圆柱体垂直入水空泡形态试验

何春涛 王 聪 魏英杰 马相孚

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 在不同攻角和不同速度条件下,对圆柱形运动体垂直入水空泡形态进行试验研究. 对140°锥角头型圆柱体在零攻角和带攻角条件下进行垂直入水试验,分析了低速垂直入水所引起的入水空泡生成、发展和闭合流动过程以及空泡稳定性等;利用平头圆柱体进行不同速度条件下垂直入水试验,分析了入水速度对空泡闭合方式和形态的影响. 研究结果表明:在试验速度范围内均能形成稳定的入水空泡,并经历生成、充分发展、空泡闭合以及最后完全脱落的过程,不同发展阶段具有不同的稳定性,其闭合方式和形态与入水速度密切相关.

关 键 词: 垂直入水; 空泡; 试验; 攻角; 空泡闭合

中图分类号: TV 131.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)11-1542-05

Vertical water entry cavity of cylinder body

He Chuntao Wang Cong Wei Yingjie Ma Xiangfu

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

Abstract: Experimental studies of the vertical water-entry of cylinder bodies were conducted using high-speed camera to capture the splashes over the water surface and the subsurface cavity shapes. The cavities formation and stability were discussed for 140° conical cylinder bodies fall into water freely. Experiment results show that the air cavity formed at very low entry speed, and lots of complicated flowing phenomena accompanied with the whole process of the formation, including splashes, cavity expand and cavity pinch-off. And the effects on the stability of the cavity due to the impact of tail were also discussed with vertical entry of the 140° conical cylinder at an angle of attack, and the results reveal that the impacts on the cavity play different roles for stability of cavity at different stage of the whole process of formation. Finally, the effects on the cavity shapes and the pinch-off of vertical water-entry of right cylinder were conducted at various entry speeds. It shows that the cavity shapes and type of pinch-off are great depended on entry speed.

Key words: vertical water-entry; cavity; experiment; angle of attack; cavity pinch-off

运动体高速入水时,在水面形成一个开口空腔,称为入水空泡. 入水空泡的生成、发展以及溃灭过程涉及到空气、水和运动体三者之间的相互作用,是一个非常复杂的过程. 入水空泡的存在对空投鱼雷、导弹、超空泡射弹等运动体入水瞬间的流体动力特性和水下初始弹道的稳定性具有重大的影响.

对入水空泡的研究最早可以追溯到19世纪末,参考文献[1-3]利用闪光照相机对球体等垂直入水时所产生的一系列流动现象进行了大量的试验观察. 上世纪50年代前后美国海军支持了大量的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. 其中参考文献[4-13]的工作最具代表性. 近年来,随着试验设备、测试手段和试验技术的迅速发展,

收稿日期: 2011-06-09; **网络出版时间**: 2012-11-16 11:07

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121116.1107.003.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10802026)

作者简介: 何春涛(1982-),男,四川南部人,博士生,chuntao.he@gmail.com.

为入水空泡流动的研究提供了更加有效的方法和途径. 参考文献[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;参考文献[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;参考文献[18]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. 垂直入水是一个非常复杂的流动过程,其流动现象与运动体的结构形态密切相关. 目前关于入水空泡研究的公开文献中, 大多都以具有较好几何对称性的球体为研究对象.

本文对 140°锥角圆柱体和平头圆柱体垂直入水过程进行试验研究,分析入水空泡的生成、发展和空泡闭合等流动现象;以及通过 140°锥角头型圆柱体带攻角垂直入水分析运动体与空泡壁面之间发生碰撞对空泡壁面稳定性的影响;并通过不同速度垂直入水试验,研究了垂直入水空泡闭合方式与垂直入水速度之间的关系等.

1　试验系统与模型参数

垂直入水试验系统示意图如图 1 所示,主要包括水槽、发射平台、高速照相机、计算机、光源、发射支架、毛玻璃和底部防护装置等.

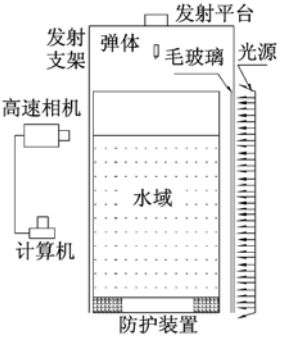
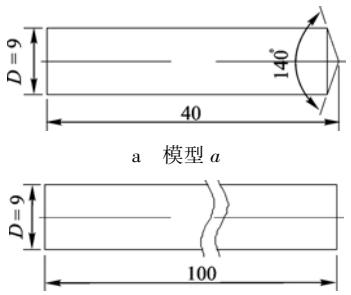


图 1　垂直入水试验系统

水槽如图 1 所示(550 mm × 550 mm × 1 000 mm)由强化玻璃粘结而成,边缘粘结处由铝合金支架加固处理,四周玻璃壁厚 10 mm,底部玻璃厚 15 mm. 在水槽底部铺有 4 层 8 mm 厚铝合金板和 5 层 4 mm 厚度塑料胶皮作为底部防护. 为了避免试验过程中发射支架对水域产生扰动,发射支架与试验水槽相互独立.

垂直入水是一个瞬态过程,高速照相机的拍摄速度和良好的光源是试验成功的关键因素之一. 本文试验采用 FASTCAM SA5 高速照相机,并以 10 000 帧/s 的速度对整个入水过程进行拍摄,采用 6×1 000 W 的光源点阵组成平行光源,并将平行光源通过毛玻璃,使其具有良好的成像效果.

试验模型如图 2 所示,分为模型 a 和模型 b 两种试验模型. 模型直径 $D=9$ mm,模型 a 为头部带 140°锥角的圆柱体,长度为 40 mm, 密度为 7.85 g/cm^3;模型 b 为平头圆柱体,长度为 100 mm, 密度约为 0.83 g/cm^3.



a　模型 a

b　模型 b

图 2　垂直入水试验模型

2　试验结果与分析

2.1　入水空泡发展过程试验分析

图 3 为模型 a 以初始高度 $H_0=0.38$ m 自由下落所形成的入水空泡随时间变化过程的部分试验照片,入水速度 $u_0\approx\sqrt{2gH_0}=2.75$ m/s,取模型

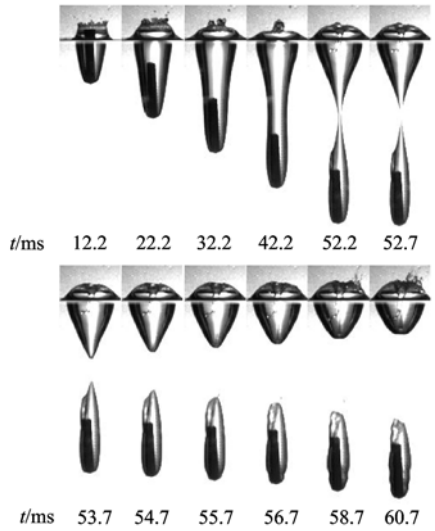


图 3　模型 a 垂直入水空泡变化过程

头部撞击水面时为零时刻. 由图 3 中试验照片可以看出,空泡的整个发展历程经历了从运动体撞击水面后空泡流动的形成、空泡充分发展、空泡壁面扩张到最大直径后开始闭合到最后空泡完全闭合的整个过程. 从图中 $t=12.2$ ms 试验照片可以看出,在模型头部撞击水面以后,在水面以上形成一层透明水幕,即喷溅[1],在靠近喷溅的上边缘有不透明的区域,并出现破碎的水花. 随着时间的推移,喷溅先是向上和向外迅速运动,当向外扩张速度减小到零时开始向中间收缩,最后在入水点上方汇聚到某一点,并形成一个拱形圆顶,如图 3

中 $t=52.2$ ms 时刻所示.

在对图3中垂直入水空泡的生成过程的试验观察的基础之上对试验系统(模型和水)进行受力分析. 试验过程中采用自由落体方式产生入水初始速度,因此试验初始时刻模型和水域均处于静止状态,整个系统只受重力作用. 在下落过程中,模型以重力加速度加速,最后撞击水面使撞击点附近的水域开始运动,并形成入水空泡. 在形成入水空泡的过程中模型本身也受到水介质的阻力作用. 从能量的角度分析,初始时刻系统只具有重力势能,当形成入水空泡后,模型和水域均处于运动状态,具有一定的动能. 通过能量守恒可以看出,垂直入水空泡的流动过程也是一个动能与势能之间相互转换的过程. 具体转换途径为模型头部撞击水面将动能传递给撞击点附近的水域,在动能的作用下该水域具有了头部外表面法线方向的速度分量,随着运动体的继续运动流体被排开,并在肩部与头部外表面发生分离,由于本文所采用的试验模型头部与主体部分通过锐边过渡,促使了流体在模型肩部过渡处的分离.

为了便于描述可以将充分发展的垂直入水空泡分为自由液面附近段、中间主体段和模型头部附近空泡部分3段. 第1段在撞击点附近的流体质点受到空气域的环境压强、高速运动的空气动力、表面张力、撞击点附近未扰动水域的静压力以及由于撞击所产生的惯性力等非常复杂的力学环境,同时还包括自由液面等及其复杂的边界条件等,导致该部分空泡极易受到外界因素的干扰. 第3部分空泡靠近流体分离点附近,由于存在直接撞击作用和流动的分离等复杂流动,使得其空泡壁面的运动过程也非常复杂. 而介于自由液面与分离点之间的空泡,由于远离自由液面和流动分离点等扰动因素,主要受到惯性力和周围未扰动水域的静压力,对外界扰动具有较强的抵御能力,空泡壁面主要以径向方向运动. 从图3中 $t=12.2$ ms时刻以后的试验结果也可以看出在充分发展的空泡壁面主要沿着径向迅速扩张.

由图3中 $t=42.2$ ms 时刻空泡轮廓可以看出,空泡壁面在水面以下某一点开始向中心收缩,直到最后完全收缩至中心线上的一点将空泡完全隔断成上下两部分. 入水空泡被分割成两部分的现象最初被定义为空泡闭合,空泡闭合一般发生在自由液面以下某一深度处和在自由液面附近,前者被定义为深闭合,后者被称为表面闭合[19]. 空泡闭合过后,闭合点分别向上和向下运动,当运动到一定程度时分别出现指向空泡内部的两股高速射流. 如图中 $t=55.7$ ms 时刻及以后的整个流动过程中,均可清晰的看到有指向空泡内部的两股射流,并且射流的速度远高于运动体的速度.

由图3中试验照片可以发现另一个现象,在自由液面上喷溅闭合过后在重力作用下逐渐下降至水平面,但在 $t=42.2$ ms 时刻以后已经完全闭合的圆拱形透明喷溅再次向外扩张. 出现该现象的主要原因是由于喷溅完全闭合后隔断了空泡与外界之间的空气流通,同时深闭合发生过后闭合点向上迅速运动使得空泡体积被迅速压缩,最终导致喷溅再次膨胀.

在图3所给出的试验结果中,运动体在后期与空泡壁面发生碰撞. 为了进一步研究运动体与空泡壁面发生碰撞对空泡稳定性的影响,利用模型 a 进行带攻角低速垂直入水试验.

2.2 带攻角垂直入水空泡稳定性分析

为了能够清晰的描述试验结果,建立如图4所示的带攻角垂直入水示意图. 模型 a 带攻角垂直入水,其重心运动轨迹为竖直向下;定义模型中心线与重心运动轨迹之间的夹角 α 为入水攻角,重心轨迹线与水平面之间的夹角 $\xi=90^\circ$ 为轨道角[20].

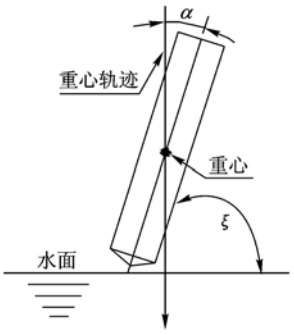


图4 模型倾斜入水示意图

模型 a 带攻角垂直入水过程不同时刻试验照片如图5所示,取模型头部撞击水面瞬间为零时刻. 由图中 $t=9.8$ ms 时刻试验照片可以看出,在入水早期阶段,只有模型头部与水接触并形成透明的入水空泡. 随着模型的进一步向下运动,当模型尾部运动到空泡入口处时,其尾部一侧与空泡壁面发生碰撞,该现象从图中 $t=17.8$ ms 时刻照片可以看出. 并从后面的试验照片可以看出,在碰撞发生过后模型尾部一直在空泡壁面滑行,并形成一个新的空泡. 模型头部所形成的空泡和尾部碰撞所生成的空泡相贯,形成一条空间的相贯曲线. 通过对整个入水过程的空泡试验照片分析不难发现:从入水空泡形成到充分发展阶段,模型尾部与空泡壁面之间的碰撞对空泡的稳定没有明显

的影响;当空泡趋于闭合时,由于两个空泡在形成过程不同步,因此,在交界线上最先出现较为复杂的流动现象,直接影响空泡的闭合时间、速度和位置.

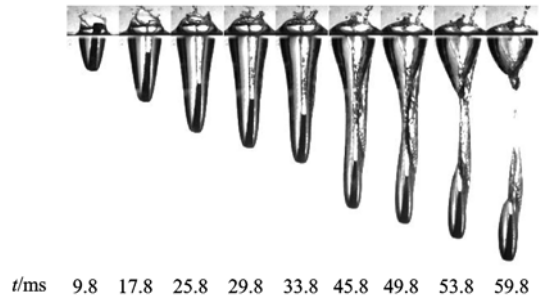


图 5　带攻角垂直入水空泡

2.3　垂直入水空泡闭合方式试验

图 6 和图 7 为模型 b 分别以 3.75 m/s 和 56 m/s 的速度 v 垂直入水空泡试验照片. 由图 6 中试验结果可以看出模型 b 在垂直入水过程中,空泡经历了从最初的流动形成到充分发展到最后趋于闭合的整个过程,与图 3 中低速垂直入水试验结果不同之处在于,该处空泡深闭合发生在模型外表面上. 闭合点在模型表面迅速向两相反方向迅速移动,离开模型尾部后形成一股向上的高速射流.

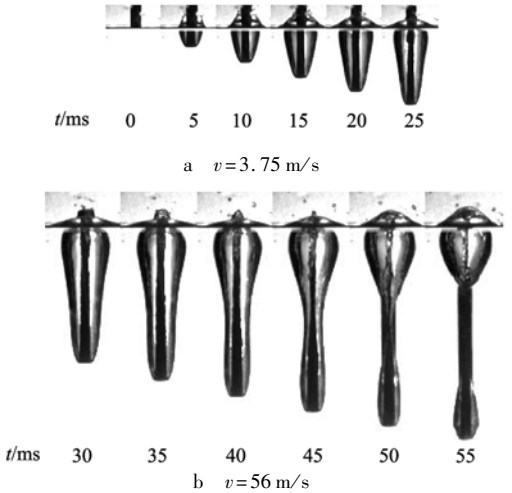


图 6　低速垂直入水空泡形态

由图 7 中可以看出,模型 b 以较高速度垂直入水所生成的空泡在紧靠自由水面下方迅速发生闭合,即表面闭合. 表面闭合在发生完成瞬间,空泡的上端上与未扰动自由液面相切,如图 7 中 t = 2 ms 时刻试验照片所示. 空泡表面闭合发生完成后,上端面迅速向下移动,同时形成向下的高速射流. 向下的高速射流直接作用在模型尾部和空泡尾端壁面上,直接影响到空泡和运动体的稳定性.

通过图 6 和图 7 的对比可以发现模型 b 以

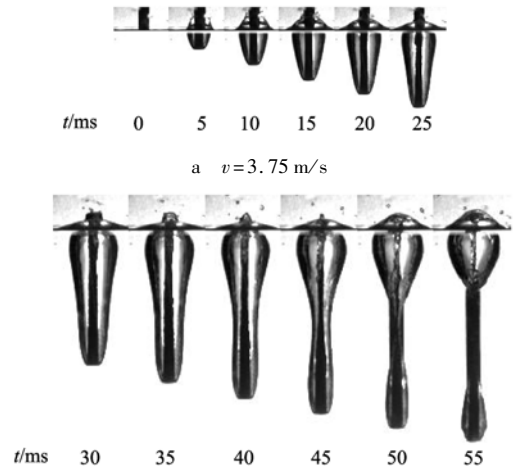


图 7　高速垂直入水空泡形态

3.75 m/s和 56 m/s 的速度垂直入水均产生入水空泡,但不同速度入水所产生的入水空泡形态和运动特性均存在一定的差异. 主要差异表现在空泡闭合方式和空泡壁面,如图 6 所示低速垂直入水空泡发生深闭合,形成透明的空泡壁面以及稳定的高速射流;而图 7 中相对较高速度垂直入水空泡闭合发生在自由液面处,空泡壁面出现浑浊现象,以及空泡闭合后所产生的射流较为混乱. 通过以上对比,同时还发现低速和高速条件下的空泡外形具有一定的差异.

图 8 给出了两种速度条件下某一时刻空泡形态对比结果. 由图中可以看出,低速垂直入水空泡主体轮廓趋近于一条倾斜直线,且在模型 a 的试验结果中也可以看出类似的结果;而高速入水空泡轮廓接近于光滑椭圆曲线.

通过以上试验对比结果表明垂直入水速度对入水空泡的闭合方式、形态、稳定性和空泡闭合所引起的射流及其稳定性等具有重大影响.

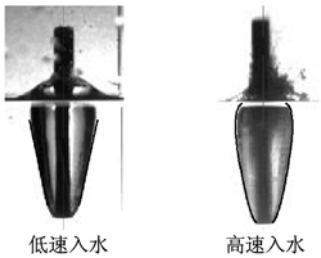


图 8　空泡形态对比结果

3　结　论

本文通过对两种不同试验模型进行不同姿态和速度的垂直入水试验研究,分析了垂直入水空泡的生成、发展和闭合过程以及空泡稳定性等,并得出以下结论:

1）本文所开展的入水试验速度范围内，均产生垂直入水空泡，空泡发展过程经历了流动形成阶段、空泡充分发展阶段和空泡闭合阶段等，最后空泡完全脱落；

2）低速入水易形成清晰的空泡壁面，且空泡主体轮廓趋于倾斜直线，而高速入水空泡壁面出现模糊状，空泡轮廓近似为光滑椭圆曲线；

3）低速垂直入水空泡易于在自由液面以下某一深度发生空泡闭合，即深闭合；而高速垂直入水空泡易于在自由液面处发生空泡闭合，即表面闭合；

4）低速运动体与空泡壁面发生碰撞会使空泡壁面出现局部畸变，且在空泡充分发展阶段对空泡稳定性没有明显的影响，但在空泡闭合阶段会导致空泡壁面运动失稳.

参考文献（References）

[1] Worthington A M, Cole R S. A study of splashes [M]. New York: Longmans Green and Company, 1908

[2] Worthington A M, Cole R S. Impact with a liquid surface [J]. Trans Roy Soc, 1897, 189A: 137-148

[3] Worthington A M, Cole R S. Impact with a liquid surface [J]. Trans Roy Soc, 1900, 194A: 175-199

[4] Waugh J G. Water-entry pitch modeling [J]. Journal of Hydrodynamics, 1968, 2(2): 87-92

[5] Birkhoff G, Caywood T E. Fluid flow patterns [J]. J Appl Phys, 1949, 20: 646-659

[6] Birkhoff G, Isaacs R. Transient cavities in air-water entry [R]. Tech Rep 1490. 1951. Navord Rep, 1951

[7] Birkhoff G, Zarantonello E H. Jet, wakes, and cavities [M]. New York: Academic Press Inc, 1957: 1-353

[8] Glibarg D, Anderson R A. Influence of atmospheric pressure on the phenomena accompanying the entry of spheres into water [J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19(2): 127-139

[9] May A. Review of water-entry theory and date [J]. Journal of Hydrodynamics, 1970, 4(4): 140-142

[10] May A, Woodhull J C. Drag coefficients of steel spheres entering water vertically [J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19: 1109-1121

[11] May A. Effect of surface condition of a sphere on its water-entry cavity [J]. Journal of Applied Physics, 1951, 22: 1219-1222

[12] May A, Woodhull C J. Drag coefficients of steel spheres entering water vertically [J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19: 1109-1121

[13] May A. Water entry and the cavity-running behavior of missiles [R]. Washington: AD A020429, 1975

[14] Glasheen J W, Macmahon T A. A hydrodynamic model of locomotion in Basilisk Lizard [J]. Nature, 1996, 380(28): 340-342

[15] Glasheen J W, Macmahon T A. Vertical water entry of disks at low Froude numbers [J]. Phys Fluids, 1996, 8(8): 2078-2083

[16] Glasheen J W, Peters Ivo R, Gordillo J M, et al. Supersonic air flow due to solid-liquid impact [J]. Phys Fluids, 2010, 2: 1-5

[17] Aristoff J M, Bush J W M. Water entry of small hydrophobic sphere [J]. J Fluid Mech, 2009, 619: 45-78

[18] Cyril D, Christophe Y, Christophe C, et al. Making a splash with water repellency [J]. Nature Physics, 2007, 3: 180-183

[19] Abelson H I. Pressure measurements in the water-entry cavity [J]. J Fluid Mech, 1970, 44(1): 129-144

[20] Waugh G, Harold A E, Thomas E P. Hydroballistics modeling [R]. Naval Undersea Center, California: AD-A007 529, 1975

[21] Glibarg D, Anderson R A. Influence of atmospheric pressure on the phenomena accompanying the entry of spheres into water [J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19(2): 127-139

（编　辑：张　嵘）