A辑第35卷第1期 水动力学研究与进展 Vol.35,No.1
2020年 1月 CHINESE JOURNAL OF HYDRODYNAMICS Jan.,2020

DOI：10.16076/j.cnki.cjhd.2020.01.003

钝体尾迹区通气空泡流动特性研究*

王志英[1], 郑亚男[2], 黄彪[2], 王国玉[2]
（1. 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190;
2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081, E-mail: huangbiao@bit.edu.cn）

摘　要：该文采用实验的方法开展了不同雷诺数和通气量下钝体尾迹区通气空泡流动特性的研究，依据雷诺数 Re 和通气率 Q_v 建立了通气空泡气液两相流的流型图谱。根据通气空泡流动特征，将其分为两大类，分别是旋涡脱落型和相对稳定型。当通气率为 Q_v=0.086 6 时，雷诺数的改变不影响空泡流型，均属于旋涡脱落型。当通气率为 Q_v=0.278 时，钝体尾部有空泡包裹，随着雷诺数的增加，空泡长度显著减小，空泡形态由相对稳定型向旋涡脱落型转变。当雷诺数保持一致时，随着通气率的增加，均出现了由旋涡脱落型向相对稳定型转变的趋势。随着雷诺数的增加，由旋涡脱落型转变为相对稳定型所需要的通气率增大。

关　键　词：通气空泡；旋涡脱落；实验研究

中图分类号：O352　　**文献标志码：**A

Characteristics of ventilated cavitating flow in the wake over a bluff body

WANG Zhi-ying[1], ZHENG Ya-nan[1,2], HUANG Biao[2], WANG Guo-yu[2]
(1. Key Laboratory for Mechanics in FluidSolid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Beijing 100190, China;
2. School of Mechanical and Vechicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, the characteristics of ventilated cavitating flow in the wake over a bluff body were investigated by experimental method. The flow pattern map of ventilated cavitating flow at different flow conditions is obtained. They are classified into two different categories: vortex shedding type and relatively stable type. When the gas entrainment coefficient is 0.0866, the flow patterns are all belonged to vortex shedding type, even if the Reynolds number changes. When the gas entrainment coefficient is 0.278, there is a ventilated cavity attached the bluff body. Under the circumstances, with the increase of Reynolds number the length of the cavity decreases significantly, and it changes from the relatively stable type to the vortex shedding type.

* **收稿日期：**2019-10-08(2019-12-16 **修改稿**)
基金项目：国家自然科学基金资助项目(11902323,91752105)和西华大学流体与动力机械教育部重点实验室开放课题资助项目(szjj2018-124)
作者简介：王志英（1989－），女，山西大同人，博士研究生.
通信作者：黄彪, E-mail: huangbiao@bit.edu.cn
Received: October 8, 2019 (**Revised** December 16, 2019)
Project supported by foundations: Supported by the Natural Science Foundation of China (11902323,91752105), Open Project of Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education (Xihua University) (szjj2018-124)
Biography: WANG Zhi-ying (1989–), Female, Ph.D. Candidate.
Corresponding author: HUANG Biao, E-mail: huangbiao@bit.edu.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

When the Reynolds number remains fixed, with the increase of gas entrainment coefficient, the vortex shedding type would transform to the relatively stable type. In addition with the increase of Reynolds number, the critical value of gas entrainment coefficient for change the flow patterns increases.

Key words: Ventilated cavitating flow; Vortex shedding; Experimental method

引言

超空泡减阻是一种实现水下航形体高速航行的重要技术，已被国外用于研制新一代水下超高速武器，譬如超空泡舰船，超空泡子弹，超空泡射弹以及超空泡鱼雷等。超空泡的实现方式有两种，一种是在足够高的速度下液体汽化形成的汽相超空泡（自然超空泡），另一种是通过在低压区通入不可凝气体，形成的气相超空泡（也称为通气超空泡[1-2]）。由于后者能够在相对较小的速度下实现超空泡的形成，从而得到了更加广泛的应用[3]。

自20世纪40年代以来，国内外研究人员就通气空泡流动中涉及的物理现象进行了广泛和深入的研究。研究重点主要聚焦于超空泡形成条件和超空泡尾部泄气方式。而当通气超空泡受到扰动时或通气量不足以形成稳定超空泡时，往往呈现出大尺度空泡旋涡脱落现象。Harwood等[4]对水翼通气空化中空泡的生成、溃灭及稳定性进行了研究，提出通气空泡的稳定性与回射流的角度有关。王一伟等[5]细致地描述了通气云状空泡脱落的细节，给出了回射流的形成和空泡脱落演化特征。研究均表明，回射流的发展是旋涡脱落的重要因素。而当流体绕过钝体时，会在钝体尾迹区出现旋涡交替脱落的现象，这种旋涡的交替脱落同样会导致流动的不稳定性[6]。Belahadji等[7]通过高速摄像研究了楔形后湍流尾迹区空化旋涡结构的初生与发展，提出了表征旋涡脱落频率的斯特罗哈数St和涡街特征参数与空化数的关系。Barbaca等[8]研究了不同参数下（通气量和弗劳德数）钝体后通气空泡形态结构，尤其是回射流的流动特性。

由于空泡的脱落会影响稳定超空泡的生成，为了形成稳定可控的通气超空泡，本文针对通气空泡展开实验研究，分析其空泡流型特征。

1 实验装置与方法

1.1 空化水洞

实验在一闭式循环空化水洞进行，该水洞主要由贮水池、真空泵、压力罐、导流片、实验段、管路、轴流泵及电机等组成。实验段尺寸为0.7 m×0.07 m×0.19 m[9]，为了便于实验现象的观测，在实验段的上、下及前侧面均安装透明有机玻璃板，后侧安装实验模型。

1.2 通气系统

为了形成稳定可控的空泡，基于水洞实验装置，设计了包括空气压气机、压力控制阀、气体稳压储存罐、转子流量计和相关控制部件及管路组成的通气系统。该系统中，通过压力控制阀控制通入流场气体的压力，气体的体积流量由转子流量计准确控制。

1.3 实验模型

设计了钝体实验模型，钝体前端的角度为60°，半圆柱直径D=20 mm。半圆柱后侧布有三排直径为d=2 mm的通气孔，气孔均匀分布在半圆柱表面，每一排有6个，共有18个通气孔。

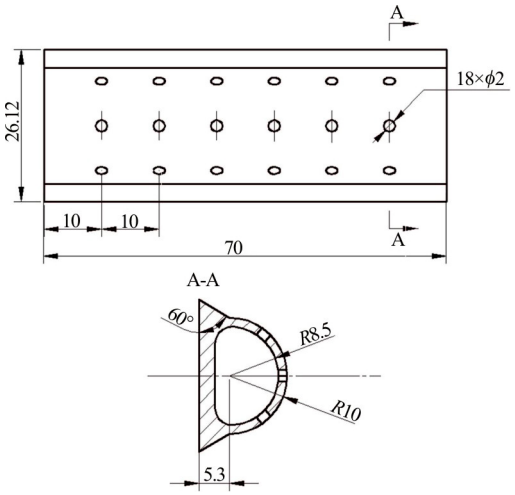

图 1 钝体模型示意图

Fig.1 The schematic diagram of bluff body

2 结果与讨论

2.1 通气空泡流型特征

在不同来流和通气条件下，绕钝体通气空泡呈现出不同的流场结构和流型特征。为了表达通气空泡流型的转变规律，以通气率Q_v和雷诺数Re作为关键参数，提出了绕钝体通气空泡流型图谱[10]，如图2所示。将其划分为旋涡脱落型和相对稳定型两大类。旋涡脱落型中包含：涡街型(BvK)、涡线型(BvKF)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和排涡型(AV),相对稳定型中包含：过渡型(AVRJ)、回射流型(RJ)和超空泡型(SS)。不同雷诺数下均出现了由旋涡脱落型向相对稳定型转变的趋势。随着雷诺数的增加，旋涡脱落型转变为相对稳定型所需要的通气率增加。

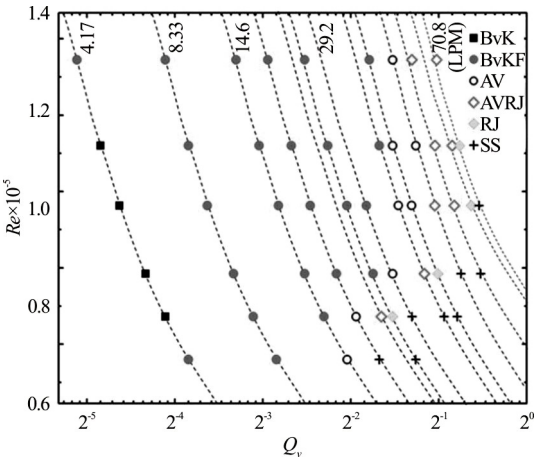

图 2 通气空泡流型图谱[10]

Fig.2 The map of ventilated cavitating flow pattern[10]

图3给出了通气率分别为Q_v=0.086 6和0.278时，不同雷诺数下湍流尾迹区的空泡形态图。从图中可以看出，不同通气率下，雷诺数对湍流尾迹区空泡形态的影响较大。在通气率较小Q_v=0.086 6时，三种雷诺数下的空泡流型均属于旋涡脱落型。在钝体尾部空泡涡团交替脱落，脱落后的空泡涡团在尾迹区形成空泡涡街。但在不同雷诺数下，小尺度空泡形态的表现却显著不同。雷诺数为Re=5.6×10^{4}时，水气掺混较少，通入流场的气体形成清晰透明的小尺度空泡，离散的小尺度空泡汇聚形成大空泡涡团。当雷诺数增大到Re=6.7×10^{4}时，水气掺混明显，流场中湍流强度增大使离散空泡发生破碎，空泡的尺寸变小。Karn等[11]在文中也得到相同的结论，在固定的通气率下，随着流场中液体速度的增加，空泡破碎，空泡尺寸减小。继续增加雷诺数到Re=7.8×10^{4}时，流场中的速度足够大，压力降低到饱和蒸汽压以下，发生自然空化。此时的流场不再是气液两相流，而是气、汽和液三相流，空泡形态为雾状。由于涡心处的压力较低，通入的气体形成空泡，被卷吸凝聚在空泡涡团的中心，涡团周围是发生自然空化产生的汽泡。

当通气率为Q_v=0.278时，钝体尾部有附着空泡包裹。随着雷诺数的增加，附着空泡长度减小，空泡流型也发生了变化。雷诺数为Re=5.6×10^{4}时，在该通气率下，为透明的气腔，属于超空泡型。雷诺数增大到Re=6.7×10^{4}时，附着空泡长度减小，水气掺混明显，空泡内部存在回射流，表现为回射流型。空泡与回射流的相互作用导致空泡尾部涡团的脱落。继续增加雷诺数到Re=7.8×10^4，空泡长度进一步减小，表现为涡线型，由于气、汽和液三相的掺混，空泡涡团呈雾状。

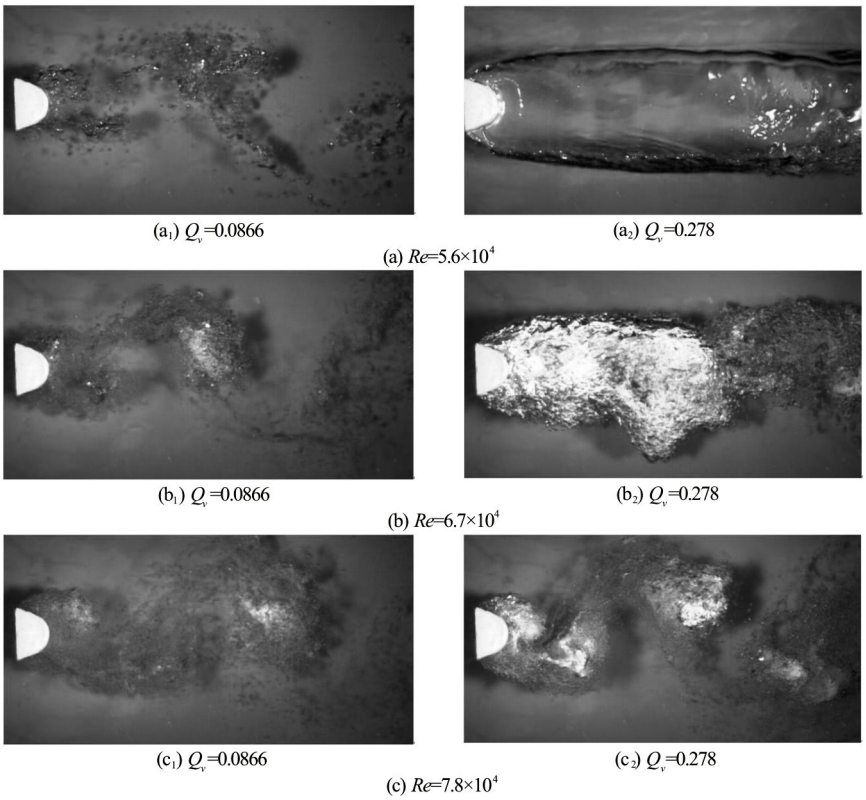

图 3 通气率 Q_v =0.086 6(左)和 Q_v =0.278(右)时,不同雷诺数下的空泡形态

Fig.3 The cavitating flow patterns at Q_v=0.086 6(left) and Q_v=0.278(right) for different Re

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2 通气空泡非定常特性分析

为了研究雷诺数对空泡涡团脱落非定常特性的影响，图4给出了通气率Q_v=0.086 6，雷诺数Re=5.6×10^4和Re=7.8×10^4时，空泡形态随时间的发展演化过程。空泡形态均属于同一流型，即涡线型，但不同雷诺数下空泡形态存在很大的差异。当雷诺数Re=5.6×10^4时，在t_1时刻，通入的气体，形成离散的小尺度空泡。小尺度空泡聚集在钝体尾部的上部，形成上空泡涡团。随着时间的发展，上空泡涡团发展到一定程度后开始脱落，如t_2时刻所示。在t_3时刻，上空泡涡团脱落并向下游运动，由于下空泡涡团的卷吸作用，脱落的空泡涡团发生拉伸变形，形成由游离小空泡组成的空泡涡线。在t_4时刻，下空泡涡团继续发展并即将脱落，而已脱落的上空泡涡团旋转着向下游运动，旋转过程中小尺度空泡在涡心位置处聚集，且空泡涡团逐渐变得规则。而雷诺数Re=7.8×10^4时，钝体尾部压力降低到了饱和蒸气压，发生空化现象，空泡涡团呈现为亮白色雾状。在空泡区域内是小尺度气泡和汽泡的混合。在t_1时刻，由于空泡涡心是低压区，通入的气体形成气泡，被卷吸到上空泡涡团中心，呈现亮色透明状。在t_2时刻，上空泡涡团直径发展到一定程度后，开始变形并准备脱落，透明气泡运动到空泡涡团边缘。在t_3时刻，上空泡涡团脱落，包裹在空泡涡团内的气泡变形，并将从脱落的空泡涡团中剥离出来。在t_4时刻，已脱落的上空泡涡团进入高压区，气泡溃灭，而下涡团继续发展。

参 考 文 献:

[1] FRANC J P, MICHEL J M. Fundamentals of cavitation [M]. Dordrecht, The Netherlands: kluwer Academic Publishers, 2005.

[2] KAWAKAMI E, ARNDT R E A. Investigation of the behavior of ventilated supercavities[J]. Journal Fluids Engineering, 2011, 133(9): 1-11.

[3] JIANG C X, LI S L, LI F C, et al. Numerical study on axisymmetric ventilated supercavitation influenced by drag-reduction additives[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 62-76.

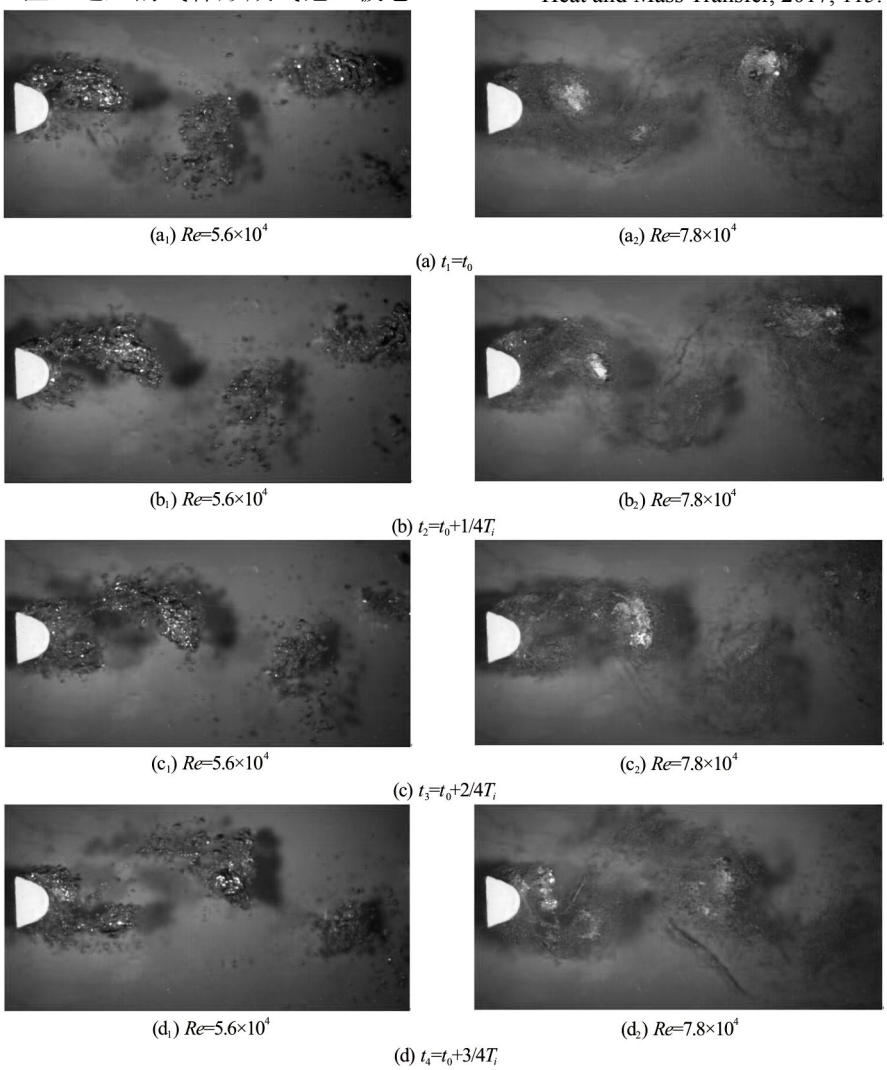

图 4 通气率 Q_v =0.086 6(左)和 Q_v =0.278(右)时,不同雷诺数下的空泡形态

Fig.4 The cavitating morphology at Re=5.6×10^4(left) and Re=7.8×10^4(right) when Q_v =0.086 6

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[4] HARWOOD C M, YIN L Y, CECCIO S L. Ventilated cavities on a surface-piercing hydrofoil at moderate Froude numbers: cavity formation, elimination and stability[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 800: 5-56.

[5] WANG Y W, HUANG C G, DU T Z, et al. Shedding phenomenon of ventilated partial cavitation around underwater projectile[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29 (1): 014601.

[6] 林宗虎, 李永光, 卢家才, 等. 气液两相流旋涡脱落特性及工程应用[M]. 北京, 中国: 化学工业出版社，2001.
LIN Zong-hu, LI Yong-guang, LU Jia-cai, et al. Vortex shedding characteristics and engineering application of gas-liquid two-phase flow[M]. Beijing, China: Press of Chemical Industry, 2001.

[7] BELAHADJI B, FRANC J P, MICHEL J M. Cavitation in the rotational structures of a turbulent wake[J]. Fluid Mech. 1995, 287: 383-403.

[8] BARBACA L, PEARCE B W, BRANDNER P A. Experimental study of ventilated cavity flow over a 3-D wall-mounted fence[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 97: 10-22.

[9] 黄彪. 非定常空化流动机理及数值计算模型研究[D]. 北京, 中国: 北京理工大学, 2012.
Huang Biao. Physical and numerical investigation of unsteady cavitating flow[D]. Beijing, China: Beijing Institute of Technology, 2012.

[10] WANG Z Y, HUANG B, ZHANG M D, et al. Experimental and numerical investigation of ventilated cavitaing flow structures with special emphasis on vortex shedding dynamics[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2018, 98: 79-95.

[11] KARN A, SHAO S, ARNDT R E A, et al. Bubble coalescence and breakup in turbulent bubbly wake of a ventilated hydrofoil[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 70: 397-407.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net