

空化器参数对超空泡形成和发展的影响

贾力平^{*,1)} 于开平^{*} 张嘉钟^{*} 王 聪^{*} 魏英杰^{*} 李 凝[†]

^{*}(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

[†](中国船舶研究院, 北京 100073)

摘要 为了探索超空泡的生成机理和形态变化规律, 依据其产生方式, 进行了自然超空泡高速射弹试验和通气超空泡水洞试验研究. 分析了超空泡的生成过程和空化器参数对形成超空泡的临界空化数和通气系数阈值的规律. 研究了超空泡形态尺寸变化的特性, 空化器直径和线型对自然和通气超空泡的形态尺寸有相类似的影响. 超空泡尺寸随着空化器直径的增加而增加; 在相同条件下, 钝头空化器要比圆锥形空化器更容易形成超空泡; 相对较小的直径空化器很难形成透明的通气超空泡, 其主要原因是自然空化数没有降到足够低. 此外, 研究表明空化器直径对通气超空泡的细长比的影响较大, 这与对自然超空泡形态的影响不相同. 最后, 对空化器的未来研究发展进行了展望.

关键词 自然超空泡, 通气超空泡, 空化器参数, 空化数, 通气系数, 射弹试验, 水洞试验

中图分类号: TV131 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2007)02-0210-07

引 言

超空泡技术是一种可以使水下高速航行体获得 90% 减阻量的革命性减阻方法, 这种减阻效果对水下航行体的研制和开发产生了巨大的影响^[1]. 由于其对水下航行体发展的深远意义, 该项研究已经成为国际前沿性课题.

产生超空泡效应的关键是必须在水与航行体之间形成稳定的气层, 这种气层既可以自行地生成也可以人为地沿航行体的表面生成. 相应超空泡的生成方式有两种实验研究技术: 高速射弹试验和水洞试验研究. 射弹试验优点是利用其高速的特点能够形成自然超空泡, 其缺点是试验过程中模型稳定性不易控制, 且关于运动参数的测量也较为困难^[2]. 相对而言, 水洞试验研究中参数的测量较为方便, 但是靠提高流体的速度和降低工作段压力来降低空化数形成自然超空泡仍旧很难实现. Reichardt^[3] 首次提出了向空泡内通气形成超空泡的方法, 也就是所谓的人工通气超空泡. Kirschner 等人的研究表明在相同空泡数的条件下, 自然超空泡和通气超空泡具有相似的几何特性和力学特性^[4]. 向次空泡内通气也是在低速条件下形成超空泡的一种有效方法, 因此, 它被广泛应用于水洞中对超空泡的试验研究.

实际上, 对于超空泡航行体, 在低速时需要利用通气超空泡的减阻特性使其加速至自然超空泡能够维持减阻的状态^[5]. 因此, 自然和通气超空泡的各自特性研究也非常重要.

空化器是安装在超空泡水下航行体头部的一个部件, 其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形态. 在文献 [6] 可以看到空化器直径、空化器的阻力特性和空化数对超空泡形态尺寸影响. 然而, 对超空泡的理解尤其是通气超空泡还不够深入. 在本文中, 利用射弹和水洞试验对自然和通气超空泡的形成过程及其影响因素进行了详细分析, 研究了空化器参数和主要流场参数对超空泡形态尺寸的影响特性.

1 实验设备与模型

1.1 自然超空泡射弹试验

自然超空泡射弹试验是在室内可观测小尺寸水筒内完成. 射弹用火药推进, 最高速度 70 m/s. 超空泡形态采用高速摄像记录. 射弹推进装置架设到水筒口, 由于该装置本身不能浸入水中, 为防止水流将装置浸湿, 实验设计了一个隔离装置控制水的流出. 实验所用的弹体模型为平头、圆锥形空化头的柱体系列.

2005-11-18 收到第 1 稿, 2006-12-10 收到修改稿.

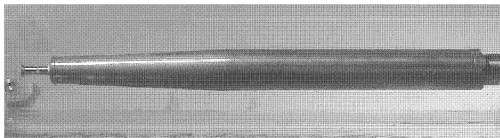
1) E-mail: lena3333@163.com

1.2 水洞通气超空泡试验

通气超空泡试验是利用中速可连续通气的空泡水洞进行的, 工作段直径 $D = 0.2\text{m}$, 工作段压力 $p = 120 \sim 20\text{kPa}$. 工作段的最大速度可以达到 30m/s . 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 4 部分组成.

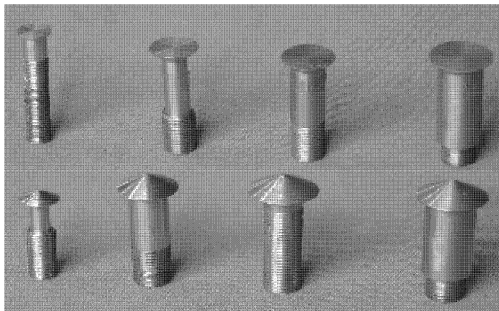
在试验中采用的空化器有圆盘形和圆锥形系列, 空化器直径从大到小依次为 $D_n = D_{n1}$, $D_n = D_{n2}$, $D_n = D_{n3}$ 和 $D_n = D_{n4}$ 如图 1(b).

试验有专门设计的外置通气系统可以保证长时间的连续通气 (见图 1(c)). 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.



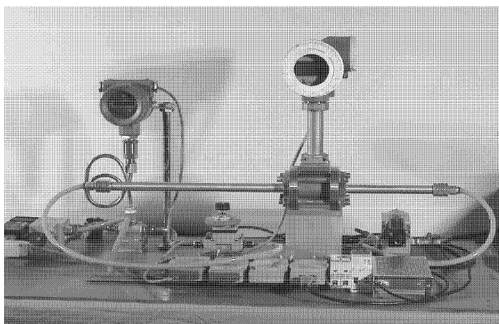
(a) 处于水洞中的试验模型

(a) Experimental model in the water tunnel



(b) 部分空化器模型

(b) Partial cavitator models



(c) 外置通气系统

(c) External ventilation system

图 1 航行体和空化器的试验模型

Fig.1 Experimental models of vehicle and cavitator

2 自然和通气超空泡的生成过程

2.1 自然超空泡的形成和临界空化数

空化数是超空泡流的主要尺度标准, 空化数定义为

$$\sigma = \frac{2(P_\infty - P_c)}{\rho V^2} \quad (1)$$

它是空泡和周围水之间的压力差 $P_\infty - P_c$, 周围液体的密度 ρ 和航行体的速度 V 的函数, 是预测超空泡的行为一个无量纲的参数. 对于自然超空泡, 空泡内的压力可以近似认为等于水的饱和蒸汽压 P_v , 所以自然空化数又称 σ_v [7].

实验研究表明自然超空泡是随着空化数的持续降低经由不同的空化阶段后发展为超空泡. 图 2 给出了平头弹体自然超空泡生成和发展过程. 在 $\sigma_v = 0.868$ 时弹体头部开始出现零星气泡. 随着空化数的降低, 气泡的数量随之增加, 片状的空泡逐渐出现. 继续降低至空化数 $\sigma_v = 0.124$ 时, 片状的空泡连成完整的空泡, 较为透明的超空泡出现, 此空化数就称为该条件下出现超空泡的临界空化数 σ_{cr} . 由于射弹实验是减速过程, 所以上述分析的是根据空泡溃灭的逆过程来分析的, 空泡溃灭的延迟效应可能会使得超空泡出现时的临界空化数偏高.

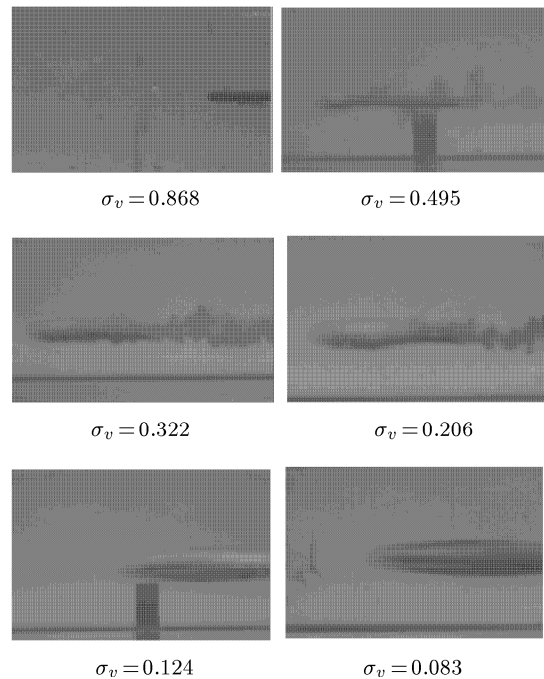


图 2 自然超空泡的生成过程

Fig.2 Forming process of natural supercavity

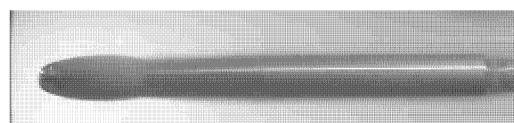
对于自然超空泡, 空化器参数对临界空化数有着决定性影响. 实验研究发现, 在相同空化器直径条件下, 钝头空化器形成超空泡需要的临界空化数约为 $\sigma_{cr} = 0.124$, 而 120° 圆锥形空化器则需要 $\sigma_{cr} = 0.107$, 这说明前者的空化特性要比后者好. 因此, 临界空化数也被认为是衡量超空泡空化特性的指标之一, 该研究对空化器的设计也具有重要意义.

2.2 通气超空泡的形成和通气系数门限值

自然超空泡的形成和发展是由于航行体速度的增加降低了空化数使得自然超空泡尺寸增大, 所以航行体速度的增加直接影响着超空泡的形态和尺寸. 对于通气超空泡, 其尺寸也随着空化数的降低而增加, 但其变化是由于通入的气体改变了空泡内部的压力 P_c (也就改变了空化数), 导致通气超空泡尺寸的变化. 通气率 Q 是改变通气空化数的主要参数, 一般通过无量纲的通气系数 $\bar{Q}$ 来表示

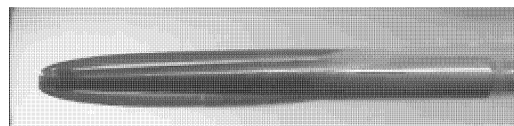
$$\bar{Q} = \frac{Q}{VD_n^2} \quad (2)$$

在实验中可以观测到通气超空泡的形成存在一个空化数降至临界值产生跳变的过程. 当气流通入到空泡中时, 空泡的长度并不会立即剧烈变化, 它随通气流率的增加而缓慢增加. 持续增加通气流率, 达到某一临界值时, 空泡将变得极其不稳定, 头部出现部分透明, 尾部剧烈振荡 (见图 3(a)). 一旦将通气流率再提高一点, 空泡将产生跳变, 形成像玻璃一样透明、形态较为稳定的空泡, 这就是所谓的“通气超空泡” (见图 3(b)). 此时的空化数就是该条件下



(a) 跳变前

(a) Before jump



(b) 跳变后

(b) After jump

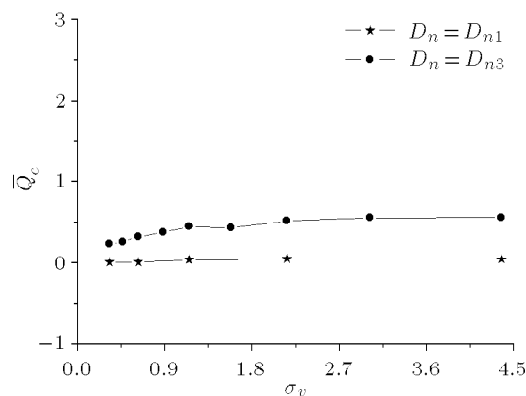
图 3 通气超空泡的临界状态

Fig.3 Critical states of ventilated supercavity

形成通气超空泡的临界空化数值, 此通气系数就定义为迅速形成通气超空泡的通气系数门限值 $\bar{Q}_c$.

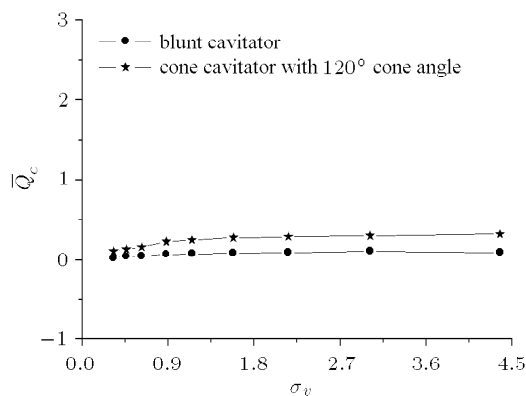
实验表明, 形成超空泡的临界空化数和通气系数门限值的大小与空化器的参数密切相关, 该项研究对水下超空泡航行体的空化器选取和通气系统的设计具有重要意义. 在本文只讨论空化器参数对通气系数门限值变化规律的影响.

图 4 给出了不同空化器的通气系数门限值随自然空化数的变化规律的实验结果. 由该图可以看出, 直径为 D_{n1} 的空化器模型比直径为 D_{n3} 的模型生成通气超空泡需要的通气系数门限值要小很多; 相同条件下, 圆盘空化器的通气系数门限值要比 120° 圆锥形空化器的低. 这也说明大直径空化器更容易形成超空泡; 相同条件下圆盘空化器比 120° 圆锥形空化器更容易形成超空泡. 另外, 从理论上分析, 随着



(a) 不同直径空化器

(a) Different diameter cavitators



(b) 不同线形空化器

(b) Different contour cavitators

图 4 不同空化器通气系数门限值随自然空化数的变化规律

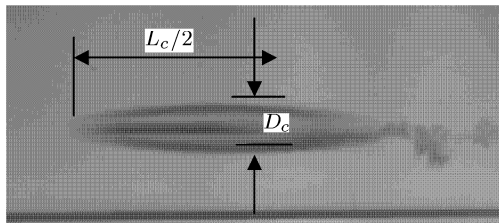
Fig.4 Relations of critical ventilation coefficient changing with natural cavitation number for different cavitators

自然空化数的减小, 其自然空化就越来越大, 则通气系数门限值应持续降低, 这与图 4 中通气系数门限值随自然空化数的降低而有减小趋势的变化规律也是一致的。

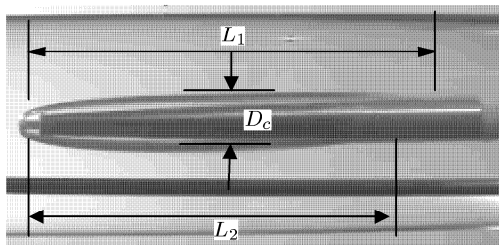
3 空化器参数对超空泡形态尺寸的影响

超空泡的基本形态为椭圆形, 其尺寸通常采用其无量纲化的最大直径 D_c 和长度 L_c 来描述 (一般采用空化器直径 D_n 无量纲化)。根据文献 [8], 自然超空泡一般取空泡前缘到其最大直径处的两倍作为其长度 L_c (见图 5(a))。然而, 对通气超空泡, 由于重力的影响空泡存在着一定的不对称性, 所以取上下空泡长度的平均值作为通气超空泡的长度 (如图 5(b)):

$$L_c = \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (3)$$



(a) 自然超空泡
(a) Natural supercavity



(b) 通气超空泡
(b) Ventilated supercavity

图 5 超空泡长度和直径的定义

Fig.5 Supercavity length and diameter definitions

稳态超空泡流中有 7 个主要参数即模型特征尺寸 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 , 水的运动黏性系数 ν 和水的表面张力系数 σ 。根据 π 定理, 可以由此给出 4 个不相关的无量纲参数: 空化数 σ , 弗鲁德数 Fr , 雷诺数 Re 和韦伯数 We , 则空泡形态的主要参数可以有下公式计算 [9]

$$D\left(\frac{x}{D_n}\right) = D_n f_1(\sigma, Fr, Re, We) \quad (4)$$

其中, f_1 是无量纲参数的函数, 可由理论或实验给出, 模型特征长度一般取空化器直径。

对于自然超空泡, 由于水流速度较高, 在超空泡自由闭合的情况下, 水的黏性影响几乎不存在, 当 $Fr > 20 \sim 30$, $We > 1000$ 时, 重力和表面张力的影响也可以忽略 [9]。因此, 在射弹实验中, 流场参数只考虑了空化数。

对于通气超空泡, 一般情况, 除空化数外还应考虑弗鲁德数 (重力) 影响。在本次通气超空泡试验中我们也着重考虑弗鲁德数, 但是关于弗鲁德对通气超空泡上飘的具体影响不在本文内研究, 本文所取得通气超空泡都是在相对较大的弗鲁德数条件下获得的, 且上下空泡长度相差不超过 15%。

3.1 空化器参数对自然超空泡尺寸的影响

实验研究发现, 自由闭合的自然超空泡尺寸变化主要决定于空化数与空化器的参数。空泡的尺寸随着空化数的减小而增加; 相同条件下, 钝头空化器比 120° 圆锥形空化器形成的超空泡尺寸要大 (见图 6)。

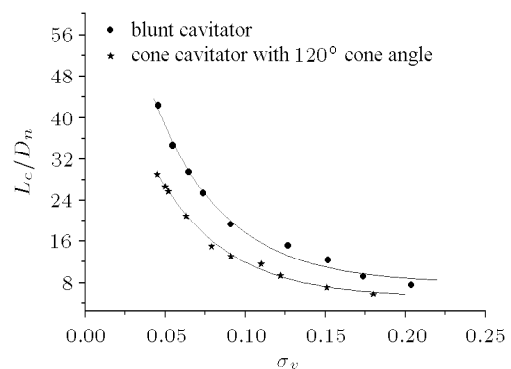
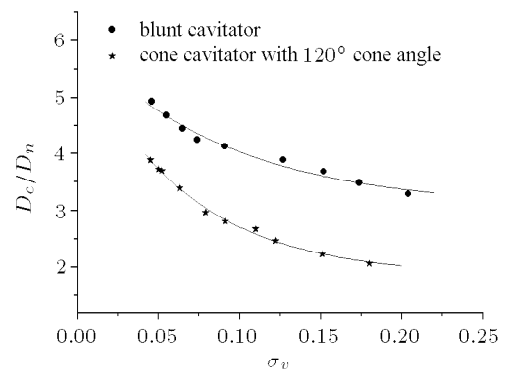


图 6 超空泡尺寸随空化数的变化关系

Fig.6 Relations of supercavity dimension changing with cavitation number

关于空泡尺寸随空化数的具体变化规律本文采用幂函数来拟合, 结果如下:

钝头弹体

$$\frac{D_c}{D_n} = 2.245\sigma^{-0.253}, \quad \frac{L_c}{D_n} = 1.461\sigma^{-1.093} \quad (5)$$

120° 圆锥头弹体

$$\frac{D_c}{D_n} = 0.932\sigma^{-0.464}, \quad \frac{L_c}{D_n} = 0.787\sigma^{-1.1783} \quad (6)$$

式 (5) 和式 (6) 的突出优点就是直接给出了空化数与超空泡尺寸的关系.

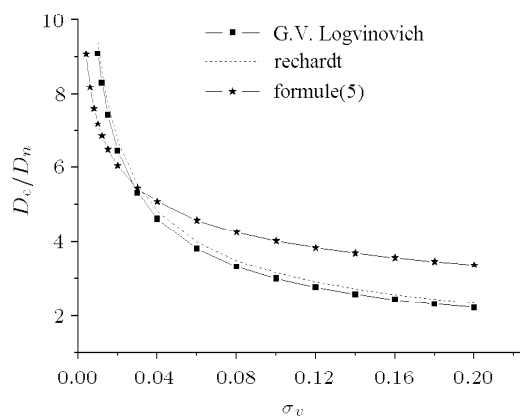
在文献上, G.V. Logvinovich 根据空泡截面扩大的独立性原则以及能量守恒原则给出了由空化器直径、阻力系数和空化数决定的空泡最大直径与长度的公式 [6]

$$D_c = D_n \sqrt{\frac{c_x}{\sigma}}, \quad L_c = \frac{D_n}{\sigma} \sqrt{c_x \ln \frac{1}{\sigma}} \quad (7)$$

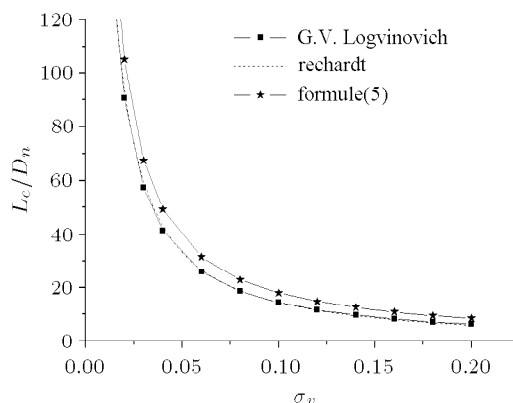
Reichardt 认为轴对称空泡长度与最大直径的比值与空化器的形状无关, 只是空化数的函数, 并且利用面元法推出了空泡尺寸的公式 [7]

$$\left. \begin{aligned} \frac{L_c}{D_c} &= \frac{\sigma + 0.008}{\sigma(0.066 + 1.7\sigma)} \\ \frac{D_c}{D_n} &= \left(\frac{c_x}{\sigma - 0.132\sigma^{8/7}} \right)^{0.5} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

对于最简单的圆盘 (钝头) 空化器 $c_x = 0.82(1 + \sigma)$. 图 7 给出了钝头空化器情况下上述理论公式与实验结果的比较. 可以看出, 在实验中所获得超空泡尺寸要比理论公式计算的结果大一些. 其可能原因是射弹实验为减速过程, 由于弹体速度太快, 上一个速度段的空泡还来不及溃灭或者没有完全溃灭, 有一部分空化就被带到下一速度段, 被认为是此速度段产生的空泡. 但是从图 7 上我们也可以看出实验



(a)



(b)

图 7 不同理论公式与实验拟合公式的比较

Fig.7 The comparison of the different theoretical formulas with experimental results

结果与理论结果的基本变化一致. 因此, 本次实验也在一定程度上验证了理论公式.

3.2 空化器参数对通气超空泡尺寸的影响

实验研究表明, 通气超空泡一旦形成, 其长度随着通气率的增加在增加, 而其直径变化则相对不太明显, 但也具有增加趋势 (见图 8). 当通气超空泡

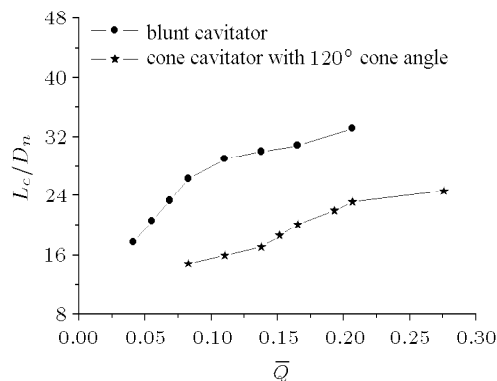
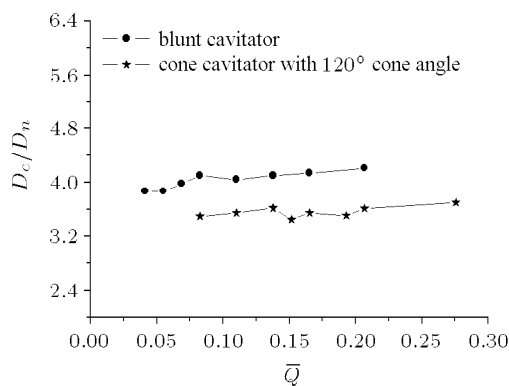


图 8 通气超空泡尺寸与通气率的关系

Fig.8 Relation of ventilated supercavity dimensions and ventilation rate

达到一定程长度时, 空泡长度不再随通气率的增加而变化. 假如继续增加通气率, 则很容易观测到空泡从透明变为混浊, 空泡界面出现较大波动. 实验表明, 这种形态超空泡不具有较好的减阻特性.

实验研究表明, 空化器参数对通气超空泡的发展具有较大的影响. 空泡尺寸随着空化器直径的增加再增加; 相同条件下, 圆盘空化器形成的超空泡尺寸要比 120° 圆锥形空化器的大 (见图 8), 这与自然超空泡的变化规律一致.

同时, 在实验中也观测到相对较小直径的空化器 $D_n = D_{n4}$ 很难形成透明的超空泡. 从通气槽出来的气体随即被水流带走, 根本形成不了空泡. 直至通气流量持续升到 $\bar{Q} = 0.988$ 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 $\bar{Q} = 1.495$ 左右, 空化器处出现相对稳定的空泡并与通气碗后的空泡联结为一体 (见图 9). 从图 9 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也达不到减阻的目的.

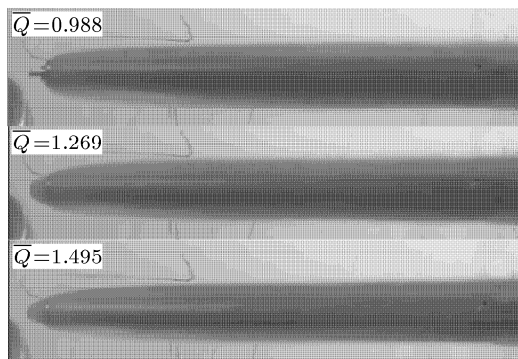


图 9 直径 $D_n = D_{n4}$ 空化器模型部分超空泡图片

Fig.9 Partial experimental pictures of supercavity for models with relatively small cavitator diameter $D_n = D_{n4}$

带有较小直径空化器的模型很难形成有效减阻的通气超空泡. 其主要原因是水洞工作段的自然空化数不能降到足够低, 这意味模型的自然空化较差. 同时实验表明水洞的阻塞比对工作段的自然空化数降低和通气超空泡的形成也有一定的影响. 阻塞比较小的情况下, 水洞工作段的自然空化数有一定的降低, 小直径空化器模型相对容易形成通气超空泡.

此外, 通过水洞实验结果的分析研究, 发现通气超空泡的长细比 L_c/D_c (也称为优良率^[8]) 与空化器

参数相关, 这与上边提到的自然超空泡理论公式的描述不相同. 图 10 给出了不同直径空化器情况下, 通气超空泡的长细比随通气系数的变化规律. 从图中曲线可以看出, 相对较大和相对较小直径的空化器形成的超空泡长细比都较小. 所以, 在一定的自然空化数条件下, 存在最佳空化器直径使得指定尺寸航行体的超空泡长细比达到极大值.

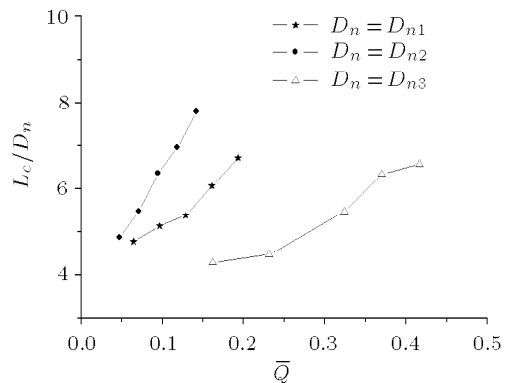


图 10 通气超空泡的长细比的变化规律

Fig.10 Fineness ratio changes for ventilated supercavity

通过上述对自然和通气超空泡的分析研究, 可以看出其形成和发展都有相似的规律, 但它们也有许多各自的特点需要我们详细研究分析. 实际上, 空化器是确保超空泡形成和航行体机动性的最重要技术之一. 圆盘或者圆锥形空化器只是一类简单的、几何形状规则的空化器, 其它复杂线形或者复合式空化器可能具有更好的特性. 所以, 能够较好地诱导空化、自动调节和稳定空泡形态以及实现声自导等多功能的空化器将是我们未来空化器的研究方向.

4 结 论

通过上述对超空泡的射弹实验和水洞实验研究, 所得到的结论如下:

自然超空泡是随着空化数的持续降低由初始气泡、经次空泡和片状空泡而形成; 通气超空泡的形成存在一空化数降至临界值产生跳变的过程. 空化器参数对临界空化数和通气系数门限值具有重要影响, 它们的值也是衡量空化器空化特性的一个重要指标.

空化器直径和线形对自然和通气超空泡具有相类似的影响规律, 超空泡的尺寸随着空化器直径的增加而增加, 相同条件下圆盘空化器的空化特性要比 120° 圆锥形空化器的空化特性好.

相对较小直径空化器的模型无法形成透明的通气超空泡. 其主要原因可能是自然空化数没有达到足够低. 其次, 实验也发现, 水洞的工作段的阻塞比自然空化数和通气超空泡都有一定影响, 阻塞比较小的情况下, 小直径空化器模型相对容易形成通气超空泡. 此外, 空化器直径对通气超空泡的长细比有较大影响, 在一定的自然空化数条件下, 存在最佳空化器直径使得指定尺寸航行体的超空泡长细比达到极大值.

参 考 文 献

- 1 Kuklinski Robert, Henoch Charles, Castano John. Experimental Study of Ventilated Cavities on Dynamic Test Model. Naval Undersea Warfare Center, Cav 2001: Session B3. 004
- 2 Vlasenko Yu D. Experimental investigation of supercavitation flow regimes of flow around self-propelled models. *Prykladna Hidromekhanika*, 2000, 2(74)(3): 26~39
- 3 Reichardt H. The laws if cavitation bubbles as axially symmetrical bodies in a flow. In: Ministry of Aircraft Production(Great Britian), Reports and Translations, 1946, 766: 322~326
- 4 Kirschner IN, Gieseke TA, Kuklinski R, et al. Supercavitation research and development. In: Undersea Defense Technologies Hawaii 2001, Waikiki, HI, October, 2001
- 5 Wosnik Martin, Schauer Travis J, Arndt Roger E.A. Experimental study a ventilated supercavitating vehicle. In: Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003). Osaka, Japan, 2003. 1~4
- 6 Savchenko Yu N. Control of supercavitation flow and stability of supercavitation motion of bodies. In: Paper Presented at the RTO AVT Lecture Series on "Supercavitating Flows", held at the von Kármán Institute (VKI) in Brussels, Belgium, 12~16 February 2001, and published in RTO EN-010
- 7 Stinebring David R, Billet Michael L, Lindau Jules W, et al. Developed cavitation-cavity dynamics. In: Applied Research Laboratory PO Box 30 State College, PA 16804 USA
- 8 Kunz Robert F, Lindau Jules W, Billet Michael L, et al. Multiphase cfd modeling of developed and supercavitating flows. In: Applied Research Laboratory PO Box 30 State College, PA 16804 USA
- 9 Savchenko Yu N. Modeling the supercavitation processes. *Prykladna Hidromekhanika*, 2000, 274(3): 75~86

INFLUENCE OF CAVITATOR PARAMETERS ON FORMATION AND DEVELOPMENT OF SUPERCAVITY

Jia Liping^{*,1)} Yu Kaiping^{*} Zhang Jiazhong^{*} Wang Cong^{*} Wei Yingjie^{*} Li Ning[†]

^{*}(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[†](China Ship Research & Development Academy, Beijing 100073, China)

Abstract Based on the way how to form supercavity, a series of projectile experiments and moderate-speed tunnel experiments were carried out to study the formation and development of the natural and ventilated supercavities in this paper. The processes of forming supercavities were recorded and discussed. The influence of cavitator parameters on the critical cavitation number and critical ventilation coefficient was analyzed. Qualitative features of the supercavity size change were obtained. It is shown that the cavitator diameter and coutour have a similar influence on the natural and ventilated supercavity sizes. Supercavity size increases with cavitator diameter and the formation of supercavity for a blunt cavitator is easier than for a cone cavitator under the same conditions. A cavitator of relatively small diameter might not be able to form a ventilated supercavity, mainly because the natural cavitation number is not small enough. Furthermore, the research shows that the cavitator diameter has an important effect on the fineness ratio of the ventilated supercavity, which is not the same as the natural supercavity. Finally, the perspective future research on cavitators is discussed.

Key words natural supercavity, ventilated supercavity, cavitator parameter, cavitation number, ventilation coefficient, projectile experiment, tunnel experiment

Received 18 November 2005, revised 10 December 2006.

1) E-mail: lena3333@163.com