

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.020

超小型叶栅空化流场试验研究*

张 瑶¹ 周志杰¹ 罗先武² 许洪元²

(1. 中国舰船研究设计中心, 武汉 430064; 2. 清华大学北京市 CO₂ 资源利用与减排技术重点实验室, 北京 100084)

摘要: 采用弦长为 14 mm 的超小型 Clark-Y 叶栅, 进行了多种空化数下的空化试验以探讨超小尺度下的空化机理和空化尺度效应。通过试验结果的分析, 发现随着空化数降低, 超小型叶栅的空化发展可分为空化初生、片状空化、云状空化、超空化几个阶段。通过与超小型翼型空化流场比较, 发现由于受翼型间相互作用的影响, 栅中翼型的空穴形态在各个空化阶段均表现为薄且狭长, 空化发展相对滞后。

关键词: 超小型叶栅 超小尺度空化 片状空化 云状空化 超空化
中图分类号: TH3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0119-06

引言

超小型泵^[1-3] (特征尺度为 1 ~ 50 mm) 是近年来发展起来的一种新型泵, 其结构小巧, 可望应用于航空航天、精密仪器、农业科学、新兴能源等诸多领域。

空化是流体机械中十分常见的一种现象^[4-6], 而超小尺度下的空化流动, 由于其特征尺度小, 流场雷诺数低、流道相对狭窄等特点, 将带来诸多空化尺度效应^[7-9], 从而使得超小尺度下的空化区别于常规尺度空化。目前对这一尺度下的空化试验研究尚不多见。

Holl 和 Wislicenus^[7] 发现对于不同弦长的翼型, 其空化初生数与雷诺数的关系并不相等, 由此说明除了雷诺数外, 尺寸和速度的尺度效应也必须考虑。Keller^[10] 发现随着模型大小尺度的增大, 或在相同物体尺度条件下, 随着模型速度大小尺度的增大, 空化初生数会相应增大。罗先武^[11] 针对两个超小型泵叶轮进行了空化试验, 试验结果表明被试超小型泵的空化性能与常规泵差别不大。张博^[12] 对弦长为 43 mm 的 Clark-Y 翼型叶栅进行了空化流动机理和非定常动力特性的分析, 得出栅距和攻角是影响叶栅空化非定常特性的关键参数。

平面叶栅又称翼栅, 是指无限多形状相同的独立叶型按等间距平行排列的叶型系列^[13]。本文以超小型叶栅为研究对象, 进行多种空化数下的空化原理试验。通过深入研究超小型平面叶栅的空化流

场, 可以得到由超小型翼型所组成的超小型流道中的空化流动特征, 从而为超小型流体机械的空化分析提供依据。

1 超小型叶栅模型

超小型叶栅翼型模型为 Clark-Y-11.7 型水翼 (以下简称 Clark-Y 翼型), 其实物图如图 1 所示。叶栅由 5 个 Clark-Y 翼型纵向排列而成, 翼型均由不锈钢制成。单个 Clark-Y 翼型弦长 C 为 14 mm, 翼展方向长 70 mm。翼型之间的垂直间距约为翼型弦长的 1/3, 即 5 mm。试验过程中, 超小型叶栅攻角 α 为 8°。

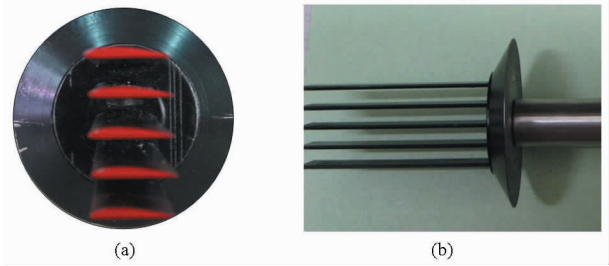


图 1 Clark-Y 超小型叶栅实物图
Fig. 1 Model of Clark-Y mini cascade
(a) 剖面图 (b) 俯视图

试验在北京理工大学循环式空化水洞中进行^[14]。试验时保持来流速度不变, 逐渐降低出口压力, 以达到所需的空化数, 同时采用高速摄像系统进行连续拍摄, 记录短时间内空化流场的发展过程 (如图 2 所示)。选取试验段进口来流速度 U_∞ 为 8.93 m/s, 试验空化数 σ 范围为 0.50 ~ 1.86。由于

收稿日期: 2013-08-15 修回日期: 2013-09-25
* 国家自然科学基金资助项目 (50976061, 51179091)
作者简介: 张瑶, 工程师, 博士, 主要从事空化两相流研究, E-mail: qioyoyo@gmail.com

叶栅中间的翼型受到上下水翼的作用,最能真实地反映叶栅流动的特点,因此以中间翼型进行分析。

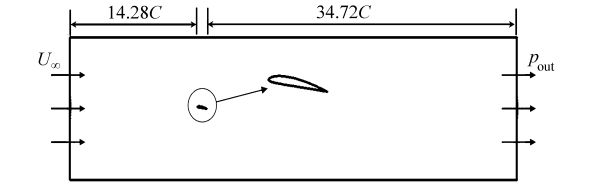


图2 超小型叶栅空化流场试验示意图
Fig. 2 Experiment section of mini cascade in the cavitation tunnel

2 超小型叶栅空化流场

2.1 片状空化流场

图3为 $\sigma = 1.86$ 时超小型叶栅空化流场随时间的变化发展。

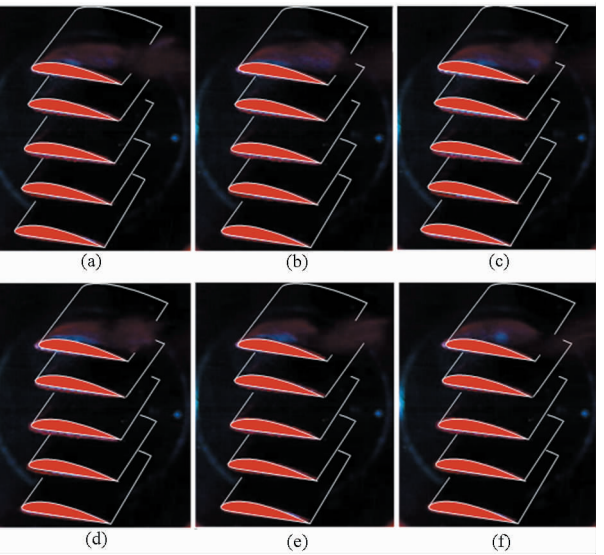


图3 超小型叶栅典型周期内空穴形态变化($\sigma = 1.86$)
Fig. 3 Evolution of cavity shape in a typical cavitation period for mini cascade ($\sigma = 1.86$)
(a) 0 ms (b) 0.66 ms (c) 1.32 ms
(d) 1.98 ms (e) 2.64 ms (f) 3.30 ms

由图3可知,位于叶栅最上方位置的翼型首先发生空化,且在此空化数下,已经发展成为具有周期性空泡团脱落的云状空化。同时,超小型叶栅中间翼型出现空化初生。因而,对于超小型叶栅的空化流场,由于相邻翼型的影响,空化将首先在位于最上方的翼型(即低压面流动受其他翼型影响最弱的翼型)上发生,且其空化的发展程度要大大高于叶栅中其他翼型。

图4为单个Clark-Y翼型(弦长同为14 mm)与叶栅的中间翼型,在不同空化数下,空化流场随时间的变化。其中,单个翼型空化的来流速度为9.13 m/s,空化数为1.73和1.44。栅中翼型空化的来流速度为8.93 m/s,空化数为1.58和1.33。

由图4a~4e^[15]、4k~4o可知,当 $\sigma = 1.73$ 时,单个翼型的吸力面上就已经出现了比较明显的片状空化。而对于栅中翼型, $\sigma = 1.58$ 时,才隐约可见空化泡出现,但空泡的面积远小于单翼型时的情况。由此可知,对比单独翼型的空化流场,栅中翼型的空化推迟了。

由图4f~4j^[15]、4p~4t可知,当 $\sigma = 1.44$ 时,单个翼型吸力面上的片状空化进一步发展,空化区面积进一步增大。而对于栅中翼型, $\sigma = 1.33$ 时,虽然空化区也清晰可见,但是与单个翼型片状空化流场相比,仍有很大区别,具体表现在:栅中翼型空化流场中的片空穴十分薄且不清晰,其空泡团体积远小于单独翼型的情况,说明叶栅中的流速大,初生空泡在低压区停留时间短、相间质量交换弱,其发育程度远不如单个翼型的空化。在空穴形态方面,单独翼型的片空穴相对较厚,其长度约为0.4C;而栅中翼型片空穴则表现为薄且狭长,在空穴尾部还表现出较强的紊动,这说明翼型间的相互影响对空化的形状及特性都有很大影响。

单独翼型和栅中翼型的片状空化仍有相似之处,由于翼型和叶栅的尺度相同,其空化的周期也大致相当。

2.2 云状空化流场

随着空化数的降低,超小型叶栅的空化流场也进一步发展。图5为 $\sigma = 1.08$ 时,超小型叶栅在典型周期内的空穴形态变化。由图可知,超小型叶栅中,各个翼型的空化发展均不相同。从上至下,翼型的空化发展依次减弱,位于最上方的翼型空化最为剧烈。在此空化数下,最上方翼型的空化已发展成为十分剧烈的云状空化,而中间翼型也进入云状空化阶段。

图6为单个Clark-Y翼型与叶栅中间翼型,在不同空化数下,空化流场随时间的变化。由图6a~6o^[15]可知,随着空化数的降低,单个翼型将逐渐由片状空化向云状空化转变。空化数从1.22至0.72,单个翼型空穴表现为长度、厚度和体积均不断增大,空穴从相对稳定的状态向非稳态、具有空泡团周期性脱落的状态转变。

由图6p~6y可知,随着空化数的降低,栅中翼型的空化流场也将进一步发展。从空化数1.08至0.83,栅中翼型的空穴表现为长度和厚度明显增大。然而,与单个翼型相比,栅中翼型在云状空化时空穴的发展仍有一些特殊表现:在云空穴的形态上,随着空化数降低,栅中翼型空穴长度明显增大,因此其相比于单个翼型的云空穴,显得十分狭长,这也说明了叶栅通道将对云空穴的形态有很大影响。其次,在

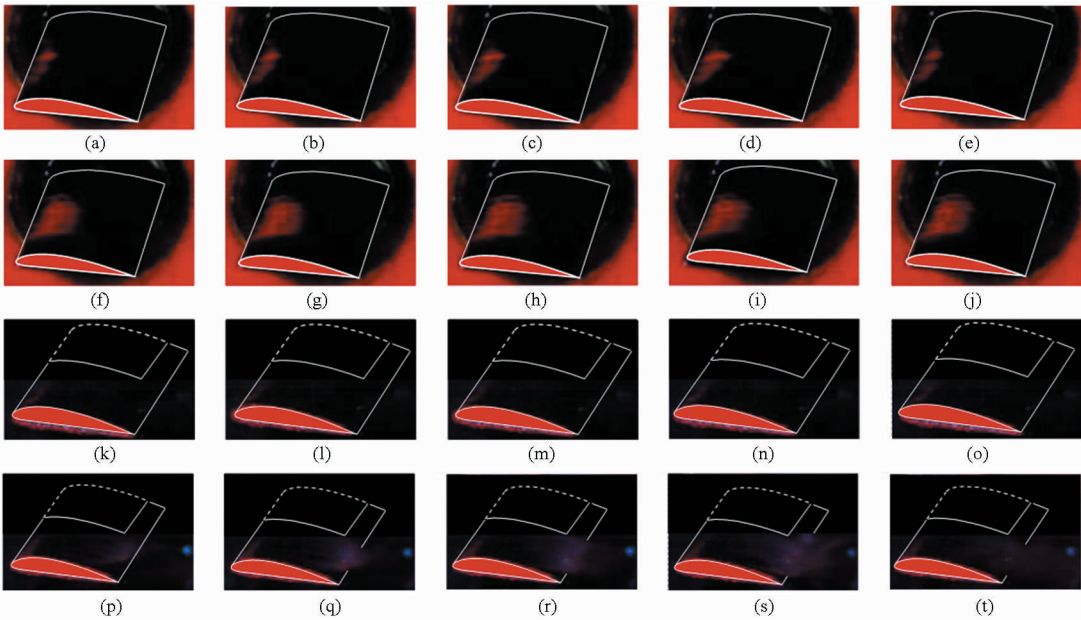


图4 典型周期内片状空化空穴形态比较

Fig. 4 Cavity shape comparison of sheet cavitation in a typical cavitation period

- (a) 0 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.73$) (b) 0.33 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.73$)
(c) 0.66 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.73$) (d) 0.99 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.73$)
(e) 1.65 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.73$) (f) 0 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.44$)
(g) 0.66 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.44$) (h) 1.32 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.44$)
(i) 1.98 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.44$) (j) 3.30 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.44$)
(k) 0 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.58$) (l) 0.99 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.58$)
(m) 1.98 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.58$) (n) 2.97 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.58$)
(o) 4.95 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.58$) (p) 0 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.33$)
(q) 0.99 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.33$) (r) 1.98 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.33$)
(s) 2.97 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.33$) (t) 4.95 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.33$)

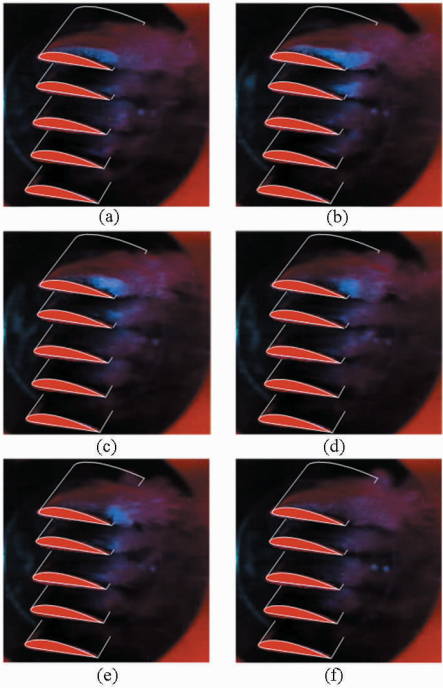


图5 超小型叶栅典型周期内空穴形态变化($\sigma=1.08$)

Fig. 5 Evolution of cavity shape in a typical cavitation period for mini cascade ($\sigma=1.08$)

- (a) 0 ms (b) 2.31 ms (c) 4.62 ms
(d) 6.93 ms (e) 9.24 ms (f) 11.55 ms

云空穴的特性上,随着栅中翼型云空穴的发展,其尾部空泡团的非定常脱落现象并不明显,说明栅中翼型虽然已经进入云状空化阶段,但由于气液相间质量交换并不剧烈,因而空泡团体积要大大小于单个翼型时的情况,从而很难形成大尺度的非定常脱落。总的来说,栅中翼型由于受到其他翼型的约束,空化发展受到制约,云空穴薄且狭长,且在云状空化阶段很难形成大尺度的空泡团脱落。

2.3 超空化流场

空化数 $\sigma=0.63$ 时,超小型叶栅在典型周期内的空穴形态变化如图7所示。由图可知,此时叶栅的5个翼型均发生空化,其中,大多数翼型的空穴长度都大于翼型弦长,超小型叶栅空化流场进入超空化阶段。同时,超空穴的长度和厚度从上至下,依次减小,最上方翼型的超空穴最长、最厚。

图8为单个翼型与叶栅中间翼型,在不同空化数下,空化流场的变化。由图8a~8e^[15]、8k~8o可知,当 $\sigma=0.55$ 时,单个翼型进入超空化阶段,但此时空穴尾部仍有抖动。而 $\sigma=0.63$ 时,栅中翼型空化不但已转变为超空化,且超空穴十分稳定。说明栅中翼型要更早进入超空化阶段,栅中翼型由云状空化向超空化的转变要比单个翼型快。由图8f~

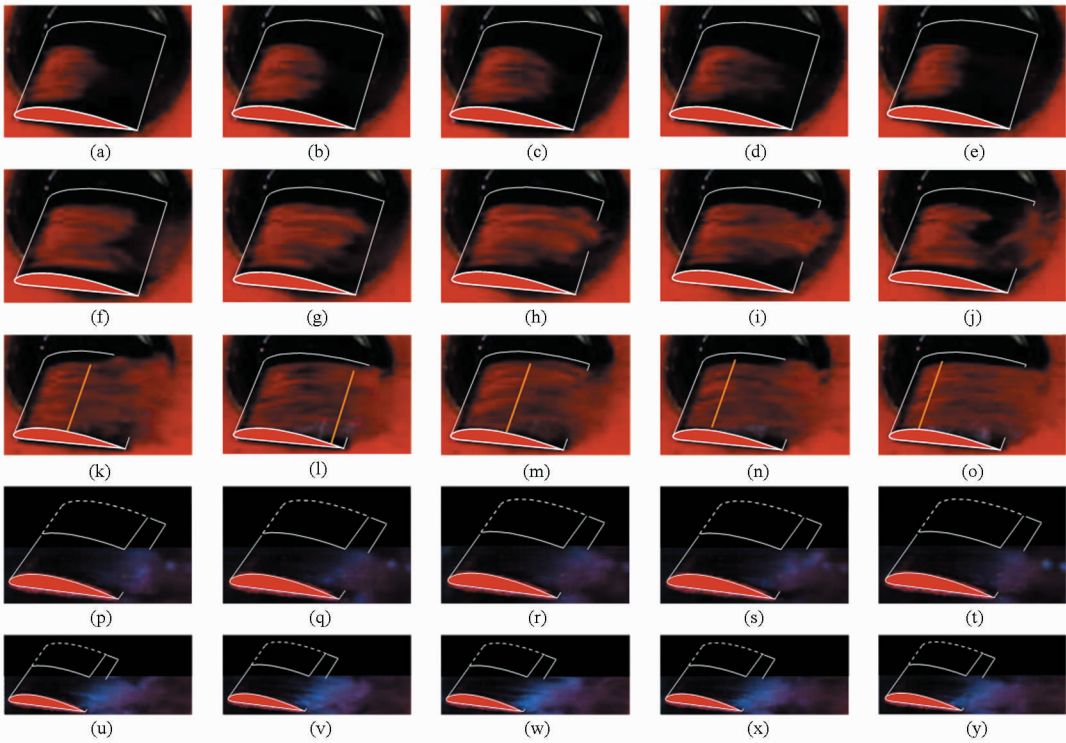


图 6 典型周期内云状空化空穴形态比较

Fig. 6 Cavity shape comparison of cloud cavitation in a typical cavitation period

- (a) 0 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.22$) (b) 0.792 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.22$)
(c) 1.584 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.22$) (d) 2.376 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.22$)
(e) 3.96 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=1.22$) (f) 0 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.96$)
(g) 2.31 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.96$) (h) 4.62 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.96$)
(i) 6.93 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.96$) (j) 11.55 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.96$)
(k) 0 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.72$) (l) 3.3 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.72$)
(m) 6.6 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.72$) (n) 9.9 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.72$)
(o) 11.55, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.72$) (p) 0 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.08$)
(q) 2.31 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.08$) (r) 4.62 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.08$)
(s) 6.93 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.08$) (t) 11.55 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=1.08$)
(u) 0 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.83$) (v) 2.31 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.83$)
(w) 4.62 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.83$) (x) 6.93 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.83$)
(y) 11.55 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.83$)

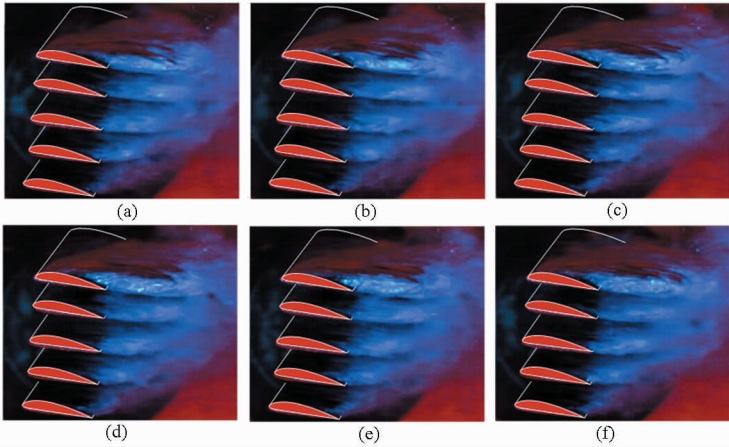


图 7 超小型叶栅典型周期内空穴形态变化($\sigma=0.63$)

Fig. 7 Evolution of cavity shape in a typical cavitation period for mini cascade ($\sigma=0.63$)

- (a) 0 ms (b) 0.99 ms (c) 1.98 ms (d) 2.97 ms (e) 3.96 ms (f) 4.95 ms

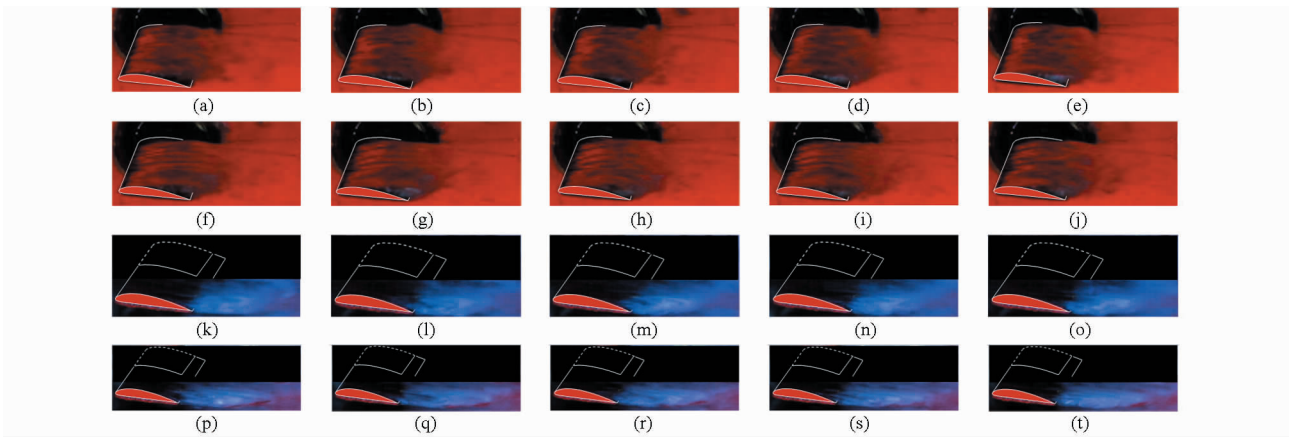


图8 典型周期内超空化空穴形态比较

Fig. 8 Cavity shape comparison of super cavitation in a typical cavitation period

(a) 0 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.55$) (b) 1.32 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.55$)

(c) 2.64 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.55$) (d) 3.96 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.55$)

(e) 6.6 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.55$) (f) 0 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.46$)

(g) 0.99 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.46$) (h) 1.98 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.46$)

(i) 2.97 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.46$) (j) 4.95 ms, 单个翼型($U_{\infty}=9.13\text{ m/s}$, $\sigma=0.46$)

(k) 0 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.63$) (l) 0.99 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.63$)

(m) 1.98 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.63$) (n) 2.97 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.63$)

(o) 4.95 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.63$) (p) 0 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.50$)

(q) 0.66 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.50$) (r) 1.32 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.50$)

(s) 1.98 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.50$) (t) 3.3 ms, 栅中翼型($U_{\infty}=8.93\text{ m/s}$, $\sigma=0.50$)

8j^[15]、8p~8t 还可知,对于单个翼型和栅中翼型,随着空化数降低,其超空穴的长度均进一步增加。

另外,比较在近似相等的空化数下,单个翼型($\sigma=0.55$)和栅中翼型($\sigma=0.50$)的空化流场,可以发现栅中翼型超空穴的长度要远大于单个翼型超空穴的长度。同时,在栅中翼型吸力面上,很难观察到空泡团,说明栅中翼型的超空穴十分薄。因而栅中翼型超空穴的特点是薄且狭长,单个翼型超空穴的特点是厚且相对较短。由此可知,当空化在叶栅流道中发展时,其厚度方向上的生长被抑制,空穴被压扁而变得十分狭长。

3 结论

(1) 随着试验空化数的不断降低,超小型叶栅的空化也可分为空化初生、片状空化、云状空化、超

空化这几个阶段。

(2) 从空化发展来看,栅中翼型由云状空化向超空化的转变要比单个翼型迅速,且栅中翼型要更早进入超空化阶段。

(3) 从空化形态上看,无论在片状空化、云状空化还是超空化阶段,相比于单个翼型,栅中翼型的空穴均表现为薄且狭长。

(4) 从空化的特性上看,栅中翼型由于受到其它翼型的影响,空化受到抑制,气液相间质量交换远不如单个翼型剧烈,生成的空泡团体积较小。因而在云状空化阶段,大尺度空泡团周期性脱落的现象并不明显。

(5) 对于超小型叶栅和单个超小型翼型,其翼型尺度相同,空化周期也大致相当。

参 考 文 献

1 Rafferty E H, Kletschka H D, Wynyard M, et al. Artificial heart II—application of nonpulsatile radially increasing pressure gradient pumping principle[J]. Minnesota Med. , 1968, 52: 191 – 193.

2 Olsen D B, Bramm G. Blood pump with a magnetically suspended impeller[J]. Transactions-American Society for Artificial Intenal Organs, 1985, 31: 395 – 401.

3 Wampler R K, Moise J C, Frazier O H, et al. In vivo evaluation of a peripheral vascular access axial flow blood pump[J]. ASAIO Transactions, 1988, 34(3): 450 – 454.

4 Brennen C E. Hydrodynamics of pumps[M]. London: Concepts NREC and Oxford University Press, 1994: 123 – 130.

5 Rayleigh L. On the pressure developed in liquid during the collapse of spherical cavity[J]. Phil. Mag. , 1917, 34: 94 – 98.

6 Plesset M S. The dynamics of cavitation bubbles[J]. J. Appl. Mech. , 1949, 16: 277 – 282.

7 Holl J W, Wislicenus G F. Scale effects on cavitation [J]. J. Basic Eng. , 1961, 83: 385 – 398.

8 Yan Y, Thorpe R B. Flow regime transitions due to cavitation in the flow through an orifice[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1990, 16(6): 1023 – 1045.

9 Liu S H, Nishi M, Yoshida K. Impeller geometry suitable for mini turbo-pump[J]. Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(3): 500 – 506.

10 Keller A P. Cavitation scale effects empirically found relations and the correlation of cavitation number and hydrodynamic coefficients [C]//The Fourth International Symposium on Cavitation, Pasadena, 2001:lecture.001.

11 罗先武, 刘树红, 邵杰, 等. 微型泵半开式离心叶轮的空化性能[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2006,46(8):1451 – 1454.
Luo Xianwu, Liu Shuhong, Shao Jie, et al. Cavitation in semi-open centrifugal impellers for a miniature pump [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(8):1451 – 1454. (in Chinese)

12 张博. 亚空化非定常流动机理及动力特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2009.
Zhang Bo. Unsteady dynamic mechanism of sub-cavitating flows [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009. (in Chinese)

13 孙寿. 水泵的汽蚀及防治[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.

14 李向宾, 王国玉, 张敏弟, 等. 绕 Hydronautics 水翼空化旋涡的高速录像观察[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(3): 426 – 428.
Li Xiangbin, Wang Guoyu, Zhang Mindi, et al. High-speed observations of cavitating vortices around a hydronautics foil [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(3): 426 – 428. (in Chinese)

15 Luo X W, Ji B, Zhang Y, et al. Cavitating flow over a mini hydrofoil[J]. China Physics Letters, 2012, 29(1): 016401.

Experiment Research of Cavitating Flow over Mini Cascade

Zhang Yao¹ Zhou Zhijie¹ Luo Xianwu² Xu Hongyuan²
(1. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

2. Key Laboratory for CO₂ Resource Utilization and Emission Reduction of Beijing, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The mini pump having the characteristic dimension of 1 ~ 50 mm, has been becoming promising fluid machinery with the growing application in aerospace, new energy and agricultural machinery area for its small size. The cavitating flows over cascade having the chord length of 14mm have been investigated in a cavitation tunnel at different cavitation numbers to study the mechanism and scale effects of cavitation at miniature dimension. Based on the analysis of experimental results, it is shown that the cavitation in miniature flow passage can experience several states such as cavitation inception, sheet cavitation, cloud cavitation and super cavitation with the decrease of cavitation number. For the mini cascade cavitating flow, the cavity characteristics are different from that of single mini hydrofoil because of the interaction among the flows in neighboring flow channels. The mass transfer between liquid and gas phase caused by cavitation for mini cascade is less intense than that for single mini hydrofoil. Thus, there is no large scale cavity shedding in cloud cavitation period in mini cascade. Also, the cavity shape of mini cascade appears thinner and longer at different cavitation states and cavitation development is also hysteresis.

Key words: Mini cascade Cavitation in miniature flow passage Sheet cavitation Cloud cavitation Super cavitation