

空泡与自由面强耦合作用下透明水层闭合机理研究¹⁾

王广航^{*,+}, 王静竹^{+,2)}, 王一伟^{*,+}

^{*} (中国科学院大学未来技术学院, 北京 100049)

⁺ (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)

²⁾ (中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 随着空泡与自由面间距离逐渐减小, 空泡振荡诱导的自由面变形主要表现为丘型、冲天型、皇冠型、溅射型、破碎型等。前四种形式中, 自由面与空泡通常不会发生界面的直接接触, 表现为以界面间液态水为间接媒介的弱耦合作用。二者距离非常近的情况下的破碎型行为演化更为复杂, 空泡膨胀诱导自由面向上飞溅形成透明水层, 二者界面交迭形成气流交换的通路。与此同时, 通路内高压气体排出或外部气流侵入, 又会导致飞溅水层内部的压力剧烈变化, 驱动水层产生扩张和闭合等复杂的行为。空泡与自由面强耦合作用已开展的研究大都针对外观形态描述, 而空泡脉动与飞溅水层演化的强耦合机制尚不清楚。本文主要通过实验观测和数值模拟方法研究强耦合作用下的透明水层闭合机理。在实验中, 利用脉冲激光在水中聚焦的光学击穿原理生成空泡, 并定义空泡产生位置与自由面的距离 h 和无限水深最大空泡半径 R_{max} 的比值为 γ 。在数值模拟中, 本文采用 OpenFOAM 内可压缩求解器 CompressibleInterFoam 求解空泡脉动与飞溅水层的耦合作用。并使用大涡模拟 (LES) 与流体体积法 (VOF) 等算法来准确捕捉空泡通气的过程的小尺度结构。由实验结果知, 随着 γ 的增大, 依据水下空泡的闭合形态, 将水花分为完全敞口型、准闭合型到闭合型三类。针对闭合类水花, 空泡膨胀诱导自由面向上飞溅形成透明水层。与此同时, 通路内高压气体排出, 当外部气压大于空泡内部气压时, 外部气流侵入, 导致飞溅水层向中心运动。最后, 基于势流理论中速度与压强的关系, 通过分析数值模拟获得的速度场信息, 发现空腔内外压强差主导水花闭合过程, 而速度非定常项是求解内外压强差不可或缺的主导因素。

关键词: 空泡破碎; 水花; 大涡模拟

1) 国家自然科学基金优秀基金项目 (12122212)、中国科学院青年创新促进会 (Y201906 和 2022019)