

自由水面对近壁面气泡溃灭诱导壁面涡的影响

黄剑霖^{*,+}, 王静竹^{*,2)}, 王一伟^{*,+,**}

* (中国科学院力学研究所, 北京 100190)

+ (中国科学院大学未来技术学院, 北京 100049)

** (中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 近壁面和自由水面约束下的气泡溃灭在机械制造和生物医学工程领域有着重要的应用。当气泡稍远离壁面溃灭时 (无量纲距离 $\gamma_r > 1.3$), 就诱导壁面附近产生一个沿着壁面迁移的壁面涡, 相反 (无量纲距离 $\gamma_r < 1.3$) 则会产生一个远离壁面的自由涡。本研究研究结合了实验、数值模拟和理论建模, 重点研究了气泡溃灭诱导的壁面附近涡旋运动, 讨论了涡流产生的机理, 并从理论模型中给出了判据。结果表明, 引入自由水面会扩大壁涡的产生区间, 使得在更小的无量纲距离下从自由涡转变成壁面涡。由于自由水面的影响, 气泡溃灭产生一个更宽的射流会刺穿底部, 此时气泡更容易沿着壁面膨胀, 并在第二循环期间形成扁平形状。在这种情况下, 气泡第二次收缩形成向外流动而不是向上流动。研究基于拉格朗日公式建立了描述气泡在边界之间的径向运动 R 和质心位置 h 的理论模型。基于镜像法构建了两组无限的镜像气泡序列来满足自由水面和壁面的边界条件, 并结合气泡第二周期开始时 (t_c) 质心的迁移方向提出了涡旋运动种类的判据: 当向上流动占主导地位 ($h'(t_c) > 0$) 时, 会出现自由涡流, 而向下流动占主导作用 ($h'(t_c) < 0$)。理论模型得到了涡旋运动种类相图, 并利用实验结果得到了验证。数值分析表明, 受自由水面影响的壁面涡产生了更大的壁面剪切力和剪切面积, 能够进一步增加表面清洁的潜力。这些发现为超声波清洗等工程应用提供了新的参考。

关键词: 气泡动力学; 气泡溃灭; 多边界约束; 壁面剪切