

基于能量观点的双泡相互作用研究

卞真东¹, 杜特专²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京, 100080, Email: zhend_b@qq.com)

(2. 中国科学院力学研究所, 北京, 100080, Email: dutezhuan@imech.ac.cn, 通信作者)

摘要: 利用 OpenFOAM 开源软件探究无限水域中单泡模型和双泡模型在运动过程中的能量变化。首先, 利用可压缩 Keller-Herring 气泡动力学方程来验证 CFD 计算模型, 结果表明 CFD 模拟得到的半径、压强以及温度等参数变化与理论解以及相应的参考文献吻合良好。其次, 证实了动能和能量模型中总功的结果基本一致, 气泡势能与气泡内压做功趋势保持一致。在单气泡能量分析的基础上, 研究更一般条件下双泡脉动过程的能量传递。分析气泡间距 D 、 A 泡内压 P_A 和 B 泡初始半径 R_B 对双气泡相互作用的影响, 给出了双泡相互作用过程中的能量传递, 包括体积、做功的变化。得到了 D , P_A , R_B 这 3 个参数对能量传递的影响规律: D 越大动能传递率和势能传递率都越小; P_A 越大动能传递率越大而势能传递率越小; 随着 R_B 变大, 势能传递率持续增大而动能传递率先增大后减小。

关键词: OpenFOAM; 功能关系; 气泡动力学; 双泡

1 引言

空化会对水下高速航行器和高速推进器造成结构破坏以及噪声等问题, 极有可能影响设备的正常使用。另一方面合理利用空化现象可以在例如超声碎石^[1]、鱼雷减阻^[2]、表面清洗^[3]等领域发挥重要作用。空化的本质是微小气泡群, 因而对气泡群脉动特性和溃灭机理进行研究, 掌握气泡群溃灭的围观机制及宏观效应, 才能更好的抑制或者利用空化效应。王诗平等^[4]从波动方程出发, 建立可压缩性非球形气泡模型, 发现可压缩性模型中气泡射流较小, 随后通过电火花产生两个气泡^[5], 发现气泡存在融合、对射流以及相反射流等现象; 张阿漫等^[6]通过 FFTM 和 HOBEM 方法探讨影响气泡群膨胀、坍塌、迁移以及射流形成的影响因素。在多气泡动力学的研究过程中发现初始半径、泡-泡间距以及泡内压力等参数至关重要, 张凌新等^[7]发现气泡群总体上存在溃灭时间的延迟以及后期加速等现象, 增加气泡数或减小气泡间距会促进该现象; 王德鑫等^[8]从双泡间的压力波出发, 分析气泡初始半径、泡-泡间距等参数对双泡相互作用的影响, 发现气泡的初始半径对泡内温度以及气泡膨胀影响很大, Bjerknes 力对气泡间距变化非常敏感; 清河美等^[9]通过三泡、五泡结构研究中

心小气泡动力学特征,发现随着周围大气泡的半径增大,中间小气泡会发生延迟膨胀甚至出现被完全抑制膨胀的现象; E. Lauer 等^[10]通过研究水平空泡阵列的溃灭,发现通常较小的气泡间距会产生更大的溃灭压力。目前很多学者从能量的角度对气泡进行研究, S Merouani 等^[11]研究超声辐射下的单气泡在不同超声频率、振动频率和超声强度等参数对声化学和声致发光的影响。YT Didenko 等^[12]从微观角度量化气泡溃灭过程中的气体能量耗散以及分析来源; Tiwari 等^[13]把气泡外 2 倍大小领域内的流体动能作为气泡的动能,研究近壁面接近 50 个气泡的发展与溃灭,发现在气泡群溃灭过程中总是最外层气泡先发生溃灭,层次递进,最终在中心产生最大的冲击压力。该方法能够精细的模拟气泡群溃灭过程压力脉冲的形成,但由于对每个气泡都进行直接模拟,因此需要消耗大量的计算资源。目前大多数学者的关注重点是多泡间的相互作用,对气泡能量的研究也基本注重于泡内气体而很少涉及功能关系在气泡群相互作用中所起到的作用。

针对气泡群溃灭压力产生机理,从功能关系出发建立气泡能量模型,用于能量传递模型并计算双泡运动过程中的能量传递以及分析能量变化与双泡运动的关系,目的是形成气泡群能量模型并计算不同工况下多泡溃灭脉冲以及用能量来分析气泡群的运动。

2 气泡能量模型

将气泡和周围的水体看成是一个整体,气泡系统的能量为气泡势能以及远场势能两部份,水体系统的能量为动能。假设气泡运动过程保持球形,且忽略液体的可压缩性。

2.1 水体动能与对水体做功的关系

如图1所示,设气泡半径为 R , 取距气泡中心 r ($r \rightarrow \infty$) 做球面边界,气泡和球面边界内的流体形成控制体 Σ 。设经过时间 dt , 气泡半径变化为 dR , r 处变化为 dr 。通过两个控制面的流量是相等的,得到公式(1):

$$4\pi R^2 \cdot dR = 4\pi r^2 \cdot dr \quad (1)$$

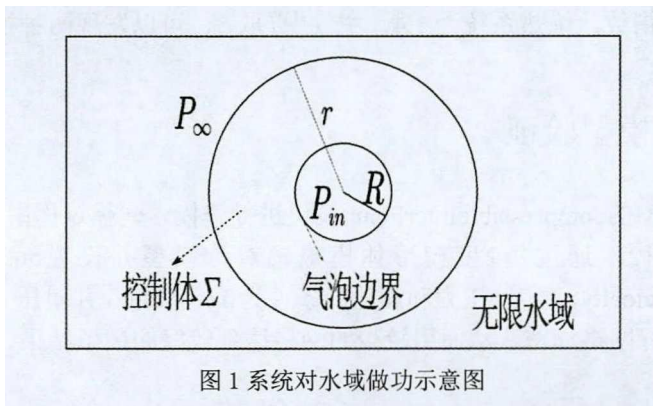


图 1 系统对水域做功示意图

记 P_∞ , P_{in} 和 V 分别为无穷远压力、泡内压力和气泡体积, 在 dt 内系统对水域做的总功为:

$$dW = 4\pi R^2 \cdot P_{in} \cdot dR - 4\pi r^2 \cdot P_\infty \cdot dr = (P_{in} - P_\infty)dV \quad (2)$$

式(2)表明, 系统对水体做功只需考虑气泡内压、无穷远压力和气泡半径这3个参数, 对于水体来说, 只有动能发生变化, 因此气泡对水体做功转化为水体动能。

2.2 气泡系统与气泡做功的关系

气泡系统与受外力驱动下而发生运动的弹簧系统十分类似, 远场势能类比外力做功而气泡势能可以类比弹簧势能。气泡膨胀, 气泡对水体做功, 泡内温度降低, 气泡的内能减少; 反之增加。根据热力学均分理论和理想气体方程并考虑气泡边界绝热, 得到气泡内能 E_T 的计算公式为:

$$E_T = \frac{i}{2} \times nRT = \frac{i}{2} \cdot P_{in} V \quad (3)$$

i, n, R, T 分别表示泡内气体的自由度、物质的量、理想气体常数以及温度。定义气泡势能为任意时刻气泡内能与初始时刻气泡内能的差值(初始时刻是最大势能点, 其值为0), 即:

$$E_{gas} = \frac{i}{2} \cdot (P_{in} V - P_{in,0} V_0) \quad (4)$$

由于气泡只和水体有能量交换, 因此气泡做功只考虑气泡对水体做功, 即:

$$dW_b = P_{in} dV = 4\pi R^2 P_{in} dR \quad (5)$$

两者满足 $dE_{gas} = dW_b$ 。从绝热系统出发仍然得到相同结论, 其公式推导如下

$$P_{in} V^\gamma = P_{in,0} V_0^\gamma = \text{const} \quad (6)$$

结合式(5)和式(6)并对 dW_b 进行积分, 有:

$$\int_{V_0}^V dW_b = \int_{V_0}^V P_{in} dV = P_{in,0} V_0^\gamma \int_{V_0}^V \frac{1}{V^\gamma} dV = \frac{1}{1-\gamma} (P_{in} V - P_{in,0} V) \quad (7)$$

式(7)中 γ 表示多方指数, 绝热系统为 1.4, 空气中 i 取 5, 可以发现两种推导结果一致。

3 数值模拟及模型验证

采用OpenFOAM的compressibleInterFoam模块进行建模, 建模过程中的参数见表1。本文CFD模型见图2, 通过用2度楔形体模拟轴对称模型并设置outlet的速度边界为pressureInletOutletVelocity, 温度、压力和相边界条件为fixedValue, 并对压力进行消波处理, 模型在气泡附近进行网格加密, 从而用较少的网格达到较好的模拟结果。

表 1 单泡模型建模参数

参数	无穷远 压强	无穷远 温度	静水 密度	黏度	声速	表面 张力	泡内 压强	泡内 温度	气泡初 始半径
单位	MPa	K	kg/m ³	×10 ⁻⁴	m/s	N/m	MPa	K	×10 ⁻⁴ m
数值	0.1	300	1027	3.65	1500	0.07	60	300	6.0

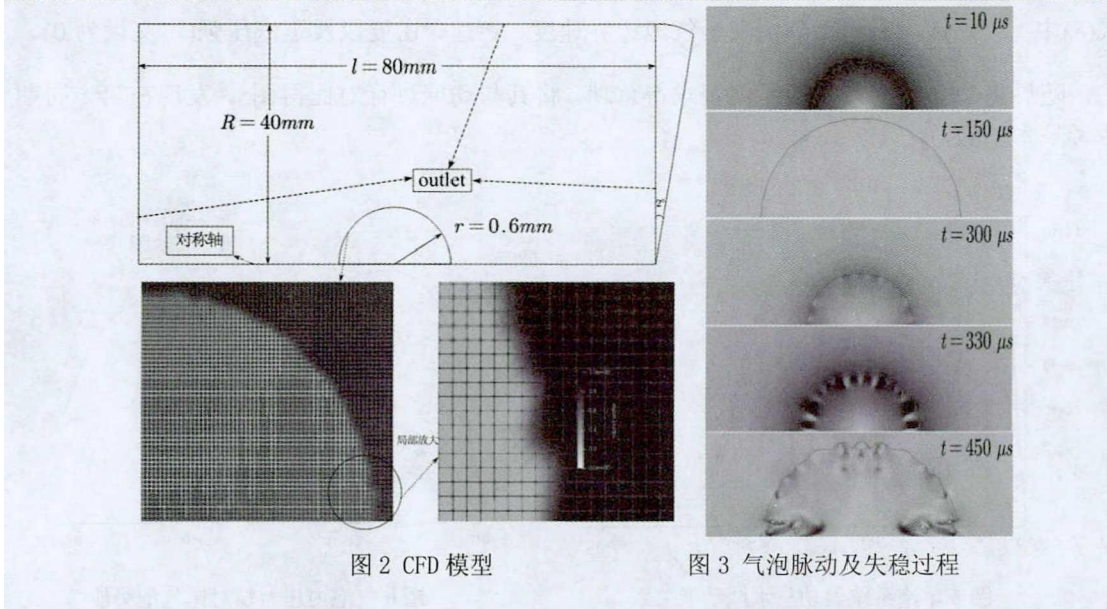


图 2 CFD 模型

图 3 气泡脉动及失稳过程

经过计算得到气泡流场如图3所示，图中轮廓线为气泡边界，图像的灰度值越大则表示速度越大，气泡在内压驱动下经历膨胀、收缩、失稳膨胀以及失稳收缩4个阶段，失稳的原因是由于气泡收缩到最小半径时内部网格不足，导致膨胀时无法维持球形气泡。

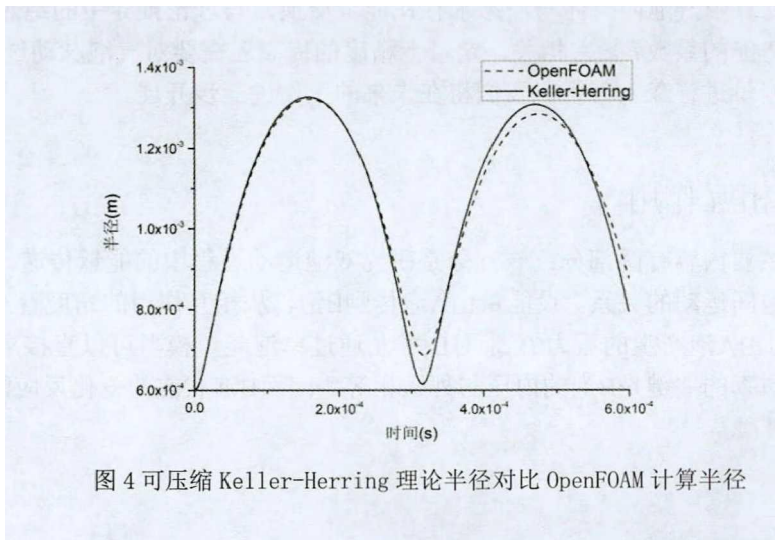


图 4 可压缩 Keller-Herring 理论半径对比 OpenFOAM 计算半径

对比可压缩Keller-Herring理论半径(式8)和OpenFOA计算半径(图4),发现在第一周期两者基本一致。

$$\left(1 - \frac{\dot{R}}{c}\right) R \ddot{R} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{\dot{R}}{3c}\right) \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} (P_L - P_{in} - P_{\infty}) \left(1 + \frac{\dot{R}}{c}\right) \quad (8)$$

式(8)中, \dot{R} , c , ρ , P_L 分别表示气泡边界速度、声速、密度以及蒸汽压强(本文设为0)。

随后将CFD数据带入能量模型求得总功,将其与动能进行对比得图5,发现在第一周期两者基本一致。

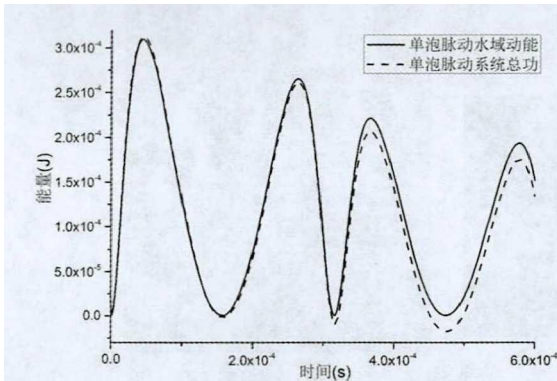


图5 单泡系统做功与水域动能关系

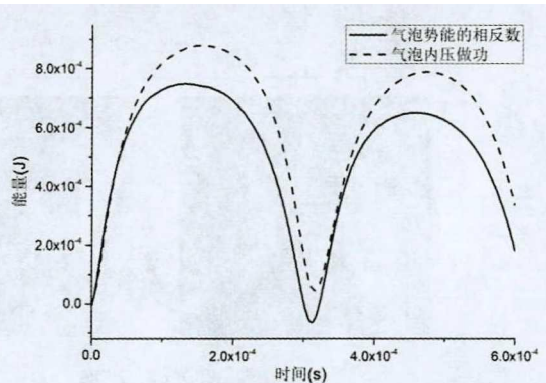


图6 气泡内压做功对比气泡势能

在假设泡内气体自由度为5的情况下,为方便比较气泡势能和内压做功,对气泡势能取相反数得图6,发现在数值上两者存在误差,但变化趋势一致,产生误差的主要原因可能是因为CFD计算中气泡内气体与液态水存在能量交换,与理论推导中的绝热假设有所差别。这与气泡势能的系数 i 紧密相关,定量上精度的提高还需要对气泡脉动过程中通过气泡界面传递的能量进行深入分析,我们将在未来的工作进一步开展。

4 双泡相互作用

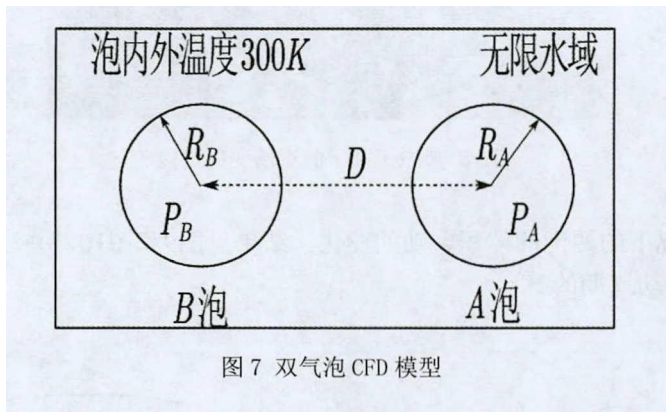
本节主要内容有两部分:一部分是研究双泡运动过程中的能量传递;另一部分是能量变化与气泡间运动的关系。设能量由A泡传到B泡,从相互作用的角度看,能量传递应表现为B泡表面由A泡产生的压力 $P_{A \rightarrow B}$ 对B做功,通过单泡能量模型可以直接求得系统的功能变化,本节仿真的关键是B泡的内压与外压相等,因而B泡状态的变化反应能量的传递。

4.1 双泡模型

设计如图7所示的双泡模型, A泡表示脉动气泡, B表示观测气泡(内压与外压相等), D 是两个气泡中心的距离。本实验主要目的是得到从A泡传递到B泡的能量, 定义B泡最大总功与A泡最大总功的比值为动能传递率, 同理定义势能传递率, 两者的计算见式(9)。

$$\eta_k = \frac{\max |W_B|}{\max |W_A|}, \eta_c = \frac{\max |W_{bB}|}{\max |W_{bA}|} \quad (9)$$

上式中 W_A , W_B 表示A、B泡的总功, W_{bA} , W_{bB} 表示A、B泡的内压做功, 由第2章分析可知, 动能与总功、气泡势能和气泡内压做功存在转换关系, 而双泡系统中无法区分不同气泡对某个区域动能的贡献, 因而在此以总功的变化代替动能的变化表示在双泡运动过程中的动能传递(势能传递同理)。



4.2 结果分析

典型工况下的双泡建模参数见表2, 水体的建模参数见表1, CFD结果见图8。

表 2 典型工况双泡建模参数

类别	A 泡			B 泡			其他因素
参数	内压	温度	初始半径	内压	温度	初始半径	间距
单位	MPa	K	$\times 10^{-4}m$	MPa	K	$\times 10^{-4}m$	$\times 10^{-4}m$
数值	0.1	300	5	60	300	0.5	15

图9中, 黑色轮廓表示气泡的形状, 图中灰度值越大则速度越大, 左为B泡右侧为A泡, 可以看到A泡膨胀收缩过程似乎不受B泡影响但是后期发生溃灭产生相反射流, B泡在形态上发生较大的变化也产生未击穿的相反射流。在其它工况下也会发生相反射流(存在击穿B泡的射流, 如果两泡的初始条件接近则会发生相对射流)以及发生明显的气泡相对运动。

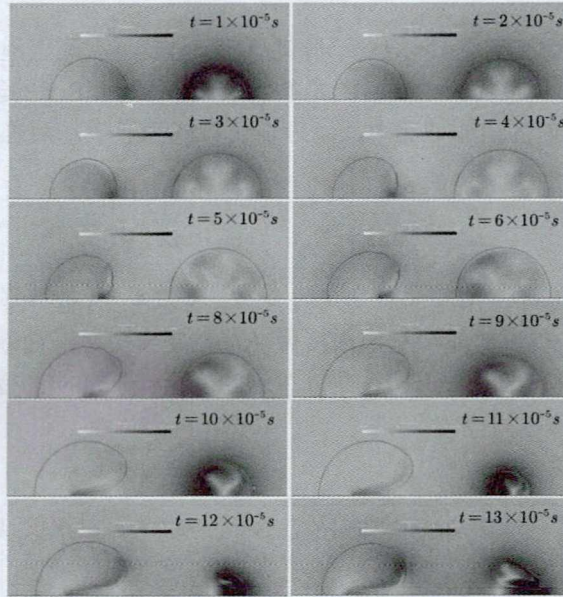


图8 典型工况下的流场变化过程

接下来分析该工况下的两泡的体积、功的变化，结果见图9和图10，并注意到A泡的运动周期是接近B泡的运动周期的2倍。

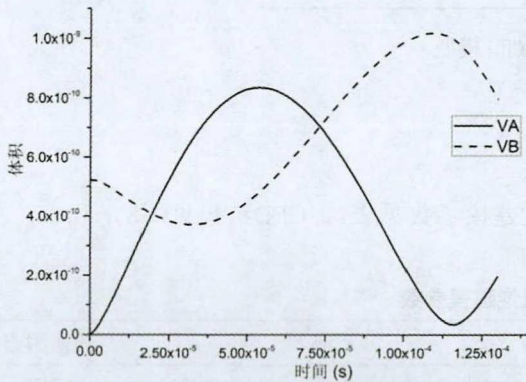


图9 双泡体积随时间变化

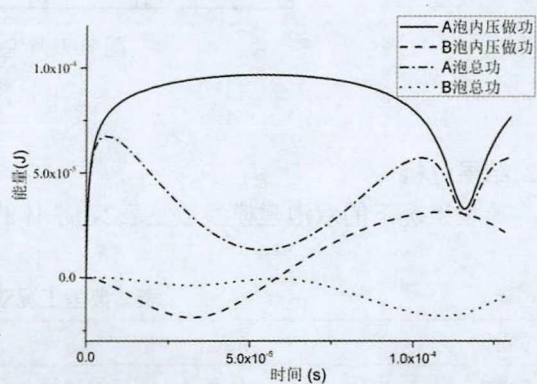


图10 双泡做功随时间变化

图9中，由于B泡相对于A泡蕴含的能量过小，因而A泡的体积变化不太受B泡的影响和单泡下的脉动结果基本一致，而B泡先接收到A泡的能量从而发生收缩，当积累到足够能量时发生类似单泡的脉动。图10中，A泡内压做正功能量减少，A泡总功变化和单泡情况类似；而B泡不太相同，内压先做负功势能增加，随后做正功势能减少，B泡总功始终为负，即双泡运动过程中B泡总是保持储能状态但也存在能量释放的过程。

4.3 参数影响分析

通过研究参数 P_A , D , R_B 对结果的影响以下分 3×5 共13组不同工况(3、8、13组为典型工况)对进行CFD实验, 得到的能量传递率结果见表3。

由表3可得 P_A , D , R_B 这三个参数对能量传递的影响规律: P_A 越大动能传递率越大而势能传递率越小; D 其越大动能传递率和势能传递率都越小; 随着 R_B 越大, 势能传递率持续增大而动能传递率先增大后减小。

表3 不同初始条件下的能量传递率

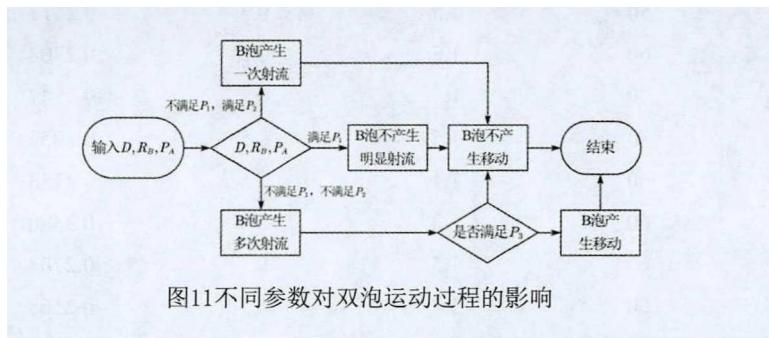
数据 编号	P_A	D	R_B	η_k	η_c
	(MPa)	(mm)	(mm)	1	1
1	40	1.5	0.5	0.2272	0.3360
2	50	1.5	0.5	0.2512	0.3279
3	60	1.5	0.5	0.2704	0.3226
4	70	1.5	0.5	0.2847	0.3112
5	80	1.5	0.5	0.2952	0.2979
6	60	1.1	0.5	0.4153	0.3985
7	60	1.3	0.5	0.3380	0.3587
8	60	1.5	0.5	0.2704	0.3226
9	60	1.7	0.5	0.2168	0.2847
10	60	1.9	0.5	0.1769	0.2596
11	60	1.5	0.3	0.1420	0.1502
12	60	1.5	0.4	0.2315	0.1956
13	60	1.5	0.5	0.2704	0.3226
14	60	1.5	0.6	0.2521	0.4098
15	60	1.5	0.7	0.2028	0.4873

三组实验在图形上最为显著区别: 随着 P_A 增大B泡会产生更大、更快的变形(对应能量传递率递增), A泡形态在不同 P_A 下变化不明显。随着 D 的减小, 而B泡产生的射流越来越激烈(对应动能传递率递增且增幅较大), 而A泡都产生明显射流。对比不同的 R_B , 随着 R_B 的增大, B泡占有的空间增大, 因而最终的变形量最大, 由于B泡内压的不确定性无法判断其势能的变化, 但通过表3可以发现势能传递率持续上升并有较大增幅, 对流场的观测发现总体上B泡周围的速度是减小的, 因此认为 R_B 增大的结果是势能储存量的增加。

总结3个参数对能量传递的影响以及双泡对应现象: P_A 对能量的传递率有明显的影响; 间距 D 对气泡运动的剧烈程度有明显的影响; R_B 反映能量的储存, 对势能的传递更为敏感。当然, 三个参数的影响是耦合的, 比如更大的 R_B 在一定程度上会影响气泡运动的剧烈程度。

5 总结

针对气泡群溃灭压力产机理，通过构建能量模型探索单泡与水体的功能关系。首先对比可压缩Keller-Herring气泡动力学方程计算半径以及考虑了液体可压缩性的OpenFOAM算例计算半径，发现两者基本吻合；之后通过CFD验证能量模型的准确性，发现动能与总功在第一周期基本相同而气泡势能的绝对值与内压做功变化趋势基本一致；随后把能量模型运用于双泡模型并进行建模，结果发现双泡运动与能量变化存在关系并由 P_A, D, R_B 这三个参数所支配；本文对这些参数进行定量分析，发现这三个参数会影响气泡运动的剧烈程度以及B泡的储能能力，随后定性描述三个参数如何影响气泡的运动。



实际上，本文同样发现双泡运动存在溃灭周期延长现象，同时相对射流、相反射流以及气泡迁移等现象的发生存在临界条件，将其规律总结如图11所示，当满足相应条件 P 时可得对应结论。之后的工作重点是定量研究能量与气泡运动之间的规律，以及通过能量的方法求得区分气泡不同运动的临界条件并完善气泡群能量模型。

参考文献

- 1 Philipp A, Delius M, Scheffczyk C, et al. Interaction of lithotripter - generated shock waves with air bubbles[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 93(5): 2496-2509.
- 2 Bushnell D. Turbulent drag reduction for external flows[C]//21st Aerospace Sciences Meeting. 1983: 227.
- 3 Ohl C D, Arora M, Dijkink R, et al. Surface cleaning from laser-induced cavitation bubbles[J]. Applied physics letters, 2006, 89(7): 074102.
- 4 王诗平, 孙士丽, 张阿漫, 等. 可压缩流场中气泡脉动数值模拟[J]. 力学学报, 2012, 44(3): 513-519.
- 5 王诗平, 张阿漫, 刘云龙, and 王超. 同相气泡耦合特性实验研究. 力学学报, 44(1): 56 - 64, 2012.
- 6 张阿漫, 姚熊亮, 李佳. 气泡群的动态物理特性研究[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1672-1682.
- 7 张凌新, 闻仲卿, 邵雪明. 多泡相互作用对气泡溃灭的影响[J]. 力学学报, 2013, 45(6): 861-867.

- 8 王德鑫. 耦合双泡声空化特性的理论研究[J]. 物理学报, 2018, 67(3): 201-208.
- 9 清河美. 空化多泡中大气泡对小气泡空化效应的影响[J]. 物理学报, 68(23): 234302.
- 10 Lauer E, Hu X Y, Hickel S, et al. Numerical investigation of collapsing cavity arrays[J]. *Physics of Fluids*, 2012, 24(5): 052104.
- 11 Merouani S, Hamdaoui O, Rezgui Y, et al. Energy analysis during acoustic bubble oscillations: relationship between bubble energy and sonochemical parameters[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(1): 227-232.
- 12 Didenko Y T, Suslick K S. The energy efficiency of formation of photons, radicals and ions during single-bubble cavitation[J]. *Nature*, 2002, 418(6896): 394-397.
- 13 A Tiwari, C Pantano, and JB Freund. Growth-and-collapse dynamics of small bubble clusters near a wall. *Journal of Fluid Mechanics*. 775:1-23, 2015.

Interaction during bubble collapse

BIAN Zhen-dong¹, DU Te-zhuan²

(1. NUC, Taiyuan, 038507. Email:zhend_b@qq.com)

(2. Engineering Science, Beijing, 100080. Email:dutezhuan@imech.ac.cn, Corresponding Author)

Abstract: In this paper, using OpenFOAM to explore the energy changes of bubble model in infinite waters. Firstly, the CFD calculation model is verified by the compressible Keller-Herring bubble dynamics equation. The results show that the parameters such as radius, pressure and temperature obtained by CFD simulation are in good agreement with the theoretical solution and the corresponding references. Secondly, it is confirmed that the results of kinetic energy and total work in energy model are basically consistent, and the trend of bubble potential energy and bubble-work is consistent. On the basis of single bubble energy analysis, the energy transfer of double bubble pulsation process under more general conditions is studied. The effects of bubble spacing, inner pressure of A bubble and initial radius of B bubble on the interaction between two bubbles are analyzed, and the energy transfer during the interaction between two bubbles is given, including the change of volume and work. The influence of P_A , D and R_B on energy transfer is obtained: the greater d is, the smaller the kinetic energy transfer rate and potential energy transfer rate are; The larger P_A is, the greater dynamic energy transfer rate is and the smaller potential energy transfer rate is. With the increase of R_B , the potential energy transfer rate increases continuously, while the kinetic energy transfer increases first and then decreases.

Key words: OpenFOAM; Functional relationship; Bubble dynamics; Double bubble