

不同头型弹丸低速垂直入水实验研究

王瑞琦, 黄振贵, 郭则庆, 陈志华, 高建国, 侯宇

(南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094)

摘要:用高速摄像机记录了平头、90°锥头、圆头、截锥体头弹丸入水过程中空泡的演变过程,比较分析了4种弹丸的入水空泡形态和空泡的闭合方式。结果表明,在垂直入水速度为2.8 m/s时,90°锥头、圆头、截锥体头弹丸入水后空泡均发生深闭合,其中90°锥头弹丸入水空泡最大,截锥体头型弹丸次之,圆头弹丸入水空泡最小,而平头弹丸入水后空泡发生了类面闭合;随着弹丸入水速度的增加,空泡分别发生准静态闭合、浅闭合、深闭合、表面闭合和类面闭合;在闭合点位置以上,空泡最大直径随水深的增加逐渐变小,而在闭合点位置以下,不同水深位置空泡最大直径保持在14.5 mm左右。

关键词:不同头型弹丸;垂直入水;空泡闭合方式;空泡最大直径

本文引用格式:王瑞琦,黄振贵,郭则庆,等.不同头型弹丸低速垂直入水实验研究[J].兵器装备工程学报,2017(11):45-50.

Citation format:WANG Ruiqi, HUANG Zhengui, GUO Zeqing, et al. Experimental Study of Low Speed Vertical Water Entry with Different Head Shape Projectiles[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(11):45-50.

中图分类号: O359+.1; TJ011.+2

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2017)11-0045-06

Experimental Study of Low Speed Vertical Water Entry with Different Head Shape Projectiles

WANG Ruiqi, HUANG Zhengui, GUO Zeqing,
CHEN Zhihua, GAO Jianguo, HOU Yu

(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Experimental studies of the vertical water entry with flat head, 90° cone-shaped head, elliptical head and cut-cone head projectiles were conducted in high-speed camera to capture the cavity-running phase. The cavity shapes of four projectiles and the cavity pinch-off types were analyzed. Experiment results show that when the water entry speed is 2.8 m/s, the 90° cone-shaped head, elliptical head and cut-cone head projectiles enter into the water, the deep seal phenomenon occurs, but the liken-surface seal occurs when the flat head projectile enters the water. With the increase of water entry velocity, quasi-static seal, shallow seal, deep seal, surface seal and liken-surface seal are observed. At the position above the pinch-off point, the maximum diameter of the cavity at each depth gradually decrease with depth, but the maximum diameter of the cavity at each depth is about 14.5 mm below the pinch-off point.

Key words: the projectiles of different head types; vertical water entry; the types of cavity pinch-off; the maximum diameter of the cavity

收稿日期: 2017-07-05; **修回日期:** 2017-08-05

基金项目: 国防预先研究基金项目(61426040303162604004); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(30917012101)

作者简介: 王瑞琦(1992—),男,硕士,主要从事水中弹道研究;黄振贵(1986—),男,博士,讲师,主要从事水中弹道研究。

物体以一定速度入水时会在水下形成一个入水空泡,空泡的形成、发展等对物体入水瞬间的运动特性、流体动力特性等方面具有重大影响,建立精准的空泡模型对于空投鱼雷、入水导弹、超空泡弹丸等的设计是非常必要的。

针对物体入水冲击问题,国内外学者从不同的角度进行了研究。文献[1]较为全面的概括了关于入水问题国外学者所进行的实验、理论与数值分析。文献[2~6]分别对球体入水过程进行了研究,Aristoff^[2-3]描述了球体动力学过程以及球体速度衰减对空泡形态的影响;Wei^[4]实验研究了球体入水速度变化情况,给出了预测球体入水速度的数学公式;马庆鹏^[5]通过实验研究,分析了表面沾湿情况对球体入水空泡的影响;叶阳辉^[6]对小韦伯数下小球入水的几种不同空泡类型进行了数值模拟。文献[7~12]针对轴对称弹丸的入水问题进行了相关研究,Yao^[7]基于 Rayleigh-Besant 问题发展了一个描述空泡形状演变过程的理论模型,与实验结果进行了对比;杨衡^[8]对圆头、90°~150°锥头弹丸低速入水进行了实验研究,分析了头部形状、入水速度、入水角度对弹丸入水空泡的影响;何春涛^[9-10]进行了圆柱体低速入水空泡形态研究,研究了多弹丸串列和并列情况下入水空泡的演变过程,分析了并列情况下空泡之间的相互影响和串列情况下多弹丸对空泡的影响;蒋运华^[11]开展了运动体约束与无约束情况下的入水空泡流动特性试验研究;路中磊^[12]对开放腔体结构以开口端撞击入水过程进行了实验研究与数值模拟,对空泡和空泡波动的形成机理进行了分析。

本文对不同头型弹丸低速垂直入水问题进行实验研究,采用高速摄像机对不同头型弹丸入水空泡进行实时拍摄。基于实验结果,分析了弹丸头型对入水空泡的大小、闭合方式等的影响以及四种头型弹丸速度的变化规律;分析了弹丸入水后空泡的闭合方式随入水速度的变化规律,最后分析了不同水深处空泡直径的变化规律和空泡最大直径随水深的变化。

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,底部防护层等。

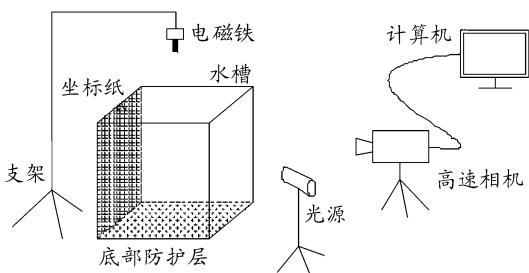


图1 实验装置示意图

水槽尺寸为500 mm×250 mm×250 mm,底部设置防护层,拍摄背景为每小格尺寸为5 mm的坐标纸。实验中电脑与 Phantom 高速摄像机连接,控制拍摄与弹丸下落同步,弹

丸垂直下落用电磁铁控制,采用1 000 W的平行光源照明,高速摄像机的拍摄速度为3 000 帧/s。实验用水采用自来水,弹丸材料为普通碳素钢,密度为7.85 g/cm³,直径8 mm、长度44 mm,头部分别为平头、90°锥头、圆头、截锥体头,如图2。

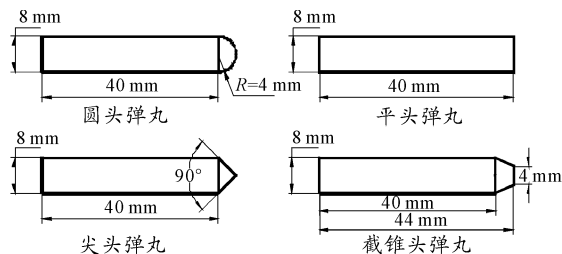


图2 四种头型弹丸尺寸

2 实验结果分析

开展了平头、90°锥头、圆头、截锥体头弹丸低速垂直入水实验。将弹丸运动过程分为自由下落阶段、入水流动形成阶段、开空泡阶段、空泡闭合阶段和弹丸带空泡运动阶段。自由下落阶段从弹丸自由下落开始到弹丸弹尖接触水面为止。入水流动形成阶段为弹丸弹尖接触水面到弹丸头部完全进入水中。对于平头弹丸,入水流动阶段在平头弹丸撞击水面瞬间完成。开空泡阶段从弹丸头部完全入水开始,空泡逐渐扩张,一直到空泡某个位置开始收缩。空泡闭合阶段为空泡开始收缩到空泡闭合缩断。弹丸带空泡运动阶段是空泡闭合缩断后弹丸带空泡继续向下运动。本文以弹丸头部接触水面时刻作为 $t=0$ 的初始时刻。

2.1 不同头型弹丸入水实验结果

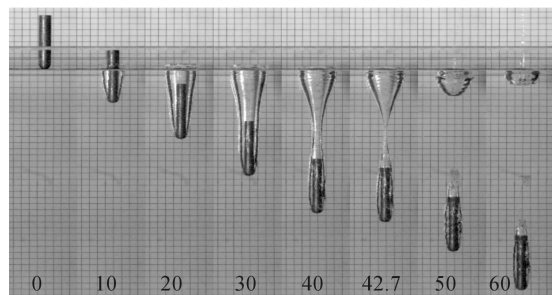
对四种不同头型弹丸进行低速垂直入水实验,入水速度 $u_0=2.8$ m/s,分别选取8个时刻的空泡形态如图3所示。

由图3(a)、(b)、(c)知,圆头弹丸、截锥体头弹丸、90°锥头弹丸以2.8 m/s速度入水过程中发生了深闭合现象,都分别经历了入水流动形成阶段、开空泡阶段、空泡闭合阶段和弹丸带空泡运动阶段。

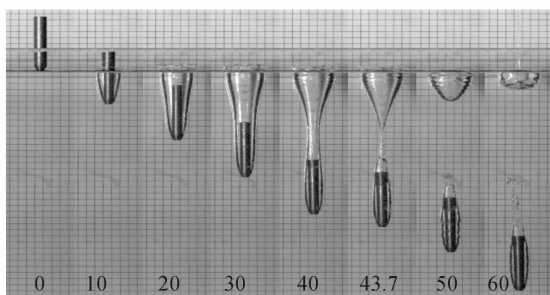
图3(a)、(b)、(c)中0~20 ms为各头型弹丸开空泡阶段,此阶段在水面上方形成一层透明的环状水幕。圆头弹丸形成的水幕较低、空泡壁面较不稳定,所形成空泡最小,截锥体头弹丸次之,90°锥头弹丸水幕最高、空泡壁面也最稳定。圆头弹丸形成的空泡壁面不稳定是因为空泡受到表面张力的影响,在空泡壁面产生表面张力波,这在40~50 ms阶段最为明显。空泡闭合阶段从30 ms开始,分别在42.7 ms、43.7 ms、48.3 ms时刻圆头弹丸、截锥体头弹丸、90°锥头弹丸空泡发生闭合。空泡发生闭合时先产生一段细长的空泡,在细长空泡的某个点先断开,然后再闭合。50 ms和60 ms时刻为弹丸带空泡运动阶段,这一阶段最明显的现象是空泡闭合后,空泡被分为近液面空泡和弹丸周围空泡两部分。圆头、截锥体头弹丸的弹丸周围空泡只包裹部分弹丸,在弹丸

尾部产生部分尾部空泡,而 90° 锥头弹丸周围空泡包裹整个弹丸,随着弹丸入水深度的增加,近液面空泡逐渐向液面收

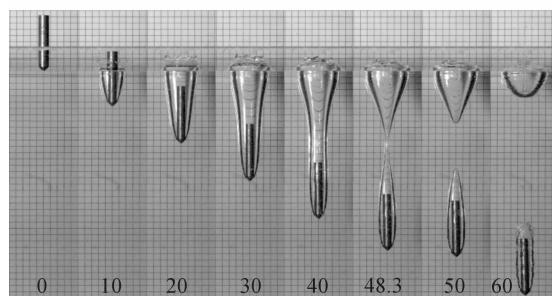
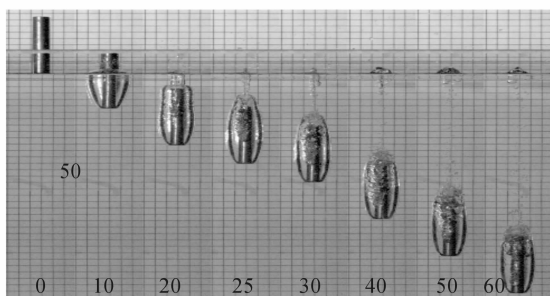
缩,形成一股指向液面的射流。弹丸周围空泡产生波动甚至脱落的现象。



(a) 圆头



(b) 截锥体头

(c) 90° 锥头

(d) 平头

图3 不同头型弹丸空泡图

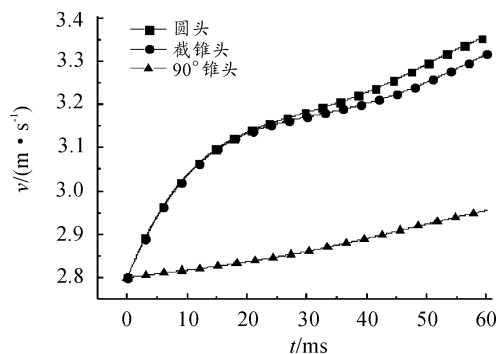
表1表示了圆头弹丸、截锥体头弹丸、 90° 锥头弹丸空泡的闭合时间 T 、闭合点距液面距离 L 和闭合时近液面空泡最大直径 D 。在入水速度相同的情况下, 90° 锥头弹丸的闭合时间 T 、闭合点距液面距离 L 和闭合时近液面空泡最大直径 D 均要大于圆头弹丸和截锥体头弹丸,即弹丸入水后 90° 锥头弹丸形成的空泡最大,截锥体头弹丸形成的空泡次之,圆头弹丸形成的空泡最小。

图4为圆头、截锥体头和 90° 锥头弹丸速度曲线,在整个入水过程中3种弹丸的速度是逐渐增加的。同一时刻,圆头弹丸速度最大,截锥头弹丸次之, 90° 锥头弹丸最小。从能量角度分析,由于弹丸之间质量差很小($\Delta m < 0.8$ g),在入水之前可认为其机械能是相等的,忽略水域与弹丸之间内能的变化。整个入水过程中,弹丸的重力势能转化为其动能和周围水域流体质点的动能,流体质点产生沿弹丸径向的分速度并向外扩张产生空泡。弹丸传递给周围流体质点的动能越大,弹丸形成的空泡也越大。流体质点所获动能的大小与弹丸入水过程中的参考面积成正比。这里的“参考面积”指流体质点从弹丸表面分离位置处弹丸的横截面积。在深闭合情况下,以 90° 锥头弹丸为例,流体质点在弹丸弹肩处与弹丸分离产生空泡,故其参考面积为弹肩处横截面积 $S_1 = \pi R^2$ 。截锥头弹丸参考面积为其前端面面积 $S_2 = 0.25\pi R^2$,实验中得到圆头弹丸的参考面积 $S_3 \approx 0.14\pi R^2$ 。三种弹丸的参考面积关系为 $S_3 < S_2 < S_1$ 。 90° 锥头弹丸传递给流体质点的动能最大,形成的空泡最大,弹丸速度最小;截锥头弹丸次之;圆头弹丸传递给周围流体质点的动能最小,形成的空泡最

小,弹丸速度最大。

表1 圆头弹丸、截锥体头弹丸、 90° 锥头弹丸空泡闭合数据

头型	T/ms	L/mm	D/mm
圆头	42.7	50	24
截锥体头	43.7	53	26
90° 锥头	48.3	58	31

图4 圆头、截锥体头和 90° 锥头弹丸速度曲线

由图3(d)知,平头弹以 2.8 m/s速度入水的过程中空泡发生了类面闭合现象,10 ms左右环状水幕顶部收缩并与弹丸接触,产生了向弹丸四周飞溅的水花,于是形成了一个包裹部分弹丸的封闭腔体。随着弹丸继续向下运动,20 ms左

右产生了沿弹丸运动方向的射流,并撞击弹丸尾部产生飞溅,在后面运动的过程中飞溅作用于空泡壁面,使壁面产生了紊乱的现象。

图5为平头弹丸的速度曲线,弹丸速度呈现先增大后减小再增大的变化趋势。在整个入水过程中弹丸的受力如图6, G 为弹丸重力, f_1 为弹丸头部受到水域的冲击力, f_2 为环状水幕收缩与弹丸接触后弹丸身部受到水的粘性力, F 为弹丸完全入水后射流对弹丸尾部的撞击力。

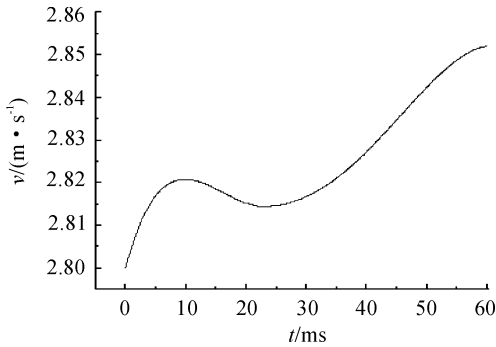


图5 平头弹丸速度曲线

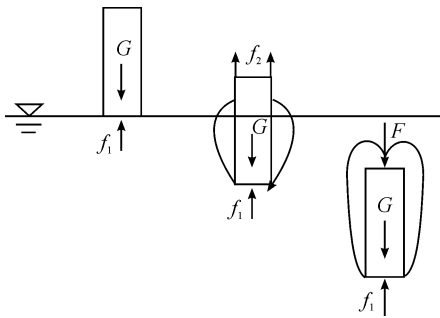


图6 弹丸受力图

在环状水幕与弹丸接触之前,弹丸受力只有 G 和 f_1 ,且 $G > f_1$,故弹丸的速度逐渐增加。在10 ms左右环状水幕顶部收缩与弹丸接触,此时弹丸身部受粘性力 f_2 ,且 $G < f_1 + f_2$,故弹丸的速度开始减小。在20 ms左右,弹丸完全进入水中,空泡逐渐拉长并逐渐包裹整个弹丸,弹丸所受水域的粘性力变为0,并且产生指向弹丸尾部的射流,使弹丸受到一个向下的撞击力 F ,且 $G + F > f_1$,故弹丸的速度又开始增加。

2.2 空泡闭合方式分析

弹丸入水后空泡的闭合方式按空泡闭合的位置可分为准静态闭合、浅闭合、深闭合、表面闭合和类面闭合。平头弹丸分别以 $u_0 = 0$ m/s、1.67 m/s、2.14 m/s、2.5 m/s、3.75 m/s的速度垂直入水,对其入水过程进行拍摄。入水过程中开空泡阶段、空泡闭合阶段和弹丸带空泡运动阶段几个时刻的空泡形态如图7~图11。

图7所示平头弹丸的入水速度为0 m/s,开空泡阶段如图7(a)~图7(d),弹丸头部入水后,在弹丸头部不产生空泡,当弹丸全部入水后,在弹丸尾部形成一个圆柱状空泡,空泡直径为弹丸直径,即8 mm,圆柱状空泡长度随弹丸入水深

度的增加逐渐增加,当长度达到8 mm之后,由于受液体表面张力和弹丸重力的作用,空泡开始收缩,进入空泡闭合阶段。空泡闭合阶段如图7(e)~图7(f),在108 ms时刻空泡将发生闭合,如图7(f),此刻空泡形状为类似于沙漏的形状。弹丸带空泡运动阶段如图7(g)~图7(j),空泡被分为弹丸尾部空泡和近液面空泡两部分。这种弹丸入水后在弹尾后部由于液体表面张力和弹丸重力的作用空泡发生闭合的方式属于准静态闭合,其主要的特点是在弹尾距离液面一个弹丸直径内,产生直径和弹丸直径大小一样的圆柱状空泡,并在弹尾后部发生闭合。闭合点在液面附近,弹丸整个入水过程中自由液面比较光滑稳定。

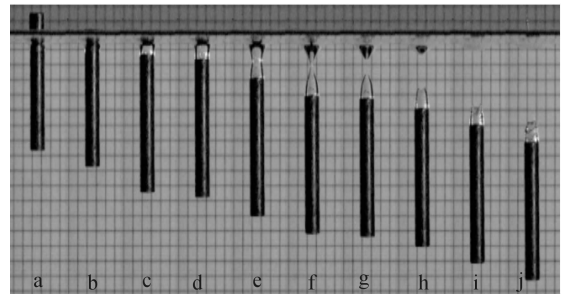


图7 准静态闭合空泡($t = 78.7, 85, 94.3, 96, 102.3, 108, 109, 112, 117, 122$ ms)

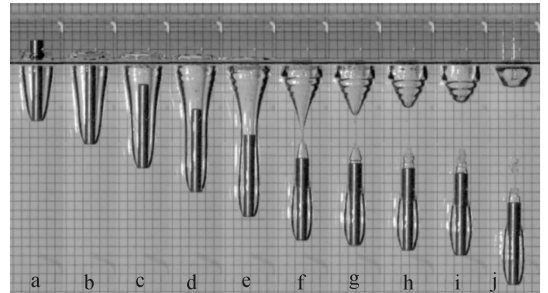


图8 浅闭合空泡($t = 19, 25.7, 32.3, 39, 45.7, 52, 53.3, 54.7, 56, 63.7$ ms)

图8所示平头弹丸的入水速度为1.67 m/s,开空泡阶段如图8(a)~图8(b),在液面上方产生了一层环状水幕。空泡闭合阶段如图8(c)~图8(f),随弹丸入水深度的增加,液面上方环状水幕逐渐降低,空泡逐渐收缩。当空泡某部分直径收缩到弹丸直径时,空泡与弹丸接触,在弹丸前端的弹身部位形成弹头部空泡,并且空泡壁面产生表面张力波,在52 ms时刻空泡将闭合,如图8(f)。弹丸带空泡运动阶段如图8(g)~图8(j)。空泡闭合后分为弹头部空泡、弹尾部空泡和近液面空泡。由于表面张力波的作用近液面空泡为多段锥台体形状,如图8(g)~图8(i)。近液面空泡随后逐渐向液面收缩产生一股指向液面的射流,如图8(j)。这种空泡闭合发生在距液面相对较浅的位置,称为浅闭合。区别于其他闭合方式的主要特点是弹丸入水后,空泡壁面产生了表面张力波,并一直存在于随后的运动阶段,空泡闭合后近液面空泡为多段锥台体形状。

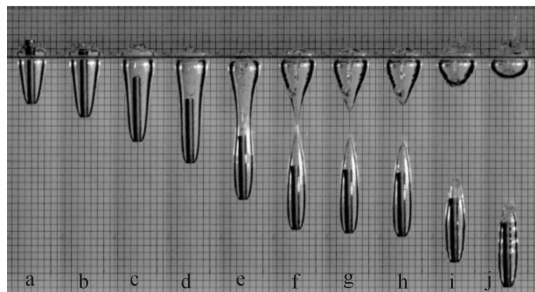


图9 深闭合空泡($t=14.7, 18.7, 26, 32.3, 43, 51.7, 52.7, 53.7, 61, 68$ ms)

图9所示平头弹丸的入水速度为 2.14 m/s。开空泡阶段如图9(a)~图9(c)。空泡壁面向四周扩张,在液面上方产生了一层环状水幕。随着弹丸运动,水幕半径逐渐扩大,水幕上边沿逐渐向中心收缩。空泡闭合阶段如图9(d)~图9(f)。液面上方水幕闭合并逐渐向下运动,在闭合点处产生一股向下的射流,如图9(e)和图9(f)。图9(f)所示 51.7 ms时刻空泡将闭合,并且射流作用于空泡壁面,水幕又逐渐向液面上方膨胀移动。这个阶段中,水幕经过了扩张变大、闭合向下运动、膨胀向上运动的过程。弹丸带空泡运动阶段如图9(g)~图9(j)。空泡发生闭合后分为弹丸周围空泡和近液面空泡。近液面空泡呈漏斗状,并逐渐向液面收缩产生了一股向上的射流,与前面所述水幕闭合产生的向下的射流在收缩过程中会相互抵消,最后产生一股向上的射流,如图9(j),图中射流冲破闭合的水幕向上喷溅。这种闭合方式与浅闭合最显著的区别是空泡闭合发生在较深的位置,且闭合后近液面空泡形状呈漏斗状,这种闭合方式为深闭合。

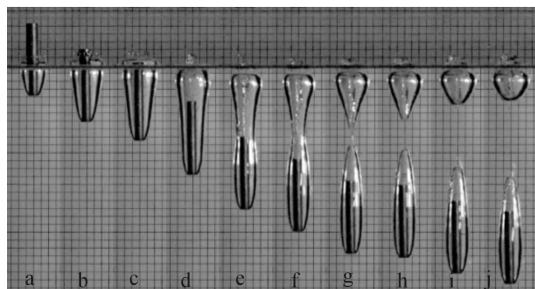


图10 表面闭合空泡($t=8, 15, 20, 29, 38, 43.7, 49.3, 50.3, 54.3, 57$ ms)

图10所示弹丸的入水速度为 2.5 m/s。开空泡阶段如图10(a)~图10(c),液面上方产生一层环状水幕,环状水幕半径随着空泡壁面的扩张逐渐变大,水幕上边沿逐渐向中心收缩。空泡闭合阶段如图10(d)~图10(g),水幕闭合并产生了向上和向下的两股射流,如图10(e)。闭合后的水幕随着弹丸一起向下运动,并最终运动到液面以下,如图10(e)、图10(f)。在图10(g)所示 49.3 ms时刻空泡将发生深闭合。弹丸带空泡运动阶段如图10(h)~图10(j)。空泡发生深闭合后被分为两个闭合空泡,近液面空泡和弹丸周围空泡如图10(h)。随着弹丸的运动,近液面空泡整体向上运动,

在液面上方形成一个凸起的水幕,并同时向液面收缩,产生一股向上的射流,与前面所述水幕闭合产生的向下的射流在收缩过程中会相互抵消,形成一股向上的射流。弹丸以 2.5 m/s速度入水过程中,空泡先在液面处发生闭合,闭合后空泡随弹丸运动到液面以下,然后再发生深闭合,这种空泡在液面处闭合的方式为表面闭合。

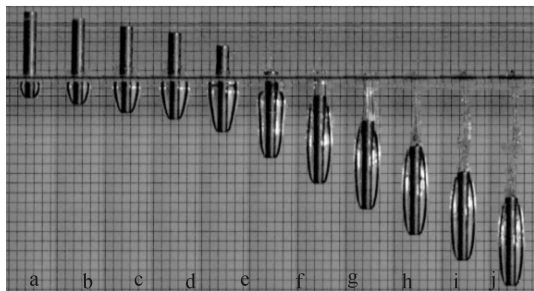


图11 类面闭合空泡($t=3.7, 4.7, 6, 7, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 33$ ms)

图11所示弹丸的入水速度为 3.75 m/s。开空泡阶段如图11(a)~图11(e),液面上方产生一层环状水幕,随着空泡壁面的扩张,水幕上方开始向中心收缩,到 7 ms时刻,水幕与弹丸接触,构成一个封闭的空泡,如图11(d)。弹丸带空泡运动阶段如图11(f)~图11(k),开空泡阶段所形成的封闭空泡随弹丸一起运动到液面以下,如图11(f)。弹丸完全进入水中之后,在弹丸尾部形成一个开放的空泡,与准静态闭合开空泡阶段所形成的圆柱状空泡不同,空泡结构类似于圆台状,如图11(g)和图11(h)。在随后的运动过程中,弹丸尾部圆台状空泡逐渐溃灭,如图11(i)~图11(k)。这种空泡的闭合方式为类表面闭合。

2.3 空泡壁面扩张规律

平头弹丸以 2.14 m/s速度入水,水深 50 mm(闭合位置)处空泡直径 D_c 随时间的变化规律如图12。

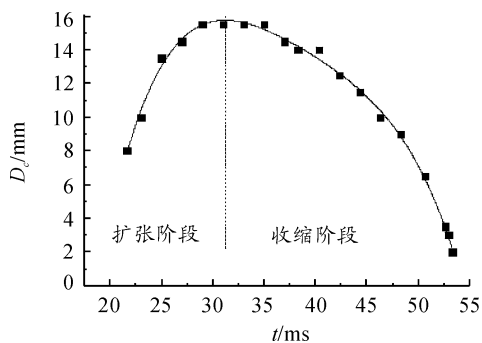


图12 空泡直径随时间的变化

忽略空气对弹丸的作用,由图12可知,在 21.7 ms时刻弹丸运动到该固定位置,弹丸的一部分机械能传递给周围水域流体质点,与弹丸相接触的流体质点获得一定的动能。这样就产生了弹丸头部外法线方向的速度分量,流体质点沿弹丸径向向外运动,在该位置截面内产生空泡。由于空泡内部和周围水域存在压差,流体质点运动的速度逐渐衰减,当截

面内流体质点速度衰减到 0 时,空泡直径扩张到最大值为 15.5 mm。在扩张阶段,流体质点的动能逐渐转化为势能。流体质点速度衰减到 0 后在压差作用下,获得指向空泡内部的反向速度,空泡开始收缩。在收缩阶段,周围水域的势能逐渐转化为流体质点的动能。

平头弹丸以 2.14 m/s 速度入水,图 13 为各不同水深空泡的最大直径 D_m 随水深 h 的变化。在闭合位置以上,空泡最大直径逐渐降低。在闭合点位置以下,空泡最大直径保持在 14.5 mm 左右,呈现波动变化。

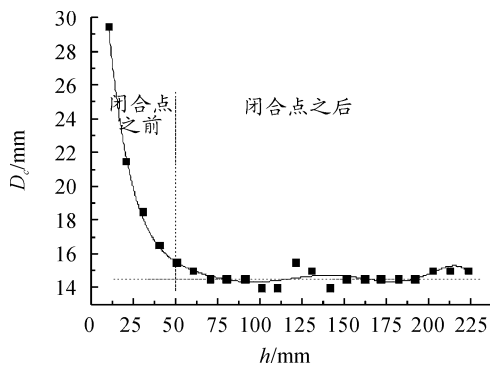


图 13 不同深度空泡最大直径

3 结论

本文通过研究不同头型弹丸低速垂直入水过程,得到以下结论:

- 1) 弹丸头部形状对弹丸入水后空泡的大小、闭合方式、空泡的稳定性以及弹丸的运动速度有很大影响;
- 2) 弹丸入水时刻速度不同,入水后空泡的闭合方式也产生变化,对于轴对称弹丸存在五种空泡的闭合方式:准静态闭合、浅闭合、深闭合、表面闭合和类表面闭合;
- 3) 在闭合点位置以上,不同水深空泡最大直径逐渐降低;在闭合点位置以下,不同水深空泡最大直径保持在 14.5 mm 左右,呈现波动变化。

参考文献:

[1] TADD T, TRUSCOTT, BRENDEN P, ET AL. Water entry of

projectiles[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2013, 46:355-378.

[2] ARISTOFF J M, TRUSCOTT T T, TECHET A H, et al. The water entry of decelerating spheres[J]. Physics of Fluids, 2010, 22:135-165.

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

[4] WEI Z H, WANG S S, MA F, et al. Experimental investigation of water-entry phenomenon[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 19(2):127-131.

[5] 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.

[6] 叶阳辉, 孙金娟, 史小兵, 等. 小韦伯数下小球入水的数值分析[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(11):40-44.

[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.

[8] 杨衡, 张阿漫, 龚小超, 等. 不同头型弹丸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.

[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.

[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.

[11] 蒋运华, 徐胜利, 周杰. 运动体小扰动下入水空泡试验研究[J]. 弹道学报, 2016, 28(1):81-87.

[12] 路中磊, 魏英杰, 王聪, 等. 正浮力开放腔体圆柱壳垂直入水数值研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(16):79-85.

[13] 刘宣, 闻泉, 王雨时, 等. 弹头外形对非零攻角亚音速旋转弹丸气动特性的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2016(9):5-10.

(责任编辑 周江川)