



水利技术

空化特性研究进展

管金发 邓松圣 张攀锋 华卫星

(后勤工程学院军事供油工程系,重庆 401331)

摘要 空化是液体特有的一种复杂流体动力学现象。从空泡运动方程、理论分析、空化实验、多空泡研究等方面简要介绍了空化特性的国内外研究现状。空泡群的研究将使空化研究更接近于工程实际,空泡群空化规律的深入研究是下一步努力的方向。

关键词 空化 空泡运动方程 空化实验 多空泡

中图法分类号 TV131.32; **文献标志码** A

空化是因液流局部压力低于相应温度下的饱和蒸汽压而出现的空泡初生、长大、收缩最后溃灭的流体动力学现象^[1]。当液流中产生空化时,空泡的溃灭会在空泡周围极小的空间内产生高温、高压、微射流,并对外辐射空化噪声,同时高压和空化噪声通常以强烈冲击波的形式出现^[2-5]。空化的发生可能带来危害,比如改变液体水动力作用使得水力机械效应降低、引起空蚀、因辐射空化噪声影响水中兵器安全等等^[6],也可能变害为利、为人所用,比如将空化应用于清洗、切割、破碎物件,提高石油钻井钻速,改善材料表面性能、过程强化等等^[7,8]。为了避免空化可能带来的危害,同时在某些场合合理利用空化,人们对空泡运动特性、空化机理等进行了深入地研究。本文从空泡运动方程、理论分析、空化实验、空泡群的研究等方面着手,对前人在空化特性方面的研究进行了一些总结。

1 空泡运动方程

空化的理论研究是从空化泡运动特性的数学建模开始的。Rayleigh^[9](1917)最早对空化现象进行了理论研究,建立了不可压缩流体中理想球形空泡的径向运动方程——Rayleigh 方程: $R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{P_R - P_\infty}{\rho}$ 。Rayleigh 方程的建立为空泡动力学的发展奠定了基础。然而,由于 Rayleigh 方程忽略了含气量、表面张力和压缩性等因素对空泡运动的影响,用其进行计算分析得到的某些结果与实际情况不相符合,比如空泡收缩到最小半径时,泡表面的速度和加速度趋于无穷大,且不会出现反弹现象等^[10]。为了更加准确、真实地描述空化泡的运动特性,诸多学者通过考虑表面张力、液体黏性和可压缩性等因素对 Rayleigh 方程进行了修正,得到考虑不同因素的空泡运动方程。对于不可压缩流体,考虑液体黏性时^[11],空泡运动方程为: $R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 =$

2011年6月20日收到 重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2009BB7177)、重庆市科技攻关项目(CSTC, 2010AC7034)资助
第一作者简介:管金发(1984—),男,博士研究生,研究方向:油气储运技术。E-mail: gjfcg_928@163.com。

$\frac{1}{\rho} \left(P_R - P_\infty - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \right)$; 考虑表面张力时^[12], 空泡运动方程为: $R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left(P_R - P_\infty - \frac{2\sigma}{R} \right)$; 考虑含气量时^[13], 空泡运动方程为 Nolting-Neppiras 方程: $R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[kP_\infty \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - (P_\infty - P_v) \right]$; 考虑液体黏性和表面张力时^[14,15], 得到 Rayleigh-Plesset 方程, 也称 Porisky 方程: $R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left(P_R - P_\infty - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \right)$; 综合考虑液体黏性、表面

张力和含气量时^[16], 空泡运动方程为: $R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 + \frac{1}{\rho_0} \left[P_\infty - P_v - \left(kP_\infty - P_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + 4\mu \frac{\dot{R}}{R} + \frac{2\sigma}{R} \right] = 0$ 。当考虑液体可压缩性时^[17], Gilmore 引入柯克伍德-贝蒂假设^[18], 即压强扰动传播的速度等于音速和液体局部速度之和, 得出空泡运动方程: $\ddot{R}R \left(1 - \frac{\dot{R}}{c} \right) + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \left(1 - \frac{\dot{R}}{3c} \right) = \left(1 + \frac{\dot{R}}{c} \right) H + \frac{R}{c} \left(1 - \frac{\dot{R}}{c} \right) \times \frac{dH}{dt}$ 。另外, 1995 年 Yasui^[19] 推导了考虑热传导因素的

空泡运动方程。2001 年, Akhatov^[20] 提出了描述激光空泡球对称运动的数学模型, 该模型综合考虑了液体压缩性、热传导、物质传输及汽化和冷凝等非平衡效应对含气空泡脉动的影响。Epstein 和 Keller^[21] 考虑液体的压缩性推导出空泡的一维及二维方程。Keller 和 Miksis^[22] 同时考虑声辐射效应、液体黏性、空泡表面张力及入射声波影响, 推导出 KM-polytechnic 方程。Keller 和 Kolodner^[23] 将周围液体看做是可压缩的, 考虑声辐射效应的影响, 推导出 Keller-Kolodner 方程。Trilling^[24] 采用拟声学近似法, 假设液体的流速与声音在液体中的传播速度相比总是很小, 略去非线性微分方程的高阶项得到 Trilling 方程。Prosperetti 和 Lezzi 则通过小扰动理论推导出可压缩流体中球形空泡的泡壁运动的一阶和二阶近似方程^[25,26]。国内赵健^[27] 等人对 Ray-

leigh、Trilling 和 Gilmore 三种球形泡壁运动方程的精确度和适应范围进行了比较研究, 认为 Rayleigh 只在泡壁速度的马赫数小于 1 且焓差时间变化率较小时具有较高的精度, Trilling 和 Gilmore 方程均在小马赫数下具有较高的精度, 而两者之间 Gilmore 方程计算精度又相对更高。空泡运动方程是理论分析空化特性的基础。因考虑的影响因数存在差异, 不同的空泡运动方程应用于空化特性分析时可能得到不同的结果, 故针对不同的问题应选用合适的空泡运动方程, 使问题能得到简化解决, 又有可靠的精度。

2 理论分析

就单空泡而言, 空化的理论分析主要是基于空泡运动方程对单空泡的演化过程, 各因素对空泡演化或者说运动特性的影响, 空泡溃灭时的溃灭压力、溃灭温度、微射流、空化噪声等各种物理现象进行了计算分析。汪鸿振^[28] 等假设空泡为球形, 基于 Gilmore 空泡运动方程对空泡演化过程进行了计算, 得到空泡溃灭有一个幅度逐渐减小的溃灭回弹过程, 即空泡溃灭有回弹现象。许卫新^[29] 对均匀规则脉动场中的单气泡运动进行数值计算, 得出气泡在压力脉动场中的运动是一种非线性很强的运动。胡影影^[30] 等通过直接求解原始变量的 N-S 方程, 对空泡在固壁附近的溃灭收缩特性进行了数值模拟, 得到固壁附近的空泡变形溃灭发生在极短的时间内, 远离固壁的空泡顶部首先变形下凹产生较强的凹陷射流; 射流击穿空泡壁, 使泡形成环状; 环泡不稳定, 最后溃灭消失, 与经典的空泡射流-溃灭模式^[31] 结果相同。空泡运动特性的影响因数主要有液体黏性、表面张力、压缩性等。1952 年, Porisky^[32] 考虑液体黏性对球形空泡的膨胀和压缩过程进行了研究, 发现液体的黏性会延缓空泡的压缩和膨胀, 但只有比水大得多的黏性才对空泡的发育和溃灭产生影响。另外, Porisky 同时考虑液体黏性和表面张力进行计算时得到: 表面张力加速空泡的压缩过程, 但对膨胀过程起延缓作用。Ivany^[33] 等人对黏

性流体中的空泡溃灭进行数值模拟计算发现:与黏滞性相比,表面张力对正在溃灭的空泡影响很小,一般可以忽略。Hunter^[34]研究爆炸空泡时发现:相对半径约为 5%,马赫数超过 0.3 时,流体的可压缩性开始产生影响。

空泡溃灭产生的高温是空化应用于过程强化的基础。空泡溃灭温度主要是以空泡运动方程为基础、采用相应的热力学模型计算得到的。由于最初的研究忽略了许多影响因素,致使空泡溃灭温度计算结果特别高。1993 年, Wu 和 Roberts^[35] 基于 Rayleigh-Plesset 方程,采用无耗散、绝热模型得到空泡溃灭的峰值温度最高可达 $10^7 \sim 10^8 \text{ K}$ 。随后,将热传导、黏性、水蒸气等因素考虑在内时,计算得到的空泡峰值温度大幅度下降。Toegel 和 Lohse^[36] 以 Keller-Miksis 空泡动力学方程为基础,考虑热交换、水蒸气的相变、空泡中不同种类气体的化学反应及反应产物在液体中的扩散,得到声致发光前、后空泡的峰值温度为 5 500 K 和 15 000 K。Kim 和 Kwak^[37] 采用 Keller-Miksis 空泡动力学方程,数值计算得到超声压力场作用下空气空泡溃灭的溃灭温度为 7 000 K。空泡溃灭温度具有不同的计算结果,但由于空泡体积微小难于直接测量而没有一个准确的数值,一般认为空泡溃灭峰值温度在 5 000 K 以上。

对于空泡溃灭压力, Rayleigh^[38] 最早基于水锤公式 $p' = \rho C \Delta U$ (C 为泡壁处音速, U 为泡壁速度) 计算得出:当溃灭速度低于音速时溃灭压力高达 3×10^6 个大气压。Peterka^[39] 计算得出:确定的球形空泡溃灭可造成固体边壁上冲击压力高达一万多个工程大气压。Sochard^[40] 等采用 Keller-Kolodner 空泡动力学方程,基于泡内气体压力均匀假设,考虑泡内气体的质量传递和热传递,算得空泡溃灭压力大于 100 Mpa。Kwak^[41] 等采用 Keller-Miksis 空泡动力学方程计算了超声压力场作用下浓硫酸溶液中氩气空泡的溃灭压力,得到初始半径为 13 μm 的空泡溃灭压力为 102 MPa。空泡溃灭能产生惊人的高压,但溃灭压力通常在什么范围,目前还没有定论。

研究表明,空泡溃灭时除了会在空泡周围极小

的空间内产生高温、高压以外,还会产生微射流和空化噪声。对于射流现象的产生目前还没有解析解,主要依据数值计算得到。Plesset 和 Chapman^[42] (1971) 首次利用有限差分法计算空泡溃灭的流场,得出了射流现象。空泡溃灭噪声是指空泡溃灭过程中因空泡体积的剧烈收缩而向往辐射的声波。1917 年, Rayleigh 首先从理论上证明了空泡溃灭时将对外辐射声脉冲。Fitzpatrick 和 Strasberg^[43] (1956 年) 是最早基于 Rayleigh 方程建立空化噪声模型的研究者之一,他们采用 Fourier 分析,将空泡溃灭时间转化为频率,得出空化噪声谱密度函数正比于频率的四次方。关于空泡溃灭噪声,很多学者还对空泡溃灭噪声的固有频率特性等进行了大量研究^[44,45]。

可以说诸多学者对空泡运动、空泡溃灭的各种特性进行了大量的理论研究,但是对空泡运动方程进行计算一般很难得到解析解,通常通过数值计算的方法进行计算。计算方法上,除了有限差分法外,还有修正的 MAC 法^[46]、变分法^[47]、边界元法^[48]、运用 MATLAB 软件进行计算^[49]、基于 FLUENT 等 CFD 软件计算^[50] 等方法。特别值得一提的是,普通边界元法只能计算到泡的上表面与下表面发生抨击的时刻,对空泡的抨击后期没法计算^[51]。为解决这一问题, Lundergren 和 Mansour (1991)^[52] 将泡溃灭分成两阶段来进行考虑,泡由开始的状态到泡的上下表面碰在一起为第一阶段,利用一般的边界元法进行处理;接下来的阶段为第二阶段,他们引进了一条涡线,从而使空泡溃灭的计算得以延续。过去,很多计算方法受限于计算机的计算能力。现今,随着计算机计算能力的增强,空泡的数值计算将得到更大的发展。

3 空化实验

空化实验是一种直观显示空泡溃灭过程的研究方法。用于空化实验的空化泡主要有电解泡、火花泡和激光泡。早期的空化实验多采用电解泡或火花泡,然而电解泡或火花泡形式的空泡缺乏球对

称性,只能用来了解空泡收缩溃灭的大致情形而不能进行定量研究。相比而言,激光泡具有球对称性好,可控性好及无机械形变的特点^[53]。因而自从利用激光产生空泡的方法出现之后,空化实验的研究得到了更好的发展。空化实验的内容大概可以分为两部分:一是观察分析空泡形态的变化规律和各种因素对空泡形态变化规律的影响。黄继汤^[54,55]等人以火花泡为研究对象,应用高速摄影技术研究了液体黏性、表面张力、水流挟沙等因素对空泡收缩及膨胀的影响。陆力^[56]采用高速摄影方法观测了液流中的空泡溃灭过程,分析了空泡在流动系统中溃灭时的泡壁稳定性,得到流动系统中,空泡外形很不稳定,常在溃灭过程中分裂出许多微小泡,有时甚至分裂成小泡团而消散。二是射流、空化噪声等各种空化物理现象的实验验证。1961年,Nau-de 和 Ellis 实验证实了空泡在边壁附近溃灭时产生微射流现象^[57]。1952年,Harrison 首次采用声学测试法成功探测到空泡溃灭声脉冲的存在。随后,Guth 于1954年采用条纹摄影术实现了对空化噪声冲击波传播过程的可视化测试。另外,实验发现空化还有发光现象。1990年,Gaitan^[58]发现悬浮在驻波声场中的单一空泡能象时钟一样精确地在每个崩溃时刻发出肉眼能看见的光——称之为声致发光。在国内吴先梅^[59]等研究了瞬态单一空化气泡的空化发光现象。三是试验研究空泡溃灭时溃灭压力、射流等流场参数的变化规律。Jones 和 Edwards 利用自制的压电式传感器测得溃灭压力最高可达 10 GPa^[60]。Lauterborn 利用激光泡试验研究了空泡溃灭的细节并对空化噪声进行了精确测量,且通过高速摄影拍摄的图像求出了射流的速度为 120 m/s。实验手段上,除了高速摄影外、还有 PIV 技术、纹影法、干涉法等等,同时研究的空泡也有不受壁面影响的空泡和自由面或壁面附近的空泡之分。1989年,Vogel^[61]和 Lauterborn 综合利用 PIV 技术和高速摄影技术测量了激光球形空泡溃灭时的整个流场分布。该方法将 PIV 照片叠加在一个有运动速度的胶片上(Drum 照相机可满足该要求),从而解决了在拍摄过程中粒子的“方向模糊”问题。

Ward(1991)^[62]采用干涉法探测了空泡在附近溃灭时对外辐射的冲击波。Vogel^[63]等人利用光延迟技术获得了皮秒和纳秒激光产生的空泡溃灭射流的速度。Shaw^[64]等采用压电换能器(水听器)结合纹影法研究了激光空泡溃灭阶段对外辐射的冲击波和射流效应对周围靶材的力学加载效应与 γ 值的关系。Barber^[65]等人采用 Mie 散射法进行了空泡形态体积的测量。赵瑞^[66]等采用自行研制的基于光偏转原理的力学传感器及压力陶瓷探针式水听器 PZT,对激光诱导的空泡在固壁面附近溃灭进行了实验研究,得到声脉冲是空泡第二次溃灭过程中主要衰减方式的结论。

4 多空泡研究

在工程实际中,空化的发生几乎都是以多个空泡或空泡群的形式出现的。空泡间的相互作用将使空泡群内空泡动力学特性发生改变,同时多空泡时也表现出与单一空泡不一样的空化特性。目前,多空泡研究主要集中于双空泡和空泡群两方面,一般从理论分析和试验研究两种手段入手。Shima(1971)^[67]首次对水中两个球形空泡的振荡进行了研究,导出不可压缩流体中两个球形气体空泡的控制方程,得出了两个空泡的固有频率。Fujikawa 和 Takahira^[68]从理论上研究了可压缩流体中两个气体空泡之间的相互作用以及它们所辐射出的压力波。戚定满^[69]等应用边界元法研究了两个相邻空泡的运动特性,得出了空泡的演化规律,计算表明:不同大小的空泡在一起时则小泡会先溃灭,且小泡的存在时间与两泡的半径比成正比;大泡对小泡来说其作用相当于一固壁面,小泡会形成一指向大泡的溃灭射流。相同大小的空泡在一起溃灭时,会同时形成指向中间的射流,与空泡在固壁面附近的溃灭情形相当。彭静^[70]对双空泡溃灭时的运动及动力特性进行了实验研究。黄继汤^[71,72]等人对含油静止液体中双空泡运动形态和溃灭特性进行了试验研究。梁柱^[73]等对固液两相流中两个空泡的溃灭过程进行了研究,指出空泡间的相互作用将使最大溃

灭压力升高,而且固体颗粒的存在对空泡溃灭和反弹阻碍作用。

对空泡群进行理论分析时涉及到采用空泡群的处理模型问题。最早在 1964 年, Van Wijngaarden^[74]采用连续介质模型分析了一平壁附近大量空泡的溃灭过程,发现由于空泡间的相互作用使得作用在壁面上的压力明显增大。该模型没有包含单个空泡的动力学效应,并且当空泡群的半径趋向于零时,压力和溃灭速度都将趋向于无穷大。d'Agostino^[75]等用连续介质模型与 R-P 方程耦合的方法计算了空泡群的固有频率,并对球形空泡群的线性动力学方程进行了求解,得出空泡群固有频率远小于单个空泡的固有频率。Smereka^[76]等采用动力系统分析法研究了周期性驱动下的空泡群的非线性行为,认为空泡群振荡是一个复杂的分叉系统和奇异吸引子。Takahira^[77]等借助于球谐函数的展开式建立了液体中空泡群的三维运动控制方程和球形空泡群振荡的特性方程式,计算得到:空泡间相互作用使得空泡群比单个孤立空泡更容易产生压谐振荡。Morch^[78]以空泡群半径和均匀体积份额的特性为基础,研究球形空泡群边界上形成的冲击波得出:随着空泡群向内溃灭冲击波将向空泡群内传播以致于完全淹没其传播路径上所有的空泡。国内黄建波^[79]等基于能量传递理论,应用分层溃灭模型计算水翼上空泡群的溃灭压力。结果表明以冲击波传播方式表现出来的空泡间相互作用使最后溃灭的空泡产生的辐射压力提高了几个量级。另一方面,由于空泡群的组成由空泡尺寸的空间分布、溃灭时间分布等因素决定,这些因素具有很大的随机性,因而一定组成的空泡群的再现很难实现,对空泡群溃灭压力、固有频率等参数进行测试也就无法开展,空泡群的试验研究多停留于简单观察。Wang^[54]等人曾实验观察了空泡群溃灭时产生的冲击波。

5 结束语

空化是液体特有的一种复杂流体动力学现象。

空化的理论分析有助于深化对空化机理的认识,而积极开发研究有效的测试技术对空化特性进行实验研究是真正掌握空化规律的重要手段。空泡群的研究将使空化研究更接近于工程实际,空泡群空化规律的深入研究将是下一步应努力的方向。液体的空化现象是流体力学中的一个热门研究领域,随着对空化规律认识的不断深化,它将为人们对空化问题趋利避害提供更有效的指导。

参 考 文 献

- 1 邓松圣,李赵杰,张福伦,等. 空化射流降解毒性有机物实验研究. 后勤工程学院学报, 2009;25(6): 46—49
- 2 Suslick K S. Sonochemistry. Science, 1990;(247): 1439—1445
- 3 Flint E B, Suslick K S. The Temperature of Cavitation. Science, 1991;(253): 1397—1399
- 4 Gibson D C. Cavitation adjacent to plane boundaries. Proc 3rd Conf Hydraul Fluid Mech, Sydney, P R. Austr Inst Engrs, 1968
- 5 戚定满,鲁传敬,何友声. 空化噪声谱特性研究. 振动与冲击, 1999;18(3): 32—36
- 6 李胜勇,黄高明,刘晓然,等. 激光空化在水下假目标中的应用研究. 舰船科学技术, 2006;28(6): 72—74
- 7 付 胜,李海涛,刘丽丽,等. 空化水射流的形成方法及其应用研究. 机械科学与技术, 2006;25(4): 491—494
- 8 卞华松,张大年,赵一先. 水污染物的超声波降解研究进展. 环境污染治理技术与设备, 2000;1(1): 57—64
- 9 Rayleigh J W. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. Philos Mag, 1917; (34): 94—98
- 10 王献孚. 空化泡和超空化泡流动理论及应用. 北京: 国防工业出版社, 2009
- 11 Plesset M S. The dynamics of cavitation bubbles. J Appl Mech, 1949; (16): 227—290
- 12 Cole R H. Underwater explosion. Princeton U. P., Princeton, 1948
- 13 Noltingk B K, Neppiras E A. Cavitation produced by ultrasonics. Proc Phys Soc London B, 1950; (63): 674—685
- 14 Brennen C E. Cavitation and bubble dynamics. Oxford: Oxford University Press, 1995
- 15 付 勇,张晓冬. 文丘里管空化器内空泡动力学特性的数值模拟. 化学工程与装备, 2007;(2): 4—7
- 16 Hinsch K, Brinkmeyer E. Investigation of very short cavitation shock waves by coherent optical methods. SPIE, 1994; (97): 116—171
- 17 Gilmore F R. The growth and collapse of a spherical bubble in a viscous compression liquid. Hydro Lab Calif Inst Tech Report, 1952

- 18 Kirkwood J G, Bethe H A. The pressure wave produced by an underwater explosion. OSRD Rep, 1942
- 19 Yasui K. Effects Thermal conduction on bubble dynamic near the somolumince threshold. J Acoust Soc Am, 1995; (98): 2772—2782
- 20 Akhatov I, Lindau O, Topolnikov A, *et al.* Collapse and rebound of a laser-induced cavitation bubble. Phys. Fluids, 2001; (13): 2805—2819
- 21 Epstein D, Keller J B. Expansion and contraction of planar, cylindrical and spherical underwater gas bubbles. J Acoustical Soc Am, 1972; (52): 975—980
- 22 Keller J B, Miksis M. Bubble oscillations of large amplitude. Journal of J Acoust Soc Am, 1980; (68): 628—633
- 23 Keller J B, Kolodner I I. Damping of underwater explosion bubble oscillations. J Appl Phys, 1956; (27): 1152—1161
- 24 Trilling L. The collapse and rebound of the gas bubble. J Appl Phys, 1952; (23): 56—57
- 25 Prosperetti J, Lezzi A. Bubble dynamics in a compressible liquid, Part 1, First-order theory. J Fluid Mech, 1986; (168): 457—478
- 26 Prosperetti J, Lezzi A. Bubble dynamics in a compressible liquid, Part 2, second-order theory. J Fluid Mech, 1987; (185): 289—321
- 27 赵 健,汪鸿振,朱物华. 可压缩性流体中球形泡壁运动的研究. 上海交通大学学报, 1989; (23): 91—94
- 28 汪鸿振,陈光治. 单空泡溃灭模拟实验. 声学技术, 1991; 10 (1): 8—10
- 29 许卫新. 单气泡在压力脉动场中运动的数值计算. 水动力学研究与进展, 1990; 5 (1): 118—121
- 30 胡影影,朱克勤,席葆树. 空泡在固壁附近溃灭的数值模拟. 水动力学研究与进展, 2004; 19 (3): 310—315
- 31 Knapp R T, Daily J W, Hammit F G. Cavitation. McGraw-Hill, New York, 1970
- 32 Porisky H. The collapse or growth of a spherical bubble or cavity in a viscous fluid. Proc First U S Nat Congr Appl Mech, ASME, 1952; 813—821
- 33 Ivany R D, Hammit F G. Cavitation bubble collapse in viscous, compressible liquids-numerical analysis. Trans ASME, Ser D, Jr Basic Engneering, 1965; (87): 977—985
- 34 Hunter C. On the collapse of an empty cavity in water. J Fluid Mech, 1960; (8): 241—263
- 35 Wu C C, Robert P H. Shock wave propagantion in a sonoluminescing gas bubble. Phys Rev Lett, 1993; (70): 1065—1067
- 36 Toegel R, Lohse D. Phase diagrams for sonoluminescing bubbles; a comparison between experiment and theory. J Chem Phys, 2003; 118 (4): 1863—1875
- 37 Kim K Y, Kwak H Y. Prediction of bubble behavior in sulfuric acid solutions by a set of solutions of navier-stokes equations. Chemical Engineering Science, 2007; (62): 2880—2889
- 38 Knapp R T, Daily J W, Hammit F G. 空化与空蚀. 水利水电科学研究院译. 北京: 水利出版社, 1981
- 39 Peterka A J. 掺气对与气蚀的影响. 高速水流论文译丛, 第一辑, 第一册. 北京: 科学出版社, 1981
- 40 Sochard S, Wilhelm A M, Delmas H. gas-vapour bubble dynamics and homogenous sonochemistry. Chemical Engineering Science, 1998; 53 (2): 239—254
- 41 Kim K Y, Byun K T, Kwak H Y. Temperature and pressure fields due to collapsing bubble under ultrasound. Chemical Engineering Science, 2007; (132): 125—135
- 42 Plesset M S, Chapman R B. Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary. J Fluid Mech, 1971; (47): 283—290
- 43 Fitzpatrick H M, Strasberg M. Hydrodynamic sources of sound Proc. First ONR Symp. On Naval Hydrodynamics, American, 1956
- 44 Plesset M S, Hisch D Y. Theory of gas bubble dynamics in oscillating pressure fields. The Physics of Fluids, 1960; (3): 882—890
- 45 Prosperetti A. Thermal effects and damping mechanisms in the forced radial oscillating of gas bubbles in liquids. J A S A, 1977; 61 (1): 17—27
- 46 Mitchell T M, Hammit F G. Asymmetric cavitation bubble collapse. J Fluids Engng Trans, ASME, 1973; (195): 29—37
- 47 Gibson D C, Blake J R. Growth and collapse of cavitation bubble near flexible boundaries. Proc 7th Austral Hydraulics and Fluid Mech Conf Brisbane, Australia, 1980
- 48 鲁传敬. 水平均流中细管排放气泡的三维数值模拟. 应用力学学报, 1996; 13 (4): 1—7
- 49 李争彩,林书玉. 超声空化影响因素的数值模拟研究. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2008; 36 (1): 38—42
- 50 李 疆,陈皓生. Fluent 环境中近壁面微空泡溃灭的仿真计算. 摩擦学学报, 2008; 28 (4): 311—315
- 51 戚定满,鲁传敬,何友声. 空泡溃灭及空化噪声研究综述. 上海力学, 1999; 20 (1): 1—9
- 52 Lundgrer T S, Mansour N N. Vortex ring bubbles. J Fluid Mech, 1991; (224): 177—190
- 53 李胜勇,胡生亮,刘晓然,等. 激光空泡溃灭辐射声波声谱特性研究. 激光技术, 2007; 31 (3): 281—329
- 54 黄继汤. 应用高速摄影技术研究空化现象. 清华大学学报(自然科学版), 1989; 29 (5): 1—7
- 55 黄继汤,陈嘉范,丁 彤,等. 表面张力对单空泡运动特性的影响. 水利学报, 1996; (12): 1—7
- 56 陆 力. 液流中边壁附近的空泡溃灭研究. 水利学报, 1992;

- (93): 65—74
- 57 贺 杰. 表面张力对光致空泡动力学特性影响的实验研究. 南京: 南京理工大学, 2008
- 58 Gaitan D F, Crum L A, Church C C, *et al.* J Acoust Soc Am, 1992; 91: 3166
- 59 吴先梅, 应崇福. 瞬态单一声空化气泡的动力学过程及空化发光. 声学技术, 2003; (2): 288—290
- 60 王智勇. 基于 FLUENT 软件的水力空化数值模拟. 大连: 大连理工大学, 2006
- 61 Vogel A, Lauterborn W. Time-resolved particle image velocimetry used in the investigation of cavitation bubble dynamics. Appl Optics, 1988; (27): 1869—1876
- 62 Ward B, Emmony D C. Direct observation of the pressure developed in a liquid during cavitation-bubble collapse. Appl Phys Lett, 1991; (59): 2228—2230
- 63 Vogel A, Busch S, Parlitz U. Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown in water. J Acoust Soc Am, 1996; (100): 148—165
- 64 Shaw S J, Schiffrs W P, Emmony D C. Experimental observations of the stress experienced by a solid surface when a laser-created bubble oscillates in its vicinity. J Acoust Soc Am, 2001; (110): 1822—1827
- 65 Barber B P, Putterman S J. Light scattering measurements of the repetitive supersonic implosion of a sonoluminescing bubble. Phys Rev Lett, 1993; (69): 3839—3842
- 66 赵 瑞, 梁忠诚, 徐荣青, 等. 固壁面附近空泡溃灭研究. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2009; 29(1): 83—86
- 67 Shima A. The nature frequencies of two spherical bubble oscillating in water. Trans ASME, J Basic Eng, 1971; 93(3): 426—432
- 68 Fujikawa S, Takahir H. Theoretical study on the interaction between two spherical bubbles and radiated pressure waves in a liquid. Acoustic, 1986; (61): 188—189
- 69 戚定满, 鲁传敬, 何友声. 两空泡运动特性研究. 力学季刊, 2000; 21(1): 16—20
- 70 彭 静. 双空泡溃灭时的运动及动力特性实验研究. 北京: 清华大学, 1989
- 71 黄继汤, 李 靖. 含沙静止液体中人工放电双空泡溃灭的运动形态. 水利学报, 1992; (7): 40—44
- 72 黄继汤, 李 靖. 含沙静止液体中双空泡溃灭时的动力特性. 水利学报, 1993; (2): 70—74
- 73 梁 柱, 戴勇峰, 程良骏. 双球泡在固液两相流中的溃灭研究. 四川联合大学学报(工程科学版), 1997; (2): 23—27
- 74 Wijngaarden V L. On the collective collapse of large number of gas bubble in water. Proceedings of 11th International Congress of Applied Mechanics, Germany, 1964
- 75 d'Agostino L, Brennen C E. Linear dynamics of spherical bubble clouds. Journal of Fluid Mechanics, 1989; (199): 155—176
- 76 Smereka P, Banerjee S. The dynamics of periodically driven bubble clouds. Physics of Fluids, 1988; 31(12): 3519—3531
- 77 Takahira H, Teruaki A, Fujikama S. Dynamics of a cluster of bubbles in a liquid. JSME Int J Series B, 1994; 37(2): 297—305
- 78 Morch K A. Energy considerations in the collapse of cavity clusters. Applied Sci Res, 1982; (38): 313—321
- 79 黄建波, 倪汉根. 可压缩液体中游移空泡群的溃灭压力. 水动力学研究与进展, 1987; 2(3): 1—11
- 80 Wang Y C, Brennen C E. Numerical computation of shock waves in a spherical cloud of cavitation bubbles. J Fluid Eng, 1999; (121): 872—880

Research Progress of Cavitation Characteristics

GUAN Jin-fa, DENG Song-sheng, ZHANG Pan-feng, HUA Wei-xing

(Engineering of Logistical Engineering University, Chongqing 401331, P. R. China)

[Abstract] Cavitation is a kind of complex hydrodynamics phenomena, which only exists in liquid. Research status on cavitation characteristics is reviewed, including bubble equation of motion, therotical analysis, cavitation experiment, as well as bubbles study. Research on bubble cluster makes cavitation study close to engineering practice. The law of cavitation on bubble cluster is a study emphasis in further research. .

[Key words] cavitation bubble equation of motion cavitation experiment bubbles