

# 超重力场下水下爆炸多气泡耦合特性研究\*

郭权势, 卢强, 张亮永, 吴祖堂, 丁洋, 郭志昀, 方厚林\*

(西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 水下多点爆炸气泡耦合及形态演化特性一直是被广泛关注的现象。在众多研究方法中, 基于离心机的超重力水下爆炸实验因同时满足 Mach 数和 Froude 数相似, 被认为是大当量水下爆炸原型实验研究的最佳手段之一。本文针对超重力场下水下多点爆炸气泡间耦合规律开展了实验和数值研究。首先开展重力加速度为 100g 的超重力环境下水下两点爆炸实验, 通过高速相机高精度捕捉了双气泡形态演化过程。其次, 利用基于实验数据验证的超重力水下多点爆炸数值模型进一步探究重力场对水下爆炸双气泡耦合形态演化及特征参数的影响。结果表明, 较大重力加速度下, 水下爆炸气泡形态演化、脉动和迁移特性与常重力场存在显著差异, 超重力这一极端条件会强化压力梯度与浮力效应, 导致射流行为呈现独特规律。超重力环境增大了流场中垂向压力梯度, 增强了气泡表面的不稳定性、引发更强烈的流体加速运动, 促使气泡迁移速度加快; 超重力场造成了气泡脉动的“时空压缩效应”同时改变气泡系统浮力-惯性力关系, 对气泡射流方向和气泡间相互作用强度有较大影响, 进而改变双气泡系统中能量的分布。

**关键词:** 水下爆炸; 气泡耦合; 超重力; 气泡脉动; 射流

中图分类号: XXXX.X

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

## Study on multi-bubble coupling in underwater explosions under hypergravity conditions

GUO Quanshi, LU Qiang, ZHANG Liangyong, WU Zutang, DING Yang, GUO Zhiyun, FANG Houlin\*

(National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaan'xi, China)

**Abstract:** The coupling mechanisms and morphological evolution characteristics of underwater multipoint explosion bubbles have long been a subject of extensive scientific interest due to their complex hydrodynamic behaviors and significant implications in both engineering and defense applications. Among various research methodologies, underwater explosion experiments conducted in centrifugal facilities—commonly referred to as hypergravity experiments—have emerged as one of the most effective approaches, primarily because of the simultaneous satisfaction of both the Mach number and the Froude number which are two critical dimensionless parameters governing dynamic similarity in fluid mechanics. This study presents a comprehensive experimental and numerical investigation into the coupling dynamics of underwater multipoint explosion bubbles under hypergravity conditions. Specifically, a series of experiments were conducted under an accelerated gravitational field of 100g, enabling high-fidelity observation of the morphological evolution of dual explosion bubbles using high-speed imaging

\*收稿日期: 2026-02-11; 修回日期: 2026-06-16

第一作者: 郭权势 (1994-), 男, 硕士, 助理研究员. E-mail: guoquanshi@nint.ac.cn;

通信作者: 方厚林 (1987-), 男, 博士, 副研究员. E-mail: fanghoulin@nint.ac.cn.

techniques. The captured visual data provided critical insights into bubble interaction processes and served as the foundation for the development and validation of a three-dimensional numerical model simulating underwater dual-bubble explosions in hypergravity environments. Through systematic comparison between experimental results and numerical simulations, the influence of gravitational intensity on the morphological evolution and characteristic parameters of coupled bubbles was thoroughly analyzed. It has been observed that under significantly elevated gravitational acceleration, the morphological evolution, pulsation dynamics, and migration characteristics of underwater explosion bubbles exhibit substantial deviations from those observed under normal gravity conditions. The hypergravity environment, as an extreme physical condition, intensifies both the pressure gradient within the surrounding fluid and the buoyancy forces acting on the bubble, thereby fundamentally altering the underlying hydrodynamic mechanisms. Specifically, the enhanced pressure gradient leads to a more pronounced asymmetry in the pressure distribution around the bubble interface, which in turn accelerates fluid motion and amplifies surface instabilities, resulting in faster and more violent bubble collapse phases, as well as stronger and more focused liquid jets during the rebound stage. Moreover, the increased gravitational acceleration significantly strengthens the buoyancy effect, which governs the direction and magnitude of bubble migration. Consequently, bubbles migrate more rapidly in the direction opposite to the effective gravity vector, and their trajectories become more predictable and less susceptible to small-scale perturbations. This enhanced migration velocity further influences the interaction intensity between multiple bubbles in a multipoint explosion scenario. The pulsation period of the bubble is also notably reduced under hypergravity, a phenomenon referred to as the "temporal compression" effect. Due to the increased restoring forces from both the ambient pressure and gravitational field, the bubble undergoes faster expansion and collapse cycles, resulting in a shorter overall lifetime and fewer oscillation periods. This spatiotemporal compression not only affects the phase relationship between coupled bubbles, thereby modifying their interference patterns and interaction intensity, but also redistributes the energy within the dual-bubble system, leading to distinct energy partitioning patterns compared to normal gravity scenarios.

**Keywords:** Underwater explosion; bubble Coupling; hypergravity; bubble pulsation; jet.

在水下爆炸 (UNDEX) 结构冲击与防护领域, 占据了爆炸总能量几乎一半的气泡载荷几乎与冲击波载荷具有相当的毁伤能力。因此水下爆炸气泡脉动现象一直是学术界广泛研究的对象。水下爆炸球状气泡的脉动可用 Rayleigh-Plesset 方程 (R-P 方程) 描述<sup>[1]</sup>, 学者对单个气泡的各种力学行为作了大量的理论<sup>[2-6]</sup>、实验<sup>[7-11]</sup>和数值研究<sup>[12-16]</sup>。但对于多气泡而言, 气泡间的非线性耦合作用改变了气泡内部和外部的压力分布, 在一次脉动周期内气泡不再保持球形, RP 方程不再适用<sup>[17, 18]</sup>。除此之外, 相较于单气泡, 多气泡间相互作用形成的高速水射流也更加复杂。因此对非球状耦合气泡的特征及射流特性的认识至关重要。

对水下爆炸气泡的研究最可靠的方法之一是实验研究, 但是对于大当量装药来说, 原型实验的规模较大, 需要较大的资源消耗, 同时具有较高的危险性和实验不确定性, 因此开展水下爆炸缩比实验研究显得尤为重要。常规的水下爆炸缩比实验有常压水池实验、减压水池实验、压力罐实验<sup>[19]</sup>。已有资料研究表明, 以上三种实验方法中, 水池实验能够满足冲击波相似, 但是都没有考虑重力相似, 即无法同时满足 Mach 数和 Froude 数相等<sup>[20, 21]</sup>。这说明常规缩尺水池实验难以真实模拟水下爆炸气泡的脉动、迁移和射流特性, 无法实现与原型的相似, 这给评估大当量装药水下爆炸气泡脉动特征参数带来了极大的误差。基于离心机的超重力水下爆炸实验可提供与原型相似的重力环境, 从而同时满足 Mach 数和 Froude 数的相似条件, 实现对原型气泡力学行为的等效模拟, 成为大当量水下爆炸研究的一种可靠方法。

不同学者针对超重力水下爆炸相似率及冲击波与气泡特性开展了较为广泛的研究。Hu<sup>[22]</sup>利用离心机进行 17 组水下爆炸超重力实验, 系统探究了水下爆炸冲击波和气泡相似关系, 发现冲击波超压峰值对重力加速度的改变不太敏感, 而气泡的脉动周期、最大半径、迁移速度等特征参数则受到重力加速度的显著影响。Wang<sup>[23]</sup>基于离心机实验和数值计算对影响水下爆炸气泡特征参数的网格尺寸、

状态方程等影响因素进行研究。发现气泡的最大半径和脉动周期随着重力加速度的增大而降低。宋歌<sup>[24]</sup>通过理论分析和数值模拟方式对密闭加压容器和离心机水下爆炸相似关系进行探究,发现离心机实验可保证水下爆炸冲击波和气泡脉动、迁移和射流的基本完全相似。刘世聪<sup>[25]</sup>采用实验和数值模拟的方法探究了水下爆炸冲击波载荷和气泡动力学行为,同样发现重力是离心机实验中对气泡特征参数影响的不可忽略因素。Zhang<sup>[26]</sup>基于离心机开展了一系列的超重力环境下水下爆炸实验探究气泡于水-土交界面的相互作用,发现水土交界面的存在,延缓了气泡脉动进程,增大了气泡脉动周期,同时发现气泡脉动对土中管道结构的损伤不可忽略。

尽管国内外学者在超重力场下水下爆炸气泡动力学领域取得了一定进展,但目前关于超重力环境下气泡耦合演化特性的研究仍极为有限,多数理论、实验与数值模拟工作聚焦于孤立气泡的动力学行为,虽然对多气泡系统非线性耦合效应也有较多探讨<sup>[27-30]</sup>,但主要集中于常重力或自由场条件,对不同重力场中多气泡耦合特性的研究,尚缺乏可靠的实验数据与数值验证。本研究中,针对超重力水下多点爆炸现象,聚焦多气泡间耦合及形态演化规律,首先基于离心机设备,在  $G=100g$  超重力环境下开展水下多点爆炸实验,利用高速摄影系统对多气泡形态演化过程进行高精度捕捉,探究竖向分布多气泡在超重力环境下的演化规律,同时利用基于实验结果验证的超重力水下多气泡数值模型进一步探究不同重力加速度对气泡形态演化及特征参数的影响规律,为大当量水下爆破工程问题提供支撑。

## 1 实验与数值设置

### 1.1 实验设置

图 1 为超重力水下多点爆炸实验布置示意图。超重力水下多点爆炸实验依托于高速旋转的离心机产生离心力进而在径向产生离心加速度从而达到改变水箱内重力场的目的。如图 1 (a) 所示,在离心机工作过程中,水箱在径向受到  $n \cdot g$  的离心加速度,在垂向受到  $1g$  的重力加速度,相较于前者,垂向上的常重力加速度可以忽略,除此之外,整个系统会受到科氏力的作用,但是根据前人的研究,对于超重力场下水下爆炸而言,科氏力对冲击波的超压峰值、波速和衰减时间常数几乎无影响,对气泡的迁移产生的偏转效应也几乎忽略不计<sup>[17]</sup>。实验中爆源采用微型硝酸胍镍球形装药(图 1 (b)),由外壳、起爆药、漆包激发脚线、防静电软胶套等部分组成。装药质量为  $2g$  硝酸胍镍,装药依据气泡能计算等效 TNT 当量为  $1g$ ,外壳采用 3D 打印树脂制成,药球的内直径为  $16.52mm$ ,药壳壁厚  $0.5mm$ ,外壳的外表面涂覆有防水型胶水,使微型药球能耐受一定水压并能保证顺利起爆,激发脚线插入至微型药球中部,采用双通道放电控制系统进行高压放电起爆。采用 DH5960 超动态信号测试分析系统采集数据,每通道自带  $8M$  点缓存,支持  $20M$  的瞬态采样速率。图 1 (c) 为爆炸水箱,内部尺寸为  $1500mm \times 1000mm \times 1000mm$ ,该水箱能够满足最高  $100g$  超重力下的水下强动载离心模型试验要求,且带有玻璃观测窗,配备有传感器、激发源和位置可调节的高速相机固定支架等附属结构。详细的实验设计如图 1 (d) 所示,两个球形微型爆源竖向放置于爆炸水箱内,水深  $800mm$ ,双爆源系统重心(连线中点)位于水下  $400mm$  处,爆源间距为  $120mm$  ( $G=100g$  时单个气泡最大半径经验值),实验中重力加速度为  $G=100g$ 。在爆炸水箱的轴向和横向均设置有压力传感器共 3 支

( $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ ),通过传感器支架固定于水中,均距双爆源中心  $20cm$ 。在观察窗设置高速相机用于捕捉双气泡的生成及发展过程,高速相机满帧帧率设置为  $2000fps$ ,采用 DH5960 超动态信号测试分析系统采集数据,最大频响可达  $1MHz$ 。通过有线控制信号收发控制箱和信号接收触发设备采用“一通两路”并联形式对双微型药球同时施加高幅值脉冲电压进行中心激发同步起爆。装药放置于水箱内,通过漆包线与高压起爆装置连接,在装药外壳表面设置有微型挂耳,穿入与漆包线固结的鱼线,防止在高速旋转过程中药球与漆包线的脱离,保证药球间的相对位置和入水深度不变(见图 1

(e) ) 。

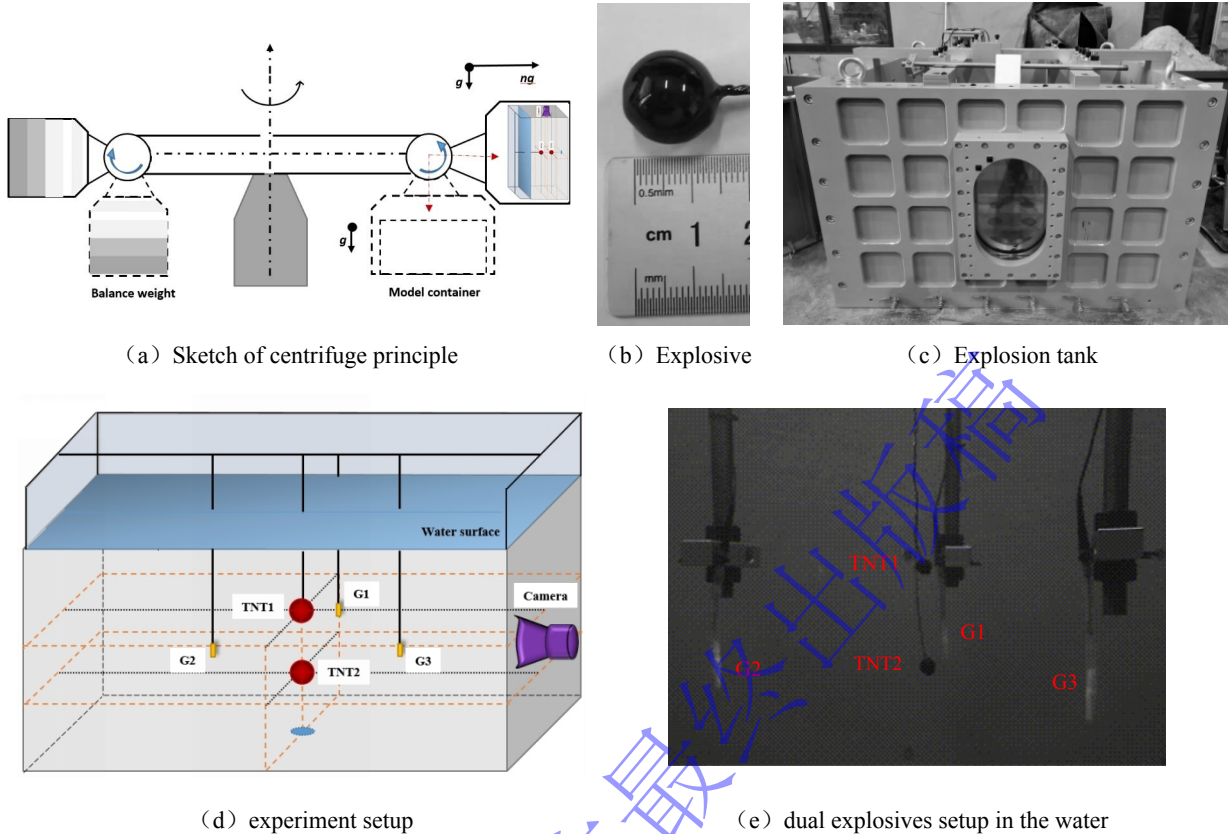


图 1 离心机水下多点爆炸实验布置示意图

Fig.1 Centrifugal experiment setup of two-charge underwater explosion.

在离心机水下多点爆炸实验中，对实验误差的分析和控制是确保实验数据可靠性和实验可重复性的关键。该实验中误差的来源主要有图像空间标定误差、气泡边界测量误差、重力场非均匀性误差、边界效应和科氏力对气泡脉动的影响等。为了减小上述误差的影响，实验中采用标定板对相机进行像素级校准以消除镜头畸变误差，在对气泡边界的测量时采用多次测量求平均值以消除测量误差，科氏力对气泡的影响较小，实验中未观察到气泡明显的偏转和旋转，在爆炸水箱内部侧壁设置消波材料减少反射波的影响，同时由于实验中为高离心加速度（ $G=100g$ ）和小当量炸药（ $W=1g$  TNT），因此根据 Hu<sup>[19]</sup>的研究，边界效应的影响较小。

相似准则是超重力水下爆炸模型实验的理论基础。前人对离心实验中缩比关系进行了大量研究<sup>[31, 32]</sup>，在超重力离心实验中，为了保证模型与原型之间的动力学相似，必须满足关键无量纲数的一致性。对于水下爆炸气泡这类由重力、压力与惯性力共同主导的瞬态多相流过程，主要需满足以下两个相似准则：

(1) Froude 数相似：

$$F_r = v / \sqrt{gL} \quad (1)$$

(2) Mach 数相似：

$$M_a = v / c \quad (2)$$

式中， $v$  为气泡边界运动速度、冲击波速度、射流速度或流体特征速度， $m/s$ ， $g$  为重力加速度， $m/s^2$ ， $L$  为气泡最大半径、水深或爆深等特征长度， $m$ ， $c$  为水中声速， $m/s$ 。Froude 数相似保证流场的重力与惯性力比值一致，确保气泡迁移与变形过程相似。Mach 数保证压缩波传播特性一致，确保压力扰

动在流场中的传播行为相似。

在离心模拟中，通过提高重力加速度至  $n$  倍，可同时满足上述两个准则。根据超重力水下爆炸相似率，原型与模型的爆炸当量缩比关系为  $n^3$  ( $n$  为超重力加速度与常重力加速度的比值)，即模型中爆炸能量等效于原型中  $n^3$  倍的爆炸能量。对于水下爆炸气泡而言，气泡脉动周期  $T_b$ 、气泡最大半径  $R_{max}$ 、气泡迁移高度  $H_b$  的缩比系数均为  $n^{1/2}$ 。表 1 为超重力水下爆炸实验特征量相似关系。

表 1 超重力水下爆炸实验特征量相似关系

Table.1 Scaling law for centrifugal experiment of underwater explosion

分类 Items	特征量 Parameters	量纲 Dimension	原型 Prototype	离心机 Centrifugal Model	比例因子 Scaling factor
重力场	离心加速度	$LT^{-2}$	$G$	$nG$	$n$
介质	水密度	$ML^{-3}$	$\rho_w$	$\rho_w$	1
	空气密度	$ML^{-3}$	$\rho_a$	$\rho_a$	1
	装药密度	$ML^{-3}$	$\rho_0$	$\rho_0$	1
装药	装药量	$M$	$W$	$W/n^3$	$1/n^3$
	装药能量	$ML^2T^{-2}$	$E$	$E/n^3$	$1/n^3$
	爆炸深度	$L$	$h$	$h/n$	$1/n$
	爆距	$L$	$R$	$R/n$	$1/n$
	装药半径	$L$	$R_0$	$R_0/n$	$1/n$
	气泡半径	$L$	$R_b$	$R_b/n$	$1/n$
	气泡	气泡迁移高度	$L$	$h_b$	$h_b/n$
	气泡脉动周期	$T$	$T_b$	$T_b/n$	$1/n$

## 1.2 超重力水下多点爆炸数值模型

实验可以真实地反映水下多点爆炸气泡演化信息，但是由于爆轰产物会对气泡形态演化的观测造成影响，同时由于实验条件的限制，更多的水下爆炸实验有着较大的时间和资金成本，为了获得更丰富的流场信息，采用经过实验验证的高精度数值模型对水下多点爆炸进行进一步研究。

基于 LS-DYNA 建立如图 2 所示的超重力水下两点爆炸二维轴对称多相流数值模型（红色圆点代表爆源，绿色八角点代表设置在爆源上的监测点）。采用任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE) 算法对冲击波和气泡的演化过程进行计算。空气域边界设置为无反射边界，其余边界均为刚性边界。计算域长度为 4000mm，水深 1000mm，装药当量为 1g TNT，为更清晰地观察双气泡的完整脉动过程，气泡间距设置为常重力下气泡最大半径的两倍  $d=320mm$ ，其连线中点位于水下 500mm。采用 DATABASE\_TRACER 关键字在每个球形装药的中心、上边界、右边界和下边界设置有拉格朗日监测点以记录爆轰产物的体积变化。空气采用 MAT\_NULL 材料本构模型和 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 状态方程，水体采用 MAT\_NULL 材料本构模型和 GRÜNEISEN 状态方程，炸药采用 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料本构模型和 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程。通过 \*INITIAL\_HYDROSTATIC\_ALE 和 \*LOAD\_BODY\_(OPTION) 关键字施加由重力引起的静水压力梯度。表 2 为实验和数值模拟工况。

图 2 超重力水下两点爆炸二维轴对称数值模型

Fig.2 2D axisymmetric numerical models of two-charge underwater explosions in hypergravity environment.

表 2 实验及数值模拟工况

Table 2 Schemes of experimental and numerical simulations



## 2.2 数值模型验证

水下爆炸气泡脉动周期和最大半径是研究水下爆炸气泡现象最重要的特征尺寸。将数值计算得到的气泡最大半径和气泡脉动周期与经验公式和实验结果进行对比，是验证数值计算模型准确性最基础的手段。

Cole<sup>[33]</sup>和 Snay<sup>[9]</sup>给出了水下爆炸气泡最大半径与当量的关系式：

$$R_{\max} = K \times \frac{W^{1/3}}{Z} \quad (3)$$

式中  $R_{\max}$  为水下爆炸脉动气泡最大半径，单位 m； $W$  为爆炸等效 TNT 当量，单位 kg； $K$  和  $Z$  为相关系数，不同的研究者针对以上公式中的系数提出了不同的取值，在这里  $K$  取值 3.5，对于超重力环境， $Z$  取值为  $Z = (nh + 10)^{1/3}$ ，其中  $h$  为装药初始爆炸深度， $n$  为比例常数。

气泡第一次脉动周期的经验公式  $T_b$  为：

$$T_b = 2.11 \frac{W^{1/3}}{(nh + 10)^{5/6}} \quad (4)$$

式中  $W$  为等效 TNT 装药质量，单位 kg； $T_b$  为第一次气泡脉动周期，单位 s。

水下多点爆炸是具有强非线性等复杂特性的现象。为了验证超重力水下多点爆炸数值模型的有效性，首先开展常重力环境下 1g TNT 当量装药水下爆炸实验 (EX-8)。实验水深为 735mm，装药初始爆炸深度为 211mm。通过对比气泡发展形态和特征参数的实验值、经验值和数值结果的相似程度来论证 LS-DYNA 数值计算的有效性。

表 3 为气泡脉动特征参数数值计算结果与理论值和实验值的对比，由表可知，气泡最大半径数值结果相较于实验结果较小，但是比理论结果大，这可能是由于实际实验中存在测量误差，数值计算中截断误差等，但整体误差来看，数值结果与实验值误差为-2.37%，与经验值误差为 2.48%，误差均小于 3%，满足要求。从脉动周期来看，实验测得的气泡脉动周期最小，经验公式计算得出的脉动周期值最大，数值计算结果介于两者之间，其中数值结果与实验结果的误差为 1.13%，与经验值的误差为-11.84%，虽然数值结果与经验值误差较大，但对比实验结果来看，数值计算整体误差较小，计算精度满足要求。

表 3 气泡特征参数数值结果与实验、经验公式对比

Table 3 Bubble characteristics (numerical results VS experimental value and the empirical value)

	气泡最大半径/mm	第一次脉动周期/ms
实验	169	26.5
经验	161	30.4
数值	165	26.8
数值与实验值误差	-2.37%	1.13%
数值与经验值误差	2.48%	-11.84%

图 4 为 EX-8 实验中水下爆炸生成的气泡形态与对应数值结果对比图。左侧为实验中不同时刻气泡形态的高速摄影图像，右侧为对应时刻的数值模拟结果。可以看到，无论是气泡膨胀至最大体积时刻 ( $t=13.25\text{ms}$ ) 还是收缩至最小体积时刻 ( $t=27.75\text{ms}$ ) 以及后续的二次膨胀，数值结果与实验结果均匹配良好。图 5 为 EX-8 实验中气泡一次脉动半径时历曲线数值与实验结果对比图，可以发现气泡在膨胀阶段数值与实验时历曲线几乎重合，在收缩阶段由于气泡的非球状坍塌和测量误差，数值与实验结果存在一些偏差，但误差在可接受范围内。因此，总的来说，本文采用的数值计算模型能够较好地模拟常重力水下爆炸气泡脉动现象。

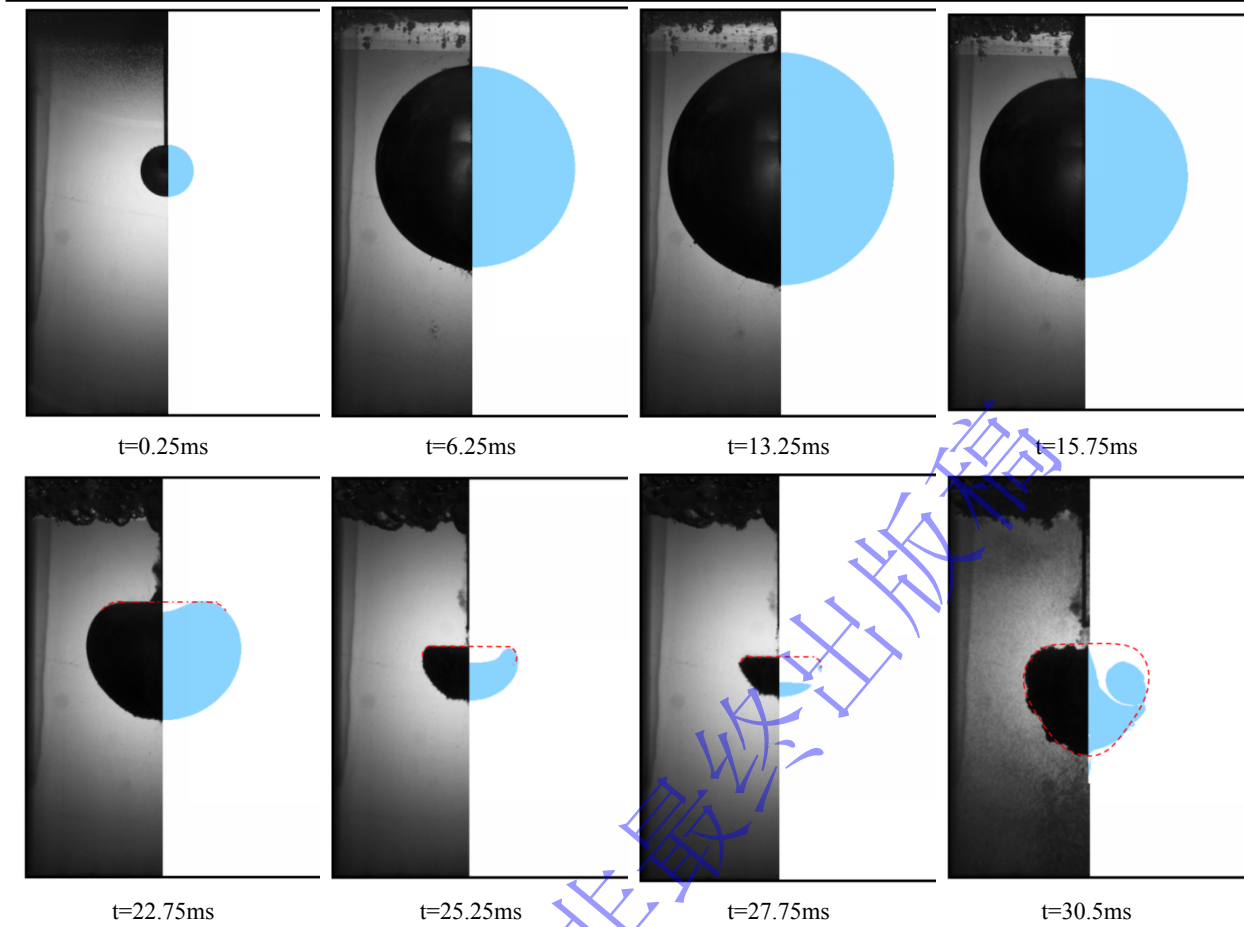


图 4 气泡形态演化实验与数值结果 ( $W=1\text{g TNT}$ )

Fig.4 Experimental and numerical bubble behaviors for  $W=1\text{g TNT}$

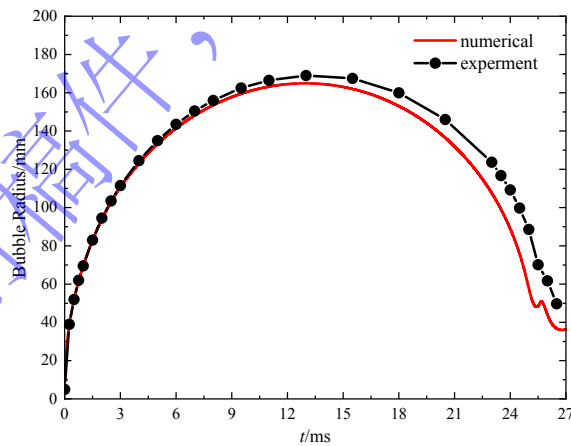


图 5 水下爆炸气泡半径时历曲线数值与实验结果对比

Fig.5 Comparison of time-history curves of UNDEX bubble radius derived from experiment and numerical simulation.

进一步验证超重力环境下数值模型的有效性,开展了  $G=100\text{g}$  双爆源水下爆炸实验 (EX-7), 采用高速摄影获取了气泡演化过程图像。图 6 为  $G=100\text{g}$  超重力环境下水下两点爆炸气泡演化过程的实验与数值结果。每幅图左侧为实验结果, 右侧为对应的数值模拟结果。由实验结果可知, 在  $100\text{g}$  的超重力环境下, 初始时刻, 双气泡体积迅速膨胀, 随着膨胀的进行, 上部气泡下边界与下部气泡的上边界出现相互抑制 (见图 6 (a)), 气泡之间的水被挤出, 水膜变薄, 边界变得扁平, 气泡不再保持球形特征 (见图 6 (b))。随着时间的推移, 气泡之间出现接触, 由于较大的压力梯度, 下部

气泡首先进入到收缩阶段，上部气泡一直保持着膨胀的状态，双气泡进入异相脉动阶段（见图 6（c））。随着下部气泡进一步收缩，下边界产生向上的水射流，此时下部气泡与处于收缩阶段的上部气泡开始出现物质交换和动量传递（见图 6（d）），可以发现，下部气泡内的物质以较高速度进入上部气泡内部，随着射流的进一步发展，水射流贯穿上部气泡（见图 6（e）），气泡内部速度场不均匀度增大，双气泡系统成为多连通区域，被贯穿的气泡进一步收缩并伴随着较为明显的向上迁移（见图 6（f））。可以发现，超重力多点爆炸数值模型较为精确地模拟出了超重力环境下双气泡的生成、接触、融合、迁移、坍塌和破碎的全过程，并更进一步展现了实验中观察不到的气泡内部物质的能量交换过程。

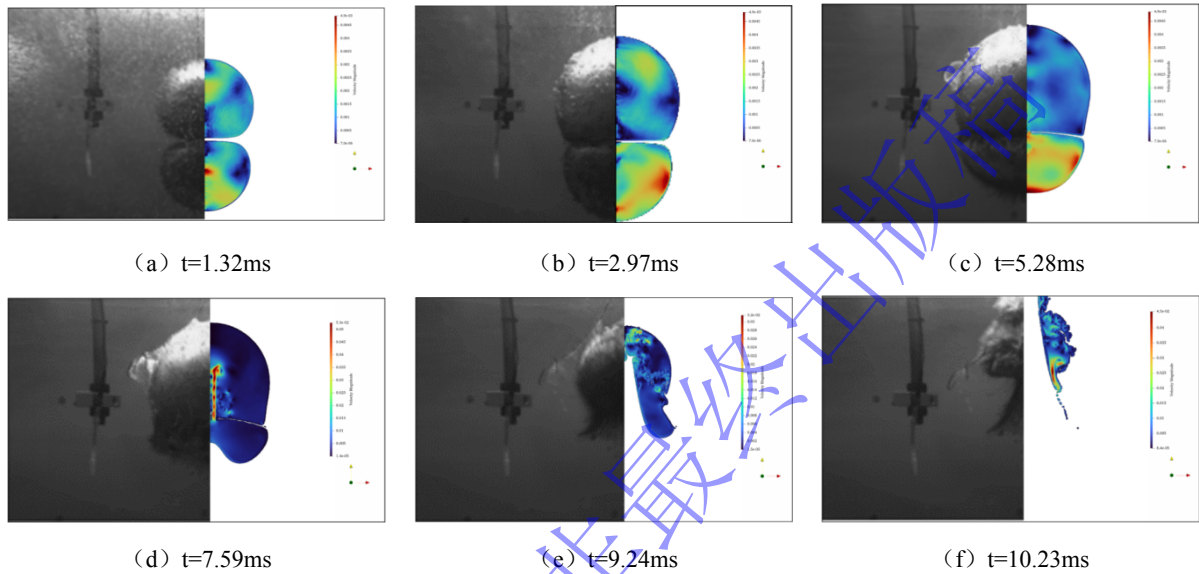


图 6 超重力水下爆炸双耦合气泡形态演化进程实验与数值结果， $G=100g$

Fig.6 Comparison of centrifugal experimental data (left part) and numerical results (right part) for two bubbles interacting in hypergravity environment,  $G=100g$ .

图 7 为超重力水下爆炸双气泡边界运动位移的实验与数值时历曲线，图 7（a）为实验中气泡半径测量方法示意图，选取双爆源初始位置为原点，考虑到气泡后期变形及溃灭给测量带来的困难和误差，选择双气泡未接触一侧的边界为对象进行测量， $R_h$  为气泡水平方向半径， $R_v$  为气泡竖直方向半径。由图 7（b）可以看到，对于上部气泡而言，其右边界水平方向位移在膨胀过程中逐渐大于上边界在竖向方向的位移，而下部气泡则有着相反的规律，这是由于双气泡在膨胀过程中，随着体积的增大，彼此出现了相互抑制，气泡不再保持球形，气泡各边界在各个方向上的演化进程出现差异，这一点从图 6 气泡演化过程图像中也可以看出。总体来看，上部气泡在竖向和水平向边界位移均大于下部气泡，这是因为在超重力环境中，上部气泡和下部气泡存在较大的压力梯度，下部气泡膨胀时需克服更大的围压，做功较多。在爆炸总能量恒定的情况下，下部气泡总是有着较小的气泡扩张半径。从图中还可以看出，除个别数据点外，实验结果与数值模拟结果吻合良好。然而，下部气泡下边界竖向位移的实验值与模拟结果存在一定偏差，这主要是由于实验中爆轰产物对气泡的遮挡造成测量误差，以及不可避免的数值离散误差。总体而言，从气泡形态演化过程及特征参数来看，数值结果与实验结果具有良好的一致性。

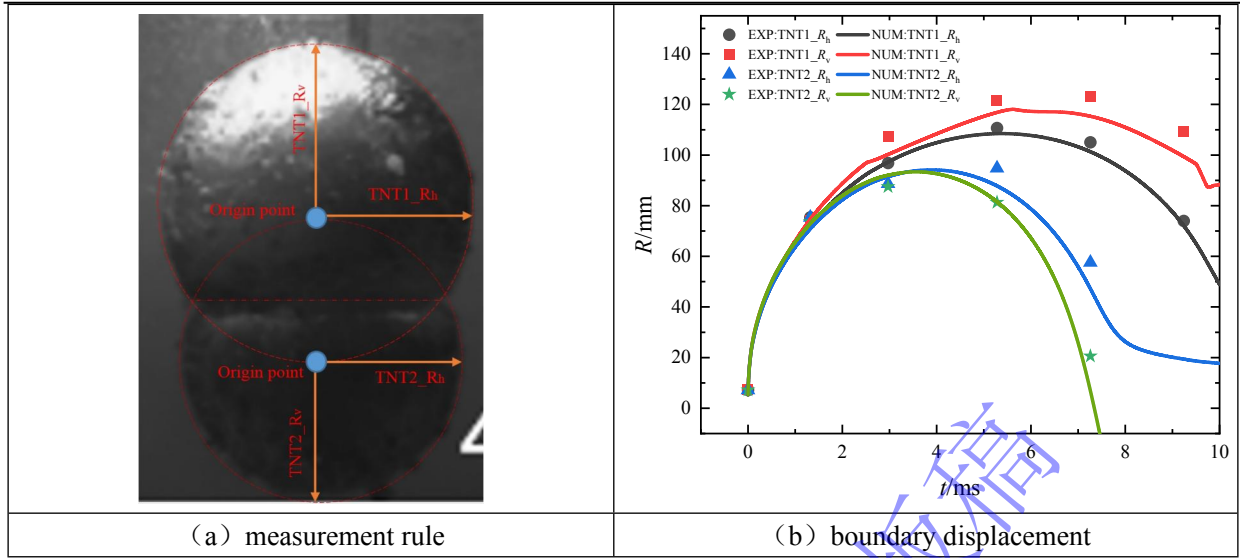


图 7 超重力水下爆炸双气泡边界扩张时历曲线 (实验与数值结果),  $G=100g$

Fig.7 Comparison of experimental and numerical bubble radius curves of underwater explosion in hypergravity environment,  $G=100g$ .

### 3 结果与讨论

基于超重力水下多点爆炸数值模型开展多组超重力环境下水下两点爆炸数值模拟, 探究超重力场对气泡演化的影响规律。设置重力加速度分别为  $10g$ 、 $50g$ 、 $100g$ 、 $200g$ 、 $300g$  和  $400g$ , 结合超重力缩比准则, 换算到原型当量  $W_p$  分别为  $1kg$ 、 $125kg$ 、 $1t$ 、 $8t$ 、 $27t$ 、 $64t$ 。选取  $G=10g$  ( $1kg$ ) 和  $G=400g$  ( $64ton$ ) 两种具有代表性的工况进行详细分析。

#### 3.1 小当量爆炸 ( $G=10g$ , $W_p=1kg$ )

在重力加速度为  $10g$  的超重力场内, 双气泡的演化与常重力场有所差别。爆炸初始时刻, 冲击波以较高的速度向四周传播, 被扰动流场速度增加。双气泡体积迅速膨胀, 呈现标准球形, 但气泡内部速度场却呈现不均匀分布, 随着气泡体积的逐渐增大, 气泡间距离逐渐减小, 双气泡相互作用加强, 形状不再保持标准球形。 $t=9ms$  时, 下部气泡开始收缩, 此时上部气泡仍处于膨胀阶段, 因此速度较大。当  $t=11.5ms$  左右, 上部气泡开始收缩, 其形状在处于收缩阶段的下部气泡的影响下, 逐渐呈现椭圆形。随着下部气泡收缩速度不断增大, 在  $t=21.5ms$  左右, 下部气泡的底边形成竖直向上的射流, 高速贯穿下部气泡并携带着较大的动能继续向上运动, 冲击上部气泡, 导致上部气泡的下边界向内凹陷 (见图 8 (e) - (g)), 受到下部气泡水射流的影响, 上部气泡下边界曲率变小, 逐渐向气泡内部凹陷, 并伴随着气泡体积的收缩, 在  $t=23.9ms$  左右, 上部气泡的上边界向下凹陷,  $0.1ms$  后, 气泡被上部射流贯穿, 形成破碎气泡, 随后破碎气泡继续收缩至最小体积 (见图 8 (h)) 随后开始向外膨胀, 上下两个破碎后的气泡间发生迁移和融合, 进行物质交换和动量传递, 内部能量重新分布 (见图 8 (k) - (l)), 系统整体动能分布趋于平衡, 融合后的破碎气泡继续扩张收缩至溃灭。

爆炸与冲击  
Explosion and Shock Waves

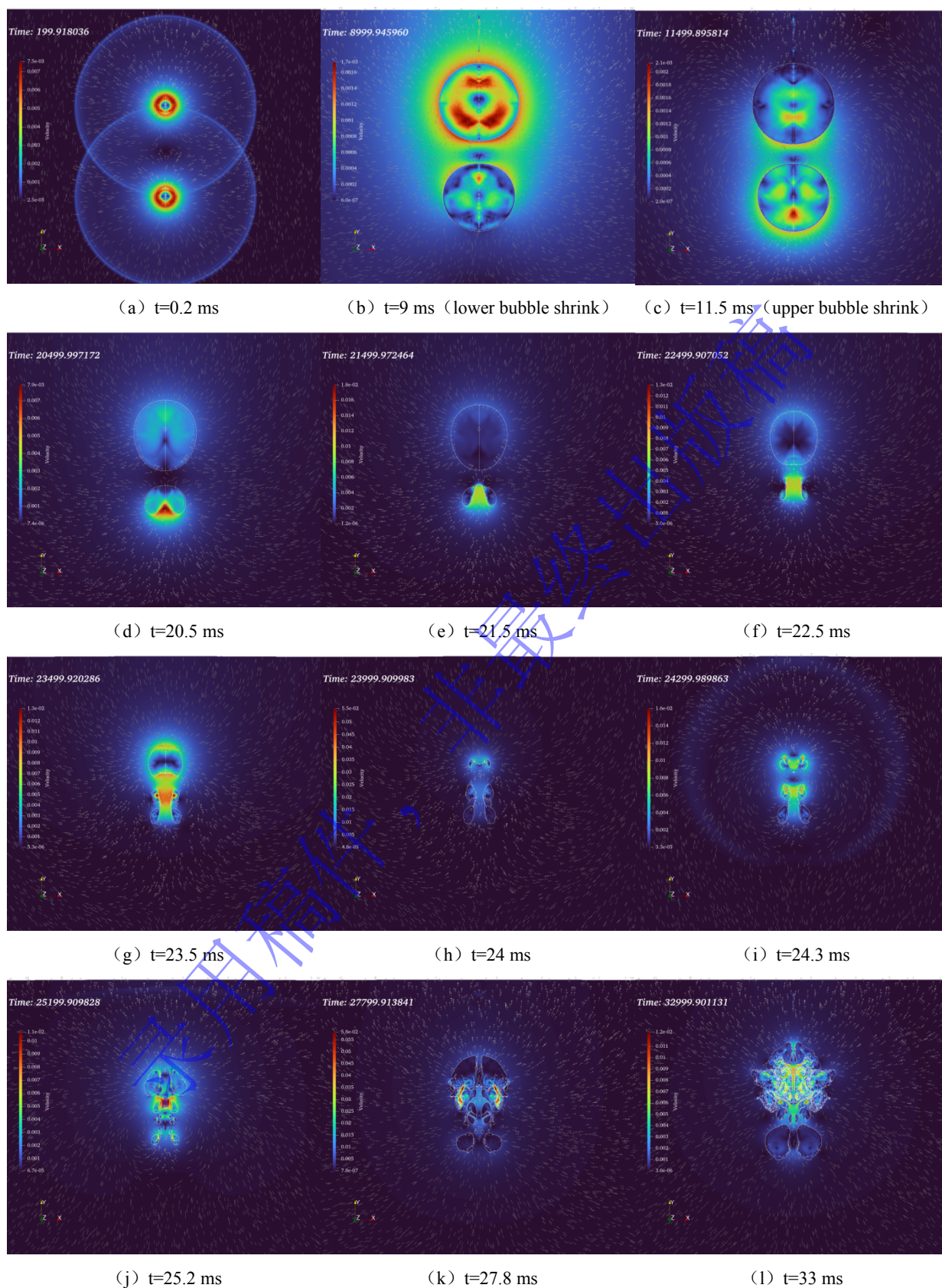
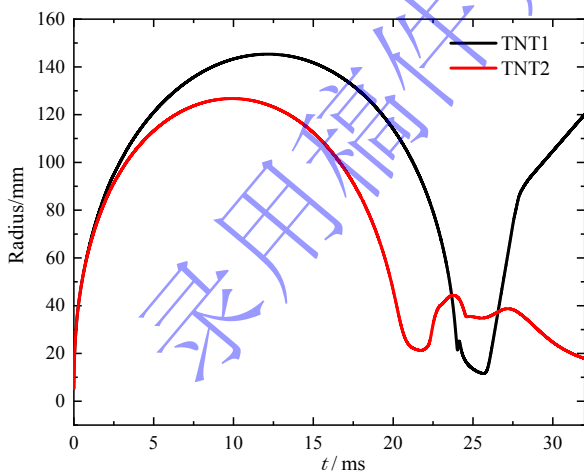
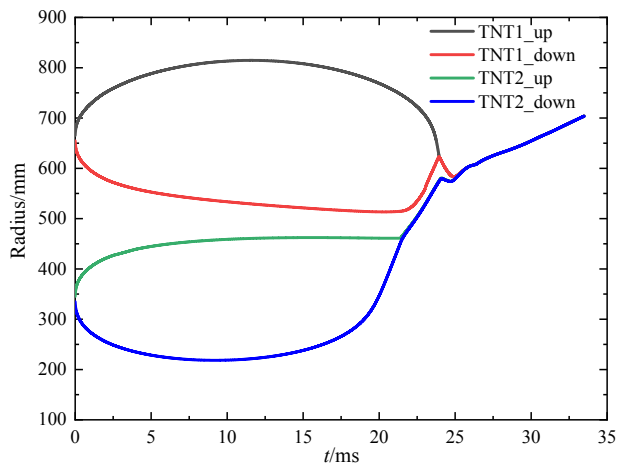


图 8 超重力场下双气泡形态耦合、融合、迁移和射流过程 (云图为速度场, 白色箭头为速度矢量方向,  $G=10g$ )  
Fig.8 Dual-bubble interaction, coalescence, migration and jetting in hypergravity environment. (The color map denotes the velocity magnitude and the white arrows denote the velocity direction,  $G=10g$ )

从图 9 (a) 中还可以看出, 在膨胀至最大体积时, 上部气泡比下部气泡有着更大的半径峰值, (下部气泡  $R_{\max}=127\text{mm}$ , 上部气泡  $R_{\max}=145\text{mm}$ ), 但是上部气泡脉动周期为  $24.1\text{ms}$ , 下部气泡脉动周期为  $22.5\text{ms}$ , 这说明下部气泡比上部气泡更快完成第一次脉动, 两气泡在第二次脉动阶段存在相位差, 进一步影响形态的演化。图 9 (b) 为双气泡的上下边界位移历时曲线, 可以发现, 在气泡膨胀开始的大约  $4\text{ms}$  后, 上部气泡 (即 TNT1) 上边界的位移量逐渐大于下边界的位移量, 这是由于下边界在气泡膨胀过程中受到下部膨胀气泡的抑制作用。随后两边界融合并一起向上运动, 这说明此时气泡被贯穿, 气泡上下边界接触。在  $23\text{ms}$  左右, 上下边界位移速度骤增, 这表明在收缩后期气泡形成了射流。对于下部气泡, 其上边界位移在初期增长较快, 随后几乎保持不变, 这是因为上边界同样受到上部气泡的抑制作用。下边界向下移动, 随后位移经历了一段“平台期”,  $t=15\text{ms}$  后下边界开始向上移动, 位移迅速增大, 这说明形成了射流, 随后下部气泡的上下边界接触一起向上运动, 此时气泡被射流贯穿, 气泡出现破碎。从图 9 (c) - (d) 可以看出, 在初始时刻, 气泡边界以数千米每秒的速度沿径向扩张, 随后气泡边界扩张速度骤降至数十米每秒后继续缓慢下降, 可以看出在气泡膨胀至最大体积阶段, 气泡一直做减速运动, 随后随着气泡的收缩, 气泡边界速度开始做反向加速运动, 速度逐渐增大。同时可以发现, 在膨胀阶段, 双气泡的半径膨胀速度一致, 但在收缩阶段和溃灭阶段, 速度出现差异, 上部气泡存在明显的速度骤增, 这是由于上部气泡发生射流后, 增大了气泡边界的运动速度。双气泡的上下边界运动速度在气泡收缩后期存在较大的差异。下部气泡的下边界首先形成射流, 但值得注意的是, 在射流形成时, 下部气泡下边界速度平稳增加并基本保持不变, 直至射流完成。这说明射流在形成过程中其速度几乎保持不变。射流速度达到峰值  $77.64\text{m/s}$ , 随后速度下降并保持在  $43.36\text{m/s}$  一段时间后, 速度转变方向, 这是受上部气泡向下射流的影响。上部气泡的下边界受到下部气泡射流的影响, 速度骤增至  $240\text{m/s}$ , 随后, 射流发展的过程中其速度下降并几乎保持不变, 上边界发生向下射流, 射流速度达到峰值  $177\text{m/s}$ 。可以发现, 射流后的气泡边界速度值整体小于射流前的速度值, 这说明高速射流消耗了双气泡系统大量的动能, 导致气泡系统在射流后动能减少。这一点在 Cui<sup>[7]</sup>和 Supponen<sup>[34]</sup>的研究中也有所发现。



(a) Horizontal



(b) Vertical

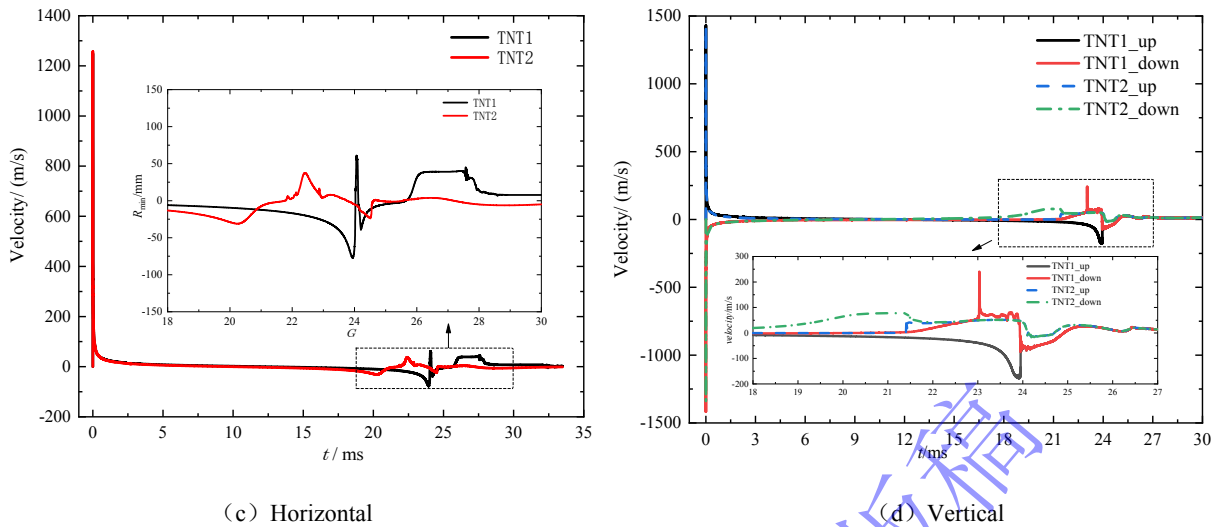


图 9 超重力场下双气泡边界位移及速度时历曲线 ( $G=10g$ )

Fig.9 Time-history curve of the displacement and velocity of the dual-bubble boundaries in hypergravity environment ( $G=10g$ )

### 3.2 大当量爆炸 ( $G=400g$ , $W_p=64t$ )

图 10 为  $G=400g$  (原型当量为 64t) 时水下爆炸双气泡形态耦合、融合, 迁移和射流演化过程, 云图为速度场大小, 白色箭头为流场内速度方向。可以看到, 随着重力加速度进一步增大, 双气泡在耦合强度、形态演化上均与较小重力加速度环境中有所不同。在爆炸后很短的时间内, 大约  $t=2.9ms$  时, 下部气泡体积就收缩至最小值, 完成第一阶段气泡脉动, 随后体积扩张, 边界速度逐渐增大, 气泡向上迁移, 并在后续的过程中伴随着方向向上的气泡分离, 显示出明显的气泡尾迹, 如图 10 (f) - (i) 所示, 这是因为一方面较大的重力加速度增大了流场内压力梯度, 增大了破碎气泡的迁移速度和距离, 另一方面, 上部气泡的收缩使得周围流场呈现“汇聚”效应, 对下部破碎气泡群产生吸引作用。值得注意的是, 在第一次脉动周期内未出现较为明显的射流现象, 这是射流发生时气泡体积较小的缘故, 但下部气泡在双气泡系统中却具有最大的射流速度, 达到了  $300m/s$  (见图 11 (d))。相对于下部气泡, 上部气泡在体积收缩过程中形成了较为明显的射流 (见图 10 (e)),  $t=4.4ms$  时, 上部气泡射流完成, 上下边界被贯穿, 气泡体积收缩至最小值, 随后进入第二次脉动阶段, 气泡体积增大,  $t=5ms$  时, 下部气泡完成二次脉动。在第一个脉动周期内, 上部气泡的最大半径远远大于下部气泡的最大半径, 上下两个气泡的一次脉动周期差距则进一步增大, 除此之外, 在三个脉动周期内, 破碎的双气泡群在向上迁移过程中没有出现气泡的接触和融合, 双气泡的耦合强度减弱, 迁移距离差距增大。

从速度场的角度分析, 在爆炸初始时刻, 气泡以较高的速度向四周膨胀, 横向膨胀初始速度可达  $1300m/s$  (见图 11 (c)), 纵向速度可接近  $1500m/s$  (见图 11 (d)), 在起爆后约  $0.4ms$ , 气泡边界膨胀速度迅速降低至几十米每秒, 随后, 气泡在膨胀过程中速度缓慢降低。即水下爆炸气泡在膨胀阶段做加速度减小的减速运动。可以发现, 下部气泡在收缩阶段有着比上部气泡更大的速度。双气泡在膨胀和收缩的过程中, 气泡内部呈现速度场的不均匀分布。上部气泡收缩至最小体积后向外迅速膨胀, 边界速度瞬间增大, 在形成射流的边界处, 周围流场具有较大的动能。值得注意的是, 射流在形成和发展过程中, 其射流边界速度处于一个“平台期”, 这说明气泡在其边界向内凹陷形成射流直至贯穿另一侧边界的过程中, 其射流速度基本保持不变。

爆炸与冲击  
Explosion and Shock Waves

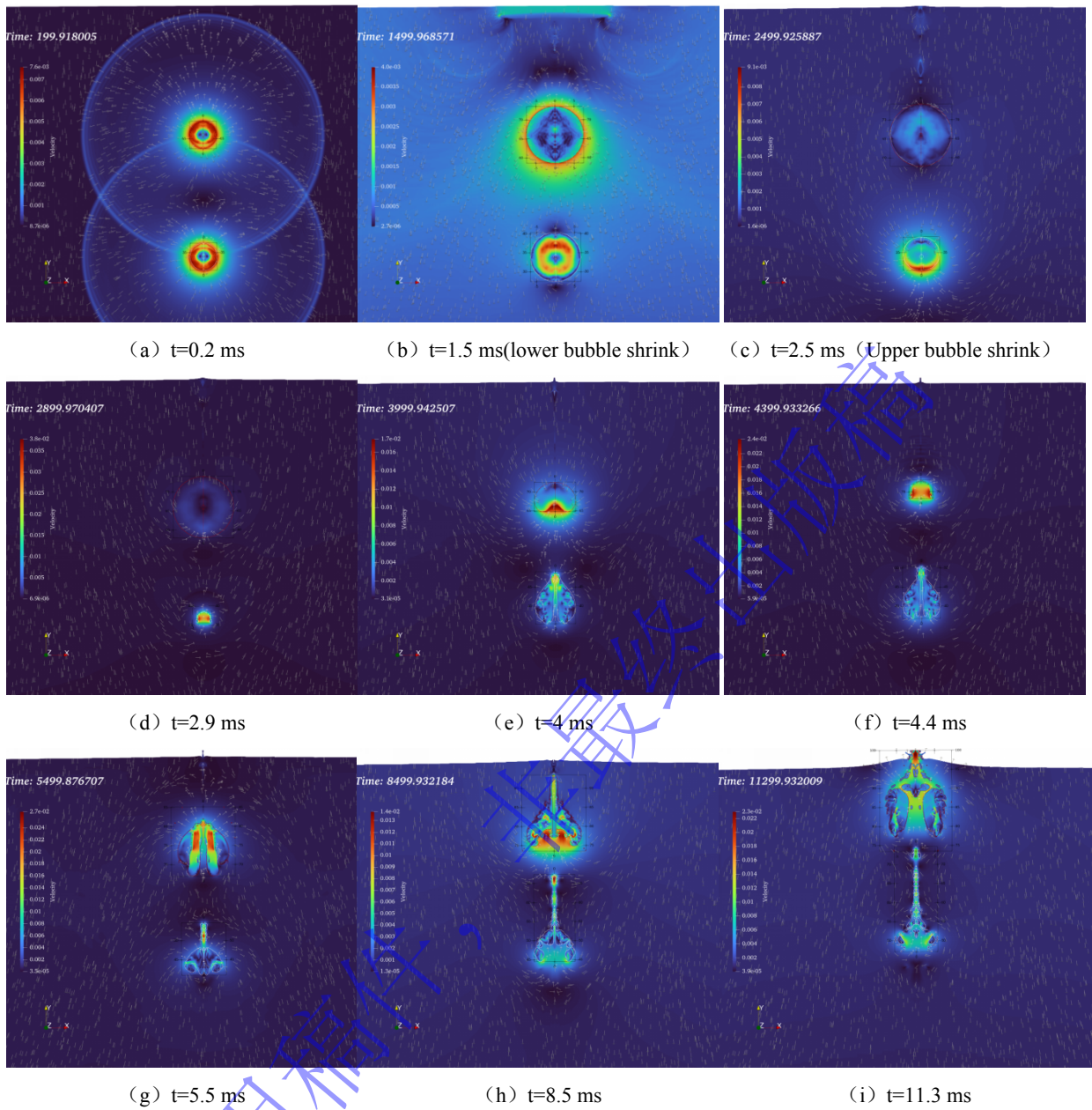
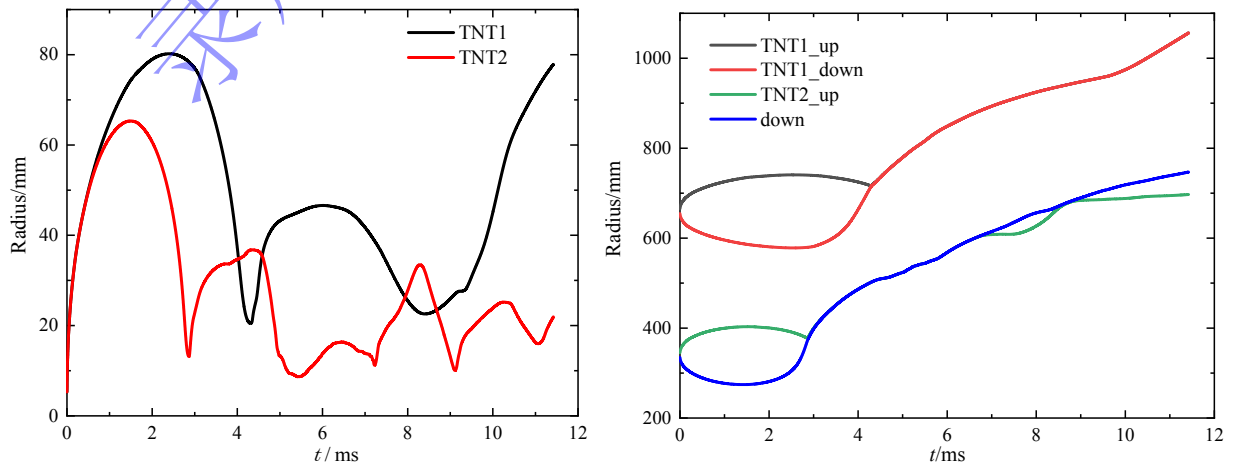


图 10 超重力场下双气泡形态耦合、融合、迁移和射流过程,  $G=400g$

Fig.10 Interaction, coalescence, migration and jetting of multiple bubbles in hypergravity environment,  $G=400g$ .



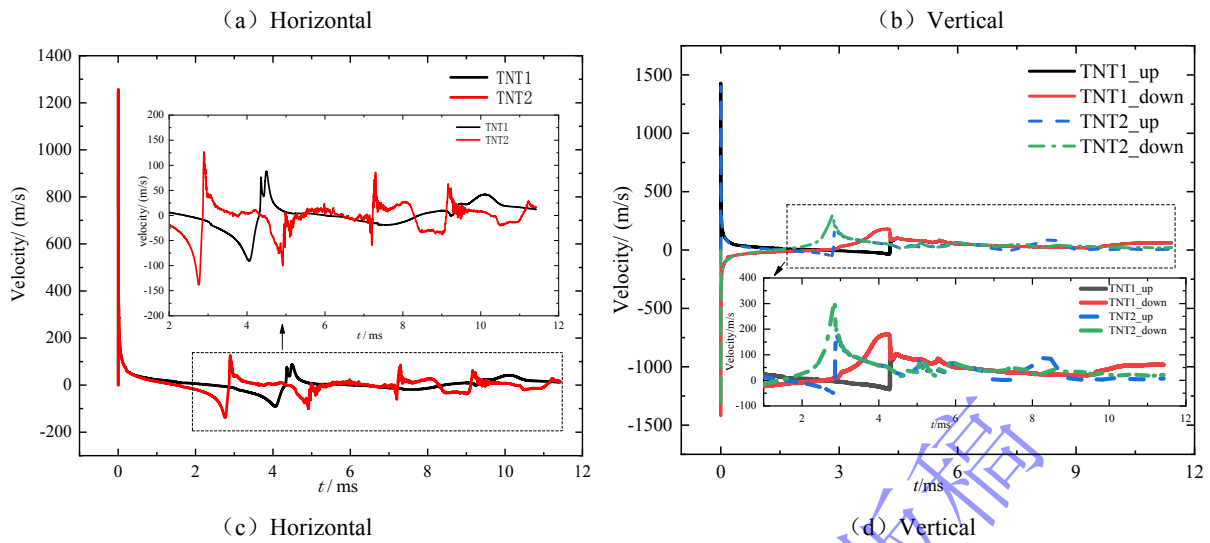


图 11 超重力场下气泡边界位移和速度时历曲线  $G=400g$

Fig.11 Time-history curve of the displacement and velocity of the dual-bubble boundaries in hypergravity environment, ( $G=400g$ )

### 3.3 重力场对多气泡耦合及形态演化的影响

图 12 为不同重力下水下爆炸双气泡在各脉动阶段形态演化对比图。其中,  $t_2^{\max}$  和  $t_1^{\max}$  分别为下部气泡和上部气泡膨胀至最大体积的时刻,  $t_2^{\text{jet}}$  和  $t_1^{\text{jet}}$  分别为下部气泡和上部气泡射流完成的时刻,  $t_2^{\text{min}^*}$  为第二个脉动周期内下部气泡收缩至最小体积的时刻。可以发现不同重力环境下, 相同间距的双气泡在形态演化及脉动过程上存在较大差异。重力加速度越小, 气泡的最大半径越大, 脉动周期也越长。同时发现, 上部气泡与下部气泡在不同重力环境下, 也有着不同的气泡特征参数, 重力加速度越大, 下部气泡比上部气泡越早地产生气泡的射流, 且向上迁移的速度也越大, 这说明超重力环境在某种程度上改变了多气泡间气泡演化的进程, 使同步起爆的气泡之间产生脉动相位差, 具有了微差起爆的效果, 但是与微差起爆不同的是, 气泡的脉动周期和气泡形态都会产生变化, 超重力环境具有压缩时间和空间的效果。同时可以发现, 当下部气泡第二个脉动阶段完成时, 上下气泡间的距离随着重力的增加而增加, 这是由于超重力环境下, 流场内部压力梯度增大, 较大地改变了双气泡系统浮力-惯性关系, 增大了气泡间的迁移速度差。除此之外, 上部气泡加速上升后方形成低压尾流区, 下部气泡在浮力驱动下加速进入该区域, 进一步加速了下部破碎气泡的彼此分离, 破碎气泡群向自由面迁移并相继溃灭。以上现象表明, 在双气泡耦合作用中, 两爆炸源之间的相互作用引起了复杂的压力干涉。当两个气泡相继或同时膨胀时, 其周围流场速度势叠加, 导致局部压力梯度重新分布。这种干涉效应可诱发气泡界面的不稳定性, 促进射流形成, 并驱动气泡朝向或远离彼此迁移, 具体取决于时序差与空间距离。在大离心加速度下, 这种迁移行为受到更强的定向恢复力约束, 导致气泡脉动轨迹更加集中, 减少了横向偏移。

$G/g$	$t=0.5\text{ms}$	$t=t_2^{\max}$	$t=t_1^{\max}$	$t=t_2^{\text{jet}}$	$t=t_1^{\text{jet}}$	$t=t_2^{\text{min}^*}$

## 爆炸与冲击 Explosion and Shock Waves

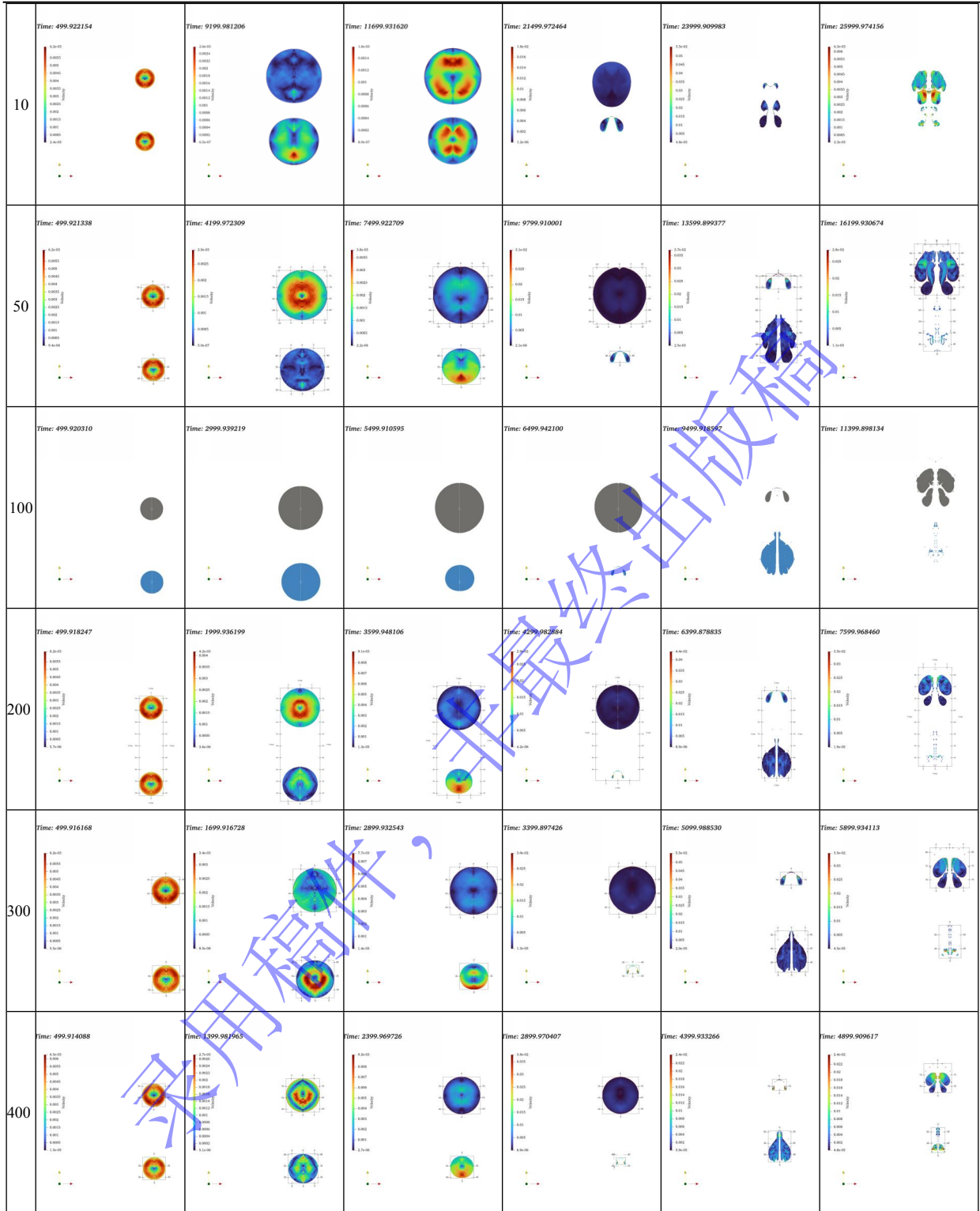


图 12 不同重力环境下水下爆炸双气泡形态演化对比

Fig.12 Contrast of explosion double bubble morphology in different gravity environment.

### 3.4 重力场对多气泡演化特征参数的影响

进一步定量分析超重重力场中加速度对气泡特征参数的影响规律。图 13 为不同重力环境下气泡特征参数对比，其中  $R_{\max}$  为气泡最大半径， $T_{R_{\max}}$  为气泡膨胀至最大体积的时间， $T_2$  为气泡二次脉动周

期。可以看到，双气泡的最大半径随着重力加速度的增大而减小，而上部气泡的最大半径始终大于下部气泡，且随着重力加速度的增大，气泡间最大半径的差距呈现先增后降的规律。 $G=50g$  时，双气泡最大半径差距最大，达 23.9mm（见图 13（a））。而气泡的第一脉动周期随着加速度的增大而降低，上部气泡相比于下部气泡有着较大的气泡脉动周期，可以看到，气泡一次脉动周期与重力加速度呈指数关系，随着加速度增大，脉动周期呈指数衰减。这是因为在超重力场中，静水压  $P_{\infty} = P_0 + \rho_w gh$ ，高  $g$  增大了流场压力梯度，加速气泡的膨胀和溃灭，气泡脉动周期  $T \propto R_0^{5/6} (\rho_w / \rho_{\infty})^{1/2} g^{-1/3}$ ，重力的增大会缩短气泡脉动周期，加快能量的释放，如图 13（b）所示，同理，气泡膨胀至最大半径所用的时间和下部气泡二次脉动时间也会随着重力的增加而降低（见图 13（c） - （d））。除此之外，由图 14 可以看到，重力加速度越大，无论是上部气泡还是下部气泡，其在第一个脉动过程完成时，收缩气泡的速度峰值较大，这说明较大的重力加速度增强了气泡在第一个脉动周期的收缩强度，进而增大了气泡系统的动能。

在水下爆炸过程中，气泡的脉动行为本质上是由流体中压力场与惯性效应之间的非线性相互作用所驱动的。特别是在超重力环境下，重力加速度的显著增强使得气泡动力学过程中的体积变化、射流形成以及迁移行为表现出与常重力条件下明显不同的物理特征。根据 Froude 数相似准则（式（1）），在保证模型与原型间动力学相似的前提下，高离心加速度有效压缩了气泡脉动的时空尺度，导致气泡最大半径减小、脉动周期缩短。这是由于在强重力场中，恢复力（即静水压力梯度）显著增强，加速了气泡膨胀后的回弹过程，从而抑制了气泡的过度膨胀。同时，Mach 数相似（式（2））确保了压力扰动（如冲击波和膨胀波）在流场中的传播特性保持一致，使得模型实验能够准确反映原型中的压缩性效应。基于以上特征，可以将超重力条件下双气泡特征参数的影响划分为三种典型的耦合模式：

（1）强耦合模式：（ $G \leq 50g$ ,  $d/R_{\max} \leq 2.6$ ）

双气泡在脉动前期相互作用较强，膨胀、收缩和射流早期阶段会发生接触与融合，流场剧烈扰动，气泡最大半径、脉动周期随着重力加速度增大呈现指数衰减趋势。

（2）中度耦合模式：（ $50 < G \leq 300g$ ,  $d/R_{\max} \leq 3.7$ ）

双气泡在脉动前期相互作用强度一般，射流后期阶段会发生接触与融合，气泡最大半径、脉动周期随着重力加速度增大呈现倒数衰减趋势。

（3）弱耦合模式：（ $300 < G$ ,  $3.7 < d/R_{\max}$ ）

双气泡在脉动前期相互作用较弱，双气泡脉动阶段没有发生接触与融合，气泡最大半径、脉动周期受重力加速度影响较小。

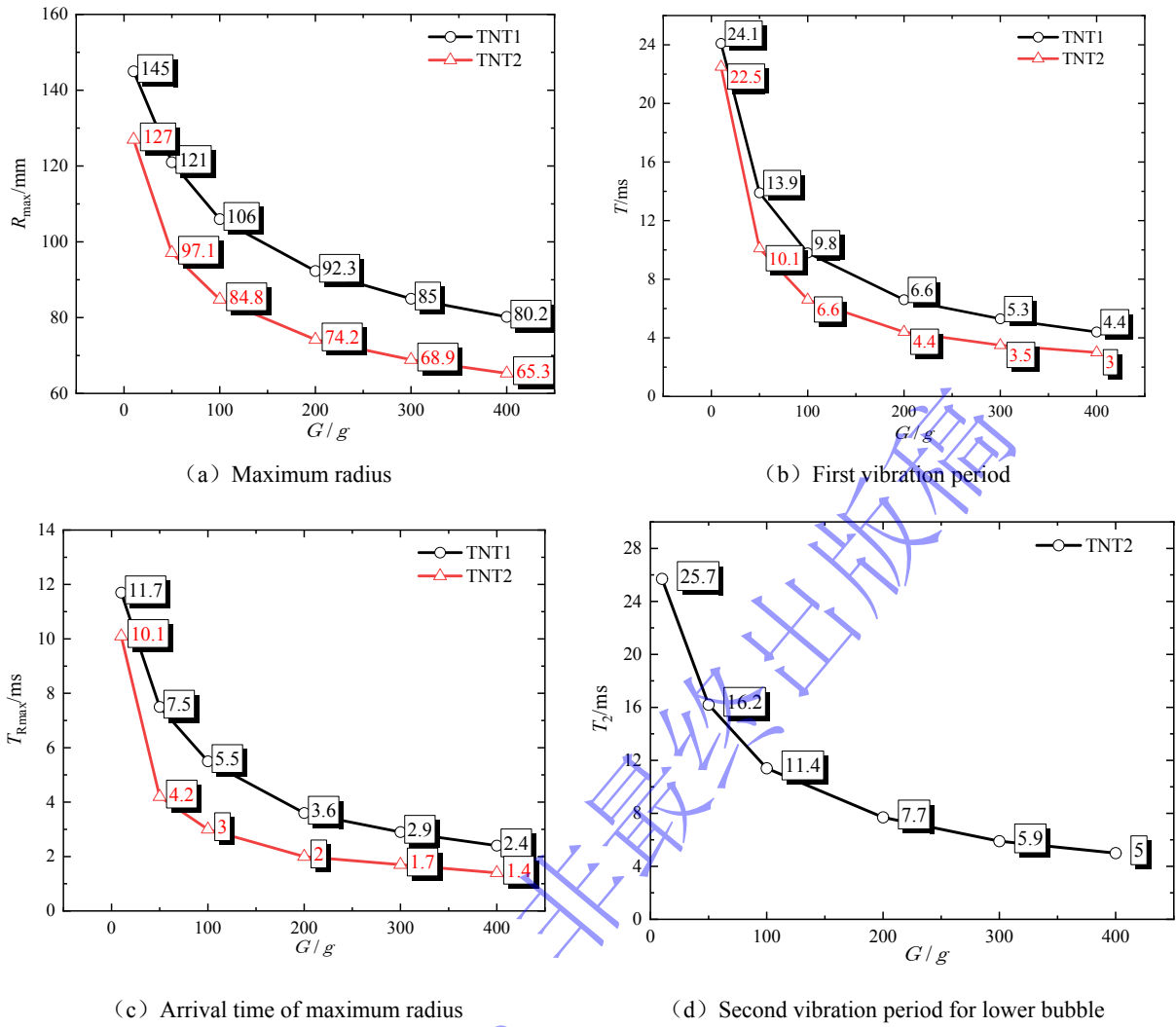


图 13 不同重力环境下气泡特征参数对比

Fig.13 Contrast of bubble characteristic parameters in different gravity environment.

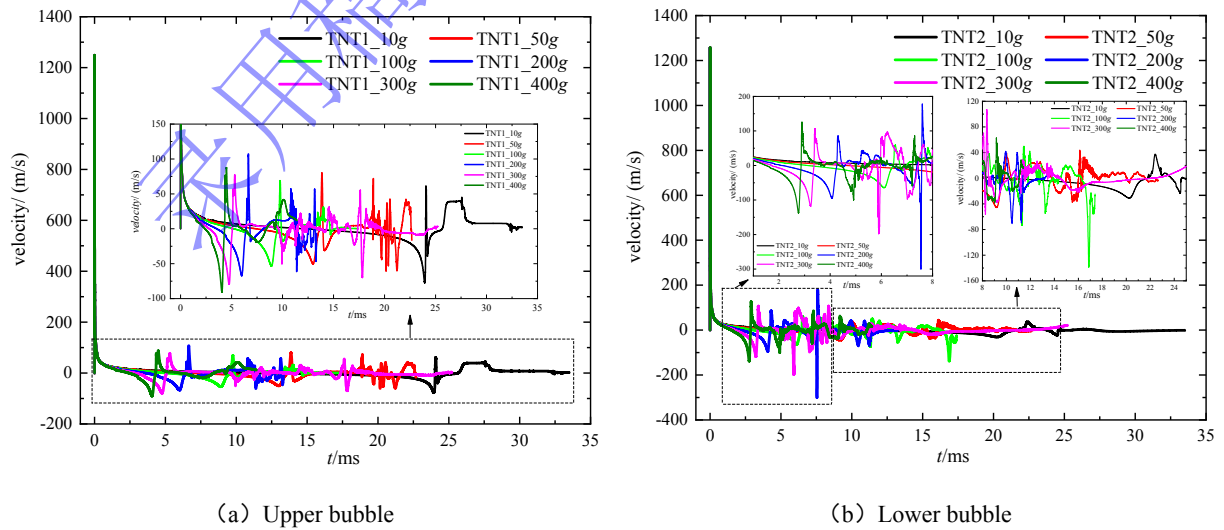


图 14 不同重力环境下气泡半径膨胀速度对比

Fig.14 Comparison of bubble radius expansion velocities in different gravity environment.

进一步结合经验公式将气泡最大半径和气泡脉动周期与比例距离的关系进行定量分析,发现两个气泡的最大半径和脉动周期的理论值均处在一条直线上,说明了经验公式对不同深度的单气泡最大半径和脉动周期预测的一致性,但是不同重力场中的双气泡的数值模拟值之间以及与对应的理论值之间则显示出了较大的差异性,其根本原因在于双气泡之间的强烈的相互作用,导致上下气泡所处的压力环境和膨胀阻力不对称,从而引发最大半径和脉动周期的差异。同时,重力场增强导致静水压力梯度显著上升,使得气泡整体最大半径减小,脉动频率增大,但在相同  $G$  值下,这种压力梯度对上下气泡的影响是非均匀的——下部气泡所处的深度更大,静压更高,进一步抑制其膨胀能力。因此,即使在相同的重力场中下,上下气泡所经历的动力学环境仍存在差异,导致上下气泡最大半径和脉动周期随比例距离变化的趋势线分离。除此之外,两气泡膨胀与收缩过程中所处的非对称流场环境导致了双气泡相位差,进而在脉动阶段又反过来显著影响形态演化与相互作用强度。

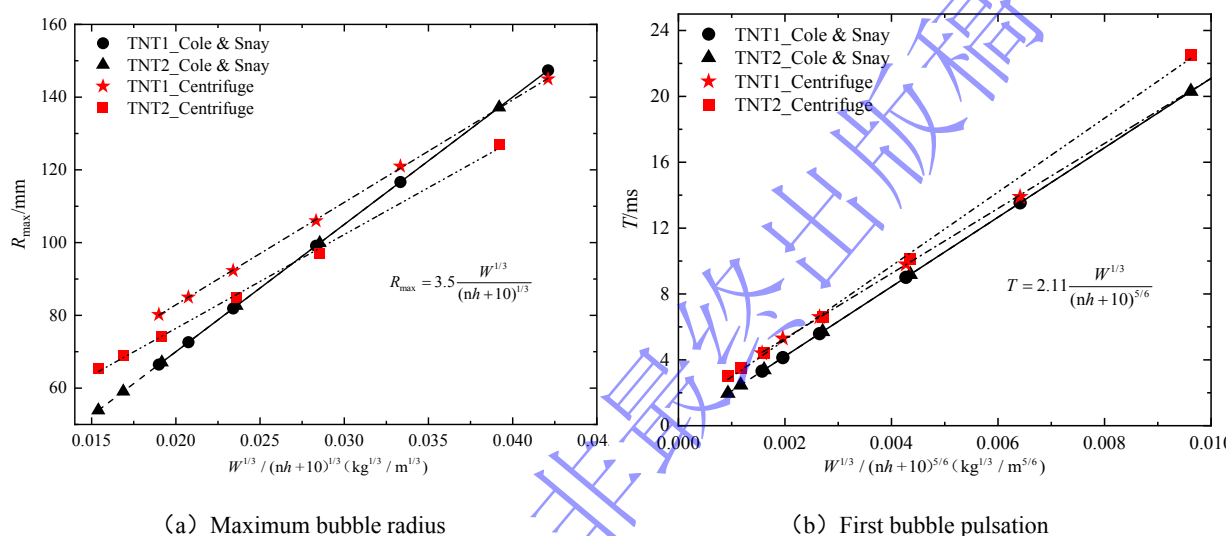


图 15 双气泡脉动特征参数

Fig.15 Dual-bubble pulsation characteristic parameters.

## 4 结论

本文搭建了水下多点爆炸超重力实验系统,在  $G=100g$  超重力场中实现了对竖向分布双气泡系统的高精度观测,利用高速摄影系统捕捉双气泡耦合演化全过程,揭示超重力条件下双气泡形态失稳、脉动与射流等现象;结合数值计算软件 LS-DYNA,构建并验证了适用于超重力环境的多气泡数值模型,实现对实验工况的高保真复现,并进一步拓展研究变量,对不同重力下双气泡的耦合规律及形态特征参数进行了数值研究,系统分析不同重力加速度下气泡特征参数(最大半径、脉动周期、形态演化)的变化规律。结果表明,在不同超重力环境下,水下爆炸多气泡耦合特性存在显著差异。这一极端条件会强化压力梯度与浮力效应,导致双气泡耦合行为呈现独特规律:

(1) 超重力环境增大了流场中垂向压力梯度。超重力环境中较大的压力梯度致使气泡上边界与下边界处的压力差别较大,进一步增强了气泡表面的不稳定性、造成更强烈的流体加速运动,导致气泡迁移速度加快,上部气泡加速上升后方形形成低压尾流区,下部气泡在重力驱动下加速进入该区域,加速了下部破碎气泡的彼此分离,气泡向自由面迁移并融合形成破碎气泡群,重力加速度越大,双气泡的迁移速度和迁移距离差值越大。

(2) 超重力场造成了气泡脉动的时空压缩效应。超重力场极大缩短了气泡的脉动周期,增大了气泡二次膨胀初期的速度,压缩了气泡的脉动尺寸,使得气泡脉动频率更快,同时加速了气泡向上

迁移的速度,增大了双气泡间的脉动相位差,影响了气泡间的耦合作用和形态演化,也缩短了破碎气泡群与自由面相互作用时间。气泡整体特征参数(气泡最大半径、一次脉动周期、二次脉动周期)随着重力加速度的增大呈现指数衰减的趋势。

(3)超重力环境改变气泡系统浮力-惯性力关系。与常重力环境不同的是,超重力环境中,浮力主导参数远大于惯性力,改变了气泡的射流方向和相互作用强度,增强了射流的强度并降低了射流的持续时间,进而改变了双气泡系统中能量的分布。

(4)超重力场水下爆炸双气泡在演化阶段会产生脉动相位差。本质上是由于双气泡间非对称的流场干扰、压力叠加效应以及重力场梯度引起的环境非均匀性共同作用的结果,脉动相位差又会进一步影响气泡间的形态演化、流场压强和相互作用强度,这反映了超重力环境下水下爆炸多气泡系统非线性和非对称演化的强耦合特征。

#### 参考文献

- [1] RAYLEIGH. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity.[J]. Philosophical magazine. 1917, No.34(01): 94-98. DOI: 10.1016/B978-0-08-006821-3.50028-3.
- [2] ZHANG A M, LI S M, XU R Z, et al. A theoretical model for compressible bubble dynamics considering phase transition and migration[J]. 2024(999). DOI:10.1017/jfm.2024.954.
- [3] PRITCHETT, J W. An Evaluation of Various Theoretical Models for Underwater Explosion Bubble Pulsation[J]. 1971.
- [4] KELLER J B, KOLODNER I I. Damping of Underwater Explosion Bubble Oscillations[J]. Journal of Applied Physics. 1956(10). DOI:10.1063/1.1722221.
- [5] BARRETT L C, THORNE C J. Oscillations of the Gas Bubble Produced by an Underwater Explosion. [J]. 1952, 87(5).
- [6] RILEY M. Analytical Solutions for Predicting Underwater Explosion Gas Bubble Behaviour[J]. 2010.
- [7] CUI P, ZHANG A M, WANG S P. Small-charge underwater explosion bubble experiments under various boundary conditions[J]. Physics of Fluids (1994-present). 2016, 28(11): 117103. DOI: 10.1063/1.4967700.
- [8] SNAY H G, TIPTON R V. Charts for the parameters of migrating explosion bubbles[J]. 1963. DOI:10.21236/ad0414350.
- [9] SNAY H G. Underwater explosion phenomena: the parameters of migrating bubbles[J]. 1962. DOI:10.21236/ad0296424.

- [10] 方厚林, 卢强, 郭权势, 等. 水下爆炸冲击波和气泡行为自由面效应的实验研究[J]. 爆炸与冲击. 2024, v.44;No.250(08): 149-160. DOI: CNKI:SUN:BZCJ.0.2024-08-012.  
FANG H L, LU Q, GUO Q S, et al. Experimental research on the free surface effect of shock wave and bubble behavior of small yield underwater explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, v.44;No.250(08): 149-160. DOI: CNKI:SUN:BZCJ.0.2024-08-012.
- [11] 郭权势, 卢强, 方厚林, 等. 基于光学法的水下爆炸冲击波流场压强测量与分析[J]. 现代应用物理. 2024, 15(02): 151-156. DOI: CNKI:SUN:CBLX.0.2007-01-013.  
GUO Q S, LU Q, FANG H L, et al. Measurement and Analysis of Underwater Explosion Shockwave Overpressure Based on Optical Method[J]. 2024, 15(02): 151-156. DOI: CNKI:SUN:CBLX.0.2007-01-013.
- [12] CHING-YU, HSU, CHO-CHUNG, et al. A numerical study on the underwater explosion bubble pulsation and the collapse process[J]. Ocean Engineering. 2014, 81(000): 29-38. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.02.018.
- [13] WANG C, KHOO B C. An indirect boundary element method for three-dimensional explosion bubbles[J]. Journal of Computational Physics. 2004(2). DOI: 10.1016/j.jcp.2003.09.011.
- [14] GEERS T L, HUNTER K S. An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble[J]. Journal of the Acoustical Society of America. 2002, 111(4): 1584-1601. DOI: 10.1121/1.1458590.
- [15] LI T, WANG S, LI S, et al. Numerical investigation of an underwater explosion bubble based on FVM and VOF[J]. Applied Ocean Research. 2018, 74(000): 49-58. DOI: 10.1016/j.apor.2018.02.024.
- [16] LINDQUIST W B. Numerical Simulation of the Collapse of an Underwater Explosion Bubble[J]. 1988.
- [17] LIU N N, ZHANG A M, CUI P, et al. Interaction of two out-of-phase underwater explosion bubbles[J]. Physics of Fluids (1994-present). 2021, 33(10): 106103. DOI: 10.1063/5.0064164.
- [18] 张阿漫, 汪玉, 闻雪友, 等. 水下爆炸气泡动态特性研究综述[J]. 船舶力学. 2009, v.13;No.73(05): 828-840. DOI: CNKI:SUN:CBLX.0.2009-05-022.  
ZHANG A M, WANG Y, WEN X Y, et al. Review of the dynamics of the underwater explosion bubble[J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, v.13;No.73(05): 828-840. DOI: CNKI:SUN:CBLX.0.2009-05-022.
- [19] 胡晶. 水下爆炸对结构作用的离心试验及数值模拟[D]. 北京航空航天大学, 2018. DOI: 10.26937/d.cnki.gbhtu.2018.000001.  
HU J. Centrifugal and Numerical Modeling on Structures Impacted by Underwater Explosion[D]. School of Transportation Science & Engineering Beihang University, 2018. DOI: 10.26937/d.cnki.gbhtu.2018.000001.
- [20] 马上, 陈叶青, 王振清, 等. 水下爆炸离心机试验中爆炸荷载的缩比关系研究[J]. 土木工程学报. 2021, 54(10): 20-29. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2021.10.006.  
MA S, CHEN Y Q, WANG Z Q, et al. Study on load scaling relationship in centrifuge test of underwater explosion[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(10): 20-29. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2021.10.006.
- [21] 娄浩然, 胡晶, 梁向前, 等. 超重力场下球形炸药水下爆炸实验及数值模拟[J]. 工程爆破. 2017, 23(03): 15-21. DOI: CNKI:SUN:GCBP.0.2017-03-004.  
LOU H R, HU J, LIANG X Q, et al. Underwater explosion experiment and numerical simulation of spherical explosives under hypergravity field[J]. Engineering Blasting, 2017, 23(03): 15-21. DOI: CNKI:SUN:GCBP.0.2017-03-004.
- [22] HU J, CHEN Z Y, ZHANG X D, et al. Underwater explosion in centrifuge part I: Validation and calibration of scaling laws[J]. SCIENCE CHINA Technological Sciences. 2017, 60(11): 1638-1657. DOI: 10.1007/s11431-017-9083-0
- [23] WANG Q, LIU S, LOU H. Calibration of Numerical Simulation Methods for Underwater Explosion with Centrifugal Tests[J]. Shock & Vibration. 2019(000). DOI: 10.1017/s0022112005005306
- [24] 宋歌, 龙源, 钟明寿, 等. 离心机和密闭加压容器中水下爆炸相似关系[J]. 爆炸与冲击. 2019, v.39;No.184(02): 95-103. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0321.  
SONG G, LONG Y, ZHONG M S, et al. Similarity relations of underwater explosion in centrifuge and pressurizing

- vessels[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, v.39;No.184(02): 95-103.**DOI**:10.11883/bzycj-2017-0321.
- [25] 刘世聪, 王秋生, 姜浩然. 水下爆炸问题的数值模拟及离心机试验验证[J]. *中国测试*. 2019, v.45;No.257(12): 138-145.**DOI**: CNKI:SUN:SYCS.0.2019-12-023.
- LIU S C,WANG Q S,LOU H R. Numerical simulation and centrifuge test verification of underwater explosion[J]. *China Measurement & Test*, 2019, v.45;No.257(12): 138-145. **DOI**: CNKI:SUN:SYCS.0.2019-12-023.
- [26] ZHANG J,GUAN L H,Li W J,et al. Centrifuge modeling of underwater explosion near the wateroil interface[J]. *Physics of Fluids (1994-present)*. 2025, 37(4).**DOI**: 10.1063/5.0260821.
- [27] Liu N N,ZHANG A M,Cui P,et al.Interaction of two out-of-phase underwater explosion bubbles[J]. *Physics of Fluids (1994-present)*.2021,33(10):106103.**DOI**: 10.1063/5.0064164.
- [28] LI S,ZHANG A M,HAN R,et al.Experimental and numerical study of two underwater explosion bubbles: Coalescence, fragmentation and shock wave emission[J]. *Ocean Engineering*. 2019, 190(000).**DOI**: 10.1016/j.oceaneng.2019.106414
- [29] CUI P,WANG Q X,WANG S P,et al.Experimental study on interaction and coalescence of synchronized multiple bubbles[J]. *Physics of Fluids (1994-present)*. 2016, 28(1).**DOI**: 10.1063/1.4939007.
- [30] LUP W C, EVERT K , OHL S W, et al. Interaction of two differently sized oscillating bubbles in a free field[J]. *Physical Review E*. 2011, 84(6).**DOI**: 10.1103/PhysRevE.84.066307.
- [31] GEL'FAND B E ,TAKAYAMA K. Similarity Criteria for Underwater Explosions[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2004, 40(2): 214-218.**DOI**: 10.1023/B:CESW.0000020144.55275.df.
- [32] 张效慈. 水下爆炸试验相似准则[J]. *船舶力学*. 2007, No.57(01): 108-118.**DOI**: CNKI:SUN:CBLX.0.2007-01-013.
- ZHANG X C. Similarity criteria for experiment of underwater explosion[J]. *Similarity criteria for experiment of underwater explosion*, 2007, No.57(01): 108-118. **DOI**: CNKI:SUN:CBLX.0.2007-01-013.
- [33] Cole R H. Underwater Explosions[J]. *Physics today*. 1948(6).**DOI**:10.1063/1.3066176.
- [34] SUPPONEN O,OBRESCHKOW D,KOBEL P et al.Shock waves from nonspherical cavitation bubbles[J]. 2017,2(9):093601-093620.**DOI**:10.48550/arXiv.1708.04049.

录用稿件