

圆柱体低速入水空泡试验研究*

何春涛[†] 王聪 何乾坤 仇洋

(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

(2011年10月20日收到; 2011年11月23日收到修改稿)

针对入水空泡生成机理和发展过程, 以及影响入水空泡发展的复杂因素等开展入水试验研究. 通过垂直和倾斜两种方式入水试验研究, 分析了入水过程中的一系列流动现象, 以及空泡的生成、发展和闭合, 同时通过对比试验结果得出了空泡闭合方式与入水速度之间的关系; 在此基础上开展了多弹体入水试验, 分析了串列和并列入水时空泡的生成和相互之间的影响, 以及对运动体本身稳定性的影响.

关键词: 圆柱体入水, 入水空泡, 空泡闭合, 试验研究

PACS: 47.54. De, 47.55. Ca, 47.55. dp

1 引言

运动体以一定的速度撞击自由水面, 在水面附近形成一系列复杂的流动现象, 其中最为主要的是在水面以下形成一个空腔, 即入水空泡. 入水空泡的存在对水雷、空投鱼雷、导弹和超空泡射弹等武器入水瞬间的流体动力特性、结构本身和水下初始弹道的稳定性等具有重大的影响^[1].

对入水空泡的研究最早可以追溯到19世纪末, Worthington 和 Cole^[2-4] 利用闪光相机对球体等垂直入水时产生的一系列流动现象进行了大量的试验观察. 上世纪50年代前后, 在美国海军相关机构的大力支持下多家研究机构 and 高校等开展了大量关于入水问题的基础研究, 主要研究内容包括垂直和倾斜入水流动现象、空泡的发展过程、运动体流体动力变化规律和入水弹道稳定性等. 其中最具代表性的有 Waugh^[5], Birkhoff^[6-8], Glibarg 和 Anderson^[9] 及 May^[1,10-13] 等开展的关于入水空泡变化过程及其影响因素的试验和理论研究. 近年来, 随着试验设备、测试手段和试验技术的迅速发展, 为入水空泡流动的研究提供了更加有效的方法和途径. Glasheen 等^[14-16] 通过示踪粒子研究了圆盘匀速垂直入水空泡闭合过程中空气流场参数

分布; Aristoff 和 Bush^[17] 通过对球体表面进行憎水处理, 对两种不同亲水性表面球体进行了对照试验研究; Cyril Duez^[18] 等对两种不同亲水程度的球体, 在垂直入水过程中所产生的压强波动进行测量和定性的分析.

本文通过对圆柱弹体进行了低速入水试验研究, 进一步探索了入水空泡的生成机理、空泡的生成和发展过程, 同时通过对比试验分析了入水速度对入水空泡闭合方式的影响; 在对单个弹体入水的基础之上开展了两个弹体串列和并列入水试验研究, 分析了多个空泡与空泡之间的相互影响, 以及空泡对弹体稳定性的影响.

2 试验系统与模型参数

入水空泡试验系统示意图如图1所示, 玻璃水箱(0.8 m × 0.5 m × 1.0 m) 四周侧壁和底部均采用具有较高强度的钢化玻璃, 侧壁厚10 mm, 底部厚15 mm, 各个侧壁之间以及侧壁与底部之间均采用酸性硅酮玻璃胶进行粘结, 并在水箱底部铺设50 mm厚度的减震防护层保护水箱底部玻璃不被撞击破坏. 滑轨是决定本文倾斜入水试验成功的重要因素之一, 光滑、平直的滑轨工作表面是为模型提供稳定、可控的倾斜入水姿态和速度关键

* 总装备部资助项目(批准号: 623010203) 资助的课题.

[†] E-mail: chuntao.he@gmail.com

因素. 本文采用直角断面的轻质铝合金材料, 并对工作表面进行较高表面质量的打磨, 运动体与滑轨之间通过线接触从而减小滑动摩擦对模型速度的损失.

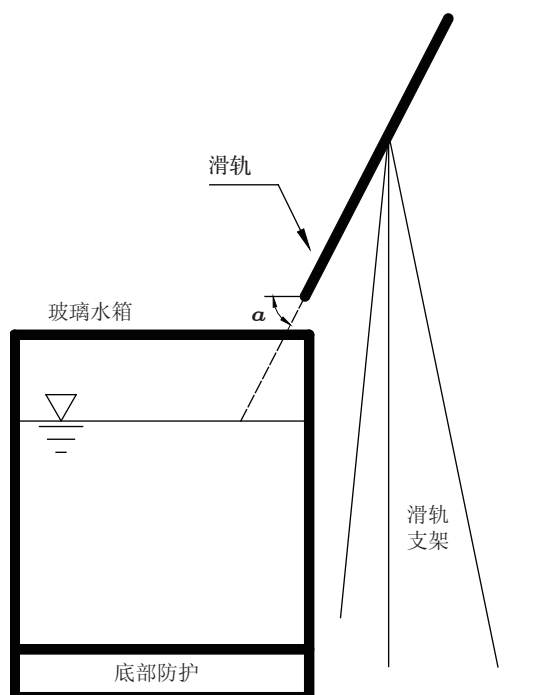


图1 入水试验系统示意图

本文入水试验系统除了图1所示的水箱、滑轨和滑轨支架等, 还包括试验模型和测试系统等. 运动体撞击水面以及随后空泡的生成、发展和脱落等都是在极短时间内完成的(毫秒量级甚至更小), 空泡壁面极易受到外界因素的干扰, 同时由于试验过程中运动体一直处于自由运动状态等. 因此, 目前还很难通过常规的测试手段和技术获得入水空泡参数, 目前对这种具有较强瞬态特性的测试大多采用高速照相技术. 随着科技的发展, 高速照相机等得到了迅速的发展, 在计算机出现之后高速照相机也从最初的机械式向现在的数字相机转变. 本文试验采用 FASTCAM SA5 高速照相机, 并以每秒 5000 帧的速度对整个入水过程进行拍摄. 由于在高速条件下拍摄照片对光源质量具有较高的要求. 因此, 为了能够得到高质量的试验照片, 本文采用 $4 \times 1000 \text{ W}$ 的光源点阵组成平行光源, 并将平行光源通过磨砂玻璃散射后到达水域, 以形成良好的成像效果.

试验过程中采用自来水源, 水深 0.7 m , 水温 $19 \text{ }^\circ\text{C}$, 使用明矾对水域进行两次循环处理除

去水中的悬浮颗粒物. 滑轨与水平面之间的夹角 $\alpha = 70^\circ$, 在忽略滑轨摩擦阻力的情况下, 滑轨能够提供的最大入水速度约为 7.8 m/s . 试验模型为 140° 锥角头型圆柱钢质弹体. 如图2所示, 直径 $D = 9 \text{ mm}$, 长度 $L = 40 \text{ mm}$, 密度为 7.85 g/cm^3 .

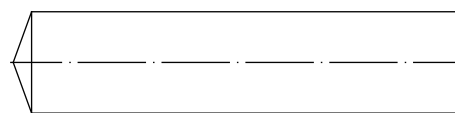


图2 入水试验模型

3 试验结果分析

3.1 单个弹体垂直入水空泡试验分析

为了进一步探索入水空泡的生成机理和发展过程, 首先开展单个弹体低速垂直入水试验研究. 为了便于分析, 文中将入水空泡的整个发展过程分为撞击、流动形成、开空泡和闭合后的空泡四个相对独立的阶段^[19]. 下面对各个阶段进行简要的描述.

入水撞击阶段是指从运动体接触到自由水面后的一个非常短暂的时间段, 该时间段一般都在零点几毫秒甚至更小^[19]. 在这个阶段尽管时间非常短暂, 但由于介质突变等因素导致了一系列复杂的流动现象, 以及由复杂流动所引起的运动体本身的运动和结构特性的变化等. 目前被大家所普遍认识到的是撞击瞬间所产生的载荷突变所带来的问题, 尤其是对一些薄壳结构、以及运动体内部的一些抗冲击能力较弱的仪器仪表等都是致命性伤害. 除了带来巨大的冲击载荷之外, 撞击过程对入水以后的流动形成等都具有较大的影响. 由于撞击阶段是运动体与水介质刚刚接触, 因此, 在很大程度上将直接决定和影响后期复杂流动特性和变化规律. 其中, 撞击阶段所产生的喷溅现象就是撞击阶段所形成的复杂流动中与入水空泡关系最为紧密的流动之一.

喷溅是运动体入水撞击水面时, 在水面之上形成的一层光滑透明的水幕, 但在整个入水过程中持续较长时间, 如图3中弹体以 2.5 m/s 速度垂直入水过程中所示, 从撞击水面开始喷溅形成, 直到最后空泡发生闭合时喷溅依然存在. 通过试验观察发现一个非常有趣的现象, 透明的水幕在整个过程中经历了向外发展、收缩、完全闭合、再次膨胀和最

后破灭的过程. 在入水初期喷溅在惯性力的作用下迅速向外扩张, 随后在表面张力、重力以及空泡入口处的空气动力等的阻碍作用下迅速向中间收缩, 形成一个拱形圆顶钟罩, 并迅速下降; 在空泡发生深闭合后, 由于向上的高速射流的作用使得上部分的空泡体积急剧压缩, 在内部压力作用下拱形圆顶钟罩再次向外膨胀, 最后在高速射流的冲击作用下破灭.

在撞击阶段之后是入水空泡流动形成阶段, 如图 3 中第一张照片所示. 从能量守恒的角度分析流动的形成过程可将该阶段解释为一个能量传递的过程. 运动体撞击自由水面之后将动能通过阻力传递给附近的水域. 水域质点在获得动能过后, 由静止状态变成运动状态, 运动到一定程度后形成开口的空泡, 即开空泡, 如图 3 中第二、三和第四张照片所示. 开空泡阶段主要是开空泡从形成到充分发展的过程, 是一个非常复杂的流动过程. 为了简化和更加清晰的描述空泡的发展过程, 大致可以将充分发展阶段的空泡在空间上从上到下分为三部分, 分别为靠近自由液面附近部分、中间部分和靠近弹体头部附近部分.

靠近自由液面附近的水域在弹体的撞击作用下产生较大的惯性力, 同时由于水深所产生的环境静压较小, 从而使得表面张力和空气动力等较为微

弱的作用力对流动过程的相对贡献增加, 从而增加了确定该阶段作用力系和各个作用力的相对重要性的难度, 导致目前针对自由液面附近的空泡动力学模型还处于不成熟阶段. 另一难点是对靠近弹体头部附近空泡形态的捕捉, 由于强力的撞击作用和模型头部较为复杂的撞击边界条件等因素, 导致模型头部附近的流场和空泡壁面都非常复杂. 在目前的空泡动力学模型中, 包括文献 [1] 中的理想入水空泡模型和文献 [20] 中的基于空泡独立膨胀原理的空泡模型, 在处理头部附近的空泡形态问题时均采用基于有限试验数据的半经验公式.

目前对于中间部分空泡的运动特性具有较为清晰的认识. 中间部分空泡由于远离自由液面, 具有较大的环境静压作用, 使得表面张力等在该部分对流动的贡献减小, 同时由于远离弹体头部, 受到由撞击过程和液体分离等产生的扰动减小. 因此, 在分析过程中可近似将该部分空泡壁面以及附近水域的作用力系简化为惯性力和由重力场所产生的环境压力的相互作用, 使得空泡壁面在径向方向扩张或收缩. 从能量守恒的角度分析, 惯性力和重力分别表征了空泡壁面附近水域的动能和势能. 其中, 动能促使入水空泡壁面向外扩张, 而势能阻碍空泡向外扩张, 两者之间并以某种形式迅速转换, 达到一个动态平衡.



图 3 垂直入水空泡变化过程

随着空泡壁面的迅速扩张空泡壁面附近的水域动能迅速被转换为势能, 空泡壁面做减速扩张, 当速度减小到零时空泡壁面扩张到最大直径, 随后空泡壁面以及附近的水域开始反向加速运动, 向中心线处收缩. 最后在水面附近或者水面以下

某一深度空泡壁面收缩至一点, 空泡完全闭合. 在自由液面附近发生闭合叫做表面闭合, 相反在液面以下某一点发生的空泡闭合称之为深闭合, 图 4 给出了同一模型以不同速度垂直入水所产生的不同闭合方式试验结果. 图 4(a) 为 140° 锥角头型圆

柱体以 2.5 m/s 速度垂直入水时发生的深闭合, 而图 4(b) 为模型以 2.9 m/s 速度垂直入水后发生的闭合情况. 通过试验结果对比发现, 以两种不同速度入水结果出现两种不同的空泡闭合方式. 为了进一步验证入水速度对空泡闭合的影响, 开展了更高速率 (56 m/s) 的垂直入水试验. 试验结果如图 4(c) 所示, 试验结果跟预想一致, 同一模型在较低速度条件下入水, 空泡在自由水面以下某一深度闭合即深闭合; 当入水速度超过某一值后空泡在自由水面附近发生闭合即表面闭合.

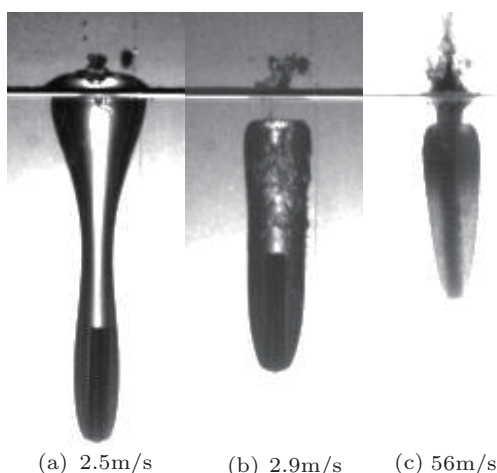


图 4 垂直入水空泡闭合方式对比 (a) 2.5 m/s; (b) 2.9 m/s; (c) 56 m/s

通过图 4 中垂直入水空泡闭合方式的对比不难发现, 图中照片 a 和照片 b 与 c 除了空泡形态和闭合方式的不同之外, 空泡壁面的清晰程度也具有很大的区别, 低速入水空泡壁面光滑透明, 而当速度增加到空泡发生表面闭合后, 空泡壁面出现模糊状, 同时受到表面闭合时产生的高速射流的冲击作用空泡尾部出现不稳定区域, 根据试验过程中高速照相结果显示, 在发生表面闭合后空泡尾部迅速破灭, 并带走部分空气. 而深闭合后包裹弹体的空泡

较为稳定只是在空泡尾部具有少部分的空泡脱落和漏气现象. 因此, 空泡的闭合方式对入水空泡的漏气具有重要的影响.

3.2 单个弹体倾斜入水空泡试验分析

为了探索入水空泡的生成机理与入水姿态之间的关系, 在前面垂直入水空泡试验研究的基础之上, 进一步开展了低速倾斜入水空泡试验. 试验采用 140° 锥角头型圆柱弹体, 滑轨与水平面之间的夹角 $\alpha = 45^\circ$.

通过对比分析图 3(约 2.5 m/s) 垂直入水和图 5(约 2.5 m/s) 倾斜入水试验结果发现, 两种不同方式入水过程产生的一系列具有各自特点的流动现象; 同时部分流动现象也具有一定的共性. 以下在垂直和倾斜入水试验结果的基础之上进行对比分析.

首先, 在自由水面以上出现两种不同的喷溅现象. 在图 3 中的垂直入水过程中产生近似轴对称的喷溅流动现象, 而图 5 中的大部分喷溅出现在沿弹体水平速度分量方向运动. 对于喷溅的产生机理一直还是大家所关注的焦点之一, 喷溅的产生是一个非常复杂的过程, 且极易受到外界因素的干扰和影响. 目前还没有较为成熟的数学模型, 因此对该局部流动现象的研究还主要以试验手段为主, 试验过程中对试验技术和方法具有较高的要求. 本文对由入水所产生的喷溅流动现象, 主要关注的是喷溅的产生对后续空泡的生成和发展的影响. 由前面对垂直入水喷溅产生的过程可得, 倾斜入水过程中喷溅的不对称主要是由于倾斜入水时弹体撞击水面的不对称所引起的. 弹体倾斜入水时头部下边缘先接触水面, 并由于弹体具有水平方向的速度分量, 使得在撞击水面瞬间产生沿水平速度方向的喷溅, 由高速照相机捕捉到的喷溅流动过程发现, 喷溅的速度远高于弹体初始入水速度.

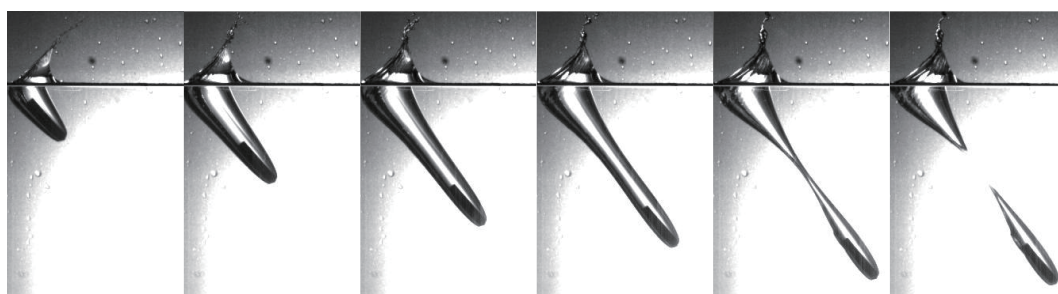


图 5 2.5 m/s 速度倾斜入水空泡变化过程

其次,在靠近自由水面的部分空泡出现非轴对称现象,与垂直入水空泡存在一定的差异.弹体上侧的空泡壁面在喷溅和自由水面的影响下一起向上运动,使部分水域高出未扰动水平面,而弹体下侧的水域在向下运动过程中受到附近水域的阻碍做减速运动,在靠近自由水面的部分水域也上升一定高度,但较弹体上侧的上升高度小.在空泡发生深闭合之前,随着距离自由液面的距离增加,空泡逐渐趋于稳定,主要沿着弹体运动轨迹做径向扩张.

最后,对比图3和图5两种入水方式所产生的入水空泡在水面以下发生的深闭合的过程,发现闭合后垂直入水空泡被分离成两个轴对称的空泡,并在闭合点附近形成指向空泡内部的两股高速射流;倾斜入水空泡在闭合后也形成与垂直入水空泡闭合类似的沿轴向指向各自空泡内部的射流,但在闭合后与弹体相连的空泡尾部由于重力作用的影响出现明显的向上漂现象.

在倾斜入水过程中,弹体在空泡内部只有头部与水接触,在重力作用下整个弹体绕头部做逆时针转动.同时由于空泡闭合后尾部出现迅速向头部收缩.在弹体发生逆时针偏转和空泡收缩的共同作用下弹体尾部撞击到空泡壁面.撞击空泡壁面发生后,在撞击点空泡壁面发生凸起,经过试验观察,该凸起部分并未立即产生空泡的不稳定因素,只是在空泡闭合过程中空泡沿着凸起部分与未扰动空泡壁面之间的相贯线迅速破灭并夹带着部分空气.

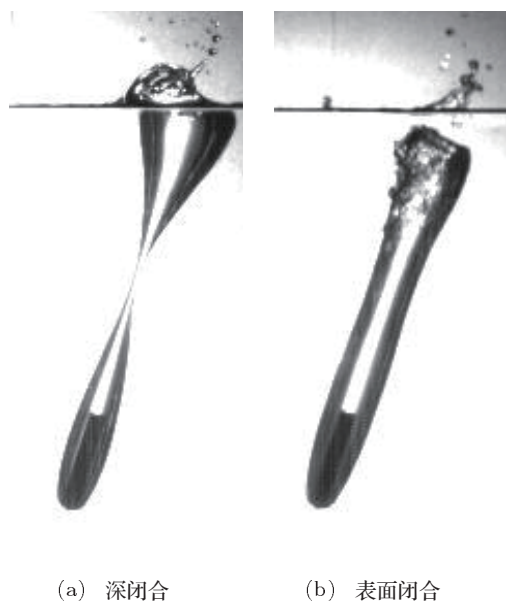


图6 倾斜入水空泡闭合方式对比 (a)深闭合;(b)表面闭合

经过以上分析表明,在倾斜入水过程中入水空

泡出现了大量的与垂直入水空泡相区别的特有现象,但从入水空泡的整个流动生成和发展过程来看,同样经历了撞击水面、撞击后流动的形成、开空泡、空泡的闭合以及闭合后的空泡几个阶段等,具有相似的运动特性.

为了进一步验证入水速度与空泡闭合方式之间的关系能否从垂直入水外推到倾斜入水中,开展了不同速度的倾斜入水试验研究.其中,图6给出了 140° 锥角头型圆柱弹体以不同速度倾斜入水试验过程中出现的深闭合和表面闭合的两种工况闭合瞬间的试验照片.图6(a)为弹体以 2.99 m/s 速度在 $\alpha = 30^\circ$ 条件下入水空泡发生的深闭合,而图6(b)为 4.26 m/s 入水时发生的表面闭合.并由试验结果照片不难看出在倾斜入水过程中两种不同方式闭合条件下空泡形态和空泡的稳定性与垂直入水过程中相似,在深闭合条件下空泡壁面光滑透明,而表面闭合条件下空泡壁面出现模糊状,表面闭合产生的喷溅冲击空泡尾部,使得空泡尾部壁面出现破碎的水花.

3.3 两弹体串列倾斜入水试验分析

通过以上对单个弹体垂直和倾斜入水空泡进行试验分析进一步明确了入水空泡的生成和发展过程以及空泡闭合与入水速度之间的关系.在此基础上进一步开展了两个弹体串列入水的试验研究.探索两个弹体串列入水过程中空泡之间的相互影响,以及空泡对弹体稳定性的影响.本文对于串列入水试验研究主要是分为三种工况:第一种是后者进入到前者生成的空泡内部;第二种是后者与前者生成的空泡之间具有较大的间距;第三种是后者刚好进入到前者生成的空泡尾部.试验过程中通过调节释放运动体时间来实现调节两运动体之间的空间间隔.两弹体几乎在相同的位置自由释放,因此,两弹具有相同的入水速度.试验过程中均采用平头圆柱弹体.图7、图8和图9分别给出了第一种、第二种和第三种工况试验结果部分照片.

由图7中可以看出,当两弹体串列入水间距小到一定程度时,后面的弹体完全进入到前面弹体所形成的开空泡内部.通过试验观测发现,在后者进入到前者空泡内部时对空泡稳定性等没有明显影响,后一弹体在前一弹体所产生的空泡内部运行,由于只与空气介质接触,所受到的阻力远小于在水中运行的阻力.运行一段时间后撞击在前面弹体尾部,导致两运动体均偏离预期运行轨迹.

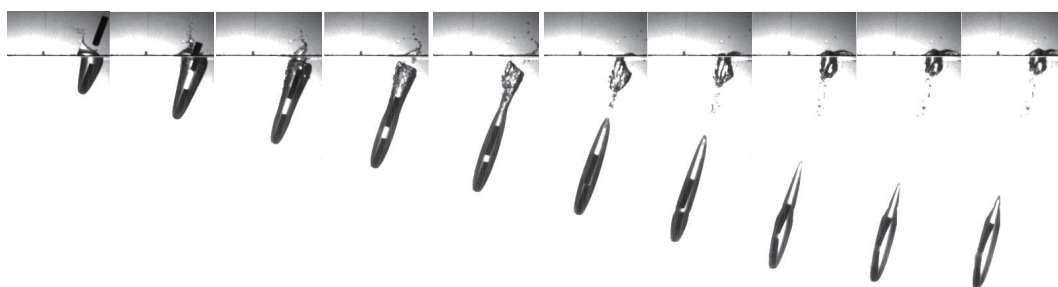


图7 小间距串列倾斜入水空泡生成过程

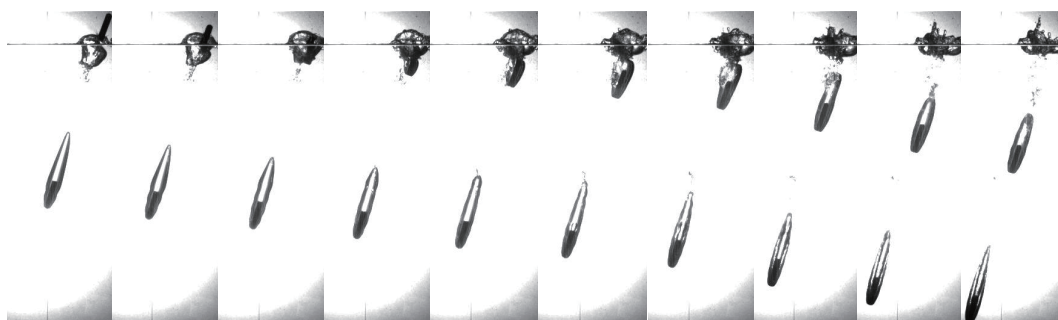


图8 大间距串列倾斜入水空泡生成过程

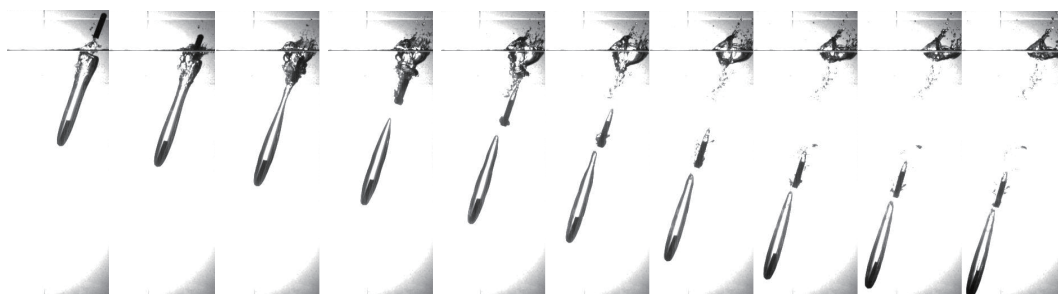


图9 中等间距串列倾斜入水空泡生成过程

第二种工况试验结果如图8所示,两弹体之间具有足够远的间距,后者撞击水面时刻前面弹体的入水空泡已经完全闭合.通过试验观察发现后者入水时由于前者入水空泡闭合时自由液面还未完全平静,并具有部分破碎的喷溅等.通过对比前后空泡的变化过程发现,由后一弹体所产生的空泡较前一弹体产生的空泡体积偏小,在穿过紊乱区域空泡趋于稳定后,两者具有相似的变化过程.

第三种工况试验结果如图9所示,后一弹体进入到前面弹体空泡尾部闭合区域.由图中前3张照片可以看出,后一弹体撞击水面时前一弹体产生的入水空泡刚好发生表面闭合,以至于后一弹体在穿

过自由液面后进入到紊乱的空泡尾流区域.通过试验观察得到一个非常有意思的现象就是,当后者穿过不稳定区域后一弹体头部没有形成稳定的空泡,而是在头部边缘出现不稳定的气泡,在尾部有较为稳定的空泡.在随后的一段时间内后一弹体一直跟随在前一弹体空泡尾部脱落区域,由于后一弹体绕流在肩部边缘出现低压区域,前面空泡脱落的气泡部分迅速被吸入到低压区域内,从图中第4张照片开始一直到最后可以清晰的看到该流动现象.从试验照片中观察得出另一现象是后一弹体在前一弹体尾部脱落气泡的作用下改变了运动方向,即失去稳定性.

3.4 两弹体并列入水试验分析

在前面开展两弹体串联入水的基础上还进行了两运动体并列入水空泡发展过程的探索试验研究. 试验结果部分照片如图 10 所示. 试验过程中两运动体中心线间距约为 $4.7D$, 入水速度约为 2.89 m/s . 为了便于比较和说明两运动体并列入水空泡之间的相互影响, 还进行了单个运动体以相同的边界条件入水的对照试验, 试验结果照片如

图 11 所示.

从图 10 和图 11 的对比中可以看出, 两弹体并列入水后, 在两弹体中间部分的水域由于受到来自两个弹体相反方向的作用力, 从而产生方向相反的速度分量. 在空泡扩张阶段, 该部分水域阻碍了空泡壁面的向外扩张; 在空泡深闭合阶段, 其延缓了内测空泡壁面向中心点的移动. 从试验照片可以看出, 在最后空泡闭合瞬间闭合点偏离了入水轨迹的中心线, 而偏向两弹体的中间.

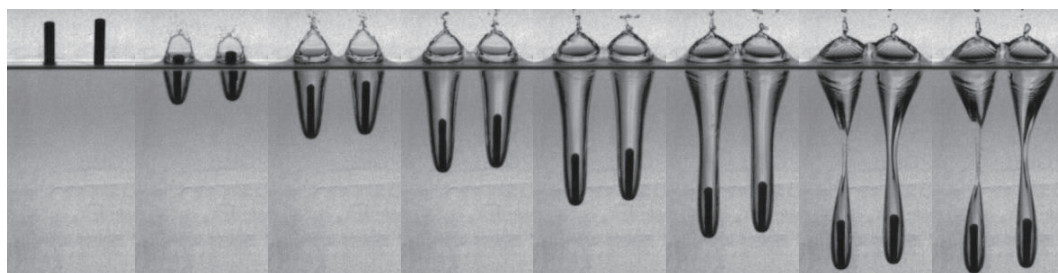


图 10 并列低速入水空泡形态

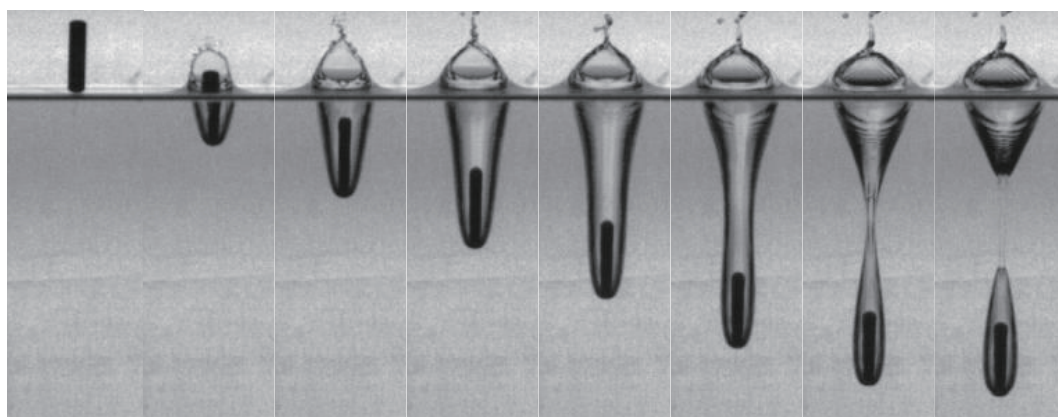


图 11 单个运动体低速入水空泡形态

4 结论

本文对 140° 锥角头型的钢质圆柱弹体开展了大量试验研究. 通过单个弹体的垂直和倾斜入水试验, 分析了入水过程中空泡的生成、发展、闭合等流动现象, 结果表明在本文入水速度范围内, 垂直和倾斜入水空泡的生成、发展和闭合等方面具有一定的相似性, 但在具体的量值上具有一定的差异; 通过不同速度的入水试验得出了入水速度对空泡闭合方式影响, 即弹体在较低速度条件下入水空泡

发生深闭合, 随着入水速度的增加空泡闭合方式转变成成为表面闭合; 通过两弹体的串列入水试验探索了两弹体串列入水的流动现象; 最后通过两弹体的并列入水试验, 得出并列入水时的流动现象和对入水空泡闭合方式和闭合点的影响.

通过本文的研究发现, 对于倾斜入水空泡的研究还有大量的工作需要进一步开展, 如针对更大范围内的入水速度和入水角度以及入水弹体本身结构形态等因素对空泡生成和发展过程的影响等; 以及多弹体入水过程的关联性等. 希望能够为后续的研究奠定一定的基础.

- [1] May A 1975 AD-A020 429
 [2] Worthington A M, Cole R S 1897 *Phil. Trans. Roy. Soc.* **189** A 137
 [3] Worthington A M, Cole R S 1900 *Phil. Trans. Roy. Soc.* **194** A 175
 [4] Worthington A M, Cole R S 1908 *A study of splashes* (London, New York, Bombay, Calcutta: Longmans, Green, and Co.) p78
 [5] Waugh J G 1968 *J. Hydrodynamics* **2** 87
 [6] Birkhoff G, Caywood T E 1949 *Appl. Phys.* **20** 646
 [7] Birkhoff G, Isaacs R 1951 *Navord Rep. Tech. Rep.* 1490
 [8] Birkhoff G, Zarantonello E H 1957 *Jet, Wakes, and Cavities* (New York: Academic Press Inc.) p6
 [9] Glibarg D, Anderson R A 1948 *J. Appl. Phys.* **19** 127
 [10] May A 1970 *J. Hydrodynamics* **4**(4) 140
 [11] May A, Woodhull J C 1948 *J. Appl. Phys.* **19** 1109
 [12] May A 1951 *J. Appl. Phys.* **22** 1219
 [13] May A, Woodhull J C 1948 *J. Appl. Phys.* **19** 1109
 [14] Glasheen J W, Macmahon T A 1996 *Nature* **380** 340
 [15] Glasheen J W, Macmahon T A 1996 *Phys. Fluids* **8** 2078
 [16] Glasheen J W, Peters Ivo R, Manuel Gordillo J, Devaraj van der Meer, Detlef Lohse 2010 *Phys. Fluids* **2** 1
 [17] Aristoff J M, Bush J W M 2009 *J. Fluid Mech.* **619** 45
 [18] Cyril Duez, Christophe Ybert, Christophe Clanet, Lyderic Bocquet 2007 *Nature Physics* **3** 180
 [19] Waugh G 1975 *Naval Undersea Center, California: AD-A007 529*
 [20] Logvinovich G V (Translated by D. Lederman) 1972 *Hydrodynamics of Free-boundary Flows* (Jerusalem: IPST Press) pp104–118

Low speed water-entry of cylindrical projectile*

He Chun-Tao[†] Wang Cong He Qian-Kun Qiu Yang

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 20 October 2011; revised manuscript received 23 November 2011)

Abstract

Experimental studies of the water-entry of cylinder bodies are conducted using high-speed camera to capture the splashes over the water surface and the subsurface cavity shapes during water entry and the cavity-running phase. Cavity evolution is discussed on single 140° conical cylinder body such as formation, development, and pinch-off of vertical and oblique entry. The dependence of the pinch-off type on the entry velocity is discussed for various entry speeds. The phenomena of two-body water entry in series and side-by-side are discussed in the end of this paper, and the data show that the spatial distance between the two bodies has a great influence on the development and the stability of the cavity and the dynamics of both bodies themselves.

Keywords: cylinder body water-entry, water-entry cavity, cavity pinch-off, experimental investigation

PACS: 47.54. De, 47.55. Ca, 47.55. dp

* Project supported by the PLA General Armament Department (Grant No. 623010203).

[†] E-mail: chuntao.he@gmail.com