DOI: 10.11883/bzycj-2018-0115
文章编号: 1001-1455(2018)06-1189-11

90°锥头弹丸不同速度下垂直入水冲击引起的空泡特性*

黄振贵[1],王瑞琦[1,2],陈志华[1],侯 宇[1],罗驭川[1]
(1.南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏 南京 210094;
2.兰州空间技术物理研究所,甘肃 兰州 730000)

摘要: 用高速摄像拍摄了 90°锥头弹丸低速入水的空泡形态演变过程,全面讨论了不同入水冲击速度下空泡的闭合方式及其演变过程,分析了空泡闭合时间、闭合点水深和弹头空泡长度随入水速度的变化规律以及不同水深位置空泡直径的变化规律;研究了水幕闭合和近液面空泡收缩上升所形成的射流现象及其相互耦合作用过程,探讨了空泡深闭合后其壁面波动规律。结果表明:随着入水速度的增加,空泡分别发生准静态闭合、浅闭合、深闭合和表面闭合,每种闭合方式对应的一个速度区间;弹头产生空泡的临界入水速度为 0.657 m/s;不同水深位置的空泡直径呈现非线性变化;随着水深的增加空泡扩张初速增大,空泡最大直径减小,扩张段缩短,收缩段延长;同一时刻水深越大空泡扩张收缩的加速度也越高;水幕闭合后会产生向上和向下两股射流,向下射流速度较大时会对弹丸运动产生影响;近液面空泡收缩上升时会产生强度正比于空泡体积大小和闭合点水深的射流,并与上两股射流相互耦合形成一股更强的向上射流;空泡深闭合后长度缩短和产生的向下射流使弹丸受力发生改变,弹丸速度因受力产生的变化带动了流体质点速度的波动,进而导致空泡壁面发生波动,壁面波动遵循空泡截面独立扩张原理。

关键词: 垂直入水冲击;空泡闭合方式;壁面波动;射流;临界入水速度
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

弹丸入水时会产生复杂流动现象,最主要的是在冲击过程中形成入水空泡。空泡的形成、发展、闭合、溃灭对弹丸入水瞬间的运动特性、流体动力特性等方面具有重大影响,研究空泡产生的临界条件以及空泡壁面波动规律等对入水导弹、鱼雷和声纳浮标等的改进具有重要意义。

近年来,许多国内外学者对低速入水问题进行了研究。Yan 等[1]利用高速相机记录了低 Froude 数下球形自由落体入水过程中空泡形态的演变过程,得到了空泡发展规律的渐近线理论。Aristoff 等[2-3]对轻质球体垂直入水问题进行了实验与数值研究,分析了球体动力学过程以及球体速度衰减对空泡形态的影响。马庆鹏等[4]实验研究了球体垂直入水的空泡形成、发展、闭合及溃灭过程,空泡在此过程中发生了表面闭合和深闭合;分析了入水速度和表面沾湿对入水空泡流场的影响,并在此基础上对球体的运动特性进行分析,结果表明球体入水是一个非线性问题。

除球体外,人们还研究了其他外形物体的入水过程,如 Bergmann 等[5]通过实验与数值方法研究了 Froude 数小于 200 的圆盘入水过程中空泡的发展过程。蒋运华等[6]对圆盘空化器航行体入水空泡问题开展了约束航行体姿态的实验研究,讨论了入水空泡的生成、发展及倾斜入水下的空泡流动特性。

因声纳浮标、导弹、鱼雷等的主体部分常采用柱形体,因此更多的学者对简化的柱形体入水问题进行了较多的研究。Yao 等[7]基于 Rayleigh-Besant 问题建立了圆头柱形弹丸空泡形状演变过程的理论模型,获得了与实验一致的位移和速度衰减规律。杨衡等[8]对圆头及 90°、120°、150°锥头柱形弹体低速垂直和倾斜入水空泡的形成、发展过程进行了实验研究,对比了四者入水过程空泡形态变化的异同,并

* **收稿日期**: 2018-04-08; **修回日期**: 2018-05-03
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(30917012101)
第一作者: 黄振贵(1986—),男,博士,讲师; **通信作者**: 陈志华,chenzh@njust.edu.cn。

给出了入水速度和俯仰角随时间的变化曲线，此外分别选取 120°、90°锥头弹研究了入水速度对垂直和倾斜入水空泡形成和闭合方式的影响，并选取 150°锥头弹研究了在不同入水角度下空泡形态的变化过程。何春涛等针对平头和 140°锥头圆柱体，研究了入水空泡的深闭合和表面闭合 2 种方式的形态演变过程[9]，并针对对单个圆柱体低速入水情况，分析了入水空泡的生成、发展和闭合，在此基础上研究了多弹体串列和并列情况下入水空泡的演变过程，对并列情况下空泡之间的相互影响和串列情况下多弹体对空泡的影响进行了分析[10]。施红辉等[11]通过不同头型钝体入水实验，研究了头型对空泡产生的初始位置和整体形状的影响。

Truscott 等[12]和王永虎等[13]分别对入水冲击问题的国内外研究现状和进展进行了综述，均指出入水冲击问题是一个具有重要工程背景的高难度研究领域，一直具有很大的研究意义。

以上对于柱形弹低速入水的研究侧重于定性分析入水空泡在表面闭合、深闭合下的演变过程，并未对其他闭合方式进行详细分析，也未得到各闭合方式所对应的速度区间。另外，弹头空泡产生的临界速度、闭合时间与闭合点的水深分别与入水速度的关系、空泡演化过程中射流的产生及相互耦合作用和壁面波动规律等仍不清楚。

基于此，本文中利用 90°锥头弹进行不同速度垂直入水实验，研究不同入水速度条件下空泡特性；采用傅里叶变换拟合计算弹头产生空泡的临界入水速度，并通过实验进行验证；探索空泡闭合时间、闭合点水深随入水速度的变化规律以及不同水深位置空泡直径随时间的变化规律，分析不同空泡闭合方式对应的速度区间及不同水深位置空泡的扩张特性；观察空泡演变过程所产生的射流现象，并分析射流间的相互耦合机理；分析空泡闭合后近液面空泡上升产生的射流强度与空泡大小及闭合点深度的关系，以及在一定入水速度下水幕闭合后产生的向下射流对弹丸运动和空泡形态稳定性的影响；通过分析空泡深闭合后的壁面波动现象，探索壁面波动的机理。

1 实验装置与模型参数

图 1 为实验装置示意图，主要包括玻璃水槽、高速摄像机、计算机、光源、电磁铁、支架、坐标纸、水槽底部防护层、水平尺等。弹体垂直入水实验在室内进行：电磁铁断电后失去磁性控制钢质弹丸垂直下落入水；采用 Phantom 高速摄像机以 3 000 Hz 的频率拍摄入水空泡的演变过程；由与高速摄像机连接的计算机控制拍摄与弹丸下落的同步；采用功率为 1 000 W 的平行光源照明，以提高摄像清晰度；弹体入水速度通过改变支架高度来调节。水槽尺寸为 500 mm×250 mm×250 mm，由厚 8 mm 的普通玻璃粘接而成，水槽底部设有防护层，水槽背面张贴每小格尺寸为 5 mm 的坐标纸作为拍摄背景；实验用水为自来水，弹丸材料为普通碳素钢，密度为 7.85 g/cm^3，直径(D)为 8 mm、长度为 44 mm，弹头长4 mm，头部锥角为 90°，如图 2 所示。

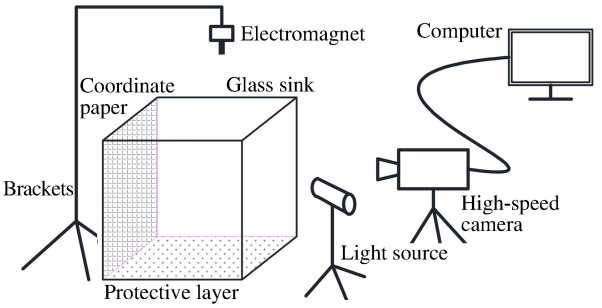


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

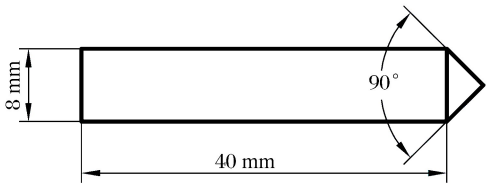


图 2 90°锥头弹丸尺寸图

Fig. 2 Dimensions of 90° cone-shaped head projectile

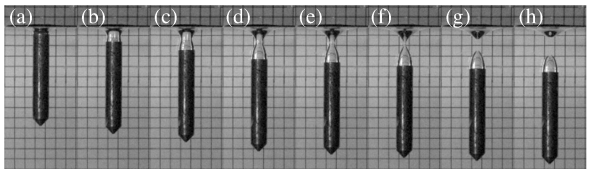
2 实验结果分析

为方便讨论，将弹丸入水前空中自由落体阶段略去，以弹头接触水面瞬间为 $t=0$ 时刻，u_0 表示 $t=0$ 时刻弹丸的入水速度，水面为 x 轴，竖直方向为 y 轴，水面与竖直轴的交点为原点。

2.1　不同入水速度条件下的空泡演化过程

对常规高速入水问题通常基于空化数分析来讨论入水过程中自然空泡的生成与演化。但由于本文中弹丸入水速度较低，入水空泡的形成主要是水面空气卷入到运动体排水空腔形成，此时空化数较大，且其变化与速度改变成反比，因此本文中基于速度对空泡演变过程进行分析与讨论。

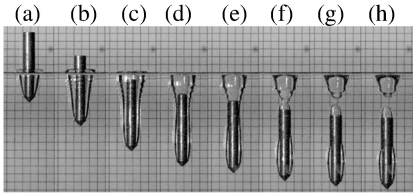
图 3～6 分别给出了 u_0 分别为 0.44、1.36、2.80、3.98 m/s 时，空泡依次发生准静态闭合、浅闭合、深闭合和表面闭合的过程。



(a) 63.3 ms, (b) 67 ms, (c) 70.7 ms, (d) 74.7 ms, (e) 76 ms,
(f) 77.3 ms, (g) 78.7 ms, (h) 80 ms.

图 3　准静态闭合空泡（$u_0=0.44$ m/s）

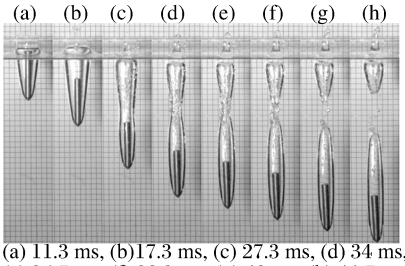
Fig. 3　Quasi-static seal impact cavity ($u_0=0.44$ m/s,)



(a) 14 ms, (b)24 ms, (c) 34 ms, (d) 40 ms,
(e) 42.3 ms, (f) 45.3 ms, (g) 47.3 ms, (h) 48.3 ms.

图 4　浅闭合空泡（$u_0=1.36$ m/s）

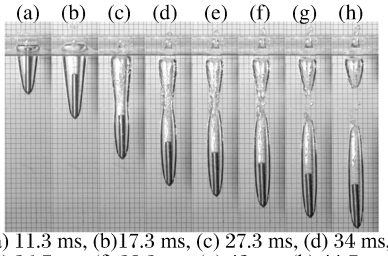
Fig. 4　Shallow seal impact cavity ($u_0=1.36$ m/s)



(a) 11.3 ms, (b)17.3 ms, (c) 27.3 ms, (d) 34 ms,
(e) 36.7 ms, (f) 39.3 ms, (g) 42 ms, (h) 44.7 ms.

图 5　深闭合空泡（$u_0=2.80$ m/s）

Fig. 5　Deep seal impact cavity ($u_0=2.80$ m/s)



(a) 11.3 ms, (b)17.3 ms, (c) 27.3 ms, (d) 34 ms,
(e) 36.7 ms, (f) 39.3 ms, (g) 42 ms, (h) 44.7 ms.

图 6　表面闭合空泡（$u_0=3.98$ m/s）

Fig. 6　Surface seal impact cavity ($u_0=3.98$ m/s)

如图 3 所示，弹丸入水速度为 0.44 m/s，空泡发生准静态闭合。弹头入水后因速度较低，对液体的冲击较小，未观察到明显的液面波动，弹头也未产生空泡；弹丸尾部没入水后，当弹尾与自由液面的距离小于弹径 D 时，受液体表面张力、惯性力、水压的影响，在两者之间会形成一个近似圆柱形的弹尾空泡，其直径与弹径相近，空泡上边界与自由液面相接，如图 3(a)～(b)所示；弹尾空泡随弹丸入水深度的增加逐渐拉长，当其中间部位的惯性力小于表面张力和水压的作用时空泡开始收缩，弹尾空泡逐渐收缩成倒沙漏状，近液面处也会形成一个较小的沙漏状空泡（图 3(c)～(d)），两个空泡最终会发生分离，弹尾空泡呈闭合状（图 3(f)）；此后近液面空泡逐渐缩小、上升并形成一股微弱的穿透液面的射流，射流消失后液面恢复平静，而弹尾空泡随弹体一起运动，其形状并未发生较大变化（图 3(g)～(h)）。

如图 4 所示，弹丸的入水速度为 1.36 m/s，空泡发生浅闭合。弹丸入水后在空泡壁面产生了表面张力波（capillary waves），液面上方产生了一层环状水幕（图 4(a)～(b)）；随着弹丸入水深度的增加，环状水幕逐渐降低到液面（图 4(c)～图 4(h)）；空泡在拉长过程中同样受到惯性力、表面张力、水压的共同作用，导致其中间部位逐渐收缩，当空泡收缩部的直径收缩到与弹径 D 相等时，空泡与弹丸接触而分裂成两部分，一部分包裹住弹丸前端形成弹头空泡，另一部分位于弹尾并与液面相连（图 4(e)），且受表面张力波的影响其壁面呈现非线性变化（图 4(e)～(f)），这与文献[3]观察到的实验现象一致；此后弹头空泡形状几乎保持不变，而尾部空泡与准静态闭合类似会发生分离而形成弹尾空泡和近液面空泡（图 4(e)～(h)），弹尾空泡跟随弹丸运动未发生较大变化，而近液面空泡在收缩上升过程会形成一股较强的细长射流，射流速度远大于弹丸速度。

如图 5 所示，弹丸的入水速度为 2.80 m/s，空泡发生深闭合。弹丸入水过程中，在液面上方同样产生了一层环状水幕，因弹丸入水速度较高，水幕高度和直径均有所增强，水幕在液面上方的时间也更为

持久;t=48.3 ms 时,空泡在弹体尾部不远处发生闭合(图 5(f)),并形成近液面空泡和包裹整个弹丸的空泡,近液面空泡在随后的运动中逐渐向液面收缩并形成一股强度极大的向上射流,其速度远大于弹丸速度。

图 6 所示弹丸的入水速度为 3.98 m/s。弹丸头部入水后,立即出现较为明显的喷溅,同时在液面上产生一层更为明显的环状水幕(图 6(a)),水幕在液面上方闭合呈圆拱形并迅速下降到液面上;封闭的空泡将弹丸包裹(图 6(b)~(c)),水幕闭合后,随着弹丸下降,形成了向上和向下的两股射流(图 6(c)~(h));因向下射流的影响,弹尾空泡壁面出现紊乱;此后空泡随弹丸运动并发生深闭合。深闭合后近液面空泡会向上收缩并与水幕闭合形成的射流相互耦合成一股强烈的向上射流,而弹尾空泡内存在一股较弱的向下射流,该射流速度大于弹丸速度,射流逐渐追赶上弹丸并对其施加作用使弹尾略微左倾,但空泡壁面并未受到较大影响;空泡深闭合前,先在液面上方发生闭合的方式为表面闭合。

由上述 4 种工况下空泡演化过程可知,准静态闭合下,弹丸冲击力较小未能使液面产生波动而形成水幕;浅闭合下虽然形成了水幕但冲击仍较小导致其在未闭合前就下降到液面上;深闭合下,水幕闭合发生在空泡深闭合之后,且未能产生向上的射流;表面闭合下,水幕闭合后会形成一股向上的射流,水幕状态变化最为快速。

4 种闭合方式下,近液面空泡收缩上升均会形成一股向上的射流,射流强度由强到弱依次为深闭合、表面闭合、浅闭合和准静态闭合,这主要由近液面空泡形成时体积及闭合点的水深决定:近液面空泡近似于拉伸后的弹簧,体积越大,相当于弹簧的劲度系数越大,拉伸相同距离时,弹簧的弹力越大,近液面空泡收缩上升时的动量越大,射流强度越高;闭合点水深越深,相当于弹簧拉伸得越长,弹簧的弹力越大,近液面空泡收缩上升时的动量越大,射流强度也越高。

2.2 入水速度对空泡特性的影响

由以上不同速度下空泡变化过程知,只有当 u_0 大于某临界值时,才会产生附着弹丸头部的空泡。为获取该临界值,针对 90°锥头弹丸,分别进行速度为 0.71~1.5 m/s 的入水冲击实验,观测各入水速度情况下弹头空泡稳定时的长度 L_i(简称弹头空泡长度),并通过傅里叶变换拟合 L_i 随 u_0 的变化曲线,结果如图 7 所示。

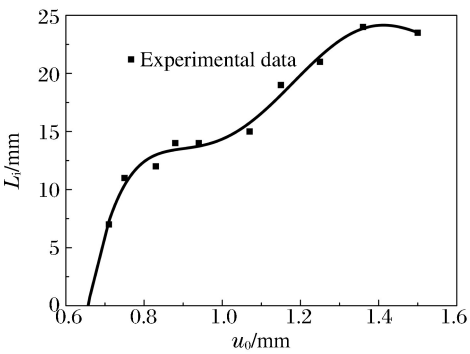


图 7 弹头空泡长度随入水速度 u_0 的变化

Fig. 7 Change of the cavity length of warhead with the initial velocity (u_0)

从图 7 可以看出,曲线与 x 轴相交于 0.657 m/s,即当 u_0=0.657 m/s 时,弹头处开始产生空泡。为验证拟合得到的临界值的正确性,进行了 u_0 = 0.44, 0.63, 0.68, 0.71, 0.75, 0.79, 0.88 m/s 的入水冲击实验,弹头空泡形态如图 8 所示。u_0=0.44, 0.63 m/s 时,弹丸头部未产生空泡(图 8(a)~(b));u_0=0.68 m/s 时,弹头产生了一个微小的空泡(如图 8(c)中箭头所示);u_0=0.71 m/s 时,弹头产生了一块片状的空泡,但并未形成包裹整个弹头周长的环状空泡(图 8(d));随着 u_0 的继续增加,在弹丸头部逐渐产生了沿周向包裹整个弹头的环状空泡,并且弹头空泡长度随着 u_0 的增大而加长(图 8(e)~(h))。

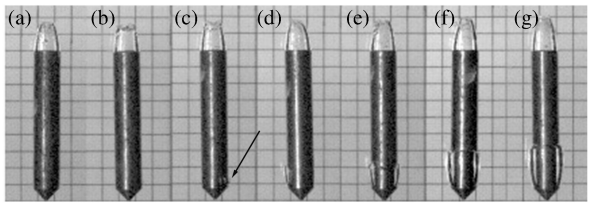


图 8 不同入水速度(u_0)情况下弹头空泡

Fig. 8 Cavities of warhead at different initial velocities (u_0)

为得到空泡闭合时间和闭合点水深随 u_0 的变化,对初速为 0~4.71 m/s 下,弹丸的垂直入水过程进行研究,图 9 为闭合时间(t_p)、闭合点水深(H_p)随 u_0 的变化趋势曲线。由图 9 可以看出,在不同的速度区间段空泡依次呈现准静态闭合、浅闭合、深闭合

和表面闭合。当弹丸入水空泡发生准静态闭合时，t_p 随 u_0 的增加线性下降，而 H_p 保持在水下 8 mm 左右；当入水空泡发生浅闭合时，t_p、H_p 随 u_0 的变化呈二次函数变化，t_p 随 u_0 增加而降低，下降到最低点 47.7 ms 后 t_p 保持在 48.7 ms 左右并逐渐过渡到深闭合，H_p 随 u_0 的增加而升高；当入水空泡发生深闭合时，t_p 不随 u_0 的变化而变化，保持在 48 ms 左右，并平稳过渡到表面闭合，H_p 总体随 u_0 的增加而增加，在接近表面闭合阶段略有下降，H_p 最高点为 65 mm；在空泡发生表面闭合阶段，t_p 随 u_0 的增加呈二次函数递减，因表面闭合发生位置是液面处，所以 H_p 均为 0。

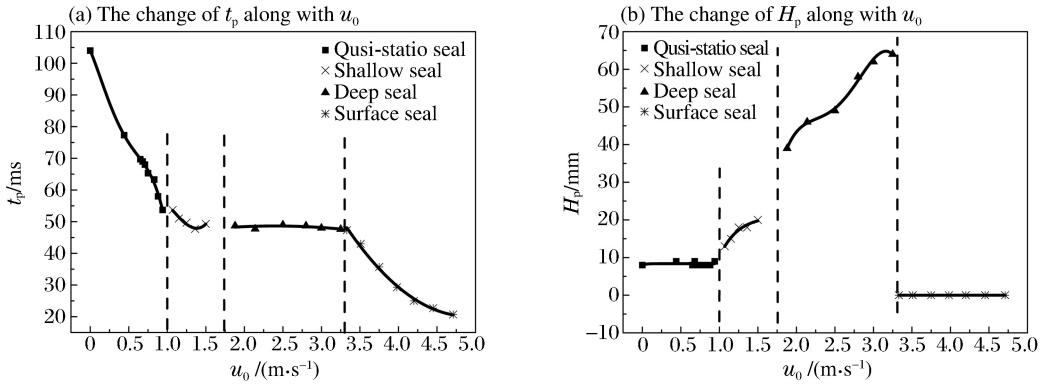


图 9 空泡闭合时间（t_p）和闭合点水深（H_p）随入水速度（u_0）的变化

Fig. 9 Change of cavity closing time (t_p) and closing depth (H_p) with initial velocity (u_0)

图 10 是弹丸入水后空泡发生深闭合时闭合点水深 H_p、空泡总长度 L_a 随及其比值随 u_0 变化的曲线。由图 10 可知，本实验中 H_p 和 L_a 的比值在 0.39～0.48 之间，与文献[12]的研究结果一致，这进一步验证了本文实验方法的正确性。

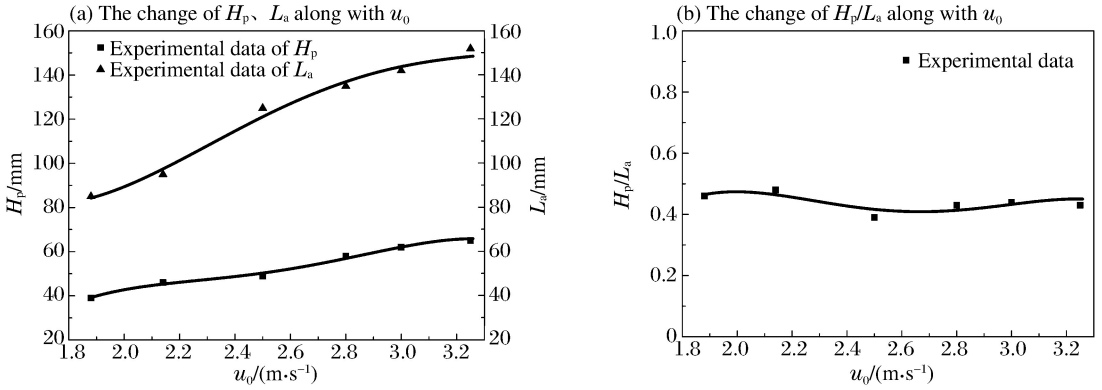


图 10 空泡闭合点水深（H_p）、空泡总长度（L_a）和两者之比（H_p/L_a）随入水速度 u_0 的变化

Fig. 10 Change of cavity closing depth (H_p), cavity length (L_a) and their ratio (H_p/L_a) with initial velocity (u_0)

2.3　不同水深位置空泡直径的变化规律

针对弹丸在 $u_0=2.8$ m/s 时的入水过程，研究不同水深位置空泡直径的扩张收缩规律。图 11 为水深 H_f 分别为 3.5、20、40、59 mm（空泡闭合位置）处空泡直径 D_c 随时间的变化，并通过傅里叶变换拟合对应位置的 D_c 随时间 t 的变化曲线。通过求导可得到不同水深位置的空泡直径变化速度曲线，如图 12 所示。可以看出，空泡直径的变化呈现高度的非线性，并且空泡最大直径随水深的增加而减小。随着水深的加大，扩张段逐渐缩短，收缩段逐渐延长。

表 1 为不同水深位置处空泡相关参数，其中：t_r 为弹丸弹肩（锥形部与圆柱部结合处）运动到某水深位置时的时刻，t_m 为空泡直径扩张到最大时的时刻，t_a 为位置空泡消失的时刻，T_e 为空泡扩张阶段所用的时间，T_s 为空泡收缩阶段所用的时间，D_m 为空泡的最大直径。

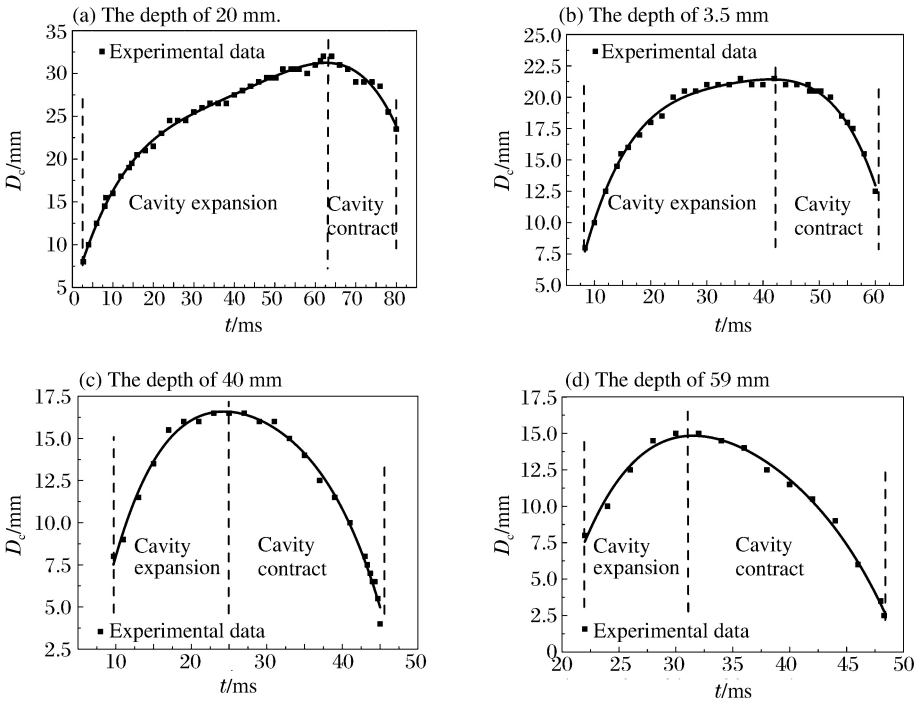


图 11 不同水深(H_f)处空泡直径(D_c)变化

Fig. 11 Change of cavity diameter (D_c) at different depths (H_f)

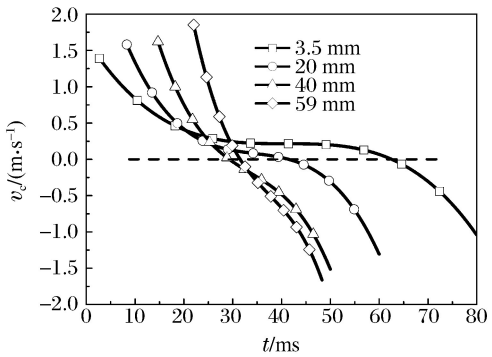


图 12 不同水深位置空泡径向速度

Fig. 12 Radial velocity of cavities at different underwater depths

表 1 不同水深位置空泡特性参数

Table 1 Characteristic parameters of cavity at different underwater depths

H_f/mm	t_r/ms	t_m/ms	t_a/ms	T_e/ms	T_s/ms	D_m/mm
3.5	2.7	63.0	82.0	60.3	19.0	32.0
20	8.3	42.0	61.3	33.7	19.3	21.5
40	14.7	28.0	50.3	13.3	22.3	16.5
59	22.0	31.5	48.7	9.5	17.2	15.0

t_r 时刻弹丸弹肩运动到该水深位置,与弹肩相接触的流体质点受弹丸的挤压获得一定的动能,产生沿弹丸径向的分速度,流体质点沿弹丸径向向外运动,与弹肩分离,诱导产生向弹尾延伸扩张的空泡;由于空泡内部和周围水域存在压差,流体质点的速度逐渐衰减,到 t_m 时刻,速度衰减到 0,空泡直径扩张到最大 D_m;此后,在压差继续作用下,流体质点反向加速获得指向空泡内部的速度,空泡开始收缩,并在 t_a 时刻空泡溃灭。

由图 12 知,水深越大空泡扩张的初速越高,但相差不大。由于空泡扩张的初速取决于弹肩到达该处传递给流体质点的动能,这说明了在弹丸运动到空泡闭合点之前,弹丸速度逐渐增大,弹丸的重力作用要大于空泡的阻力,进一步说明了空泡有利于弹丸水中减阻。

图 13 为不同水深位置空泡径向加速度的对比曲线。空泡扩张收缩的加速度主要取决于周围水域和空泡内部的压差,由于水深越深水压越大,造成周围水域和空泡内部的压差增大,故在同一时刻,越深位置处空泡的加速度越大;另外,同一水深位置的空泡直径加速度先增加再减小,由此可知周围水域和空泡内部的压差先减小后增大。

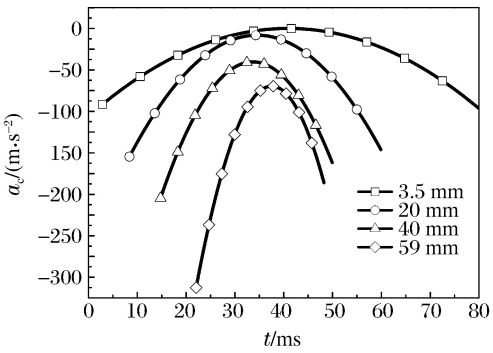


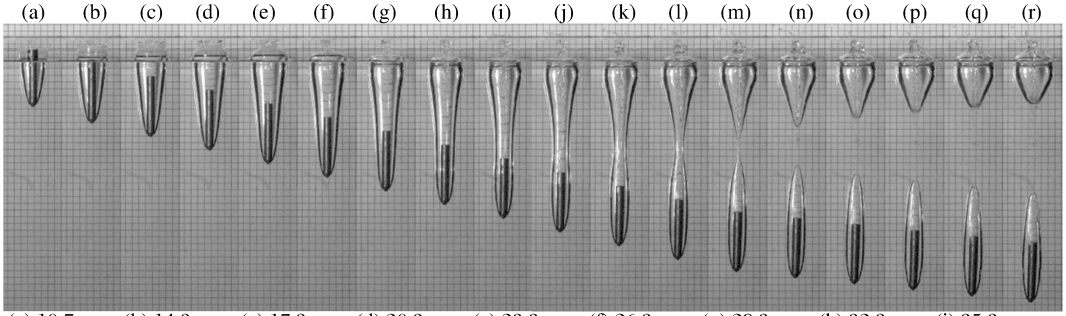
图 13 不同水深位置空泡径向加速度曲线

Fig. 13 Radial acceleration of cavities at different underwater depths

2.4 空泡闭合产生的射流现象分析

根据 2.1 节的讨论可知，在一定的入水速度条件下，水幕闭合时会产生向上与向下的 2 股射流；空泡闭合后近液面空泡的收缩上升也会形成一股向上射流并与水幕闭合产生的射流相互耦合，包裹弹丸空泡的尾部也存在一个强度与入水速度大小有关的向下射流。为讨论射流的形成过程、演变耦合机理及其对弹丸运动的影响，本文研究了在 $u_0=3.33$，4.20 m/s 条件下弹丸入水过程中空泡形态的演变过程，得到弹丸入水后不同时刻的空泡形态分别如图 14 和 15 所示。

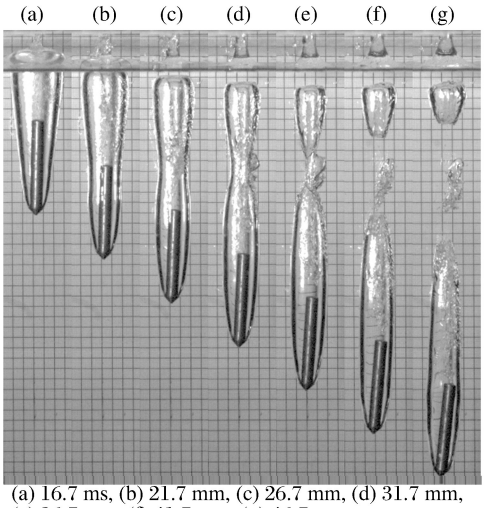
随着弹丸入水深度的增加，空泡逐渐扩张，并在液面上产生一层环状水幕，水幕直径随空泡扩张逐渐变大，水幕先是向上运动，边缘处水花向外运动，此后在重力的作用下，水幕在入水点上方逐渐收缩并汇聚到一点，形成一个拱形圆顶，如图 14 中 26.3 ms 时刻。水幕闭合后，在闭合点处分别形成了向上和向下的射流，向下射流的速度大于弹丸，但因速度较小和距离较大，未能追上弹丸，如图 14 中 29.3～47 ms 时间段内所示。在重力的作用下水幕高度逐渐降低，并在 38.3 ms 时刻达到最低点。空泡在弹丸向下运动过程中逐渐拉长，并在中间收缩，最终在 47.0 ms 时刻发生深闭合，此时，空泡分为包裹整个弹丸和近液面两部分。随着弹丸的运动，近液面空泡逐渐向液面收缩，直径逐渐变大，收缩速度也逐渐增高，水幕逐渐升高，并产生了向上的射流，该射流和水幕闭合时所产生的向下射流相冲撞和叠加，形成一股较强的向上射流。图 14 所示的空泡演变过程中，液面上方水幕依次发生了扩张、闭合、收缩、膨胀。



(a) 10.7 mm, (b) 14.3 mm, (c) 17.3 mm, (d) 20.3 mm, (e) 23.3 mm, (f) 26.3 mm, (g) 29.3 mm, (h) 32.3 mm, (i) 35.3 mm, (j) 38.3 mm, (k) 41.3 mm, (l) 44.3 mm, (m) 47 mm, (n) 48.3 mm, (o) 49.3mm, (p) 51 mm, (q) 52.3 mm (r) 53.7 mm

图 14 空泡形态、水幕和射流图（$u_0=3.33$ m/s）

Fig. 14 Cavity, water curtain and jet ($u_0=3.33$ m/s)



(a) 16.7 ms, (b) 21.7 mm, (c) 26.7 mm, (d) 31.7 mm, (e) 36.7 mm, (f) 41.7 mm, (g) 46.7 ms.

图 15 射流对弹丸及空泡的影响（$u_0=4.20$ m/s）

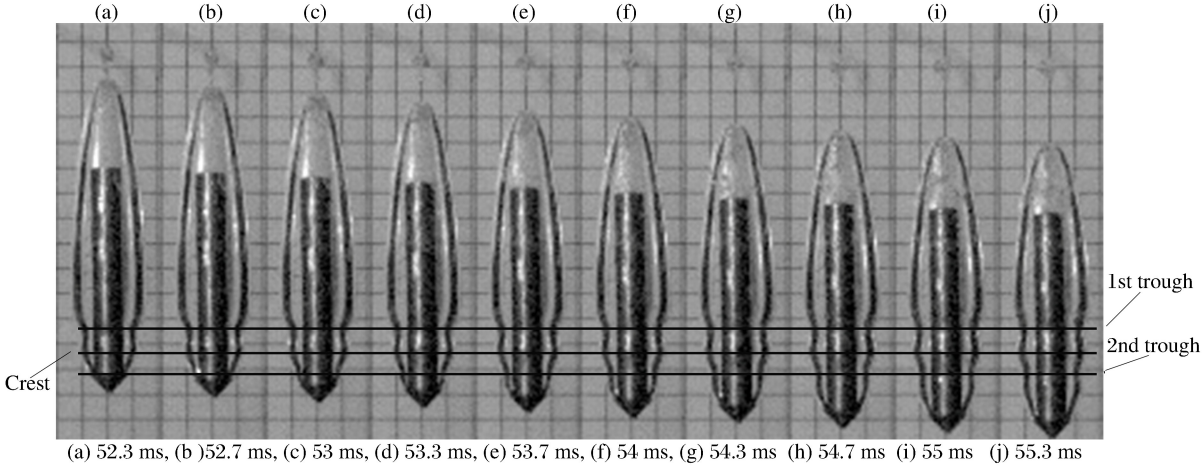
Fig. 15 Effect of jets on projectile and cavity ($u_0=4.20$ m/s)

图 15(a)中空泡在液面发生表面闭合后同样产生了向上与向下的 2 股射流，射流强度与速度均比图 14 要大得多；由于向下射流的运动速度与图 14 相

比远大于弹丸速度,射流在图 15(b)时刻追上弹丸并与弹丸尾部发生碰撞产生飞向四周的飞溅,飞溅作用于空泡壁面,导致其产生紊乱,使得包裹弹丸的空泡呈现非对称性。弹丸在非对称空泡和非对称射流作用下出现倾斜(图 15(c)～(d))。在射流的作用下空泡闭合状态也呈现出不稳定性(图 15(e))。空泡深闭合后,由于入水速度较图 14 大,位于弹尾部的射流速度较大,仍对弹丸尾部产生作用,使其更为倾斜(图 15(e)～(g))。因此在弹丸一定入水条件下产生的射流会影响其运动特性及空泡形态的稳定性。

2.5 深闭合空泡的壁面波动机理

在 90°锥头弹丸低速入水实验过程中,空泡深闭合后,空泡壁面产生了波动现象。为研究其波动机理,以静止的自由液面为横轴建立惯性坐标系,弹丸以 2.8 m/s 的速度入水后 10 个典型时刻的空泡壁面波动情况如图 16 所示。由图 16 可以看出,同一条横线上(同一水深处),空泡壁面均为波峰或者波谷,这说明波动在深度方向上不会进行传播,波动为横波。根据空泡截面独立扩张原理,不同水深位置空泡相互影响很小,任意水深位置的空泡截面独立扩张,扩张程度与弹丸经过此位置时水的流动状态有关,所以空泡的壁面波动现象是不同截面空泡扩张程度不同的体现。

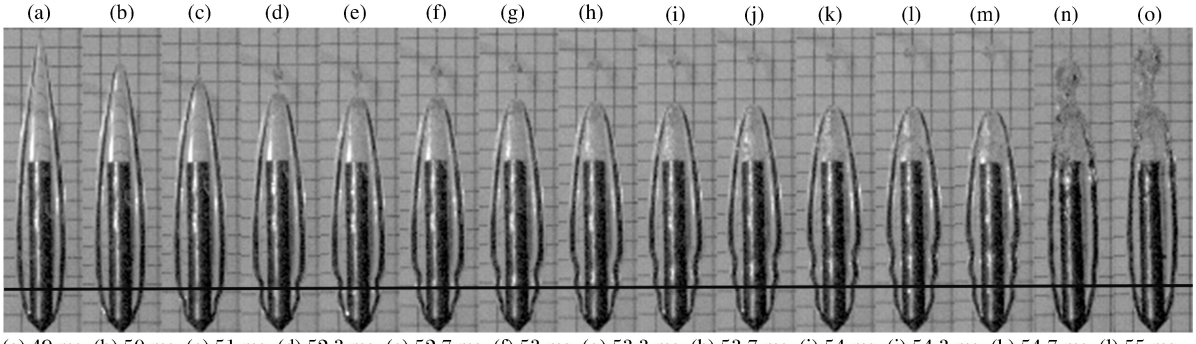


(a) 52.3 ms, (b)52.7 ms, (c) 53 ms, (d) 53.3 ms, (e) 53.7 ms, (f) 54 ms, (g) 54.3 ms (h) 54.7 ms (i) 55 ms (j) 55.3 ms

图 16 惯性参考系中空泡的壁面波动(u_0=2.80 m/s)

Fig. 16 Fluctuation of the cavity wall in static coordinate(u_0=2.80 m/s)

以弹体底部中心点建立参考系,图 17 给出了不同时刻距弹头 1.5D 处空泡的壁面波动规律,可以看出空泡壁面由波谷到波峰,再由波峰到波谷进行周期变化。图 16(d)～(k)中刚好经过一个周期的波动,时间周期为 2.4 ms,波动在纵向方向上相对弹丸向上传播,进一步证实了波动为横波。随着弹丸入水深度的增加,空泡波动在纵向逐渐收缩,其长度逐渐变短,直至在图 17(m)时刻才基本保持稳定。



(a) 49 ms, (b) 50 ms, (c) 51 ms, (d) 52.3 ms, (e) 52.7 ms, (f) 53 ms, (g) 53.3 ms, (h) 53.7 ms, (i) 54 ms, (j) 54.3 ms, (k) 54.7 ms, (l) 55 ms, (m) 55.3 ms, (n) 73.7 ms, (o) 75.3ms

图 17 弹体坐标系中空泡的壁面波动(u_0=2.80 m/s)

Fig. 17 Fluctuation of the cavity wall in the body coordinate (u_0=2.80 m/s)

图 18 为空泡壁面波动阶段弹丸速度随时间的变化曲线。弹丸弹肩在 49.78 ms 时刻运动到第一个波谷所处深度，并在 52.16 ms 时刻到达第二个波谷所处深度，两个波谷之间的时间间隔约为2.4 ms，与图 17(d)与图 17(k)之间的时间间隔基本一致，图中弹丸速度的振幅呈现波动变化，这很好地解释了空泡壁面的波动现象。根据空泡截面独立扩张原理，不同空泡截面的扩张规律主要与弹肩经过该空泡截面时传递给空泡截面流体质点的动能有关，所以空泡的壁面波动现象主要由空泡壁面连续流体质点速度的波动变化引起。空泡深闭合时，会产生向上与向下的两股射流，并导致空泡长度缩短，同时向下射流会与弹尾碰撞并产生反射，使弹丸受力发生变化，导致弹丸速度波动，弹丸速度的波动进一步引起流体质点速度的波动，从而引起空泡壁面波动。

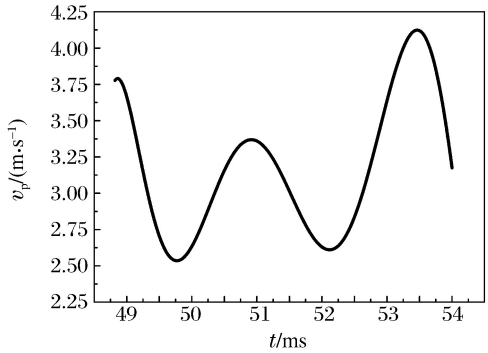


图 18 空泡波动阶段弹丸速度随时间的变化

Fig. 18 Change of projectile velocity with time at the stage of cavity fluctuation

通过观察不同速度下弹丸的运动过程，发现只有当空泡发生深闭合之后，空泡壁面才会产生波动现象，且随着弹丸的运动，当空泡长度不再变化时，波动现象逐渐消失，如图 19 所示。对比不同入水速度产生空泡的壁面波动现象，发现波动持续时间取决于空泡闭合后的长度收缩时间，收缩持续时间越长，则空泡壁面产生波动时间越长。

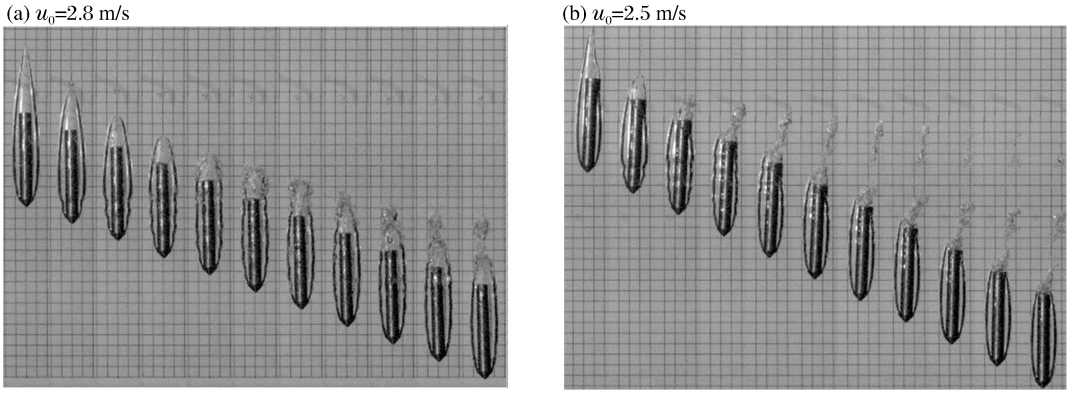


图 19 两种速度情况下的空泡波动图

Fig. 19 Fluctuation of the cavity at two initial projectile velocities

3 结　论

对 90°锥头弹丸进行不同入水速度的垂直入水实验研究，得到以下结论：

(1)随着入水速度的增加，弹丸入水空泡分别发生准静态闭合、浅闭合、深闭合和表面闭合，每种闭合方式均对应着一个速度区间；

(2)通过研究入水速度与弹头空泡长度的关系，得到弹头产生空泡的临界速度约为 0.657 m/s；空泡闭合时间和闭合点水深随入水速度的变化在不同的闭合方式区间内呈现出不同的变化趋势；空泡深闭合时，闭合点水深为空泡总长度的 1/3～1/2；

(3)随着水深的增加空泡扩张初速增大，空泡最大直径减小，扩张段缩短，收缩段延长；同一时刻水深越大空泡扩张收缩的加速度也越高；

(4)在一定的入水速度条件下，弹丸入水引起的水幕闭合后，会在闭合点处分别形成了向上和向下的射流，向下的射流速度较大时会对弹丸的运动产生影响；空泡随着弹丸的运动逐渐拉长收缩分裂为包裹弹丸和近液面两部分，近液面空泡收缩形成的向上射流与水幕闭合形成的射流相互作用形成一股更

强向上射流;

(5)弹丸入水空泡深闭合后,在弹丸带空泡运动阶段空泡壁面会发生波动现象,主要原因为空泡长度收缩会引起弹丸受力以及速度的波动,弹丸速度的变化进而引起流体质点速度的波动,当空泡长度不再收缩时空泡壁面也不再波动;空泡壁面波动遵循空泡截面独立扩张原理。

参考文献:

[1] YAN H M, LIU Y M, KOMINIARCZUK J, et al. Cavity dynamics in water entry at low Froude numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009,641:441-461. DOI: 10.1017/S0022112009991558.

[2] ARISTOFF J M, TRUSCOTT T T, TECHET A H, et al. The water entry of decelerating spheres[J]. Physics of Fluids, 2010,22(3):032102(1)-032102(8). DOI: 10.1063/1.3309454.

[3] ARISTOFF J M, BUSH J W M. Water entry of small hydrophobic spheres[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 619:45-78. DOI: 10.1017/S0022112008004382.

[4] 马庆鹏,何春涛,王聪,等.球体垂直入水空泡实验研究[J].爆炸与冲击,2014,34(2):174-180. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)02-0174-07.
MA Qingpeng, HE Chuntao, WANG Cong, et al. Experimental investigation on vertical water-entry cavity of sphere[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(2):174-180. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)02-0174-07.

[5] BERGMANN R, MEER D V D, GEKLE S, et al. Controlled impact of disk on a water surface: cavity dynamics [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009,633:1-34. DOI: 10.1017/S0022112009006983.

[6] 蒋运华,徐胜利,周杰.圆盘空化器航行体入水空泡实验研究[J].工程力学,2017,34(3):241-246. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.09.0726.
JIANG Yunhua, XU Shengli, ZHOU Jie. Water entry experiment of a cylindrical vehicle with disc cavitator[J]. Engineering Mechanics, 2017,34(3):241-246. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.09.0726.

[7] YAO E R, WANG H R, PAN L, et al. Vertical water-entry of bullet-shaped projectiles[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2014,2:323-334. DOI: 10.4236/jamp.2014.26039.

[8] 杨衡,张阿漫,龚小超,等.不同头型弹体低速入水空泡试验研究[J].哈尔滨工程大学学报,2014,35(9):1060-1067. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.201304035.
YANG Heng, ZHANG Aman, GONG Xiaochao, et al. Experimental study of the cavity of low speed water entry of different head shape projectiles[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014,35(9):1060-1067. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.201304035.

[9] 何春涛,王聪,魏英杰,等.圆柱体垂直入水空泡形态试验[J].北京航空航天大学学报,2012,38(11):1542-1546.
HE Chuntao, WANG Cong, WEI Yingjie, et al. Vertical water entry cavity of cylinder body[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012,38(11):1542-1546.

[10] 何春涛,王聪,何乾坤,等.圆柱体低速入水空泡试验研究[J].物理学报,2012,61(13):281-289. DOI: 10.7498/aps.61.134701.
HE Chuntao, WANG Cong, HE Quankun, et al. Low speed water-entry of cylindrical projectile[J]. Acta Physica Sinica,2012,61(13):281-289. DOI: 10.7498/aps.61.134701.

[11] 施红辉,胡青青,陈波,等.钝体倾斜和垂直冲击入水时引起的超空泡流动特性实验研究[J].爆炸与冲击,2015,35(5):617-624. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0617-08.
SHI Honghui, HU Qingqing, CHEN Bo, et al. Experimental study of supercavitating flows induced by oblique and vertical water entry of blunt bodies[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(5):617-624. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0617-08.

[12] TRUSCOTT T T, EPPS B P, BELDEN J. Water entry of projectiles[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2013,46:355-378. DOI: 10.1146/annurev-fluid-011212-140753.

[13] 王永虎,石秀华.入水冲击问题研究的现状与进展[J].爆炸与冲击,2008,28(3):276-282. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)03-0276-07.
WANG Yonghu, SHI Xiuhua. Review on research and development of water-entry impact problem[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(3):276-282. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)03-0276-07.

Experimental study of cavity characteristic induced by vertical water entry impact of a projectile with a 90° cone-shaped head at different velocities

HUANG Zhengui[1], WANG Ruiqi[1,2], CHEN Zhihua[1], HOU Yu[1], LUO Yuchuan[1]

(1. *National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*)

Abstract: Experimental studies of the vertical water entry of projectile with 90° cone-shaped head were conducted by using high speed camera. The pinch-off types and evolutionary process of the cavity were comprehensively discussed at different water entry impact velocities. The variations of cavitation closure time, water depth at the closure point and length of the warhead cavitation with water entry velocities, as well as the cavitation diameter at different water depth positions were analyzed. The jet phenomenon caused by the closure of the water curtain and contraction-rising process of the cavity near undisturbed free surface were studied, as well as the coupled effect between them. The cavity wall fluctuation occurring after the deep seal was discussed. The results show that with the increase of water entry velocity, the quasi-static closure, shallow closure, deep closure and surface closure of the cavitation occurs respectively, and each closure mode corresponds to a velocity range; the critical water entry velocity of forming cavitation is 0.657 m/s. The diameter of the cavitation presents a nonlinear increase along with the water depth. The initial cavity expansion velocity increases, the maximum diameter of the cavity decreases, the expansion section shortens, the contraction section lengthens, and the acceleration of the expansion and contraction of the cavity increases along with the increase of the water depth at the same time. When the water curtain closes, there will be upward and downward jets, and when the downward jet velocity is relatively large, the projectile motion will be affected. The strength of a water jet induced by longitudinal upward contraction of the cavity near free surface is proportional to the volume of cavity and pinch-off depth. A large strength upward water jet is induced by the coupling of the above all water jet. The longitudinal contraction of the cavity around the projectile and the impact effect of downward jet on projectile would cause the force change of the projectile after deep seal. The fluctuation of the projectile's velocity because of its force change brings the velocity change of fluid and then leads to the fluctuation of the cavity wall. The fluctuation of cavity wall follows the principle of independent expansion of cavitation section.

Keywords: vertical water entry impact; the types of cavity pinch-off; fluctuation of cavity wall; water jet; critical water entry velocity

（责任编辑　王小飞）