

# 类球形空泡的动态特征识别与分析

李泓辰<sup>1,2</sup> 杨明<sup>2,2</sup> 刘鹏<sup>3,3</sup> 王静竹<sup>4,1,2</sup> 王一伟<sup>5,1,2\*</sup>

- (1. 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
3. 中国科学院力学研究所中国科学院微重力重点实验室, 北京 100190)

**摘要** 本文采用电火花空化法和高速摄影技术, 对近无限水域和 Ecoflex、PDMS 和不同浓度的明胶等软物质膜附近类球形空泡的脉动进行了探究。针对类球形空泡动态特征提取的需求, 基于 Matlab GUI 和图像处理技术设计了类球形空泡识别与特征提取软件, 并使用该软件对两类工况下空泡脉动的形态特点、空泡质心和半径等进行了提取, 并同基于 Rayleigh-Plesset 方程的理论解进行了对比。在实验中, 探究了不同无量纲空化发生高度下空化致软物质膜的大变形和非线性行为, 捕捉到了空泡溃灭发光、溃灭冲击波、软物质膜褶皱和穿刺等现象。理论计算与实验结果显示, 随着弹性模量的增加, 软物质膜对空泡脉动的限制作用逐渐增强, 主要体现在空泡半径的减小和非对称收缩上。本文的相关结果可为组织消融、无针注射等生物医学领域的相关应用提供一定参考, 设计的类球形空泡识别与特征提取软件, 可为单/多空泡检测和其他圆形检测相关的计算机视觉领域提供支持。

**关键词:** 电火花空化; 空泡动力学; 圆形检测; 软物质

## 一、实验方法

对于近无限水域类球形空泡和软物质膜附近的类球形空泡的动态行为两类问题, 设置了相同的实验系统, 两类工况的实验系统示意图如图 1 所示。

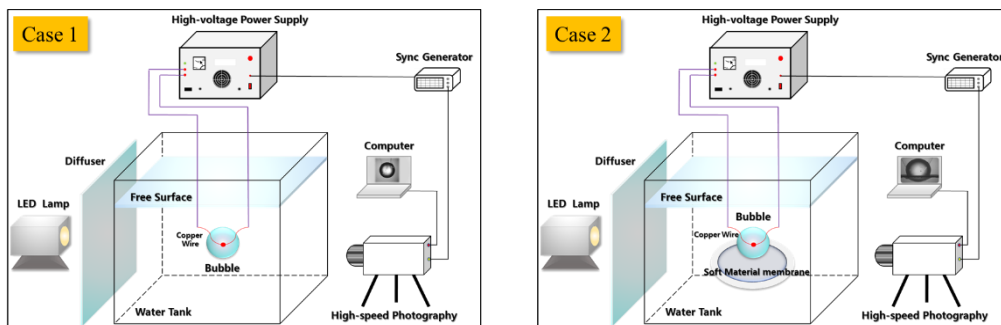


图 1 实验系统示意图

## 二、基于 Matlab GUI 的空泡动态特征识别与分析软件

采用 Hough 变换法来对空泡进行识别。为了提高识别的稳定性和可靠性, 先对图像进行灰度均衡、频域滤波、空域滤波、边缘检测、二值化、腐蚀与膨胀等预处理操作, 然后对图像分割后的图像进行 Hough 变换, 提取圆形的质心、半径等特征参数。理论计算部分基于 Rayleigh-Plesset 方程和 Akaki 模型。在对图片集中的空泡脉动序列图进行完识别和特征提取后, 可将提取的空泡半径同相关理论值进行对比, 并得出误差关系。

## 三、结果与讨论

### 3.1 空化致软物质膜的变形与非线性行为

