

不同类型气泡组成的混合泡群声空化特性*

清河美 那仁满都拉†

(内蒙古民族大学数理学院, 通辽 028043)

(2020年3月14日收到; 2020年5月21日收到修改稿)

声空化实验中经常观察到由许多空化气泡组成的各种泡群结构. 本文利用气泡群及群内任一气泡的 Rayleigh-Plesset 方程并结合 van der Waals 型过程方程, 研究了不同类型气泡组成的混合泡群中的气泡半径、泡内温度和群内压力脉冲变化规律, 得到以下结果: 相同尺寸相同气体气泡和相同尺寸不同气体气泡组成的两种泡群中气泡所含的不同气体对泡内温度有较明显的影响, 但对气泡半径变化和群内压力脉冲峰值的影响较小; 不同尺寸相同气体气泡和不同尺寸不同气体气泡组成的两种混合泡群中, 随着大气泡数的增多, 大小气泡内温度开始快速下降, 之后大泡内温度逐渐趋近于纯大气泡组成泡群的泡内温度, 小泡内温度逐渐趋近于许多大泡辐射作用下的单一小气泡泡内温度; 气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值, 先急剧减小到拐点, 之后平稳增加并逐渐趋近于纯氩气大气泡和纯氮气大气泡组成泡群内的压力脉冲峰值; 群内大气泡数占比对泡群空化特性有重要影响, 只有大气泡数占比达到一定值后泡群中才能出现不同尺寸气泡同时崩溃的现象.

关键词: 球状泡群, 不同类型气泡, 膨胀与崩溃, 泡内温度, 群内压强

PACS: 43.25.+y, 43.35.+d, 47.55.dd

DOI: 10.7498/aps.69.20200381

1 引言

超声作用于液体时所产生的不同尺寸的空化气泡往往会以各种群式结构振荡^[1-3]. 这种由大量空化气泡组成的群式结构的空化特性一直是人们重点关注的问题. 文献[4]建立了丝状气泡群和球状气泡群的动力学方程, 并对泡群的振动及多泡声致发光特性进行了研究. 文献[5]建立了由不同尺寸气泡组成的球状泡群的动力学模型, 研究了相同尺寸和不同尺寸气泡组成的泡群中气泡的线性和非线性振动, 发现了泡群内两种不同尺寸的气泡同步崩溃以及由于一种尺寸气泡的存在使另一种尺寸气泡的崩溃变得更彻底的规律. 文献[6]对单一和两种混合气泡组成的泡群内气泡初始半径、气泡数量、声频率及声压对气泡动力学特性的影响进行了数值研究. 文献[7]在气泡群振动模型的基础上,

考虑了气泡间耦合振动的影响, 得到了均匀球状泡群内振动气泡的动力学方程, 并以此为基础分析了气泡的非线性声响应特征. 文献[8]从泡群中气泡动力学方程出发, 对泡壁运动方程进行线性约化, 得到了球状泡群中气泡谐振频率的表达式, 并讨论了泡群中气泡的尺寸、数量及间距对谐振频率的影响. 文献[9]联立非线性声波方程和 Keller-Miksis 方程并用数值方法分析了混合气泡与声场的相互作用、气泡之间的相互作用以及混合情况下的频谱特性. 文献[10]对环形声源激励下圆盘中液体的空化问题进行研究, 提出了通过控制圆盘中心处温度来增强圆盘内液体空化效应的一种有效方法. 文献[11]研究了由三泡和五泡组成的多泡系统中周围大气泡对中间小气泡空化效应的影响, 发现了适当条件下小气泡会被完全抑制或可以发生延迟膨胀现象. 文献[12]考虑气泡壁上的质量交换、热传导和化学反应等效应, 研究了声压幅值、频率和气

* 国家自然科学基金(批准号: 11462019)和内蒙古自治区研究生科研创新项目(批准号: S2018112002Z)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: nrmdlbf@126.com

泡数对球状泡群内的温度和氧化剂生成量的影响,进而给出了有效降解不同有机污染物的一种方法.文献 [13]提出了稳态声场下产生气泡群的一种实验方法,并研究气泡群的形成和平移运动,指出气泡群和平移主要是由次 Bjerknes 力和惯性力引起.文献 [14]数值研究了声场中双泡的脉动和平移,并指出声场引起的气泡脉动使它们平移,不同的脉动导致不同的平移和不同的相互作用特性.文献 [15]对饱和氩气的 NaOH 水溶液中空化泡的光谱进行了数值模拟研究,证明了随着声压幅值的增大,辐射强度增强,双峰钠 (Na-D) 线谱的两个峰值会合并为一个峰值,且半峰宽度增大.文献 [16]推广并深入开展了文献 [5] 的研究,进一步明确解释了球状泡群中气泡的线性和非线性振荡规律.

以上关于气泡群的研究中,考虑的气泡群都是相同尺寸或不同尺寸的内含相同气体的气泡组成的泡群,没有考虑泡群内气泡含有不同气体的情况.然而,关于多泡声致发光的实验中人们通常注入不同的惰性气体来增强泡群的声致发光效应 [17–20],这有可能导致泡群内气泡含有不同的气体.因此,有必要研究由不同尺寸、不同气体气泡组成的泡群的声空化特性.本文在对声场作用下注入氦气的磷酸溶液中多泡声致发光现象进行实验观察的基础上,针对观察到的球状泡群,利用泡群和泡群内气泡的 Rayleigh-Plesset 方程以及 van der Waals 型过程方程,研究不同尺寸、不同气体气泡组成的球状泡群内气泡的声空化特性.

2 实验观察与理论模型

实验中,把注入氦气的浓度为 85% 的磷酸溶液装入容量为 500 mL 的石英烧杯中,并采用频率为 20 kHz 的超声波作用于磷酸溶液,观察和记录磷酸溶液中产生的多泡声致发光现象.实验观察发现,随着超声波强度的调节,液体中会形成球状泡群、链状泡群、星点泡群等各种群式结构,其中重点记录的球状泡群结构如图 1 所示.由图 1 可以看到,超声作用下形成的空化泡群聚集在类似球形的空间区域并发光,且此类球状泡群的尺寸大约在 1–2 mm 的范围内.

为了从理论上研究这种泡群的声空化特性, Nasibullaeva 和 Akhatov [5,16] 提出了球状泡群模型.提出模型时假设: 1) 泡群和泡群内的每个气泡

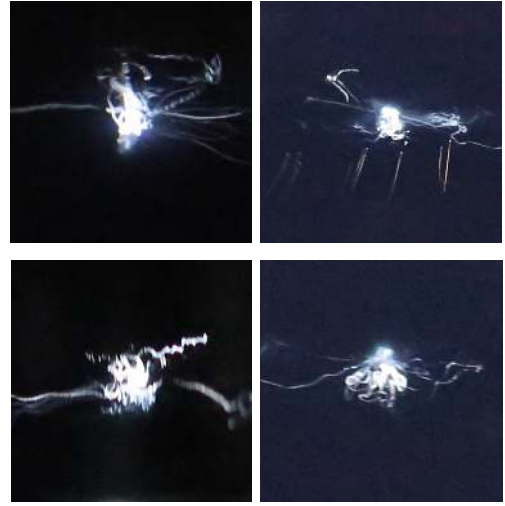


图 1 实验观察到的注入氦气磷酸溶液中的泡群结构

Fig. 1. Experimental observation of bubble structure in injected helium phosphoric acid solution.

在振荡过程中始终保持球形,且泡群质心没有任何空间位移; 2) 泡群振荡过程中始终和液体间保持边界,界面上的气泡溃灭后由液体占据; 3) 不考虑化学反应、液体相变和质量交换的影响; 4) 泡群内液体压力、气泡内压强和温度在空间上均匀分布; 5) 泡群内气泡总数保持不变.在这些假设条件下,整个泡群及群内任一空化气泡都遵循 Rayleigh-Plesset 方程 [5,16]:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{P_c - P_s}{\rho} + \frac{R}{\rho c}(\dot{P}_c - \dot{P}_s), \quad (1)$$

$$r_i\ddot{r}_i + \frac{3}{2}\dot{r}_i^2 = \frac{P_{B,i} - P_c}{\rho} + \frac{r_i}{\rho c}(\dot{P}_{B,i} - \dot{P}_c). \quad (2)$$

另外,整个泡群的体积变化率应等于群内所有空化气泡的体积变化率之和 [5,16],即:

$$R^2\dot{R} = \sum_i N_i r_i^2 \dot{r}_i. \quad (3)$$

(1)–(3) 式中, $R = R(t)$ 为泡群的瞬时半径, $r_i = r_i(t)$ 为泡群中第 i 类气泡的瞬时半径, N_i 为第 i 类气泡的数量. $P_s = P_0 - P_a \cdot \sin(2\pi ft)$ 为外界压力, $P_{B,i} = P_{\text{gas}} + P_v - \frac{4\eta\dot{r}_i + 2\sigma}{r_i}$ 为气泡壁上的压力,而 c , ρ , η 和 σ 分别表示液体中的声速、液体密度、黏滞系数和表面张力系数, P_c , P_0 , P_a , P_v , P_{gas} 分别表示泡群内压力、静态环境压力、驱动声压幅值、气泡内蒸汽压及气泡内气体压力.此模型不但能够把整个球状泡群当作一种独立系统来研究其动力学特征,还能够研究泡群内不同类型的气泡在外声场作用下的动力学行为.因此,此模型是关于

泡群的一种较好的理论模型, 到目前很多学者都采用此模型研究了不同的球状泡群 [5,6,12,16], 但这些研究中泡群内的气泡是相同尺寸、相同气体气泡组成或不同尺寸、相同气体气泡组成的泡群. 本文为了研究不同尺寸、不同气体气泡组成的球状泡群的声空化特性, 采用文献 [21] 给出的 van der Waals 型过程方程:

$$\dot{P}_{\text{gas}}(r, t) = -\gamma(r, \dot{r}, T) \frac{3r_i^2 \dot{r}_i}{r_i^3 - h^3} P_{\text{gas}}, \quad (4)$$

式中 h 为 van der Waals 硬核半径; $\gamma(r, \dot{r}, T)$ 为气体可变多方指数, 其表达式为

$$\gamma(Pe) = 1 + (\Gamma - 1) \exp\left(-\frac{A}{Pe^B}\right), \quad (5)$$

其中 $A \approx 5.8$, $B \approx 0.6$, Peclet 数 $Pe = r(t) |\dot{r}(t)| / \zeta$. 这里 $\zeta = \zeta(r_i, T)$ 表示气泡的热扩散, 根据 Enskog 理论, ζ 可表示为

$$\zeta = \frac{25}{48x\Gamma} \sqrt{\frac{\pi d_{\text{gas}}^2 \Re_{\text{gas}} T}{\mu_{\text{gas}}}} (m^{-1} + 1.2x + 0.755x^2 m), \quad (6)$$

其中 $\Re_{\text{gas}} = 8.314$ 为气体常数, Γ 为绝热指数 (单原子气体 5/3), d_{gas} 为气体有效分子直径, μ_{gas} 为气体分子量, $T = T(t)$ 为泡内温度, $m = 1 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3$, $c_1 = 0.625$, $c_2 = 0.2869$, $c_3 = 0.115$, $x = 2\pi N_A d_{\text{gas}}^3 r_0^3 (3V_m r^3)^{-1}$, N_A 为阿伏伽德罗常数, V_m 为摩尔体积. 由 (5) 式和 (6) 式可以看出, 过程方程 (4) 中的 $\gamma(r, \dot{r}, T)$ 是可变参量, 它不仅与气泡半径、半径变化率和泡内温度有关, 而且还与气体有效分子直径、气体分子质量和摩尔体积有关. 因此, 过程方程 (4) 不同于通常用的绝热过程状态方程, 它能够更准确地反映气泡内不同气体的变化过程. 此时, 考虑热扩散效应的不同气体气泡内的温度可表示为 [21]

$$\dot{T} = -[\gamma(r, \dot{r}, T) - 1] \frac{3r_i^2 \dot{r}_i}{r_i^3 - h^3} T - \zeta \frac{T - T_0}{r_i^2}, \quad (7)$$

其中 T_0 表示静态环境温度.

3 数值计算

本节利用 Runge-Kutta 方法, 对球状泡群的声空化特性进行数值研究. 数值计算时, 选取驱动声压幅值 $P_a = 2 \text{ atm}$ ($1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$), 频率 $f = 20 \text{ kHz}$, 泡群内气泡总数 N 为 1000 个. 其他参数如表 1 所列.

表 1 75% 磷酸溶液的相关物理参数 [22]

Table 1. Physical parameters of 75% phosphoric acid [22].

相关参数	值
液体密度 $\rho / \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1575
表面张力 $\sigma / \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	0.07987
黏滞系数 $\eta / \text{Pa}\cdot\text{s}$	0.05111
环境压强 P_0 / atm	1
声速 $c / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1671
环境温度 T_0 / K	273.15
蒸气压 P_v / Pa	763

3.1 相同尺寸相同气体气泡组成泡群的声空化特性

为了解由相同尺寸相同气体气泡组成泡群的声空化特性, 选取初始半径为 $5 \mu\text{m}$ 的氩气泡和初始半径为 $5 \mu\text{m}$ 的氦气泡组成的两种泡群, 并用数值方法绘制了两种泡群的气泡半径变化、径向速度变化、泡内温度变化、泡群半径变化和群内压力变化, 如图 2 所示. 同时, 为了显示气泡初始半径不同所导致的影响, 图 2 中也给出了初始半径是 $10 \mu\text{m}$ 的氩气泡和初始半径是 $10 \mu\text{m}$ 的氦气泡组成的两种泡群的气泡半径变化、径向速度变化、泡内温度变化、泡群半径变化和群内压力变化.

由图 2(a) 可知, 不管是初始半径都为 $5 \mu\text{m}$ 的氩气泡和氦气泡组成的两种泡群, 还是初始半径都为 $10 \mu\text{m}$ 的氩气泡和氦气泡组成的两种泡群, 它们所含气泡的膨胀与收缩阶段的半径变化规律基本相同, 只是崩溃和回弹阶段的规律有些不同 (如图 2(c)). 含氦气的气泡崩溃深度比含氩气的气泡崩溃深度要略深, 而含氩气的气泡回弹阶段半径变化幅度比含氦气的气泡回弹阶段半径变化幅度要大 [23]. 这表明, 初始半径相同的情况下, 气泡所含气体不同产生的影响主要体现在气泡崩溃和回弹阶段. 从图 2(a)–(c) 还可以看出, $10 \mu\text{m}$ 氩气泡和氦气泡的崩溃深度、崩溃速度以及半径压缩比 (R_{max}/R_0) 都小于 $5 \mu\text{m}$ 氩气泡和氦气泡的对应量, 但崩溃时间滞后于 $5 \mu\text{m}$ 氩气泡和氦气泡的崩溃时间. 这些结果与文献 [5, 6] 给出的结果一致. 主要原因是在固定初始半径的有限泡群空间内, 随着气泡尺寸的增大群内气泡的空间分布变得更加密集, 这使泡群的膨胀半径增大 (图 2(d)), 泡

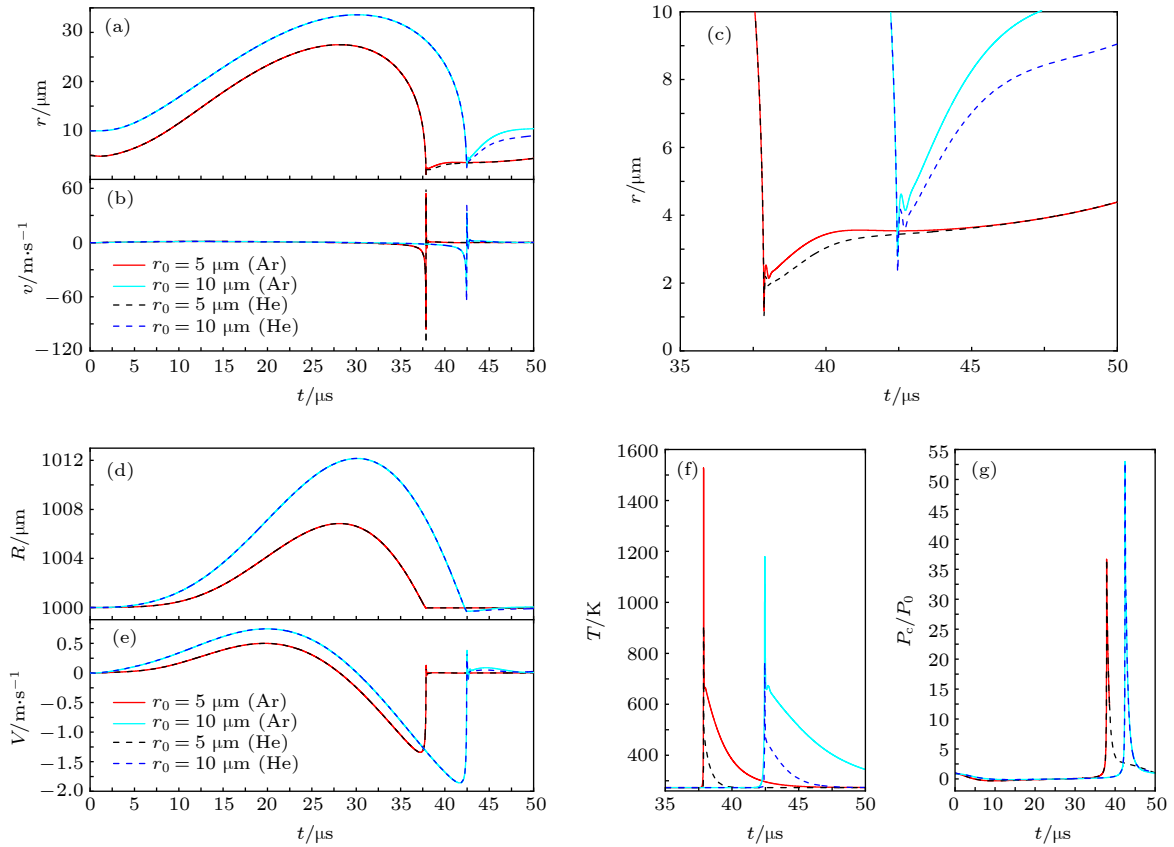


图 2 相同尺寸相同气体气泡组成的四种泡群的声空化特性 (a) 气泡半径变化; (b) 气泡径向速度变化; (c) 气泡崩溃及回弹阶段的半径放大图; (d) 泡群半径变化; (e) 泡群径向速度变化; (f) 气泡内温度变化; (g) 泡群内压力变化

Fig. 2. Acoustic cavitation characteristics of four kinds of bubble groups composed of same size and same gas bubbles: (a) Change of bubbles radius; (b) change of bubbles radial velocity; (c) magnified figure of bubbles radius at the stage of collapse and rebound; (d) change of bubble group radius; (e) change of bubble groups radial velocity; (f) change of temperature in bubbles; (g) change of pressure in bubble groups.

群对气泡振动的约束作用增强, 也即气泡振动受到的抑制增强^[7], 从而导致了上述结果. 正由于此原因, 10 μm 气泡的泡内温度要低于 5 μm 气泡的泡内温度 (图 2(f)). 但从图 2(g) 可看出, 10 μm 气泡组成泡群内的压力脉冲峰值都大于 5 μm 气泡组成泡群内的压力脉冲峰值. 这主要是因为泡群内压力与群内气泡振动和泡群振荡的耦合作用有关, 虽然 10 μm 气泡的半径压缩比、崩溃深度和崩溃速度都小于 5 μm 气泡的对应量, 但 10 μm 气泡组成泡群的膨胀半径、崩溃深度 (图 2(d)) 和崩溃速度 (图 2(e)) 都大于 5 μm 气泡组成泡群的对应量, 所以可以造成 10 μm 气泡组成泡群内的压力脉冲峰值大. 值得注意的是由于泡群及群内气泡的声响应与多种因素有关^[7], 在不同环境中泡群及群内气泡的声响应不同, 所以不能给出大气泡组成泡群的群内压力脉冲峰值大于小气泡组成泡群的群内压力

脉冲峰值的统一结论, 这里给出的结果只能在本文模型和计算条件下成立. 另外, 由于不同气体的有效分子直径、有效分子质量、van der Waals 硬核半径、密度等参数的不同, 不同气体气泡组成泡群中泡内温度和群内压力脉冲也有所不同, 例如 5 μm 氩气泡群中的泡内温度约为 1528 K, 压力脉冲峰值约为 36.68 P_0 , 相比 5 μm 氦气泡群中的泡内温度高出 600 K (图 2(f)), 压力脉冲峰值高出 0.5 P_0 (图 2(g)); 10 μm 氩气泡群中的泡内温度约为 1179 K, 压力脉冲峰值约为 52.98 P_0 , 相比 10 μm 氦气泡群中的泡内温度高出 400 K (图 2(f)), 压力脉冲峰值高出 0.06 P_0 (图 2(g)). 由此可知, 氩气泡群中的泡内温度和群内压力脉冲峰值都高于氦气泡群中的泡内温度和群内压力脉冲峰值, 这也就是为什么在声致发光实验中为获得更好的发光效应注入分子量大的惰性气体的原因^[24,25].

3.2 相同尺寸不同气体气泡组成泡群的空化特性

为了解相同尺寸气泡组成泡群内含有不同气体气泡时,不同气体气泡对泡群的声空化特性的影响,本节研究不同气体气泡(氩气和氦气)组成的初始半径为 5 和 10 μm 的两种混合泡群.泡群内气泡总数仍为 1000 个,其中氩气气泡和氦气气泡的比例为 1:1.此时绘制的两种混合泡群的气泡半径变化、径向速度变化、泡内温度变化、泡群半径变化和群内压力变化,如图 3 所示.由图 3 可看出,相同尺寸不同气体气泡组成的混合泡群中的气泡振荡规律和泡群振荡规律与图 2 显示的相同尺寸相同气体气泡组成泡群的变化规律都很相似,所以这里不再进行分析.详细比较可知,两种泡群中的泡内最高温度以及群内最大压力脉冲峰值等都有些差别,如 10 μm 的相同气体泡群和不同气体泡群中的氩气泡内的温度差别约 10 K,氦气泡内

的温度差别约 6 K,群内压力脉冲峰值差别约为 $0.22P_0$ (氩气泡)和 $0.16P_0$ (氦气泡).在计算中还了解到,泡群内气泡总数不变的情况下,改变群内不同气体气泡数的比例对群内气泡的最大膨胀半径、最高温度以及群内的最大压力脉冲的影响也不是很明显.

3.3 不同尺寸相同气体气泡组成的混合泡群的空化特性

对于不同尺寸气泡组成的泡群来讲,群内不同尺寸气泡数的比例是影响泡群空化特性的重要因素.为了解不同尺寸气泡数的比例对泡群内气泡半径变化、泡内温度以及群内压力脉冲变化造成的影响,研究了 10 和 5 μm 气泡组成的氩气泡群和氦气泡群,相关结果如图 4 所示.由图 4(a)可看出,不管氩气泡群还是氦气泡群,当大气泡数为 1(小气泡数为 999)时,大气泡内的温度最高,高于相同初始半径的单泡泡内温度,接近文献 [26] 实验测得

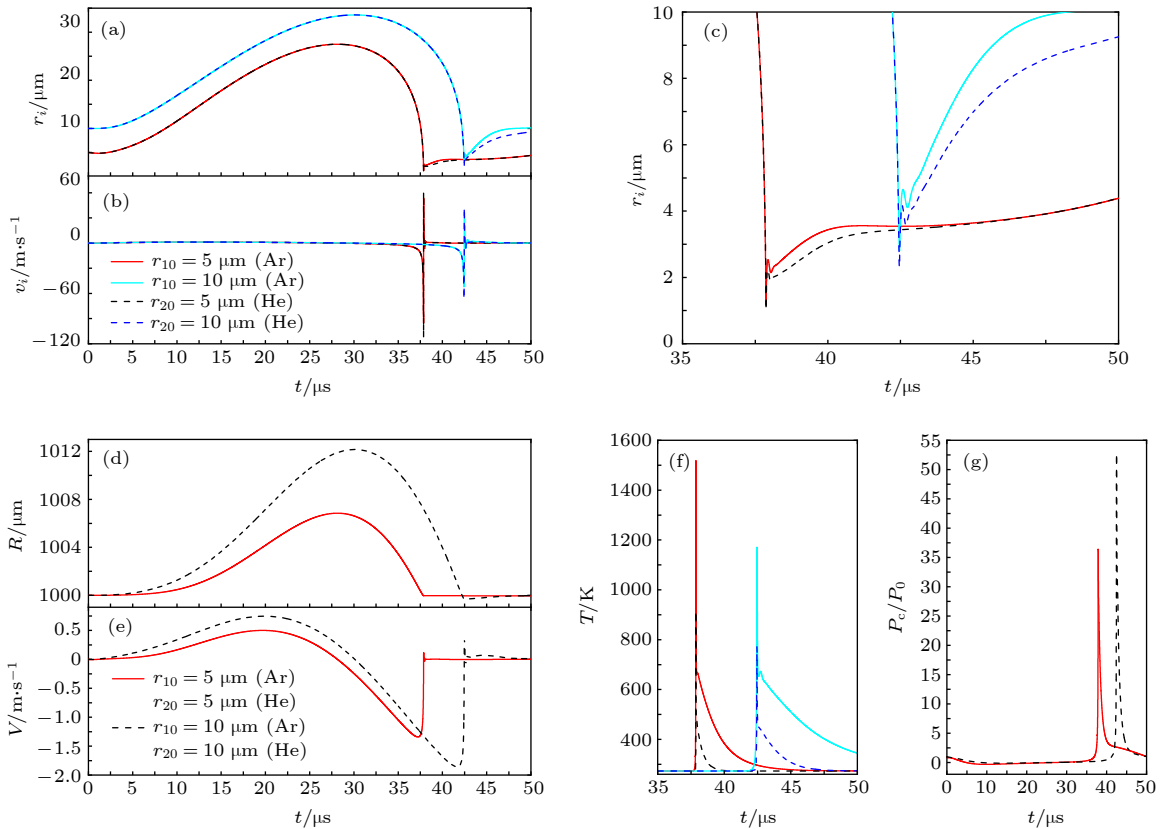


图 3 相同尺寸不同气体气泡组成的两种混合泡群的声空化特性 (a) 气泡半径变化; (b) 气泡径向速度变化; (c) 气泡崩溃及反弹阶段的半径放大图; (d) 泡群半径变化; (e) 泡群径向速度变化; (f) 气泡内温度变化; (g) 泡群内压力变化

Fig. 3. Acoustic cavitation characteristics of two kinds of mixed bubble groups composed of same size and different gas bubbles: (a) Change of bubbles radius; (b) change of bubbles radial velocity; (c) magnified figure of bubbles radius at the stage of collapse and rebound; (d) change of bubble group radius; (e) change of bubble groups radial velocity; (f) change of temperature in bubbles; (g) change of pressure in bubble groups.

的大泡泡内温度. 随着大气泡数的增多, 两种泡群中大泡内的最高温度都快速下降, 并逐渐趋近于纯大气泡组成泡群的泡内温度, 即图 2(f) 所示温度. 这是因为随着大气泡数的增多, 群内气泡的空间分布变得更加密集, 气泡振动受到的抑制作用迅速增强, 气泡崩溃时间延长, 崩溃速度和半径压缩比减小, 导致大气泡内的温度快速下降. 群内大气泡数增加到一定比例之后, 大气泡的声响应逐渐占据主导地位, 整个泡群相当于纯大气泡组成的泡群, 群内大泡内温度平稳趋近于纯大气泡组成泡群的泡内温度. 对于泡群中的小气泡来讲 (图 4(b)), 开始时由于大气泡很少 (1 个大气泡), 泡群相当于纯小气泡组成的泡群, 所以泡群中小泡内温度接近于纯小气泡组成泡群的泡内温度, 即图 2(f) 所示温度. 随着大气泡数的增多, 两种泡群中小泡内的最高温度急速下降, 并达到 400 K (氩气泡) 和 300 K (氦气泡) 左右的平稳温度, 即趋近于许多大气泡辐射作用下的单一小气泡泡内温度. 泡群中小泡内最高温度出现这样的变化规律, 主要是因为大泡数的逐渐增加, 群内气泡的空间分布变得愈加密集, 泡群对气泡的抑制和大泡对小泡的辐射作用迅速增强, 使得小泡的振动被有效抑制, 导致小泡泡内温度迅速下降并趋于完全被抑制的小气泡泡内温度. Ida 等^[27] 研究发现在液体中注入大气泡能够抑制空化的发生与发展, 表明了大泡确实对小泡有很强的抑制作用. 总体来讲, 不管是大气泡还是小气泡, 氩气泡群中的泡内最高温度要高于氦气泡群中的泡内最高温度, 这与我们在声致发光实验中观察到的实验现象相符. 从图 4(c) 可知, 两种泡群中气泡崩

溃时产生的压力脉冲峰值, 随着大气泡数的增多, 先急剧减小, 达到拐点之后平稳增加并逐渐趋近于纯氩气大气泡和纯氦气大气泡组成泡群的压力脉冲峰值, 即图 2(g) 所示的压力脉冲峰值. 整体上, 在拐点之后氩气泡群中的压力脉冲峰值略高于氦气泡群中的压力脉冲峰值.

为详细了解泡群内大小气泡是否同时崩溃以及群内压力脉冲峰值为何出现拐点等现象, 绘制了氦气泡群 (氩气泡群的完全类似) 中大气泡数为 1, 24, 100, 400, 800 时的大小气泡的半径变化图和群内压力脉冲变化图, 如图 5 所示. 从图 5(a1)–(e1) 可清楚地看到, 当泡群内的大气泡较少时, 小气泡的崩溃在大气泡崩溃之前, 只有在泡群中大气泡数达到一定比例之后 (本文计算条件下大气泡约 400) 大小气泡的崩溃才能同步, 即群内大小气泡能够同时崩溃. 这一结果补充完善了文献 [5, 6] 给出的泡群中不同初始半径的气泡能够同时崩溃的结论, 明确了泡群中不同初始半径的气泡同时崩溃的条件. 借助图 5(a2)–(e2) 可以容易地理解群内压力脉冲峰值出现拐点的原因. 图 5(a2) 显示的是大气泡数为 1 时, 泡群内大小气泡崩溃时产生的压力脉冲, 可看出群内压力脉冲有两个峰值, 左边的是小气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值 (小气泡先崩溃), 右边的是大气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值 (大气泡后崩溃), 且此时小气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值远大于大气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值. 当大气泡数增加到 24 时, 大小气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值基本相等 (图 5(b2)), 但两个峰值都小于图 5(a2)、图 5(d2)、图 5(e2) 表示的其

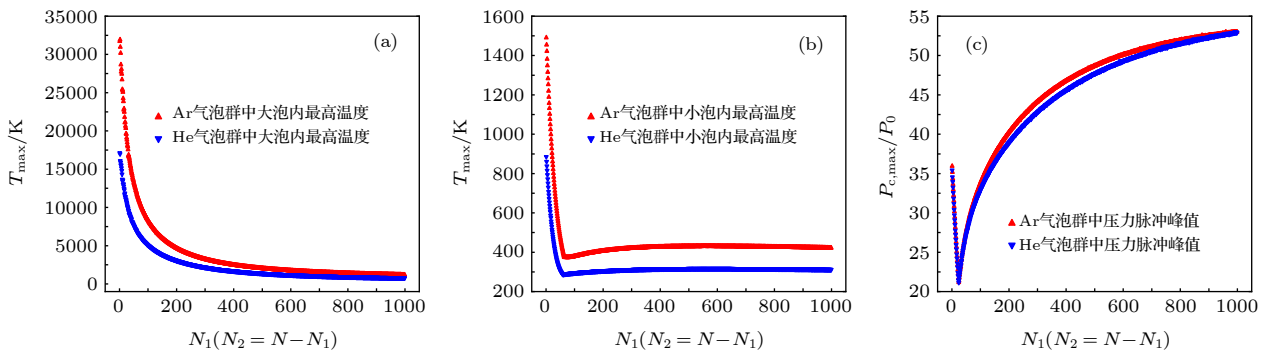


图 4 不同尺寸相同气体气泡组成的两种混合泡群的声空化特性 (a) 大泡内最高温度随大气泡数的变化; (b) 小泡内最高温度随大气泡数的变化; (c) 泡群内压力脉冲峰值随大气泡数的变化

Fig. 4. Acoustic cavitation characteristics of two kinds of mixed bubble groups composed of different size and same gas bubbles: (a) The change of the maximum temperature in the large bubble with the number of large bubbles; (b) the change of the maximum temperature in the small bubble with the number of large bubbles; (c) the change of the peak of pressure pulse with the number of large bubbles in a bubble groups.

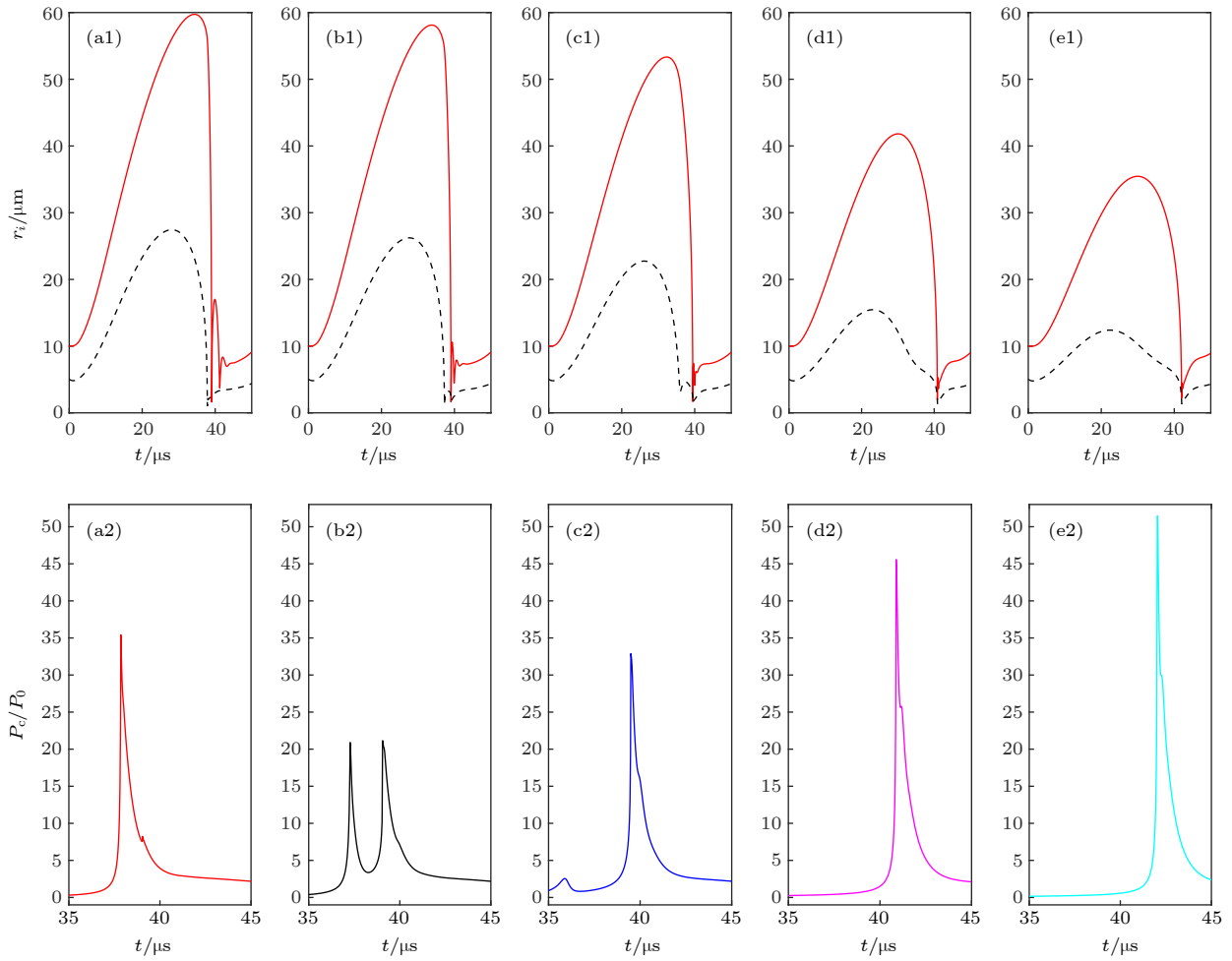


图 5 氦气泡群中, 大(红实线)、小(黑虚线)气泡的半径变化及对应的群内压力脉冲变化 (a1), (a2) $N_1 = 1$; (b1), (b2) $N_1 = 24$; (c1), (c2) $N_1 = 100$; (d1), (d2) $N_1 = 400$; (e1), (e2) $N_1 = 800$

Fig. 5. Radius change of large (red solid line) and small (black dotted line) bubbles in helium bubble group and corresponding pressure pulse change in the group: (a1), (a2) $N_1 = 1$; (b1), (b2) $N_1 = 24$; (c1), (c2) $N_1 = 100$; (d1), (d2) $N_1 = 400$; (e1), (e2) $N_1 = 800$.

他压力脉冲峰值, 所以这是压力脉冲峰值的最小值, 也就是图 4(c) 中出现的拐点. 当大气泡数继续增加到 100 时, 大气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值 (右边峰值) 明显大于小气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值 (左边峰值), 如图 5(c2) 所示, 大气泡数再继续增加到 400 以上时, 大小气泡开始同时崩溃, 所以群内压力脉冲只有 1 个峰值 (图 5(d2) 和图 5(e2)). 由此可知, 图 4(c) 中出现的拐点是大小气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值相等的点, 在拐点之前小气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值大于大气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值, 所以记录的是小气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值变化; 拐点之后小气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值小于大气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值, 所以记录的是大气泡崩溃时产生的压力脉冲峰值变化. 泡群内大小气泡崩溃时

产生的压力脉冲的变化, 从另一角度表现出了群内大小气泡是否同时崩溃.

3.4 不同尺寸不同气体气泡组成的混合泡群的空化特性

对不同尺寸相同气体气泡组成泡群声空化特性的研究基础上, 本节研究不同尺寸 (10 和 5 μm) 不同气体 (氩气和氦气) 气泡组成的两种混合泡群的声空化特性. 这两种泡群中的第一种是大气泡含氩气、小气泡含氦气的泡群, 第二种是大气泡含氦气、小气泡含氩气的泡群. 研究了两种泡群中大气泡内最高温度、小气泡内最高温度以及群内压力脉冲峰值随大气泡数的变化规律, 如图 6 所示. 可以看出, 图 6 反映的泡内最高温度和群内压力脉冲变化规律与图 4 反映的规律基本相同, 不同的是第一

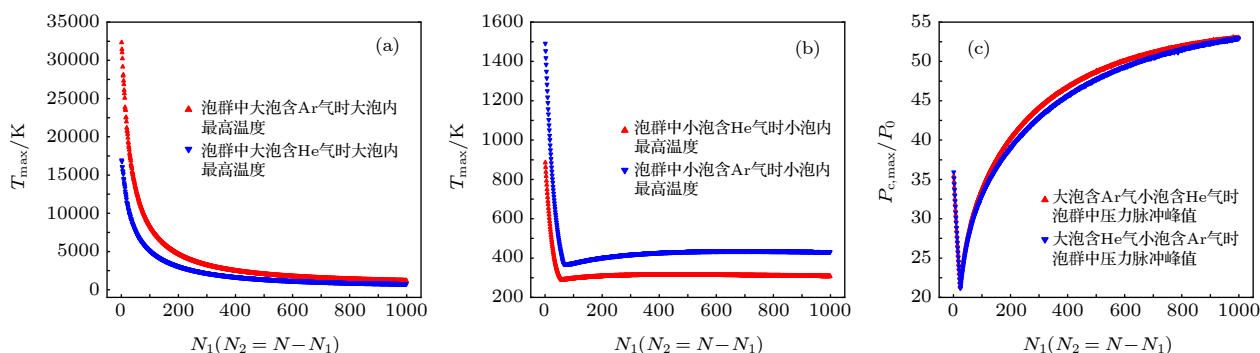


图6 不同尺寸不同气体气泡组成的两种混合泡群的声空化特性 (a) 大泡内最高温度随大气泡数的变化; (b) 小泡内最高温度随大气泡数的变化; (c) 泡群内压力脉冲峰值随大气泡数的变化

Fig. 6. Acoustic cavitation characteristics of two kinds of mixed bubble groups composed of different size and different gas bubbles: (a) The change of the maximum temperature in the large bubble with the number of large bubbles; (b) the change of the maximum temperature in the small bubble with the number of large bubbles; (c) the change of the peak of pressure pulse with the number of large bubbles in a bubble groups.

种泡群中大泡泡内温度高于第二种泡群中大泡泡内温度, 而第一种泡群中小泡泡内温度低于第二种泡群中小泡泡内温度. 这主要是气泡含有的气体不同导致的. 总体上讲, 在初始半径相同的情况下, 不管是大气泡还是小气泡, 含分子量大的惰性气体气泡的泡内温度要高于含分子量小的惰性气体气泡的泡内温度, 发光也强于后者. 同样, 对泡群中大小气泡数比例不同的情况下, 给出了大小气泡半径和群内压力脉冲随时间的变化规律 (图略), 发现大小气泡的半径变化规律和群内压力脉冲变化规律与图5中显示的变化规律相同.

4 结论

本文对注入氦气的磷酸溶液中多泡声致发光现象进行了实验观察和记录, 发现溶液中产生的大量的空化气泡可形成不同形状结构的气泡群, 其中球状气泡群是典型的一种泡群. 利用泡群及群内任一气泡的 Rayleigh-Plesset 方程并结合 van der Waals 型过程方程, 研究了相同尺寸相同气体气泡组成的泡群、相同尺寸不同气体气泡组成的泡群、不同尺寸相同气体气泡组成的泡群和不同尺寸不同气体气泡组成的泡群中气泡半径变化、泡内温度变化和群内压力脉冲变化. 结果表明, 对于相同尺寸相同气体气泡组成的泡群和相同尺寸不同气体气泡组成的泡群, 群中气泡所含的气体对泡内温度有较明显的影响, 但对气泡半径和群内压力脉冲峰值的影响较小. 含有分子量小的气体气泡崩溃深度比含有分子量大的气体气泡崩溃深度要深, 但回弹

阶段的半径变化幅度要小于后者; 对于不同尺寸相同气体气泡组成的泡群和不同尺寸不同气体气泡组成的泡群, 在群中气泡总数不变的条件下, 群内只有一个大气泡时, 大气泡内温度最高, 可高于相同尺寸相同气体单泡的泡内温度, 随着群中大气泡数的增多, 大小气泡内温度快速下降, 大气泡内温度趋近于相同尺寸相同气体大泡组成泡群中的气泡内温度, 小泡内温度逐渐趋近于许多大泡辐射作用下的相同气体小气泡的泡内温度; 泡群中压力脉冲峰值随着大气泡数的增多, 先急剧减小, 到拐点之后平稳增加并趋近于相同气体大气泡组成泡群内的压力脉冲峰值. 泡群中大气泡数占比对泡群空化特性产生重要影响, 只有大气泡数占比达到一定值后泡群中不同尺寸气泡才能出现同时崩溃现象, 这一结论完善了前文给出的结论. 本文结果对进一步探索泡群空化效应及发光机理将提供一定的理论指导与帮助.

参考文献

- [1] Yasui K, Iida Y, Tuziuti T, Kozuka T, Towata A 2008 *Phys. Rev. E* **77** 016609
- [2] Doinikov A A, Zavtrak S T 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **99** 3849
- [3] Mettin R, Luther S, Ohl C D 1999 *Ultrason. Sonochem.* **6** 25
- [4] An Y 2011 *Phys. Rev. E* **83** 066313
- [5] Nasibullaeva E S, Akhatov I S 2005 *Acoust. Phys.* **51** 705
- [6] Shen Z Z, Wu S J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 244301 (in Chinese) [沈壮志, 吴胜举 2012 物理学报 **61** 244301]
- [7] Wang C H, Mo R Y, Hu J, Chen S 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 234301 (in Chinese) [王成会, 莫润阳, 胡静, 陈时 2015 物理学报 **64** 234301]
- [8] Zhang P L, Lin S Y, Zhu H Z, Zhang T 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 134301 (in Chinese) [张鹏利, 林书玉, 朱华泽, 张涛 2019 物

- 理学报 **68** 134301]
- [9] Miao B Y, An Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 204301 (in Chinese) [苗博雅, 安宇 2015 物理学报 **64** 204301]
- [10] Zhang Y Y, Chen W Z, Zhang L L, Wang X, Chen Z 2019 *Chin. Phys. Lett.* **36** 034301
- [11] Qinghim, Naranmandula 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 234302 (in Chinese) [清河美, 那仁满都拉 2019 物理学报 **68** 234302]
- [12] Shen Z Z 2020 *Chin. Phys. B* **29** 014304
- [13] Sugita N, Ando K, Sugiura T 2017 *Ultrason.* **77** 160
- [14] Zhang L L, Chen W Z, Zhang Y Y, Wu Y R, Wang X, Zhao G Y 2020 *Chin. Phys. B* **29** 034303
- [15] Liang J F, An Y, Chen W Z 2019 *Chin. Phys. Lett.* **36** 107801
- [16] Nasibullaeva E S, Akhatov I S 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** 3727
- [17] Yasui K 2001 *Phys. Rev. E* **63** 035301
- [18] Storey B D, Szeri A J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 074301
- [19] Lohse D, Breener M P, Dupont T F, Hilgenfeldt S, Johnston B 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1359
- [20] Chen W Z 2014 *Sound Cavitation Physics* (Beijing: Science Press) pp297–298 (in Chinese) [陈伟中 2014 声空化物理 (北京: 科学出版社) 第297—298 页]
- [21] Hilgenfeldt S, Grossmann S, Lohse D 1999 *Phys. Fluids* **11** 1318
- [22] Moshaii A, Faraji M, Tajik-Nezhad S 2010 *Ultrason. Sonochem.* **18** 1148
- [23] Faraji M, Moshaii A 2012 *Phys. Lett. A* **376** 2703
- [24] Didenko Y T, McNamara III W B, Suslick K S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 777
- [25] Xu H, Suslick K S 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 244301
- [26] Cairós C, Mettin R 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 064301
- [27] Ida M, Naoe T, Futakawa M 2007 *Phys. Rev. E* **76** 046309

Acoustic cavitation characteristics of mixed bubble groups composed of different types of bubbles*

Qinghim Naranmandula[†]*(College of Mathematics and Physics, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028043, China)*

(Received 14 March 2020; revised manuscript received 21 May 2020)

Abstract

In this paper, we observe and record the phenomenon of multi-bubble sonoluminescence in phosphoric acid solution which helium is injected into. It is found that a large number of cavitation bubbles are produced in the solution, which can form bubble groups with different shapes and structures, among them the spherical bubble group is a typical one. By the Rayleigh-Plesset equation of bubble group and any bubble in the group with the combination of van der Waals process equation, we study the variations of the bubble radius, temperature of the bubble, pressure pulse in the groups which are composed, respectively, of the bubbles with the same size and the same gas, the bubbles with the same size and different gases, the bubbles with different sizes and the same gas and the bubbles with different sizes and different gases. The results show that for the bubble group composed of the bubbles with the same size and the same gas and the bubble group composed of the bubbles with the same size and different gases, the gas contained in the bubble has a significant effect on the temperature inside the bubble, but has little effect on the bubble radius and the pressure pulse peak within the cluster. Bubble collapse depth of gas with low molecular weight is deeper than that of gas with high molecular weight, but the radius change of rebound stage is smaller than that of the latter. For the bubble group composed of the bubbles with different sizes and the same gas and the bubble group composed of the bubbles with different sizes and different gases, when the total number of bubbles in a bubble group is constant, for the case where there is only one large bubble in the group, the temperature in the large bubble is the highest, which can be higher than the temperature in a single bubble with the same size and the same gas; with the increase of the number of large bubbles in the group, the temperatures in the large and small bubbles both decrease rapidly: the temperature in the large bubbles approaches to the temperature in the bubbles of the bubble group composed of large bubbles with the same gas and the same size, and the temperature in the small bubble gradually approaches to the temperature in small bubble with the same gas under the radiation of many large bubbles. With the increase of the number of large bubbles, the peak value of the pressure pulse in the bubble group first decreases sharply to the inflection point, and then increases steadily to the peak value of the pressure pulse in the bubble group composed of large bubbles with the same gas and the same size. The proportion of large bubbles number in the bubble group has an important influence on the cavitation characteristics of the bubble group, only when the proportion of large bubbles reaches a certain value, can the bubbles of different sizes in the bubble group collapse at the same time, and this conclusion improve and perfect the previous conclusion. The results of this paper will provide some theoretical guidance and help to further explore the cavitation effect and luminescent mechanism of the bubble group.

Keywords: spherical bubble group, different types of bubbles, expansion and collapse, bubble temperature, pressure in bubble group

PACS: 43.25.+y, 43.35.+d, 47.55.dd

DOI: 10.7498/aps.69.20200381

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11462019) and the Inner Mongolia Graduate Research Innovation Fund, China (Grant No. S2018112002Z).

[†] Corresponding author. E-mail: nrmdlbf@126.com