天津大学 Tianjin University

结构&声学: 声学和振动

COMSOL CONFERENCE 2026 SHENZHEN

基于修正Rayleigh-Plesset气泡动力学与非线性亥姆霍兹方程的壁面式声反应器非线性声场数值模拟

Numerical simulation of the nonlinear acoustic field in bath-type sonoreactor based on the modified Rayleigh-Plesset bubble dynamics and the nonlinear Helmholtz equation

任斯德[1], 杨博文[1], 刘丽艳[1,2*]

[1]天津大学化工学院, 天津市海河教育园雅观路135号;

[2]天津市化工安全与装备技术重点实验室, 天津市海河教育园雅观路135号

引言

- 近年来，槽式超声化学反应器在多个化工领域备受关注。其核心机制是空化效应，能够有效地促进化学反应。
- 由于空化效应的复杂性和随机性，准确预测空化场的分布仍然具有挑战性，这使得反应器设计的理论指导相对薄弱。随着计算机技术的发展，开发数学模型并进行数值模拟的预测方法显示出极大的便利性，但综合考虑空化气泡影响的数学模型较少谈及。
- 超声反应器的输入、结构等相关参数对空化场的影响机制尚不完全明确，这限制了对反应器性能的精确调控和优化。因此，进一步完善地探究其相关参数具有重要意义。
- 为补充先前的研究，本文基于修正的Rayleigh-Plesset气泡动力学方程，并结合考虑非线性衰减的亥姆霍兹方程，提出一种能够描述气泡尺寸变化及非均匀分布的数学模型。进而验证了该模型的合理性。所研究的参数包括驱动声压、液位高度以及较少涉及的驱动声波波形，旨在提高槽式声反应器在工业应用中的效率和适应性。

方法与验证

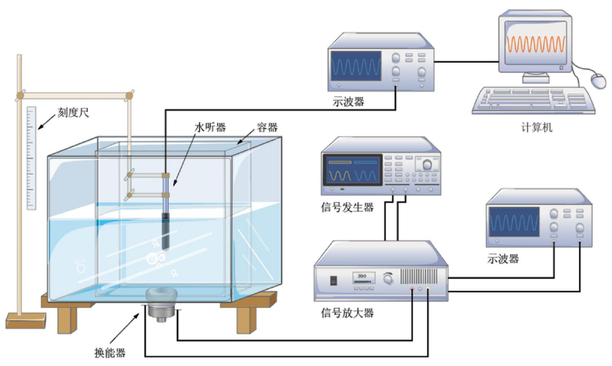


Fig.1. 槽式超声反应器和声压采集系统

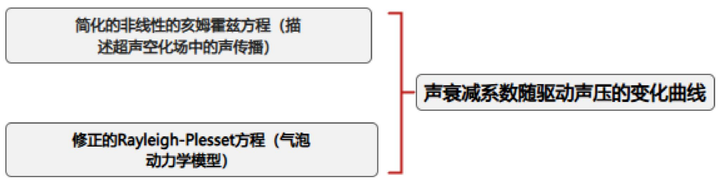


Fig.2. 理论构建思路(为描述气泡尺寸变化及非均匀分布，取气泡体积分数β随声压的变化并对气泡随时间变化的曲线取积分平均得到气泡初始平衡半径R_0)

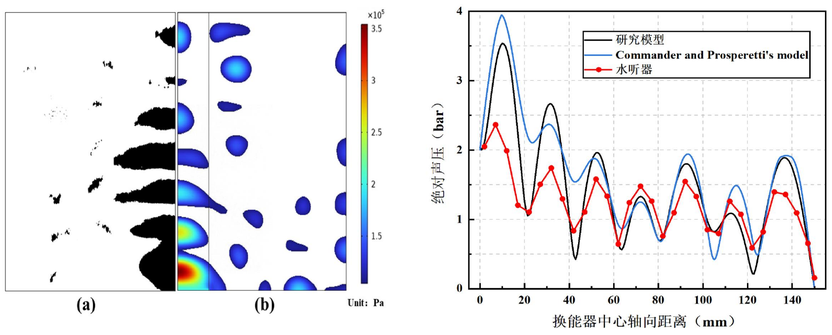


Fig.3. 铝箔腐蚀与水听器实验与模拟压力场对比，对数学模型进行了定性，定量验证

总结

该研究模型的非线性衰减能够预测与实验数据相同数量级的压力场。

- 研究驱动压力时，观察到声压反常衰减的现象，且随着驱动声压的增加，空化强度增幅趋于平缓，空化转化效益降低。
- 液位高度会影响空化场的驻波比及均匀性，液位相对较低时空化场强度分布与驻波理论简图相吻合；液位相对较高时，则出现驻波滞后效应；在中等液位高度131mm时，空化场均匀性最佳矩形波拥有波动最大的衰减系数。
- 此外，基于波形，综合分析前两者对空化性能的影响，得到在驱动压力幅值400 kPa，液位高131 mm条件下，三角波的空化率在所有条件中达到最高，这在一定程度上为优化空化场提供了借鉴。

结果与讨论

1.驱动声压的影响

- 在低压场0-0.5bar，较高驱动声压所占的体积比例更大，这是由于驱动声压较高时气泡数量增多，且脉动更为剧烈，导致产生更高比例的高频谐波，当声波在传播过程中逐渐衰减至低于空化阈值后，液体中无空化泡，不再有新的高频谐波产生，此后各次谐波以比基波更快的速度衰减，消耗更多基频的能量，导致在远处低声压场所占比例更大。
- 随着驱动声压的增加，空化率的增加趋于平缓，这是因为在一定程度上空化总体水平由声反应器的几何形状和换能器个数决定。驱动声压从1bar、2bar、3bar提高到2bar、3bar、4bar，空化增长率及剧烈空化增长率均提高20%以上，其他声压则效益较低。说明一昧提高输入，这只利于一些极端的应用。

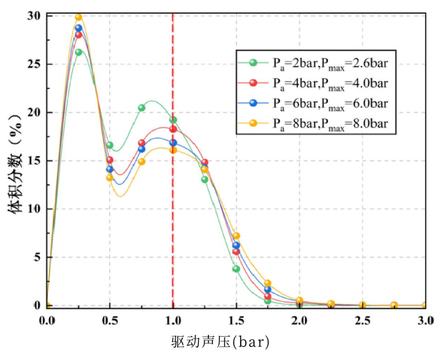


Fig.4. 不同驱动声压下，空化场中绝对压力体积占比的变化趋势

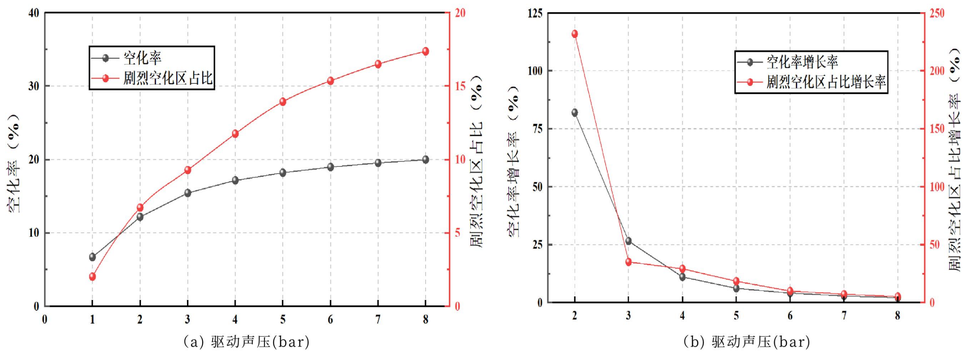


Fig.5. 不同驱动声压对空化性能的影响规律

2.液位的影响

- 在换能器附近的空化活动较为剧烈，且在低于液面 1/4 波长处均会形成稳定的空化区，这是因为液体的特征阻抗大约为气体的 3500 倍，声波在液-气交界面会发生全反射。当液面处于相对较低高度时，与右侧的驻波理论简图达到很好的对应性。当液面相对较高时，仿真声压场则出现明显的滞后现象。
- 从反应器底部以纵向1/2λ为距离单位划分体积区块，并计算每个区块的空化率，来进行空化场的均匀性分析。H=75mm，94mm，112mm，131mm时均匀性良好，H=150mm的均匀性较差，这是因为高度超过一定水平后，驻波场的增益将很难弥补结构不紧凑导致的空化削弱，此时中心远场空化区以及外围空化区存在明显的衰减。另外，通过对比可知，H=131mm时，均匀性同空化率一样也具有较高的水平。

Fig.6. 仿真声压云图与理论驻波图像

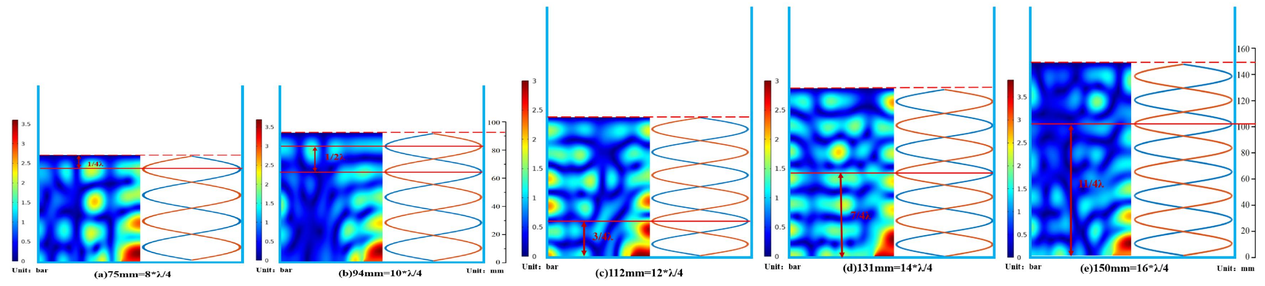
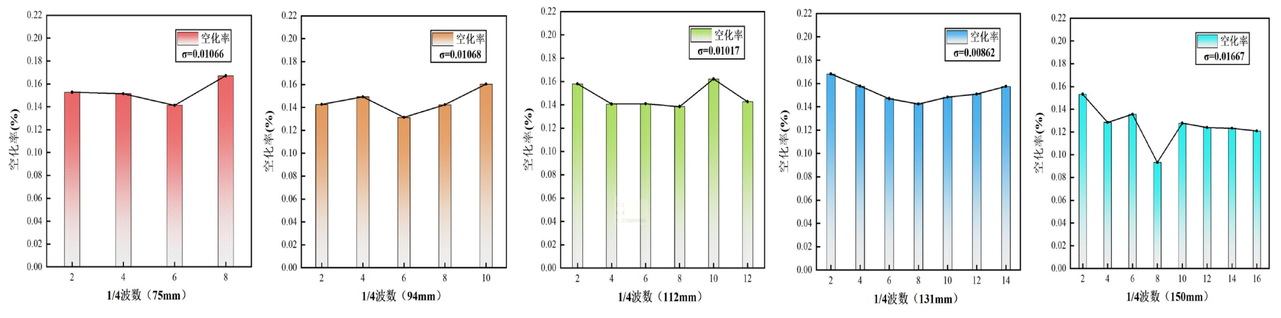


Fig.7. 每半波长的体积区块所对应的空化率分布



3.波形的影响

- 矩形波驱动下的空化泡在半径上较慢达到峰值，接近初始半径的12倍这是因为矩形波由于其陡峭的上升和下降沿，导致了快速的压力变化，从而有利于空化泡的形成和膨胀。
- 正弦波和三角波均表现出良好的能量传输特性，矩形波波动和衰减最大。这是由于矩形波能够产生更大的空化气泡导致局部强烈空化，加快基频能量损耗和衰减。
- 在P_A=4bar，H=131mm下，三角波的空化率在三者所有条件中达到最高，超过20%。同时，矩形波和正弦波也均在H=131mm，P_A=4bar达到自己的最大值，这与上述结论一致，也意味着声场最佳液位及输入声压的选取与驱动波形无关。

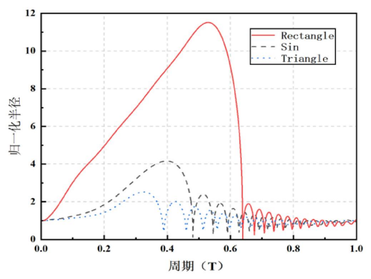


Fig.8. 不同驱动波形下，空化泡的归一化半径在一个周期内的变化

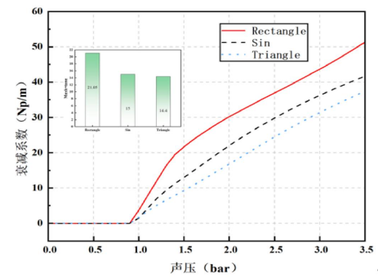
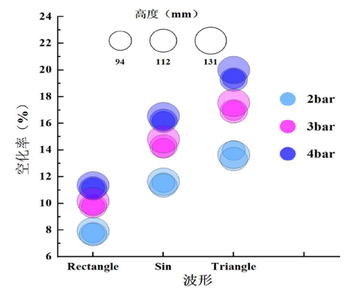


Fig.9. 由非线性模型求解的空化场衰减系数规律

Fig.10. 波形、驱动声压和高度三者对活跃区域的综合影响，空化率表示f0=40kHz时的$\square_{blake}$



参考文献

[1] Rashid Jamshidi,B. Pohl,Urs A. Peuker, et al. Numerical investigation of sonochemical reactors considering the effect of inhomogeneous bubble clouds on ultrasonic wave propagation. Chemical Engineering Journal. 2012;189-190 (0):364-375.
[2] Zongbo Zhang,Tiantian Gao,Xiaoyang Liu, et al. Influence of sound directions on acoustic field characteristics within a rectangle-shaped sonoreactor: Numerical simulation and experimental study. Ultrasonics Sonochemistry. 2018;42 (0):787-794.
[3] Zedong Wang,Zhiping Shi,Liyan Liu. Numerical simulation of cavitation performance in a scaled-up bath-type sonoreactor considering inhomogeneous bubble cloud. Chemical Engineering Journal. 2023;465 (0):143070-143070.

致谢

该工作得到了国家自然科学基金（批准号：22178250）的资助。