

细长体倾斜入水时的非平衡态超空泡气液两相流研究

施红辉, 张晓萍, 吴 岩, 周浩磊, 周素云, 贾会霞, 章利特, 董若凌, 王 超

(浙江理工大学流体机械研究所, 杭州 310018)

摘 要: 采用高速摄影技术观察高速细长体倾斜入水后超空泡气液两相流形态发展变化过程并对其结果进行研究。分析 48 mm 长的细长体在 50 m/s 左右的入水速度工况下, 分别以几种不同入射角度进入水中后相关的流体力学特性过程。实验结果表明, 当细长体倾斜入水时, 其与水自由面接触产生的力矩改变了细长体的初始运动方向, 使其偏转并产生有多重褶皱的非规则空泡体, 细长体尾部也更容易在入水时与产生的空泡边界接触而打断超空泡, 致使部分超空泡留在近自由面处。根据速度拟合曲线, 验证了细长体倾斜入水情况下依旧有超空泡减阻作用。

关键词: 细长体; 超空泡; 倾斜入水

中图分类号: O352.1 **文献标识码:** A

0 引 言

当运动体入水速度足够大时, 运动体头部附近的水压力会低于当地饱和蒸汽压力值, 从而发生局部空化现象。当速度达到某一临界值时, 运动体周围就会形成一个完全包围运动体的空泡, 称为超空泡。由于超空泡中的混合气体密度明显低于水密度, 因此, 运动体在超空泡中的运动阻力将大大减小, 超空泡的减阻特性由此显现。

目前运动体入水问题已得到国内外大量学者的重视, 其实际应用也早就出现在反潜导弹和鱼雷的发射问题上^[1], 对于此方面的研究主要是通过实验或者数值模拟手段实现, 因运动体入水现象是一个十分复杂的气液两相动力学过程, 仅从理论上很难对其过程进行完整的分析。目前研究较多的是运动体入水后超空泡形态的产生、发展和溃灭过程的观察描述, 主要研究: 对超空泡尺寸、空泡内外压差、空泡中运动体受力状况以及水自由面处的水花发展过程; 空泡发生器参数对于产生空泡形态的影响问题; 运动体水中运动轨迹等。

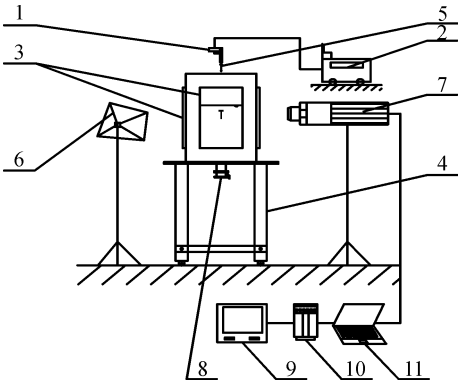
以往的研究中, 较多的是钝体垂直出入水时其自由面的作用和相关的超空泡现象, 较少涉及到细长体的入水现象研究。倾斜入水时, 运动体的质心分布对于其运动特性影响较大, 水平方向分力较大, 因此横向运动明显。由于细长体的细长比较大, 它相对于一般运动体来说, 受力力矩更大, 在倾斜入水时的水动力学特性就会明显不同。施红辉等^[2-4]在过去的研究中, 利用高速摄影手段可视化地观察了细长体垂直与倾斜出入水时运动体的水中形态变化发展过程, 运动体与水自由面接触时的冲击过程以及近自由面空泡的发展过程等。

本文通过在自行研发的一套装置中进行细长体入水实验, 分析验证水下运动的超空泡减阻特性, 并进一步研究细长体倾斜入水时与自由面作用过程的力学特性、高速运动体产生的超空泡与内部运动体之间的作用、运动体产生的超空泡发展过程和空泡尾迹的形态特性。

1 实验系统与实验方法

实验装置以及所采用的实验系统见图 1, 它主

要包括发射系统、观察系统、测量系统 3 个部分。



1. 美特 T50SA 型号射钉枪, 2. 直联便携式空气压缩机,
3. 观察水箱, 4. 支撑架, 5. 细长钉体, 6. 照明灯,
7. 摄像头, 8. 球阀, 9. 监视器, 10. 控制器, 11. 电脑

图 1 物体入水实验装置示意

实验中所使用的设备为:高速摄影设备为美国 Cooke 公司生产的 Cookeco. 1200s 高速摄影仪,它由摄像头 7、控制器 10 和监视器 9 等 3 部分组成,同时还配备有照明灯 6 和一台用于数据收集和存储的电脑 11;空气压缩机的额定排出绝对压力为 0.9 MPa;水箱材质为 5 mm 厚的不锈钢板,尺寸为 60 cm×60 cm×100 cm。水箱四面均开有相同大小的观察窗,所用材料为厚度为 5 mm 的透明有机玻璃板,尺寸均为 80 cm×30 cm。水箱上端面敞开,既可为细长弹体的入射口,又可用作水箱的注水口;水箱下端连接有一球阀 8,用于连接水箱下部与外界,同时又用作水箱的排水口。水箱支撑架所用材料为 Q235 方形钢。整个支架的尺寸为 84 cm×84 cm×150 cm(不含脚轮)。在用数字高速摄像机拍摄流场前,考虑到是高速流场,为了获得较清晰的拍摄效果,在水箱观察窗的适宜位置上贴有部分均光纸以使得背景光均匀地照射在所拍摄的对象上。实验前水箱中的水是静止的,处于室温室压状态(20℃)。实验中所用的细长弹体的外形及其尺寸如图 2 所示。该细长体是质量为 0.7 g 的铁钉。

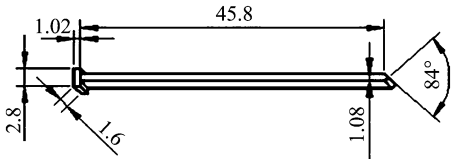


图 2 细长体的外形及其尺寸/mm

具体实验方法为:保证球阀为关闭状态,往水箱中注入一定量实验所需的水。然后,打开光源以及高速摄影仪,通过监视器来调整光源位置及摄影仪的焦距,使得实验观察对象在监视器中显示为最佳

效果。接着,将空气压缩机开启,使其充气压力达到额定输出值,给射钉枪装钉,将其与压气机连接。准备工作结束后,用射钉枪将钉体按实验设计工况要求射入水中。

在实验过程中,通过空气减压器来调节射钉枪的驻室压力 P_0 ,进而驱动细长体获得不同的发射速度 V_0 。 P_0 的值由安装在空压机出口的压力表来测量和显示。通过调整枪口的射姿来实现弹体的多角度发射入水,这里定义弹体入射轨迹线与自由液面的竖直垂线之间的夹角为弹体入射角,用 α 表示。本实验中选用的注水液面高度固定为 $H=50\text{ cm}$,背压值 $P_b=0.104\text{ 3 MPa}$ 。表 1 给出了 6 个工况的实验条件。用高速摄影技术对这 6 个工况的细长体入水过程进行研究,可以基本了解入水超空泡流的运动规律。实验中拍摄速度选为 1 000 帧/s。将所拍摄得到的图片用 photoshop7.0 放大到 A4 纸尺寸(210 mm×297 mm)大小之后,再进行物体位移的测量,测得的物体运动速度的误差为 2.3%^[5]。

表 1 不同工况下的实验参数汇总

工况数	驻室压力 P_0/MPa	注水高度 H/cm	入射角度 $\alpha/(\text{^\circ})$	初始速度 $V_0/(\text{m/s})$
1	0.90	50	5	53.0
2	0.83	50	8	45.8
3	0.82	50	8	45.0
4	0.86	50	45	47.6
5	0.87	50	45	48.7
6	0.88	50	20	50.1

2 实验结果与分析

与细长体相比,一般钝体在被超空泡包裹时其质心与受力点力臂不是很长,力矩不大。此次实验所用钉体本身细长比较大,其质心距离钉体前端的受力点就会比较的远,也就是说,钉体前端所受的水的承托力对于质心的力臂比一般钝体大,所产生的力矩就会比一般的钝体大很多。这使得钉体在倾斜入水瞬间更容易因为水的浮力而使整个细长体发生偏转。

图 3 为细长体倾斜入水时被超空泡包裹后的局部受力分析图。如图 3(a)所示,取钉体运动方向为 X 方向,取垂直于钉体运动方向为 Y 方向,O 为细长体质心位置。在细长体周围产生超空泡以后,细长体被包裹在超空泡中,所受力仅仅为钉体前段空泡发生器所受的力 F_n ,可分解为 X 方向分力 F_{nX} 与 Y 方向上分力 F_{nY} ,图示可知,X 方向的分力 F_{nX} 的方向与细长体运动方向相反,因此产生的力矩会使细长

体原运动方向上的速度减小,阻碍其沿着 X 方向运动; Y 方向的分力 F_{ny} 与力臂相乘即可得到 Y 方向上运动体的受力力矩,对原运动方向的速度进行 X 方向与 Y 方向的分解可知原始速度在 Y 方向上无分速度,但是由于入水后 F_n 力的作用,会给细长体一个 Y 方向上的力矩,因此会促使细长体产生 Y 方向上的速度分量。因此可知,当钉体完全被空泡所包裹

住,那么就只有钉体前端的空泡发生处受力,这个力会使运动体不断向垂直运动体运动方向的 Y 方向偏转,偏离原来的运动方向。这样,就会使得钉体运动方向与水平面的夹角变小,而造成钉体尾部与空泡壁碰撞(如图 3(b)),从而产生了力 F_s ,导致空泡可能被细长体尾部所打断的结果。

上述工况中,工况 5 即为钉体尾部由于受力偏转而使得其与空泡下边面撞击打断空泡壁的实例。图 4 所示为工况 5 的高速细长体入水实验的摄影照片。如图所示,射钉从右侧以 45° 入射角由射钉枪射,钉体初始出现在图 4(2)的右侧。图 4(4)中钉体刚刚碰到水自由面,图 4(5)中钉体完全进入水中,并且可以明显观察到图 4(5)中的钉体外形尺寸相比于图 4(4)中的钉体要大很多,这就说明由于运动体的高速运行,在冲击面的瞬间,运动体周围压力低于本地压力而产生局部空泡,进而发展为钉体完全被空泡包裹住,即产生超空泡。同时,图 4(5)中也可发现已经有少许水花产生,这个水花在图 4(6)中已经发展并能被明显观察到。

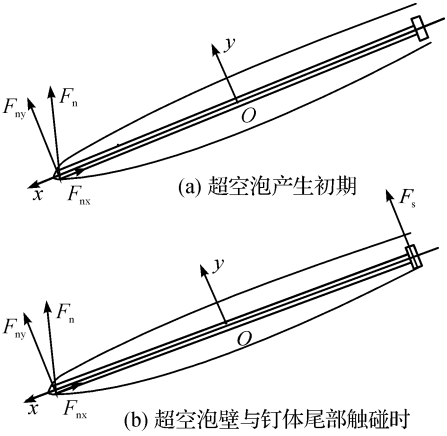


图 3 超空泡中细长体局部受力分析

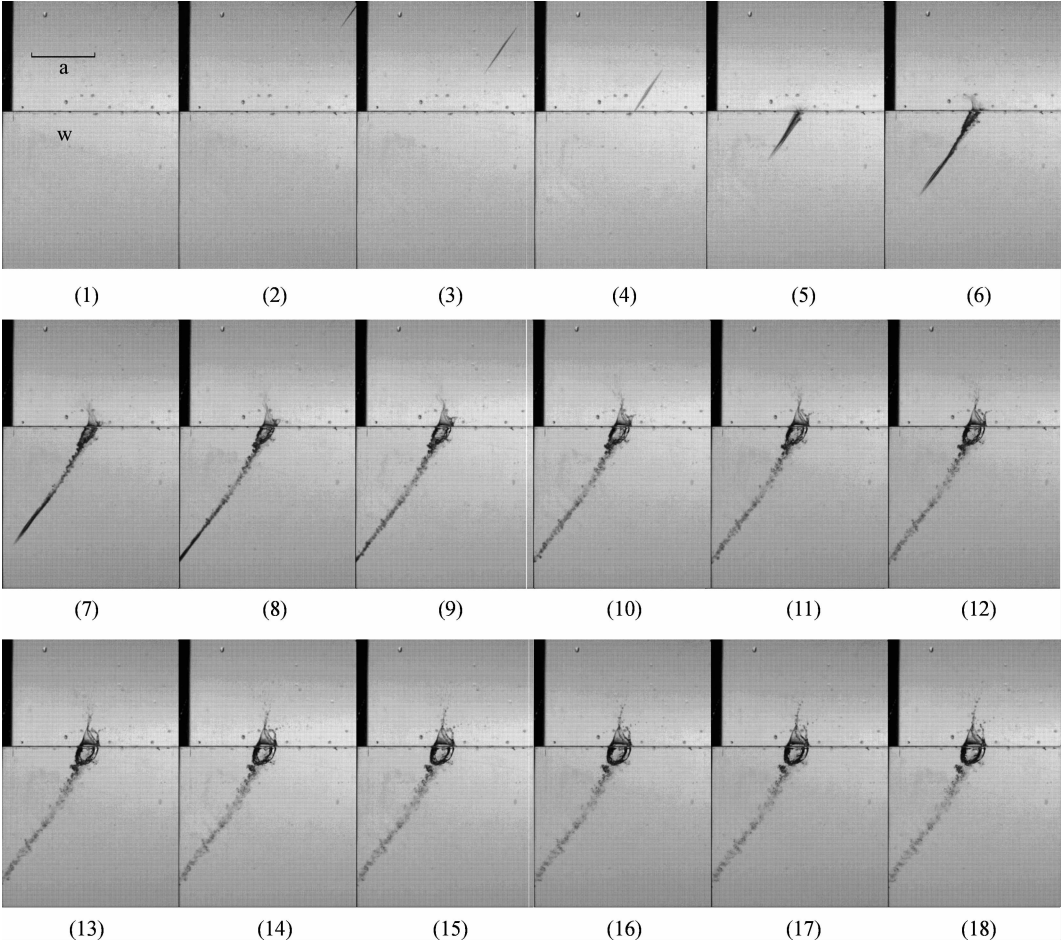


图 4 细长体大角度倾斜入水时超空泡流动(工况 5)

注:图 4(1)中黑色线段为照片比例尺,其长度相当于实际的 50 mm。相邻照片时间间隔为 1 ms。

从图 4(5)中可以观察到,由于钉体尾部撞击空泡壁,空泡壁产生缺口,超空泡被打断。图 4(7)~图 4(18)可以看到,有一部分空泡由于被钉体尾部打断而留在了近自由面处,随着空泡内压力不断变化,近自由面处的空腔从发展逐渐溃灭。由图 4(6)~图 4(8)也可发现钉体因为受力偏转而使得其运动轨迹偏离原入射角度,因此其尾迹流呈现曲线型。

图 5 所示为工况 5 细长体入水后的速度实验拟合曲线。初始时间为 $t=3$ ms,结束时间为 $t=7$ ms,其中共根据图 3 计算出了 5 个速度工况点,利用 MATLAB 软件拟合了一个速度曲线。由此曲线可以发现,在 $t=3\sim 4$ ms 过程中,即图 4(4)~图 4(5)的这个阶段,运动体产生了一个明显的速度增大趋势,这充分验证了超空泡的减阻作用。由于在此过程中,空泡未完全闭合,但是在钉体周围产生的超空泡使钉体免于被沾湿而使速度下降。此时物体所受的力仅仅为物体前端的水阻力和物体本身的重力。由于此时钉体所受重力还大于阻力,因此在速度分布图上在这个过程中它的速度仍是增加的,只不过相比于没有阻力时加速度小了而已。在 $t=4$ ms 以后,由于水的阻力,物体速度就不断下降。

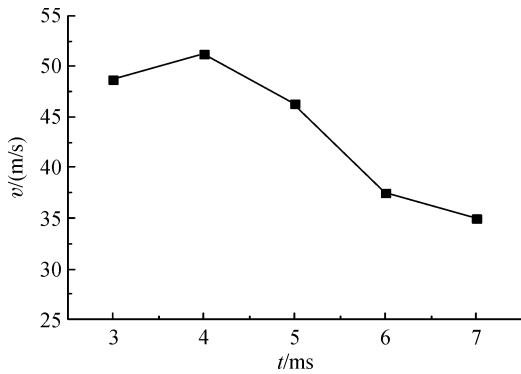


图 5 工况 5 细长体斜入水后速度随时间变化分布

图 6 所示为工况 1 的高速细长体入水实验的摄影照片。工况 1 与工况 5 的入射角相差比较大,但是,均为非垂直入射,因此,在垂直于钉体运动方向上还是会有一个力矩。与工况 5 相似,在钉体入水后,迅速在近自由面处产生超空泡,如图 6(2)~图 6(4)所示,可明显观察到钉体的尺寸较空气中有明显增加。由于入射角度不是非常的明显,钉体在超空泡中稳定运动的距离较长,在图 6(6)中才观察到钉体打断超空泡壁而使超空泡断开。但是在图 6(6)的近自由面超空泡中发现,空泡内表面并不是光滑的,而是褶皱的。这是由于在钉体偏转的过程中,钉体不断与空泡壁碰撞但未能有足够的力来打断空泡壁,因此,只是在空泡壁上产生撞击的褶皱,同时

自身不断偏转。随着水的浮力作用,钉体运动速率不断下降,空泡内压力降低,空泡缩小,致使钉体尾部更容易接触到空泡壁而将其打断,分成了上下两部分空泡。上面一部分的空泡会因为浮力而上浮到液面,最后溃灭。下面部分的空泡则会随着钉体速度减小而无法形成空泡,最终溃灭。

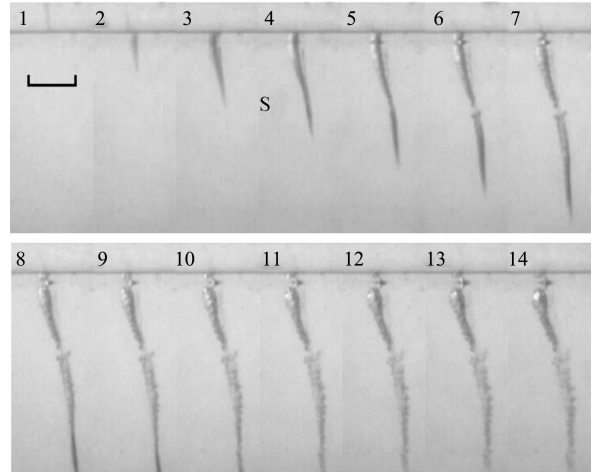


图 6 细长体小角度倾斜入水时超空泡流动(工况 1)

注:图 6(4)中 S 表示超空泡;图 6(1)中黑色线段为照片比例尺,其长度相当于实际的 50 mm;相邻照片时间间隔为 1 ms。

与大角度的入射角相比,接近垂直的小角度细长体在打断超空泡前会经历数次钉体尾部与超空泡壁面撞击的过程,致使产生的超空泡内部会有多重褶皱。这种情况与工况 5 有所不同。为验证其性质,增加了工况 6,如图 7 所示。由于角度增大到 20° ,从图 7(3)~图 7(7)可以明显观察到空泡内壁中的多层褶皱,钉体的偏转也更加强烈。这是因为随着入射角度的增大,空泡前端所受力的 Y 方向分量增大,使得钉体在 Y 方向上运动趋势增大,从而使钉体不断地向 Y 方向偏转。由此,钉体尾部也不断地与空泡下表面撞击并且回弹,再偏转下落与空泡壁碰撞再回弹,形成非定常的运动形态,在未打断空泡前是一个动态中的力的平衡^[6]。

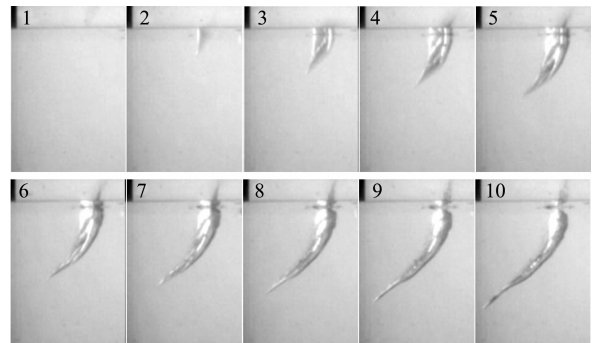


图 7 细长体倾斜入水时超空泡流动(工况 6)

注:每张照片的宽度代表 14 cm。相邻照片时间间隔为 1 ms。

为了减小实验测量钉体位移时的误差,采用两个基准面,分别是水面和照片的底部,测量出钉尖与这两个基准面的距离,然后分别求得两组速度,取其平均值^[5]。图 8 为各工况下细长体斜入水时速度拟合曲线图。由图中可看出,各种工况下细长体的速度变化趋势基本一致,都是随着时间变化呈下降趋势,但是在形成超空泡的过程中,其速度曲线斜率小于而后无超空泡时的斜率。这说明钉体速度的下降有一个减缓的过程,验证了细长体斜入水情况下的超空泡的减阻效应。

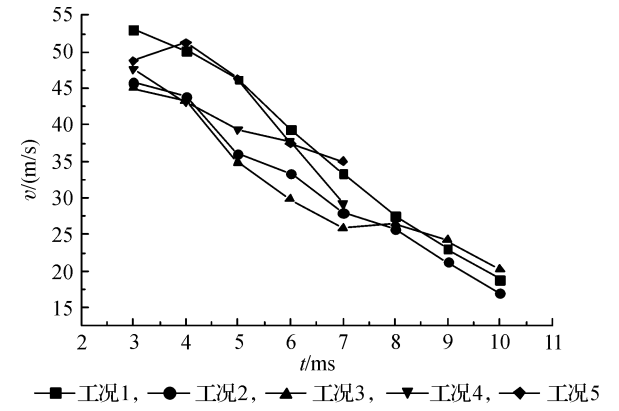


图 8 各个工况下细长体斜入水时速度随时间的变化

3 结 论

a)实验结果表明,当细长体倾斜入水时,其与水

自由面接触产生的力矩改变了细长体的初始运动方向,产生的超空泡也并非是以细长体为中心线的轴对称图形,而是有多重褶皱的非规则空泡体。b)入射角度比较大的细长体在产生超空泡时尾部更容易与空泡边界接触而打断超空泡,致使部分超空泡留在近自由面处。c)细长体运动所拉拽出的尾迹流也呈现曲线型。d)实验结果验证了超空泡对于水下航行体的减阻效应。

参考文献:

[1] 向 耿, 杨 海. 美国超空泡鱼雷专利技术新动向[J]. 鱼雷技术, 2006, 14(1): 47-53.
[2] Shi H H, Takami T. Some progress in the study of the water entry phenomenon[J]. Experiments in Fluids, 2001, 30: 475-477.
[3] Shi H H, Kume M. An experimental research on the flow field of water entry by pressure measurements[J]. Physics of Fluids, 2001, 13: 347-349.
[4] Shi H H, Kume Makoto. Underwater acoustics and cavitating flow of water entry[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 20(4): 375-382.
[5] 吴 岩. 物体高速出入水实验装置研制及流场可视化[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2011.
[6] 王献孚. 空化泡和超空化泡流动理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 76-83.

The Non-Equilibrium Gas-Liquid Two-Phase Flow and Supercavitation Phenomenon during Water Entry of a Slender Body

SHI Hong-hui, ZHANG Xiao-ping, WU Yan, ZHOU Hao-lei, ZHOU Su-yun, JIA Hui-xia, ZHANG Li-te, DONG Ruo-ling, WANG Chao

(School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The phenomenon of supercavitation during water entry of a high speed slender body has been studied experimentally with high-speed photography, and the results are studied deeply. The fluid dynamic processes of water entry of the 48mm long slender body at the speed of about 50 m/s in different incident angles have been analyzed specifically. Experimental results show that when the slender body tilt into the water in some incident angle, the contact with the free surface changes the torque generated by the initial movement direction of the slender body, which makes the slender body deflect and produce multiple irregular folds of the cavity. At the same time, the slender body breaks the supercavity more easily during water entry because of the interaction between the supercavity wall and the slender body, resulting in some supercavitation stays near the free surface. According to the curve based on the speed, it is verified that there is still a super-bubble drag reduction effect during water entry of a slender body.

Key words: slender body; supercavitation; enter the water some incident angle

(责任编辑: 杨元兆)