

文章编号: 1000-4750(2013)04-0442-06

潜射导弹空化特性水洞模型试验研究

王亚东, 袁绪龙, 张宇文

(西北工业大学航海学院, 陕西, 西安 710072)

摘 要: 潜射导弹水下弹道品质决定了发射过程的成败。发射速度提高形成的导弹附体空泡造成了流体动力的不确定性, 增加了水下弹道设计的难度。针对潜射导弹水下航行的特点, 采用通气空泡技术来模拟不同空化状态下航行的导弹, 给出了空泡形态及其流体动力特性, 分析了锥头锥角对空泡形态和流体动力特性的影响, 得出了回流效应及弹体自由攻角随锥角增大而增大的结论。借鉴超空泡武器外形理论, 设计了增强弹道稳定性的截头锥头型, 并通过试验验证了该头型弹体稳定性好的特点。试验结果可供潜射导弹水弹道设计人员参考。

关键词: 流体力学; 潜射导弹; 试验研究; 空化形态; 力学特性

中图分类号: TJ762 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.11.0794

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CAVITATION CHARACTERISTICS OF SUB-LAUNCHED MISSILE MODELS IN WATER TUNNEL

WANG Ya-dong, YUAN Xu-long, ZHANG Yu-wen

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: The quality of a water trajectory decides whether the sub-launched missiles can be launched successfully. The attached cavity on a missile due to velocity increase adds to the indeterminacy of fluid forces, and it enhances the difficulty of water trajectory design. According to the features of a sub-launched missile navigating in water, experiments were carried out to investigate the cavity profile and force characteristics using the ventilated cavity method. The effects of the angle of a conical head on the cavity shape and the fluid dynamic features were studied, with the conclusion that the re-entrant jet effect and the free attack angle become more distinct as the cone angle increases. Referring to the shape-design theory of supercavitating vehicles, a series of truncate conical heads were designed. The experiment results have validated the improved stability performance of the new models, which can be referenced by sub-launched missile underwater ballistics design engineers.

Key words: hydromechanics; sub-launched missiles; experimental investigation; cavity profile; mechanical properties

潜射导弹以其隐蔽性、攻击突然性等优势而为各大国海军所青睐。其发射过程需要跨越水、气两种介质, 为了缩短攻击时间以增强打击效率, 必须增加导弹的发射初速度, 而导弹在水下航行时, 表面流体加速引起的局部压降导致导弹肩部空化产生, 改变了导弹绕流流态, 流体动力特性也随之发生变化, 特别是形成的附体空泡长度的不确定性更

增加了分析的难度。为确保出水条件达到要求, 必须了解导弹水下弹道特性或者是进行水下弹道控制, 而各状态下的流体动力特性是控制系统设计的基本条件。

罗金玲等^[1]阐述了潜射导弹在水下运动过程中产生空化的机理, 并通过试验和理论计算的方法揭示了空化会改变导弹水动力和附加质量的现象。刘

收稿日期: 2011-11-24; 修改日期: 2012-03-02

通讯作者: 王亚东(1985—), 男, 河北任丘人, 博士生, 从事水中兵器发射、总体设计研究(E-mail: roby868@163.com).

作者简介: 袁绪龙(1977—), 男, 安徽寿县人, 副教授, 博士, 硕士, 从事水下弹道设计与分析研究(E-mail: yuanxulong@nwpu.edu.cn);

张宇文(1946—), 男, 安徽合肥人, 教授, 学士, 博导, 从事水中兵器总体设计、流体力学研究(E-mail: zhangyuwen@nwpu.edu.cn).

筠乔等^[2]将通气空泡技术应用于导弹水下垂直发射出筒过程。魏海鹏等^[3]使用自然空化模型模拟了不同空化数下潜射导弹的空化特性,证实了水动力受空化影响较大的结论。魏英杰等^[4]用数值方法研究了导弹垂直发射过程中非定常空泡流受重力场的影响。闵景新等^[5]用数值方法分析了导弹头型对空泡和流体动力影响。根据空泡流相似理论,在空泡形态相同情况下,弹体的流体动力特性是一致的,因此可以采用通气空泡^[6-7]来模拟实际情况下的自然空泡。在通气空泡试验研究领域,文献[8-9]侧重于测量超空泡航行体的流体动力特性,文献[10-11]重点则在于研究通气超空泡空泡形态控制技术。

本文以模型试验为基本研究手段,采用通气法形成导弹附体空泡,对比分析导弹在全沾湿和不同空化状态下的流体动力特性,阐述流体动力产生差异的原因,并针对性地设置多种导弹头型工况来探究流体动力最优的头型,以给出设计建议。试验所得到的结果可用来校验数值模拟方法的可行性以及为潜射导弹水下弹道设计提供参考。

1 试验设备与模型

试验在西北工业大学高速水洞实验室进行,该水洞为闭式循环水洞,工作段尺寸为 $\phi 400 \times 2000 \text{mm}$,工作段水速为 $0 \sim 18 \text{m/s}$ 可调,工作段压力为 $20 \text{kPa} \sim 300 \text{kPa}$ (绝对压力),可达到 0.15 的最小空泡数。实验室配置各种量程的内外置测力天平、流场压力测量系统、自动通气系统、高速摄像系统、PIV测试系统和流噪声测量系统。实验室如图1所示。



图1 西北工业大学高速水洞

Fig.1 High speed water tunnel of Northwestern Polytechnical University

本次试验的测试系统包括通气与压力测控系统、流体动力测量系统及高速摄像系统。其中通气系统采用气体质量流量控制器,可设定输出流量

Q_m 并反馈实际流量以监视系统工作状态。压力测量包括水洞工作段压力 P_w 、收缩段压力 P_t 及其弹体空泡内压力 P_c 三路。高速摄像系统负责采集空泡形态,记录变化过程。

为减少支撑系统对弹体空泡和受力的影响,采用尾支撑方式连接模型与水洞,模型内装内测三分力量程天平以增加测量精度,模型外形和天平装配方式如图2所示。

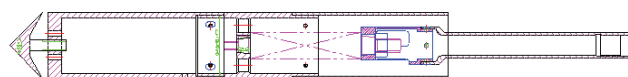


图2 试验模型图

Fig.2 Scheme of experimental model

图2中右侧为中空尾支撑杆,其内部穿出天平、压力传感器测控线和通气管路。点划线部分为测力天平、连接支杆和模型主体。模型内设通气管路,通入的气体经管路输运由模型头部和圆柱段间的环隙泻出。模型头部由螺纹连接,可更换其他头型,本试验设置了6种不同头型,如图3所示。

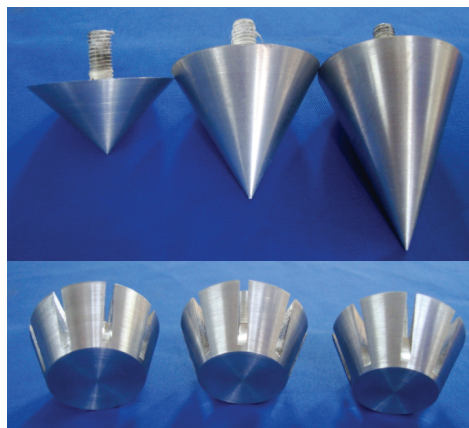


图3 模型头型

Fig.3 Profiles of model head

图3上部所示锥头模型锥角分别为 90° 、 60° 和 45° ,下部截头锥锥角分别为 35° 、 40° 和 45° ,截断后长度相同。根据超空泡相关理论^[12],锥头的脱体点在圆锥最大直径处,而截头锥的空泡脱体点为前端面。为保证试验中模型的空泡脱体点和真实情况保持一致,该头型和圆柱段不留环隙且截头锥上开槽以引导通气从前端泻出。

采用上述模型,针对各模型特点指定不同空化长度工况来测量弹体在不同状态下的流体动力。

2 试验结果与分析

试验相关的无量纲参数定义如下:

通气空泡数:

$$\sigma_c = \frac{P_w - P_c}{0.5\rho V^2} \quad (1)$$

阻力系数:

$$C_d = \frac{D}{0.5\rho S V^2} \quad (2)$$

升力系数:

$$C_l = \frac{L}{0.5\rho S V^2} \quad (3)$$

力矩系数:

$$m_z = \frac{M_z}{0.5\rho S V^2 L} \quad (4)$$

对于锥头系列的模型试验, 分别选取长度为 $L/5$ 、 $L/3$ 、 $L/2$ 和 L 的附体空泡流型来研究不同空泡数下导弹空泡和流体动力特性。

选取 60° 锥头为标准工况, 其不同空化长度的照片如图 4 所示。

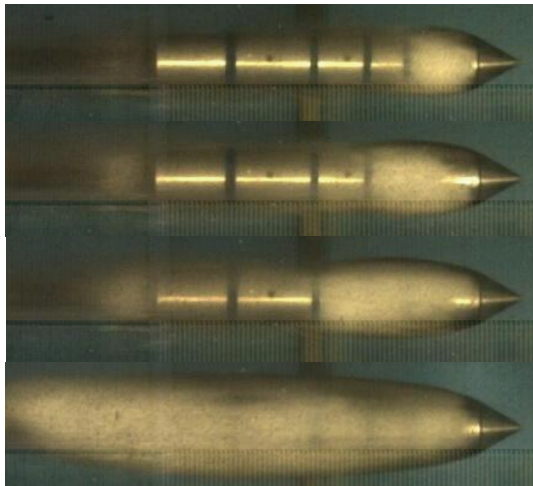


图 4 不同空化长度结果

Fig.4 Results of different cavity length

以上各个工况分别对应的空泡数如表 1。

表 1 不同空化长度对应空泡数

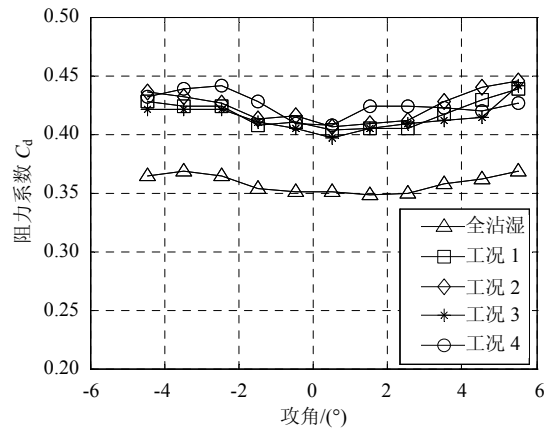
Table 1 Cavitation numbers of different cavity length

空泡长度	$L/5$	$L/3$	$L/2$	L
σ_c	0.5307	0.3608	0.2977	0.2477

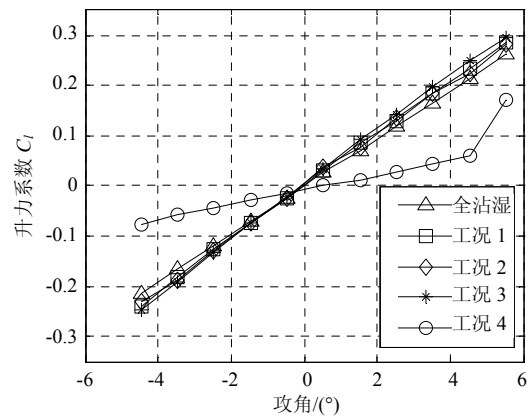
由图 4 可知, 锥头导弹形成的附体空泡在各空化长度下的回射流效应均极其显著。超空泡水下航行器形成的附体空泡水气界面均较为清晰, 空泡壁面透明程度较好, 而试验获得的导弹空泡回射流效应导致的水气掺混现象明显。回射流是空泡不稳定的原因之一, 导致了空泡闭合位置的非定常性。试验结果表明: 导弹在水下运动形成的空泡回射流效应明显, 不稳定性程度较高。

不同空化长度(不同空泡数)下对应的流体动力

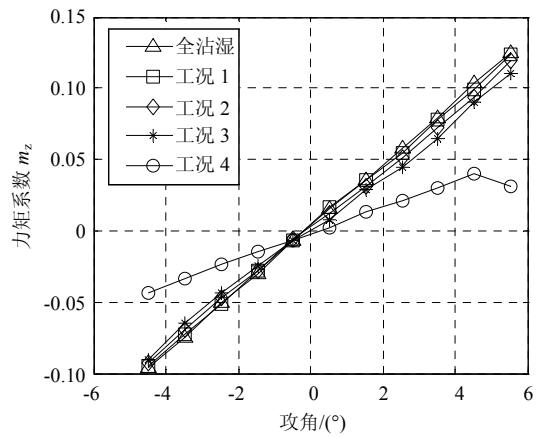
与全沾湿流体动力对比如图 5 所示。



(a) 阻力系数



(b) 升力系数



(c) 力矩系数

图 5 不同空化长度流体动力

Fig.5 Force coefficients of different cavity length

图 5 给出了全沾湿及不同空化长度工况对应的力学特性, 其中工况 1 至工况 4 空化长度依次增加。由结果分析可知, 该头型导弹阻力系数在空化后出现了明显增大。这是因为该头型形成的空泡最大直径较大, 空泡形态较为丰满, 空泡效应减小的阻力权重远小于增大的压差阻力, 导致总体阻力增加。

出现空化后，不同空化长度引起的阻力系数变化差值较小，维持在 0.4~0.5 之间。导弹的升力主要由头部和尾部产生，锥头空泡脱体点在圆柱起始点位置，故头部始终沾湿，故空泡在未包裹尾部之前，各空化状态升力线基本保持一致，而工况 4 在小攻角时尾部仍包裹在空泡内，直至 6°攻角时尾部出现沾湿，升力线斜率显著增加。空泡闭合位置在导弹中心之前时导弹颠覆力矩效应相差不大；导弹超空化后，攻角引起的空泡不对称效应导致弹体尾部在大攻角下会出现局部沾湿而产生恢复力矩，但锥头本身产生的是颠覆力矩，加之其产生的空泡较丰满，弹体自由攻角较大，图示在 5°攻角后才体现为 $m_z^\alpha < 0$ ，证实了该头型下自由攻角在 $\pm 5^\circ$ 量级。

取 $L/2$ 空化长度来对比不同锥头下空化特性的区别，如图 6 所示。

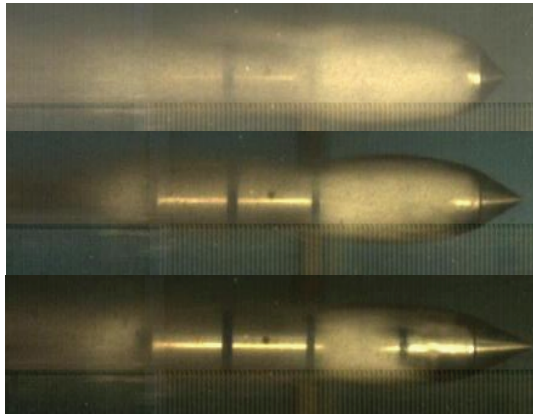
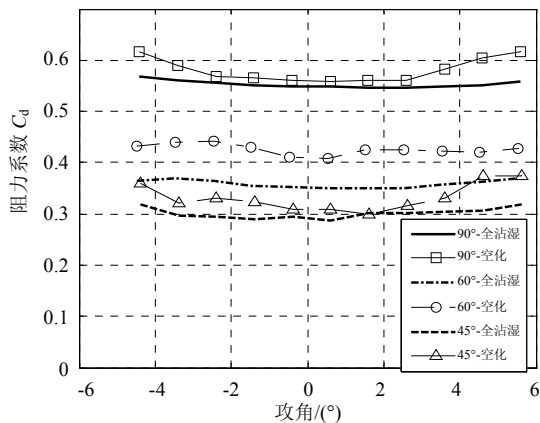


图 6 不同锥头空化对比

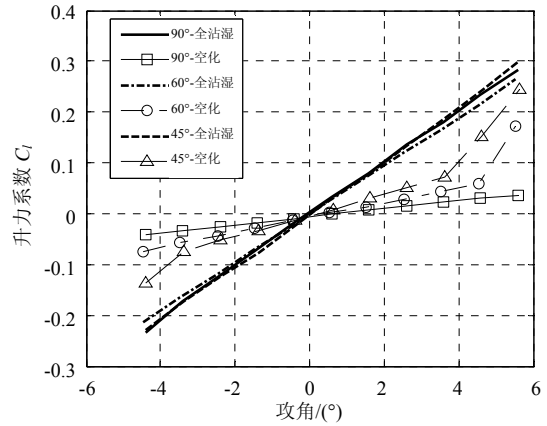
Fig.6 Cavities of different head shape

由图 6 可知，头型锥角越小，产生的空泡越为“瘦削”（最大直径减小），且空泡中回射流效应越不明显，空泡变得更为透明，空泡稳定性程度加大。

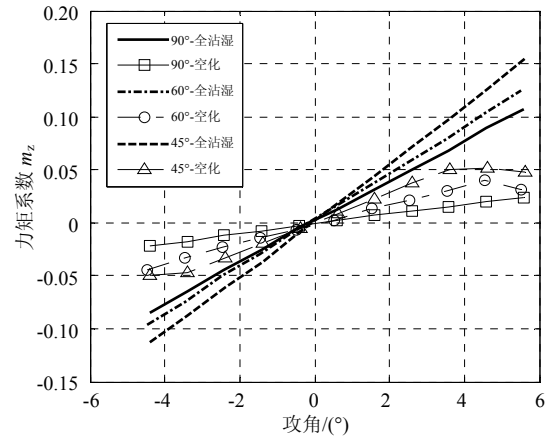
对比各头型全沾湿和全空化流体动力，结果如图 7 所示。



(a) 阻力系数



(b) 升力系数



(c) 力矩系数

图 7 不同头型流体动力

Fig.7 Force coefficients of different head shape

各头型在沾湿和空化状态下的阻力特性、升力特性和 60°锥头的保持一致，但头型锥角越小，空泡越“瘦削”，弹体在空泡内的自由攻角越小，45°锥角模型自由攻角在 $\pm 3.5^\circ$ 量级，90°锥角模型自由攻角绝对值大于 6°。

潜射导弹水下垂直发射时，为了保证弹道稳定性，需要减小带空泡时的自由攻角。借鉴超空泡射弹外形，设计了截头锥外形作为带空泡航行导弹的头部导流罩，该头型在带空泡时力矩和空泡闭合特性稳定性好。选用 35°、40°和 45°截头锥，空泡形态对比如图 8 所示。

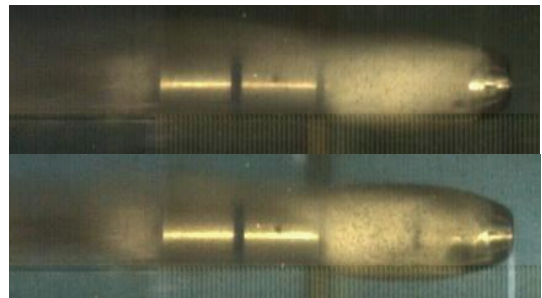




图8 不同锥头空化对比

Fig.8 Cavities of different head shape

截头锥模型空泡在头部稳定脱体, 回射流效应随着截头锥锥角增加即头部最小直径的减小而减弱, 但整体上空泡稳定性增强。该系列截头锥头型全空化时所对应的流体动力特性如图9所示。

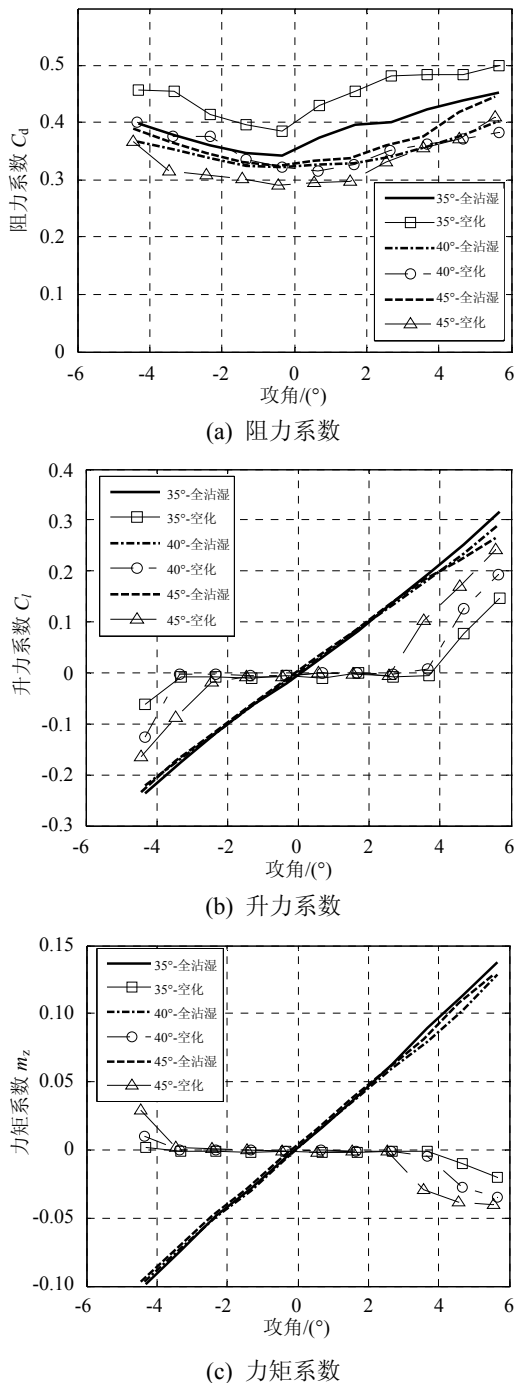


图9 不同头型流体动力

Fig.9 Force coefficients of different head shape

35°截头锥空化后的阻力仍大于沾湿阻力, 但锥角增加至40°时二者基本相当, 到45°时空化后阻力减小。该系列头型弹体在空泡内自由攻角减小至 $\pm(3\sim 4)^\circ$ 量级, 但其优势在于弹体在空泡内自由活动不存在颠覆力矩, 攻角较大时的恢复力矩也非常大, 这有利于提高非控弹道的稳定性。截头锥的优点在于借鉴了超空泡武器的设计, 利用脱体点位置的不同改善了流体动力特性及空泡稳定性。

3 结论

本文通过试验获得了潜射导弹在不同空化长度下的空泡形态和流体动力特性, 揭示了其空化流态中回射流作用显著的现象。研究了头型锥角对流场性质和流体动力的影响, 并根据弹道稳定性要求, 设计了截头锥头型并验证了该系列头型对力学特性的改善。主要结论如下:

(1) 圆锥锥头系列导弹形成的空泡最大直径大, 且存在强烈的回射流, 形成的空泡水气掺混程度大, 空泡稳定性差。

(2) 圆锥锥头系列导弹在空化后阻力变大, 导弹在空泡内的自由攻角范围大, 60°锥角时均在 $\pm 5^\circ$ 量级, 超过自由攻角后力矩才出现静稳定特性, 自由攻角随锥角增大而增大。

(3) 截头锥锥头的引进有利于改善潜射导弹带空泡航行时的流体动力特性, 45°截头锥产生的空泡有减阻效应。

(4) 截头锥锥头导弹在全空化后, 弹体在自由攻角范围内变化时升力和力矩基本为0, 超过自由攻角恢复力矩大, 45°截头锥自由攻角为 $\pm 3^\circ$ 。

参考文献:

- [1] 罗金玲, 何海波. 潜射导弹的空化特性研究[J]. 战术导弹技术, 2004, 25(3): 14-17.
Luo Jinling, He Haibo. Research on cavitation for under-water launching missile [J]. Tactical Missile Technology, 2004, 25(3): 14-17. (in Chinese)
- [2] 刘筠乔, 鲁传敬, 李杰, 曹嘉怡. 导弹垂直发射出筒过程中通气空泡流研究[J]. 水动力研究与进展 A 辑, 2007, 22(5): 549-554.
Liu Yunqiao, Lu Chuanjing, Li Jie, Cao Jiayi. An investigation of ventilated cavitating flow in vertical launching of a missile [J]. Journal of Hydrodynamics Ser. A, 2007, 22(5): 549-554. (in Chinese)
- [3] 魏海鹏, 郭凤美, 权晓波. 潜射导弹表面空化特性研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1506-1509.
Wei Haipeng, Guo Fengmei, Quan Xiaobo. Research on

- cavitation of submarine launched missile's surface [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(6): 1506—1509. (in Chinese)
- [4] 魏英杰, 闵景新, 王聪, 邹振祝, 余峰. 潜射导弹垂直发射过程空化特性研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(7): 251—256.
Wei Yingjie, Min Jingxin, Wang Cong, Zou Zhenzhu, Yu Feng. Research on cavitation of vertical launch submarine missile [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(7): 251—256. (in Chinese)
- [5] 闵景新, 魏英杰, 王聪, 曹伟, 邹振祝. 潜射导弹垂直发射过程流体动力特性数值模拟[J]. *兵工学报*, 2010, 31(10): 1303—1309.
Min Jingxin, Wei Yingjie, Wang Cong, Cao Wei, Zou Zhenzhu. Numerical simulation on hydrodynamic characteristics of submarine missile in the vertical launch process [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(10): 1303—1309. (in Chinese)
- [6] Semenenko V N. Artificial supercavitation: physics and calculation. RTO AVT Lecture Series on Supercavitation Flows [C]. Von Karman Institute Brussels, Belgium, 2001: 206—237.
- [7] Wosnik M V, Schauer T J, Arndt R E A. Experimental study of a ventilated supercavitating vehicle [C]. Proceedings CAV 2003: Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003), Osaka Japan, 2003. Cav03-OS-7-008.
- [8] Kuklinski Robert, Henoch Charles, Castano John. Experimental study of ventilated cavities on dynamic test model [C]. Fourth International Symposium on Cavitation, California: California Institute of Technology, 2001. Session B3.004.
- [9] 蒋增辉, 于开平, 张嘉钟, 王聪, 黄文虎. 超空泡航行体尾部流体动力特性试验研究[J]. *工程力学*, 2008, 25(3): 26—30.
Jiang Zenghui, Yu Kaiping, Zhang Jiazhong, Wang Cong, Huang Wenhui. Experimental research on hydrodynamic character of aft section of underwater supercavitating bodies [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(3): 26—30. (in Chinese)
- [10] 杨武刚, 张宇文, 阚雷, 范辉. 通气法控制超空泡流动的实验研究[J]. *应用力学学报*, 2007, 24(4): 504—508.
Yang Wugang, Zhang Yuwen, Kan Lei, Fan Hui. Experimental investigation to supercavitation flow with ventilated method [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2007, 24(4): 504—508. (in Chinese)
- [11] 王海滨, 王聪, 魏英杰, 张嘉钟, 贾力平. 水下航行体通气超空泡的实验研究[J]. *船舶力学*, 2007, 11(4): 514—520.
Wang Haibin, Wang Cong, Wei Yingjie, Zhang Jiazhong, Jia Liping. Experimental investigation of ventilated supercavity of underwater bodies [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2007, 11(4): 514—520. (in Chinese)
- [12] 贾力平, 于开平, 张嘉钟, 王聪, 魏英杰, 李凝. 空化器参数对超空泡形成和发展的影响[J]. *力学学报*, 2007, 39(2): 210—216.
Jia Liping, Yu Kaiping, Zhang Jiazhong, Wang Cong, Wei Yingjie, Li Ning. Influence of cavitator parameters non formation and development of supercavity [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, 39(2): 210—216. (in Chinese)