生, 研究方向: 化工传质与分离。

张华余 (1983-), 男, 硕士研究生。

马空军 (1969-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师。

[†]通讯作者: 马空军, E-mail: kjma@xju.edu.cn

空化的主要因素^[2]。本文从空化泡运动方程、数值模拟、实验研究和对空泡群的研究等方面着手,对近年来在超声空化泡运动特性方面的研究进行了一些总结。

2 超声空化泡运动方程

Rayleigh 在 1917 年首次提出了无限大不可压缩液体中的单一球形空化泡动力学模型,由于没有考虑含气量、表面张力和压缩性等因素对空泡运动的影响,用其进行计算的结果有时不符合实际情况。为了更加准确真实地描述空化泡的运动特性,早期的一些学者对该方程进行了修正,最早的超声空化泡运动方程是在 R-P 方程的基础上引入声辐射这一因素而得出的^[3]。由于早期的 R-P 方程是以半径为动力学参数的,近年来基于研究的需要,国外学者 Leighton^[4]直接以体积作为动力学参数,推导出了基于体积的 R-P 方程,该方程为研究空化过程中气泡体积的变化规律奠定了基础^[5]。Lim 等^[6]在 Navier-Stokes 方程的基础上,考虑了气泡内部和气壁热传递的影响,研究了超声作用下微泡的非线性行为,结果表明热传递引起的熵变降低了空化崩溃的程度,熵变很大程度上影响着气泡的非线性行为。马空军等^[7]运用相间的传质渗透理论和相关的流体力学原理,研究了超声空化泡在相界面上的运动行为,包括气泡滑移、聚并和逸出相界面的行为,分别导出了这三种气泡行为的传质模型,在此基础上,又提出了三种气泡行为同时存在时的传质模型,该模型为超声波强化传质过程提供了理论依据。陈伟中^[8]等认为实际声场是球对称部分和具有偶极子结构的非球对称部分叠加而成的非球对称声场,他们研究了该声场驱动下空化泡的运动,最后建立了非球形气泡动力学方程。近年来,利用振子模型,李林^[9]等推导出了多参数下空化气泡壁的运动方程,姜学平等^[10]把研究对象看做理想不可压缩流体,建立了微泡在无限大刚性平面附近运动特性的类 R-P 方程,曹玉叶等^[11]得出了空泡的运动方程,并对单、双空泡运动方程的异同在理论上进行了比较。

3 数值研究

超声作用于液体时,空化气泡一旦形成,随着

声压的变化其运动特性会发生变化,或者继续做稳态振荡,或者快速转向崩溃闭合,这取决于许多因素,近年研究较多的是声学参数(如声压、声频等)、液体的物理性质(如液体粘性、可压缩性及表面张力等)及空化泡初始半径对空化泡运动的影响。Xi 等^[12]人研究表明气泡的运动情况受声压和初始半径的影响,且共振半径稍大气泡的运动轨道受影响程度较大。已经有研究表明,气泡会随着声压的增强,逐渐出现非线性振荡,当声压超过稳态空化阈值时,气泡会迅速崩溃,并且当其他条件一定时,黏滞系数较小,有利于空化,气泡的膨胀压缩和振荡过程也更为激烈^[13]。刘秀梅等^[14]对不同表面张力液体中空泡泡壁运动规律进行了数值模拟和实验研究,发现随着表面张力的增大,空泡膨胀程度变小,空泡收缩速度加快,所得实验结果与数值计算基本一致。但是数值模拟采用的模型只考虑了表面张力,需对其做进一步改进,方能较真实的反应气泡的运动。在考虑了液体可压缩性的影响后,已有学者通过数值研究发现了空化运动的非线性特性及空化泡运动规律的不确定性^[15]。王成会等^[16]不考虑泡内蒸汽压、泡内外气体扩散等对空化泡运动的影响,在 Flynn 方程基础上引入泡内气体的压缩性,建立了描述超声空化泡非线性振动的方程,对其进行数值模拟,结果表明:根据初始半径大小划分,声场中存在三种不同运动状态的气泡,即大气泡、空化泡和微气泡。其中大气泡做准本征振动,并且在运动变化过程中吸收周围气泡逐渐变大,但是当停止超声辐射后,大气泡立即消失。研究还发现,随着声压的增强,气泡运动均加剧,且微气泡会变成空化气泡。许文林、何玉芳等^[17]在建立超声空化泡运动模型时将流体的动力粘度、表面张力和溶剂的蒸汽压等因素考虑在内,采用数值迭代法用 Matlab 对所建立的模型进行模拟,研究了声频、声压及空化泡初始平衡半径对空化泡运动的影响,结果表明:声频增大使空化泡振幅变小,增强声压可以使空化泡的运动加剧,振动周期增长。史振方等^[18]利用数值迭代法对修正过的 R-P 方程进行模拟求解,发现在考虑的众多因素当中,对空化泡振幅有较大影响的是声频、声压、气泡初始半径、环境压力。并且气泡直径为共振尺寸、低频、低粘度、小的表面张力、较低的环境压力、低气体导热系数、强声压、高气体多变指数情况下,气泡振幅会增大。

超声作用于生物组织和细胞液中的微小气泡时，微泡会产生膨胀、收缩、振荡、崩溃等空化过程，导致细胞膜产生孔状结构，这种变化随着超声辐射的消失而消失，此现象称为声孔效应。超声应用于细胞病理切片过程时，为掌握超声参数对细胞的影响规律，以便合理利用超声空化作用，陈谦等^[19]假设细胞液为不可压缩的理想流体，建立了超声作用下气泡的振动模型，通过数值计算分析了声学参数、微泡初始半径和黏滞系数等因素对微气泡振动的影响。KODAMA 等^[20]研究声孔效应中空化泡对分子传递的影响，结果说明：空化泡崩溃所产生的脉冲对于外来大分子的渗入起主导作用。Zhou 等^[21]联合光学、声学、电生理学等技术在单细胞水平上实时测量了细胞渗透性的变化，研究了空化泡运动对细胞渗透性的影响，结果表明空化泡崩溃、气泡生长均可导致细胞渗透性的改变，而且这种影响随着气泡与细胞膜距离的增加而减小。杨阳等^[22]考虑了液体的可压缩性，用四阶 Runge-Kutta 方法数值模拟，进一步探讨了声学参数、气泡初始半径、液体粘度、表面张力对单泡振动的影响，计算结果表明：与声学参数相比，初始半径对单泡振动的影响较大；与文献[19]相比，考虑液体的可压缩性可以改进单泡的最佳空化区域。在工程技术中，关于超声空化的研究多属于宏观评价，对空化本质的研究很少，孔为等^[23]采用数值模拟法探究了声学参数、空化泡半径和泡内气体种类对钢液中超声空化泡运动的影响，所得结论为如何提高钢液超声操作中的空化效果提供了指导。黄永春等^[24]采用数值迭代法和 4-5 阶的龙格-库塔算法对 R-P 方程进行数值模拟，研究了不同浓度、温度的蔗糖溶液中超声空化泡的运动情况，探讨了声参数及溶液浓度、温度等对空化泡运动的影响规律，研究结果表明：空化泡振幅与声强、溶液温度成正比例关系，与声频、环境压力、溶液浓度成反比关系，所得结果为优化制糖过程中的超声条件提供了可靠依据。徐峥等^[25]在前人研究工作的基础上，建立了激光和超声的联合作用下的金纳米颗粒表面空化泡的振荡模型，数值模拟后发现，激光作用的存在使气泡的振荡加剧了，气泡的膨胀程度变大；激光辐射效应在超声正压相时起主要作用。

近年来，基于工程实际，许多学者对双空化泡进行了数值研究。张鹏利^[26]等忽略了流体的可压缩

性，在考虑了流体表面张力、黏度及泡内含气量等因素的条件下，提出了双空泡的运动方程，并在此基础上又导出两空化泡的振动频率、振动半径，然后再对所得方程进行数值计算，结果表明：两气泡的间距影响气泡的共振频率及共振振幅，且随着间距增大，二者都增大。曹玉叶^[27]等进一步提出了双空化泡的振动位移方程和振动速度方程，研究了一定空泡间距时振动位移和振动速度随时间的变化规律，结果表明：随着时间的推移，在声波周期内，空泡振动位移形式复杂最后溃灭，而振动速度的振幅越来越大。曹玉叶^[11]、卢义刚^[28]等通过建立空泡运动方程，数值研究了声参数、双泡间距对空化泡运动的影响，结果表明：声参数对双空化泡运动的影响效果与前人对声参数单空化泡的研究结果相同；双泡间距对空化效果有影响，间距越大则影响就越弱。另外，文献[28]还发现了决定空化泡运动特性的主要因素是空化泡的线度；双泡空化运动受双频超声的影响较小。An 等^[29]通过分析驻波场中空化的特性，采用恰当的近似建立了气泡运动方程，数值模拟结果表明：相近尺寸大小的气泡同步增长或收缩，声辐射引起的气泡间的相互作用力抑制了气泡的生长和溃灭，气泡聚并程度越高，作用力就越大。此外，基于水力空化的研究结果^[30]，在考虑了液体黏性、表面张力、液体压缩性以及湍流作用等因素的情况下，沈壮志等^[31]采用龙格-库塔法研究了超声空化和水力空化作用下空化泡的动力学行为特性，计算结果说明：超声很大程度上影响着水力空化泡的反弹和崩溃；改变声参数与空化反应器的结构参数均可以改变空化泡的运动情况。Vanhille 等^[32]数值模拟发现高振幅声场容易产生气泡并且气泡首先出现在声波波腹位置；非线性超声场与气泡的产生过程有关。Chakma 等^[33]研究了超声解吸芳香族污染物的物理机制，发现环境压力一定时，空化泡做瞬态的高振幅运动，直径较小的空化泡崩溃产生的高波幅的声波，利于有机物的解吸附过程；随着气泡周围介质压力的增大，不同泡径的空化泡产生的冲击波和微对流速度的程度都降低，气泡做稳态振荡。Parkar 等^[34]采用数值模拟辅助研究超声作用催化豆油与甲醇转酯化反应，发现由于油类物质粘度高，在超声作用下的气泡径向运动一般为小振幅振荡，空化泡崩溃产生的微对流速度和冲击波也相应的较小，此较弱的物理效应使得

空化泡动力学产生的乳化作用随之降低；低温条件下空化泡瞬间崩溃产生的微对流和冲击波对转酯化反应的影响较显著。

4 实验研究

大量研究表明空化泡运动是一种复杂的非线性运动，空化运动方程多为非线性高阶微分方程。为使研究更接近实际情况，常常要考虑许多因素对空化泡运动的影响，每引入一个影响因素就要在方程中相应的增加一个变量，这加大了方程推导和求解的难度。为更深入的了解空化泡的运动，许多学者进行了实验研究。陈伟中等^[35]利用实验与理论模型对比研究了空化泡的运动。李彬^[36]用超高速显微成像实验观察了超声场中微泡动力学行为。Ashokkumar 等^[37]采用频闪观测器、毛细管技术等研究了超声场中气泡的运动，用实验数据分析了超声空化泡的生长、聚合及溶解行为，强调了超声空化是声波与气泡相互作用所产生的一种复杂的现象。刘亚楠等^[38]以水作为工作介质，采用相机的锁相积分成像技术实验测量了不同驱动声压下空化泡半径随时间的变化规律，通过研究发现：随着声压的增强和时间的推迟，空化泡半径从线性向非线性转变，当声波强度较强时，空化泡的线性效应和非线性效应同时存在。液体的表面张力是影响空化泡运动特性的的基本因素之一。齐水宝等^[39]实验研究了超声作用于酒精溶液中空化泡随时间的演化关系，结果表明酒精通过降低液体表面张力和增大液体的饱和蒸汽压，间接的影响了空化泡的运动，整体来说水中加入酒精使得空化泡的运动减弱了。崔炜程等^[40]基于高精度的锁相积分频闪脉冲法实验测量等声压驱动下不同浓度甘油溶液中空化泡的半径变化，结果显示在等声压驱动时，随着溶液黏度的增大，其气泡平衡半径也增大，表明粘度是影响空化泡运动过程中气泡大小的重要因数之一，该结论为人们研究空化泡动力学特性提供了实验依据。Suzuki 等^[41]研究了十二烷基硫酸钠中气泡的运动，发现气泡在较高振幅也能稳态运动，并且气泡是在声压波腹附近做反向钟摆的剧烈的共振振荡和舞动。徐兴华等^[42]实验发现了一些杂质存在于声致发光的单泡的周围，并且气泡的稳定性在一定程度上受杂质含量大小的影响，随着杂质含量的减

少，气泡的稳定性会有所提高。黄威等^[43]将锁相积分照明技术和长距离显微术结合，实验测定与数值模拟相结合，得到了硫酸溶液中单泡稳定悬浮发光的最佳声压范围，分析结果表明：当低于（或高于）该范围时气泡开始作往复运动，并且随着声压的降低（或增大）气泡运动更剧烈，到逐渐变暗直至不发光（气泡破灭）。Qu 等^[44]研究了超声作用下热泡的动力学特性，发现超声作用下产生大气泡主体后，随之产生的附属小气泡会在液体较大区域中溅开，并围绕在大气泡周围做剧烈运动。在实验加热过程中，大气泡会发生振荡，在气泡边界形成驻波或行波，不加热后，大气泡会收缩最终在微型加热器表面消失。Brotchie 等^[45]分别对单频和双频超声作用下空化泡的寿命、融合速率、溃灭温度等进行研究，研究结果表明双频驱动下空化泡振动时间较长，溃灭温度较低，声化学反应速率比两单频联合的速率高，并且双频超声空化泡的融合速率受声化学反应速率的影响很大。Browne 等^[46]对超声作用下不同电解质溶液中的气聚行为进行了实验研究，发现电解质种类，电解质溶液的浓度都影响着气泡的聚合程度。Thiemann 等^[47]对超声频率为 230kHz 下的空化泡进行了研究，发现半径相近且大于共振半径的气泡做平行上移的运动，其周围伴随着共振半径大小的气泡的产生，半径小于共振半径的气泡以射流的方式进行运动且能发光。Sivasankar^[48]等为掌握超声对有机物的降解规律，采用理论和实验相结合的方法对其进行了研究，发现空化泡大小、泡壁的温度是影响降解效率的重要因素。SHU 等^[49]对超声空化泡的动力学行为及其对低熔点合金固相化时枝晶破碎的影响进行了研究，通过数值模拟方法对高速数码相机拍摄的图片进行辅助分析，发现空化泡内爆产生的冲击波能在几十毫秒之内将附近的晶粒粉碎。混沌空化和准稳态空化云使得距离空化泡几百微米区域范围内发生枝晶破碎，其中混沌空化更易导致二次枝晶的出现。空化泡运动状态不同使得所形成的晶粒有所差别，这对研究冶金合金中颗粒的细化有重要的意义。

5 空泡群的研究

在工程实际中，空化现象的发生几乎都伴随着

空化泡群的形成，空泡群中空泡之间的相互作用力相对单泡与双泡来说比较复杂，其运动特性与它们有所不同。近年来人们对空化泡群的研究日益增加。陈红等^[50]使用高速摄影拍摄了高强度聚焦场中空化泡群结构的空分布情况，研究了空化泡群在不同声压下的结构变化情况，通过分析照片了解了空化泡群结构的建立过程尤其是起始过程，发现在焦区附近最先出现，随后是后焦区，最后出现在前焦区，并且这三个区域中空化泡的运动特征不同，焦前区主要是运动速度较快的小气泡，焦区附近则分布较多的运动较慢的大气泡，而焦后区的空化泡较密集且能观察到枝状结构。王成会^[51]等利用高速摄影技术对局部泡群的行为进行实验观察并对泡群的运动进行了初步的理论分析，认为强声场中离声源近会产生尺寸较大的泡群，并且泡群振荡整体可近似看成球形；而尺寸小的泡群离声源远，且泡群振荡的整体形状会发生不规则变化。亢淑梅等^[52]进行了模拟钢包水模的实验，应用高速摄像机研究了实验中超声空化泡群的运动行为，结果发现在超声波的波腹位置产生锤状空化泡群，随后空泡群沿任意方向向节点处作直线运动，在运动过程中会发生空化泡的聚集、长大和崩溃等过程，这些变化都在一定程度上起到了搅拌作用，有助于缩短均混时间，另外，在一定范围内，气泡群数量随着超声功率的增强而增加，可以观察到锥状区范围在不断扩大，空化泡运动速度也有所加快。Suslick^[53]用声致光谱探测法研究了空泡群中的高温高压及泡的运动情况，结果表明：分布在超声发生器探头附近的空化泡成对称溃灭且辐射温度高，而振荡速率快的气泡成非对称溃灭。Birkin 等^[54]综合电化学、声学、光散射等方法，研究超声发生器探头附近水中空化泡的动力学行为，结果发现在探头周围存在空泡群，并且它们会周期性的崩溃，崩溃后在溶液中产生寿命较短的小泡群。Louisnard^[55]研究认为，在超声场中由于能量衰减会出现行波，这使得发生器附近声辐射力较大且容易将空化泡驱逐到声波的驻点，并且对称轴上的驻点离锥形空化泡群结构的锥尖较远；空泡群锥形结构与沿传感器的声速梯度分布有关；在类似超声清洗槽的薄板弯曲振动所形成的复杂声场中，空化泡群会出现彩带、斑状结构。

6 展望

空化泡是影响超声空化的一个很重要的因素。影响空化泡运动特性的因素很多，包括驱动声压、液体的黏度、表面张力、可压缩性等因素。近年来，随着科学技术的进步，人们对液体中声空化泡的运动展开了大量的研究。如：建立不同的模型；用不同的计算方法进行模拟求解；通过实时拍摄直观的观察空泡的运动情况和在液体中的整体分布情况。研究声空化泡的运动特性对建立超声空化理论有一定的指导作用，为实现空化控制提供了一定的理论支持和实验参考。

但是对空化泡运动的研究仍存在一些问题：(1) 由于缺乏相关理论，人们在研究过程中会忽略一些重要因素的影响，导致建立的模型与实际过程存在偏差，从而影响实验结果。(2) 由于空泡群中空泡尺寸大小的空间分布、空泡间相互作用及溃灭时间分布等具有很大的随机性，很难实现一定组成的空泡群的再现，那么我们就无法开展对空泡群溃灭压力、固有频率等参数的测试，目前对空泡群的研究主要集中在实验观察阶段，对其理论研究很少。

今后的研究工作可以从以下几方面入手：(1) 有待于研究开发有效的计算方法和测试技术；联合实验观察、数值模拟和理论分析等方法研究空化泡的运动，以期对其进行全面了解，是今后空化泡研究的必然趋势。(2) 空泡群的研究可以为工程实际提供理论指导，空泡群的研究目前还属于初级阶段，对空泡群空化规律有待于进行更深入的研究。(3) 现阶段研究主要集中在单一超声场下空化泡的运动特征，还可以尝试超声与其他外加场联合作用下空化泡运动特征的研究。(4) 超声空化虽然已广泛应用于化学、医学、食品工业、工业焊接、污水处理等方面，但现阶段空化泡的研究主要在化学和医药领域，有必要向其他领域延伸扩展，以便为人们趋利避害提供理论指导。

参 考 文 献

[1] 李争彩, 林书玉. 超声空化影响因素的数值模拟研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2008, 36(1): 38-42.
[2] IVANY R D, HAMMITT F G. Cavitation bubble collapse in viscous, compressible liquids: numerical analysis[J]. Journal of Basic Engineering, 1965, 87, 977.
[3] PROSPERETTI A, LEZZI A. Bubble dynamics in a compressible

liquid, part 1: first-order theory[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 168, 457-478.

[4] LEIGHTON T G. The Rayleigh-Plesset equation in terms of volume with explicit shear losses[J]. Ultrasonics, 2008, 48(2): 85-90.

[5] 吴岸峰, 苟小龙, 李朋. 超声降解废水机理及空化气泡运动过程数值模拟[J]. 机电设备, 2008, 25(4): 37-40.

[6] LIM C, KIM J E, LEE J Y, et al. Nonlinear behavior of micro bubbles under ultrasound due to heat transfer[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(9): 2521-2528.

[7] 马空军, 黄玉代, 贾殿赠, 等. 相界面上超声空化气泡聚并、滑移促进的传质[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 742-746.

[8] 陈伟中, 黄威, 刘亚楠, 等. 声空化泡动力学及其测量[J]. 中国科学(G 辑), 2006, 36(2): 113-123.

[9] 李林. 超声场下空化气泡运动的数值模拟和超声强化传质研究[D]. 四川: 四川大学, 2006.

[10] 姜学平, 程茜, 钱梦霖. 刚性边界附近微泡运动特性的计算及数值模拟[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 230-231.

[11] 曹玉叶, 林书玉, 张鹏利, 等. 双超声空泡相互作用研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版, 2010, 3 (4): 46-50.

[12] XI X Y, CEGLA B F, LOWE M, et al. Study on the bubble transport mechanism in an acoustic standing wave field[J]. Ultrasonics, 2011, 51(8): 1014-1025.

[13] 徐峥, 许坚毅, 刘峻晓. 超声波降解有机物溶液的气泡动力学研究[J]. 声学学报, 2009, 34(2): 180-186.

[14] 刘秀梅, 贺杰, 陆建, 等. 表面张力对固壁旁空泡运动特性影响的理论和实验研究[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 4020-4025.

[15] 张风华. 振荡压力场中空泡混沌运动的数值研究[J]. 应用力学学报, 2001, 18(3): 14-19.

[16] 王成会, 林书玉. 超声波作用下气泡的非线性振动[J]. 力学学报, 2010, 42(6): 1050-1059.

[17] 许文林, 何玉芳, 王雅琼. 超声空化气泡运动方程的求解及过程模拟[J]. 扬州大学学报:自然科学版, 2005, 8(1): 55-59.

[18] 史振方. 声空化优化的数值模拟研究[D]. 陕西: 陕西师范大学, 2009.

[19] 陈谦, 邹欣晔, 程建春. 超声波声孔效应中气泡动力学研究[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6476-6481.

[20] KODAMA T, TOMITA Y, WATANABE Y, et al. Cavitation bubbles mediated molecular delivery during sonoporation[J]. Journal of Biomechanical Science and Engineering, 2009, 4(1): 124-140.

[21] ZHOU Y, YANG K, CUI J, et al. Controlled permeation of cell membrane by single bubble acoustic cavitation[J]. Journal of Controlled Release, 2011, 157: 103-111.

[22] 杨阳, 宗丰德. 超声驱动下激励参数对单泡空化振动的影响[J]. 力学学报, 2009, 41(1): 8-14.

[23] 孔为, 苍大强, 王文波. 钢液内超声空化气泡运动过程模拟[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(35): 8696-8701.

[24] 黄永春, 周莹, 杨锋, 等. 蔗糖溶液中超声空化泡运动数值的模拟[J]. 食品与机械, 2011, 27(6): 23-27.

[25] 徐峥, 许坚毅, 刘峻晓. 声光协同作用下金纳米颗粒表面空化泡的动力学研究[J]. 声学学报, 2010, 35(1): 14-18.

[26] 张鹏利, 林书玉. 声场作用下两空化泡相互作用的研究[J]. 物理学报, 2009, 58(11): 7797-7781.

[27] 曹玉叶, 林书玉. 超声双空泡运动特性的研究[J]. 声学技术, 2010, 29(4): 412-414.

[28] 卢义刚, 吴雄慧. 双泡超声空化计算分析[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 475-479.

[29] AN Y. Formulation of multibubble cavitation[J]. Physical Review, 2011, 83(6): 1-6.

[30] 蔡军, 淮秀兰, 闫润生, 等. 湍流作用下水力空化气泡内温度演变动力学分析[J]. 科学通报, 2011, 56(12): 947-955.

[31] 沈壮志, 林书玉. 声场中水力空化泡的动力学特性[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 379-388.

[32] VANHILLE C, CAMPOS-POZUELO C. Acoustic cavitation mechanism: a nonlinear model[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19(2): 217-220.

[33] CHAKMA S, MOHOLKAR V S. Mechanistic features of ultrasonic desorption of aromatic pollutants[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 175(15): 356-367.

[34] PARKAR P A, CHOUDHARY H A, MOHOLKAR V S. Mechanistic and kinetic investigations in ultrasound assisted acid catalyzed biodiesel synthesis[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 187: 248-260.

[35] 刘亚楠, 陈伟中, 黄威, 等. 稳态声空化泡的高精度测量技术[J]. 科学通报, 2005, 50(22): 2458-2462.

[36] 李彬, 万明习. 基于超高速摄影显微成像和超声散射的纳米包膜造影微泡包膜厚度估计. 生物物理学报, 2005, 21(1): 71-77.

[37] ASHOKKUMAR M, KENTISH S, GRIESER F. Bubbles in an acoustic field: an overview[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2007, 14(4): 470-475.

[38] 刘亚楠, 陈伟中, 黄威, 等. 不同幅度的空化泡动力学演化过程[A], 中国声学学会 2006 年全国声学学术会议论文集[C]. 2006, 255-256.

[39] 齐水宝, 陈伟中, 崔炜程. 酒精-水溶液中空化泡的动力学研究[J]. 声学与电子工程, 2011, (4): 49-50.

[40] 崔炜程, 苟杰, 陈伟中. 等声压下声空化气泡平衡半径与甘油浓度的关系[J]. 声学技术, 2009, 28(11): 76-77.

[41] SUZUKI H, LEE I Y S, OKUNO Y. Stability and dancing dynamics of acoustic single bubbles in aqueous surfactant solution[J]. International Journal of Physical Sciences, 2010, 5(3): 176-181.

[42] 徐兴华, 陈伟中, 黄威, 等. 溶液的杂质含量对单泡声致发光的影响[J]. 声学技术, 2004, 23(22): 41-42.

[43] 黄威, 陈伟中, 高贤娟, 等. 硫酸中单泡声致发光的气泡半径与声压的关系[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 5-6.

[44] QU X P, QIU H H. Acoustically driven micro-thermal-bubble dynamics in a microspace[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20: 1-12.

[45] BROTHIE A, GRIESER F, ASHOKKUMAR M. Characterization of acoustic cavitation bubbles in different sound fields[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2010, 114(34): 11010-11016.

[46] BROWNE C, TABOR R F, DAGASTINE R R, et al. Bubble coalescence during acoustic cavitation in aqueous electrolyte solutions[J]. Langmuir, 2011, 27: 12025-12032.

[47] THIEMANN A, NOWAK T, METTIN R, et al. Characterization of an acoustic cavitation bubble structure at 230kHz[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(2): 595-600.

[48] SIVASANKAR T, MOHOLKAR V S. Physical insights into the sonochemical degradation of recalcitrant organic pollutants with cavitation bubble dynamics[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2009, 16 (6): 769-781.

[49] SHU D, SUN B D, GRANT P S, et al. A high-speed imaging and modeling study of dendrite fragmentation caused by ultrasonic cavitation[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012,

43(10):3755-3766.

[50] 陈红, 李晓静, 万明习, 等. 高强度聚焦超声场中空化泡群的结构及其形成过程水[J]. 声学学报, 2006, 31(6): 532-535.

[51] 王成会, 林书玉. 超声波作用下局部泡群的运动[J]. 声学技术, 2010, 29(6): 148-149.

[52] 亢淑梅, 沈明钢, 李成威, 等. 第十六届全国炼钢学术会议论文集[C]. 2010, 278-284.

[53] SUSLICK K S, EDDINGSAAS N C, FLANNIGAN D J, et al. Extreme conditions during multibubble cavitation: Sonoluminescence as a spectroscopic probe[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(4): 842-846.

[54] BIRKIN P R, OFFIN D G, VIAN C J B, et al. Multiple observations of cavitation cluster dynamics close to an ultrasonic horn tip[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130(5): 3379-3388.

[55] LOUISNARD O. A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid. Part II: Primary bjerknese force and bubble structures[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 19(1): 66-76.



中国科学院声学研究所第四届青年学术会议在京成功举办

中国科学院声学研究所第四届青年学术会议于2012年10月9日到10日在北京成功举办。本次会议由中国科学院声学研究所学术委员会举办, 科技处承办, 是继1999年、2003年和2009年前三届青年学术会议之后的又一次青年学术大会。声学所所长王小民和所党委书记张春华等所领导出席了会议。

会议共收录论文150篇, 涉及水声、超声、音频、信号与信息处理和管理等学科, 收录论文的数量、质量和学科覆盖面创历史新高, 反映出声学所科研事业蓬勃发展和人才队伍基础雄厚的景象。来自声学研究所各个实验室、研究室(中心)和管理部门的175名代表参加了会议。

会议于10月9日上午开幕, 由声学所副所长、副书记倪宏主持, 王小民所长致开幕词, 侯朝焕院士发表了讲话。

大会报告由所学术委员会主任王秀明和副主任杨军主持, 张仁和院士、汪承灏院士分别作了题为《海洋声学基础研究进展》和《做科研的体会》的大会报告, 另外王秀明研究员做了《储层声学及其应用》的大会报告。

张仁和院士首先对海洋声学基础研究的进展进行了介绍, 并向青年学子讲述了学习要将书本从厚读到薄, 再从薄读到厚和科研工作要持之以恒的道理, 并强调提出问题要比解决问题更具有重要意义; 汪承灏院士结合自身的科研经历与广大青年学子畅谈了自己的科研体会, 并希望广大青年人

专注科研, 要有“安、专、迷”的精神, 在学术上精益求精; 王秀明研究员介绍了储层声学的基本概念、意义、内涵及应用, 并指出未来的发展趋势, 特别对逆时声学进行了深入浅出的介绍。

在分组交流中, 会议以水声学科组、音频声学科组、超声学科组和信号与信息处理、三站与管理学科组为单元进行了交流。交流内容涵盖了水声物理与水声技术、声学换能器和测试仪器设备、空气声学噪声控制技术、语言声学和内容理解理论、固体声学深部钻测技术、超声检测与声学微机电技术、医用声学、数字信号处理、网络信息技术、管理学等多个研究领域。

大会于10月10日下午3时落下帷幕, 李风华副所长主持闭幕式, 王小民所长做了主题为“珍惜金色的年华, 珍惜伟大的时代”的闭幕式讲话, 会议还评出了24篇优秀论文, 并举行了颁奖仪式。

本届青年学术会议的召开, 正值中科院进入“创新2020”, 声学所全面推进“一三五”战略规划的关键之年, 大会拓展了声学所青年科研人员的视野, 激发了大家的科研热情, 提高了青年的创新能力, 对中科院声学所的学科建设和人才梯队建设起到了积极的作用, 会议取得了圆满成功。

(中国科学院声学研究所 徐德龙)