

文章编号: 1000-4750(2008)09-0203-06

模型结构对通气超空泡影响的实验研究

*张学伟, 魏英杰, 张嘉钟, 王 聪, 于开平

(哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江, 哈尔滨 150001)

摘 要: 在水洞中开展了模型结构对通气超空泡形态和水动力影响的系列模型实验研究。结果表明: 空化器、通气碗、锥柱结合的模型主体、尾部收缩段以及模型支撑的截面形状和方式都会对空泡形态和模型水动力产生影响。在相同空泡数下, 空化器直径越大, 超空泡长度越大, 并且在相同直径下, 圆盘空化器比圆锥空化器产生的超空泡长度大; 模型尺度越大, 阻塞比越大, 超空泡长度越大; 锥柱结合的模型主体会产生滞后效应; 模型支撑的截面形状应为流线型; 前支撑、腹支撑和尾支撑适用于研究不同的超空泡特性, 其中当模型采用前支撑方式时, 空泡形态和水动力应采用有效空化器直径进行计算。

关键词: 流体力学; 通气超空泡; 水洞实验; 模型结构; 支撑方式

中图分类号: O352; TV131.2 **文献标识码:** A

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE EFFECT OF MODEL STRUCTURE ON VENTILATED SUPERCAVITY

*ZHANG Xue-wei, WEI Ying-jie, ZHANG Jia-zhong, WANG Cong, YU Kai-ping

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

Abstract: A series of model experiments in water tunnel were carried out to investigate the effect of model structure on the shape and hydrodynamic characteristics of ventilated supercavity. It is shown that the characteristics of ventilated supercavity are affected by many factors, such as: cavitator, gas deflector, main-body combining cone with cylinder, contractive rear-body, section shape of the strut and its connection type. Consequently, the conclusions are drawn as: 1) If the number of cavitation remains unchanged, the length of supercavity increases with the cavitator diameter. 2) With equal diameters, disc cavitator can produce longer supercavity than cone cavitator, and both the choke ratio and the supercavity length increase with the model scale. 3) Hysteresis effect may happen on the main-body. 4) Strut section should be in the shape of streamline. 5) Different supercavity characteristics should be analyzed using different strut types. 6) If front-strut type is used, supercavity shape and hydrodynamics should be calculated with effective cavitator diameter.

Key words: fluid mechanics; ventilated supercavity; water tunnel experiment; model structure; strut type

借助超空泡减阻技术, 可以使得水下航行体减阻 90%, 达到非常高的速度。超空泡分为自然超空泡和通气超空泡两种, 前者主要依靠提高航行体的

速度生成超空泡, 后者主要依靠人工通气增加空泡内压强生成超空泡。由于形成自然超空泡的高速条件在水洞实验中难以达到, 因此目前主要在水洞中

收稿日期: 2007-01-13; 修改日期: 2007-07-27

作者简介: *张学伟(1979—), 男, 哈尔滨人, 博士生, 从事超空泡流理论及实验研究(E-mail: zxw@hit.edu.cn);

魏英杰(1975—), 男, 大庆人, 副教授, 博士, 从事流体力学数值模拟、超空泡理论与实验研究(E-mail: weiyjingjie@gmail.com);

张嘉钟(1945—), 男, 哈尔滨人, 教授, 博士, 博导, 从事航天器动力学、机械故障诊断、流体力学等研究(E-mail: zhangjz@hit.edu.cn);

王 聪(1966—), 男, 呼和浩特人, 教授, 博士, 博导, 从事航天器动力学、振动与控制、流体力学等研究(E-mail: alanwang@hit.edu.cn);

于开平(1968—), 男, 富锦人, 教授, 博士, 博导, 从事结构动力学、振动与控制、流体力学研究(E-mail: yukp@hit.edu.cn).

进行通气超空泡的实验研究。

虽然国内外学者对超空泡的形态、流场速度和压力分布及带空泡模型的动力特性等方面都进行了广泛研究^[1-6],但是由于实验设备、实验方法和采用的实验模型等条件不同,对于同一规律的实验结果存在较大差别。本文通过分析轴对称实验模型不同组成部分对空泡形态及模型水动力影响,说明了通气超空泡实验模型应该具有的合理结构和尺度,对于生成形态稳定并能够有效减阻的通气超空泡、提高实验结果的准确性具有重要意义。

1 实验设备及方法

通气超空泡实验是在中速通气水洞中完成的。该水洞工作段直径为 0.2m,最大平均流速可达 25m/s。水洞配备了计算机控制与管理系统,并设有先进的除气装置,高速数据采集系统和高速摄影系统,其中除气装置能够保证水洞在长时间连续通气的情况下保持工作状态基本不变。实验模型由空化器、通气碗、圆锥段、圆柱段组成的轴对称体(图 1),模型内部有管路与外置通气系统和测压系统相连,并装有内置六分力天平。

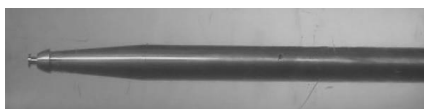


图 1 实验模型

Fig.1 Experimental specimen

实验首先设定环境压力,然后选择一系列流速在每个流速下逐步增大通气量以此得到不同阶段的通气超空泡,记录相应工况下模型参数(空化器直径 D_n 和模型最大直径 D 等)、工作段的流速和压力、通气量、空泡内部压力、空泡形态(超空泡的最大长度 L_c 和最大厚度 D_c)以及模型动力等,并由此得到空泡数 σ 和阻力系数 C_d 等重要参数:

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_c}{1/2\rho U_\infty^2}, \quad C_d = \frac{F}{1/2\rho U_\infty^2 S} \quad (1)$$

其中: P_∞ 为流场压力; P_c 为空泡内部压力; ρ 为流体密度; U_∞ 为流场速度; F 为模型阻力; S 为模型最大横截面积。

2 实验结果分析

2.1 模型最大直径的选取

超空泡实验模型首先应该根据实验能力选取模型的特征尺度,其余各部分尺寸按与特征尺度成

一定的比例进行选取。由于水洞实验中存在阻塞常数^[7],即水洞所能达到的最小空泡数不能大于阻塞常数,而阻塞常数随模型阻塞比的增大而增大,因此为了有效降低水洞的空泡数,以便更好的研究超空泡现象,应尽量降低模型的阻塞比 Ψ ($\Psi = S_m / S_g$, S_m 为模型最大截面, S_g 为水洞工作段截面)。由于模型最大直径与阻塞比密切相关,因此根据阻塞比的要求选取模型最大直径为模型的特征尺度。通常为了降低水洞工作段边壁的影响要求模型阻塞比满足 $\Psi < 0.04$,但是在超空泡实验中由于超空泡最大直径大于模型最大直径,使得阻塞比上升,因此阻塞比即使满足上述条件,水洞边壁依然会对超空泡形态产生影响,图 2 给出了通过改变模型最大直径得到的不同阻塞比下的超空泡长度随空泡数的变化规律,可见在相同空泡数下阻塞比越大,空泡长度越大。实验表明超空泡实验中要忽略边壁影响应满足 $\Psi < 0.01$ 。

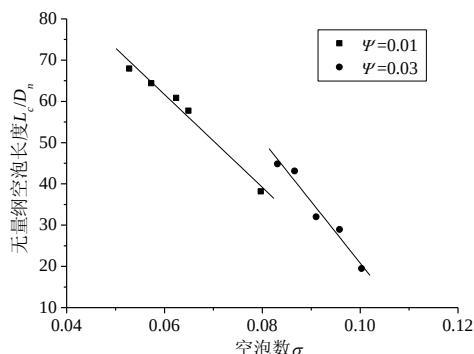


图 2 阻塞比对空泡形态影响

Fig.2 Effect of choke ratio on supercavity

2.2 模型主体的选取

目前对于超空泡实验模型主体形状研究较少,基本都是由前锥段和中间柱段组成的。图 3 给出了通气量逐渐增加时空泡逐渐变长依次闭合在前锥段和中柱段的发展过程。可见当空泡数达到 0.08 空泡闭合位置由锥段变为柱段时,曲线出现折点,斜率变大,说明空泡的发展加快。上述现象被 Savchenko^[8]定义为滞后效应(Hysteresis effect)。他的研究表明通气率越大空泡长度越大,空泡闭合角越大,从而导致空泡的泄气率也越大,对于一定长度的空泡,其通气率与泄气率基本平衡,当空泡由闭合在锥段上转变为闭合在柱段上时闭合角(空泡尾部界面与模型夹角)变小,这时通气率大于泄气率,空泡会突然增长,直到闭合角逐渐变大,通气率与泄气率达到新的平衡为止。为了研究模型主体

对于空泡形态的影响,将上述曲线与 Savchenko^[9]提出的自然空泡自由闭合时的形态计算公式(2):

$$\frac{L_c}{D_n/2} = 4.0 + \frac{3.595}{\sigma} \quad (2)$$

进行对比,结果如图3所示。

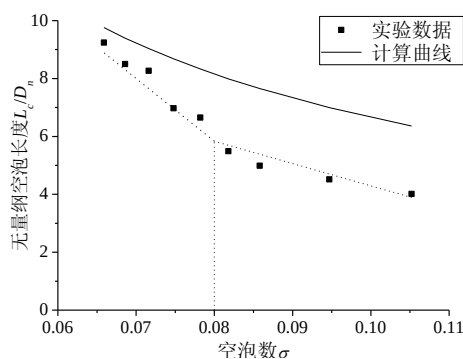


图3 模型主体对空泡形态的影响

Fig.3 Effect of main-body on supercavity

考虑到在相同空泡数下通气空泡与自然空泡具有相同的几何特性的结论还有待进一步证明,实验与计算的对比仅看作定性的对比分析。可见由于模型不带后体不存在滞后效应,因此计算曲线没有出现折点,并且由于空泡闭合在模型表面,将使得空泡实际长度小于计算长度。滞后效应的存在对于控制通气超空泡来说是非常重要的,它启示人们可以通过设计模型的外形来稳定空泡的闭合点。

2.3 空化器的选取

空化器是超空泡实验模型中最重要的组成部分。它一方面在模型头部的流场中产生一个较大的负压峰值,使空泡易于发生,另一方面非流线形的空化器一旦产生空泡,空泡便总是起始于空化器的最大圆周处,有利于获得稳定和确定的空泡形态。传统的典型空化器主要是圆盘或圆锥空化器。

空化器的大小和形状很大程度上决定了产生空泡的难易程度。实验观察到空化器直径越小,越不利于空泡的产生。如图4所示,当空化器直径较小($D_n < 0.2D$)时无论如何增大通气量,空化器所产生的空泡也不能与通气空泡联合生成一个光滑透明的通气超空泡,此时空泡内部含气率较低,空泡比较混浊,不能达到有效减阻的目的。



图4 空化器较小时产生的通气空泡

Fig.4 Supercavity shape in small cavitator

图5给出了空化器直径分别为 $0.2D$ 和 $0.25D$ 的圆盘空化器的空化特性和模型阻力特性。可见在相同空泡数下超空泡的长度随着空化器直径的增大而增大,通气形成超空泡后模型阻力显著减小,但是不同直径空化器下的模型阻力基本相同。由于气体密度远小于液体密度,因此为了最大程度降低模型摩擦阻力需要超空泡具有一定的长度包裹模型表面,这就要求选取较大直径的空化器,但是直径较大的空化器在相同空泡数下产生的空泡厚度也较大,而空泡厚度的存在相当于增加了模型的横截面积,也就在一定程度上增加了模型的形状阻力,从而导致超空泡的减阻效果不明显。因此空化器直径过大或过小都是不适宜的,必须与模型直径成一定比例。

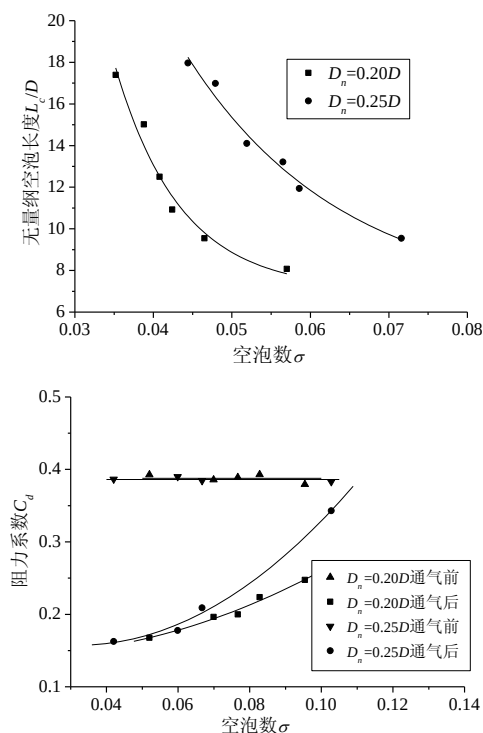


图5 不同空化器直径下的空化特性和模型阻力特性

Fig.5 Shape and hydrodynamics characteristics of ventilated supercavity with different cavitator diameters

图6给出了相同直径的圆盘和 120° 圆锥空化器的空化特性和模型阻力特性。可见在相同空泡数下圆盘空化器比圆锥空化器产生的超空泡尺度大,通气形成超空泡后模型阻力显著减小,但是类似于空化器直径中所作的讨论,不同空化器线型下的模型阻力基本相同。单从空化特性考虑应选取圆盘空化器,但是如何选取空化器线型使得摩擦阻力的减小量尽可能的大于形状阻力的增大量,达到有效减

阻,还有待进一步研究。

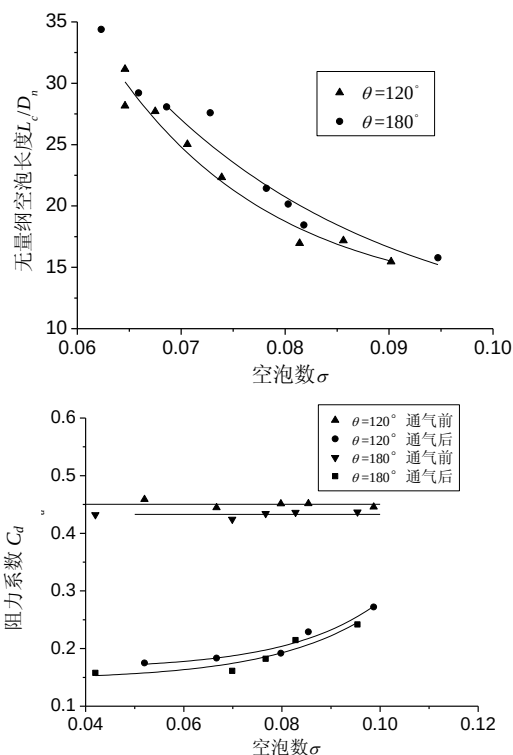


图6 不同空化器线型下的空化特性和模型阻力特性

Fig.6 Shape and hydrodynamics characteristics of ventilated supercavity with different cavitator line-types

2.4 通气孔和通气碗的选取

通气孔和通气碗是保障空化器与通气联合生成超空泡的重要环节。通气孔的作用主要是在空化器所形成的低压区内通气,使超空泡在较低流速下迅速形成。实验发现通气孔与空化器的轴向距离越小越有利于空泡的生成和发展,当两者距离较大时将无法形成光滑透明的通气超空泡。通气碗的作用主要是通过导流使通入的气流有合理的入射角度,而不至于与空泡界面发生强烈作用。通气碗结构不合理将会对空泡形态产生显著影响(如图7所示),当通气碗扩散角度过大时,由通气系统喷出的气流与空泡界面将产生不平行,由这种不平行而产生的通气力将会使得空泡界面发生波动,空泡从清晰透明转变为混沌模糊。另外当通气碗尺度过大时,空化器形成的空泡无法越过通气碗,自然空泡与通气空泡不能联合形成覆盖模型大部分表面的超空泡。除了扩散角度和最大直径外,通气碗的另一个重要参数是通气碗的级数,由于通气孔尺度较小在一定程度上限制了通气量,因此采用多级通气便可以保证足够的通气量,另外多级通气还可以均化通气力对空泡界面的作用有利于保证超空泡形态稳定性。

综上所述在通气碗结构设计中,要选取合适的扩散角度和最大直径,并且采用二级或多级通气。

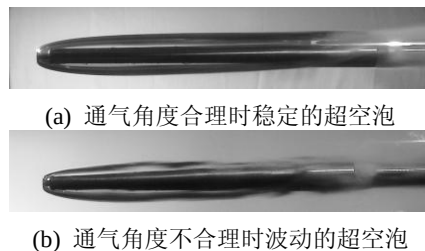


图7 通气角度对空泡形态影响

Fig.7 Effect of ventilated angles on supercavity

为了最大限度的降低通气孔和通气碗结构不合理对空泡形态产生的影响,应用 Logvinovich^[10]提出的近空化器处的超空泡轮廓曲线公式(3)对通气孔与空化器轴向距离 L_t 、通气碗最大直径 D_t 和通气碗扩散角 α 进行了优化设计。

$$\frac{R}{R_n} = \left(1 + 3 \frac{x}{R_n}\right)^{1/3}, \quad \frac{x}{R_n} < 3-5 \quad (3)$$

其中: $R_n = D_n / 2$ 为空化器半径; x 为空泡界面的轴向坐标; R 为 x 处对应的空泡周向半径。根据上述公式,为了使超空泡越过通气碗的最大直径,应使得 D_t 和 L_t 满足下式:

$$\frac{D_t}{2} = R_n \left(1 + 3 \frac{L_t}{R_n}\right)^{1/3} \quad (4)$$

为了最大限度的降低通气力的影响,应使得通气角度与相应位置上空泡界面相切,将公式(3)对 x 求导,可得 L_t 和 α 应满足下式:

$$\tan(\alpha) = \left(1 + 3 \frac{L_t}{R_n}\right)^{-2/3} \quad (5)$$

由于: $L_t / R_n < 3-5$, 因此根据式(5)可得: $8^\circ \leq \alpha \leq 13^\circ$, 另外由于 α 随 L_t 的增大而减小,因此当采用多级通气时,应使得通气碗的扩散角逐级减小。根据上述关系设计的通气碗,经过实验验证取得了比较好的效果。

2.5 尾部收缩段的选取

模型尾部形状与超空泡形态和模型流体动力布局密切相关,没有尾部收缩段(即模型尾部与支撑杆之间的过渡段)和具有尾部收缩段的不同模型在相同环境下尾部流场情况存在较大差别,没有尾部收缩段的模型不但在前端空化器处产生空泡,而且由于模型尾部的逆压梯度较大也会产生空泡,即生成了双空泡。当通气空泡数进一步降低时,前后两

个空泡会连起来形成一个较大的通气超空泡, 由于此时的超空泡是空化器和模型尾部联合生成的, 因此在研究空化器特性时会使得实验结果偏大。实验观察到当双空泡形成时超空泡长度波动十分剧烈, 此时超空泡界面与模型表面的间隙较小, 当超空泡发生波动时界面被模型表面所隔断, 使得空化器形成的超空泡与尾部突变处形成的超空泡时断时续的相连, 超空泡体积的这种剧烈变化, 将导致超空泡内部压力的剧烈变化, 进而影响超空泡形态的稳定性。

2.6 模型支撑的选取

水洞实验中不可避免的要考虑模型支撑对空泡形态以及模型水动力的影响, 合理的选择支撑的截面形状并根据实验要求选择合适的支撑方式可以有效提高实验结果的准确性。实验发现当模型采用腹支撑方式时, 支撑截面形状分别为六边形和流线型水翼在相同环境下对空泡形态和模型阻力的影响存在较大差别。在这两种截面形状下超空泡都难以越过模型支撑, 而与水翼型支撑相比六边形支撑此时产生了大量游移型空泡, 严重影响光滑透明的超空泡形态, 另外六边形支撑的模型在其尾部压力降低较大, 一方面会造成通入的气体部分进入支撑的尾流, 使得在形成相同尺度的通气超空泡时将要求较大的通气率, 另一方面会造成支撑受到的阻力较大, 使得模型振动加剧。图 8 给出了采用腹支撑方式、截面形状分别为六边形和流线型水翼在相同环境下对空泡形态和模型阻力的影响。可见同一模型当采用非流线型支撑时, 在形成超空泡前后受到的阻力波动都比流线型支撑时的大。

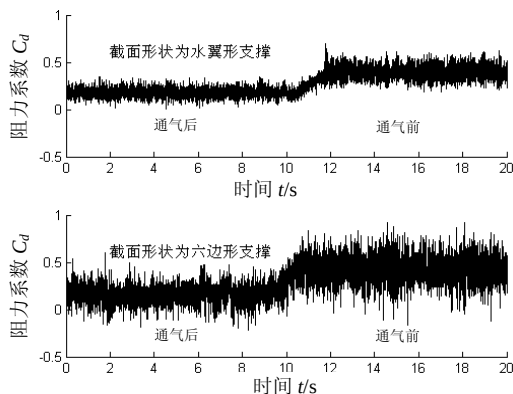


图 8 支撑截面形状对模型阻力的影响

Fig.8 Effect of section shape of the strut on dynamic characteristics

模型支撑方式主要有前支撑、尾支撑和腹支撑

三种。目前应用最广泛的是尾支撑方式, 支撑在模型尾部, 距离模型中最重要的部分—空化器较远, 这样不会破坏来流的流场特征, 并且由于支撑与超空泡不相交将使得支撑对空泡形态影响降到最小。尾支撑的缺点主要是尾部支杆的存在会产生导流作用, 从而破坏了尾部流场。因此采用尾支撑方式不适合研究超空泡自然闭合、模型尾部动力等尾部流场特性。另外, 采用尾支撑方式要求模型有高的刚度, 如图 9 所示, 当模型刚度较低时, 模型会发生强烈的振动, 严重影响超空泡形态。

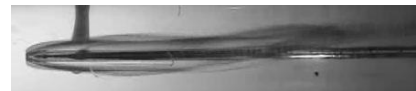


图 9 模型振动时的超空泡形态

Fig.9 Supercavity shape during vibrating

如上所述, 为了研究超空泡尾部流场特性模型只能采用腹支撑或前支撑方式。在腹支撑方式中, 支撑位于模型中部, 这样支撑既不会破坏前部流场也不会影响尾部流场, 因此腹支撑方式被普遍用于模型总阻力的测量。但是由于支撑截面与超空泡界面相交, 当空化器较小时空泡界面甚至很难越过模型支撑, 因此腹支撑方式不适于进行空泡形态的定量研究。

为了研究超空泡尾部流场特性并降低支撑对空泡形态的影响, 支撑方式只能选择前支撑如图 10 所示。



图 10 模型为前支撑时形成的超空泡形态

Fig.10 Supercavity shape in front-strut type

在前支撑方式中支撑位于空化器前端, 这样由绕流所形成的高压作用在模型支撑的前端而不同于尾支撑中压力直接作用在空化器前端, 因此空化器振动较小, 实验观察到采用前支撑方式形成的超空泡形态比较稳定, 尤其是尾部闭合位置比较固定, 不同于采用尾支撑方式形成的超空泡在尾部闭合处发生强烈的振荡。前支撑的最大缺点是由于模型位于空化器前端将势必对来流流场产生一定的影响。因此 Logvinovich^[10]提出当模型采用前支撑方式时, 空泡形态和模型动力应采用有效空化器直径 D_e ($D_e = \sqrt{D_n^2 - D_z^2}$, 其中 D_z 为支撑的直径) 进行计算, 即空化器的有效截面应该排出前端支杆的截面积而等于空化器直接与水接触的面积。图 11

将采用前支撑方式形成的超空泡厚度分别用空化器直径和有效直径进行无量纲化,并与采用尾支撑方式形成的无量纲空泡厚度进行对比:

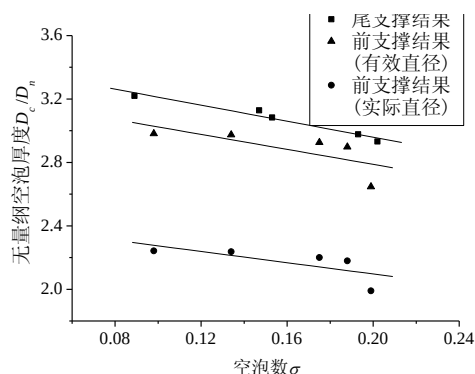


图 11 分别采用前支撑和尾支撑时的超空泡形态发展规律

Fig.11 Comparison of supercavity development using front-strut with that using rear-strut mode

可见采用有效直径时两种支撑方式的计算结果符合较好,这说明了采用有效直径的合理性。

3 结论

通气超空泡水洞实验结果表明实验模型会对空泡形态及模型水动力产生较大影响:

(1) 在相同空泡数下模型尺度越大,阻塞比越大,空泡长度越大。

(2) 锥柱结合的模型主体会产生滞后效应,它有利于控制超空泡闭合位置。

(3) 在相同空泡数下超空泡的长度随着空化器直径的增大而增大,并且在相同直径下,圆盘空化器比圆锥空化器产生的超空泡尺度大。

(4) 通气碗结构不合理将导致无法形成光滑透明的通气超空泡。

(5) 模型尾部也会产生空泡,并与前端空化器产生的空泡一起形成双空泡。

(6) 非流线型横截面的支撑将产生大量游移型空泡,并导致模型振动加剧,不同的支撑方式适用于研究不同的内容,当模型采用前支撑方式时,空泡形态和模型动力应采用有效空化器直径进行计算。

本文通过分析上述影响因素,说明了通气超空泡实验模型应该具有的合理结构和尺度。但是由于超空泡在减小模型摩擦阻力的同时,会导致模型的

形状阻力有所增加,因此如何选取空化器的直径、线型和模型主体形状使得产生的超空泡能够有效减阻还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Hrubec J D. High-speed imaging of supercavitating underwater projectiles [J]. Experiments in Fluids, 2001, 30(1): 57—64.
- [2] Vlasenko Y D. Experimental investigation of supercavitation flow regimes at subsonic and transonic speeds [C]// Yoichiro Matsumoto. 5th International Symposium on Cavitation. Osaka, Japan: 2003, GS-6-006.
- [3] 颜开, 褚学森. 超空泡流体动力学研究进展[J]. 船舶力学, 2006, 10(4): 148—155.
Yan Kai, Chu Xuesen. Research progress of supercavitation hydrodynamics [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(4): 148—155. (in Chinese)
- [4] 曹伟, 王聪. 自然超空泡形态特性的射弹试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(12): 175—179, 187.
Cao Wei, Wang Cong. High-speed projectile experimental investigations on the characteristics of natural supercavitation [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(12): 175—179, 187. (in Chinese)
- [5] Kuklinski R, Henoch C, Castano J. Experimental study of ventilated cavities on dynamic test model [C]// Christopher E B. 4th International Symposium on Cavitation. California: California Institute of Technology, 2001, Session B3. 004.
- [6] Martin W, Travis J S, Roger E A. Experimental study of a ventilated supercavitating vehicle [C]// Yoichiro Matsumoto. 5th International Symposium on Cavitation. Osaka, Japan: 2003, OS-7-008.
- [7] Brennen C E. Cavitation and bubble dynamics [M]. New York: Oxford University Press, 1995.
- [8] Savchenko Y N. Supercavitation-problems and perspectives [C]// Christopher E B. 4th International Symposium on Cavitation. California: California Institute of Technology, 2001, Lecture. 003.
- [9] Savchenko Y N, Vlasenko Y D, Semenenko V N. Experimental study of high-speed cavitated flows [J]. International Journal of Fluid Mechanics Research, 1999, 26(3): 365—374.
- [10] Logvinovich G V. Hydrodynamics of flows with free boundaries [M]. Naukova, Dumka, Kiev: Halsted Press, 1969.