

DOI:10.11918/201903028

高速射弹并联入水过程空泡演化特性试验

黄海龙¹, 王 聪², 余德磊², 张 鹤², 卢佳兴²

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为研究多射弹并联入水时空泡演化特征, 首先设计了可用于双射弹水平高速入水的发射装置, 通过试验验证了该系统的可行性; 然后基于该系统进行了不同空化器直径、径向间距的双射弹并联入水试验, 利用高速摄影技术采集到双射弹在并联入水运动过程; 最后对采集到的运动序列图片进行数据分析, 得到双射弹在并联入水过程中的双空泡演化规律, 揭示了射弹并联入水过程中空泡之间的耦合演化机理。试验结果表明: 高速射弹并联入水过程中, 其空泡演化过程存在穿越、吸引及截断3种典型现象; 空化器直径与射弹径向间距均是影响双空泡耦合特性的重要因素。相同射弹径向间距时, 随着射弹空化器直径减小, 双空泡之间的耦合程度减弱, 完全穿越转变成部分穿越现象; 相同的空化器直径时, 随着双射弹的径向间距增大, 射弹的脱落空泡之间的吸引现象逐渐减弱, 但是脱落空泡的偏移幅值随着径向间距的增大呈现先增大后减小的变化趋势; 当双射弹存在前后距离时, 先发射弹易出现空泡的截断现象。随着轴向间距增大, 截断现象将减弱。根据独立膨胀原理可知, 相同条件下射弹前后间距减小时截断现象亦将减弱。

关键词: 并联入水; 空泡演化; 高速射弹; 空泡耦合特性; 独立膨胀原理

中图分类号: TV131.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)12-0015-06

Experimental study on cavitation evolution of high-speed projectile water entry in parallel

HUANG Hailong¹, WANG Cong², YU Delei², ZHANG He², LU Jiaying²

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To study the multi-cavity evolution characteristics of parallel multi-projectile water entry, the launcher that can be used for high-speed water entry in parallel was designed, and the feasibility of the system was verified by experiments. Then, based on the system, the test on parallel double-projectile water entry was carried out with different cavitator diameters and radial spacing. The high-speed photographic technology was used to collect the movement process of double-projectile water entry in parallel. Finally, the collected motion sequence images were analyzed to obtain the data of double-projectile water entry in parallel. The evolution law of double cavitation in the process of parallel water entry was obtained, which reveals the coupling evolution mechanism between the cavitation of the projectiles entering water in parallel. Results show that there were three typical phenomena of crossing, attraction, and truncation in the process of cavitation evolution of high-speed projectiles. The cavitator diameter and the radial distance of projectile were important factors affecting the coupling characteristics of double-cavity. When the radial distance of the projectiles was constant, as the diameter of the projectile cavitator decreased, the degree of coupling between the double cavitation was weakened, and the complete crossing phenomenon became a partial crossing phenomenon. Under the same cavitator diameter, with the radial distance increased, the attraction phenomenon between the shedding cavities of the projectiles was gradually weakened, while the offset amplitude of the shedding cavities increased first and then decreased with the increase of the radial distance. When there was a front-to-back distance between the double-projectile, the first projectile was prone to the truncation phenomenon. As the radial distance increased, the truncation diminished. According to the principle of independent expansion, the truncation phenomenon will also be weakened when the distance between the front and back of the projectile was reduced under the same conditions.

Keywords: water entry in parallel; cavitation evolution; high-speed projectile; cavitation coupling characteristic; independent expansion principle

收稿日期: 2019-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(11672094)

作者简介: 黄海龙(1976—), 男, 高级工程师;

王 聪(1966—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 王 聪, alanwang@hit.edu.cn

射弹并联入水是指两个或多个射弹沿空间平行线同时或在极短时间间隔内穿越自由水面进入水中的过程。射弹在入水过程中, 当流体低压区压力降低

至水的饱和蒸汽压时,发生空化形成空泡,空泡向后发展覆盖整个弹体,形成超空泡^[1]. 处于超空泡包裹之中的射弹流体阻力急剧下降,因此超空泡射弹得到国内外学者的广泛关注^[2].

国内外对超空泡射弹的研究手段主要集中于理论、数值和试验研究. 早期的理论研究大多基于 Logvinovich 等^[3]的空泡截面独立膨胀原理对空泡发展过程进行描述. Lee 等^[4]利用能量守恒原理对射弹高速入水空泡生成、发展过程和闭合特性进行研究. Al'ev^[5]基于细长体理论研究了细长锥形体在考虑压缩性影响时的空泡特征. 文献[6-7]在计算中应用了均值多相流模拟多相流场,给出了稳态和瞬态情况下轴对称流动、通气和自然超空泡形态的计算. 国内在理论方面研究较早,早期陈九锡等^[8]利用有限差分法对 N-S 方程直接求解,获得了平头射弹垂直入水时的空泡生成、发展、闭合过程及流场变化过程. 马庆鹏等^[9]对射弹高速入水时的弹道特性、空泡形态等进行了数值模拟研究. 在试验方面, Mostafa 等^[10]通过水平发射入水试验发现不同的空化数下超空泡射弹形成的空泡形态不同. Hrubes^[11]通过高速摄影技术获得超空泡射弹的水下运动情况,研究了射弹在运动过程中的尾拍现象. 文献[12-14]系统开展大量超空泡射弹试验研究,对实验中获取的空泡形态进行测量分析,总结出由一定适用范围超空泡形态计算的的经验公式. 曹伟等^[15]对空化器、弹径不同的多种弹丸进行射弹试验研究. 金大桥等^[16]利用轻气炮射弹实验装置开展了通气超空泡水下射弹试验研究. 赵成功等^[17]开展细长体模型水下高速运动的试验研究.

国内外的研究大多基于单个射弹,随着“饱和攻击”^[18]的提出,多发及队列射弹入水逐渐被世界各国所重视. 目前尚未从国外公开文献中查到多射弹入水的研究. 国内的相关研究也极少. 王志东等^[19]和孙亚亚^[20]对连发射弹进行了数值模拟研究. 本文将通过高速摄像方法和高压动力并联发射装置进行双射弹的上、下方向并联入水试验,研究了双射弹并联入水过程中的双空泡演化特征及其机理.

1 试验系统及方案

试验系统如图 1 所示. 试验系统主要由动力加载系统、发射控制系统、光学测试系统和试验水槽及防护系统组成. 其中发射系统主要包括高压气瓶、高压气室、双炮管、高压管路系统;发射控制系统主要由电磁阀与控制器组成,控制器能够提供电信号触发高速摄像和电磁阀,从而保证气室触发装置和摄

像触发装置同步,能够更有效的拍摄射弹水下运动过程;光学测试系统包括高速摄像系统、照明系统及炮口通断靶测速系统;开放式水槽尺寸为 $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 10.0 \text{ m}$,顶部开口,前侧面采用较高强度的钢化玻璃,底部和其余侧壁由钢板和相应支架组成;保护及回收系统包括多层钢丝网和回收池等,保护及回收系统布置于水槽末端,当射弹达到水槽末端时,会撞击上钢丝网减速并进入回收池.

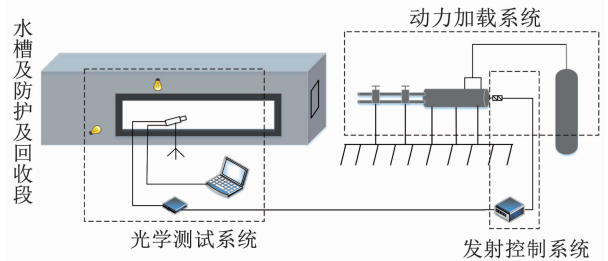


图 1 试验系统总体方案

Fig. 1 Overall scheme of the test system

试验中采用两种截锥型射弹和一种圆柱型射弹. 其中截锥射弹模型如图 2 所示. 3 种射弹模型的具体尺寸见表 1. 试验中通过调整发射管间距改变射弹间距;通过加载不同的气室压强改变射弹入水初速度.

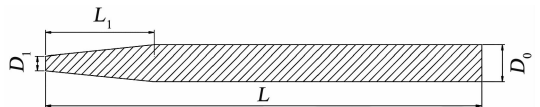


图 2 截锥型射弹模型示意

Fig. 2 Schematic diagram of truncated cone projectile model

表 1 射弹模型尺寸

Tab. 1		Projectile model size			mm
模型	D_1	D_0	L_1	L	
A	8	20	60	240	
B	14	20	30	210	
C	20	20	-	120	

射弹空泡形态主要受空化数 σ 和弗劳德数 Fr 影响,对于本实验,由于射弹速度较高,弗劳德数 Fr 较大,即重力影响较小,在本文研究中予以忽略,故本实验空泡形态主要由空化数 σ 决定,定义如下:

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{0.5\rho u^2}$$

式中: p_∞ 为流场的参考压力; p_v 为当前温度下的饱和蒸汽压,对于水的空化,即为水的饱和蒸汽压; u 为流场的来流速度,本文中即为射弹速度. 双发射弹入水时其速度存在较小的差异,因此定义双射弹初始空化数时采用其平均速度计算空化数 $\bar{\sigma}$. 表 2 列出了部分试验工况.

表 2 并联入水试验部分工况

Tab. 2 Partial conditions of parallel water entry test

序号	弹型	射弹间距/mm	初始空化数 $\bar{\sigma}$
1	C	$0.5D_0$	0.045 0; 0.065 0
2	B	$0.5D_0$	0.085 2
3	B	$1.5D_0$	0.050 0
4	B	$2.0D_0$	0.050 0
5	B	$3.0D_0$	0.050 0
6	B	$4.0D_0$	0.047 4
7	A	$0.5D_0$	0.044 1
8	A	$1.0D_0$	0.049 2
9	A	$1.5D_0$	0.051 9
10	A	$2.0D_0$	0.048 5
11	A	$2.5D_0$	0.048 5
12	A	$3.5D_0$	0.048 5

注: D_0 为射弹直径; 序号 1 的初始空化数分别为上、下方射弹的初始空化数, 表示速度差异过大不宜用 $\bar{\sigma}$ 处理。

2 结果及分析

2.1 射弹并联入水过程空泡穿越现象

图 3 展示了工况 1 的双空泡演化过程. 不同于单独入水时空泡的自由发展, 并联入水时射弹空泡发展受到耦合影响, 另一发射弹对空泡的附近流场形成扰动, 甚至直接破坏空泡界面. 图 3 对双空泡的附近流场和空泡界面扰动现象进行了细致研究. 在 $2t_0$ 时刻, 下方射弹率先入水形成较大的入水空泡并且将上方射弹包含在内, 此时上方射弹在下方射弹空泡内受到的阻力作用很小, 这将导致上方射弹追上下方射弹, 在穿过下方射弹的空泡壁面后产生新的入水空泡. 在 $3t_0 \sim 4t_0$ 时间内, 上方空泡迅速扩张, 下方射弹空泡壁面被上方射弹破坏后再次受到空泡扩张扰动, 导致界面严重失稳且伴随着大量的汽水混合物. 另外, 在 $3t_0$ 时刻下方射弹空泡下侧出现凸起的流场结构, 分析其产生原因可能是上方射弹空泡扩张时对下方射弹空泡界面流场造成强扰动. 在 $7t_0$ 时下方射弹头部空泡变得光滑, 说明其受到的扰动减弱. 上方射弹空泡后半部分尺寸“过度膨胀”, 这种现象是由于空泡下方存在大量的脱落气团, 使得空泡扩张时受到的流场压力较小. 运动至 $12t_0$ 时射弹偏移较大, 双空泡发展时的相互影响减弱, 此时下方射弹空泡变得透明且在尾部闭合, 上方射弹空泡混合了下方射弹部分泄露气体, 其体积进一步增大. 至 $20t_0$ 时, 下方射弹远离上方射弹空泡发展区域, 上方射弹空泡不断被拉长后由于泡内压力降低, 在环境压力作用下收缩溃灭.

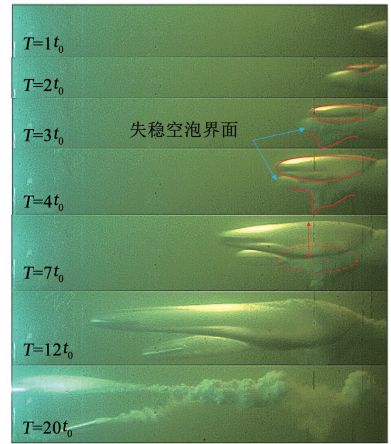


图 3 双空泡演化过程中的完整穿越现象

Fig. 3 Complete crossing phenomenon in the evolution of double cavitation

图 4 为工况 2 的双空泡演化过程. 与图 3 不同, 先入水射弹产生的入水空泡直径尺寸较小, 在相同间距下未能完全包裹后发射弹. 在运动过程中上方射弹空泡较短时间内维持部分在空泡内, 部分在水域中, 如 $3t_0$ 时刻, 上方射弹部分与下方射弹的空泡壁面接触, 部分穿越时上方射弹持续冲击着下方射弹空泡壁面, 导致下方射弹空泡表面产生不透明的汽水混合物. 运动至 $6t_0$ 时刻, 上方射弹空泡扩张且空泡表面较透明, 在运动时其空泡扩张处于主导地位, 趋向于挤压下方射弹空泡后得到扩张. 随着射弹继续运动, 在 $8t_0$ 时刻, 上方射弹空泡尾部尺寸较前方略大, 分析形成原因是由于下方射弹空泡内部从空气中得到的补充气体迅速减小, 当下方射弹空泡体积增大时泡内压力降低, 所以上方射弹尾部区域射弹空泡处于低压区, 空泡尺寸较自由发展时大, 而在射弹前部双空泡耦合剧烈 (图 4 中椭圆标识), 其膨胀受到抑制后空泡尺寸较单空泡发展小. 在这种发展模式下形成了上方射弹前部分尺寸较小, 尾部区域尺寸较大的波浪状轮廓. 运动至 $13t_0$

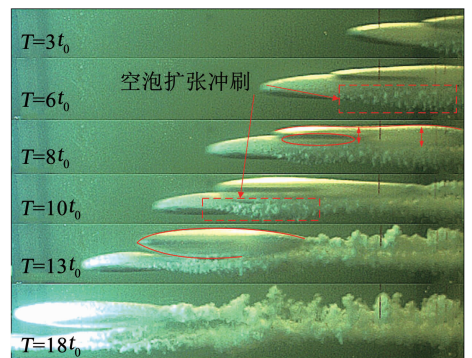


图 4 双空泡演化过程中的部分穿越现象

Fig. 4 Partial crossing phenomenon in the evolution of double cavitation

时刻,下方空泡内部压力降低,上方射弹空泡在扩张过程中占据优势,空泡轮廓偏向椭圆,下方射弹空泡不断以气团形式向两侧脱落.至 $18t_0$ 时刻,双发射弹的耦合程度减弱,双空泡相对完整.此时先发的下方射弹的脱落空泡呈发散状发展,后发的上方射弹脱落空泡基本单股发展.

综上所述,并联入水过程中双空泡的穿越现象产生条件为先入水空泡产生的空泡尺寸较大,造成后发射弹入水后全部或部分处于空泡内部.在本文中保持射弹间距不变,改变了射弹空化器直径,发现双空泡由完全穿越过渡到了部分穿越.由试验图片还观察到了穿越过程中出现的“空泡扩张冲刷”和“过度膨胀”现象.

2.2 射弹并联入水过程空泡吸引现象

图 5 为 B 型射弹在不同间距下的流场结构.从图 5 中可以观察到双空泡之间的吸引现象,即同单独入水时的脱落空泡运动相比,并联入水时射弹脱落空泡朝着相互靠近的方向运动,图 5 中先入水的下方射弹脱落空泡的偏移现象较明显.图 5 中的虚线表示单独入水时脱落空泡的发展趋势,可以直观的观察双脱落空泡的吸引现象.另外,从图 5 中可以观察到上、下脱落空泡的径向尺寸有较大差异,并且后发的上方射弹脱落空泡尺寸较大,说明在形成入水空泡过程中后发的上方射弹空泡含气量更多.双脱落空泡在发展一段时间后逐渐混合.

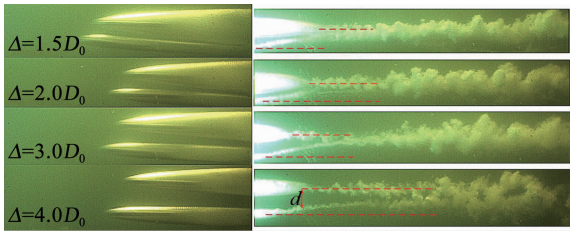


图 5 B 型射弹在不同间距下的双空泡吸引现象

Fig. 5 Attraction phenomenon of double cavitation of type B projectile at different spacing

图 6 为 A 型射弹在不同间距下的双空泡流场结构.同 B 型射弹相比,A 型射弹入水后产生的空泡尺寸较小,从图 6 中同样看到双空泡之间的吸引现象,具体特征和 B 型射弹稍有差异,在较小间距下下方射弹的脱落空泡部分向上发展,部分沿下游发展,此分流现象的形成机理将在下文说明.当间距增大至 $2.0D_0$ 时下方射弹的脱落空泡呈单股发展,脱落空泡朝着互相靠近的方向偏移.同图 5 相同先入水射弹的脱落空泡偏移量更大,从图 6 中可以发现,双空泡闭合位置附近的脱落空泡处于不同的流场环境中.其中空泡耦合段(矩形区域标识)受后发射弹空泡演化影响具有一定速度,其压力较低,脱落空泡

亦对流场产生一定影响.另外,射弹受到的静水压力存在差距(上方射弹上侧环境压力较小),进一步揭示了空泡耦合段的压力更低,在较大的压差驱动下先发射弹的脱落空泡出现较大偏移.

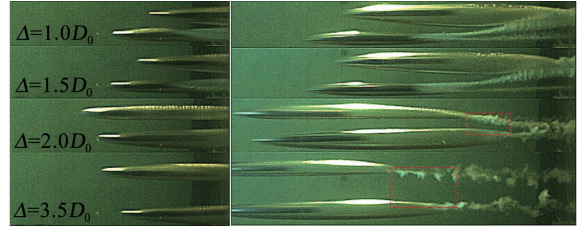


图 6 A 型射弹在不同间距下的双空泡吸引现象

Fig. 6 Attraction phenomenon of double cavitation of type A projectile at different spacing

为研究空泡吸引现象随射弹间距的变化规律,定义量纲一的距离 d^* 如下:

$$d^* = \frac{D-d}{D_0}$$

式中: D 为射弹轴间距; d 为后发射弹闭合点与另一股脱落空泡的距离(如图 6 中所示); D_0 为射弹直径.通过提取不同间距工况下的相同时刻的距离 d ,得到以下两种射弹的空泡靠拢幅度随着射弹间距的变化特点.从图 7 中发现 A 型射弹的曲线呈现先增大后减小的特点,而 B 型射弹随着间距增大,脱落空泡偏移量逐渐增大.从而可以得知,对于 A 型射弹,其脱落空泡相互靠拢,并且靠拢的幅值随着间距增大而增大(在 $D = 2.0D_0 \sim 3.0D_0$ 内),当到达某个临界后,随着间距增大,脱落空泡之间的靠拢趋势减弱;对于 B 型射弹,其入水空泡尺寸较大,在相同间距下,空泡耦合范围较大,双射弹之间的流体区域较小,如图 7 中该间距下某时刻的空泡演化状态所示.因此当 A 型射弹达到临界间距时,B 型射弹尚未达到临界距离,表现为曲线随着射弹间距增大而继续增大.

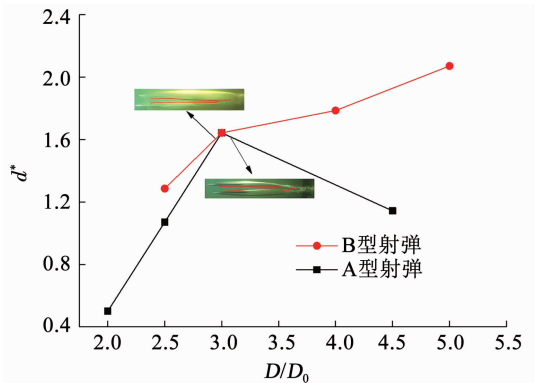


图 7 双空泡吸引现象随射弹间距变化规律

Fig. 7 Variation of attraction phenomenon of double cavitation with projectile spacing

由上述分析可知双空泡之间的吸引现象不仅和射弹间距有关,还与空泡尺寸有关.通过试验结果

对双空泡的吸引现象进行初步分析: 当双射弹间距较大时, 射弹入水瞬间其头部产生完整空泡. 在射弹之间存在有限的流体区域, 射弹运动时排开周围液体, 同时空泡的演化对流场造成扰动, 使得中间流体产生一定的扰动速度. 根据伯努利原理知此区域压力降低. 在压差力驱动下射弹的脱落气团向低压区发展, 形成图 7 中的吸引现象, 并且脱落空泡的靠拢幅度随着间距的增大而增大, 当达到临界间距时, 靠拢幅度随着间距增大而减小. 在后续研究中, 将对此吸引机理进行深入分析.

2.3 射弹并联入水过程空泡截断现象

图 8 为工况 7 中的并联入水过程空泡演化过程. 从图 8 中可以看到下方射弹率先入水, 与上方射弹前后间距 $l = 0.614L_0$. 此工况下出现了射弹空泡被截断的现象. 在 $2t_0$ 时刻射弹空泡发展尚未受到上方射弹的影响, 其形态基本和单发射弹相同. 当运动至 $6t_0$ 时, 从图 8 中看到双发射弹的空泡形态存在很大的差异: 上方的后发射弹空泡基本呈椭圆形并包裹着射弹 (图中实线标识), 下方先发射弹空泡未包裹射弹, 并且其上、下方的轮廓不对称 (图中虚线标识). 造成空泡不对称的原因解释如下: 在相同位置截面处, 上方射弹空泡扩张速度远大于下方射弹空泡扩张速度, 这将对下方射弹空泡发展造成抑制作用. 由于双射弹间距过近, 这种抑制效应将下方射弹空泡截断. 如图 8 中 $6t_0$ 所示, 下方射弹的截断位置在上方射弹头部正下方附近, 说明了下方射弹空泡被截断缘于上方射弹空泡扩张的“挤压”. 当下方射弹空泡上侧空泡被截断后, 下侧空泡受到其影响后亦闭合于弹身某处. 同上侧空泡相比下侧空泡未受到上方射弹作用, 其闭合位置偏向尾部, 形成了不对称的空泡轮廓. 运动至 $10t_0$ 时, 下方射弹空泡由于尾部闭合处产生的回射流向前运动, 整个射弹空泡变得不透明, 空泡界面产生波动. 此时上方射弹的空泡较透明, 与之前时刻相比, 其尺寸进一步增大. 射弹进一步运动, 在 $16t_0$ 时可以清楚观察到双射弹尾迹相互吸引的趋势. 其中上方射弹脱落气团在运动时逐渐偏下, 下方射弹的脱落气团偏向上方, 双脱落空泡在发展过程中逐渐混合 (图中椭圆所示).

图 9 为工况 8 的并联入水过程空泡演化过程. 从图 9 中可看到下方射弹率先入水, 上、下射弹的前后间距 $l = 0.25L_0$. 该工况下发现弱化的截断现象, 表现为凹型空泡轮廓. 在 $3t_0$ 时刻, 上方射弹空泡基本对称而下方射弹空泡出现较大变形 (图中红线标识): 其上侧空泡在上方射弹对应位置处的空泡尺寸普遍较小, 其原因是下方射弹空泡扩张时受到上方射弹的抑制作用. 与图 8 相比射弹的间距较大, 并

且前后距离较近时相同截面位置处的空泡膨胀速率差距较小, 因此形成空泡上侧的凹型结构, 未产生图 8 中下方射弹空泡被截断的现象. 在 $5t_0$ 时刻, 上方射弹空泡基本透明, 从图 9 中可以明显观察到其下侧尺寸大于上侧, 最大尺寸位置距离下方射弹尾端较远处. 同时下方射弹空泡在空泡尾部出现分流现象: 部分向上方发展, 小部分基本沿水平向下游发展. 在 $8t_0$ 时刻观察到下方射弹闭合点处的双泄气通道. 射弹继续运动, 双射弹空泡均闭合后相对独立发展.

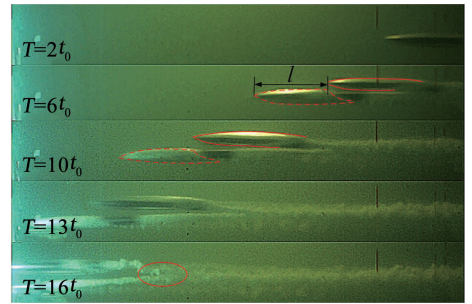


图 8 双空泡演化过程中的截断现象

Fig. 8 Truncation phenomenon in the evolution of double cavitation

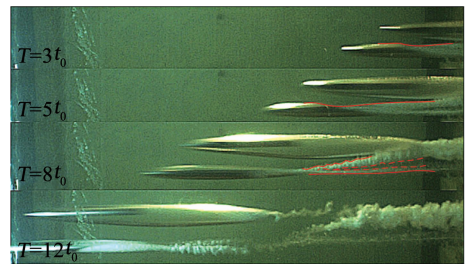


图 9 双空泡演化过程中的弱截断现象

Fig. 9 Weak truncation in the evolution of double cavitation

在工况 9 (图 6 中的 $\Delta = 1.5D_0$) 中双空泡演化规律与图 9 类似, 均出现了弱截断和分流现象. 分析此现象的形成机理: 图 10 中的 I 表示双空泡发展时的强耦合区域, 入水后在 I 区域内射弹存在前后间距且速度差距很小, 因此在相同位置截面处上方射弹空泡膨胀速度大于下方射弹, 根据独立膨胀原理可知 $3t_0$ 时刻在 I 中下方射弹空泡部分扩张部分处于收缩阶段, 上方射弹处于膨胀阶段. 当双空泡均处于扩张阶段时, 对应的区域的空泡均受到抑制, 空泡尺寸较正常演化时小; 当下方射弹收缩而上方射弹扩张时, 下方射弹的收缩过程加快. 这种耦合状态导致下方射弹空泡上侧出现未充分发展后的凹状结构. 相对于截断现象, 双射弹前后间距 l 较小, 上方射弹对下方射弹空泡的抑制作用较弱, 不足以将下方射弹空泡在弹身处截断, 但是下方射弹空泡收缩加快, 造成其空泡壁面触碰到射弹表面. 在下方射弹发生尾拍后, 其尾部产生大量分散的脱落气团. 在 II 区域, 下方射弹空泡基本闭合, 由伯努利原理可知此

区域流场压力较低,因此上方射弹空泡收缩过程相对减缓,表现为此区域内上方射弹空泡下侧尺寸较大.同时较快的流速导致压力较低,加快了脱落气团向上方发展的趋势,形成图中出现的分流现象.

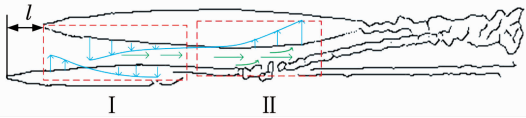


图 10 双空泡耦合发展时的流场结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of flow field structure during the development of double-cavity coupling

3 结 论

1)建立了双射弹并列、连续发射试验系统并通过试验验证了该系统的有效性,为进一步开展并联入水多空泡融合与演化特性,以及多射弹运动干扰等奠定基础.

2)高速射弹并联入水过程中,其空泡演化过程存在穿越、吸引及截断 3 种典型现象.空化器直径和射弹间距是影响双空泡耦合演化的重要因素.相同射弹轴向间距时,随着射弹空化器直径减小,双空泡之间的耦合程度减弱,完全穿越转变成部分穿越现象;相同的空化器直径时,随着双射弹的轴间距增大,射弹的脱落空泡之间的吸引现象逐渐减弱,但是脱落空泡的偏移幅值随着轴间距的增大呈现先增大后减小的变化趋势.

3)当双射弹存在前后距离时,先发射弹易出现空泡的截断现象.随着轴向间距增大,截断现象将减弱.根据独立膨胀原理可知,相同条件下射弹前后间距减小时截断现象亦将减弱.

参 考 文 献

[1] 孟庆昌, 张志宏, 刘巨斌, 等. 水下高速航行体超空泡流动研究进展[J]. 船海工程, 2006(6): 26
MENG Qingchang, ZHANG Zhihong, LIU Jubin, et al. Research development of high-speed super-cavitating flow of the high-speed underwater vehicle[J]. Ship & Ocean Engineering, 2006(6): 26. DOI:10.3963/j.issn.1671-7953.2006.06.008

[2] SAVCHENKO Y N. Control of supercavitation flow and stability of supercavitating motion of bodies[C]//RTO AVT Lecture Series on "Supercavitating Flows" Held at the von Karman Institute (VKI) in Brussels. Belgium; [s. n.], 2001; 321

[3] LOGVINOVICH G V, BUYVOL V N. Hydrodynamics of cavitating flow with perturbations[J]. Journal de Physique IV, 2003, 110(9): 559. DOI:10.1051/jp4;20020752

[4] LEE M, LONGORIA R G, WILSON D E. Cavity dynamics in high-speed water entry[J]. Physics of Fluids, 1997, 9(3): 540. DOI: 10.1063/1.869472

[5] AL'EV G. Separated transonic water flow past a circular cone[J]. Izv Akad Nauk SSSR, Mekh Zhidk Gaza, 1983, 2: 152

[6] KUNZ R F, BOGER D A, CHYCEWSKI T S, et al. Multi-phase CFD analysis of natural and ventilated cavitation about submerged bodies[C]//Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference. San Francisco, California; ASME, 1999; 1

[7] MERKLE C L, FENG Jian, BUELOW P E O. Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Cavitation. Grenoble, France; CAV, 1998; 307

[8] 陈九锡, 颜开. 用 MAC 方法计算平头物体垂直等速入水空泡[J]. 空气动力学学报, 1986, 4(1): 47
CHEN Jiuxi, YAN Kai. The calculation of vortical constant-speed water entry cavity of flat-nosed body using the MAC-method[J]. Journal of Aerodynamics, 1986, 4(1): 47. DOI:10.1607/j.cnki.cjhd.1985.01.002

[9] 马庆鹏, 魏英杰, 王聪, 等. 不同头型运动体高速入水空泡数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(11): 24
MA Qingpeng, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Numerical simulation of high-speed water entry cavity of cylinders[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(11): 24

[10] MOSTAFA N, NAYFEH A, VLACHOS P. Cavitating flow over a projectile[C]//Proceedings of the 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Fluid Dynamics Conference. Reno, NV; [s. n.], 2001

[11] HRUBES J D. High-speed imaging of supercavitating underwater projectiles[J]. Experiments in Fluids, 2001, 30(1): 57. DOI:10.1007/s003480000135

[12] LOGVINOVICH G V. Some problems of supercavitating flows [C]//Proceedings of High Speed Body Motion in Water. Hull; Canada Communication Group Inc., 1998. AGARDR-827-18

[13] SAVCHENKO Y N. Experimental investigation of supercavitating motion of bodies; ADA400728[R]. Brussels, Belgium; RTO EN-OIO, 2001

[14] VLASENKO Y D. Experimental investigation of supercavitation flow regimes at subsonic and transonic speeds[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Cavitation. Osaka, Japan; [s. n.], 2003; 1

[15] 曹伟, 魏英杰, 王聪, 等. 超空泡技术现状、问题与应用[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 571
CAO Wei, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Current status, problems and applications of supercavitation technology [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(4): 571. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0992.2006.04.008

[16] 金大桥, 王聪, 魏英杰, 等. 通气超空泡水下射弹实验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 214
JIN Daqiao, WANG Cong, WEI Yingjie, et al. Experimental study on ventilated supercavitating underwater projectile[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 214

[17] 赵成功, 王聪, 魏英杰, 等. 细长体水下运动空化流场及弹道特性实验[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(3): 439
ZHAO Chenggong, WANG Cong, WEI Yingjie, et al. Experimental of cavitation and ballistic characteristics of slender body underwater movement [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(3): 439. DOI:10.11883/1001-1455(2017)03-0439-08

[18] 丁启伟, 赵晶, 王黎黎. 利用巡航导弹进行饱和攻击研究[J]. 战术导弹技术, 2015(3): 30
DING Qiwei, ZHAO Jing, WANG Shenshen. Study of saturation attack using cruise missile[J]. Tactical Missile Technology, 2015(3): 30. DOI:10.16358/j.issn.1009-1300.2015.03.06

[19] 王志东, 李洋, 付佳, 等. 串、并联航行体自然超空泡数值分析方法研究[J]. 船舶工程, 2015, 37(9): 17
WANG Zhidong, LI Yang, FU Jia, et al. Research on numerical analysis method of parallel and tandem vehicles with natural supercavity flow[J]. Ship Engineering, 2015, 37(9): 17. DOI: 10.13788/j.cnki.cbgc.2015.09.017

[20] 孙亚亚. 复杂表面形状以及多连发射弹的超空泡流动特性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018
SUN Yaya. Research on supercavitation flows characteristics of complex surface shape and successive projectiles[D]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Technology, 2018