

物体出水和入水动力学的实验研究

施红辉,高聚瑞,贾会霞,陈波,周杨洁

(浙江理工大学机械与自动控制学院,浙江杭州 310018)

摘要:用射钉枪和一级轻气炮对高速物体(细长体)出入水时的超空泡流动现象进行了实验研究,并用高速摄影仪拍摄了相关流场。研究表明,由气泡组成的超空泡尾部的尾涡呈周期性脱落。在出水过程中,物体的速度总体上是在减小的;但是在出水后,如果水花喷溅到物体尾部,物体会获得一定程度的短暂加速。在入水过程中,物体与空泡壁面的碰撞以及非对称性空泡脱落,会导致水下物体的弹道发生变化。根据实验结果,测量了入水后物体的阻力系数 C_d , $C_d \approx 0.7 \sim 1.2$ 。

关键词:超空泡;高速物体出入水;高速摄影;水弹道

中图分类号:O352 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2015.06.007

引用格式: Shi Honghui, Gao Jurui, Jia Huixia, et al. Experimental research on the hydrodynamic processes of water exit and entry[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(6): 470-475.

施红辉,高聚瑞,贾会霞,等. 物体出水和入水动力学的实验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(6):470-475.

Experimental research on the hydrodynamic processes of water exit and entry

SHI Honghui, GAO Jurui, JIA Huixia, CHEN Bo, ZHOU Yangjie

(College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Using a pneumatic gun and a single stage light gas gun, the supercavitation phenomena during water entry and exit of high-speed bodies (slender bodies) were investigated experimentally. The flow fields were visualized by a high speed camera. The study shows that the trailing vortices consisting of small bubbles shed periodically behind a supercavity. During water exit, the bodies' velocities decrease generally, but a short acceleration may occur when the water splash impacts on the bottom of the body. During water entry, the hydroballistics of the underwater body may change due to the asymmetric bubble shedding behind the body and the collision between the body and the cavity's wall. According to experimental results, the drag coefficient in water C_d was measured, and $C_d \approx 0.7 \sim 1.2$.

Key words: supercavitation; high-speed water exit and water entry; high speed photography; hydroballistics

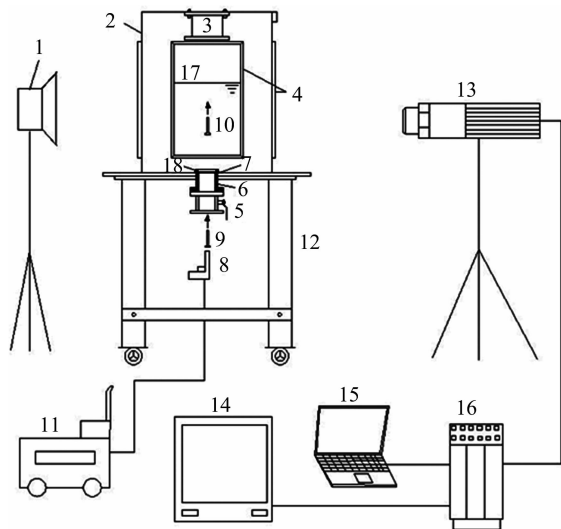
0 引言

物体出入水过程在军事领域有着重要的应用,如潜射导弹、反潜导弹、高速鱼雷等。为此,美国 and 苏联进行了较深入的研究^[1-4]。我国在这方面的系统研究起步较晚^[5-6]。高速物体出入水时一般都带有空泡,这样就存在空泡自由面和水面自由面的相互作用,再考虑到固体的存在,这个气-液-固三相流场十分复杂,到目前为止还没有被完全了解清楚^[7-8]。在实际应用中,计算出水时物体的附加质量十分重要^[3,9],而掌握超空泡的流动形态是计算附加质量的前提。这就需要以大量的实验数据为基础,而目前的实验数据是不充分的,本文通过使用射钉枪和一级轻气炮,对物体出水入水过程进行了高速摄影观察,对相关流场和水弹道学开展了进一步的分析研究。

1 实验装置与实验方法

图1是实验所用装置的系统简图。如图1所示,水箱(2)置于支撑架(12)上,水箱的材质是5 mm厚的不锈钢板,尺寸为60 cm×60 cm×100 cm,水箱的四面均开设有观察窗,尺寸为30×80 cm,材质是5 mm厚的透明有机玻璃。高速摄影系统包括相机(13)、显示器(14)、控制器(16)。同时还配有提供照明的光源(1)和用于数据收集、存储的电脑(15)。每次实验开始前,将水箱的底部用0.1 mm厚的锡纸(7)密封并打开球阀(5),用射钉枪(8)发射钉体(9)。空气压缩机(11)为射钉提供动力。钉体(9)冲破锡纸(7)后变成水下航行体(10),然后向水平面(17)运动。用高速相机系统(13~16)拍摄记录这一过程。安全截获器(3)内装有黏土,用于回收射出水面的细长体,每次实验结束后关闭球阀,更多的实验技术及细节可参阅文献^[10-11]。

实验中分别采用了日本 Keyence(基恩士)公司生产的 VW-6000/5000 和美国 Cooke 公司的 pco. 1200s 高速摄影仪。实验所用细长体(图1中(9))是一钢钉,具体尺寸如图2(a)所示,从水箱底部射入水中。由于射钉枪具有单件体积较小,手动操作性能好的优点,因此我们首先利用它开展了次数较多的高速钉体出水试验研究。图2展示了实验所用的不同类型细长体的几何尺寸。其中,钢钉1(图2(a))净重0.70 g;长径比分别为11和15的铝镁合金材质的圆柱形细长体(图2(b),(c)),质量分别为5.035和6.919 g,用于出水实验;总长37 mm的钢钉2(图2(d))净重0.555 g,用于入水实验。



1. 光源 2. 水箱 3. 捕获装置 4. 观察窗 5. 球阀 6. 法兰 7. 锡箔纸 8. 射钉枪 9. 刚出枪的钢钉 10. 射入水中的钢钉 11. 空气压缩机 12. 支撑架 13. 高速摄影仪 14. 监视器 15. 电脑 16. 控制器 17. 自由液面 18. 金属环

图1 用射钉枪的高速物体出水装置简图

Fig. 1 Schematic of the experimental system for high speed slender body exit water

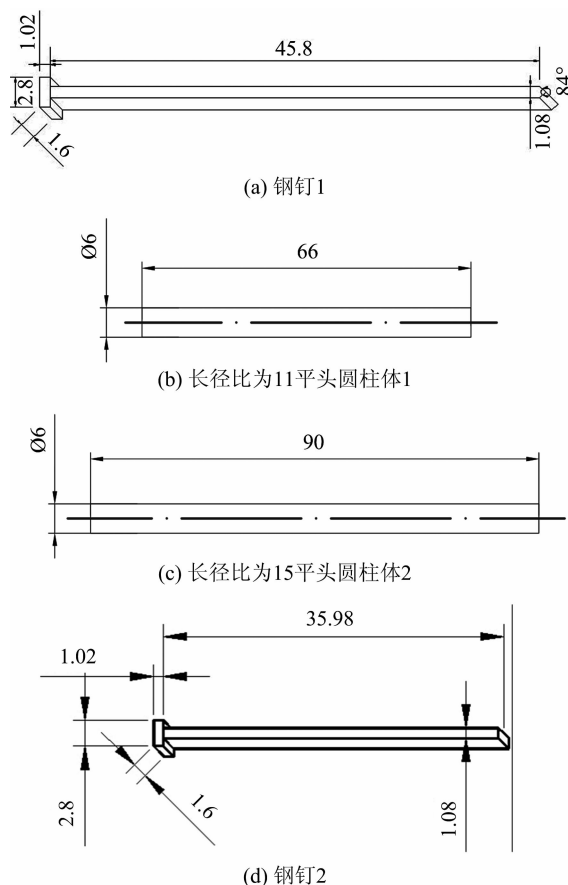
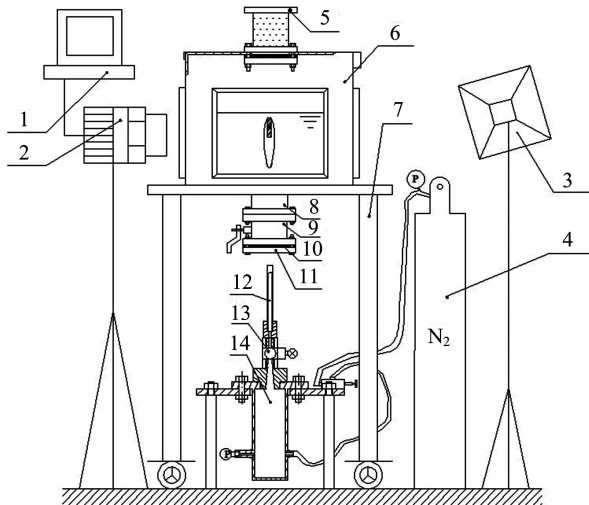


图2 细长体外形及尺寸,单位:mm

Fig. 2 Geometry of the slender body, unit: mm

鉴于直联便携式空气压缩机的气体最大输出压力有限,射钉枪发射的细长钢钉能实现的最大速度一般仅为 50m/s 左右,此外钢钉的种类相对单一.因此,我们同时又设计了一套立式一级轻气炮装置为发射系统(见图 3),主要由发射管(12)、电磁阀(13)、高压气缸(14)等组成.实验时将高压气源(4)里的氮气通入到高压气缸中,通过气压表和电磁阀调节至实验所需的压力,再打开电磁阀,高压气缸中的氮气驱动发射管中的射弹模型(圆柱形细长体,如图 2(b)、2(c)所示)高速入水,初速度可以达到 100 m/s 以上^[11].水箱和高速摄影仪等装置不变.

实验中采用了 6 种不同工况,各工况条件如表 1 所列,其中,工况 1~4 是出水实验,工况 5~6 是入水实验.工况 3 和 4 的初速度 V_0 的差异,可能是由于模型加工误差的缘故.



1. 工控计算机 2. 高速摄影仪 3. 光源 4. 高压气源 5. 安全截获器
6. 水箱 7. 支撑架 8. 法兰 9. 球阀 10. 锡纸 11. 法兰盖 12. 发射管
13. 电磁阀 14. 高压气缸

图 3 用轻气炮的高速物体出水装置简图

Fig. 3 Schematic of the improved experimental system for high speed slender body exit water

表 1 不同工况下的实验参数汇总表

Tab. 1 Experimental parameters under different work conditions

工况	形状	压强 P_0/MPa	水深 H/cm	初速度 $V_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	钢钉 1	0.85	20	33.23
2	钢钉 1	0.80	20	24.26
3	圆柱体 1	1.6	40	37.02
4	圆柱体 2	1.6	40	43.09
5	钢钉 2	0.83	50	43.04
6	钢钉 2	0.87	50	45.28

2 实验结果与分析

2.1 出水实验

图 4 是在驱动压力为 0.85 MPa(绝对压力)时获得的细长体出水的高速摄影照片.图中 N 表示已冲出水面并脱离空泡的钉体(Nail),B 表示气泡(Bubble),W 表示尾迹(Wake).图 4(1)中黑色线段为照片比例尺,其长度相当于 45 mm.相邻两幅照片的时间间隔为 1.5 ms.细长体在图 4(2)中开始出现,在图 4(3)中可以清晰地看到细长体的头部和底部分别产生了局部空泡,在图 4(4)中空泡开始穿透自由面进入空气中.在接下来的时序照片中细长体头部空泡开始溃灭.在图 4(5)中细长体冲出水面,并拉出向上运动的水花喷溅,见图 4(5)~4(10).

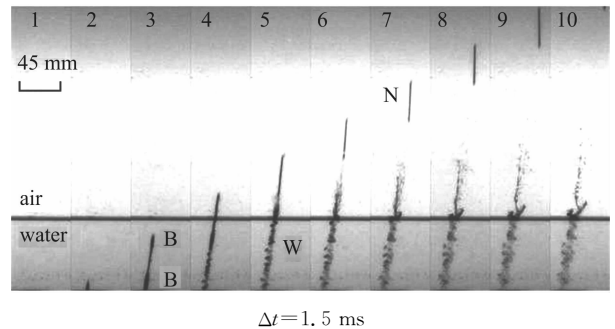


图 4 细长体出水过程中的空泡流动(工况 1)

Fig. 4 Cavitating flow of a slender body during the water exit process (Case 1)

图 5 中的钉体初速较小,只有尾部产生了空泡,见图 5(3).钉体在图 5(5)的时刻完全离开水面,进入大气自由飞行;钉体在水面上也拉出水花,但是较图 4 的尺度较小.在图 4 和 5 中,钉体在离开水面后都发生了逆时针反方向的偏转,这是因为钉体尾部在出水时与水面相互作用获得反向力矩的缘故.有趣的是,水面上的水花向右偏斜时,钉体逆时针偏转,反之亦然.

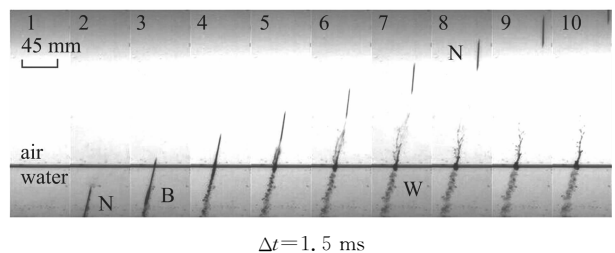
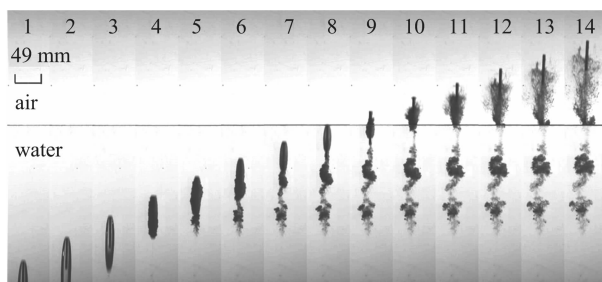


图 5 细长体出水过程中的空泡流动(工况 2)

Fig. 5 Cavitating flow of a slender body during the water exit process (Case 2)

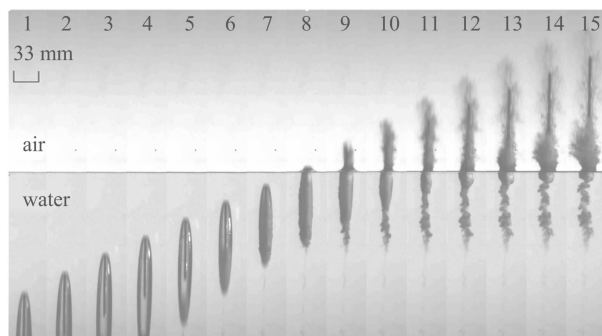
图6是用轻气炮装置发射长径比为11的平头圆柱体(工况3)出水过程的高速摄影照片,相邻两幅照片的时间间隔是1.2 ms,实验中拍摄频率为5 000 FPS.在图6(1)中航行体已经诱导产生了完全超空泡,直至图6(3)中仍清晰可见;3.6 ms后,在图6(4)中空泡界面开始变得模糊,图6(5)中开始有空泡溃灭并脱落下来,在图6(8)~6(14)中可以清晰地看到在水中的脱落的两团空泡.在图6(7)~6(8)中,此时形成了一个小的空泡包裹着整个航行体的上半部分,这样的空泡被称为局部空泡;图6(8)中物体刚开始探出水面,物体先带出一个薄壁空泡,然后空泡在周围的大气压力的作用下迅速溃灭^[5-6];图6(9)中物体的尾部表面已经没有了空泡的覆盖,完全与水接触.空泡的溃灭伴随着激波和射流等冲击现象的出现,这使得物体的受力状态复杂化.



$\Delta t = 1.2 \text{ ms}$

图6 细长体出水过程中的超空泡流动(工况3)
Fig. 6 Supercavitating flow of a slender body during the water exit process (Case 3)

图7是长径比为15的平头圆柱体(工况4)出水过程的时序照片,相邻两幅照片的时间间隔是0.6 ms,实验中拍摄频率为5 000 FPS.图7(1)~7(6)中可以清晰地看到水中物体表面上覆盖的完全



$\Delta t = 0.6 \text{ ms}$

图7 细长体出水过程中的超空泡流动(工况4)
Fig. 7 Supercavitating flow of a slender body during the water exit process (Case 4)

超空泡.在图7(7)~7(8)中空泡开始溃灭(空泡尺寸变小、空泡壁面变粗糙);在7(8)中向上运动的物体压缩物体上方的水层,导致自由液面被抬高,形成水冢.在图7(9)~7(15)中可以看到物体的周围形成了许多喷溅的水花,甚至部分喷溅水花运动到了物体的前方,说明这部分水花运动得比物体还快.

将拍摄到的图片用AutoCAD 2013放大,测量出相邻两幅时序照片中细长体的位移,因拍摄速率已知,可以计算出细长体在相邻两幅照片中的平均速度.测量结果如图8所示,横坐标的零时刻是出水的时刻.从图8可以看出,4个工况的物体速度整体上是随时间的增长而减小的,其中在水中因为阻力的作用速度有较大幅度的减小,在空气中物体的速度也有减小但幅度不大,这是因为空气阻力比水阻力要小许多的缘故.要注意的是,在工况1的1.5 ms、工况3和4的2.4 ms时刻,已出水的物体的速度出现了小幅的增加.从图4、6和7中可以看出,在这些时刻,有迹象表明向上喷溅的水花冲击到了物体的底部,所以物体才可能加速.工况3和4的速度衰减率较工况1和2小很多,这是由于在工况3和4的情况下圆柱体的表面被超空泡包裹,减阻效果优于表面仅带局部空泡的钉体(工况1和2).

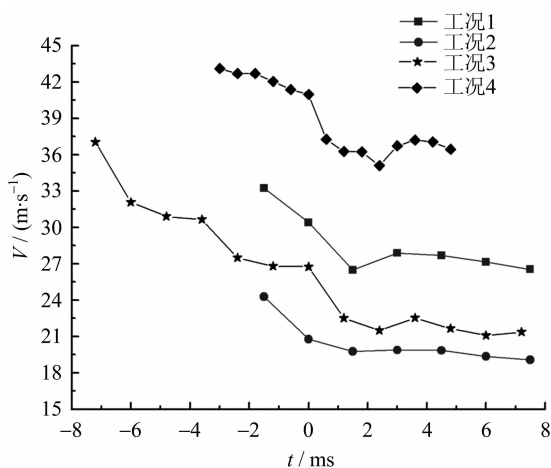


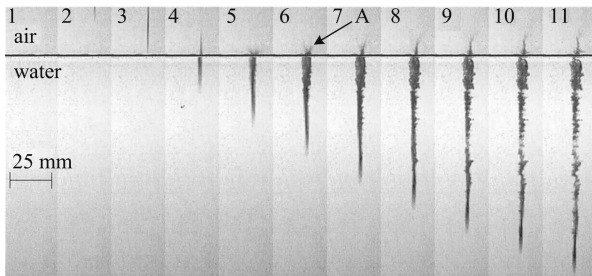
图8 细长体出水运动速度随时间变化关系
Fig. 8 Velocity variations of the slender body with time after exit water in various cases

2.2 入水实验

图9是工况5下钉体以43.04 m/s的速度垂直入水的高速摄影照片,相邻两幅照片的时间间隔是0.5 ms,拍摄频率为2 000 FPS.由于设置了足够大的拍摄视野,所以清晰地观察到了钉体后的尾迹流.

在图9(4)中,钉体位于水下的部分已经开始形

成了超空泡,其径向尺寸较水上的钉体尺寸大很多.在钉体入水初期,液面的上方有一小部分被钉体打开,形成一个小空腔^[12],如图 9(6)中箭头 A 所示,此时细长体周围的空气不断地进入到超空泡中.钉体继续向下运动,如图 9(7)~9(8),超空泡由于受自由面拖拽作用,上部仍与自由面相连.在水体阻力的作用下钉体的速度逐渐降低,钉体周围的超空泡开始脱落,由小气泡组成的尾涡周期性地脱落,形成了一个长长的空泡涡街,见图 9(10)~9(11).此时钉体的速度较低,涡街较细且比较有规则地分布着.

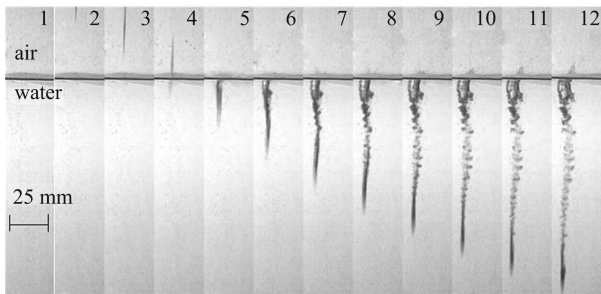


$\Delta t = 0.5 \text{ ms}$

图 9 细长体入水过程中的超空泡流动(工况 5)

Fig. 9 Supercavitating flow of a slender body during the water entry process (Case 5)

由于钉体的长径比较大(约 22~33),在入水时很容易与空泡壁面发生碰撞,引起压力分布不对称.图 10 是工况 6 下钉体以 45.28 m/s 的速度入水的高速摄影照片,相邻两幅照片的时间间隔是 0.5 ms,拍摄频率为 2 000 FPS;由于钉体与空泡壁面的碰撞和拍打,导致钉体的运动方向发生变化,如图 10(5)~10(7).图 10(6)~10(12)中,钉体入水时形成的、与水面接触的一个圆锥形空腔,由于不断有空气进入水体中,其尺寸逐渐变大.图 10(10)~



$\Delta t = 0.5 \text{ ms}$

图 10 细长体入水过程中的超空泡流动(工况 6)

Fig. 10 Supercavitating flow of a slender body during the water entry process (Case 6)

10(12)中,钉体的速度逐渐降低,表面覆盖的超空泡也逐渐变为局部空泡.

取出现钉体的第一张照片,即图 9(2)、图 10(2)时刻为 0 ms 时刻,对钉体入水后的速度和阻力系数进行测算,得到它们随时间的变化关系,如图 11 和 12 所示.阻力系数 C_d 的计算公式取自文献^[11-12].

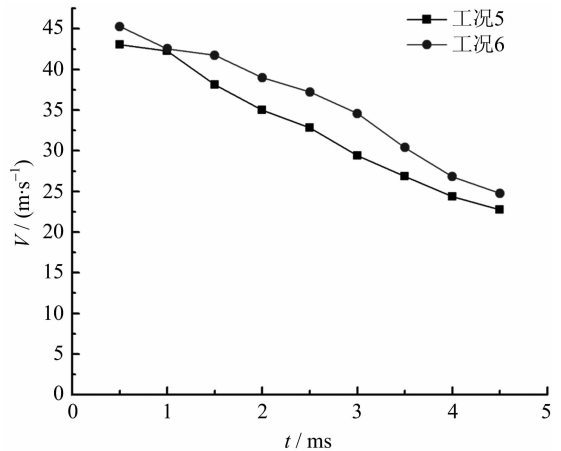


图 11 细长体速度随时间变化

Fig. 11 The velocity of the slender bodies at different times

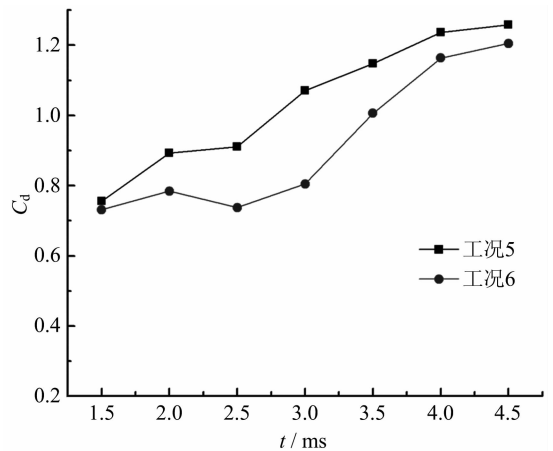


图 12 阻力系数随时间变化

Fig. 12 The drag coefficient at different times

由图 11 可知,钉体入水后速度呈现出较强的衰减特性.图 12 中阻力系数随时间的总体变化趋势是增大的,即钉体入水后所受阻力越来越大.但是在工况 6 的 2.5 ms 时刻,其阻力系数较前一个时刻会变小.通过观察拍摄所得的图片可知,发生这一现象时空泡开始断裂(图 10(7)),钉体尾部的空泡形状已发生明显的变化,尾部空泡呈现出闭合状.空泡的断裂,使得钉体可以更自由地穿透入水中;尽管这个穿透不足以使得物体速度增加(图 11),但是可以造成小幅的阻力系数的降低(图 12).另外,根据经典理

论^[3],空泡闭合之后尾部会产生高速再进入液体射流,射流冲击物体尾部使之加速向前推进,不过本文的实验还无法提供这方面的直接证据。

3 结论

(I) 物体出水前速度逐渐下降;出水后进入空气中,由于所受阻力突然减小,物体速度下降幅度减缓.但如果喷溅水花与物体底部接触,会出现物体速度的瞬态增加。

(II) 入水时钉体与空泡壁面碰撞,导致钉体运动方向发生变化;超空泡上部开始与自由面相连,形成一个圆锥形的空腔,由于空气的不断进入导致空腔尺寸逐渐扩大。

(III) 入水后钉体的阻力系数总体上不断增大,但如果超空泡发生断裂,有可能出现阻力系数降低.Vlasenko^[4]曾经解释到:空泡闭合后尾部会产生高速再进入液体射流,射流冲击物体使之加速。

致谢 作者感谢吴岩和周浩磊对本文工作的贡献。

参考文献(References)

- [1] Waugh J G, Stubstad G W. Hydroballistic Modeling [M]. Washington DC: US Government Printing Office, 1975.
- [2] Hrubec J G. High-speed imaging of supercavitating underwater projectiles [J]. Exp Fluids, 2001, 30: 57-64.
- [3] 罗格维诺维奇 T B. 自由边界流动的水动力学[M]. 施红辉,译. 上海:上海交通大学出版社,2012.
- [4] Vlasenko Y D. Experimental investigations on high-speed unsteady supercavitating flows[C]//Proc Third International Symposium on Cavitation. Grenoble, France, 1998: 39-44.
- [5] Shi Honghui, Luo Xisheng. Compressible and High-Speed Multiphase Flows[M]. Hefei: The University of Science and Technology of China Press, 2014. 施红辉,罗喜胜. 可压缩性和高速多相流动[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2014.
- [6] Lu Chuanjing, Li Jie. Research on the collapse process and characteristics of water-exit cavity of underwater

vehicle [C]//Proceedings of the 11th National Conference on Hydrodynamics & 24th National Symposium on Hydrodynamics and Commemoration of the 110th Anniversary of Zhou Peiyuan's Birth. Beijing: Ocean Press, 2012: 54-67.

鲁传敬,李杰. 水下航行体出水空泡溃灭过程及其特性研究[C]//第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源教授诞辰110周年纪念大会文集. 北京:海洋出版社,2012:54-67.

- [7] Shi H H, Zhou H L, Hu J H, et al. Experimental research on supercavitation flows during water exit [C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Cavitation. Singapore, 2012: 885-889.
- [8] Shi H H, Zhang X P, Wu Y, et al. Supercavitation phenomenon during water exit and water entry of a fast slender body[C]//Proceedings of the 28th International Symposium on Shock Waves. Heidelberg: Springer, 2012:15-20.
- [9] Luo Jinling, Mao Hongyu. Research on aerodynamics and hydrodynamics in exiting water process of missile [J]. Tactical Missile Technology, 2004(4): 23-25. 罗金玲,毛鸿羽. 导弹出水过程中气/水动力学的研究[J]. 战术导弹技术,2004(4): 23-25.
- [10] Wu Yan. Experimental investigation on the fluid dynamic processes of water exit and water entry of a fast slender body[D]. Hangzhou, China: Zhejiang Sci-Tech University, 2011. 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.
- [11] Zhou Haolei. Design of a launch system of high-speed underwater vehicles and research on the characteristics of supercavitation flows [D]. Hangzhou, China: Zhejiang Sci-Tech University, 2012. 周浩磊. 水下高速航行体发射系统的设计及超空泡流场特性研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2011.
- [12] Shi Honghui, Zhou Haolei, Wu Yan, et al. Experiments on water entry of high-speed slender body and the resulting supercavitation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(1): 49-55. 施红辉,周浩磊,吴岩,等. 伴随超空泡产生的高速细长体入水实验研究[J]. 力学学报,2012,44(1): 49-55.