

高速航行体水下发射水动力学研究进展

王一伟 黄晨光[†]

中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190
中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049

摘要 高速航行体水下发射水动力学研究, 是具有重大工程应用背景的前沿基础问题. 与之紧密相关的非定常空化流动, 特别是空泡稳定性、溃灭等问题, 是影响发射载荷及安全性的关键. 本文首先简述了这一领域的主要科学问题, 归纳了主要控制参数和影响方式; 之后针对非定常空化流动问题, 综述了已有的实验观测手段及数值模拟方法; 总结了空泡发展、稳定性、溃灭及流动控制等重要物理机制、模型及各因素相互作用规律; 最后展望了该领域仍存在的主要科学问题与未来发展趋势.

关键词 水下发射, 高速水动力学, 空泡稳定性, 空泡溃灭, 通气流动控制, 流固耦合载荷

中图分类号: TJ6, O352 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0992-16-020

收稿日期: 2016-05-28; 录用日期: 2017-05-22; 在线出版日期: 2017-05-30

[†] E-mail: huangcg@imech.ac.cn

引用方式: 王一伟, 黄晨光. 高速航行体水下发射水动力学研究进展. 力学进展, 2018, 48: 201805

Wang Y W, Huang C G. Research progress on hydrodynamics of high speed vehicles in the underwater launching process. *Advances in Mechanics*, 2018, 48: 201805

© 2018《力学进展》版权所有

1 引 言

1.1 问题简述

高速航行体的水动力载荷问题研究, 具有重大的工程应用背景. 特别是水下发射相关的基础研究, 一直是研究的前沿与热点. 水下发射作为一种重要的投放方式, 具有良好的隐蔽性和机动性等突出优势, 但恶劣的水动力载荷环境给发射安全性带来了许多困难.

高速航行体水下发射过程通常包括出筒、水中航行和出水三个阶段 (如 **图 1** 所示), 整个时间历程很短. 从科学层面来看, 该过程是一个典型的非定常空化流动及其与固壁、自由面的相互作用问题. 在出筒阶段 (如 **图 1(a)**), 航行体逐渐加速, 表面低压区的压力低于水的饱和蒸气压时, 液态水会发生空化相变, 形成水汽混合的空泡; 水中航行阶段 (如 **图 1(b)**), 空泡不断演变, 有时伴随断裂和脱落; 出水阶段 (如 **图 1(c)**), 航行体穿越水、气自由表面, 空泡内水蒸气会由于压力的变化再次相变成为水, 导致空泡溃灭, 形成对壁面的冲击. 溃灭压力一般表现为作用于航行体表面局部高压. 其峰值、脉宽等参数与出水前空泡的状态密切相关. 水下发射过程中, 空泡的不稳定演变包括回射、断裂、脱落等现象, 呈现出随机性和较宽的变化范围, 这给航行体载荷预测造成了很大困难.

1.2 主要科学问题

航行体载荷形成与作用机理问题是水下发射最重要的基础. 非定常条件下的多相空化流动是其中关键的科学问题, 而空泡与自由面、空泡与结构的耦合效应等是其主要困难, 需要特别关注其中的空泡稳定性和空泡溃灭两个方面.

空化是高速水动力学领域最为经典的难题之一 (Knapp et al. 1970, Brennen 1995). 描述空化现象的最重要的无量纲参数为空化数

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (1)$$

其中, p_{∞} 为流场环境压强, p_v 为水的饱和蒸气压, ρ 为液体密度, v 为特征速度. 空化数表征环境压强与饱和蒸气压之差与来流动压的关系. 空化数越小, 相变越容易发生, 如 **图 2** 所示 (Franc & Michel 2004, Franc 2006).

在空泡的演变过程中, 随着空化数减小, 航行体表面的空泡按照其形貌通常可以分为初生空泡、片状空泡、云状空泡和超空泡等 (Wang et al. 2001, Franc & Michel 2004):

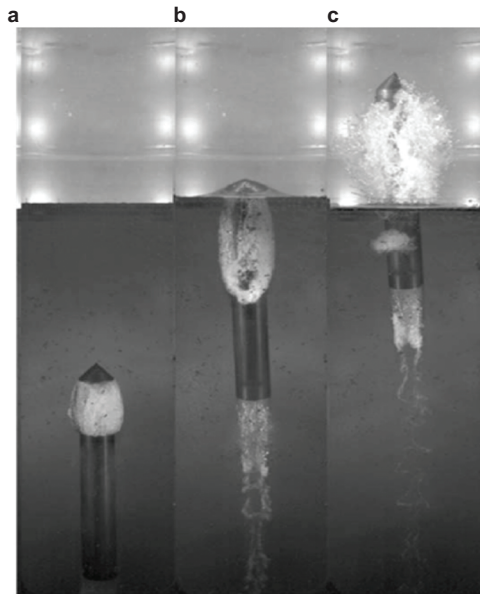


图 1

水下发射实验照片 (王一伟等 2012). (a) 出筒阶段, (b) 航行阶段, (c) 出水阶段

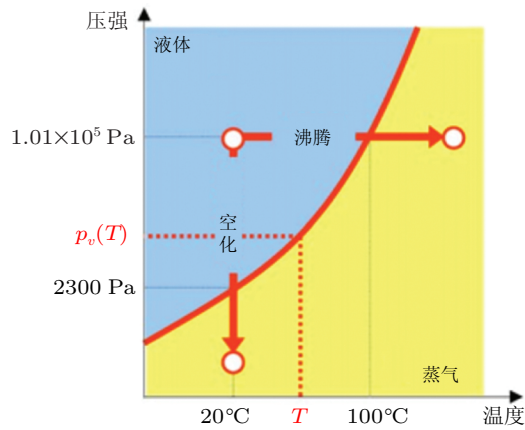


图 2

空化相关的物性示意图 (Franc & Michel 2004, Franc 2006)

(1) 当航行体刚刚出现空泡时, 空泡表现为局部的零星气泡或者辫状的气泡带, 称为初生空泡 (如 图 3(a)). 此时对应的空化数为初生空化数;

(2) 随着空化数的减小, 空泡面积逐渐增大, 气泡逐渐形成片状, 泡形较为稳定, 泡内存在波动, 即所谓片状空泡 (如 图 3(b));

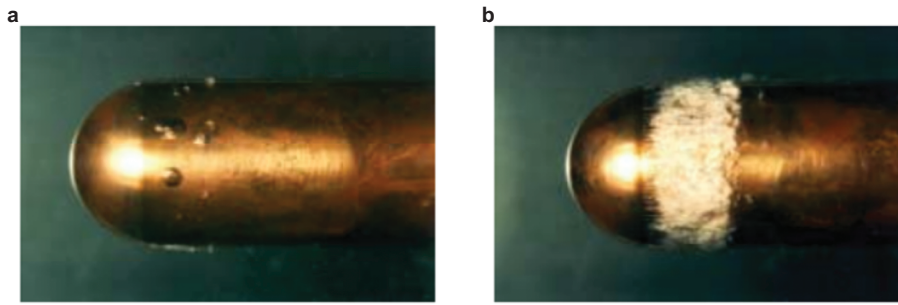


图 3

半球头回转体的初生空泡和片状空泡 (Keller 2001). (a) 初生空泡 $\sigma = 0.80$ 和 $V_\infty = 8.0 \text{ m/s}$, (b) 片状空泡 $\sigma = 0.80$ 和 $V_\infty = 14.0 \text{ m/s}$

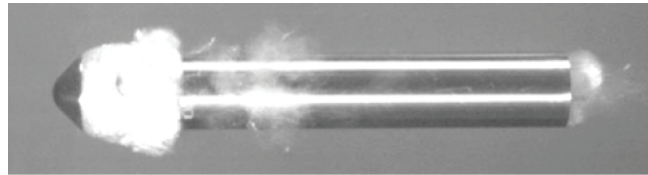


图 4

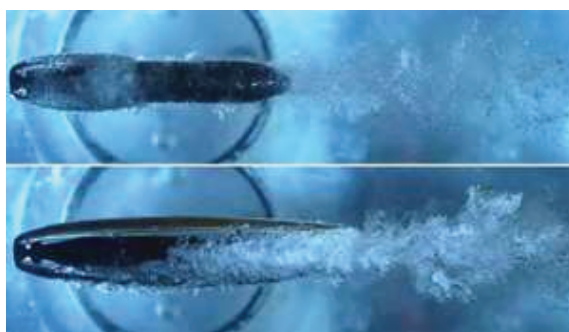
圆锥头回转体的云状空泡 (王一伟 2013)

(3) 当空化数持续减小, 空泡继续增长、变厚, 形成大团的气泡群, 同时伴随着准周期性的空泡云的脱落、振荡或溃灭等, 时空泡被称为云状空泡 (如 图 4);

(4) 随着空化数的进一步减小, 空泡增长直至超过航行体的末端, 航行体除头部之外全部被包裹进空泡之中, 此时的状态一般称为超空泡. 实际的超空泡现象常常是通过头部的人工通气或空化发生器产生的 (如 图 5).

在航行体高速水动力学领域中, 云状空泡是一个非常重要的研究对象. 一方面其发生的条件相对较宽, 接近甚至覆盖了通常的高速航行体运行环境. 如环境压力为一个大气压、运动速度在 20 m/s 左右时, 大多数头型的回转航行体在运动中都会产生云状空泡. 另一方面, 云状空泡的非定常、准周期演化特性比较复杂, 是航行体载荷波动的最重要来源之一, 其衍生的空泡稳定性问题极具挑战性.

从物理上讲, 溃灭是空化的逆过程. 当空泡周围压力升高到一定程度, 空泡剧烈收缩. 单个空泡溃灭产生窄脉宽的高压脉冲, 并伴随着高速微射流等的形成, 一般容易诱发结构的局部破坏. 对于高速航行体水动力学问题中的溃灭而言, 主要表现形式为空泡群的集体溃灭行为. 群体溃灭的累积效应会形成较大面积、较长脉宽的压力脉动 (Prosperetti 1998, Fuster & Colonius 2011). 这种情况下的空泡溃灭往往会直接危及

**图 5**

通气回转体条件下的云状空泡和超空泡 (Cavitation and Bubbly Flows Research Group 2016)

结构整体的完整性, 其特征和机理是高速水动力学相关问题的重要研究对象.

为了对空泡演变和溃灭流场进行调节, 主动流动控制方法在理论和工程应用中均具有非常重要的意义. 其中, 主动通气是一种广泛、有效的水下流动控制手段, 通过在航行体表面设置气孔、开缝等向水中通入气体, 形成气泡、气层、气腔等结构, 可以有效地达到减阻、降载、提高流动稳定性等目的. 由于通气量、航行速度、头型等因素的不同, 流动形态也相应呈现离散气泡、辫状气泡、层状气泡, 以及包含相变效应的云状空泡和空泡群等各种形态, 每种流态的水动压力特征以及对环境条件的敏感性都存在较大差异. 由于影响因素较多, 不同尺度下流态转变的相似参数选取以及相似律也非常复杂.

1.3 主要控制参数

在空泡的形成、发展和溃灭过程中, 除了空化数的影响外, 流体黏性、重力、表面张力、水中含气量等因素的影响也是相关研究的重要内容. 此外, 水下发射中, 航行体的运动、变形往往与空泡的演变相互耦合. 这种耦合是水下发射载荷不稳定性和随机性的一个重要原因.

对于出筒、航行和出水等不同的阶段, 以及空泡演变和溃灭等具体的物理过程而言, 不同参量的影响机制和影响程度会有较大的区别. 我们首先对整个过程所包含的参数进行整理, 确定关键的无量纲参量, 再深入到各个典型问题中, 对不同参数的影响程度作出分析和估计.

水下发射过程中, 由于周围水的质量和热容都很大, 在不存在高温气体的情况下, 我们可以按等温条件考虑, 忽略能量和温度的影响. 以空泡长度 L 作为因变量, 可以

有如下表达式

$$L = f(t; \rho_w, \rho_v, \rho_a, v, \mu, H, p_\infty, p_v, g; D, T_s, N) \quad (2)$$

其中, t 为时间, ρ_w, v, μ 分别为液态水的密度、来流速度和黏度系数, ρ_v 和 ρ_a 分别为水蒸气和不可凝结气体的密度, H 为发射深度, p_∞ 和 p_v 分别为背景压力和饱和蒸气压, g 为重力加速度, D 为航行体的直径, T_s 为表面张力系数, N 为气核的体积密度数. 由于水蒸气和空气的密度相对液态水小 3 个量级甚至更多, 同时压力的作用主要体现在压力差 $p_\infty - p_v$ 方面, 因此可忽略上述 3 个密度和压力项, 上式化成无量纲形式可以得到

$$\frac{L}{D} = f\left(\frac{tv}{D}, \frac{\rho_w v D}{\mu}, \frac{H}{D}, \frac{gH}{v^2}, \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2}\rho_w v^2}, \frac{\rho_w v^2 D}{T_s}, N^{1/3} D\right) \quad (3)$$

上式除了无量纲时间 tv/D 和无量纲深度 H/D 外, 还有 5 个无量纲参数:

(1) 空化数 $\sigma = (p_\infty - p_v) / \left(\frac{1}{2}\rho_w v^2\right)$, 描述背景压力与饱和蒸气压之差与来流动压的关系. 空化数表征流场中发生空化现象的难易程度.

(2) 弗劳德数 $Fr = gH/v^2$, 描述重力的作用, 包括水深对压力的影响, 以及接近自由表面时, 表面波对水动力的影响;

(3) 韦伯数 $We = \rho_w v^2 D / T_s$, 描述表面张力的作用;

(4) 气核数 $\bar{n} = N^{1/3} D$, 描述流场中气核的数量, 与水质等因素相关. 气核数较大时, 流场中易发生空化;

(5) 雷诺数 $Re = \rho_w v D / \mu$, 描述惯性力与黏性力之比.

一般情况下, 上述 5 个无量纲参数决定了空化流场, 保持这 5 个无量纲参数一致就能够保证流场的相似性. 但在实际的工作中, 由于不同缩比实验均采用水作为流场介质, 温度和含盐量的改变对介质性能调节范围很小, 因此在尺度与速度等发生大范围改变时, 无法实现 5 个相似参数的同时满足.

对于空泡稳定性而言, 最重要的物理量是演变的特征时间或者频率, 即斯特劳哈尔数 (Strouhal number, St). 对于水平发射工况, 基于之前对弗劳德数影响的讨论, 重力引起的压力差异与流体动压相比是小量, 同时航行体与自由表面的距离远大于航行体直径, 从而兴波效应也可忽略. 我们进一步合理地忽略气核数、相变率、雷诺数的影响, 可以得到 $St = f(\sigma)$, 即非定常效应仅与空化数相关. 对于垂直发射工况, 最值得关注的是航行体头部触及自由表面时刻空泡的状态, 这是决定之后出水溃灭压力稳定性的关键因素. 对此可以构造新的无量纲数 S_{ul} 描述这一状态. 自变量方面, 由于垂直发射过程中深度引起的压力变化不可忽略, 因此需要考虑弗劳德数 Fr 和无量纲深度 H/D 的影响, $S_{ul} = f(\sigma, Fr, H/D)$.

对于空泡溃灭, 最重要的因变量是压力峰值、脉宽、冲量等. 同时, 我们已经知道溃灭与水体冲击行为相关, 因此参与冲击的混合物声速需要纳入考虑的范畴. 因此对于垂直发射的溃灭过程, 冲击压力的函数形式可以表示为

$$\frac{p_i}{\rho c v} = f\left(\sigma, Fr, \frac{H}{D}, Ma\right) \quad (4)$$

由于溃灭的影响因素众多, 且水下发射每个阶段的演变特征都会对溃灭压力产生显著影响, 因此很难直接给出式 (4) 的具体表达形式. 实际工作中, 只能针对实际的出水条件, 建立概念性的物理模型, 以估计溃灭压力的特征.

对于主动通气流动控制的情况, 需要考虑高速通入的气流与原有空泡壁及回射流等的相互作用. 对于主控参数中通入气体的性质和通气条件的影响, 可通过自然空化流场与主动通气的质量流量比、动量流量比、能量比等参数来研究和评估主动通气的效果 (于嫻嫻等 2015).

综上所述, 高速航行体的水下发射问题, 其研究的内容、方法和相关现象的机制都超出了经典水动力学的范围. 因此, 针对空泡演变、稳定性和溃灭等高速水动力学典型现象, 形成相应的研究方法, 深入分析机理, 获得主要控制因素及其影响规律, 建立相应的动力学模型, 从而提升相关实验和数值模拟分析方法的精度和实用性, 对于支撑水下高速航行体设计、提高水下发射技术水平、推动水动力学基础理论的发展都具有非常重要的意义.

空化及相关问题的研究, 已超过一个世纪, 与一般的流体力学问题类似, 其研究方法主要包括理论、实验和数值计算. 对于空化流动, 学者们针对水翼、空化器、轴对称航行体等典型构型, 在空泡演变特征、稳定性以及影响因素分析等方面都开展了大量的研究工作. 对于空泡溃灭, 研究工作从单个气泡的溃灭理论出发, 扩展到多个气泡、气泡群以及与壁面、自由面等边界的相互作用. 进一步, 关于空化流动调节、空化抑制, 乃至与水下发射相关的流固耦合方法等问题的研究成果也均有报道.

2 空化流动研究方法现状

空泡流理论的研究始于 19 世纪下半叶. 早期重要的研究成果主要是基于复变函数保角映射的自由流线理论, 及后期发展的各种修正模型, 如映射模型、开放尾流模型、回射流模型等等 (Wu 1972, Brennen 1995). 这些工作理论上严密完整, 但具有较强的假设和限制条件, 且主要针对简单二维定常流动或是单个空泡, 其结果很难推广到实际工程中的三维和非定常情况.

由于上述限制, 实验研究成为研究空泡演变的重要手段. 实验研究最早始于 20 世纪 40 年代 Knapp 等的观测 (Knapp & Hollander 1948, Knapp et al. 1970). 此后, 空化流动相关实验在水洞、水池等装置中大量开展. 此外, 也有一些基于压缩空气 (周

浩磊 2012)、动量传递 (Wei et al. 2011) 等技术研制的发射装置, 能够开展有特色的高速空化流动实验. 测试技术是空化流动实验的难题和关键, 相比较而言, 压力测试方法比较常规, 主要采用表面压力传感器、探针等技术, 不断提升其空间和时间分辨率. 例如 Le 等 (1993) 测量了脱落空泡的溃灭压力. 在流场显示方面, 由于空泡壁周围介质密度的间断与不均匀性等, 测试技术逐步由激光多普勒测速 (laser Doppler velocimetry, LDV)、粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 走向了 X 射线、磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 等, 以推动对空化现象的深入认识. 目前空化流动的精细测量和流场显示仍是最具挑战性的问题.

密度测量方面, 气液两相体积分数的分布和变化是发展物理模型预测多相流时空变化的基础. 然而, 这一测量具有很大的挑战, 因为空泡区域内部通常不透明, 而普通的插入式传感器会对高速流场产生干扰, 因此需要发展更有效的非接触式测量方法. 电阻层析成像测量技术发展得非常成功 (Welle 1985, Ceccio & George 1996, Holder 2005, Elbing et al. 2008). 通过阻抗成像系统能够获得相场的时间分布, 但空间分辨率较为有限, 并且测量位置通常局限于边界附近. 此外, 该技术的重构方法依赖于流场的拓扑结构, 通常需要使用者对流场形态已有一定的前期认识.

相反地, 辐射密度计和层析成像技术中, 射线路径并不依赖相分布, 因而对流场形态的适应性更好. 伽马射线和 X 射线光源都可以被用于多相流场检测. X 射线成像技术在空化流场中也得到了许多的应用 (Stutz & Legoupil 2003, Coutier-Delgosha et al. 2007, Aeschlimann et al. 2011). 相关工作在 Heindel (2011) 关于 X 光技术在多相流中应用的综述中得到了全面的介绍.

Makiharju 等 (2013) 针对高雷诺数空化流场的瞬态密度测量, 发展了一种采样频率在 1 kHz 以上的 X 射线速度测量装置, 得到了楔形体片状空泡内水蒸气体积分数的时空变化, 获得了密度间断面沿空泡内部向前缘传播的过程 (如 **图 6**), 证实了激波导致空泡断裂脱落的物理机制 (Ganesh 2015). 该方法已经进一步用于精细数值模拟结果的验证 (Gnanask & Mahesh 2015).

速度测量方面, Stutz 和 Reboud (1997, 2000, 2003) 开展了一系列 Venturi 管的空化实验, 利用双光学探头测量了空泡结构内的水蒸气体积分数和贴壁水流的速度, 从而确认了回射流动的存在, 并采用 X 射线装置开展了对比性实验. 美国 John Hopkins 大学的 Katz 教授研究组 (Gopalan & Katz 2000) 和明尼苏达大学的 Arndt 教授研究组 (Wosnik et al. 2005) 等用 PIV 方法开展了片状空泡尾流的速度测量. 黄彪等 (2011) 利用高速全流场显示技术和动态应变式测力系统研究了绕平头回转体的非定常空化流动及其动力特性, 捕捉到了空泡团断裂和脱落现象的过程和特征频率等. Dular 等 (2004, 2005) 将 PIV 技术与激光诱导荧光方法相结合, 利用双高速摄像设备实现对流场结构和测速粒子的同时观测, 揭示水翼空泡周围及部分内部流场的特征与运动规

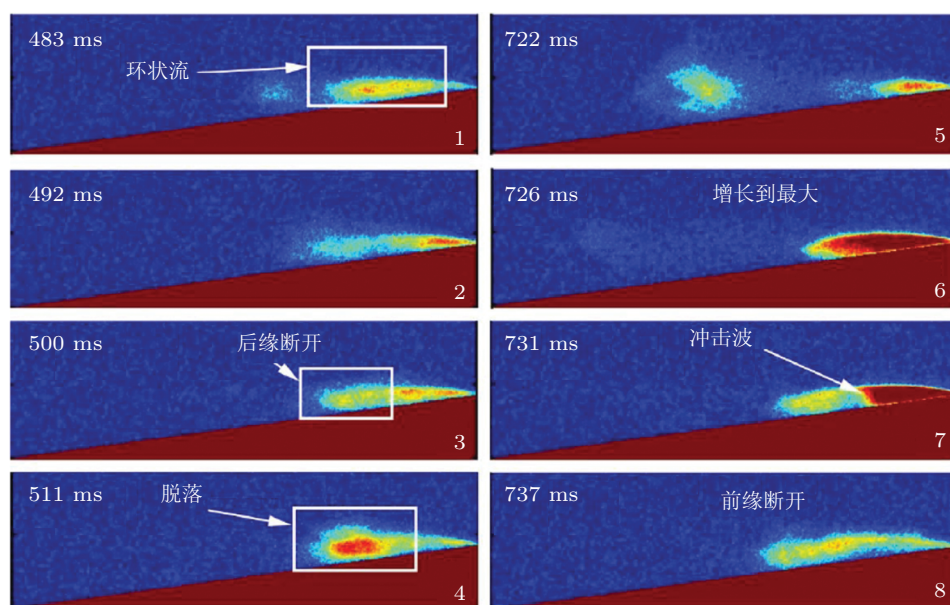


图 6

楔形体空化流场密度测量结果 (Ganesh 2015)

律, 并与数值模拟结果进行了对比. 然而, 当气体体积分数大于 20% 时, 空化区通常会变得不透明, 给空化核心区域的速度测量带来困难.

Khelifa 和 Coutier-Delgosha (2013) 发展了一种基于超高速 X 射线成像的原创技术. 方法拓展了前述高频射线测量局部蒸气体积分数的方法, 进一步引入了对射线不透明的粒子进行液相示踪, 因此可以通过 PIV 分析来获得两相的速度场, 液相速度采用粒子相关性计算而气相速度用气泡运动相关性计算. 该方法同时获得了文丘里管空化流场两相各自的速度场 (如 图 7), 发现两相间存在明显的速度滑移特征, 能够为未来更精细的流场特征研究奠定基础.

综上所述, 由于水气 (汽) 自由表面的干扰和反光等问题, 传统的实验观测仍局限于对空泡外围及尾流的观测. 最近, 高时间分辨率 X 光密度测量以及 X 光诱导的粒子相关测速已揭开了空泡内部流场结构测量的序幕, 会成为空化流动实验研究最主要的发展方向.

数值模拟方法能够获得更详细的空化流场结构信息, 一直是机理研究的主要手段之一. 近年来, 随着计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 技术的进步, 人们通过求解 Navier-Stokes (N-S) 方程来模拟高速水动力学涉及的空化流场, 构造了多种描述多相流动及空化相变的方法. 目前主要可以分为两类: 第一类方法将流场介质考虑为多相流场, 通常不考虑各相的可压缩性, 建立关于多相混合物的动量方程, 利用各

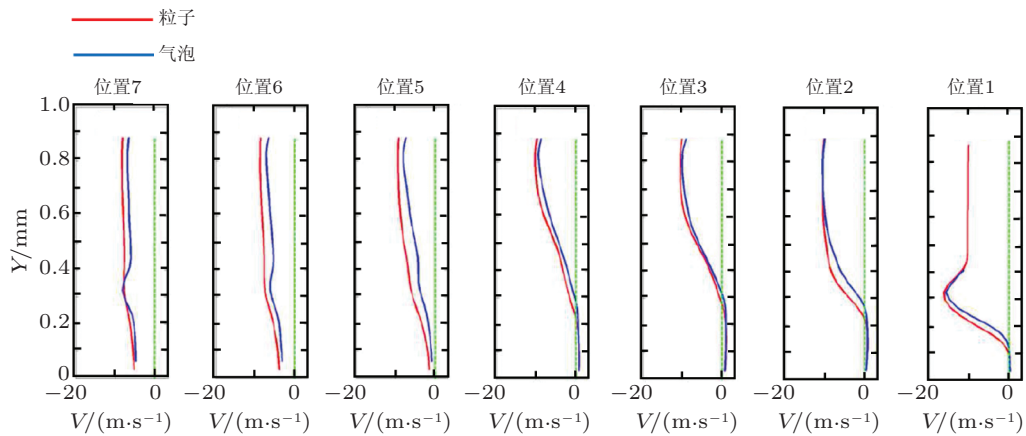


图 7

基于 X 射线 PIV 测量设备获得的文丘里管空化流场水-气两相速度 (Khelifa & Coutier-Delgosha 2013)

相的质量或体积分数来描述混合物的密度, 同时构造关于各组分的连续性方程, 并引入专门的空化模型来描述相变规律. Merkle 等 (2001) 和 Kunz 等 (2000) 基于这个概念提出了一系列的空化模型, 其中 Singhal 等 (2002) 提出了基于 Rayleigh-Plesset 方程的“完全空化模型”, 并对水翼、水下回转体等的稳态空化现象进行了模拟, 计算结果与相关的实验符合良好, 因而被众多计算程序所采用. 第二类方法假定流场中仅存在单一种类流体, 根据水、水蒸气及混合物的压力与密度关系构造出该单一流体的物性曲线, 进而求解关于该流体的 Navier-Stokes 方程 (Coutier-Delgosha et al. 2007). 此外, 也有一些方法结合了上述不同方法的特点, 例如第一类多相方法中为每种流体组分建立单独的守恒方程, 并构造描述其相互作用的源项加入到方程中 (Toumi et al. 1999); 或是在第二类可压缩流场中引入空化相变模型来计算各相的体积分数 (Gnanask & Mahesh 2016), 代替通常的压力-密度代数关系.

与空化模型中的介质属性相协调, 流场求解器的选择通常也包含基于密度和基于压力两种: 基于压力求解器 (Senocak & Shyy 2004) 通常易于实现, 并在相间界面追踪等方面具有较好的精度, 得到了更广泛的应用. 由于第二类方法中水-气(汽)掺混介质的声速很低, 需要采用基于密度的求解器 (Le et al. 1993, Coutier-Delgosha et al. 2003), 并得到压力波在介质内的传播过程. 当需要考虑水/气及混合物介质可压缩性, 求解空泡溃灭压力波及激波诱导空泡脱落等问题时, 基于密度求解器方法具有较大的优势, 是未来重要的发展方向.

空泡的行为, 特别是云状空泡在不稳定条件下的行为, 往往与旋涡的运动紧密联系在一起, 因此建立合适的湍流模拟也是空化流动数值计算中的要点. 长期以来, 对

于空化流动的数值模拟, 特别是与工程应用相关的问题, 一般采用基于雷诺时均纳维-斯托克斯方程 (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, RANS) 结合湍流模型的方式 (Wilcox 1998). 其中, 修正湍流黏性系数的重正化群 (RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型 (Coutier-Delgosha et al. 2003a, 2003b; Coutier-Delgosha et al. 2007a, 2007b; Zhou & Wang 2008)、基于滤波的 $k-\varepsilon$ 模型 (filter-based $k-\varepsilon$ model, FBM) (Wu et al. 2005), 部分平均的 N-S 方程 (partially averaged Navier-Stokes, PANS) 方法 (Huang & Wang 2011, Ji et al. 2012, Hu et al. 2014, Huang et al. 2014, Ji et al. 2014) 等, 在水翼、回转体等结构的非定常空化流动模拟中得到了广泛的应用.

近年来, 大涡模拟方法 (large eddy simulation, LES) 作为一种更精细的手段, 也逐渐应用于空泡流动模拟当中. 它能更好地模拟非定常的大尺度涡结构运动, 理论上讲它对湍流与小尺度空泡云结构的瞬态特征预测得更加精确. 如 Bensow 等 (Bensow & Bark 2010) 采用不可压缩的隐式大涡模拟方法对半球头型的细长体、机翼和螺旋桨等进行了计算分析, 验证了该方法的有效性, 同时指出空化流动的大涡模拟仍然需要进一步的发展和探索. Wang 和 Ostoja-Starzewski (2007) 针对常见的 NACA0015 翼型空化绕流开展了大涡模拟, 相比于以往的均匀化方法, 得到了更多的流场细节, 并捕捉到了云状空泡溃灭及相关的不稳定性特征. 许多数值模拟工作都获得了可信的精细结果 (Wang & Ostoja-Starzewski 2007; Dittakavi et al. 2010; Ji et al. 2013, 2015; Roohi et al. 2013; Huang et al. 2014; Yu et al. 2014; Wu et al. 2015). Wang 等 (Yu et al. 2013, Wang et al. 2016) 针对回转体云状空泡流动, 对比了二维轴对称修正 RNG $k-\varepsilon$ 模型和三维 LES 的模拟结果, 发现采用湍流黏度修正后的 RANS 方法能够较好地模拟片状空泡部分的发展, 满足工程中对空泡形态的模拟需要; 而精细的 LES 方法能够更好地捕捉空泡云脱落及内部溃灭的特征 (如 图 8).

然而整体来看, 面对空化与湍流相互作用这一世纪难题, 数值模拟方法仍然面临许多困难与挑战. 对于各类空化和湍流模型, 人们对于模型的重要性、敏感性以及如何选择仍远未形成共识, 许多尚未解决的问题也逐渐浮出水面. 例如, 当前的模拟手段主要借鉴单一介质湍流理论, 可能无法精确预测空化区域内部流动结构; 空化的质量传输过程发生在复杂湍流流动中, 而现有的空化模型大多数基于单泡动力学或是平衡态模型, 并未考虑湍流传输过程的影响; 另一方面关于大量小尺度气泡构成的气泡群运动对宏观流场及湍流脉动的影响, 其涉及到的多尺度模拟方法仍未构建.

鉴于此, 一些新的思路也逐渐被发展起来, 例如 Žnidarčič 等 (2015) 将快速直接数值模拟 (direct numerical simulation, DNS) 方法用于非定常空化流动, 力求从更基础的视角来对空泡质量输运进行求解, 对空化模型进行改进.

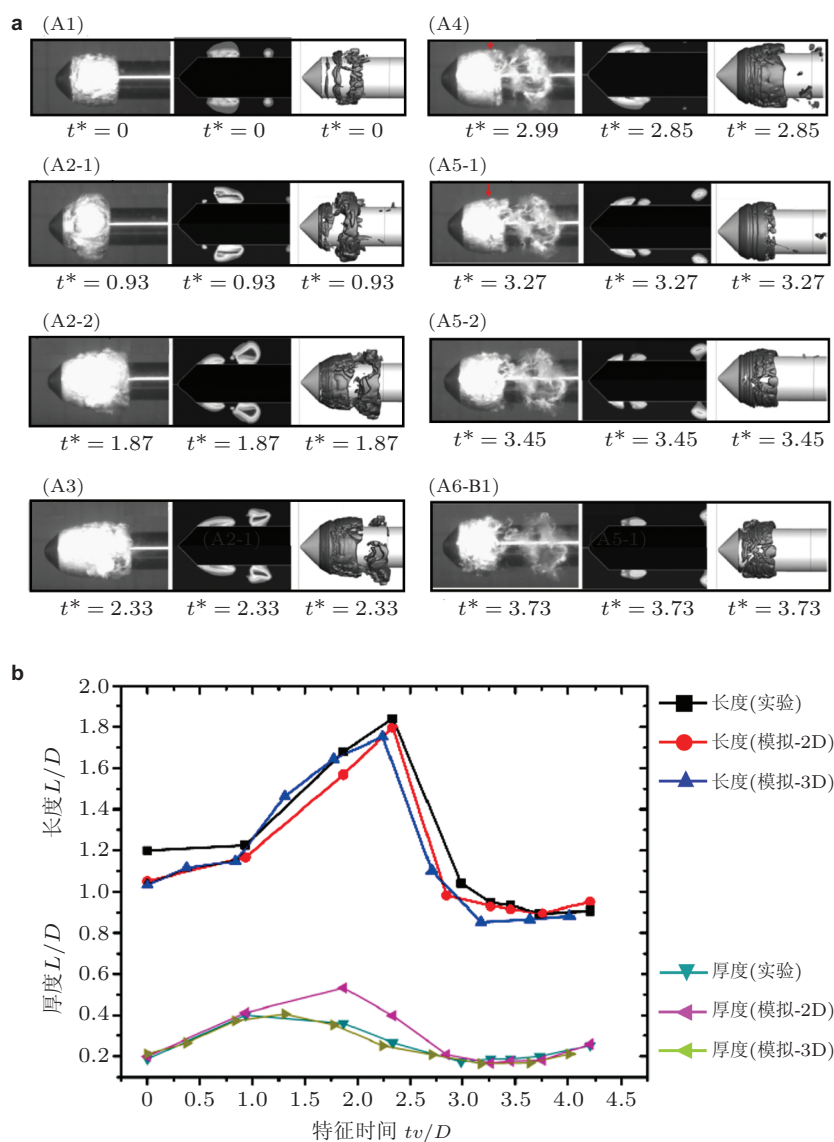


图 8

回转航行体云状空泡不同类型数值模拟结果与实验对比. (a) 流场图, (b) 实验结果、轴对称 RANS 结果、三维 LES 结果 (右侧为长度和厚度在一周期内的对比结果) (Wang et al. 2016)

3 空泡发展与空泡稳定性研究

水下发射过程中, 载荷的变化与空泡演变和稳定性紧密联系. 特别当空泡发生断裂脱落等不稳定现象时, 可能导致载荷变化范围增大、随机性增强, 对于发射安全性

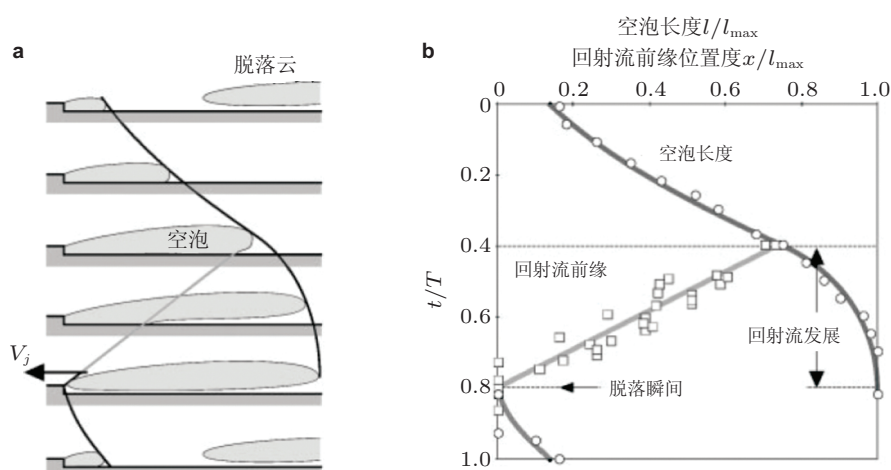


图 9

典型后台阶流动回射流切断空泡过程. (a) 左侧为流场结构示意图, (b) 空泡长度与回射流前缘位置对比 (Callenaere et al. 2001)

非常不利. 在基础研究领域, 空泡脱落及片状-云状空泡状态转变等问题也一直是机理研究工作的难点和关键.

基于上述计算与实验方法, 许多学者研究了非定常空泡的演化问题, 特别是在水翼和螺旋桨空化流动方面取得了非常好的成果. 典型的如 Coutier-Delgosha 和 Reboud 等 (Lohrberg et al. 2002; Coutier-Delgosha et al. 2003a, 2003b, 2005, 2007a, 2007b; Fortes-Patella et al. 2007; Duplaa et al. 2010) 基于前述的 PIV, X 射线等实验手段结合单一流体数值模拟方法, 研究了水翼和 venturi 管的片状/云状空泡的非定常空化流动特征, 发表了系列论文, 获得了空泡形态、泡内气体含量等关键参数在不同条件下的演变特征. Zhou 和 Wang (2008) 应用前述空化计算方法结合修正的 RNG $k-\epsilon$ 湍流模式研究了水翼绕流的空泡脱落特征, 取得了与实验一致的结论. Callenaere 等 (2001) 研究了绕水翼及后台阶流动空泡稳定性与回射流运动的关系 (如 图 9), 并根据攻角、空化数等参数对不同情况下的特征进行了归类. Ji 和 Luo 等 (Ji et al. 2012, Luo et al. 2012) 对非定常螺旋桨和扭曲水翼空化进行了数值模拟, 获得了空泡的演变过程以及压力的脉动特征. 类似的工作还有很多 (Cervone et al. 2006, Pouffary et al. 2008). 大多数工作认为, 对于水翼和螺旋桨类结构, 涡结构变化与空泡非定常演变过程存在密切的联系, 大尺度涡的脱落夹带大量小气泡的运动行为是空泡脱落的主要原因. 而回射流动往往是空泡及旋涡脱落的最重要的诱导因素.

相对而言, 针对轴对称航行体的非定常空化流动特征和机制的研究工作较为少见. Kunz 等 (1999) 基于多相 CFD 方法研究了轴对称航行体稳定自然空化和通气空

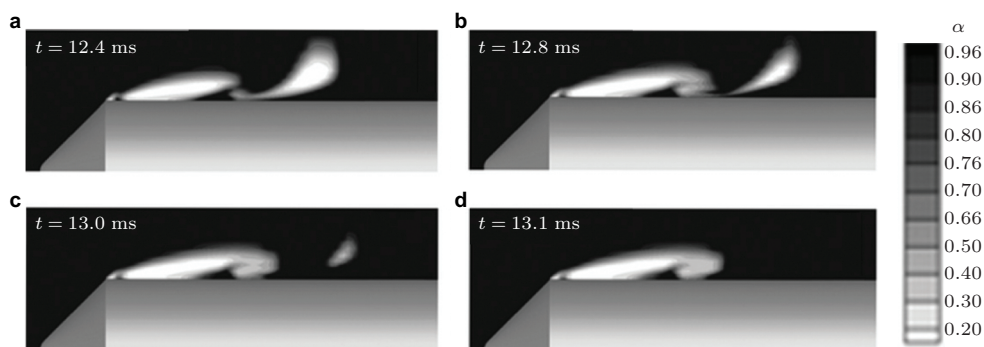


图 10

基于 LES 的回转体云状空泡脱落后形态发展结果 (Yu et al. 2014)

化的特征, 得到了液相体积分数、表面压力等结果并与实验吻合良好. Owis 和 Nayfeh (2004) 研究了轴对称航行体非定常空泡的演变, 并对比了不同头型下空泡特征的差异. 傅慧萍和鲁传敬 (2005) 利用 Fluent 软件对不同头型的回转体空泡几何特性进行了研究, 也对非零攻角绕流下的局部空泡和超空泡特征进行了数值模拟, 给出了局部空泡的几何形状与阻力特性. 胡常莉等 (2015) 采用实验的方法研究了绕不同头型回转体空化流动的特性, 发展了一种基于混合密度分域的修正 PANS 湍流模型, 综合实验和数值的方法研究了绕不同头型回转体空化三维流动结构及旋涡运动特性. 于姗姗等 (2014) 基于开源程序 OpenFOAM 研究了锥头回转航行体云状空泡的脱落和溃灭过程, 获得了与实验结果吻合的数值模拟结果, 给出了回射流运动、空泡脱落形态、脱落空泡溃灭规律等关键特征和物理机制 (如 图 10). 王一伟等 (2013) 鉴于空泡末端逆压梯度是回射流运动的驱动力, 通过对空泡末端贴壁处的局部切片流体微团的分析, 得到了回射流速度和位置随逆压梯度变化的定量规律, 预测了回射流速度和空泡长度.

除了回射流及旋涡诱导空泡不稳定之外, 压力波诱导空泡脱落也是一个被持续关注的问题. Arndt 等 (2001, 2005) 最早发现水翼空泡脱落存在两种不同的斯特劳哈尔数, 猜测长空泡的脱落源于压力波在泡内的传播. 随后在 Coutier-Delgosha 等 (Leroux et al. 2005, Coutier-Delgosha et al. 2007)、Schnerr (2008) 的实验和计算中也都发现了类似的现象. 这一问题最近由 Ceccio 研究组 (Ganesh 2015) 通过高频密度测量手段确认. 该现象可能广泛存在于包括水下发射在内的各类空泡流动现象当中, 然而由于该研究需要更复杂的实验和计算手段, 相关机理分析仍刚刚起步, 不同结构、条件下的压力波产生机制值得未来深入研究.

水下发射过程往往受水深变化、加减速甚至发射气体等因素的影响, 空泡的演变过程更加复杂, 空泡稳定性分析更困难. 邢彦江等 (2012) 研究了加速条件对于自然超

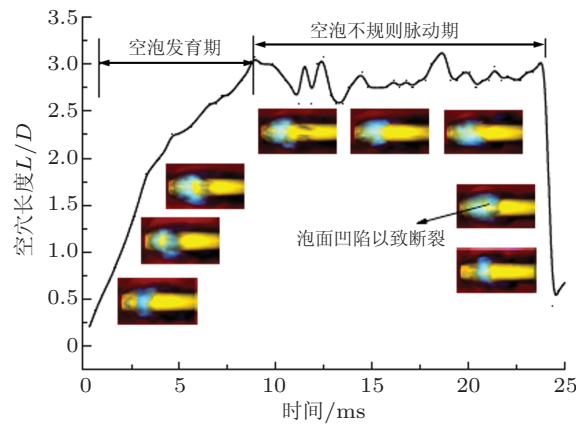


图 11

绕平头回转体空泡脉动的典型阶段 (黄彪等 2012)

空化及通气超空泡形态的影响特征, 尤其是加速引起的通气超空泡连续脉动现象. 王柏秋等 (2012) 利用数值模拟方法, 对空化模型中的相变系数进行了研究, 通过半球头圆柱体的二维轴对称模型对比了不同系数对不同位置空泡的影响. 黄彪等 (2012) 采用实验的方法研究了绕轴对称体的非定常空化流动, 从时域与频域两个角度分析空泡形态和阻力信号, 分析了空泡的非稳定演变过程, 发现空化流场形态与动力特征频率存在高度的相关性, 且不同头型轴对称体的脉动特性存在明显的差异 (如 图 11). Wang 等 (2016) 针对典型半球头水下垂直发射过程, 发现了空泡末端推进溃灭现象, 结合数值模拟结果给出了减速导致的内部推进溃灭机理 (如 图 12).

针对垂直发射过程, 程少华等 (2015) 基于空泡独立膨胀原理, 考虑横流对独立空泡发展的影响, 建立了小攻角下水下航行体空泡形态的理论计算模型, 对典型工况开展计算, 获得了航行体迎背流面空泡长度、空泡压力的变化过程, 并与试验数据进行对比, 验证模型的合理性. 陈玮琪等 (2012) 基于势流理论研究了重力场中非定常垂直空泡闭合区域中最大压力的存在位置, 推导了最大压力的理论公式, 揭示了最大压力与空泡发展速度之间的关系, 并通过试验进行了验证, 并进一步分析了空化器垂直空泡长度的变化规律, 得到了有限水深出水空泡长度变化公式. 姚琰等 (2009) 对单筒和同心筒发射中高速气体射流及气泡演变过程进行了实验研究, 给出了航行体壁表面压力的动态变化规律. 张素宾等 (2012) 通过 RANS 方法数值模拟了重力影响下高速航行体垂直发射水下运动过程, 揭示了通气空泡的演变规律及流动载荷变化特征. 王一伟等 (2015) 通过对垂直发射过程空泡脱落的影响机制分析, 提出回射流运动时间和航行体运动时间的比值大小能够作为空泡脱落和空泡状态的判据 (如 图 13), 对不同深度发射工况流场与空泡演变过程开展了系统数值模拟并与典型试验结果对比 (如 图

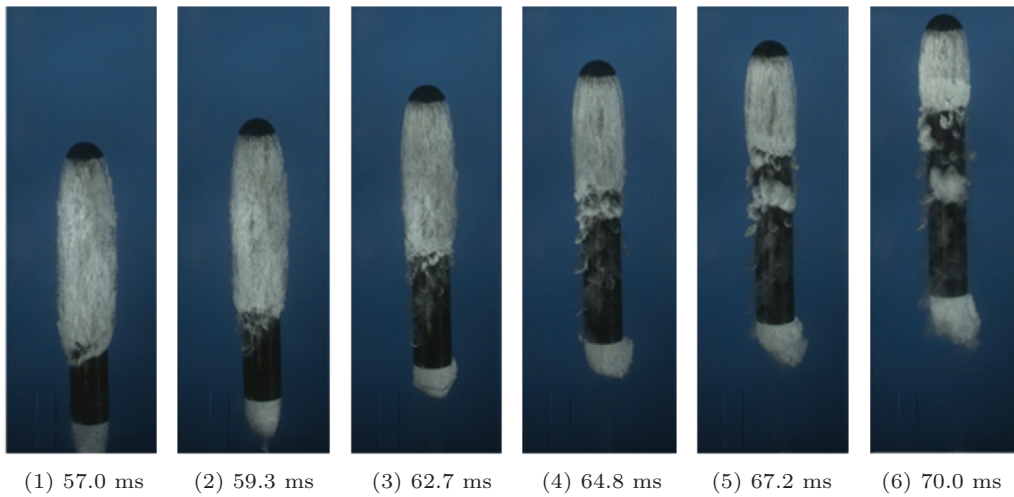


图 12

减速导致的空泡末端推进溃灭实验照片 (Wang et al. 2016)

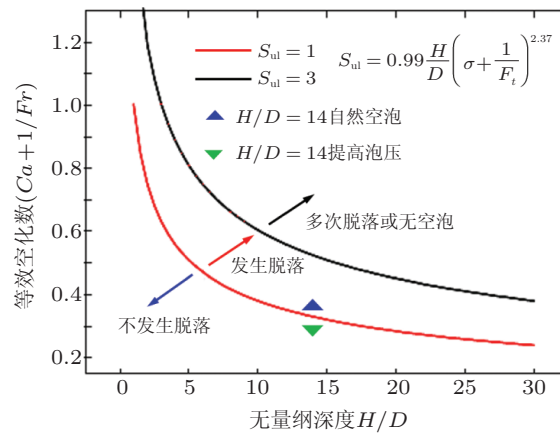


图 13

水下发射空泡脱落准则与应用 (王一伟等 2015)

14), 给出了该判据在典型发射工况下的量化表达式并验证了其正确性.

总体说来, 由于工程问题的复杂性, 大多数工作仍集中于对空泡形态演变分析和预测, 对于稳定性机制的研究仍不深入, 很少涉及压力波导致的空泡失稳机制. 未来需要开展更深入的研究工作, 对主控参数进行系统的归纳、分析, 并建立更完善的相似律.

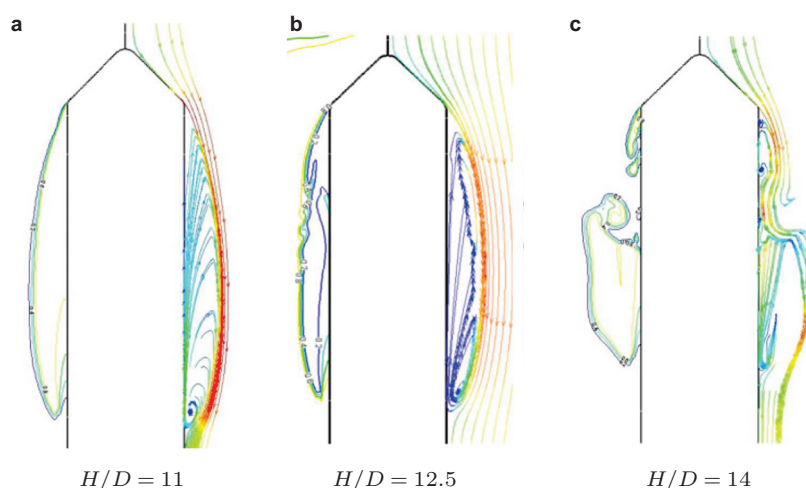


图 14

发射深度对空泡脱落影响 (随着无量纲深度的增大, 出水前空泡由稳定趋向于不稳定) (王一伟等 2015)

4 空泡溃灭及空泡与自由面相互作用研究

在水下发射的出水阶段, 空泡与自由表面相互作用是最重要的物理过程, 大尺度空泡群的溃灭能够在航行体壁面形成大范围的冲击压力, 是航行体最重要的载荷来源之一。

文献中对于空泡溃灭的研究大多针对单个空泡. 最早可以追溯到 20 世纪初 (Besant & Ramsey 1913). 在理论方面, Rayleigh 最早建立了球形气泡模型以描述单个气泡在无黏流动中的生长、收缩和溃灭过程. Plesset 进一步考虑了黏性力和表面张力的影响, 提出了气泡动力学控制方程 Rayleigh-Plesset 方程 (Plesset & Chapman 1971, Plesset & Prosperetti 1977), 而后 Brennen (1995) 对上述的球形空泡溃灭理论进行了总结和完善, 并细化了溃灭的特征, 给出了单个空泡溃灭时间的理论解. 上述结果至今仍作为重要的理论依据得到了广泛的应用 (Seo et al. 2010, 张凌新等 2012, 杜特专等 2015). 随着实验和计算方法的进步, 人们逐渐发现单个空泡溃灭时会发生射流和激波等复杂现象 (Blake & Gibson 1987), 并强烈依赖于边界条件。

此后, 边界积分方法成为气泡溃灭研究中最常用的数值模拟方法 (Tong 1997, 张阿漫和姚熊亮 2008). 而在实验研究方面, 单个气泡的溃灭特征乃至气泡与壁面、多个气泡间相互作用等问题都获得了丰富的结果 (Wang et al. 1996, Pelekasis et al. 2004, Bremond et al. 2006, Quinto-Su & Ohl 2009, Zhang et al. 2009, Lauer et al. 2012).

关于航行体穿越自由表面的流场行为, 胡影影等 (2002) 利用 VOF 方法模拟了细

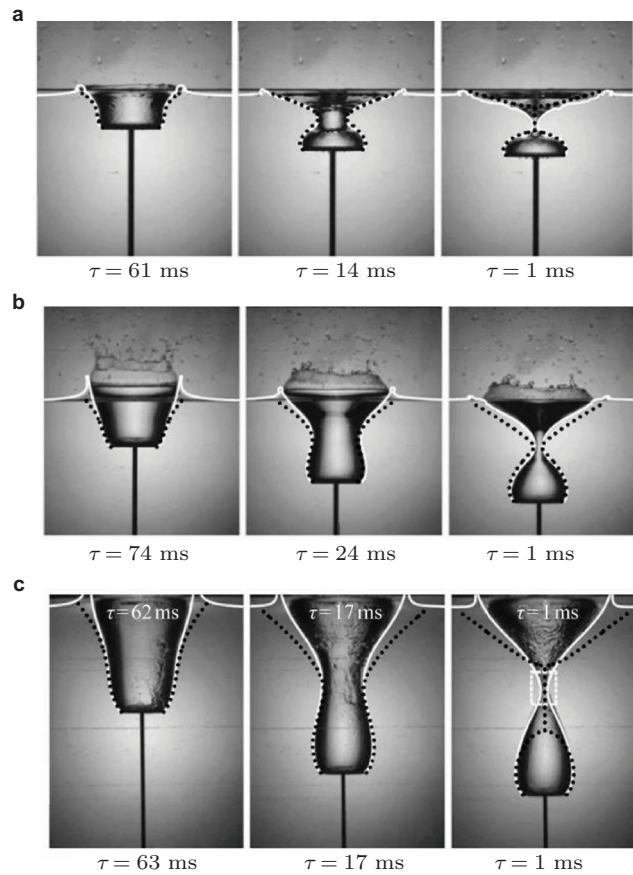
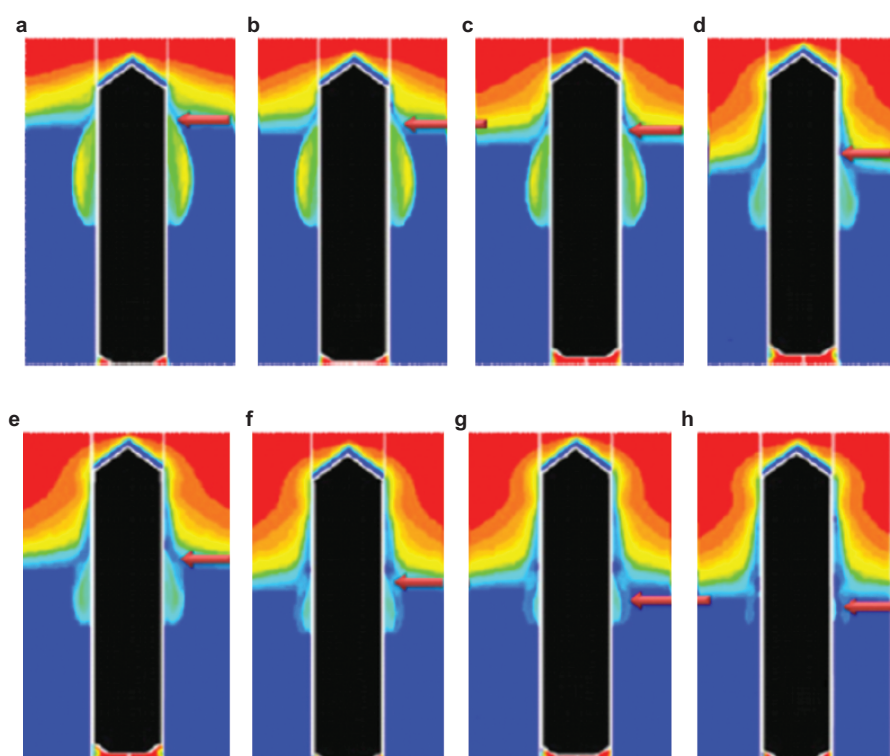


图 15

空化器入水空泡外形计算结果 (黑点虚线) 与实验照片对比 (陈玮琪等 2013)

长圆柱体低速出水时自由液面的变化, 研究了韦伯数、弗劳德数等无量纲参数对液面演变的影响; 陈玮琪等 (2013) 建立了描述出入水垂直空泡关键特征的简化数学模型 (如 图 15), 借助数学模型研究了出入水空泡的各种特性及物理现象的机理. 张马骏等 (2014) 耦合 VOF 多相流模型和自然空化模型, 用数值方法模拟了不同加速度下锥头航行体垂直出水过程, 给出了空泡外形及压力分布的变化规律. 孔德才等 (2015) 采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型结合 Singhal 空化模型模拟了空泡界面对头锥面附近流场压力的影响, 并与试验结果进行了对比验证. Wang 等 (2015) 开展了回转体平行自由面运动云状空泡发展的实验与数值模拟, 研究了近自由表面云状空泡的流场结构.

在自由界面的影响下, 空泡周围压力场升高导致凝结和溃灭, 空泡与航行体壁面、自由表面存在强烈的相互作用. 由于空泡是由数量巨大的小空泡构成第, 经典单空泡的研究成果难以直接应用, 只能采用其他实验或数值模拟等手段进行研究. 关

**图 16**

典型锥头回转体出水溃灭过程空泡形态演变 (颜色代表不可凝结气体体积分, 红、黄、绿、蓝逐渐减小) (王一伟等 2012)

于空泡云的溃灭问题, 针对水翼脱落空泡的研究已取得一定数量的结果 (Reisman et al. 1998, Konno et al. 2002, Saito et al. 2007). 而对于细长航行体, 特别是出水的溃灭问题, 报道的研究成果非常有限. Sato 等 (Saito & Sato 2003) 利用实验观察了圆柱脱落空泡发生溃灭的过程以及对结构的冲击; 权晓波等 (2008) 将航行体出水过程肩空泡溃灭简化为各截面上二维圆型空泡的溃灭过程, 分析了空泡溃灭产生压力的机理和影响因素. 施红辉等 (2014) 基于高速摄像手段观测了完全超空泡出水过程, 建立了超空泡在运动过程中崩溃次数的理论模型, 结合数值模拟方法对不同头型和长径比的航行体在出水过程中超空泡的形成、溃灭及其与水平面相互作用的水动力学机理进行了研究. 贾会霞等 (2015) 测量分析了各种不同头型航行体诱导的空泡尺寸、轮廓和生成溃灭形态的变化规律, 对已有的理论公式和半经验公式进行了比较和修正. 王一伟等 (2011, 2012, 2015) 开展了对航行体出水稳定空泡溃灭过程的研究, 揭示了出水溃灭过程空泡形态及压力演变规律 (如图 16), 建立了空泡溃灭压力的物理模型, 给出了相关参数的影响规律.

5 空化流动调节与控制方法研究

流动控制是流体力学研究中的重点和热点. 对不稳定空化流动的控制主要可以分为两大类.

一类是被动控制, 主要是通过改变外形或增加附件来改变或干扰流场, 这类方法往往用于特定的工作环境和流动条件. 较早的工作中, 常用的控制方法是通过推迟流动的分离来推迟空化的初生. 例如利用扰流丝 (Arakeri & Acosta 1976, Holl & Carroll 1981)、扰流片或者粗糙带 (戴月进等 2012) 使物体的绕流流动提前发生湍流转捩, 推迟流动分离. 随着对空化流动特征认识的深入, 出现了专门针对空化流动不稳定性机制而采用的流动控制方法 (Amromin et al. 2006), 例如通过在水翼表面设置凹槽 (Tanimura et al. 1995) 或挡流条等 (Kawanami et al. 1997, 顾巍和何友声 2001, Zhao et al. 2010) 来阻止回射流的发展, 能够在一定程度上控制空泡云的脱落和空化流动中的激振现象.

另一类则是以主动通气为代表的主动流动控制方法. 主要原理是通过在流场中引入主动气体射流等因素, 使其与泡壁或是回射流等相互作用, 达到调节、改善流场的效果. 对于不同的来流条件和通气参数, 主动通气形成的流场特征主要包括边界层气泡, 边界层气层、通气局部空泡、通气超空泡等. 前两种主要反映通入气体与外流场的相互作用, 主要关注边界层内部的物性与流动分布; 后两种表现为通气气泡与相变产生的空泡的结合, 其范围一般超过了边界层的区域, 空泡内部的回射流 - 通气之间的相互作用为关键影响因素, 主要关注与空泡稳定性相关的断裂、脱落、内部溃灭等现象.

边界层气泡与气层流动特征主要出现于流线型结构的绕流流动中, 在自然状态结构表面压力变化比较平缓, 因此不容易生成显著的自然空泡, 通入气体主要位于边界层内部, 与外流液态水相互作用, 达到减阻、均匀压力、降低载荷等目的, 此类研究中往往针对平板结构展开. 针对平板流动气泡流态, Bogdevich 等 (1976) 较早发现在充气孔下游很近的位置流动控制效果最佳, 减阻达到最大值, 再远处表面摩擦恢复正常. Merkle 和 Deutsch (1992) 总结了这一问题中主要的影响参数: 充气孔下游距离, 气体流量, 来流速度, 平板方向 (浮力), 通气孔几何形状、壁面粗糙度等. 王家楣等 (2004) 研究了平板船模底部通气流动控制的效果, 对比了不同通气形式、位置、通气量、来流速度等因素的影响. Madavan 等 (1984, 1985) 测量了实验室尺寸的平板湍流边界层气泡流动控制, 结果表明气泡尺寸分布取决于自由来流速度和通气量, 而气层在平板下方时效果好于上方. 但对于细观因素和流态的影响机理问题, 至今仍未有明确结论. 以气泡尺寸影响为例, Kawamura 等 (2003) 发现喷出的气泡直径较小时能够显著提高减阻效率, 相较, Fontaine 和 Deutsch (1992) 的结果表明气体的性质包括密度和溶解度

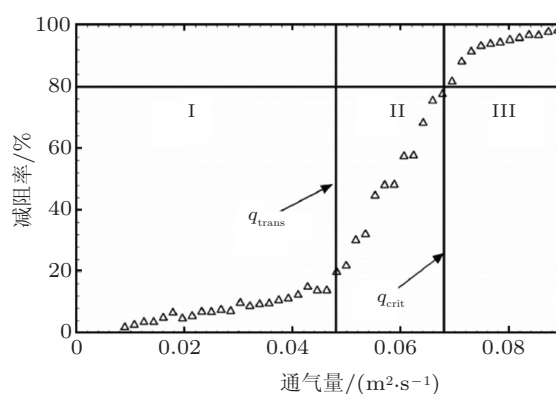


图 17

平板通气减阻流动中减阻百分比随通气量变化曲线 (由左至右逐渐从气泡减阻流态 BDR 过渡到气层减阻流态 ALDR) (Elbing et al. 2013)

等对减阻和流动控制的影响不大, Shen 等 (2006) 也报道气泡尺寸在不同水质中影响较小, 甚至当气泡大小接近于黏性长度时也没有对减阻效果产生大的影响。

近年来, 美国密歇根大学 Ceccio、Elbing 等组成的研究团队 (Winkel et al. 2004; Sanders et al. 2006; Shen et al. 2006; Elbing et al. 2008, 2013; Ceccio 2010) 在美国海军 William B. Morgan 大型空化水洞 (large cavitation channel, LCC) 针对平板模型开展了一系列气泡、气层的减阻降载研究, 他们关注于气泡与气层的减阻效果差别, 涉及到了气泡与气层的流态转变问题. Sanders 等 (2006) 指出在高雷诺数气泡流态条件下, 通气孔局部能够得到高减阻率, 但仅能保持在 $1 \sim 2\text{m}$ 范围内. 而在小来流速度/通气大流量条件下, 能够形成完整的气层流态, 减阻率达到 80%, 效果显著提升. Elbing 等 (2008) 进一步确认了由气泡向气层形式转变现象, 结果表明转变过程能够使减阻效果从 20% 迅速提升至 80%, 并给出了典型条件下的转变临界流量, 同时也指出气泡流动相似律仅在喷气初始区域有效, 而气层流动对来流条件也非常敏感. Ceccio (2010) 综述了采用气泡与气层注入方法进行流动控制的研究成果, 特别指出对气泡融合形成气层的转变过程的物理机制与相似律的研究, 是该方向未来工作的重点. Elbing 等 (2013) 进一步研究证实了平板开缝充气条件下, 气泡减阻流态 (bubble drag reduction, BDR) 向气层减阻流态 (air layer drag reduction, ALDR) 的转变实际是一种气层的间歇形成和破碎过程, 而减阻效率取决于气层形成的比例 (如 图 17 和 图 18). 这一系列结果能够为相关研究提供很好的参考, 也指出了流态转变过程是机理与效果分析的关键问题与难点. 另一方面, 对于大多数实验装置尺寸, 实验结果都存在一定尺度效应, 难以达到自模拟的大尺度区间, 因而需要特别重视对相似律和尺度效应的分析。

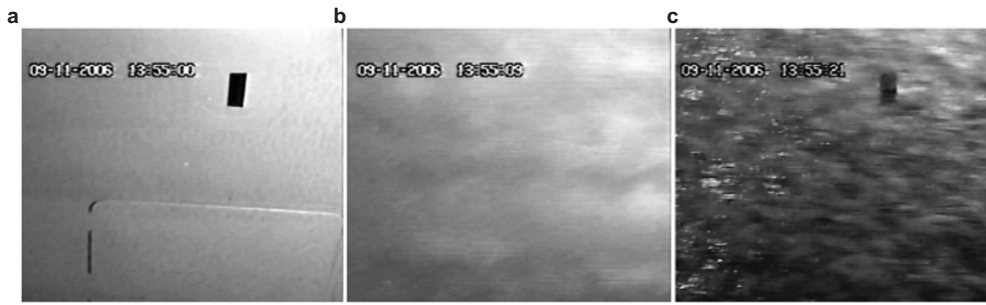


图 18

平板通气减阻流动中不同流态条件下壁面附近流动显示图片. (a) 无通气, (b) 气泡减阻流态 BDR, (c) 气层减阻流态 ALDR (Elbing et al. 2013)

对于轴对称等实际航行体结构, 由于其外表面压力存在非均匀的分布, 其气泡流动特性更为复杂. Clark 和 Deutsch (1991) 研究了回转体在外加压力梯度下的气泡流动减阻, 结果表明, 平缓的顺压梯度会降低气泡流动减阻的效率, 而逆压梯度中充气更能引起分离和更高水平的减阻. 于嫻嫻等 (2012, 2015) 开展了高速水下回转体边界层通气流动控制研究工作, 获得了通气条件下气层形态、边界层速度、摩擦阻力等物理量的演变特征和规律 (如 图 19). Takahashi 等 (2001) 针对大尺寸拖曳体, 用表面活性剂降低气泡尺寸, 发现气泡尺寸对减阻效率没有明显的影响. 董文才等 (董文才等 2002, 郭峰等 2010) 研究了一系列断阶滑行艇等结构通气减阻问题, 发现气层在光滑平板、低速平地驳船等底部一般表现为微气泡, 而在高速艇底部一般变现为气穴. 李勇等 (2011) 开展了平板和散货船船模的气泡减阻数值计算, 探讨了参数对减阻效果的影响. 大尺寸工程应用方面, 日本船舶研究所 Watanabe, Kodama 等团队 (Watanabe et al. 1998; Kodama et al. 2000, 2002) 开展了大尺度的实验来研究气泡流动的相似律, 针对细长平底船舶模型开展通气研究, 结果显示了一定的减阻效果; 但由于尺寸和复杂性, 效果并不稳定. 因为缺乏详细的数据, 他们未能明确给出减阻机理及失效原因, 这也反映了工程应用需要以扎实的机理认识为基础.

通气空泡主要包括通气超空泡和局部空泡两种流态. 通气超空泡是通过在高速乃至超高速运行的航行体头部空化器通入气体, 来产生长度达到或超过航行体长度的空泡. 它作为一种有效减阻技术, 是基础研究和应用研究的热点之一. 其中超空泡的发展与稳定性、水动力特性以及与之相关的航行体操纵特性是超空泡研究的主要关键问题 (傅慧萍等 2003, 曹伟等 2006, 颜开等 2006). 当前来看, 稳定的超空泡生成与发展问题已经较为成熟, 新的工作主要集中于局部的不稳定现象和航行体操纵等方面. 例如, 陈鑫等 (陈鑫 2006, Chen et al. 2008) 较为系统地开展了通气超空泡的实验与数值

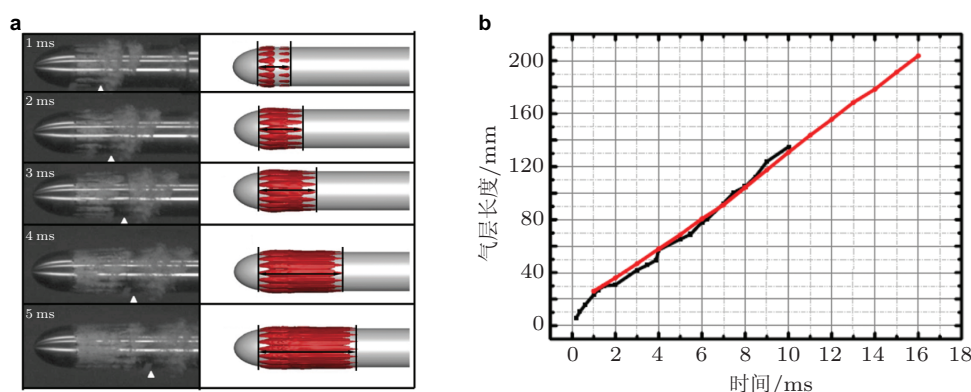
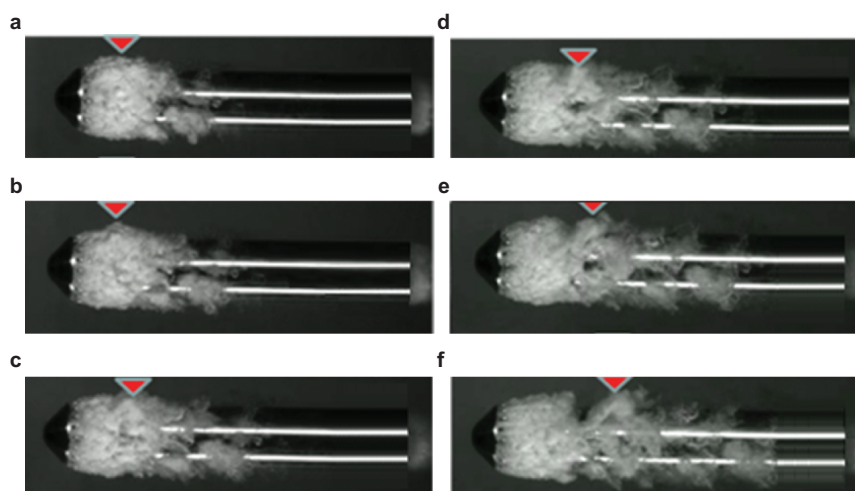


图 19

流线型回转体通气气层减阻流场结构计算与实验对比. (a) 气层形态对比, (b) 气层长度对比 (Yu et al. 2015)

模拟研究, 获得了通气量影响、水洞洞壁影响、非定常演化等规律. 于开平等 (Yu et al. 2010, Yu et al. 2012, Zou et al. 2013) 利用实验与数值模拟方法, 研究了通气超空泡在小弗劳德数下的升力系数随通气率的变化规律、航行体俯仰条件下的水动力特性与泄气流场改变规律等问题. Lee 等 (2008) 也指出, 航行体悬浮在超空泡中经常会产生俯仰运动与尾拍打现象, 会导致尾部流态的改变并产生较大冲击压力. 裴譔等 (2011a, 2011b) 针对超空泡航行体控制技术, 研究了安装参数、攻角等对尾翼舵效的影响规律.

通气局部空泡作为通气气层与通气超空泡的中间形态, 在学术界也得到了越来越多的关注. 一方面是由于高速条件下航行体表面大多数会形成空泡, 难以完全满足边界层气泡与气层的来流条件; 另一方面通气局部空泡在某种意义上是超空泡的一种发展中形态, 通过保留尾部局部沾湿区, 能够在保持一定减阻效果的同时显著提高航行稳定性, 避免出现超空泡条件下的尾拍打现象. Kunz 等 (1999) 基于多相 CFD 方法研究了轴对称航行体稳定自然空化和通气空化的特征, 得到了液相体积分数、表面压力等结果并与实验吻合良好. Pham 等 (1999) 实验研究了在水翼前端喷气的方式对空泡不稳定性抑制的效果, 并与挡流条方式进行了比较. 陈玮琪等 (2012) 基于势流理论研究了重力场中垂直发射航行体表面空泡的发展过程, 并与实验和数值模拟方法进行了对比. 张素宾等 (2012) 采用包含运动网格的 CFD 方法研究了典型高速航行体垂直发射条件下通气空泡的演变规律. 段磊 (2014) 发展了通气空泡多相流流的实验技术, 提出了通气空泡的典型流型分类, 获得了通气空泡非定常发展及其与自由液面相互作用特征. 于嫻娴等 (2012, 2014, 2015) 研究了非定常通气云状空泡的演变过程, 发现主动通气方法改变了原有自然空泡大团云状整体脱落与溃灭的特点, 形成了局部断裂脱

**图 20**

典型通气云状空泡实验观测到的局部空泡脱落现象 (红色倒三角指向区域发生空泡的中段断裂现象) (Wang et al. 2012)

落现象 (如 图 20), 并探索了旋涡诱导脱落的机制, 从质量流量、动量流量角度分析了通气对空泡稳定性的影响. 此外, 还有许多工作从压力振荡等角度分析了通气的稳定空泡效应 (王国玉和曹树良 2001, Feng et al. 2005), 以及通气量和发射条件等参数对于空泡发展的影响 (张博等 2011, 鲍文春等 2014).

6 水下发射载荷及流固耦合问题

水下发射过程中, 流动压力作用在结构表面进一步形成内力载荷, 载荷特征与结构安全性是工程设计中最关心的问题. 由于这一过程中流体与结构相互作用的特点, 严格求解时需要考虑流固耦合效应, 即流场与固体运动和变形的相互作用以及影响 (邢景棠等 1997, 叶正寅等 2010). 水动弹性 (Cheng 1957, 郑哲敏 1958) 也是与水下结构流固耦合问题相关的一个非常值得注意的内容. 特别当航行体在水中做高速运动时, 空泡的不稳定、出水时的空泡溃灭等往往会使结构产生强烈的振动, 甚至于造成结构的破坏, 流固耦合研究对相关工程领域非常重要.

针对此类问题, 国外已有一定数量的实验研究成果, 例如 Tijsseling 等 (2005) 研究了 T 形管流场中空化流动及流固耦合问题, Dular 等 (2004) 研究了不同形状以及来流条件下的水翼空化以及脱落空泡溃灭造成的气蚀效应, 给出了空泡结构演化与气蚀造成的损伤之间的关系.

鉴于空化流动以及耦合的复杂性, 数值求解时大多对流场进行必要的简化, 将结

构的响应作为重点. Young (2007, 2008) 利用边界元方法模拟空泡形状, 并与有限元结构分析相结合, 模拟了水轮机叶片的振动问题; 杨传武和王安稳 (2008) 基于超空泡体运动特点, 采用理论分析方法近似确定了作用在超空泡水下航行体上的冲击载荷及其在航行体尾部的分布, 并用有限元法研究了超空泡水下航行体的结构响应. 张劲生等 (2010) 首先用理论方法推导了作用于超空泡水下航行体尾部的冲击载荷与航行速度的关系, 然后利用有限元法研究了在不同速度条件下航行体的结构动力响应和变形特性.

实际工程设计领域, 对于同时考虑结构变形和流场模拟双向交互的流固耦合方法应用的还较少, 大多应用计算量较小的简化方法, 后者在处理特定工程问题时具有一定优势. 程载斌等 (2008) 应用 LS-DYNA 显式程序建立了气、液、固等多物质耦合的 ALE 网格模型, 使用罚函数流体 - 固体耦合方法开展了水下无攻角发射过程的流固耦合数值模拟. 陈玮琪等 (2007) 对约束物体零攻角高速出水的轴向水动力参数进行了辨识, 获得了轴向方向的附加质量和阻力系数的非线性模型. 此外, 许多学者采用商业软件, 基于简化、解耦等手段, 给出了导弹出筒、出水等过程的载荷、弹道等特性, 能够为工程应用提供参考 (李国良等 2013, 王亚东等 2013, 秦勇 2014, 张健等 2014).

上述载荷求解中应用的简化方法计算量较小, 在处理特定工程问题时具有一定优势. 但在许多情况下, 空泡的生长、发展和溃灭等非定常演变过程会对结构的运动和变形产生强烈的作用, 与此同时结构运动和变形也会反过来影响前者. 因此, 对于水下高速航行体结构载荷的机理分析以及强度设计等关键问题, 根本解决的出路是把能更精确描述空泡演变的 CFD 方法与结构动力学程序耦合起来进行求解. Wang 等 (2014) 将基于 CFD 的空泡流动数值模拟程序与模态叠加结构振动计算程序结合, 形成了针对水下发射过程的双向流固耦合分析方法, 初步认识了结构振动特性对空泡溃灭压力及振动载荷的反馈作用 (如 图 21).

7 总结与展望

总体来看, 水下发射高速水动力学已经取得了许多重要的进展. 实验方面已经形成了针对空化流动的较为丰富的研究手段, 能够实现对空泡形态以及密度、速度、压力等物理量的精细观测; 数值计算方面, 空化模型、修正湍流模型等已发展成熟, 大涡模拟、直接数值模拟等精细分析手段也逐渐得到了广泛的应用. 在此基础上针对空泡稳定性、空泡溃灭、空泡流动主动控制等方面开展了大量的工作, 发现了空泡脱落、溃灭等典型现象的物理机制, 给出了水下发射空泡状态判据并建立了溃灭压力物理模型, 分析了以主动通气为代表的多种主动控制手段的效果和作用机制, 并完成了一些典型工况的流固耦合分析及载荷工程应用支撑. 未来, 该领域在如下几个方面还需要

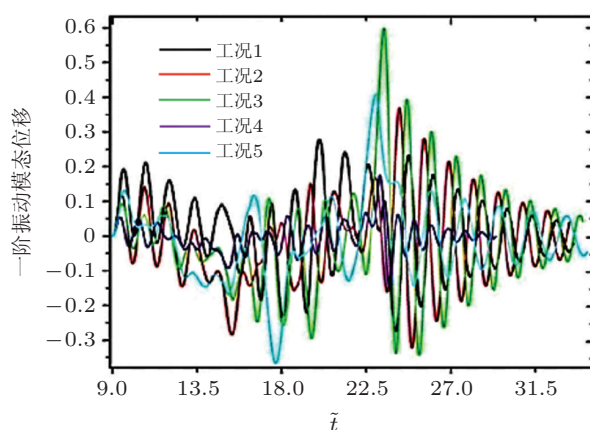


图 21

水下发射航行体一阶振动模态位移对比 (不同曲线分别为不同结构振动特性, 工况 1 ~ 5 分别为刚性垂直发射、考虑刚体运动、中等振动频率、低振动频率、高振动频率) (Wang et al. 2014)

继续深入.

(1) 在空化流动的研究方法上, 当前实验与计算的方法仍有一定的局限性, 特别是对于揭示空泡精细内部结构方面还有明显的不足, 更为成熟的精细流场测试及空化/湍流相互作用模拟手段都有待于进一步发展.

(2) 对于空化流动的演化与不稳定性, 系统的成果大多集中在水翼构型的片状-云状空泡流态转变等问题上, 而轴对称航行体的非定常演化更多表现为内在不稳定性, 对于空泡不稳定性机制还缺乏全面以及清晰的描述, 对于控制参数影响规律的研究仍不够系统.

(3) 在空泡溃灭及空泡与自由面相互作用方面, 单个空泡以及有限个空泡的振荡特征是以往研究的热点, 而空泡群的溃灭机理问题尚未解决, 仍有待于在出水溃灭中不同形态的空泡群与自由表面的相互作用方面进一步深入研究.

(4) 针对空化流动的控制问题, 主动控制方法目前主要用于空化器通气超空化、平板边界层通气减阻等方面, 而对于轴对称航行体在不同条件下的通气局部空泡流态转变亟待形成系统的研究成果.

(5) 对于水下发射的载荷问题, 以及空泡演变、溃灭压力等流场特征与航行体结构间的相互作用问题, 目前工程中常用的数值模拟方法大多仍局限于简化的算法, 还需要进一步建立和推广更为精确的 CFD 与结构仿真的耦合方法, 并在此基础上把握两者耦合特性及耦合规律, 从而更为准确地预测航行体高速水动力学载荷.

在这一领域, 作者认为未来可以优先考虑如下几个重点的方向.

(1) 从有限个空泡到空泡群的多尺度模型

现有的空泡溃灭工作仍然基于平均化模型, 得到的是宏观物理特征和机制. 而对于单个空泡溃灭, 与平均化的群体溃灭之间尚未建立起清晰的联系. 未来考虑从有限个空泡的特征以及相互影响出发, 建立空泡群溃灭的多尺度模型, 以便对空泡溃灭给出更深层次的物理解释.

(2) 新的通气方式机理与应用分析

针对主动通气流动控制方法中的回射、脱落、溃灭等关键物理过程, 开展系统的控制参数分析与机理研究, 特别关注不同离散气泡-气层-通气空泡之间的流态转变以及稳定性问题, 在深入认识机理的基础上形成物理模型与相似律, 从而推进发展更有效的主动通气流动控制方法.

(3) 新型材料在空化流动控制中的作用与机制研究

近年来, 新材料与流动控制结合成为热点, 但在空化流动控制方面还未系统开展. 超疏水材料、聚合物喷流、可变性结构等调节手段, 都值得深入研究.

致谢 衷心感谢郑哲敏院士在本课题研究及论文撰写过程中的悉心指导! 国家自然科学基金 (11332011, 11202215, 11672315, 11772340) 及中国科学院青年创新促进会 (2015015) 资助项目.

参考文献

- 鲍文春, 权晓波, 魏海鹏. 2014. 航行体排气水下发射流体动力数值仿真研究. 导弹与航天运载技术, 14-18 (Bao W C, Quan X B, Wei H P. 2014. Numerical simulation on the flow dynamics of underwater vehicle launching with exhaust. *Missiles and Space Vehicles*, 14-18).
- 曹伟, 魏英杰, 王聪, 邹振祝, 黄文虎. 2006. 超空泡技术现状、问题与应用. 力学进展, 36: 571-579 (Cao W, Wei Y J, Wang C, Zou Z Z, Huang W H. 2006. Current status problems and application of supercavitation technology. *Advances in Mechanics*, 36: 571-579).
- 陈玮琪, 王宝寿, 颜开, 鲁海燕. 2013. 物体垂直出入水的非定常空泡数学模型. 应用数学和力学, 34: 1130-1140 (Chen W Q, Wang B S, Yan K, Lu H Y. 2013. Model of the unsteady vertical water-entry and water-exit cavities. *Applied Mathematics and Mechanics*, 34: 1130-1140).
- 陈玮琪, 王宝寿, 颜开, 易淑群. 2012. 空化器出水非定常垂直空泡的研究. 力学学报, 45: 76-82 (Chen W Q, Wang B S, Yan K, Yi S Q. 2012. Study on the unsteady vertical cavity of the exit water cavitator. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 45: 76-82).
- 陈玮琪, 王宝寿, 易淑群, 郑俊, 褚学森. 2012. 非定常空泡闭合区域最大压力的理论研究. 力学学报, 44: 701-708 (Chen W Q, Wang B S, Yi S Q, Zheng J, Zhu X S. 2012. A theoretical investigation on the maximum pressure of the unsteady cavity closure position. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 44: 701-708).
- 陈玮琪, 颜开, 王宝寿, 史淦君, 汤新元, 刘志勇. 2007. 物体斜出水过程的轴向水动力参数辨识. 船舶力学, 11: 521-527 (Chen W Q, Yan K, Wang B S, Shi C J, Tang X Y, Liu Z Y. Parameter identification

- of axial hydrodynamic forces acting on axis-symmetric body exiting water obliquely. *Journal of Ship Mechanics*, **11**: 521-527).
- 陈鑫. 2006. 通气空泡流研究. [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学 (Chen X. 2006. An investigation of the ventilated cavitating flow. [PhD Thesis]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University).
- 程少华, 权晓波, 于海涛, 翟章明, 王占莹. 2015. 小攻角下航行体三维非定常空泡形态理论预示方法. *船舶力学*, **19**: 889-895 (Cheng S H, Quan X B, Yu H T, Zhai Z M, Wang Z Y. 2015 Three-dimensional cavitation shape of the underwater vehicles at a small attack angle in unsteady flow. *Journal of Ship Mechanics*, **19**: 889-895).
- 程载斌, 刘玉标, 刘兆, 申仲翰. 2008. 导弹水下潜射过程的流体-固体耦合仿真. *兵工学报*, **29**: 178-183 (Cheng Z B, Liu Y B, Liu Z, Shen Z H. 2008. FSI simulation on the vertical launching process of underwater missile. *Acta Armamentarii*, **29**: 178-183).
- 戴月进, 张媛媛, 黄典贵. 2012. 水翼表面粗糙带对空化抑制效果的数值研究. *工程热物理学报*, **33**: 770-773 (Dai Y J, Zhang Y Y, Huang D G. 2012. Numerical study of the impact of hydrofoil surface roughness on cavitation suppression. *Journal of Engineering Thermophysics*, **33**: 770-773).
- 董文才, 郭日修, 刘希武. 2002. 断阶滑行艇气层减阻试验研究. *水动力学研究与进展*, **17**: 440-447 (Dong W C, Guo R X, Liu X W. 2002. Experimental investigation on the resistance reduction of stepped planing craft by formation of air cavity. *Journal of Hydrodynamics*, **17**: 440-447).
- 杜特专, 黄晨光, 王一伟, 于娟娟, 吴小翠. 2015. 有限水域内球形气泡振动特性及影响参数研究. *水动力学研究与进展*, **30**: 1-8 (Du T Z, Huang C G, Wang Y W, Yu X X, Wu X C. 2015. Study on the vibration characteristics and influence parameters of a sphere bubble within finite field. *Journal of Hydrodynamics*, **30**: 1-8).
- 段磊. 2014. 通气空泡多相流流动特性研究. [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学 (Duan L. 2014. Study on Characteristics of ventilated cavitating flows around an axisymmetric body. [PhD Thesis]. Beijing: Beijing Institute of Technology).
- 傅慧萍, 鲁传敬, 冯学梅. 2003. 超空泡武器技术中的几个水动力学问题. *船舶力学*, **7**: 112-118 (Fu H P, Lu C J, Feng X M. 2003. Some hydrodynamic problems in supercavitation technology. *Journal of Ship Mechanics*, **7**: 112-118).
- 傅慧萍, 鲁传敬, 吴磊. 2005. 回转体空泡流特性研究. *水动力学研究与进展: A 辑*, **20**: 84-89 (Fu H P, Lu C J, Wu L. 2005. Research on characteristics of flow around cavitating body of revolution. *Journal of Hydrodynamics: Ser. A*, **20**: 84-89).
- 胡常莉. 2015. 绕回转体空化流动特性与机理研究. [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学 (Hu C L. 2015. Research on characteristics and mechanisms of flow around cavitating body of revolution. [PhD Thesis]. Beijing: Beijing Institute of Technology).
- 胡影影, 朱克勤, 席葆树. 2002. 半无限长柱体出水数值模拟. *清华大学学报 (自然科学版)*, **42**: 235-238 (Hu Y Y, Zhu K Q, Xi B S. 2002. Numerical simulation of a semi-infinite cylinder exited from water. *J Tsinghua Univ (Sci and Tech)*, **42**: 235-238).
- 顾巍, 何友声. 2001. 空泡流非稳态现象的流动控制. *力学学报*, **33**: 19-27 (Gu W, He Y S. 2001. Flow control on unstable cavitation phenomena. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **33**: 19-27).
- 郭峰, 董文才, 毕毅. 2010. 回转体微气泡减阻影响因素理论研究. *哈尔滨工程大学学报*, **31**: 1443-1449 (Guo F, Dong W C, Bi Y. 2010. The theoretical study on influencing factors to resistance reduction of a gyrooidal object by microbubbles. *Journal of Harbin Engineering University*, **31**: 1443-1449).

- 黄彪, 王国玉, 权晓波, 张敏弟. 2011. 绕平头回转体非定常空化流体动力特性研究. 实验流体力学, **25**: 22-28 (Huang B, Wang G Y, Quan X B, Zhang M D. 2011. Study on the unsteady cavitating dynamic characteristics around a 0-caliber ogive revolution body. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, **25**: 22-28).
- 黄彪, 王国玉, 权晓波, 张敏弟. 2012. 轴对称体空化水动力脉动特性的实验研究. 工程力学, **29**: 239-244 (Huang B, Wang G Y, Quan X B, Zhang M D. 2012. Experimental study on fluctuating hydrodynamics around axisymmetric bodies. *Engineering Mechanics*, **29**: 239-244).
- 贾会霞, 胡俊辉, 施红辉, 陈波. 2015. 出水超空泡的形状与弗劳德数影响的实验研究. 西安交通大学学报, **49**: 67-73 (Jia H X, Hu J H, Shi H H, Chen B. 2015. Experimental research on the shape of water-exit supercavity and the effect of Froude number. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, **49**: 67-73).
- 孔德才, 权晓波, 魏海鹏, 燕国军, 尤天庆. 2015. 锥柱航行体肩空泡界面效应对头锥面受力的影响研究. 水动力学研究与进展 A 辑, **2**: 012 (Kong D C, Quan X B, Wei H P, Yan G J, You T Q. 2015. Influence of cavitation interface effect of cone-column vehicle on the forces of the cone. *Journal of Hydrodynamics: Ser.A*, **2**: 012).
- 李国良, 袁湘江, 敖林. 2013. 潜射导弹出水载荷数值算法研究. 力学与实践, **35**: 25-30, 24 (Li G L, Yuan X J, Ao L. 2013. Simulation of under-water launched missile's water-exit load. *Mechanics In Engineering*, **35**: 25-30, 24).
- 李勇. 2011. 船舶微气泡减阻机理研究. [硕士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学 (Li Y. 2011. Mechanism research on drag reduction of ship by microbubbles. [Master Thesis]. Harbin: Harbin Engineering University).
- 裴譞, 王育才, 张宇文, 邓飞, 袁绪龙. 2011a. 超空泡航行器舵效的水洞试验研究. 西南交通大学学报, **46**: 1008-1012 (Pei X, Wang Y C, Zhang Y W, Deng F, Yuan X L. 2011. Experimental research on tail rudder efficiency of super-cavitation vehicle. *Journal of Southwest Jiaotong University*, **46**: 1008-1012).
- 裴譞, 张宇文, 袁绪龙, 张纪华. 2011b. 尾翼对超空泡航行器形态及力学特性影响实验研究. 实验流体力学, **25**: 23-28 (Pei X, Zhang Y W, Yuan X L, Zhang J H. 2011. Exploring experimentally effect of tail wing on shape and dynamics on super-cavitation vehicle, *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, **25**: 23-28).
- 秦勇. 2014. 均压气体对考虑波浪的航行体水动力特性影响机制研究. [硕士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 (Qin Y. 2014. Effect of gas exhausting on hydrodynamic characteristic of underwater vehicle considering wave. [Master Thesis]. Harbin: Harbin Institute of Technology).
- 权晓波, 李岩, 魏海鹏, 吕海波, 辛万青, 鲁传敬. 2008. 航行体出水过程空泡溃灭特性研究. 船舶力学, **12**: 545-549 (Quan X B, Li Y, Wei H P, Lu H B, Xin W Q, Lu C J. 2008. Cavitation collapse characteristic research in the out-of-water progress of underwater vehicles. *Journal of Ship Mechanics*, **12**: 545-549).
- 施红辉, 胡俊辉, 周浩磊. 2014. 完全超空泡出水的实验研究及理论分析. 空气动力学学报, **32**: 544-550 (Shi H H, Hu J H, Zhou H L. 2014. Experimental and theoretical analysis of water exit of a supercavity. *Acta Aerodynamica Sinica*, **32**: 544-550).
- 王柏秋, 王聪, 黄海龙, 何春涛, 张嘉钟. 2012. 空化模型中的相变系数影响研究. 工程力学, **29**: 378-384 (Wang B Q, Wang C, Huang H L, He C T, Zhang J Z. 2012. Study of the influence of phase-changes coefficients in the cavitation model. *Engineering Mechanics*, **29**: 378-384).
- 王国玉, 曹树良. 2001. 通气对空化引起振动的影响. 水力发电学报, 55-62 (Wang G Y, Cao S L. 2001. Ventilation effects on cavitation induced vibration. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 55-62).

- 王家楣, 姜曼松, 郑晓伟, 詹德新. 2004. 不同喷气形式下船舶微气泡减阻水池试验研究. 华中科技大学学报: 自然科学版, **32**: 78-80 (Wang J M, Jiang M S, Zheng X W, Zhan D X. 2004. Study of drag reduction of vessel model by microbubble with different injection forms on the towing basin. *J. Huazhong Univ. of Sci. and Tech. (Nature Science Edition)*, **32**: 78-80).
- 王家楣, 郑晓伟, 姜曼松. 2004. 船舶吃水对微气泡减阻影响的水池试验研究. 船舶工程, **26**: 9-12 (Wang J M, Zheng X W, Jiang M S. 2004. Test research on drag reduction of ship model at different draft by microbubble in towing basin. *Ship Engineering*, **26**: 9-12).
- 王亚东, 袁绪龙, 张宇文, 刘维. 2013. 气泡弹性对同心筒水下发射影响研究. 计算力学学报, 313-318 (Wang Y D, Yuan X L, Zhang Y W, Liu W. 2013. On the effect of bubble elasticity to sub-launch process using concentric canister launcher. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 313-318).
- 王一伟. 2013. 高速航行体水动力载荷特征与机理研究. [博士论文]. 北京: 中国科学院大学 (Wang Y W. 2013. Principal characteristics and physical mechanisms of hydrodynamic load for high-speed underwater vehicles. [PhD Thesis]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences).
- 王一伟, 黄晨光, 杜特专, 方新, 梁乃刚. 2012. 航行体垂直出水载荷与空泡溃灭机理分析. 力学学报, **44**: 39-48 (Wang Y W, Huang C G, Du T Z, Fang X, Liang N G. 2012. Mechanism analysis about cavitation collapse load of underwater vehicles in a vertical launching process. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **44**: 39-48).
- 王一伟, 黄晨光, 杜特专, 刘维玮. 2011. 航行体有攻角出水全过程数值模拟. 水动力学研究与进展 **26**: 48-57 (Wang Y W, Huang C G, Du T Z, Liu W W. 2011. Numerical simulation of a submerged body exiting from water with an attack angle. *Journal of Hydrodynamics*, **26**: 48-57).
- 王一伟, 黄晨光, 方新, 杜特专, 于嫻嫻. 2013. 水下回转航行体的云状空化回射流运动特征研究. 水动力学研究与进展 A 辑, **28**: 23-29 (Wang Y Y, Huang C G, Fang X, Du T Z, Yu X X. 2013. Characteristics of the re-entry jet in the cloud cavitating flow over a submerged axisymmetric projectile. *Journal of Hydrodynamics: Ser.A*, **28**: 23-29).
- 王一伟, 黄晨光, 吴小翠, 杜特专, 方新, 梁乃刚, 于嫻嫻. 2015. 航行体水下垂直发射空泡脱落条件研究. 工程力学, **32**: 33-39 (Wang Y W, Huang C G, Wu X C, Du T Z, Fang X, Liang N G, Yu X X. 2015. Investigation of cavities shedding condition on underwater vehicles in the vertical launch process. *Engineering Mechanics*, **32**: 33-39).
- 邢景棠, 周盛, 崔尔杰. 1997. 流固耦合力学概述. 力学进展, **27**: 19-38 (Xing J T, Zhou S, Cui E J. 1997. A survey on the fluid-solid interaction mechanics. *Advances in Mechanics*, **27**: 19-38).
- 邢彦江, 张嘉钟, 魏英杰, 王聪. 2012. 航行体加速运动对空泡形态影响研究. 工程力学, **29**: 343-348 (Xing Y J, Zhang J Z, Wei Y J, Wang C. 2012. Study on effect of vehicle accelerating motion on cavity shape. *Engineering Mechanics, Advances in Mechanics*, **29**: 343-348).
- 颜开, 褚学森, 许晟, 冯光. 2006. 超空泡流体动力学研究进展. 船舶力学, **10**: 148-155 (Yan K, Chu X S, Xu S, Feng G. 2006. Research progress of supercavitation hydrodynamics. *Journal of Ship Mechanics*, **10**: 148-155).
- 杨传武, 王安稳. 2008. 超空泡水下航行体振动特性分析. 海军工程大学学报, **20**: 30-32 (Yang C W, Wang A W. 2008. Vibration of supercavitating underwater vehicles. *Journal of Naval University of Engineering*, **20**: 30-32).
- 杨传武, 王安稳. 2008. 冲击载荷作用下超空泡水下航行体的结构响应. 华中科技大学学报 (自然科学版), **36**: 129-132 (Yang C W, Wang A W. 2008. Structural response of supercavitating underwater

- vehicles subjected to impact loads. *J. Huazhong Univ. of Sci. and Tech. (Nature Science Edition)*, **36**: 129-132).
- 姚琰, 鲁传敬, 朱坤. 2009. 水下高速气体射流的实验研究. 水动力学研究与进展: A 辑, **24**: 590-595 (Yao Y, Lu C J, Zhu K. 2009. Experimental study on confined high-speed gas jets in water. *Journal of Hydrodynamics: Ser. A*, **24**: 590-595).
- 叶正寅, 张伟伟, 史爱明. 2010. 流固耦合力学基础及其应用. 哈尔滨工业大学出版社 (Ye Z, Zhang W W, Shi A M. 2010. *Fundamentals of Fluid-Structure Coupling and Its Application*. Harbin Institute of Technology Press).
- 于嫻嫻, 王一伟, 黄晨光, 杜特专. 2012. 水下回转体边界层通气减阻的研究//第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源诞辰 110 周年纪念大会文集 (上册) (Yu X X, Wang Y W, Huang C G, Du T Z. 2012. Investigation of drag reduction by gas injection into boundary layer of underwater gyroidal bodies//Proceeding of the 11th National Congress on Hydrodynamics and 24th National Conference on Hydrodynamics and Commemoration of the 110th Anniversary of Zhou Pei-yuan's Birth).
- 于嫻嫻, 王一伟, 黄晨光, 杜特专. 2014. 轴对称航行体通气云状空化非定常特征研究. 船舶力学, **18**: 499-506 (Yu X X, Wang Y W, Huang C G, Du T Z. 2014. Unsteady characteristics of ventilated cloud cavity around symmetrical bodies. *Journal of Ship Mechanics*, **18**: 499-506).
- 于嫻嫻, 王一伟, 黄晨光, 杜特专. 2015. 通气对云状空化不稳定性调节中的控制参数与影响规律研究. 中国科学: 物理学力学天文学, **45**: 034703 (Yu X X, Wang Y W, Huang C G, Du T Z. 2015. Parameters and influence of gas injection on modification of cavitation stability. *Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica*, **45**: 034703).
- 张阿漫, 姚熊亮. 2008. 基于边界积分法的气泡动态特性综述. 力学进展, **38**: 561-570 (Zhang A M, Yao X L. 2008. Review on the bubble dynamics based on boundary integral method. *Advances in Mechanics*, **38**: 561-570).
- 张博, 张宇文, 张纪华. 2011. 通气空泡生成和溃灭特性试验研究. 应用力学学报, **28**: 55-58 (Zhang B, Zhang Y W, Zhang J H. 2011. Experimental Study on Formation and Collapse of Ventilation Cavity. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, **28**: 55-58).
- 张健, 范国芳, 张兴国. 2014. 航行体垂直出筒载荷特性及影响因素分析. 战术导弹技术, **5**: 002 (Zhang J, Fan G F, Zhang X G. 2014. Characteristic analysis and effect factors about dynamic load of underwater vehicles during vertical launching from a tube. *Tactical Missile Technology*, **5**: 002).
- 张劲生, 张嘉钟, 魏英杰, 曹伟. 2010. 超空泡水下航行体的结构动力响应特性. 北京航空航天大学学报, **36**: 411-414 (Zhang J S, Zhang J Z, Wei Y J, Cao W. 2010. Structural dynamic response characteristics of supercavitating underwater vehicles. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, **36**: 411-414).
- 张凌新, 尹琴, 邵雪明. 2012. 水中气泡溃灭的理论与数值研究. 水动力学研究与进展 A 辑, **27**: 68-73 (Zhang L X, Yin Q, Shao X M. 2012. Theoretical and numerical studies on the bubble collapse in water. *Journal of Hydrodynamics: Ser. A*, **27**: 68-73).
- 张马骏, 陈鑫, 鲁传敬. 2014. 锥头航行体非匀速垂直出水数值研究. 水动力学研究与进展: A 辑, **29**: 683-690 (Zhang M J, Chen X, Lu C J. 2014. Numerical study of the submerged body with a conical head exiting from water vertically in non-uniform velocity. *Journal of Hydrodynamics: Ser. A*, **29**: 683-690).
- 张素宾, 鲁传敬, 陈鑫. 2012. 高速航行体通气空泡形态. 上海交通大学学报, **2**: 329-334 (Zhang S B, Lu C J, Chen X. 2012. Investigation of ventilated cavity shapes of a high speed underwater vehicle. *Journal*

- of Shanghai Jiaotong University, **2**: 329-334).
- 郑哲敏. 1958. 输水管的振动问题. 力学学报, **2**: 100-111 (Che-Min Cheng. 1985. Vibration of water pipes. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **2**: 100-111).
- 周浩磊. 2012. 水下高速航行体发射系统的设计及超空泡流场特性研究. [硕士论文]. 杭州: 浙江理工大学 (Zhou H L. 2012. Design of a launch system of high-speed underwater vehicles and research on the characteristics of supercavitation flows. [Master Thesis]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University).
- Aeschlimann V, Barre S, Legoupil S. 2011. X-ray attenuation measurements in a cavitating mixing layer for instantaneous two-dimensional void ratio determination. *Physics of Fluids*, **23**: 253-268.
- Amromin E, Kopriva J, Arndt R, Wosnik M. 2006. Hydrofoil drag reduction by partial cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, **128**: 931-936.
- Arakeri V H, Acosta A J. 1976. Cavitation inception observations on axisymmetric bodies at supercritical Reynolds numbers. *Journal of Ship Research*, **20**: 40-50.
- Arndt R E A, Balas G J, Wosnik M. 2005. Control of cavitating flows: A perspective. *JSME International Journal*, **48**: 334-341.
- Arndt R E A, Song C C S, Kjeldsen M, He J, Keller A. 2001. Instability of partial cavitation: A numerical/experimental approach//Twenty-Third Symposium on Naval Hydrodynamics.
- Bensow R E, Bark G. 2010. Implicit LES predictions of the cavitating flow on a propeller. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, **132**: 041302.
- Besant W H, Ramsey A S, 1913. A treatise on hydromechanics: Hydrostatics and hydrodynamics. Deighton, Bell G, USA.
- Blake J R, Gibson D C. 1987. Cavitation bubbles near boundaries. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **19**: 99-123.
- Bodgevich V G, Evseev A R. 1976. The distribution of skin friction in a turbulent boundary layer of water beyond the location of gas injection. *Investigations of Boundary Layer Control (in Russian)*, Thermophysics Institute Publishing House, **62**.
- Bremond N, Arora M, Ohl C D, Lohse D. 2006. Controlled multibubble surface cavitation. *Physical Review Letters*, **96**: 224501.
- Brennen C E. 1995. Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford University Press, USA.
- Callenaere M, Franc J P, Michel J M, Riondet M. 2001. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet. *Journal of Fluid Mechanics*, **444**: 223-256.
- Ceccio S L. 2010. Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **42**: 183-203.
- Ceccio S L, George D L. 1996. A review of electrical impedance techniques for the measurement of multiphase flows. *Journal of Fluids Engineering*, **118**: 391-399.
- Cervone A, Bramanti C, Rapposelli E, d'Agostino L. 2006. Thermal cavitation experiments on a NACA 0015 hydrofoil. *Journal of fluids engineering*, **128**: 326-331.
- Cheng C M. 1957. Problems in hydro-elasticity//Proceedings 9th International Congress of Applied Mechanics, University of Bruxelles, Avenue Franklin Roosevelt.
- Clark III H, Deutsch S. 1991. Microbubble skin friction reduction on an axisymmetric body under the influence of applied axial pressure gradients. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, **3**: 2948-2954.

- Coutier-Delgosha O, Deniset F, Astolfi J A, Leroux J. 2007a. Numerical prediction of cavitating flow on a two-dimensional symmetrical hydrofoil and comparison to experiments. *Journal of Fluids Engineering*, **129**: 279-292.
- Coutier-Delgosha O, Devillers J, Leriche M, Pichon T. 2005. Effect of wall roughness on the dynamics of unsteady cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, **127**: 726-733.
- Coutier-Delgosha O, Fortes-Patella R, Reboud J L. 2003a. Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, **125**: 38-45.
- Coutier-Delgosha O, Reboud J L, Delannoy Y. 2003b. Numerical simulation of the unsteady behaviour of cavitating flows. *International journal for numerical methods in fluids*, **42**: 527-548.
- Coutier-Delgosha O, Stutz B, Vabre A, Legoupil S. 2007b. Analysis of cavitating flow structure by experimental and numerical investigations. *Journal of Fluid Mechanics*, **578**: 171-222.
- Dittakavi N, Chunekar A, Frankel S. 2010. Large eddy simulation of turbulent-cavitation interactions in a venturi nozzle. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, **132**: 121302.
- Dular M, Bachert R, Stoffel B, Sirok B. 2004. Relationship between cavitation structures and cavitation damage. *Wear*, **257**: 1176-1184.
- Dular M, Bachert R, Stoffel B, Sirok B. 2005. Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, **24**: 522-538.
- Duplaa S, Coutier-Delgosha O, Dazin A, Roussette O, Bois G, Caignaert G. 2010. X-ray measurements in a cavitating centrifugal pump during fast start-ups. *Journal of Fluids Engineering*, **135**: 041204.
- Elbing B R, Mäkiharju S, Wiggins A, Perlin M, Dowling D R, Ceccio S L. 2013. On the scaling of air layer drag reduction. *Journal of Fluid Mechanics*, **717**: 484-513.
- Elbing B R, Winkel E S, Lay K A, Ceccio S L, Dowling D R, Perlin M. 2008. Bubble-induced skin-friction drag reduction and the abrupt transition to air-layer drag reduction. *Journal of Fluid Mechanics*, **612**: 201-236.
- Feng X M, Chuan-Jing L U, Hu T Q, Lei W U, Jie L I. 2005. The fluctuation characteristics of natural and ventilated cavities on an axisymmetric body. *Journal of Hydrodynamics*, **17**: 87-91.
- Fontaine A A, Deutsch S. 1992. The influence of the type of gas on the reduction of skin friction drag by microbubble injection. *Experiments in Fluids*, **13**: 128-136.
- Fortes-Patella R, Coutier-Delgosha O, Perrin J, Reboud J L. 2007. Numerical model to predict unsteady cavitating flow behavior in inducer blade cascades. *Journal of Fluids Engineering*, **129**: 128-135.
- Franc J P. 2006. *Physics and Control of Cavitation*. Grenoble Univ (France).
- Franc J P, Michel J M. 2004. *Fundamentals of Cavitation*. Springer.
- Fuster D, Colonius T. 2011. Modelling bubble clusters in compressible liquids. *Journal of Fluid Mechanics*, **688**: 352-389.
- Ganesh H. 2015. Bubbly shock propagation as a cause of sheet to cloud transition of partial cavitation and stationary cavitation bubbles forming on a delta wing vortex. [PhD Thesis], University of Michigan.
- Gnanaskandan A, Mahesh K. 2015. Large Eddy Simulation of turbulent cavitating flows//Proceedings of the 9th International Symposium on Cavitation. *Journal of Physics: Conference series*, Switzerland, **656**: 012135.
- Gnanaskandan A, Mahesh K. 2016. Numerical investigation of near-wake characteristics of cavitating flow

- over a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, **790**: 453-491.
- Gopalan S, Katz J. 2000. Flow structure and modeling issues in the closure region of attached cavitation. *Physics of Fluids*, **12**: 895-911.
- Heindel T J. 2011. A review of x-ray flow visualization with applications to multiphase flows. *Journal of Fluids Engineering*, **133**: 074001.
- Holder D S. 2005. Electrical impedance tomography: Methods, history, and applications. *Physics in Medicine and Biology*, **26**: 583-584.
- Holl J W, Carroll J A. 1981. Observations of the various types of limited cavitation on axisymmetric bodies. *Journal of Fluids Engineering*, **103**: 415-433.
- Hu C, Wang G, Chen G, Huang B. 2014. A modified PANS model for computations of unsteady turbulence cavitating flows. *Science China-Physics Mechanics and Astronomy*, **57**: 1967-1976.
- Huang B, Wang G. 2011. Partially averaged Navier-Stokes method for time-dependent turbulent cavitating flows. *Journal of Hydrodynamics*, **23**: 26-33.
- Huang B, Wang G, Zhao Y. 2014. Numerical simulation unsteady cloud cavitating flow with a filter-based density correction model. *Journal of Hydrodynamics*, **26**: 26-36.
- Huang B, Zhao Y, Wang G. 2014. Large eddy simulation of turbulent vortex-cavitation interactions in transient sheet/cloud cavitating flows. *Computers & Fluids*, **92**: 113-124.
- Ji B, Luo X, Peng X, Wu Y. 2013. Three-dimensional large eddy simulation and vorticity analysis of unsteady cavitating flow around a twisted hydrofoil. *Journal of Hydrodynamics*, **25**: 510-519.
- Ji B, Luo X, Arndt R E A, Wu Y. 2014. Numerical simulation of three dimensional cavitation shedding dynamics with special emphasis on cavitation-vortex interaction. *Ocean Engineering*, **87**: 64-77.
- Ji B, Luo X, Peng X, Wu Y, Xu H. 2012a. Numerical analysis of cavitation evolution and excited pressure fluctuation around a propeller in non-uniform wake. *International Journal of Multiphase Flow*, **43**: 13-21.
- Ji B, Luo X, Wu Y, Peng X, Xu H. 2012b. Partially-averaged Navier-Stokes method with modified k-epsilon model for cavitating flow around a marine propeller in a non-uniform wake. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**: 6582-6588.
- Ji B, Luo X, Arndt R E A, Peng X, Wu Y. 2015. Large Eddy Simulation and theoretical investigations of the transient cavitating vortical flow structure around a NACA66 hydrofoil. *International Journal of Multiphase Flow*, **68**: 121-134.
- Kawamura T, Moriguchi Y, Kato H, Kakugawa A, Kodama Y. 2003. Effect of bubble size on the microbubble drag reduction of a turbulent boundary layer//ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference.
- Kawanami Y, Kato H, Yamaguchi H, Tanimura M, Tagaya Y. 1997. Mechanism and control of cloud cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, **119**: 788-794.
- Keller A P. 2001. Cavitation scale effects-empirically found relations and the correlation of cavitation number and hydrodynamic coefficients//The 4th International Symposium on Cavitation (cav2001: lecture001), Pasadena, CA USA.
- Khlifa I, Coutier-Delgosha O. 2013. Velocity measurements in cavitating flows using fast X-ray imaging//Congrès Français de Mécanique, France.
- Knapp R T, Daily J W, Hammitt F G. 1970. Cavitation. McGraw-Hill.

- Knapp R T, Hollander A. 1948. Laboratory investigations of the mechanism of cavitation. *Trans. ASME*, **70**: 419-435.
- Kodama Y, Kakugawa A, Takahashi T, Kawashima H. 2000. Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **21**: 582-588.
- Kodama Y, Kakugawa A, Takahashi T, Nagaya S, Sugiyama K. 2002. Microbubbles: Drag reduction mechanism and applicability to ships//24th Symposium on Naval Hydrodynamics.
- Konno A, Kato H, Yamaguchi H, Maeda M. 2002. On the collapsing behavior of cavitation bubble clusters. *JSME International Journal Series B*, **45**: 631-637.
- Kunz R F, Boger D A, Chyczewski T S, Stinebring D, Gibeling H, Govindan T. 1999. Multi-phase CFD analysis of natural and ventilated cavitation about submerged bodies//Proceedings of 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference.
- Kunz R F, Boger D A, Stinebring D R, Chyczewski T S, Lindau J W, Gibeling H J, Venkateswaran S, Govindan T R. 2000. A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction. *Computers & Fluids*, **29**: 849-875.
- Lauer E, Hu X Y, Hickel S, Adams N A. 2012. Numerical investigation of collapsing cavity arrays. *Physics of Fluids*, **24**: 052104.
- Le Q, Franc J P, Michel J M. 1993. Partial cavities: Pressure pulse distribution around cavity closure. *Journal of Fluids Engineering*, **115**: 249-254.
- Lee Q, Xue L, He Y. 2008. Experimental study of ventilated supercavities with a dynamic pitching model. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, **20**: 456-460.
- Leroux J B, Coutier-Delgosha O, Astolfi J A. 2005. A joint experimental and numerical study of mechanisms associated to instability of partial cavitation on two-dimensional hydrofoil. *Physics of Fluids*, **17**: 052101.
- Lohrberg H, Stoffel B, Fortes-Patella R, Coutier-Delgosha O, Reboud J. 2002. Numerical and experimental investigations on the cavitating flow in a cascade of hydrofoils. *Experiments in Fluids*, **33**: 578-586.
- Luo X, Ji B, Peng X, Xu H, Nishi M. 2012. Numerical simulation of cavity shedding from a three-dimensional twisted hydrofoil and induced pressure fluctuation by large-eddy simulation. *Journal of Fluids Engineering*, **134**: 041202.
- Mäkiharju S A, Gabillet C, Paik B G, Chang N A, Perlin M, Ceccio S L. 2013. Time-resolved two-dimensional X-ray densitometry of a two-phase flow downstream of a ventilated cavity. *Experiments in Fluids*, **54**: 1-21.
- Madavan N K, Deutsch S, Merkle C L. 1984. Reduction of turbulent skin friction by microbubbles. *Physics of Fluids*, **27**: 356-363.
- Madavan N K, Deutsch S, Merkle C L. 1985. Numerical investigations into the mechanisms of microbubble drag reduction. *Journal of Fluids Engineering*, **107**: 370-377.
- Merkle C L, Deutsch S. 1992. Microbubble drag reduction in liquid turbulent boundary layers. *Applied Mechanics Reviews*, **45**: 103-127.
- Merkle C L, Feng J, Buelow P E O. 2001. Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation//Proc 3rd International Symposium on Cavitation, Grenoble, France.
- Owis F M, Nayfeh A H. 2004. Numerical simulation of 3-D incompressible, multi-phase flows over cavitating projectiles. *European journal of mechanics-B/Fluids*, **23**: 339-351.

- Pelekasis N A, Gaki A, Doinikov A, Tsamopoulos J A. 2004. Secondary Bjerknes forces between two bubbles and the phenomenon of acoustic streamers. *Journal of Fluid Mechanics*, **500**: 313-347.
- Pham T M, Larrarte F, Fruman D H. 1999. Investigation of unsteady sheet cavitation and cloud cavitation mechanisms. *Journal of Fluids Engineering*, **121**: 289-296.
- Plesset M S, Chapman R B. 1971. Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, **47**: 283-290.
- Plesset M S, Prosperetti A. 1977. Bubble dynamics and cavitation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **9**: 145-185.
- Pouffary B, Patella R F, Reboud J, Lambert P. 2008. Numerical analysis of cavitation instabilities in inducer blade cascade. *Journal of Fluids Engineering*, **130**: 041302.
- Prosperetti A. 1998. A brief summary of L. van Wijngaarden's work up till his retirement. *Applied Scientific Research*, **58**: 13-32.
- Quinto-Su P A, Ohl C D. 2009. Interaction between two laser-induced cavitation bubbles in a quasi-two-dimensional geometry. *Journal of Fluid Mechanics*, **633**: 425-435.
- Reisman G E, Wang Y, Brennen C E. 1998. Observations of shock waves in cloud cavitation. *Journal of Fluid Mechanics*, **355**: 255-283.
- Roohi E, Zahiri A P, Passandideh-Fard M. 2013. Numerical simulation of cavitation around a two-dimensional hydrofoil using VOF method and LES turbulence model. *Applied Mathematical Modelling*, **37**: 6469-6488.
- Saito Y, Sato K. 2003. Cavitation bubble collapse and impact in the wake of a circular cylinder//Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003), Osaka, Japan.
- Saito Y, Takami R, Nakamori I, Ikehagi T. 2007. Numerical analysis of unsteady behavior of cloud cavitation around a NACA0015 foil. *Computational Mechanics*, **40**: 85-96.
- Sanders W C, Winkel E S, Dowling D R, Perlin M, Ceccio S L. 2006. Bubble friction drag reduction in a high-Reynolds-number flat-plate turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, **552**: 353-380.
- Schnerr G H, Sezal I H, Schmidt S J. 2008. Numerical investigation of three-dimensional cloud cavitation with special emphasis on collapse induced shock dynamics. *Physics of Fluids*, **20**: 040703.
- Senocak I, Shyy W. 2004. Interfacial dynamics based modelling of turbulent cavitating flows, Part 2: Time dependent computations. *International journal for numerical methods in fluids*, **44**: 997-1016.
- Seo J H, Lele S K, Tryggvason G. 2010. Investigation and modeling of bubble-bubble interaction effect in homogeneous bubbly flows. *Physics of Fluids*, **22**: 063302.
- Shen X, Ceccio S L, Perlin M. 2006. Influence of bubble size on micro-bubble drag reduction. *Experiments in Fluids*, **41**: 415-424.
- Singhal A K, Athavale M M, Li H, Jiang Y. 2002. Mathematical basis and validation of the full cavitation model. *Journal of Fluids Engineering*, **124**: 617-624.
- Stutz B, Legoupil S. 2003. X-ray measurements within unsteady cavitation. *Experiments in Fluids*, **35**: 130-138.
- Stutz B, Reboud J L. 1997. Experiments on unsteady cavitation. *Experiments in Fluids*, **22**: 191-198.
- Stutz B, Reboud J L. 2000. Measurements within unsteady cavitation. *Experiments in Fluids*, **29**: 545-552.
- Takahashi T, Kakugawa A, Nagaya S, Yanagihara T, Kodama Y. 2001. Mechanisms and scale effects of skin friction reduction by microbubbles//Proceedings of 2nd Symposium on Smart Control of Turbulence,

- University of Tokyo, Japan.
- Tanimura M, Tagaya Y, Kato H, Yamaguchi H, Maeda M, Kawanami Y. 1995. Mechanism of cloud cavitation and its control. *Journal-Society of Naval Architects of Japan*, **178**: 41-50.
- Tijsseling A S, Vardy A E. 2005. Fluid-structure interaction and transient cavitation tests in a T-piece pipe. *Journal of Fluids and Structures*, **20**: 753-762.
- Tong R P. 1997. A new approach to modelling an unsteady free surface in boundary integral methods with application to bubble-structure interactions. *Mathematics and computers in simulation*, **44**: 415-426.
- Toumi I, Kumbaro A, Paillere H. 1999. Approximate Riemann solvers and flux vector splitting schemes for two-phase flow//Proceedings of the 30th Computational Fluid Dynamics, von Karman Inst. Lecture Ser.
- Wang G, Ostoja-Starzewski M. 2007. Large eddy simulation of a sheet/cloud cavitation on a NACA0015 hydrofoil. *Applied Mathematical Modelling*, **31**: 417-447.
- Wang G, Senocak I, Shyy W, Ikhagi T, Cao S. 2001. Dynamics of attached turbulent cavitating flows. *Progress in Aerospace Sciences*, **37**: 551-581.
- Wang Q X, Yeo K S, Khoo B C, Lam K Y. 1996. Nonlinear interaction between gas bubble and free surface. *Computers & Fluids*, **25**: 607-628.
- Wang Y, Huang C, Fang X, Yu X, Wu X, Du T. 2016. Cloud cavitating flow over a submerged axisymmetric projectile and comparison between two-dimensional rans and three-dimensional large-eddy simulation methods. *Journal of Fluids Engineering*, **138**: 061102.
- Wang Y, Huang C, Wu X. 2015. On the scaling of bubble cluster collapse in cloud cavitating flow around a slender projectile//Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE-2015), USA.
- Wang Y W, Huang C G, Fang X. 2016. On the internal collapse phenomenon at the closure of cavitation bubbles in a deceleration process of underwater vertical launching. *Applied Ocean Research*, **56**: 157-165.
- Wang Y W, Huang C G, Du T Z, Wu X C, Fang X, Liang N G, Wei Y P. 2012. Shedding phenomenon of ventilated partial cavitation around an underwater projectile. *Chinese Physics Letters*, **29**: 014601.
- Wang Y, Wu X, Huang C, Yu X. 2015. On the flow structure of cloud cavitating flow around an axisymmetric body near the free surface//9th International Symposium on Cavitation (CAV2015) Switzerland.
- Watanabe O, Masuko A, Shirosé Y. 1998. Measurements of drag reduction by microbubbles using very long ship models. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, **183**: 53-63.
- Wang Y, Liao L, Du T, Huang C, Liu Y, Fang X, Liang N. 2014. A study on the collapse of cavitation bubbles surrounding the underwater-launched projectile and its fluid-structure coupling effects. *Ocean Engineering*, **84**: 228-236.
- Wei Y P, Wang Y W, Fang X, Huang C G, Duan Z P. 2011. A scaled underwater launch system accomplished by stress wave propagation technique. *Chinese Physics Letters*, **28**: 024601.
- Welle R V D. 1985. Void fraction, bubble velocity and bubble size in two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow*, **11**: 317-345.
- Wilcox D C. 1998. Turbulence Modeling for CFD. (2nd edition). DCW Industries, Inc.
- Winkel E S, Ceccio S L, Dowling D R, Perlin M. 2004. Bubble-size distributions produced by wall injection of air into flowing freshwater, saltwater and surfactant solutions. *Experiments in Fluids*, **37**: 802-810.
- Wosnik M, Qin Q, Arndt R E A. 2005. Identification of large scale structures in the wake of cavitating

- hydrofoils using les and time-resolved PIV//58th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics.
- Wu J Y, Wang G Y, Shyy W. 2005. Time-dependent turbulent cavitating flow computations with interfacial transport and filter-based models. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **49**: 739-761.
- Wu T Y. 1972. Cavity and Wake Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **4**: 243-294.
- Wu X C, Wang Y W, Huang C G. 2015. Effect of mesh resolution on large eddy simulation of cloud cavitating flow around a three dimensional twisted hydrofoil. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, **55**: 229-240.
- Xin C, LU C, Jie L I, PAN Z C. 2008. The wall effect on ventilated cavitating flows in closed cavitation tunnels. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, **20**: 561-566.
- Young Y L. 2007. Time-dependent hydroelastic analysis of cavitating propulsors. *Journal of Fluids and Structures*, **23**: 269-295.
- Young Y L. 2008. Fluid-structure interaction analysis of flexible composite marine propellers. *Journal of Fluids and Structures*, **24**: 799-818.
- Yu K, Zhang G, Zhou J, Zou W, Li Z. 2012. Numerical study of the pitching motions of supercavitating vehicles. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, **24**: 951-958.
- Yu K, Zhou J, Min J, Zhang G. 2010. A contribution to study on the lift of ventilated supercavitating vehicle with low froude number. *Journal of Fluids Engineering*, **132**: 111303.
- Yu X, Wang Y, Huang C, Du T. 2013. Study on the influence of phase change rate on cloud cavitation. *Procedia Engineering*, **61**: 204-206.
- Yu X, Huang C, Du T, Liao L, Wu X, Zheng Z, Wang Y. 2014. Study of characteristics of cloud cavity around axisymmetric projectile by large eddy simulation. *Journal of Fluids Engineering*, **136**: 051303.
- Yu X, Wang Y, Huang C, Wei Y, Fang X, Du T, Wu X. 2015. Experiment and simulation on air layer drag reduction of high-speed underwater axisymmetric projectile. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, **52**: 45-54.
- Zhang A M, Yao X L, Feng L H. 2009. The dynamic behavior of a gas bubble near a wall. *Ocean Engineering*, **36**: 295-305.
- Zhao W, Zhang L, Shao X, Deng J. 2010. Numerical study on the control mechanism of cloud cavitation by obstacles. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, **22**: 792-797.
- Zhou L, Wang Z. 2008. Numerical Simulation of Cavitation Around a Hydrofoil and Evaluation of a RNG κ - ε Model. *Journal of Fluids Engineering*, **130**: 011302.
- Žnidarčič A, Coutier-Delgosha O, Marquillie M. 2015. A new algorithm for DNS simulations of cavitating flows using homogeneous mixture approach. In: Simos T E, Tsitouras C eds. AIP Conference Proceedings, **1648**: 030018.
- Zou W, Yu K P, Arndt R E A, Zhang G, Li Z W. 2013. On the shedding of the ventilated supercavity with velocity disturbance. *Ocean Engineering*, **57**: 223-229.

(责任编辑: 许春晓)

Research progress on hydrodynamics of high speed vehicles in the underwater launching process

WANG Yiwei HUANG Chenguang[†]

Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China

Abstract Research on hydrodynamics of high speed vehicles in underwater launch process has a prominent engineering background, and contains typical frontier scientific issues. Relevant unsteady cavitating flow issues including instability and collapse of cavities, are of crucial importance to the analysis of dynamic load and underwater launching vehicles' safety. In this paper, we first introduce the main scientific problems and the control parameters. Then we review the physical mechanisms on the development instability, collapse and control methods of unsteady fluid cavitation. Finally, remaining challenges and development tendency for future research are given.

Keywords underwater launching, high speed hydrodynamics, cavitation stability, cavitation bubbles collapse, flow control by ventilation, load of fluid-structure interaction

Received: 28 May 2016; accepted: 22 May 2017; online: 30 May 2017

[†] E-mail: huangcg@imech.ac.cn

Cite as: Wang Y W, Huang C G. Research progress on hydrodynamics of high speed vehicles in the underwater launching process. *Advances in Mechanics*, 2018, 48: 201805

© 2018 *Advances in Mechanics*.



黄晨光, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 中国科学院流固耦合系统力学重点实验室主任. 主要研究方向包括水动力学、冲击动力学、流固耦合等. 曾获得中科院科技进步一等奖、国防科技进步二等奖等奖项. 现任装备发展部水动力学专业组专家、中国力学学会常务理事、流固耦合专业委员会副主任委员等. 在国内外学术期刊发表论文 100 余篇.



王一伟, 1983 年生, 研究员, 博士生导师. 主要研究方向包括高速水动力学、流固耦合等, 曾获得中船重工科技进步二等奖等奖项. 现任中国科学院青年创新促进会会员, 中国科学院青年联合会委员、力学学会流体力学专委会工业流体力学组成员、*Journal of Hydrodynamics* 编委等职. 近年来发表学术论文 40 余篇.