

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.01.002

# 近壁面深水爆炸气泡射流演化特性的研究<sup>\*</sup>

梁浩哲 张玉磊 苏健军 李芝绒 甘云丹  
西安近代化学研究所(陕西西安, 710065)

**[摘要]** 近壁面气泡载荷是水中战斗部对障碍物毁伤作用的重要载荷之一。以近壁面深水爆炸气泡脉动及射流载荷特征问题为中心,开展了模拟300 m水深环境下的爆炸实验。通过高速摄影仪得到了气泡射流的演化过程;利用Autodyn轴对称模型对气泡射流的演化过程进行了计算,分析了比例距离对气泡脉动周期、射流演化形成时刻及射流强度特征的影响;探讨了壁面近场范围内的压力特征,总结得到射流载荷的演化规律。可为深水环境下水中战斗部对障碍物的毁伤效应研究提供理论参考。

**[关键词]** 深水爆炸;气泡;射流;近壁面

**[分类号]** O382<sup>+</sup>.1

## Evolution Characteristics of Bubble Jet during Deep-Underwater Explosion near the Rigid Wall

LIANG Haozhe, ZHANG Yulei, SU Jianjun, LI Zhirong, GAN Yundan  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

**[ABSTRACT]** The bubble load near the wall is one of the important loads for underwater warheads to damage obstacles. Focusing on the characteristics of bubble pulsation and jet load in deep-water explosions near the rigid wall, explosion experiments were conducted to simulate a water depth environment of 300 meters. Using the high speed camera, the evolution of bubble jet was obtained. The evolution process of bubble jet was calculated using the Autodyn axisymmetric model, and the influence of scaled distance on bubble pulsation period, jet evolution formation time, and jet intensity characteristics was analyzed. The pressure characteristics within the near-field range of the wall were explored, and the evolution law of jet load was summarized. It can provide theoretical reference for study on the damage effect of warheads on obstacles in deep water environments.

**[KEYWORDS]** deep-underwater explosion; bubble; jet; near the rigid wall

## 0 引言

水中装药战斗部对目标的打击过程中,当冲击波完全产生后,约40%的能量保留在爆轰产物中并转化为气泡能;而现在的含铝炸药等复合炸药爆炸产生的气泡能更高<sup>[1-3]</sup>。由于初始压力和温度较高,气泡将出现脉动行为,在有障碍物时还会演化出高速水射流。射流是对结构的局部进行作用,因此也能够对目标形成很大的威胁。虽然现代水下目标的结构大致趋于流线型,但在局部(如潜艇顶部、潜航器主体等)薄弱环节,依然为近似平面结构。所以,对近壁面气泡射流演化过程及载荷规律的研究<sup>[4]</sup>

能够为水下目标结构毁伤研究提供理论支撑。

对近壁面气泡射流演化问题很早就有研究。最初是以水中电解泡、火花泡及激光泡等方法模拟水中爆炸气泡进行研究,Cole<sup>[1]</sup>对上述方法进行了总结。Benjamin等<sup>[5]</sup>采用开尔文冲量理论估算了气泡的动态特性,预测了气泡射流的形成位置、方向等参数。

Blake等<sup>[6]</sup>从流体动力学原理出发,采用数值仿真方法系统分析了气泡脉动射流演化过程。设 $\gamma$ 为气泡脉动最大半径与气泡到壁面的距离比, $\delta$ 为浮力比,将 $\gamma$ - $\delta$ 参数分为几个区域,并给出了在浮力和Bjerknes效应相互作用下气泡的运动方向。此结论称为Blake准则<sup>[7]</sup>。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2023-12-04

第一作者:梁浩哲(1988—),男,博士,副研究员,主要研究方向为毁伤评估。E-mail: haozheliang2010@yeah.net

学者们分别对边界元法进行了改进<sup>[8-10]</sup>, 获得了高精度三维边界元法, 并采用此方法讨论了针对多种壁面结构的水下爆炸射流特性。近年来, 国内大量学者采用 Autodyn 等有限元计算方法, 对近壁面各尺度结构水下爆炸射流问题进行了研究, 揭示了各种因素对气泡射流演化的影响<sup>[11-13]</sup>。

本文中, 就深水爆炸气泡脉动射流的基本现象进行了研究, 从实验和数值计算两方面讨论了气泡射流的载荷特性, 分析了比例距离  $r$  对射流演化过程、射流载荷特征的影响, 并对模拟深水环境近壁面水下爆炸压力场的特征进行了相应的总结。

1 实验

1.1 实验介绍

实验在图 1 所示的密闭容器中进行。容器内径 1.5 m、内部净高 2.1 m, 容器设置有 2 个直径 0.10 m 的对视圆形观察窗。观察窗安装了具有较高强度和较好透光性的钢化玻璃。药包由药柱固定在与观察窗等高的部位, 因此可较好地观察到气泡的运动过程。装药采用梯恩梯(TNT), 密度  $1.63\text{ g/cm}^3$ , 药柱长径比 1:2, 药量 2.0 g。使用 8# 雷管进行起爆。密闭容器连接空气压缩机, 增压形成高静水压环境, 来模拟深水环境。气泡在膨胀较大时会超出观察窗视野, 影响观察效果, 因此射流实验仅采用 300 m 深水环境的工况。图 2 所示为高速摄影仪拍摄的初始影像。刚性壁面采用 Q235 钢板模拟, 钢板厚 1 cm、宽 40 cm、长 40 cm。钢板距离水面 0.8 m。在实验过程中, 钢板无明显变形, 强度满足刚性壁面要求。因此, 在本文中均以刚性壁面描述。刚性壁面底座固定在容器中, 实验过程中不发生位移。药包中心距

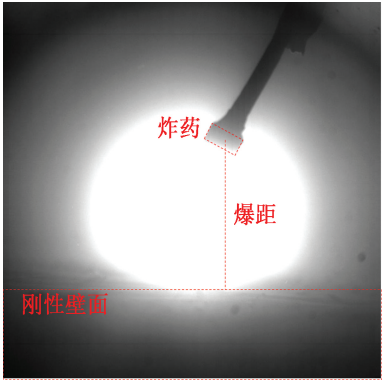


图 2 药包初始时刻影像

Fig. 2 Image of the explosive at the initial moment

离刚性壁面 5 cm。由于高速摄影仪位于补光灯对侧, 仅获得气泡阴影图像。高速摄影仪采样频率为 7 500 Hz, 曝光时间为  $1/40\,000\text{ s}$ 。

1.2 实验结果

图 3 所示为 300 m 水深环境下的实验过程。以炸药起爆为初始时刻。从实验结果来看, 气泡是在完成脉动时刻演化出射流。此时, 气泡距离壁面还有一定的距离, 在射流的推动下, 气泡向壁面运动, 到达壁面对壁面进行作用; 随后, 气泡贴在刚性壁面完成了多次持续的脉动过程。从结果来看, 射流从气泡顶部到达壁面的时间小于 3 ms, 而平均运动速度大约为 120 m/s。由于实验过程中观察的是气泡运动的阴影图像, 对气泡内部的运动过程很难观察到, 仅能进行定性描述; 但从结果来看, 整个射流演化过程非常快, 必然形成了较大的冲击作用。

2 数值计算

2.1 数值模拟介绍

2.1.1 数值计算模型

图 4 为建立的数值仿真模型。模型中, 炸药、水域、空气域尺寸与实验容器尺寸一致。水域与空气域采用 Euler 单元, 炸药为 2.0 g 球形药包, 设置中心起爆模式; 钢板模型为刚性板, 采用 Lagrange 单元, 计算采用流固耦合算法。考虑到实验时压力容器为钢制材料, 根据波阻抗比较结果, 近似认为钢制材料为刚性边界。因此, 仿真中所有 Euler 单元的边界也设置为刚性边界。

2.1.2 状态方程及参数

采用多项式状态方程描述水的状态, 在压缩和拉伸状态的表达式分别为

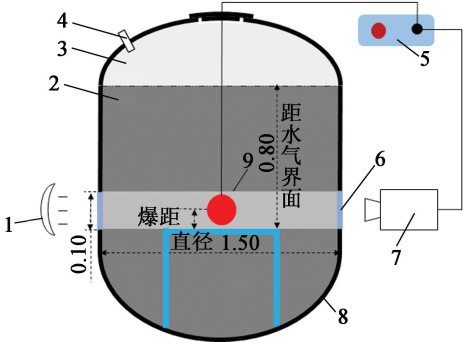


图 1 实验装置示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup (Unit: m)

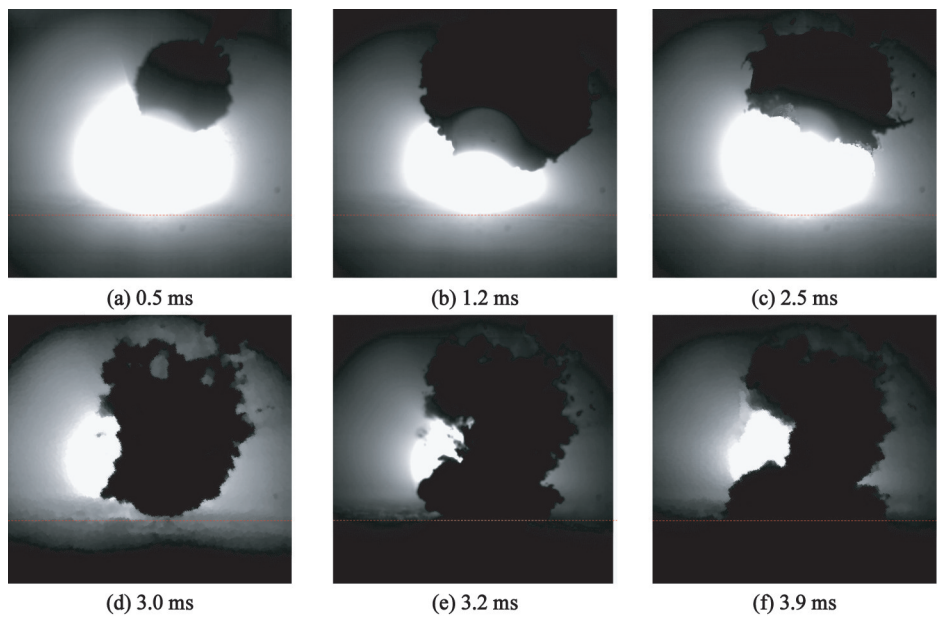
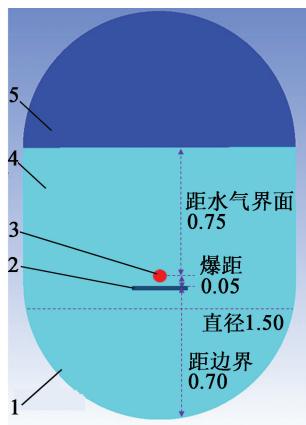


图 3 气泡射流演化影像  
Fig. 3 Images of the evolution of bubble jet



1 - 刚性边界;2 - 刚性壁面;3 - 药包;4 - 水;5 - 空气。  
图 4 数值计算模型(单位:m)  
Fig. 4 Numerical model (Unit: m)

$$p_w = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0e, \mu \geq 0; \tag{1}$$
$$p_w = T_1\mu + T_2\mu^2 + A_1\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0e, \mu < 0. \tag{2}$$

式中: $p_w$  为压力; $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ , $\rho$  为当前密度, $\rho_0$  为初始参考密度; $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $B_0$ 、 $B_1$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  为材料常数; $e$  为水的比内能。

在计算的初始阶段, $\rho = \rho_0$ ,则式(1)、式(2)变为: $p = B_0\rho_0e$ 。因此,通过改变比内能,来施加不同的初始静水压力。由于水只能承受很小的拉伸负压,因此,在计算中将截止压力统一设成 0。水的状态方程参数见表 1。

表 1 水的状态方程参数

Tab. 1 State equation parameters of water

$A_1/\text{GPa}$	$A_2/\text{GPa}$	$A_3/\text{GPa}$	$B_0$
2. 20	9. 54	14. 57	0. 28
$B_1$	$T_1/\text{GPa}$	$T_2/\text{GPa}$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
0. 28	2. 20	0	1. 00

采用理想气体状态方程描述空气的状态,表达式为

$$p_{\text{air}} = (\gamma_{\text{air}} - 1)\rho_{\text{air}}e_{\text{air}} \tag{3}$$

式中: $p_{\text{air}}$  为压力; $\gamma_{\text{air}}$  为空气的绝热指数; $\rho_{\text{air}}$  为空气密度; $e_{\text{air}}$  为气体比内能。

空气的状态方程参数见表 2。

表 2 空气状态方程参数

Tab. 2 State equation parameters of air

$\rho_{\text{air}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\gamma_{\text{air}}$	$e_{\text{air}}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$
1. 225	1. 4	$2. 068 \times 10^5$

炸药采用 JWL 状态方程,表达式为

$$p_e = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V} + \frac{\omega}{V}E. \tag{4}$$

式中: $p_e$  为压力; $V$  为相对体积; $E$  为单位体积的内能; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为材料参数。

炸药的状态方程参数见表 3。

2.2 计算结果

数值计算结果如图 5 所示。图 5 中依次显示初



表 3 炸药的 JWL 状态方程参数

Tab.3 JWL state equation parameters of the explosive

$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
373.77	3.747	4.15	0.9	0.35
$p_{CJ}/\text{GPa}$	$D_{CJ}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-3})$	$E_0/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	
21	6 930	7 147	1 630	

始时刻[图 5(a)]→气泡膨胀阶段[图 5(b)~图 5(c)]→射流演化及载荷阶段[图 5(d)~图 5(f)]。气泡最大时刻 5.60 ms。

对比实验结果,数值计算能够非常好地描述气泡的脉动阶段,两者脉动周期及半径差异很小。但对于射流运动过程,受实验条件限制,两者结果还存在一定的差异。原因来自两个方面。一方面是数值仿真条件下炸药会完全反应生成气体,且在气泡运动过程中气泡的质量并不会出现损失;但在实验过程中,气泡收缩时可以发现大量的粉末物质在气泡的边缘,表明气泡内大量物质流失,造成一定的质量和能量损失,因此造成计算结果与实验结果产生了一定的误差。另一方面,计算过程中并未考虑到流体的黏性、流体与刚性壁面之间的流动阻力等因素,必然影响到气泡及射流的运动过程。

总体来说,采用的计算方法较为合理、可靠,能够描述水中气泡的运动过程,可用于对深水环境爆

炸射流载荷特征的研究。

3 比例距离对射流演化的影响

3.1 射流演化过程计算结果

从射流演化研究的规律可以看出,比例距离  $r$  是影响射流形成的关键因素之一。利用数值模拟分析了比例距离对射流载荷形成的影响。

比例距离为

$$r=\frac{L}{R_{\max}}。$$

(5)

式中: $R_{\max}$  为气泡最大半径; $L$  为气泡中心到刚性壁面的距离。

为了方便地分析比例距离对射流演化的影响,建立了 300 m 水深、2.0 g 球形 TNT 的近壁面水中爆炸的有限元模型。球形 TNT 的初始半径为 6.7 mm,在水深 300 m 自由环境中的脉动最大半径为 49.1 mm,脉动周期为 1.7 ms,取气泡最大半径为 50 mm。设置计算工况如表 4 所示。

计算表 4 所示的 8 种工况下的气泡射流演化过程,比较气泡脉动到最大时刻与射流头部穿过气泡到达气泡另一侧时射流的形状,如图 6 所示。其中: $t_1$  对应气泡膨胀到最大时刻; $t_2$  对应射流穿透气泡作用壁面的时刻。

如图 6 所示,在比例距离较小时,气泡在膨胀阶

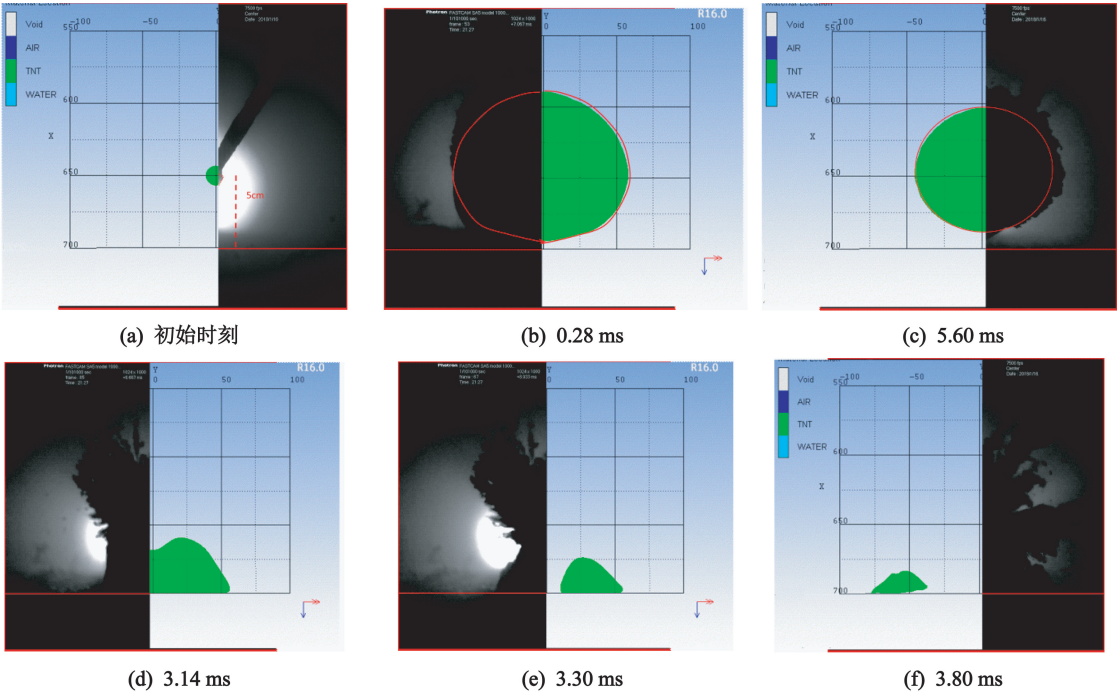


图 5 数值计算结果  
Fig.5 Numerical calculation results

表 4 计算工况  
Tab.4 Calculation conditions

比例距离 $r$	0.2	0.5	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3
实际距离/mm	10	25	50	60	75	100	125	150

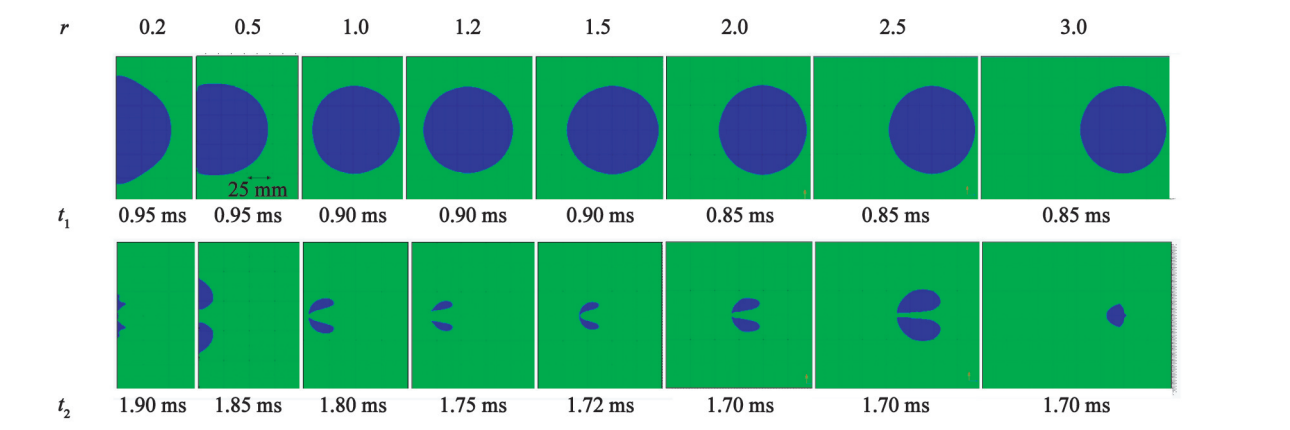


图 6 不同比例距离下气泡射流的演化形态  
Fig.6 Evolution of bubble jets at different proportional distances

段就受到了壁面的影响,形成不规则的非球形气泡;在气泡膨胀到最大时,已经完全贴在刚性壁面上,阻碍了气泡完成脉动过程,因此也无法演化出较为理想的气泡。在比例距离适当的工况中,可以看到完整的气泡脉动过程和射流演化过程,射流形成于气泡收缩阶段,并穿透气泡,演化出环形气泡,同时将气泡推向壁面,最终作用于壁面。当气泡距离壁面较远时,气泡就不受壁面的影响,仅仅完成了脉动过程,可以看到气泡的脉动周期及脉动半径与自由场状态基本一致。因此,从气泡射流演化的过程可以看出,比例距离对气泡的演化具有重要的影响。

3.2 射流载荷特征

记录气泡射流的头部速度,得到不同比例距离下射流头部的速度曲线,如图 7 所示。

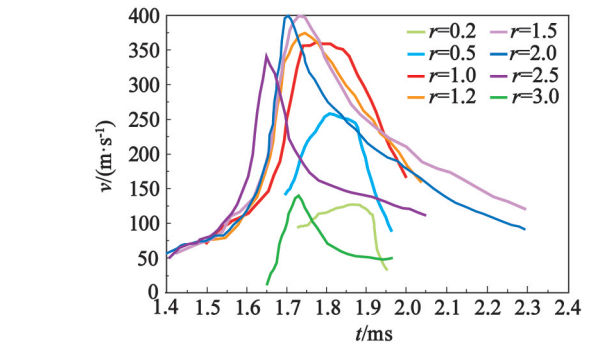


图 7 不同比例距离下气泡射流的头部速度  
Fig.7 Head speed of bubble jets at different proportional distances

从图 7 中可以看出,射流头部最大速度的持续时刻也与比例距离之间存在关联;射流形成时刻接近气泡完成脉动时,此时气泡收缩到最小阶段。因此,在比例距离较小时,气泡吸附于壁面,不能保持球形并且半径很小,可以看到射流速度缓慢增长;由于射流穿透气泡后将与水介质相遇,因此,可以看到射流速度在很短的时刻内迅速下降。当比例距离增大时,气泡脉动不再受壁面约束,且射流速度在缓慢增长,因此,形成了速度较高而持续时间较长的射流;但是,当气泡演化出速度最快的射流时,射流将快速穿透气泡,形成了速度高而持续时间短的射流。当比例距离增大到气泡不受壁面影响时,在气泡收缩到最小时刻,可以看到,射流速度在增长阶段及下降阶段都比较小,此时射流的速度接近气泡的收缩速度。

另外如图 8 所示,射流头部最大速度与比例距离变化也存在关系。当气泡靠近壁面时,射流速度几乎与气泡收缩速度相等;随着气泡与壁面距离的增大,气泡射流的演化过程区域完整,壁面效应显现,射流速度提升。在  $r$  为 1.5 ~ 2.0 时,射流头部速度达到最大,对应本节计算药量,射流速度最大能够达到 400 m/s,远高于自由场气泡的收缩速度 120 m/s。而当比例距离过大时,壁面效应减弱,气泡仅仅完成脉动过程,不再演化出射流,因此速度也慢慢减小,最后不再形成射流;而面向壁面一侧,水的运动速度也等于气泡在自由场中的收缩速度。

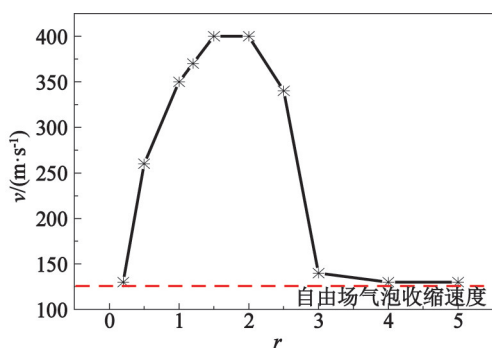


图 8 射流头部最大速度随比例距离的变化

Fig. 8 Variation of maximum velocity of jet head with scaled distance

## 4 近壁面射流载荷特征

### 4.1 近壁面流场特征

在近壁面 5.0 mm 处的射流速度场中心处设置测点,对射流运动的最大速度进行记录,如图 9 所示。射流是在气泡收缩过程中形成,基本位于气泡中心处,距离壁面还有一段距离。在射流形成后,从气泡中心运动到壁面,然后对壁面产生冲击载荷,此时射流的强度必然比射流形成初期的状态有所减弱,而且距离壁面越远,射流减弱得就越厉害。对射流载荷效应的评估应当考核壁面附近的压力场或流体速度场。

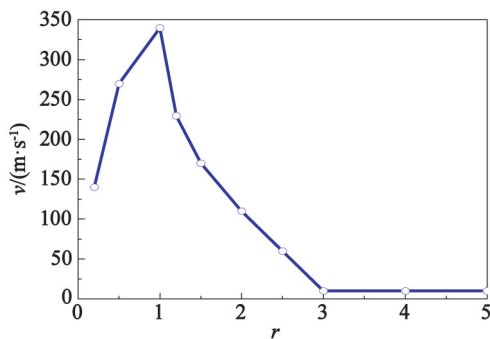


图 9 近壁面流场最大速度与比例距离的关系

Fig. 9 Relationship between the maximum velocity of the near wall flow field and scaled distance

从图 9 中可以看出,近壁面流场最大速度的变化与比例距离有很大关系。 $r=0.1$  时,气泡贴近壁面,壁面处流场速度较低,与气泡脉动收缩速度基本一致。随着  $r$  变大,在收缩段气泡急速向壁面靠拢,水射流保持着演化形成初始时刻的能量,因此,相比于射流演化初始时刻的速度,近壁面流场的速度差异不大。当  $r$  较大时,虽然气泡能够形成理想的高速射流,但随着射流形成位置到壁面距离的增加,射

流要穿透一定距离的水介质才对壁面进行作用,因此,流场速度相比形成时刻有了较大的降低。在  $r$  大于 3.0 时,射流已经无法对壁面形成有效载荷,流场的速度已经非常小,可以忽略射流的作用。

### 4.2 近壁面压力场特征

图 10 为不同比例距离下近壁面处射流速度  $v$ 、水域压力  $p$  和气泡内能  $E_i$  随时间的变化。

从图 10 中可以看到,当  $r=0.2$  时,射流载荷作用时间早于第一次脉动完成时刻,射流的速度很小,射流的作用非常小,大部分压力都是由气泡脉动提供。脉动压力场压力最高达到 80 MPa,这是由于气泡几乎贴在壁面上,气泡距离测点非常近,气泡运动能量损耗最小,所以在壁面的载荷压力非常高。但气泡对壁面的作用不一定能够达到此压力。对于  $r=0.5$  和  $r=1.0$  的工况,明显可以看出射流速度的升高,射流载荷有了很大的提升,压力强度能够达到与脉动压力一致的高度;另外,此时射流到达壁面时刻仍早于气泡脉动完成时刻,所以壁面是先受到射流载荷、后受到气泡脉动载荷的作用。在  $r=1.2$  和  $r=1.5$  时,可以看到射流载荷晚于气泡脉动载荷,而且强度有所下降。对照前文射流演化条件来看,在  $r$  较大时,射流虽然演化得很成功,但由于距离壁面较远,受到水的阻力在射流到达壁面时有了很大的下降,此时射流几乎与脉动同时完成;而脉动压力是以水声速度传播,所以将会早于射流到达壁面,而且脉动压力衰减较缓,此时的载荷便以脉动压力波为主。

从上述可以看出,气泡对壁面作用的最佳位置是在  $r=1.0 \sim 1.2$  之间,此时气泡脉动与射流几乎能够同时作用于壁面,作用强度高、时间长,对结构的毁伤能力也强。

## 5 总结

以近壁面深水爆炸射流载荷特性为中心,利用实验和数值计算对射流演化特征、射流载荷特征及近壁面压力场进行了研究,总结如下:

1) 利用高速摄影仪得到了完整模拟深水环境下气泡射流的演化图像;

2) 利用有限元软件 Autodyn 对实验工况进行了计算,轴对称模型计算结果与实验结果符合较好,说明计算方法能够很好地求解近壁面水中爆炸问题;

3) 对模拟深水环境近壁面爆炸过程进行计算后发现,比例距离  $r$  对气泡脉动特征及射流演化特征具有决定性的影响,在  $r$  为 2.0 ~ 2.5 之间时,气



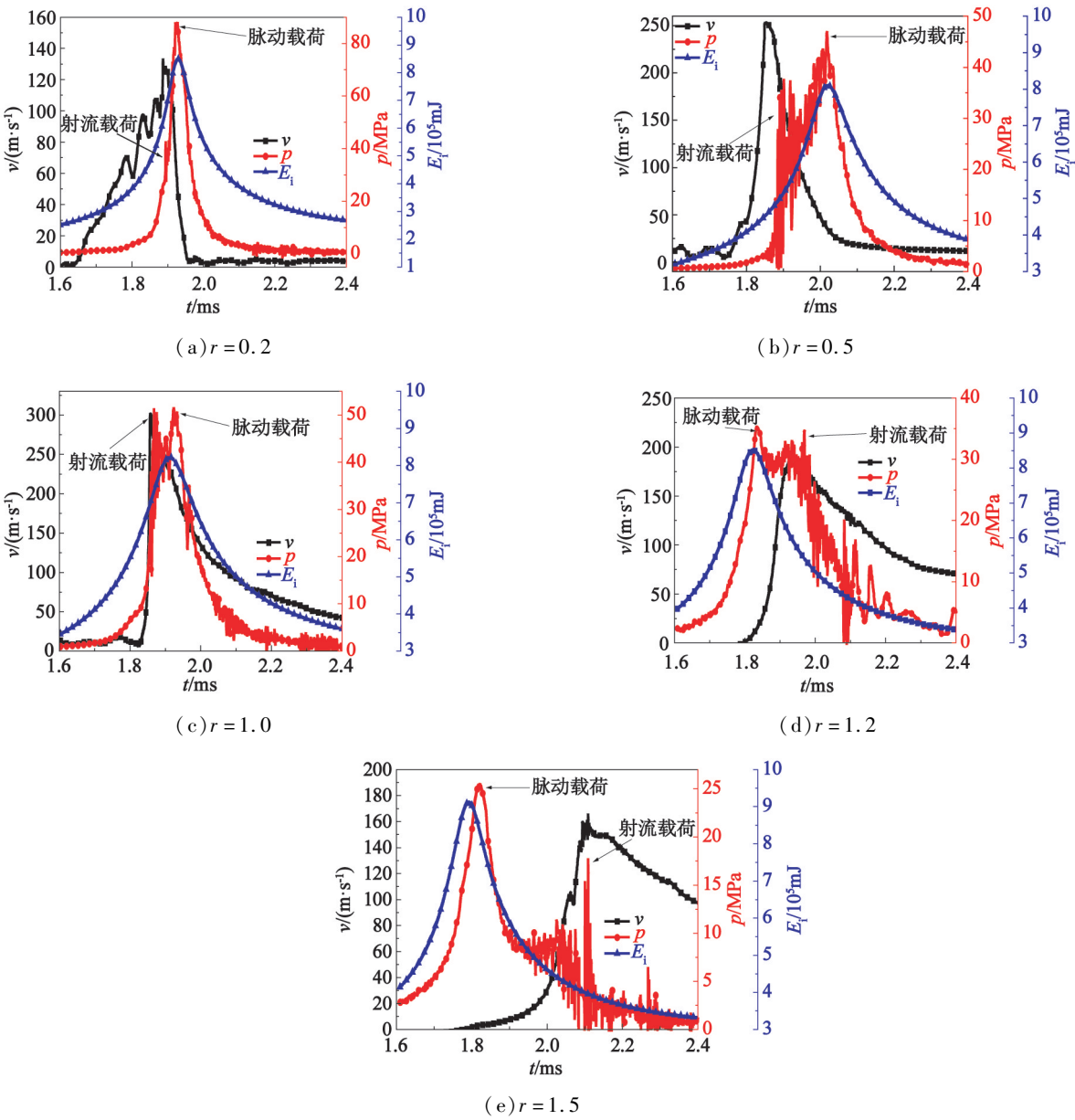


图 10 近壁面处的射流速度、水域压力和气泡内能曲线

Fig. 10 Jet velocity, water pressure, and bubble internal energy curves near the rigid wall

泡演化出速度最大的射流；

4) 从近壁面压力场的分析结果来看,受  $r$  的影响,气泡脉动压力和射流冲击载荷对壁面均有作用,但当  $r$  在 1.0 ~ 1.2 之间时,脉动压力与射流载荷几乎同时作用于壁面,对壁面的作用强度最大。

参 考 文 献

[1] COLE H R. Underwater explosions[M]. Princeton, NJ, US: Princeton University Press,1948.

[2] 冯淞, 饶国宁, 彭金华. 含铝炸药深水爆炸冲击波和气泡脉动的数值模拟[J]. 爆破器材, 2017, 46(5): 1-7.

FENG S, RAO G N, PENG J H, et al. Numerical simu-

lation of shock wave and bubble pulse in deep water explosion of aluminized explosive [J]. Explosive Materials, 2017, 46(5): 1-7.

[3] 伍俊, 杨益, 庄铁栓. 水中爆炸作用机理及毁伤效应研究综述[J]. 火炸药学报, 2016, 39(1): 1-13.

WU J, YANG Y, ZHAG T S. A review of research on action mechanism and damage effect of underwater explosion [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(1): 1-13.

[4] 刘磊, 王远, 张成良, 等. 深水静压下化学敏化乳化炸药爆炸能量的输出特性[J]. 爆破器材, 2022, 51(3): 28-32.

LIU L, WANG Y, ZHANG C L, et al. Output characteristics of explosion energy of chemically sensitized emul-

(下转第 22 页)

- static sensitivity ignition of an electric igniter [J]. New Technology & New Process, 2021(5): 42-45.
- [9] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [10] 石蓝, 杨安民, 张迎春, 等. 电火工品桥带温升数学模型及可靠性设计应用[J]. 火工品, 2016(6): 24-27.
- SHI L, YANG A M, ZHANG Y C, et al. Temperature rise mathematical model of bridge strip electric initiator and its reliability design [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(6): 24-27.
- [11] 张伟, 黄群英. 硼-硝酸钾(BPN)点火药的制备及其性能研究[J]. 山西化工, 2023, 43(1): 9-10.
- ZHANG W, HUANG Q Y. Study on preparation and properties of boron-potassium nitrate (BPN) igniter [J]. Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(1): 9-10.
- [12] 郭伟, 张志新, 王端, 等. B/KNO<sub>3</sub> 激光点火器装药参数与点火性能研究[J]. 火工品, 2023(1): 11-15.
- GUO W, ZHANG Z X, WANG D, et al. Study on charge parameters and ignition performance of B/KNO<sub>3</sub> laser igniter [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2023(1): 11-15.
- [13] 高耸松, 王元和, 程涛, 等. 常用耐温点火药在宇航环境中的输出性能研究[J]. 火工品, 2022(5): 30-34.
- GAO S S, WANG Y H, CHENG T, et al. Research on the output performance of commonly used temperature resistance ignition powder in aerospace environment [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2022(5): 30-34.
- [14] 时家俊. 某型延时起爆装置延期时间影响因素的研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(4): 33-38.
- SHI J J. Study on delay time as a key influencing factor for a delay detonating device [J]. Explosive Materials, 2020, 49(4): 33-38.
- [15] 中国兵器工业集团公司. 火工品试验方法: 第1部分总则: GJB 5309.1—2004 [S]. 2004.
- China North Industries Group Co., Ltd. Test methods of initiating explosive devices: Part 1 General principles: GJB 5309.1—2004 [S]. 2004.

(上接第 15 页)

- [5] BENJAMIN T B, ELLIS A T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 1966, 260 (1110): 221-240.
- [6] BLAKE J R, TAIB B B, DOHERTY G. Transient cavities near boundaries. Part 2: free surface [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, 181: 197-212.
- [7] KUCERA A, BLAKE J R. Approximate methods for modelling cavitation bubbles near boundaries [J]. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 1990, 41 (1): 1-44.
- [8] KLASBOER E, HUNG K C, WANG C, et al. Experimental and numerical investigation of the dynamics of an underwater explosion bubble near a resilient/rigid structure [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 537: 387-413.
- [9] CUI P, ZHANG A M, WANG S P. Small-charge underwater explosion bubble experiments under various boundary conditions [J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28 (11): 117103.
- [10] 王强, 王强, 王强. 空泡爆炸动力学研究 [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 776: 137-160.
- [11] 杜志鹏, 汪玉, 辛春亮. 水下刚性壁装药爆炸气泡简化模型和数值仿真 [J]. *计算机仿真*, 2009, 26 (4): 10-13, 17.
- [12] DU Z P, WANG Y, XIN C L. Simplified bubble dynamic model and numerical simulation of charge underwater explosion on a fixed rigid floor [J]. *Computer Simulation*, 2009, 26 (4): 10-13, 17.
- [13] 卢熹, 王树山, 马峰, 等. 近小尺度壁面水下爆炸射流特性数值模拟 [J]. *弹箭与制导学报*, 2015, 35 (3): 79-84.
- [14] LU X, WANG S S, MA F, et al. Numerical study on characteristics of underwater explosion jet near small scale wall [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2015, 35 (3): 79-84.
- [15] 张伟, 岳永威, 张阿漫, 等. 基于 AUTODYN 的气泡与固定壁面相互作用数值模拟 [J]. *中国舰船研究*, 2012, 7 (6): 23-30.
- [16] ZHANG W, YUE Y W, ZHANG A M, et al. Numerical simulation of underwater explosion bubble interactions with a solid boundary based on AUTODYN [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2012, 7 (6): 23-30.