

文章编号: 1000-4750(2019)09-0237-10

空心圆柱低速垂直入水试验研究

侯 宇, 黄振贵, 陈志华, 罗驭川

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏, 南京 210094)

摘 要: 为获得空心圆柱垂直入水空泡演化规律和运动特性, 利用高速摄像技术对其低速垂直入水过程进行了试验研究。通过对空心圆柱体入水空泡的演化过程的观察和运动参数的测量, 讨论分析空心结构对空泡形态演变的影响和不同入水速度下空泡演化过程和模型运动阻力变化。结果表明: 空心结构诱发通孔射流使深闭合下的空泡壁由点分离形式变为线分离, 出现新的空泡壁收缩形式, 运动体尾部出现环状空泡, 稳定状态空泡出现气泡分阶段脱落和“云化”现象; 入水速度的增加使入水空泡由深闭合变为面闭合, 空泡体积随入水速度变化较为明显, 尾部气泡因空泡稳定状态的不同呈现不同脱落形式; 通孔射流顶部存在小气泡, 顶端液滴近似落体运动, 表面张力对射流整体运动影响较小; 孔中内流的产生有助于物体运动的稳定, 物体水中阻力因入水速度不同短时间内产生两类变化, 速度增高阻力曲线拐点增多。

关键词: 空心圆柱; 入水试验; 空泡演化; 通孔射流; 动态特征

中图分类号: O35 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.08.0440

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE LOW SPEED VERTICAL WATER-ENTRY OF HOLLOW CYLINDERS

HOU Yu, HUANG Zhen-gui, CHEN Zhi-hua, LUO Yu-chuan

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

Abstract: To reveal cavity evolution rules of the low speed vertical water-entry of hollow cylinders, an experiment was conducted incorporating high-speed video cameras and the visualization technique. According to the images of the flow patterns and motion parameters, the effects of hollow structures on cavity pinch-off, bubble evolution and velocity changes were addressed during the water-entry process. The results show that the deep-closed cavity at low water-entry speed collapses to an arc line between through-hole jets and cavitating flow instead of a point under the free surface. Therefore, the bubble shedding in steps, annular cavity on the jet and cloud cavity are observed at the stabilization stage of the cavity. The increase of water-entry velocity makes the cavity change from deep-closure to surface-closure with the cavity volume changed and different shedding patterns of the tail bubbles. The surface tension around the droplet presents minor effects on the overall motion of jets with a small bubble, which is approximately regarded as toss motion under gravity. The inflow in the hole contributes to the stability of the movement and the resistance curve has two types of changes and more inflection points with higher water-entry velocities.

Key words: hollow cylinder; water-entry experiment; cavity evolution; through-hole jet; dynamic characteristic

收稿日期: 2018-08-05; 修改日期: 2018-11-04

基金项目: 瞬态物理国家重点实验室基金项目(614260403041803, 61426040303162604004); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(30917012101); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX19_0259)

通讯作者: 黄振贵(1986—), 男, 广西人, 博士, 主要从事水下航行体研究(E-mail: hzkeylab@njjust.edu.cn).

作者简介: 侯宇(1993—), 男, 江苏人, 博士生, 主要从事水下航行体研究(E-mail: houyu@njjust.edu.cn);

陈志华(1967—), 男, 湖南人, 教授, 双博士, 博导, 主要从事流体动力研究(E-mail: chenzh@mail.njust.edu.cn);

罗驭川(1994—), 男, 陕西人, 硕士生, 主要从事水下航行体研究(E-mail: 2301690025@qq.com).

物体以一定速度穿越自由液面入水过程中存在强烈的气液固三者相互耦合作用, 会裹带空气而出现入水空泡、喷溅、射流^[1-2]等物理现象。空心结构体即通孔结构体, 因其结构的特殊性入水瞬间物体内外均会出现复杂的流场变化, 且通孔尺寸的大小、数量、样式和开设位置等对运动体水中航行阻力、隐身性能和弹道稳定性等均产生重要影响, 故对空心结构体入水问题的研究对空投鱼雷、潜艇流水孔和排水孔、空投声纳浮标等结构的设计和改进有着重要的意义。

入水问题的研究始于 19 世纪末, Worthington^[1-2]利用闪光照相机对刚性球体垂直入水过程中入水空泡、喷溅等现象进行试验研究; Gilbarg 等^[3]研究了不同入水速度和大气压力对球体入水空泡的影响; Richardson^[4]对球体垂直入水空泡和阻力特性进行了试验研究; May 等^[5-6]研究了入水速度、环境密度和压力、球体尺寸和表面亲水性等参数对钢质球体入水空泡的形态及发展过程的影响, 给出不同尺寸的球体以及不同速度入水的阻力系数; Duez 等^[7]、Aristoff 等^[8]、Korkmaz 等^[9]分别对不同亲水性表面和不同亲水程度的球体和柱体进行了入水对照试验研究; Truscott 等^[10-11]针对不同旋转角度条件下球体入水问题开展了大量的试验研究, 估算了球体入水过程的升力和阻力。

近年来随着研究的深入, 研究对象的结构和材料也日趋复杂。陈先富^[12]针对三种不同形状的弹头在不同入水速度条件下的空穴流动现象开展了入水试验研究; 何春涛等^[13-14]开展了球体、圆锥和圆柱体等回转体不同入水速度垂直入水空泡研究; Truscott 等^[15]总结回顾了球体及钝头、尖头和平头等不同头型柱体入水的试验研究; 路中磊等^[16]对开放空腔圆柱壳体垂直入水的流场结构、流体动力特征及入水空泡流动特征进行了大量的实验研究; 蒋运华等^[17-18]对圆盘空化器航行体开展约束情况下入水过程的实验研究, 分析了弗劳德数、入水角度和通气率对空泡尺寸、喷溅闭合时间和位置的影响。相比而言对空心结构的入水问题研究较少, 公开的文献可知最早 Tseitlin^[19]将两平板间流体流动的解决方法应用到带通孔的圆盘的流体特性研究; Deinekin^[20]对带通孔结构空化器进行了数值研究; Savchenko^[21]通过水洞实验系统研究了不同孔径的圆盘空化器的阻力特性, 得出阻力系数和附加质量之间的关系。对空心结构流体流动特性研究较为深

入是在空心弹^[22-23]的研制中, 但也仅限于单一介质。空心结构体入水过程存在多相耦合作用, 且内外均存在复杂流场, 研究难度较大。

基于此, 本文采用空心圆柱进行低速垂直入水试验研究, 详细描述空心圆柱低速入水和流场变化过程, 讨论并分析通孔结构对运动体周围流场结构和入水空泡演化过程的影响; 对比分析不同入水速度空心圆柱体入水运动规律, 以期对入水空心弹、舰船和潜艇底部空心结构、空投声纳浮标等结构的设计和改进提供一定的实验指导和理论基础。

1 试验系统与模型参数

1.1 试验系统

高速摄影测量技术以其直观性强、易实现等特点被广泛应用于瞬态流动现象的试验研究。因此, 本文基于该技术建立入水试验测量系统对空心圆柱体低速垂直入水过程进行试验研究。

实验系统如图 1 所示, 实验设备主要包括: FASTCA 高速摄像机、数据采集计算机、玻璃缸 (1000 mm×700 mm×1000 mm)、发射平台、可升降平台支架、水平测试仪、两盏 2600 W 新闻灯、底部防护装置和若干插线板等。

实验采用重力作为试验体发射动力, 温度 15 ℃ 自来水为实验流体, 水深 0.8 m, 实验玻璃缸采用透光性较好的超白玻璃粘结而成, 玻璃壁厚 15 mm, 底部采用 15 mm 厚减震硅胶板作为防护装置。试验模型由电磁铁吸附在发射平台上, 平台支架可自由升降改变模型落下高度以实现不同速度入水。电磁铁断电后, 模型由平台自由落体进入实验水域, 同步启动高速摄像机对入水过程进行拍摄记录。考虑

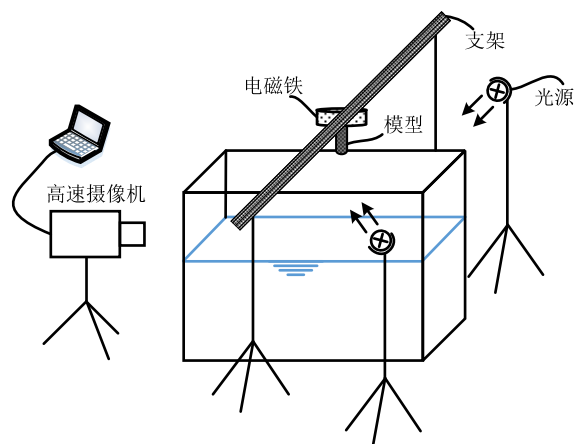


图 1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic of experimental setup

到模型入水速度、空泡演化周期和水域范围,高速相机拍摄参数设置为:拍摄频率 2000 fps、曝光时间 20 μs 、图片分辨率 1280 \times 800。实验时采用两盏 2600 W 新闻灯对实验水域照明,以增强照片的可视程度。

1.2 模型参数

试验模型如图 2 所示,为两端开放的管状通孔结构体,材料为 45 号钢,具体参数如表 1 所示。

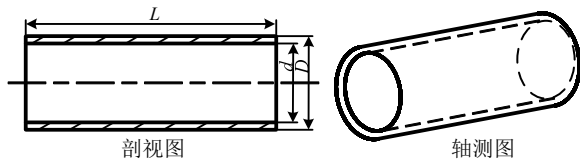


图 2 入水模型示意图

Fig.2 Schematic of water-entry model

表 1 模型详细尺寸

Table 1 Details of model size

外径 D/mm	内径 d/mm	长度 L/mm	空心圆柱长径比 L/D	通孔长径比 L/d
30.0	25.3	80.0	2.667	3.162

2 入水空泡形态演化分析

2.1 空心圆柱垂直入水现象描述

为深入研究通孔结构影响下入水空泡生成机理及演化过程,首先开展空心圆柱体以速度 2.84 m/s 垂直入水试验研究,图 3 与图 4 为其入水空泡形态变化过程。为便于分析,根据空泡演化特征将空泡形态变化过程分为撞击、开空泡、空泡闭合和航行体带空泡运动四个阶段进行讨论研究。

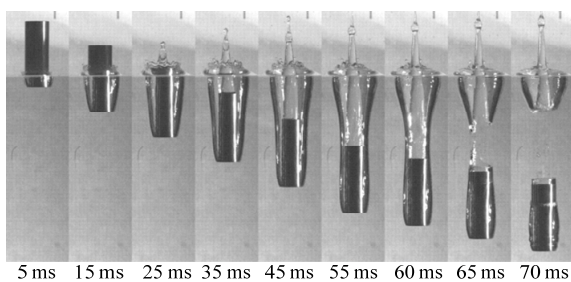


图 3 垂直入水空泡形成过程

Fig.3 Development of vertical water-entry cavity

撞击阶段指物体由空气进入水中的瞬间,发生在自由液面附近。物体撞击水面时受头部挤压的流体分别产生水平向内和向外的速度,因空心结构分为孔内流和外流两区域。外流一部分运动出液面形成一层环绕模型的透明光滑水幕,即“喷溅”现象,另一部分继续向外扩展形成包裹模型的空泡;内流受通孔约束沿着孔内壁向后流动形成射流,通孔射

流是空心结构体入水过程中特殊的现象。通孔射流于 0 ms 模型撞击液面时形成,约 20 ms 时运动至模型底部,25 ms 时穿出通孔并穿过水幕,其几何外形较为规则,顶端存在球状气泡。

开空泡阶段是入水空泡生成、扩展、延伸、收缩直至闭合的过程,物体撞击水面将水排开,模型头部获得冲击动能的流体一部分经通孔射出形成通孔射流,另一部分向外扩展形成包裹柱体的空腔,被模型裹带的空气进入空腔形成入水空泡。空泡壁随后减速扩展,在约 25 ms 时空泡壁达到最大直径(约 1.41 D),约 35 ms 时空泡壁出现凹陷并逐渐收缩,约 60 ms 时与通孔射流液柱发生碰撞而形成闭合的空泡。

空泡闭合阶段是入水空泡在水下形成独立封闭空腔的过程。空泡壁扩展速度衰减为零后,附近水域势能转化为动能,空泡壁反向加速并在液面下某一位置发生闭合,参考实心圆柱体低速入水的闭合方式^[13]可将其称作深闭合。相比传统深闭合中空泡壁收缩至液面下某一点的闭合分离方式,这里收缩至射流液柱上某条圆弧线发生闭合分离,并且射流为分离的空泡壁进一步收缩提供类似导轨的作用,分离的上下空泡壁均沿着射流液柱继续收缩。上部分空泡壁收缩至自由液面将包裹的空气排出,附近水域流体势能转化成动能,流体速度未衰减为零并在重力作用下继续向上做减速运动,在约 105 ms 时形成二次射流,相比通孔射流,二次射流平均体积较大,范围较大,且没有较为规则的外形轮廓,如图 4(b)中射流对比。

下半部分空泡壁向下收缩形成的空泡包裹圆柱体向下运动即航行体带空泡运动阶段,约 70 ms 形成较为稳定的半包裹空泡,过程中空泡整体轮廓较为稳定,局部存在波动。空泡壁顺着液柱向下收缩经模型底部端面时,受到壁面剪切出现进一步分离,在尾部形成一个套在通孔液柱上的环状空泡,由于分离出空泡较小且空泡两侧流体均相对模型向上流动而拉长空泡壁,实验拍摄的二维图只显示两条细长的“尾巴”,如图 4(c)。模型继续向下运动,约 95 ms 时模型尾部距液面约 2.31 L 处出现分阶段空泡脱落的现象,先是大簇空泡脱落,后沿着“尾巴”处小气泡脱落形成小气泡脱落区,区域宽度与模型外径近似相同。脱落的气泡来源概括为两部分,一是从包裹模型的外空泡尾部边界顺着固壁分离而脱落的气泡,二是入水时向孔内壁扩展形成的

孔内空泡随着入水深度的增加被增大的水压挤出通孔而脱落的气泡。孔内空泡的演化过程因模型的非透明性无法拍摄记录，这里不作讨论。物体继续运动空泡尾部壁面会逐渐出现扰动如图 4(c)，出现类似文献[16]中的“云化”现象，且扰动的范围逐渐增大并向空泡头部传播。同时空泡尾部处向上存

在小气泡脱落，向下存在向内翻卷的回射流，两者皆顺着模型固壁运动。整个过程中亦发现自空泡闭合后模型运动轨迹发生微小偏转，两方面原因：一是空泡壁闭合收缩时对模型底部冲击带来的小扰动；二是尾部气泡的不对称脱落和空泡尾部壁面的紊流致使模型底部水域压力不均匀变化。

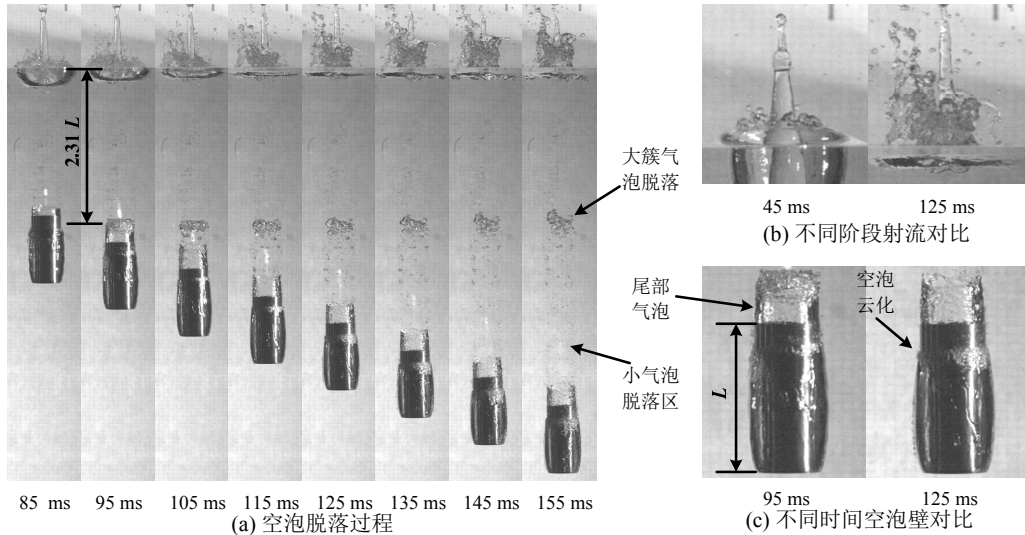


图 4 航行体带空泡运动阶段

Fig.4 Evolution of cavities attached to model

由上述演化过程可知，空心结构的存在使得运动体入水瞬间的流场结构更加复杂，通孔射流的形成改变了深闭合下空泡壁分离方式，建立了一种新的空泡壁收缩形式，使得运动体尾部出现环状空泡，包裹模型的空泡出现明显分阶段气泡脱落和“云化”现象。

2.2 入水速度对入水空泡流动特征影响

为了探究入水速度对空心圆柱体入水空泡演化的影响，通过改变模型的自由落体高度来改变入

水速度，进一步开展空心圆柱体的低速入水试验。对比不同速度入水空泡演化特征，分别从空泡闭合方式、空泡稳定形态和空泡脱落方式三个方面作对比分析。

2.2.1 空泡闭合方式

根据入水速度不同闭合方式可大致分为两种，如图 5。入水速度较低时模型以深闭合为主，闭合点位于水面下某处，并且随着速度的减小，闭合点不断由尾部液柱向模型壁面移动。入水速度较高时

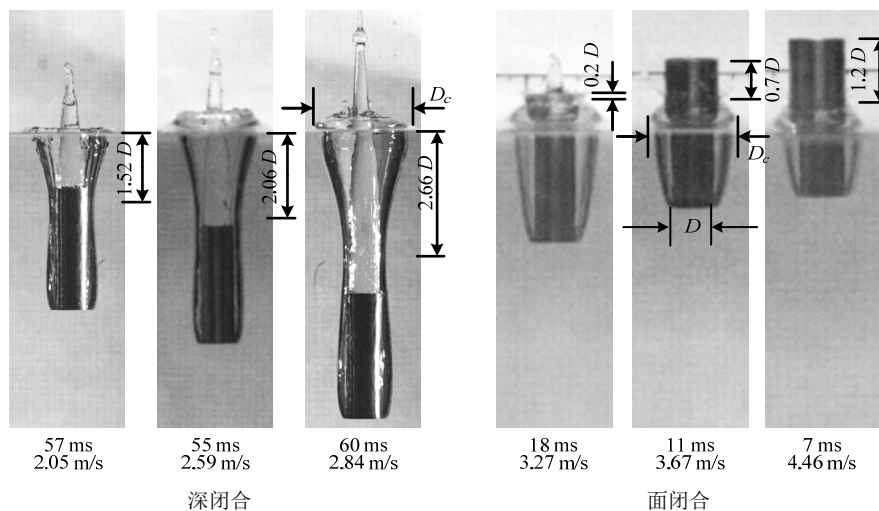


图 5 不同入水速度空泡闭合方式对比

Fig.5 Different pinch-off types of cavities with different entry velocities

模型以面闭合为主, 闭合发生在自由液面附近, 由喷溅形成的水幕收缩撞击在模型壁面产生空泡闭合。如图 5(b), 撞击点会随着速度的降低逐步由模型头部向尾部移动, 闭合的速度变慢, 闭合时间延长。3.27 m/s 时的撞击点已接近模型尾部, 此时空泡闭合接近临界状态, 若速度继续降低, 模型会穿过水幕收缩形成的穹顶, 从而转变成面闭合方式到深闭合方式的过渡阶段。

图 6 为不同入水速度入水过程中水面处空泡截面无量纲直径随时间的变化图。水面处流体质点受运动体头部挤压获得沿模型径向向外的分速度, 在空泡内部和周围水域压差的作用下做减速运动。空泡先是向外扩展, 动能转化为势能, 速度为零后反向加速空泡收缩, 势能转化成动能。深闭合下 (<3.27 m/s), 运动体入水速度较低, 传给流体质点的动能较少, 流体质点获得的径向分速度较低, 空泡扩展和收缩均较为缓慢, 表现在整个过程耗时较长 (>80 ms), 且耗时会随着入水速度增大而增大。面闭合下 (≥ 3.27 m/s), 较高的入水速度使得随运动体进入空泡内部的气体流速远高于水面上空气流速, 导致喷溅内外存在较大的压力差, 空泡扩展后于水面处迅速收缩闭合, 整个过程耗时较短 (<50 ms), 且随着入水速度增大时间会进一步缩短。

除此, 深闭合后分离的上部分空泡壁会包裹部分空气向水面收缩上浮, 形成的短暂高压会再次挤压水面处扩张的空泡。流体质点会再次获得动能进一步向外运动, 出现二次扩张现象, 对应图 6 中 60 ms 左右空泡截面直径二次增大的过程, 故深闭合下水面处空泡截面大部分在二次扩张时达到最大直径。而面闭合下空泡截面直径仅在 30 ms 左右有所波动, 整体呈下降趋势, 故面闭合时水面处空泡截面最大直径取决于空泡初始扩张阶段, 入水速度

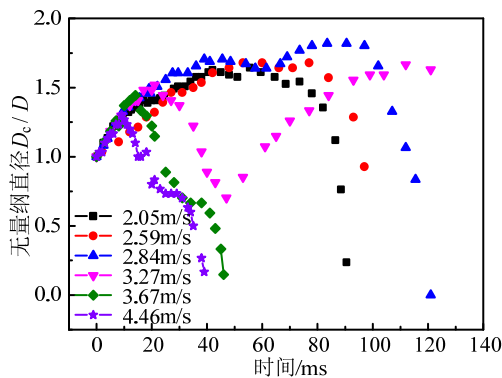


图 6 水面处空泡截面无量纲直径变化

Fig.6 Non-dimensional diameters of cavities on free surface

越高, 空泡扩展收缩越快, 空泡截面最大直径越小。

图 7 为入水速度 3.27 m/s 时空泡演化实验图, 该过程空泡先于约 20 ms 时发生面闭合, 后约 60 ms 时又发生深闭合。面闭合形成的空泡扩张收缩迅速, 后继续随着模型继续向下运动, 深闭合会分离出一部分空泡在底部水体压力的作用上浮水面, 上浮的空泡包裹的空气会进一步挤压水面处已收缩的流体质点使其反向运动, 收缩的空泡截面再次扩张达到最大直径, 故图 6 中 3.27 m/s 的空泡截面直径变化明显区别于其它曲线, 同时具有面闭合和深闭合的部分特征, 存在面闭合向深闭合转变的阶段特性。

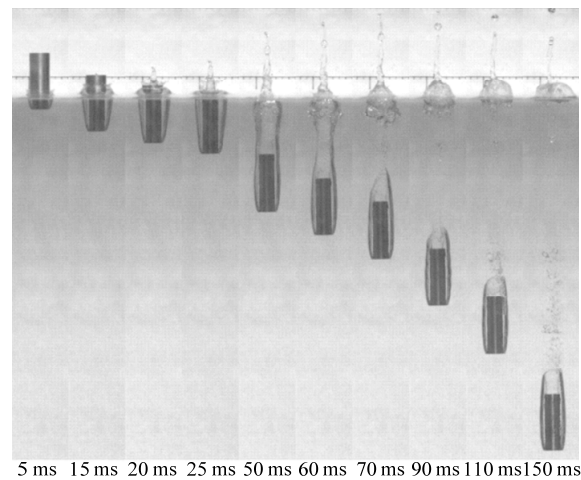


图 7 入水速度 3.27 m/s 空泡演化实验图

Fig.7 Cavity formation with entry velocity of 3.27 m/s

2.2.2 空泡稳定状态

严格来讲物体入水运动过程中空泡会随时间而变化, 不可能处于完全稳定的状态。试验中观察到后期空泡会以一种较为固定的形态包裹模型运动一段时间, 此时空泡长度和空泡截面最大直径均变化较小, 此时称空泡处于稳定状态。

图 8 为不同入水速度空泡稳定状态的对比。深闭合方式下空泡在稳定状态时, 体积较小, 未包裹整个模型, 空泡长度随速度增加而增大, 尾部侧壁

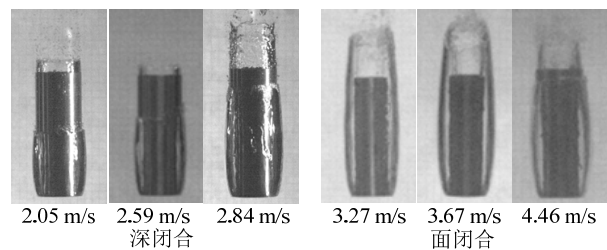
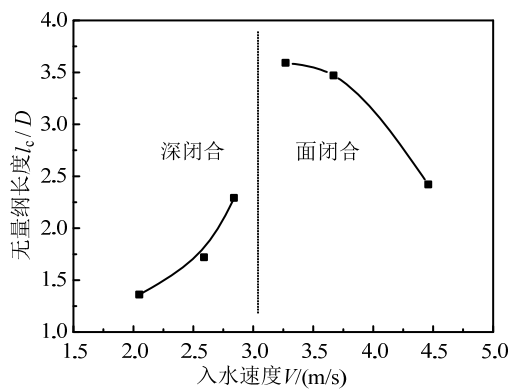


图 8 不同入水速度空泡稳定状态对比

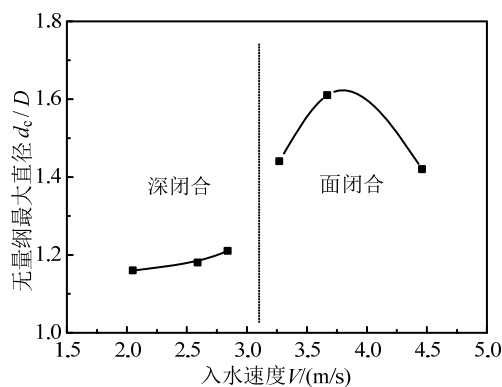
Fig.8 Stabilization stage of cavities with different entry velocities

拖有环状空泡。面闭合下,空泡体积较大,能完全包裹整个运动体和小段射液柱,入水速度继续增大后空泡状态发生改变。

图9是稳定状态下空泡无量纲长度和最大直径随入水速度的变化曲线,可见入水速度对空泡的长度和最大直径影响较大,不同闭合方式下变化趋势各有不同。深闭合下空泡体积变化由入水时空泡扩张速度决定,取决于流体质点获得的初速,模型入水速度越高,流体质点受挤压获得的径向初速越大,空泡扩张越明显,裹带进入空泡的空气越多,故稳定状态下入水速度越高空泡长度和直径越大,相比而言速度对空泡最大直径影响较小。面闭合下空泡体积变化由入水时面闭合的速度决定,如图5(b)所示,入水速度越高,喷溅闭合速度加快,空气没有足够的时间进入扩展的空泡,故形成的空腔随之变小,速度增至4.46 m/s时稳定阶段的空泡已不能包裹运动体。



(a) 空泡无量纲长度



(b) 空泡无量纲最大直径

图9 稳定状态空泡无量纲长度和最大直径

Fig.9 Non-dimensional length and maximum diameter of cavities with different entry velocities

2.2.3 空泡脱落方式

图10为不同入水速度模型运动过程中空泡脱落的对比,深闭合空泡的脱落开始于水下某一深

度,在尾部环形空泡处先是大簇气泡脱落,随后小气泡脱落,因这里存在通孔射流和模型外流的交汇,两部分流体质点速度的不均匀极易形成的涡带走气体,尾部形成一段小气泡脱落区,区域宽度与模型直径近似。面闭合的空泡脱落自闭合后随即发生,随着入水速度的增大变得更加剧烈。脱落的空泡开始是由于喷溅形成的穹顶闭合在模型上后随模型向下翻卷运动后破裂形成的空泡如图8,后是由尾部通孔射流和空泡壁外回射流交汇成涡卷走空腔内气体形成的小气泡,故速度越快气泡脱落的也越明显。

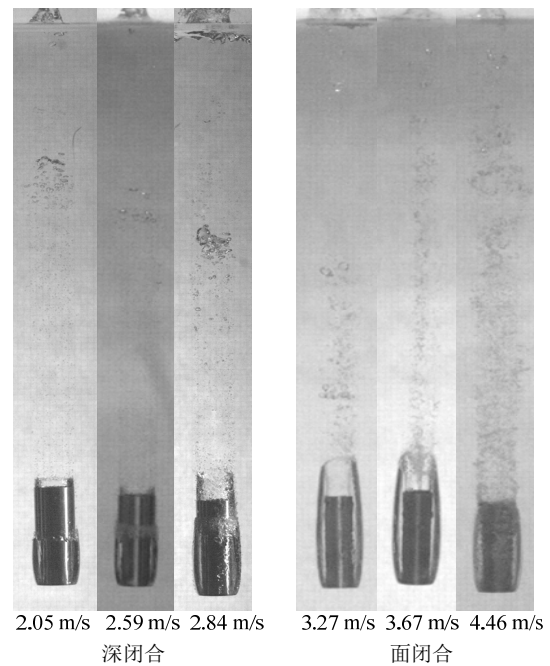


图10 不同入水速度空泡脱落对比

Fig.10 Images of bubbles shedding with different entry velocities

3 动态特征分析

3.1 通孔射流形成机理

通孔射流是空心圆柱入水独有的重要现象。射流由运动体冲击水面形成的喷溅沿孔内壁向外流动形成,二维情形下可将其看作两个并列入水的平板,如图11。内部流体因距内壁远近不同而获得的不同动能,靠壁面的流体质点最先受模型挤压,流动较早,相同时刻流体竖直方向的分速度从内壁面至中心轴处递减,故在中心处形成内凹的空腔。运动过程中,最先受挤压的流体质点因其径向向内的分速度会逐渐靠近,两者接触后发生闭合即形成射流顶端的气泡。运动中顶部微团在表面张力的作用下会局部变形,形成一近似球状的液滴如图12。

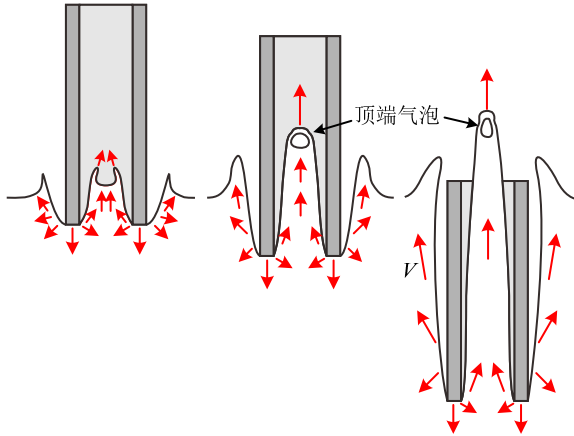


图 11 通孔射流形成示意图

Fig.11 Schematic of through-hole jets formation

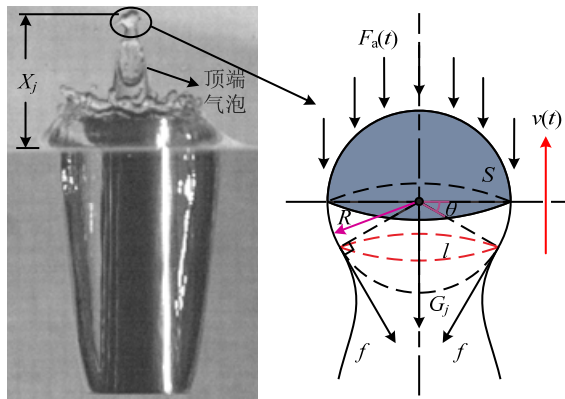


图 12 射流顶端液滴受力示意图

Fig.12 Schematic of force on top droplet of jets

以水面为原点，水面和垂直于水平面方向为坐标轴，其中竖直向上为正。由于整个过程时间较短，为简化计算将射流顶端近似看作一个直径 R 的球形液滴且形状短时间内保持不变。射流出通孔后垂直向上运动分别受重力 G_j 、空气阻力 $F_a(t)$ 、和表面张力 f 作用，如图 12，液滴质量为 M_j ，瞬时速度为 $v(t)$ 。可得：

$$F_a(t) + G_j + f \cos \theta = -M_j \frac{dv(t)}{dt} \quad (1)$$

式中， θ 为张力作用切面与竖直平面的夹角，该值可由实验图像获得，2.1 节的试验中该取值介于 30° 和 90° 之间。

空气阻力 F_a 作用在整个上半球部，低马赫数下空气阻力大小与速度成正比，可得：

$$F_a(t) = -kSv(t) \quad (2)$$

式中： k 为空气阻力系数，低马赫数下可取 2.937； S 为迎风面积； v 为液滴速度。

重力作用在液滴重心，可得：

$$G_j = M_j g = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_w g \quad (3)$$

式中： R 为液滴直径，可由实际拍摄图像近似获得。 ρ_w 为水密度，取 1000 kg/m^3 。 g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2 。

表面张力公式：

$$f = \gamma l \quad (4)$$

式中： γ 为表面张力系数，常温下取 0.0728 N/m ； $l=2\pi R \cos \theta$ 为界面的周长。

结合式(2)~式(4)，并对式(1)进行积分，可近似得到出孔后射流顶端的位移公式：

$$X_j(t) = -\frac{C}{A} e^{-At} - \frac{B}{A} t + X_0 \quad (5)$$

式中： $A = \frac{3k}{4R\rho_w}$ ； $B = g + \frac{3\gamma \cos^2 \theta}{2R^2 \rho_w}$ ；常数 C 和 X_0 由图像中射流初始状态决定。

如图 13 是模型约 2.84 m/s 入水时通孔射流顶端位移实验结果和理论计算结果的比较。理论计算结果与实验数值趋势相符。实际运动中，液滴并不是固定的球体，表面张力在液滴变形后竖直分量会逐渐变小直至为零，故理论推导中液滴阻力计算较实际大，导致位移计算结果偏小。通过改变表面张力切面的夹角计算发现，切面与水平面夹角越大，表面张力的竖直分量越小，数值越接近实验结果，表明表面张力对射流整体运动影响较小，液滴减速阶段近似落体运动。

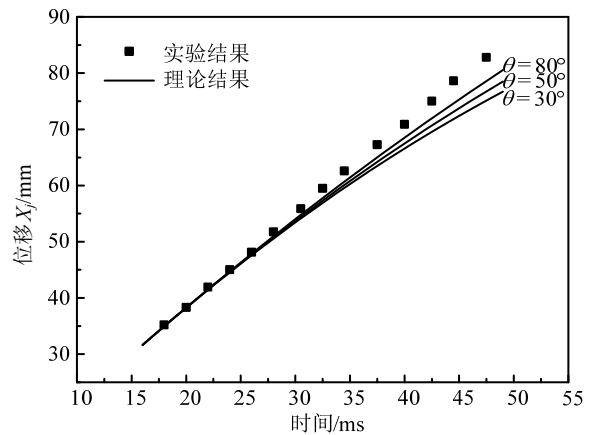


图 13 射流顶端位移变化图

Fig.13 Displacement on top of through-hole jets

考虑到入水瞬间时间较短，表面张力影响较小，针对图 12 射流运动，假定流动是无旋流，可用势函数 ϕ 来简单描述射流整体运动。如图 14 以入水点为坐标原点，模型中心轴为 x 轴，物体运动方向为正向，水面为 r 轴，圆孔径向向外为正向，则有：

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = v_x, \quad \frac{\partial \phi}{\partial r} = v_r \quad (6)$$

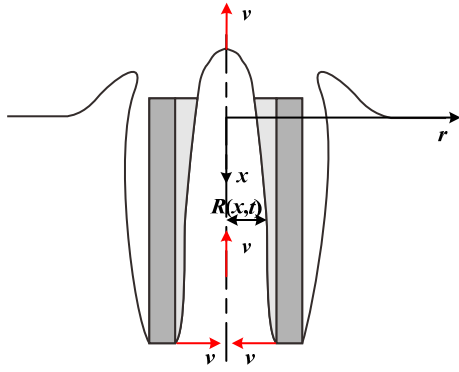


图 14 初始通孔射流运动示意图

Fig.14 Schematic of initial through-hole jets motion

由流动的对称性可推断出中心轴处流体质点只存在轴向速度，表现为射流的轴向拉伸，由模型头部流体流动分离可知在射流与空气边界处流体质点只存在径向速度，表现为射流的径向收缩，即：

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{r=R} = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (7)$$

故入水瞬间，孔中射流运动可看作是模型头部前方的流体受管壁作用，轴向拉伸和径向收缩的过程。

3.2 空心圆柱体运动特征分析

根据 3.2 节实验结果可知空心圆柱低速垂直入水后空泡存在两种稳定形态，对比普通圆柱入水后两种空泡稳定状态作简要的运动稳定性分析，如图 15 所示。

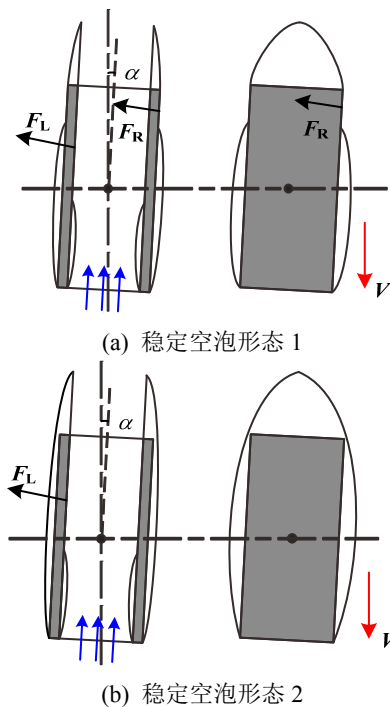


图 15 小扰动下空心圆柱与普通圆柱受力对比

Fig.15 Hollow cylinder and normal cylinder wrapped in cavity with small perturbation

小扰动下假设两种模型运动中均向右偏转小角度 α ，相比之下图 15(a)、图 15(b) 两种情形空心圆柱均会比普通圆柱多一个内流产生的向左回复力 F_L 。参考文献[24]对孔中射流的研究，低速下空心圆柱孔内壁头部因流体流动分离会形成一小段封闭的空腔，内流对内壁的合力 F_L 作用点会偏向模型后半部分，产生的回复力矩有助于模型姿态的调整，可以为空心圆柱水下运动提供较好的稳定性。

考虑到对拍摄图片的位移数据直接微分获得的速度和加速度误差较大，本文采用文献[25]的数据处理方法，利用 MATLAB 软件进行图像处理获得位移坐标，先对其进行 5 阶多项式样条函数拟合后求导获得速度和加速度，其中平均数据点为 300 个，图片辨识度 0.47 mm/px。以模型入水瞬间为时间零点，水面为位移原点，竖直向下为正。为便于分析，引入无量纲速度 u ：

$$u = \frac{V}{V_0} \quad (8)$$

式中： V 是模型瞬时速度； V_0 是模型入水初速。

阻力系数表达式为：

$$C_d = \frac{F}{0.5 \rho_w V^2 A_H} \quad (9)$$

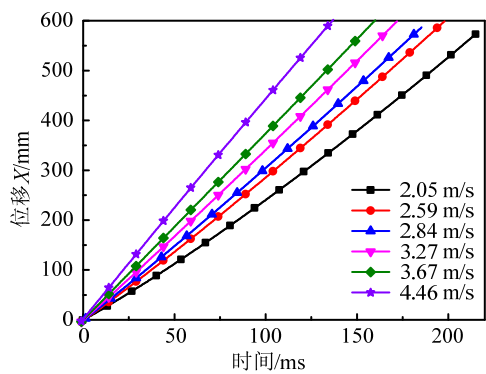
式中： F 为模型总阻力， $F = -ma + mg$ ， m 为模型质量，重力加速度 g 取 9.8 m/s^2 ；水密度 ρ_w 取 1000 kg/m^3 ； A_H 为空心圆柱的横截面积。

图 16 分别给出空心圆柱体不同入水速度下位移、速度、无量纲速度、加速度、阻力系数变化曲线。从图 16(b) 可知模型入水后短时间内速度依旧增加，表明入水瞬间重力对模型加速效果占主导。阻力因入水速度的增加逐渐增大，故速度增幅会逐渐减少。入水速度的变化对后期模型速度变化也产生较大影响。入水速度较小时，后期速度上升明显，随着入水速度的提高，后期速度增幅减少。当入水速度大于 2.8 m/s 时，模型运动速度呈现下降趋势，当入水速度为 4.46 m/s 时，速度基本处于衰减状态。图 16(c) 可知入水速度较低时，速度增幅较大，增速较快，后期速度增幅最高达 50%。随着入水速度的升高，运动速度增幅降低，当入水速度高于一个临界速度后，模型运动速度会显著下降，并逐渐逼近入水速度，入水速度继续增大时，模型整个运动过程基本处于减速阶段，最终速度减幅约达 5%。

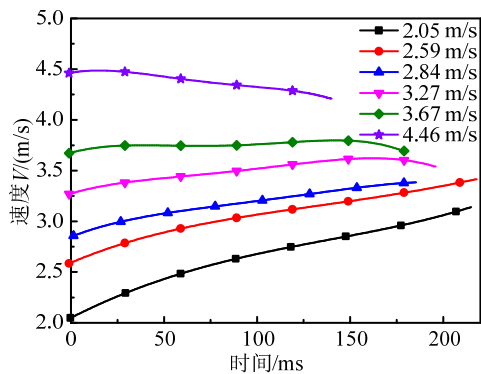
图 16(d) 给出物体加速度变化曲线，物体入水瞬间存在较大冲击，加速度初值并非为自由落体重力

加速度 9.8 m/s^2 ，而是有明显的下降，入水速度越高，加速度下降更明显，表明冲击阻力随入水速度升高而增大。运动中，加速度均有一个先下降后上升的过程，对应图 16(b)、图 16(c)速度增幅的反弹，表明该阶段阻力存在先增大后衰减的过程，由图 16(e)亦可看出，重力依旧占主导地位。入水速度升高使得这个过程逐渐变短，加速度增幅变小，随着入水速度继续升高，加速度下降后出现负值，而且上升不久就进一步下降，可见入水速度对重力和阻力主导地位的变化影响较大。结合图 16(e)阻力系数曲线图可知，整个入水过程阻力系数变化因入水速度的不同出现两类变化。速度较低时变化曲线存在一个拐点，集中在 $60 \text{ ms} \sim 140 \text{ ms}$ 之间，数值在 0.8 上下浮动，速度增加后拐点数目也增加，拐点出现的时间逐步前移，这段时间恰好是空泡闭合向空泡稳定阶段过渡的过程，表明空泡演化过程对运动体阻力变化影响明显。

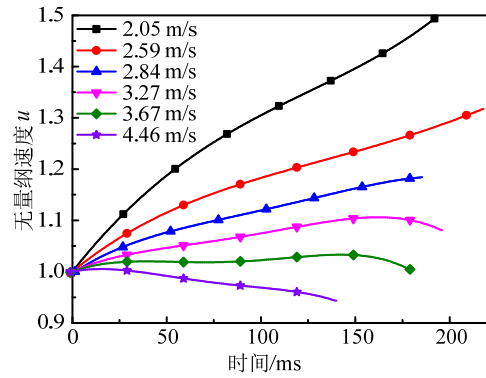
综合可知，入水速度较低时模型运动过程中阻力先增大后减少，加速度先减小后增大，速度缓慢增长后增速变快，增幅较大。入水速度继续升高高于某个临界速度后，阻力减少后会急剧升高，模型逐渐出现反向加速度，后期速度下降趋势较为明显。



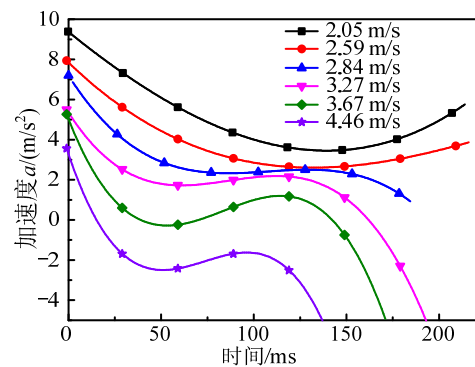
(a) 位移变化



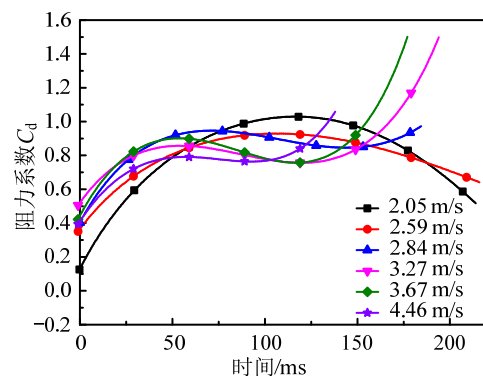
(b) 速度变化



(c) 无量纲速度变化



(d) 加速度变化



(e) 阻力系数变化

图 16 空心圆柱体不同入水速度垂直入水运动参数和阻力系数变化图

Fig.16 Motion parameters for tubular cylinders in vertical water entry with different entry velocities and drag coefficients

4 结论

本文采用高速摄像测量技术，对空心圆柱低速垂直入水过程进行实验研究，分析了不同入水速度下空泡形态演化规律，揭示了空心结构对空泡闭合方式和流场形成的影响，获得了入水运动过程中速度、加速度和阻力系数等参数的变化情况。具体结论如下：

(1) 空心结构诱发的通孔射流改变了深闭合下入水空泡壁的分离方式，由传统的点分离形式变成

线分离形式, 并建立新的空泡壁收缩形式, 运动体尾部出现环状空泡, 稳定状态的入水空泡出现分阶段气泡脱落和“云化”现象。

(2) 入水速度的增加使入水空泡由深闭合方式向面闭合方式过渡, 稳定状态的空泡体积随入水速度变化较为明显, 尾部气泡脱落因空泡稳定状态的不同呈现不同形式。

(3) 通孔射流顶端存在孔内喷溅闭合形成的气泡, 表面张力使得顶端液滴收缩成近似球状且对射流整体运动影响较小, 液滴减速阶段近似落体运动。

(4) 孔中内流的产生有助于物体运动的稳定, 物体水中阻力因入水速度的不同短时间内存在两类变化, 速度较低时阻力先升后降, 运动速度增加较为明显, 入水速度较高时, 冲击阻力较大, 阻力下降幅度较小后急剧上升, 后期速度衰减较为明显。

参考文献:

- [1] Worthington A M. On impact with a liquid surface [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1882, 34(220): 217—230.
- [2] Worthington A M, Cole R S. Impact with a liquid surface studied by the aid of instantaneous photography. paper II [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1900, 194: 175—199.
- [3] Gilbarg 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.
- [4] Richardson E G. The impact of a solid on a liquid surface [J]. Proceedings of the Physical Society, 1948, 61(4): 352.
- [5] May A, Woodhull J C. Drag coefficients of steel spheres entering water vertically [J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19(12): 1109—1121.
- [6] May A. Effect of surface condition of a sphere on its water-entry cavity [J]. Journal of Applied Physics, 1951, 22(10): 1219—1222.
- [7] Duez C, Ybert C, Clanet C, et al. Making a splash with water repellency [J]. Nature Physics, 2007, 3: 180—183.
- [8] Aristoff J M, Bush J W M. Water entry of small hydrophobic spheres [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 619: 45—78.
- [9] Korkmaz F C, Guzel B. Water entry of cylinders and spheres under hydrophobic effects; Case for advancing deadrise angles [J]. Ocean Engineering, 2017, 129: 240—252.
- [10] Truscott T T, Techet A H. Water entry of spinning spheres [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 625: 135—165.
- [11] Truscott T T, Techet A H. A spin on cavity formation during water entry of hydrophobic and hydrophilic spheres [J]. Physics of Fluids, 2009, 21(12): 121703.
- [12] 陈先富. 弹丸入水空穴的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 1985, 5(4): 70—73.
Chen Xianfu. Experimental studies on the cavitation phenomena as a pellet entering water [J]. Explosion and Shock Waves, 1985, 5(4): 70—73. (in Chinese)
- [13] 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—288.
He Chuntao, Wang Cong, He Qiankun, et al. Low speed water-entry of cylindrical projectile [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 281—288. (in Chinese)
- [14] 何春涛, 王聪, 闵景新, 等. 回转体匀速垂直入水早期空泡数值模拟研究[J]. 工程力学, 2012, 29(4): 237—243.
He Chuntao, Wang Cong, Ming Jingxin, et al. Numerical simulation of early air-cavity of cylinder cone with vertical water-entry [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 237—243. (in Chinese)
- [15] Truscott T T, Epps B P, Belden J. Water entry of projectiles [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46(1): 355—378.
- [16] 路中磊, 魏英杰, 王聪, 等. 基于高速摄像实验的开放腔体圆柱壳入水空泡流动研究[J]. 物理学报, 2016, 65(1): 309—323.
Lu Zhonglei, Wei Yingjie, Wang Cong, et al. An experimental study of water-entry cavitating flows of an end-closed cylindrical shell based on the high-speed imaging technology [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(1): 309—323. (in Chinese)
- [17] 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.
Jiang Yunhua, Xu Shengli, Zhou Jie. Water entry experiment of a cylindrical vehicle with disc cavitator [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 241—246. (in Chinese)
- [18] Jiang Y, Bai T, Gao Y, et al. Water entry of a constraint posture body under different entry angles and ventilation rates [J]. Ocean Engineering, 2018, 153: 53—59.
- [19] Tseitlin MYu. On the pressure on two parallel plates in a jet flow [R]. TsAGI Transactions on Hydrodynamics, 1959: 296—308.
- [20] Deinekin YuP. Cavity flow past flow passage bodies [J]. Gidromekhanika, 1994, 1(68): 74—78.
- [21] Savchenko G Y. Hydrodynamic characteristics of a disc with central duct in a supercavitation flow [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 107—113.
- [22] 王雨时. 西方国家的空心弹技术[J]. 火箭技术, 1996, 1(3): 1—10.
Wang Yushi. Studying progress on hollow projectile technique in the western countries [J]. Projectile and Rocket Technology, 1996, 1(3): 1—10. (in Chinese)
- [23] 王雨时. 西方国家的空心弹技术(续)[J]. 火箭技术, 1996, 1(3): 14—23.
Wang Yushi. Studying progress on hollow projectile technique in the western countries [J]. Projectile and Rocket Technology, 1996, 1(3): 14—23. (in Chinese)
- [24] Ramamurthi K, Nandakumar K. Characteristics of flow through small sharp-edged cylindrical orifices [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1999, 10(3): 133—143.
- [25] Epps B P. An impulse framework for hydrodynamic force analysis: fish propulsion, water entry of spheres, and marine propellers [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010: 133—165.