文章编号：1000-4750(2007)03-0159-06

空化器参数对通气超空泡形态影响的实验研究

*贾力平，王　聪，于开平，魏英杰，王海斌，张嘉钟

(哈尔滨工业大学航天学院，哈尔滨 150001)

摘　要：为了在低速下获取形态可控有效减阻的通气超空泡，利用中速可持续通气空泡水洞开展了空化器参数对通气超空泡形态影响的研究。研究结果表明：空化器直径与通气超空泡的形态密切相关，在相同流场参数条件下，较大直径的空化器易于空化且在较低的通气率下即可形成较大的通气超空泡；通气超空泡的优良率与空化器直径密切相关；不易选取空化器直径与模型后体直径比值 $D_n / D < 0.263$ 的空化器；空化器线形同样也是一个重要的参数，例如，在相同流场参数条件下，平头倒角形空化器比圆锥形空化器形成的超空泡尺寸大，对于圆锥形空化器，锥角越小越不易产生通气超空泡。此外，还将圆盘形空化器超空泡形态的试验结果与理论结果进行了比较，其总的规律是相一致的。

关键词：空化器直径；空化器线形；通气超空泡；通气流量；水洞实验
中图分类号：O35; TV131.3　　**文献标识码**：A

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CAVITATOR PARAMETERS EFFECTING ON VENTILATED SUPERCAVITY SHAPE

*JIA Li-ping , WANG-Cong , YU Kai-ping , WEI Ying-jie , WANG Hai-bin , ZHANG Jia-zhong

(School of astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to get a perfect ventilated supercavity with controllable shape and reducible drag, the experiments have been done in a ventilated cavitation tunnel to study the relationship between the cavitator parameters and the ventilated supercavity shape. Experimental results showed that the cavitator diameter plays an important role on the ventilated supercavity developing. Under the same conditions of the fluid parameters, the bigger the cavitator diameter is, the easier the cavitation is and the bigger the ventilated supercavity size becomes. Fineness ratio of ventilated supercavity is closely related to cavitator diameter. The ratio of cavitator diameter to the attached body diameter $D_n / D < 0.263$ is unfit for choice. The contour of cavitator is also an important parameter, for instance, under the same conditions of the fluid parameters the blunt reverse angle cavitator is easier to form supercavity than conic cavitator，and the conic cavitator with the smaller cone angle is much harder to form ventilated supercavity than the one with a bigger cone angle. Besides, the experimental results of disk cavitator have been compared with theoretical results in the paper, and the main patterns agree.

Key words: cavitator diameter; cavitator contour; ventilated supercavity; ventilation flow rate; water tunnel experiment

---

收稿日期：2005-05-28；修改日期：2005-09-26

作者简介：*贾力平(1977)，女，河北邯郸人，博士生，从事超空泡流体力学理论及试验研究(E-mail: lena3333@163.com)；
王　聪(1966)，男，内蒙古呼和浩特人，副教授，博士，从事航天器动力学、振动与控制，流体力学等研究；
于开平(1968)，男，黑龙江哈尔滨人，教授，博士，主要从事水下航行体的超空化减阻理论与试验技术；
魏英杰(1975)，男，黑龙江大庆人，副教授，博士后，从事流体力学数值模拟、超空泡流理论与试验研究；
王海斌(1976)，男，河北邯郸人，博士生，从事超空泡数值仿真及试验研究；
张嘉钟(1945)，男，黑龙江哈尔滨人，教授，硕士，从事航天器动力学、机械故障诊断，流体力学等研究。

空化器是安装在超空泡航行体前端的一个诱导、促进空化的部件，它的基本作用是通过脱体绕流来诱导降压创造空化条件和调整超空泡的形态。同时空化器的线形也在很大程度上影响着航行体的形状阻力，为此国内外研究人员对空化器开展了大量的研究。在早期，他们就给出了在较小空化数下空化器阻力特性与空化数的关系[1]。Logvinoich G V 早在上个世纪 60 年代通过理论与实验研究给出了空化器阻力系数、空化器直径和空化数与自然超空泡形态的函数关系[2]。Savchenko Yu N 在 2000 年对锥形空化器和 Σ 形空化器开展了研究，给出了它们的阻力特性与几何参数和空化数的函数关系，同时还对 Σ 形空化器的稳定性进行了深入的研究和分析[3]。然而，上述研究大部分都是针对空化器参数对自然超空泡形态的影响。由于在实验室水洞里靠提高水速产生自然超空泡很困难，一般情况需要通过高速射弹试验来研究超空泡。Reichardt[4]首次提出在低速情况下通过人工通气的方法来研究超空泡。Kirschner 等人[5]的研究结果表明在自然空泡数和通气空泡数相同的条件下，自然超空泡与通气超空泡具有相似的几何特性与力学特性。通气超空泡因其易于实现和控制而成为实验室研究超空泡特性和形状控制的一种有效途径。而且对于水下航行体，即使在其巡航段的速度下可以形成自然超空泡，但是也需要利用通气超空泡的减阻特性使航行体迅速加速至巡航速度。所以对如何迅速形成有效减阻的通气超空泡本身的研究也是极其必要的。然而，在目前公开文献上，对通气超空泡的研究主要集中于典型空化器(圆盘形、圆锥形)下，通气率、通气压力、通气角度对超空泡形态和航行体减阻效果的影响，关于空化器几何参数对通气超空泡形态的影响研究还少见有文献发表。

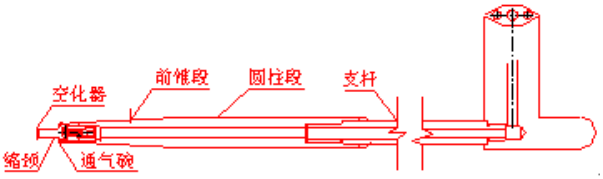
本文将根据带有不同空化器模型的轴对称细长体在中速空泡水洞中的实验结果，研究空化器直径、空化器线形等参数对通气超空泡的影响，并将部分实验结果与理论值进行对比。

1 实验模型与相似准则

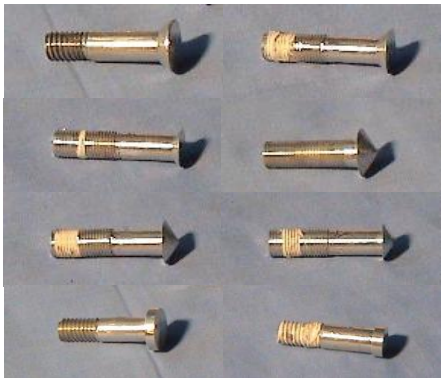
1.1 实验设备与模型

具体试验是利用中速可连续通气的空泡水洞完成。水洞为封闭循环式，有减压、除气装置。工作段直径 $D=0.20$m，压力 $p=120$kPa ~ 20kPa。在水洞的收缩段内装有蜂窝器，以降低湍动度，使出口水流均匀。外置通气系统可以保证持续的长时间通气。电脑控制的数据采集、处理与显示系统以及高速摄像系统、高分辨率数字相机和内置的六分力天平等测量系统保证了对所需要的实验数据较为准确的测量。

航行体的试验模型如图 1(a)，由空化器、通气碗、前锥段和圆柱段四部分组成。空化器模型为圆盘形、圆锥形和平头倒角系列。空化器直径 D_n 采用系列尺度从大到小依次为 D_{n1}、D_{n2}、D_{n3}、D_{n4}，试验中所采用的部分空化器模型如图 1(b)。空化器与模型采用螺纹连接，模型和尾撑采用枝干连接。通气管路和所有的测试线路都由模型内部经支杆从尾部引出水洞，以便尽量减少对流场和超空泡形态的影响。



(a) 模型和尾部支撑示意图



(b) 空化器的部分试验模型

图 1 航行体试验模型和空化器的部分试验模型

Fig.1 Experimental models of vehicle and partial cavitators

1.2 超空泡流相似准则的考虑

超空泡流有 7 个主要参数即模型特征长度 L、自由流和空泡内的压力差 $p_\infty - p_c$、流体的速度 V、流体的密度 ρ、重力加速度 g、水的运动粘性系数 ν 和水的表面张力系数 ς。在实验中要保证超空泡流的完全相似，需要满足空化数 σ、弗鲁得数 Fr、雷诺数 Re 和韦伯数 We 完全相等。这在实际试验中几乎不可能做到，一般只考虑满足其中最重要的一到两个相似准。

超空泡流中最主要的相似准则参数是空化数 σ，$\sigma<0.1$ 相应于超空泡流[6]。对于自然超空泡，该空化数值可以在 $V>50$m/s 时达到。在该速度情况

下，水的粘性影响几乎消失，重力和表面张力也可以忽略不计，则空化数就成了自然超空泡流的唯一相似准则。对于通气超空泡，一般是在较低速度下形成，重力对超空泡形态存在一定的影响，所以实验中需要考虑弗鲁德数。本次试验通过对次空泡内的持续通气增加空泡的压力来满足空化数的相似条件，试验可以满足的弗鲁德数范围 $Fr=16\sim71$ ($Fr=V/\sqrt{gD_n}$)。在较低的弗鲁德数下尤其是 $Fr<30$，所形成的通气超空泡存在着严重的不对称性(见图 2)。本文所采用的试验数据都是在 $Fr=30\sim71$ 之间，模型上下超空泡的长度差不超过15%。弗鲁德数对超空泡不对性影响的具体规律不在本文讨论范围内。

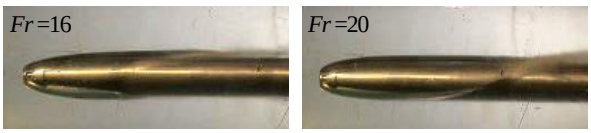


图 2　实验中的部分严重不对称的超空泡图片

Fig.2　Partial unsymmetrical ventilated cavity in the experiment

2　超空泡形态处理方法

由于影响超空泡形态稳定因素较多，而且超空泡本身也是瞬息万变。但是在一定的尺度下其形态是相对稳定的。本次试验在每一个速度的每一个通气流量下都持续一定的时间至空泡形态处于相对稳定状态，然后采用高速摄像拍摄了一系列图片。数据处理时对这些图片上的空泡尺寸取平均。由于弗鲁德数影响，空泡上下长度不相等，所以本文在其长度处理过程中，根据文献[7]，超空泡的长度取最大直径之前空泡长度的两倍，超空泡厚度以其最大直径来衡量(见图 3)。超空泡形态尺寸的具体处理采用软件 ACDPhotoEditor3。

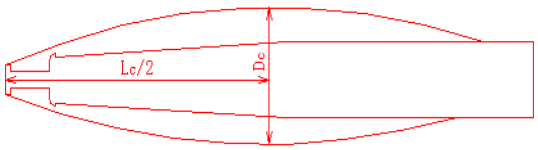


图 3　超空泡长度和直径定义示意图

Fig.3　Supercavity length and diameter definitions

3　空化器参数对通气空泡形态的影响

3.1　空化器直径对通气超空泡形态的影响

通过本次水洞试验，发现在相同通气流量 Q 下，不同空化器直径模型所产生的超空泡尺寸有很大差别，空化器直径越大所产生的通气超空泡的尺寸就越大。图 4 给出了自然空化数 $\sigma_v=0.462$ 情况下，不同直径倒角空化器的超空泡形态与通气流量的关系。其中，超空泡的最大直径 D_c 由模型最大直径 D 做无量纲处理，长度 L_c 由模型总长度 L_0 做无量纲处理。从图中可以看出随着通气流量的增加空泡的直径变化虽不甚明显，但有增加趋势；超空泡的长度随着通气量在单调的增加，但是大直径空化器形成的超空泡尺寸始终比小直径的大。

利用超空泡减小水下航行体的阻力，其减阻效果与超空泡形态密切相关。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航行体；从理论上分析，空泡的厚度只要超过了粘性层的厚度就具有减阻的效应，实际上，空泡的厚度要比粘性层厚很多。控制超空泡的形态就是在超空泡具有一定长度条件下控制其厚度。超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压差阻力。实验表明过厚的超空泡降低航行体摩擦阻力的同时大幅度增加了航行体的压差阻力，从而导致超空泡的减阻效果不明显。由图 4 可以看出对于平头倒角空化器模型，在空化器直径 $D_n=D_{n1}$ 情况下，虽然其超空泡的长度最大，但

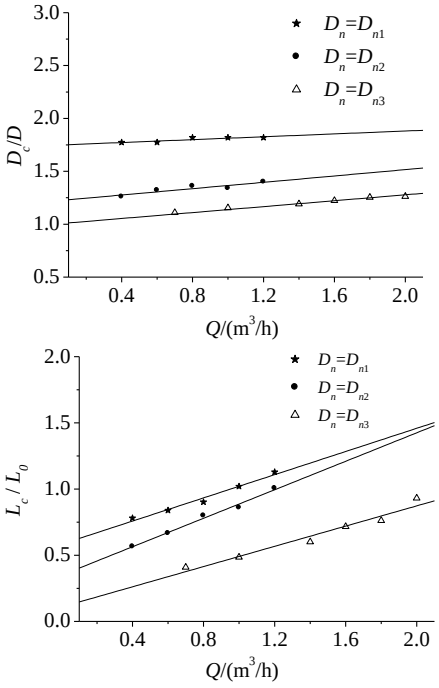


图 4　$\sigma_v=0.462$ 情况下，不同直径平头倒角空化器形成的通气超空泡形态

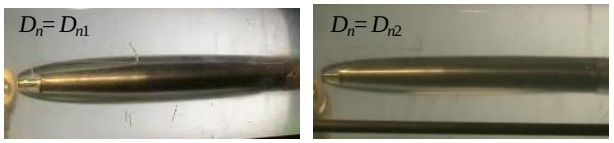
Fig.4　Supercavity shapes for different diameter blunt reverse angle cavitator models at $\sigma_v=0.462$

是超空泡的直径超过了模型直径的 160%；对于 $D_n = D_{n3}$ 的空化器模型，虽然空泡的直径较小，但是为了得到一定长度的超空泡所需要的通气量比较大；而对于 $D_n = D_{n2}$ 的空化器模型，虽然在相同通气流量下形成的空泡长度没有直径为 $D_n = D_{n1}$ 的空化器模型形成的超空泡尺寸大，但也可以在较低的流量下形成完全包裹上模型的超空泡，且超空泡的直径相对来说也不太大(图 4)。所以对于空化器直径过大或过小都是不适宜的，必须与模型后体直径成一定比例。

下面从超空泡长细比 L_c / D_c 来分析空化器直径对超空泡形态的影响。在文献[7]中，超空泡的长细比也称为其形态的优良率，L_c / D_c 值越大，超空泡的形态就好，减阻效果就越好。Reichardt 认为超空泡的长细比与空化器的几何参数无关，它只是空化数的函数：

$$\frac{L_c}{D_c} = \frac{\sigma + 0.008}{\sigma(0.066 + 1.7\sigma)} \tag{1}$$

该公式与试验研究中得到的空化器直径对通气超空泡 L_c / D_c 的影响规律不同。如图 5 所给的在不同直径空化器模型条件下，达到相同空泡长度时的超空泡形态，可以看出直径为 D_{n1} 的空化器模型比直径为 D_{n2} 的生成的超空泡厚很多，这说明空化器直径对通气超空泡的细长比有很大影响。图 6 给出了不同直径平头倒角空化器模型的超空泡的长细比 L_c / D_c 随通气流量的变化关系。由该图可以看出超空泡的优良率随着通气量的增加在变大；直径为 D_{n2} 的空化器形成超空泡优良率要比直径为 D_{n1} 和 D_{n3} 的高很多，这也说明在试验中对于平头倒角空化器选 D_{n2} 较为适合。对于一定直径的航行体，空化器直径选取与空化器的线形也有关系，所以空化器直径与航行体直径的最佳比值我们将在后续试验深入研究。



(a) Q = 0.8m^3/h (b) Q = 1.0m^3/h

图 5 平头倒角空化器通气超空泡形态

($L_c/L_0 = 0.902$)

Fig.5 Supercavity size for reverse angle cavitators ($L_c/L_0 = 0.902$)

此外，在实验中我们还观察到太小的空化器直径模型在较小的流量下根本无法在模型表面形成空泡，从通气槽出来的气体随即被水流带走。实验表明：对直径为 D_{n4} 平头倒角空化器模型，直至通气流量持续升到 $Q = 3.5\text{m}^3/\text{h}$ 时，才开始在模型的表面形成较为稳定的气层，但是空化器处未出现空泡。随着通气流量的继续增加，空化器附近开始出现空泡，但是该空泡有明显脱落周期，未能与通气空泡联结为一体。继续增大通气流量至 $Q = 5.3\text{m}^3/\text{h}$ 左右，空化器处出现相对稳定空泡并与通气碗后的空泡联结为一体(见图 7)。从图中可以看出大通气量下的空泡相对小通气量下的较为透明，但是仍旧混浊，这意味着空泡内部的含气率较低，实验表明这样的空泡实际上达不到减阻的目的。同时对直径为 D_{n4} 的空化器模型，随着流速的持续提升，模型的震动和空泡的噪声在增大、空泡界面出现相对较大波动。这些现象与 Yuriy D Vlasenko[8]在超空泡实验中观测到的的现象以及 S I Putiliu(1998)[9]采用乌克兰的 NAS 流体力学研究所开发的 SCAV 软件计算的结果都是一致的。由此可见空化器直径过小，不但空化特性不好，而且对稳定性影响也不好，根据

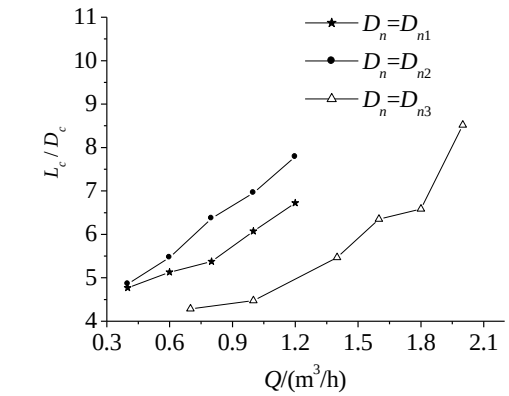


图 6 不同直径平头倒角形空化器模型生成的超空泡长细比

Fig.6 Fineness ratio of supercavity for different diameter blunt reverse angle cavitator models

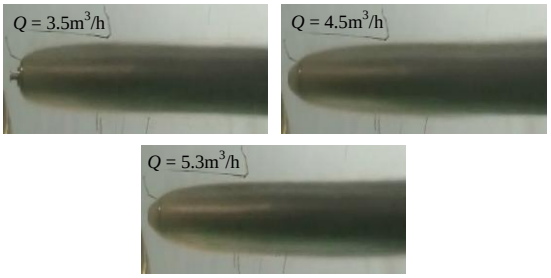


图 7 直径 $D_n = D_{n4}$ 的平头倒角空化器模型部分超空泡图片

Fig.7 Partial experimental pictures of supercavity of blunt reverse angle cavitator with diameter $D_n = D_{n4}$

我们的实验经验综合考虑其特性，初步认为不易选取空化器直径与模型后体直径比值 $D_n/D<0.263$的空化器。

3.2　空化器线形对通气超空泡形态的影响

由前期我们所做的无动力高速射弹自然超空泡生成的实验可知，在相同空化数和空化器直径条件下，平头空化器模型比 120°锥角的圆锥形空化器模型产生的超空泡尺寸大。所以我们认为平头空化器要比圆锥形空化器模型的空化特性好，更容易形成自然超空泡。本次试验对平头倒角形和 120°锥角圆锥形空化器模型进行了通气超空泡的研究。结果发现在相同通气量下，其超空泡最大直径和长度也有很大差别。图 8 给出了在自然空化数 $\sigma_v=0.33$情况下，平头倒角和圆锥形空化器模型的超空泡形态与通气流量的关系。可以看出相同通气流量下，平头倒角空化器模型所产的超空泡尺寸要比圆锥形空化器模型的大很多。而且通过对实验数据的研究也表明：在相同通气量下，平头倒角空化器模型和圆锥形空化器模型都在随自然空化数的减小，超空泡变长，厚度变化虽不甚明显，也基本呈增加趋势，但后者的空泡尺寸始终都明显比前者的小很多。另外，图 9 也给出了其超空泡的优良率，可以看出在直径 $D_n=D_{n2}$ 情况下，平头倒角空化器比 120°锥角圆锥形的超空泡形态的优良率高。可见不同线形空化器其超空泡长细比也有很大差异。

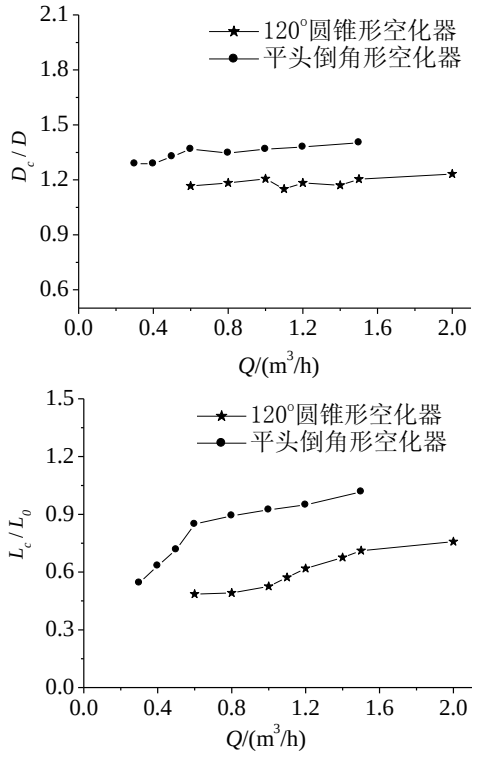


图 8　圆锥形空化器模型和平头倒角空化器模型的超空泡形态与通气流量的关系

Fig.8　Relations of supercavity shapes of models with cone or blunt reverse angle cavitator and ventilation flow rate at σ_v = 0.33

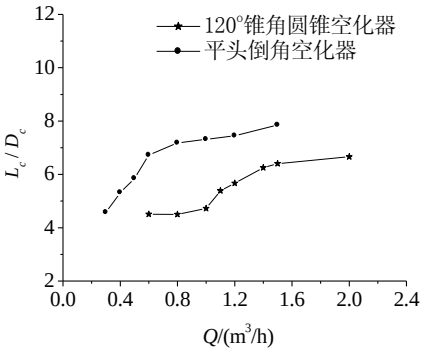


图 9　当 $D_n=D_{n2}$ 时，圆锥形和平头倒角空化器的超空泡长细比

Fig.9　Fineness ratio of supercavity for coin and blunt reverse angle cavitator models with $D_n=D_{n2}$

3.3　圆锥形空化器锥角对通气超空泡形态的影响

为了探讨圆锥形空化器锥角对通气超空泡形态的影响，本次试验对 120°锥角和 60°锥角圆锥形空化器进行了研究。实验表明 120°锥角空化器模型在 0.3m³/h 左右的通气流量下就可以迅速的形成透明的通气超空泡，而 60°锥角圆锥形空化器模型在 4m³/h 下都几乎形成不了超空泡。当通气率大于 4m³/h 时，60°锥角的空化器模型能够形成超空泡，但空泡不够透明，尾部没有明确的闭合点，如图 10 给出的部分超空泡的实验图片。空泡不够透明意味着空泡内部的含气率较低，试验表明这样的空泡形态减阻效果较差。所以我们认为锥角较小的圆锥形空化器不易用来诱导初始空化形成通气超空泡。

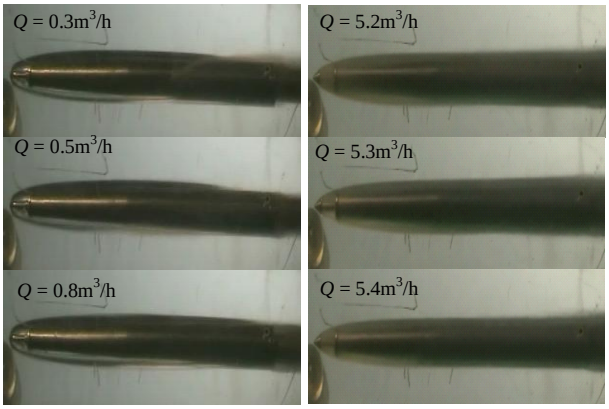


图 10　120°(左)和 60° 锥角(右)圆锥形空化器模型通气超空泡形态的部分实验图片

Fig.10　Partial experimental pictures of ventilated supercavity of coin cavitators with 120°(left) or 60° (right) angle of coin

3.4 圆盘空化器的通气超空泡形态的试验与理论结果

在实验中，为了得到空泡内的压力 P_c，需要在模型的表面嵌入一定数量的压力传感器，但是这对模型加工存在着一定的难度，所以本次试验没有测空泡内的压力。根据文献[3]中所给的通气率 $\overline{Q}$、通气空泡数 σ 和弗鲁德 Fr 的关系数：

$$\overline{Q}=\frac{0.27}{\sigma[\sigma^3 Fr^4-2]} \tag{2}$$

初步计算了通气率 $\overline{Q}$ 与 σ 关系进而给出 σ 与空泡形态的关系，其中，$\overline{Q}=Q/(VD_n^2)$。依据空泡截面扩大的独立性原理，G.V.Logvinovich 利用自由流线扩展渐近律得到了小空化数情况下空泡的中截面直径 D_c 和长度 L_c 与空化器直径 D_n、阻力系数 c_x 和空化数 σ 的关系：

$$\begin{aligned} D_c &= D_n\sqrt{\frac{c_{x0}(1+\sigma)}{\sigma}} \\ L_c &= \frac{D_n}{\sigma}\sqrt{c_{x0}(1+\sigma)\ln\frac{1}{\sigma}} \end{aligned} \tag{3}$$

其中，$c_x=c_{x0}(1+\sigma)$，c_{x0} 是空化器的零阻力系数，对于圆盘空化器 $c_{x0}=0.82$[10]。对于式(3)的渐进关系，带圆盘空化器的模型在较小空化数情况已经得到实验证实。为此，本文将部分圆盘形通气超空泡形态的试验结果与理论值进行了比较，如图 11 所示。

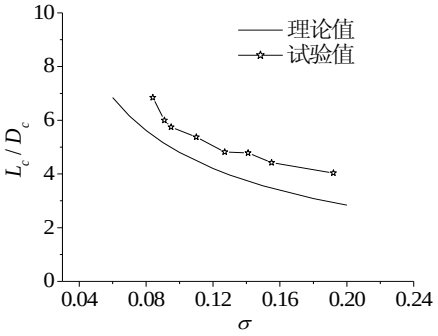


图 11 圆盘空化器超空泡 L_c/D_c 的试验值与理论值

Fig.11 Experimental and theoretical results of supercavity L_c/D_c for disk cavitator

由图 11 可以看出超空泡长细比的试验值和理论值的基本变化规律一致，但在每个空化数下前者都比后者大一些。其原因可能是用式(3)算出的超空泡长细比与空化器直径无关，而实际试验中通气超空泡的长细比与空化器的直径有很大关系，所以空化器的直径选取可能是造成其差异的原因之一。其次，理论公式给所描述是超空泡自由闭合方式下状态，而本次试验超空泡都闭合在模型或尾部的支撑上，属于非自由闭合，这是造成其差异的可能原因之二。另外，由于通气超空泡的复杂性，除空化器外模型的后体尤其是连接空化器与模型前锥段的通气碗相当于在模型上安装了第二个空化器这也会对空泡外形有影响，通气槽的开设位置及气流的流入角度也都会对空泡的尺寸产生影响。其具体原因将有待于我们后续试验继续研究。

4 结论

通过对本次试验结果数据的分析与研究主要得到如下结论：

(1) 空化器直径越大，在相同的通气流量下形成的超空泡尺寸就越大；超空泡优良率与空化器直径密切相关，但并不一定随空化器直径的增加而增大。直径太小的空化器不适合用来产生通气超空泡，初步认为不易选取空化器直径与模型后体直径比值 $D_n/D<0.263$ 的空化器。

(2) 相同空化器直径条件下，平头倒角空化器模型要比圆锥的通气超空泡尺寸大。通气超空泡的优良率与空化器线形也有关系。较小锥角的圆锥形空化器不易形成通气超空泡。

(3) 通气超空泡形态随空化数变化规律的试验结果与理论结果一致。

参考文献：

[1] 水利水电科学研究院译. 空化与空蚀[M]. 北京: 水利出版社, 1981.
Translated by China Research Institute of Water Resources and Hydropower. Cavitation [M]. Beijing: Water Resources Press, 1981. (in Chinese)

[2] Logvinovich G V. Hydrodynamics of flow with free boundaries [M]. Kiev, Naukova Dumka, 1969.

[3] Savchenko Y u N. Control of supercavitation flow and stability of supercavitation motion of bodies [C]. Brussels, Belgium: Published in RTO EN-010. 2001.

[4] Reichardt H. The laws if cavitation bubbles as axially symmetrical bodies in a flow [J]. Ministry of Aircraft Productuin (Great Britian), Reports and Translations, 1946, (766): 322~326.

[5] Kirschner I N, Gieseke T A, Kuklinski R. Supercavition research and development [C]. Undersea Defense Technologies Hawaii 2001, Waikiki, HI, October, 2001.

[6] Yu N Savchenko. Modeling the supercavitation processes [J]. Prykladna Gidromekhanika, 2000, 2(74):75~86.

[7] Kunz R F, Boger D A, Chyczewski T S. Multi-phase CFD analysis of natural and ventilated cavitation about submerged bodies [C]. Proceedings of FEDSM'99. 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, 1999.

[8] Vlasenko Y D. Experimental investigation of supercavitation flow regimes at subsonic and transonic speeds [C]. Osaka, Japan: Cav03-GS-6-006.

[9] Putilin S I. Some features of a supercavitating model dynamics [J]. Prykladna Gidromekhanika, 2000, 2(74): 65~74.

[10] Savchenko Y N. Supercavitation – problems and perspectives [C]. California, 4th International Symposium on Cavitation, 2001.