

文章编号: 1000-4750(2015)11-0033-07

航行体水下垂直发射空泡脱落条件研究

王一伟¹, 黄晨光¹, 吴小翠¹, 杜特专¹, 方 新², 梁乃刚², 于娴娴¹

(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. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 航行体水下垂直发射出水时空泡的脱落能够影响溃灭的压力以至结构的设计载荷, 因此研究发射条件对空泡脱落和空泡状态的影响具有重要的意义。该文首先从回转体空泡脱落的特征出发, 确认回射流是导致空泡脱落的关键因素, 进而通过对空泡脱落的影响分析, 提出回射流运动时间和航行体运动时间的比值大小能够作为空泡脱落和空泡状态的判据; 接着对不同深度发射工况流场与空泡演化过程开展了系统数值模拟并与典型试验结果对比分析, 验证并给出了该判据其在典型发射工况下的量化表达式; 进而讨论了空化数、弗劳德数、深度、发射速度、泡内压力等条件对空泡断裂脱落的影响, 给出了出水空泡溃灭时产生较强随机性高压脉冲的发射区间。

关键词: 水下发射; 空泡脱落; 数值模拟; 脱落条件; 发射条件优化

中图分类号: O352 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.04.0331

INVESTIGATION OF CAVITIES SHEDDING CONDITION ON UNDERWATER VEHICLES IN THE VERTICAL LAUNCH PROCESS

WANG Yi-wei¹, HUANG Chen-guang¹, WU Xiao-cui¹, DU Te-zhuan¹,
FANG Xin², LIANG Nai-gang², YU Xian-xian¹

(1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid and Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Shedding phenomena of cavitation bubbles can change the characteristics of collapse pressure. Thusly, it is very important for structural design to investigate the influence of launch conditions on the shedding and evolution of cavitation bubbles. Firstly, the re-entry jet was affirmed as the control factor through the analysis of bubbles shedding. A dimensionless number S_{ul} was conducted as the ratio of periods of the re-entry jet motion and the vehicle motion. S_{ul} can describe the condition of bubbles at the moment when the vehicle is running through the free surface. Moreover, a series of numerical simulations were carried out to obtain the evolutions of flow fields and cavities in typical launch processes with different depth. CFD results verified theoretical results and calculated the parameters in the formula of S_{ul} by nonlinear fitting. Finally, the influence of important factors on shedding of cavities was discussed, such as cavitation number, Froude number, launch speed, and depth.

Key words: underwater launch; cavities shedding; numerical simulation; shedding criteria; launch conditions optimization

收稿日期: 2014-04-21; 修改日期: 2015-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(11202215, 11332011); 中国科学院青年创新促进会项目(2015015)

通讯作者: 王一伟(1983), 男, 河北人, 副研究员, 博士, 从事计算流体力学研究(E-mail: wangyw@imech.ac.cn);

作者简介: 黄晨光(1969), 男, 湖北人, 研究员, 博士, 博导, 从事冲击动力学, 流体结构耦合动力学研究(E-mail: huangcg@imech.av.cn);

吴小翠(1985), 女, 河北人, 博士生, 从事计算流体力学研究(E-mail: wuxiaocui@imech.ac.cn);

杜特专(1983), 男, 福建人, 助理研究员, 硕士, 从事计算流体力学研究(E-mail: dutezhuan@imech.ac.cn);

方 新(1963), 男, 北京人, 副研究员, 博士, 从事流体力学研究(E-mail: fang@lnm.imech.ac.cn);

梁乃刚(1944), 男, 北京人, 研究员, 博士, 从事结构力学研究(E-mail: lng@lnm.imech.ac.cn);

于娴娴(1987), 女, 山东人, 博士生, 从事水动力学研究(E-mail: yuxianxian110@mails.ucas.ac.cn).

高速水下航行体出水过程中,其载荷因肩部附着空泡的存在而变得异常复杂。空泡溃灭压力能够形成决定航行体结构完整性的关键载荷,而空泡的状态是影响溃灭压力的重要因素,特别是在一定条件下发生的空泡脱落现象,会造成出水溃灭压力的幅值和随机性增大。因此研究水下发射过程空泡脱落的机制,推导脱落的发生条件并形成相应的脱落判据,对于控制发射条件具有重要意义。

在以往的研究工作中,许多学者基于机理性试验,研究了空泡脱落等不稳定性问题,Knapp 等^[1]最早对空泡尾部的流动作了精确描述,指出向上游运动的回射流会导致空泡分离,是不稳定性的重要来源。之后很多研究人员对该问题进行了进一步的分析,例如,Kubota 等^[2]描述了非稳态云状空化流场的细节,指出脱落的空泡云由大尺度涡构成;Le 等^[3]测量了脱落空泡的溃灭压力;Stutz 等^[4]利用速度测量技术确认了沿壁面反向回射流动的存在;Callenaere 等^[5]对回射流导致的空泡不稳定性各种不同情况进行了归类和分析;黄彪等^[6]利用高速全流场显示技术和动态应变式测力系统实验研究了绕平头回转体的非定常空化流动及其动力特性,捕捉到了空泡团断裂和脱落现象的过程和特征频率等。这类工作在水翼非定常空泡方面的研究成果较丰富,一般认为从尾部向头部贴壁运动的回射流是空泡脱落的主要原因,但也存在许多其它类型的脱落现象和机理^[7-8]。

针对水下发射方面,也有一定工作对空泡状态、溃灭及其形成的载荷进行了研究,如:权晓波等^[9]将航行体出水过程肩空泡溃灭简化为各截面上二维圆型空泡的溃灭过程,分析了空泡溃灭产生压力的机理和影响因素;胡影影等^[10]利用 VOF 方法模拟了细长圆柱体低速出水时自由液面的变化,研究了 We 、 Fr 等无量纲参数对液面演化的影响;傅慧萍等^[11]利用 Fluent 软件对回转体不同头型的空泡几何特性进行了研究,也对非零攻角绕流下的局部空泡和超空泡特征进行了数值模拟,给出了局部空泡的几何与阻力特性;闵景新等^[12]基于 RANS 方程求解和动网格技术,实现了弹体边界运动与汽水流场的流体-固体耦合问题求解,数值模拟了重力影响下的潜射导弹垂直发射水下运动过程,对比分析了潜射导弹头型对肩空泡和流体动力的影响;王一伟等^[13]开展了航行体出水稳定空泡溃灭过程的研究,并建立了空泡溃灭的物理模型,给出了相关参

数的影响。

综上所述,目前对于水平条件下空泡的脱落和机制等都有了较为全面的研究,对垂直发射条件下航行体载荷计算和分析也有了长足的进展。而对于水下发射载荷问题,尚亟需将这两者进一步结合起来,归纳垂直发射条件下空泡脱落的规律。

本文首先提出了控制航行体出水时刻空泡状态和脱落的判据,接着通过对不同深度发射过程的系统数值模拟和典型试验对比,基于空泡演化图像得到了脱落条件的定量表达式,讨论了发射条件对空泡脱落的影响。

1 空泡脱落控制因素与临界条件

水下发射过程流场的主要控制参量包括:无量纲的空化数、弗劳德数,具体的发射条件如发射深度、速度曲线和航行体的形状等。而空泡脱落现象主要由回射流运动所主导。因此本部分从回射流的运动历程出发,寻找前述各物理量对过程的影响规律,进而提出了空泡脱落满足的临界条件,并建立关于前述其主要作用参量的临界条件表达式。

1.1 控制因素

对于轴对称水下航行体,通常空泡状态按照空化数的从大到小表现为初生空化、片状空化、云状空化和超空化等不同阶段。其中空泡脱落主要发生于云状空化阶段,一般认为回射流运动对空泡状态起主导作用。作者在之前工作中^[14-15]通过试验和对比计算给出了水平发射过程中空泡周期性脱落演化的过程(如图 1,上方为气泡形态拍摄图片,下方为数值模拟速度矢量),在一个周期内包含如下阶段:空泡生长,回射流在空泡末端产生并向上游推进(如图 1(a)、图 1(b),试验照片中箭头向下所示间隙为回射流前端);回射流到达位于航行体肩部的空泡前沿,切断原有空泡(如图 1(c));回射流与主流共同作用造成原有空泡断裂脱落,并在肩部形成新的空泡(如图 1(d)、图 1(e))。因此在这一条件下,相比水翼空化中存在的尾涡振荡等其他因素,能够确认回射流是导致大团空泡脱落的控制因素,而相应的回射流到达肩部则可以认为是空泡发生脱落的临界条件。

典型水下垂直发射过程通常包括加速、水中自由航行、出水 3 个阶段,空泡在加速阶段生成,在自由航行阶段不断演化。因而随着航行体的逐渐加速和所处深度的减小,肩空泡也会经历上述生长、

回射以致脱落的过程。因此基于前述讨论，确定是否发生空泡脱落可判断回射流到达肩部时刻 T_r 与航行体出水时刻 T_o 的关系，如果前者早于后者，则出水时刻会发生空泡脱落。而根据空泡长度和回射流运动速度可以计算 T_r ，根据发射深度与航行速度可计算 T_o 。

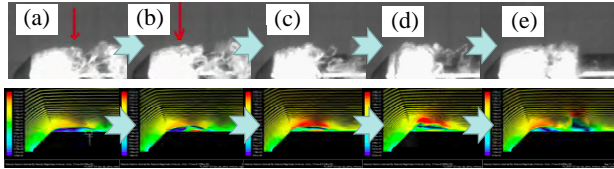


图1 水平发射空泡脱落过程

Fig.1 Cavity shedding process of horizontal launching

1.2 回射流运动

水下发射过程中背景压力和航行体速度不断变化，航行体肩部当地空化数可表示为：

$$\sigma_h = \frac{p_\infty + \rho gh - p_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (1)$$

其中： p_∞ 为水面以上环境压力； ρ 为水的密度； g 为重力加速度； h 为当地深度； p_v 为水的饱和蒸汽压； v 为航行体速度。而水中自由航行过程中经历时间较长，而航速与深度均缓慢减小，因此此间空化数变化比较稳定，通常空泡长度能够达到一个稳定数值。对于这一阶段，在忽略加速度效应的条件下，可以认为空泡长度 L 与整个过程的平均空化数相关，即：

$$\frac{L}{D} = f(\bar{\sigma}_h) = f\left(\frac{p_\infty + \rho g \frac{H}{2} - p_v}{\frac{1}{2} \rho \bar{v}^2}\right) = f\left(\sigma + \frac{1}{Fr}\right) \quad (2)$$

其中： D 为航行体直径； H 为发射深度； \bar{v} 为航行阶段平均速度； $\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho \bar{v}^2}$ 与 $Fr = \frac{\bar{v}^2}{gH}$ 分别表示

出水空化数和弗劳德数。

因而，回射流到达肩部的时间可表示为：

$$\Delta t_1 = \frac{L}{v_{re}} = \frac{Df\left(\sigma + \frac{1}{Fr}\right)}{v_{re}} \quad (3)$$

其中， v_{re} 为回射流运动速度。

1.3 空泡脱落的判据

令 H_1 表示回射流产生时刻航行体所处深度，回射流产生到航行体出水的运动时间：

$$\Delta t_2 = \frac{H_1}{\bar{v}} \quad (4)$$

由此可定义一个空泡脱落(Cavitation Shedding of Underwater Launching)的特征数：

$$S_{ul} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{v_{re}}{\bar{v}} \frac{H_1}{D} \frac{1}{f\left(\sigma + \frac{1}{Fr}\right)} \quad (5)$$

在云状空化阶段， $S_{ul} > 1$ 时空泡会发生脱落即出水时刻之前发生了空泡脱落现象， $S_{ul} < 1$ 时空泡则将在出水前保持稳定， $S_{ul} = 1$ 将是空泡脱落的临界条件。

数值模拟与典型试验结果表明：对于整个空化过程，当 $S_{ul} > 1$ 并继续增大时，空泡可能会发生多次脱落，如 $S_{ul} \gg 1$ 出水时刻航行体空泡状态为初生空泡或无空泡；当 $S_{ul} < 1$ 并继续减小时，空泡将在生长状态下出水，如果 $S_{ul} \ll 1$ ，出水时刻空泡状态将为超空泡。 S_{ul} 值的范围可以作为空泡脱落和空泡状态的判据。

1.4 S_{ul} 表达式

应用空泡脱落判据时，需要将 S_{ul} 表达式(5)的函数形式进一步具体化。

计算和试验证明 $f\left(\sigma + \frac{1}{Fr}\right)$ 为单调下降函数，

例如在文献[16]开展了不同空化数的锥头细长航行体水洞试验，将 18° 和 45° 锥角下的空泡长度均拟合为关于空化数指数为负的幂函数形式(空化数范围在 0.2~0.6)。本文中针对云状空化小范围的空泡长度变化情况，也将空泡无量纲长度处理成类似的幂函数形式，如：

$$\frac{L}{D} = f\left(\sigma + \frac{1}{Fr}\right) = c_1 \left(\sigma + \frac{1}{Fr}\right)^{-m} \quad (6)$$

其中， c_1 和 m 均为正常数。

回射流的产生源自于空泡末端逆压梯度，而逆压梯度是由航行体前方来流在空泡末端滞止后形成。因此通过逆压梯度相联系，两者存在直接的关系。在云状空化阶段的小参数范围内，回射流运动速度与航行体运行速度比值可认为是一个正常数，即：

$$\frac{v_{re}}{\bar{v}} = c_2 \quad (7)$$

回射流产生时刻与航行体的加速过程有关，而水下发射一般经历加速、航行、出水 3 个阶段，速度变化规律类同，因在云状空化的范围内，加速阶段回射流产生时深度与航行体总发射深度之比也应为一个小于 1 的正常数，即：

$$\frac{H_1}{H} = c_3 \quad (8)$$

根据式(6)~式(8)，将其中的常数代入表达式(5)，简化后可以得到：

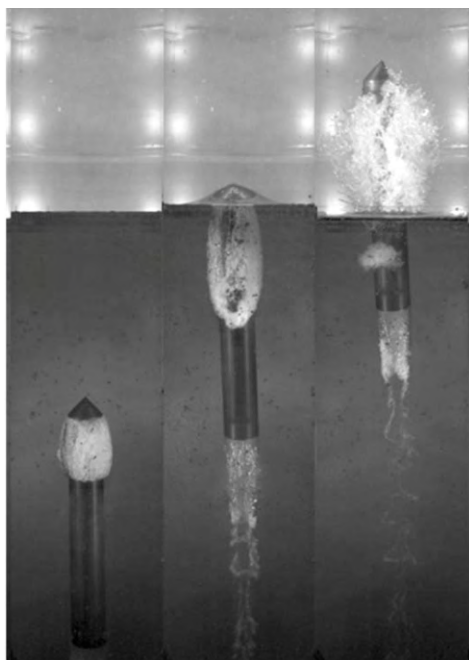
$$S_{ul} = c \frac{H}{D} \left(\sigma + \frac{1}{Fr} \right)^m \quad (9)$$

其中 c 和 m 为主要与航行体头型有关的参数。式(9)将通过典型工况下的系统的水下发射数值模拟结果予以验证。

2 数值模拟验证与参数 c 和 m 的确定

为了验证上一节的结论并确定表达式(9)中的参数，本节将利用 CFD 方法^[17]模拟典型的锥头圆柱水下垂直发射过程，典型试验照片如图 2，航行体轴向速度曲线如图 3。 $H/D=11$ 的典型工况下，航行体在发射筒中垂直加速出筒，肩部形成稳定的空泡并在出水过程中发生溃灭。文献[13]中详细探讨了该工况下空泡的演化以及溃灭过程，并与试验对比了空泡的形态及典型时刻的表面压力分布，考核了数值模拟的合理性。

本节基于上述典型工况的分析，在发射速度曲线不变的前提下，系统开展了变深度的 CFD 数值模拟。



(a) $t=15$ (b) $t=20$ (c) $t=25$

图 2 发射试验不同阶段照片

Fig.2 Experimental photos in different phases of launching process

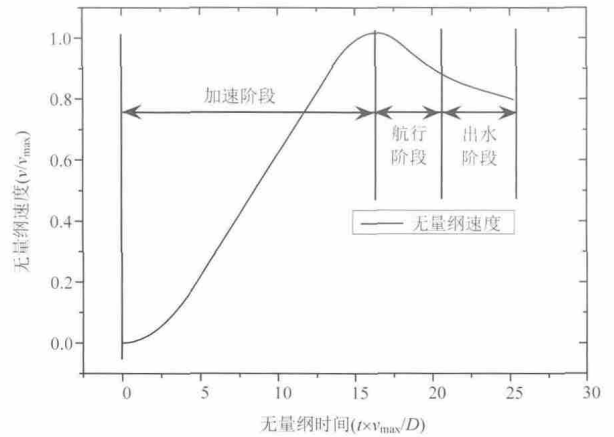
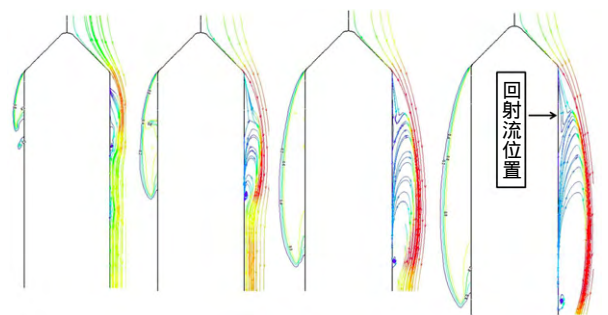


图 3 无量纲发射速度曲线

Fig.3 Dimensionless launching velocity curve

2.1 不同发射深度空泡形态对比

本文对给定发射速度的典型工况 $H/D=11$ 、12、12.5、13、14 进行了数值分析。 $H/D=11$ 是发射深度较浅的典型工况，流场和空泡形态的演化如图 4，其中各图左侧为用液态水体积分数表示的空泡轮廓，右侧为流线(下同)。图中表明出水时刻回射流无法到达肩部，图 4(d)中箭头标注处为出水时刻回射流前段所处位置，因此空泡始终处于生长状态。



(a) $t v_{\max} / D=14$ (b) $t v_{\max} / D=16$ (c) $t v_{\max} / D=18$ (d) $t v_{\max} / D=20$

图 4 $H/D=11$ 条件下空泡及周围流场

Fig.4 Cavitation and flow field in the condition of $H/D=11$

$H/D=14$ 是发射深度较深的典型工况，回射流与主流形成较强的相互作用，并且在图 5 最左一幅图时刻回射流已经到达肩部，在相应的试验压力测量中，对应时刻肩部测点也存在压力峰值，反映了回射流回到肩点的特征。回射流继续运动，进而造成空泡形态产生了如第二部分机理性试验形式的现象，包括空泡断裂脱落、肩部新生空泡的出现和生长等过程，因而此深度下出水时的空泡状态与时间密切相关，会造成出水载荷的强不确定性。

发射深度不同时出水时刻的空泡状态对比见图 6。随着深度的增大，空泡长度相对变短，空泡

状态也变得更加不稳定：当 $H/D=11$ 、 $H/D=12$ 时，空泡始终处于生长状态；当 $H/D=13$ 、 $H/D=14$ 时，空泡已发生了断裂和脱落；并且随着水深的加深，空泡脱落也更加明显。当 $H/D=12.5$ 时，达到了 $S_{ul} = 1$ 的临界条件。此时回射流刚刚到达肩部，空泡即将发生断裂。

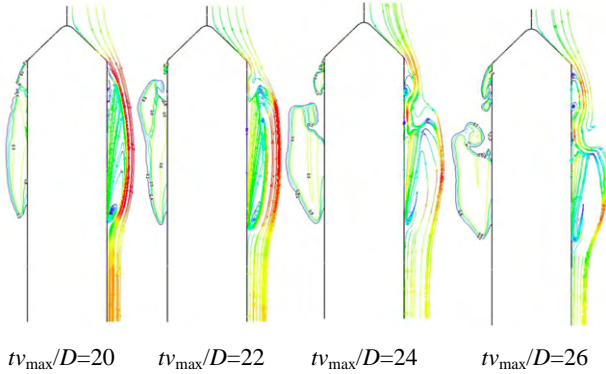


图5 $H/D=14$ 条件下空泡及周围流场
Fig.5 Cavitation and flow field at $H/D=14$

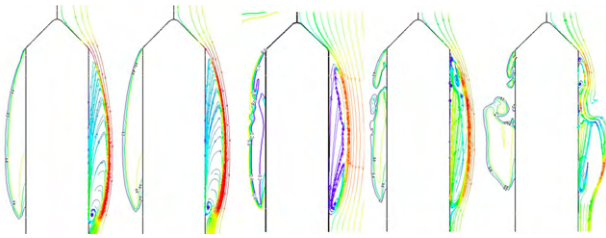


图6 不同水深条件下空泡及周围流场对比
Fig.6 Cavitation shapes and flow fields in the conditions of different H/D

利用第 1 节的分析我们也可以得到发射深度的影响：随着深度增加， Fr 数下降，而导致空泡长度缩短；另一方面无量纲深度 H/D 的也相应增大， S_{ul} 数会随之显著增大，因此空泡的脱落更加容易发生。由此可见，上述的试验和数值模拟与理论分析的结论是一致的。

2.2 S_{ul} 表达式参数拟合

从数值模拟结果中能够得到空泡长度随 $\sigma + \frac{1}{Fr}$ 变化曲线如图 7，可见规律符合前述幂函数形式，可以拟合其中参数，因而表达式(9)的具体写为：

$$f\left(\sigma + \frac{1}{Fr}\right) = 0.208\left(\sigma + \frac{1}{Fr}\right)^{-2.37} \quad (10)$$

文献[13]也给出了不同锥角条件下类似形式的空泡长度表达式，上述得到的参数 m 的值符合该文

相应参数的外推规律。

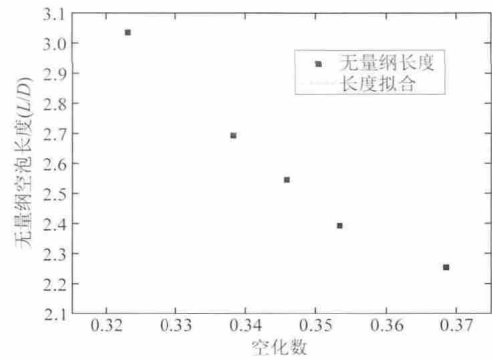


图7 无量纲空泡长度与等效空化数的关系及曲线拟合
Fig.7 The variation of dimensionless cavity length with cavitation number

考虑到数值模拟结果中 $H/D=12.5$ 对应回射流刚好到达肩部的临界条件 $S_{ul}=1$ (如图 6(c))。因此可进一步代入得到系数 c 的值为 0.99。从而求出在此典型外形下，控制垂直发射空泡脱落特征数可进一步表示为：

$$S_{ul} = 0.99 \frac{H}{D} \left(\sigma + \frac{1}{Fr} \right)^{2.37} \quad (11)$$

3 脱落条件应用

基于式(11)，在相对深度和等效空化数同时变化时，能够得到临界条件 $S_{ul} = 1$ 如图 8 中的左下方曲线，对于曲线左方和下方的发射条件空泡将不发生脱落，对于曲线右方和上方的发射条件空泡将发生脱落。另一方面，当 S_{ul} 数继续增大时，空泡将发生多次脱落，趋近于无空泡状态，此时出水空泡溃灭形成的压力也会较小(如图 8 中右上方曲线对应 $S_{ul} = 3$ 条件)。因此对于典型的水下发射而言，出水溃灭压力幅值和随机性均较高的发射条件位于两条曲线之间，应尽量避免。

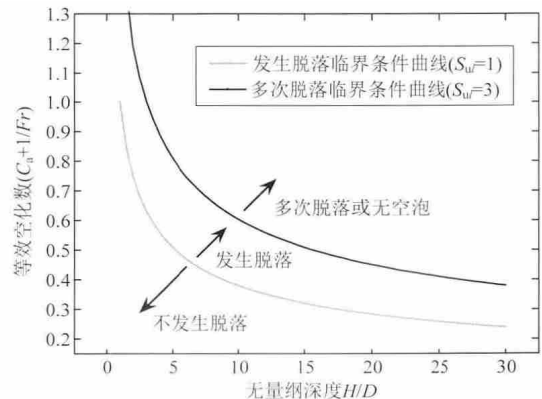


图8 发射条件对空泡脱落的影响
Fig.8 The effect of launch conditions on cavitation shedding

进一步可讨论其他具体发射条件对空泡脱落的影响。发射深度增大同时可使 H/D 和 Fr 两项发生变化, 进一步均造成 S_{uv} 数增大。例如临界条件附近 S_{uv} 随深度变化曲线如图 9, 可见其对深度的敏感程度较高, 深度的增加很容易引起空泡脱落的发生。

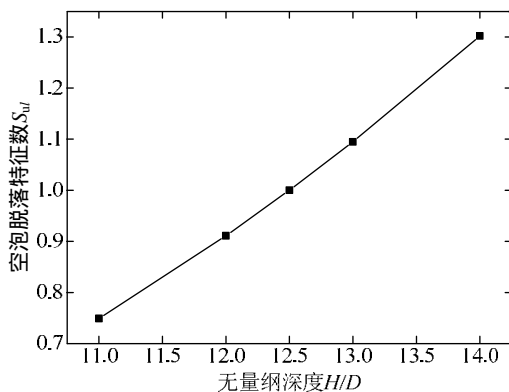


图 9 无量纲深度对空泡脱落的影响

Fig.9 The effect of cavitation shedding on dimensionless cavity length

由式(11)还可以推论:

空化数越大, Fr 数越小, 脱落越容易发生;

发射速度提高能引起空化数减小同时 Fr 数增大, 脱落更加不容易发生。

4 结论

本文首先确认了回射流运动是影响空泡脱落和空泡状态的控制因素, 提出了空泡脱落的临界发射条件判据及量化表达式, 讨论了发射条件对空泡脱落和出水载荷的影响, 主要取得如下结论:

(1) 本文提出了一个空泡脱落与空泡状态的判据及其表达式。

(2) 该判据得到了系统数值模拟与试验结果的验证, 并在锥头回转航行体垂直发射情况下求得了量化表达式形式。

(3) 利用脱落条件无量纲表达式讨论了发射条件对空泡状态的影响规律, 并给出了可能出现随机大出水载荷的发射条件区间。

(4) 本文给出的临界发射条件判据和表达式是基于典型轴对称航行体垂直发射的云状自然空泡研究得到的, 给出的具体表达式形式能够应用于类似航行体头型和发射条件下的空泡脱落状况估计, 但在更宽的范围内表达式系数需要依据典型的情况进行修正, 相关的具体物理现象也有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] Knapp R T, Daily J W, Hammit F G. Cavitation [M]. New York, USA, McGraw-Hill Book Co., Inc, 1970.
- [2] Kubota A, Kato H, Yamaguchi H, et al. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section using conditional sampling technique [J]. Journal of Fluid Engineering, 1989, 111(2): 204-210.
- [3] Le Q, Franc J P, Michel J M. Partial cavities: Pressure pulse distribution around cavity closure [J]. Journal of Fluid Engineering, 1993, 115(2): 249-254.
- [4] Stutz B, Reboud J L. Experiments on unsteady cavitation [J]. Experiments in Fluids, 1997, 22(3): 191-198.
- [5] Callenaere M, Franc J, Michel J. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 444: 223-256.
- [6] 黄彪, 王国玉, 权晓波, 等. 绕平头回转体非定常空化流体动力特性研究[J]. 试验流体力学, 2011, 25(2): 22-28.
Huang Biao, Wang Guoyu, Quan Xiaobo, et al. Study on the unsteady cavitating flow dynamic characteristics around a 0-caliberogive revolution body [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(2): 22-28. (in Chinese)
- [7] 季斌, 罗先武, 彭晓星, 等. 绕扭曲翼型三维非定常空泡脱落结构的数值分析[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2010, 25(2): 217-223.
Ji Bin, Luo Xianwu, Peng Xiaoxing, et al. Numerical analysis for three dimensional unsteady cavitation shedding structure over a twisted hydrofoil [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(2): 217-223. (in Chinese)
- [8] 陈瑛, 鲁传敬, 吴磊. 绕水翼局部空泡的非定常流动特性[DB]. 中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/9026>, 2006-10-26.
Chen Ying, Lu Chuanjing, Wu Lei. The study of unsteady motion properties of partial cavitation around hydrofoil [DB]. Science Paper Online. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/9026>, 2006-10-26. (in Chinese)
- [9] 权晓波, 李岩, 魏海鹏, 等. 航行体出水过程空泡溃灭特性研究[J]. 船舶力学, 2008, 12(4): 545-549.
Quan Xiaobo, Li Yan, Wei Haipeng, et al. Cavitation collapse characteristic research in the out-of-water progress of underwater vehicles [J]. Journal of Ship Mechanics, 2008, 12(4): 545-549. (in Chinese)
- [10] 胡影影, 朱克勤, 席葆树. 半无限长柱体出水数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(2): 235-238.
Hu Yingying, Zhu Keqin, Xi Baoshu. Numerical simulation of a semi-infinite cylinder exited from water [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(2): 235-238. (in Chinese)

- [11] 傅慧萍, 鲁传敬, 吴磊. 回转体空泡流特性研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005, 20(1): 84-98.
Fu Huiping, Lu Chuanjing, Wu Lei. Research on characteristics of flow around cavitation body of revolution [J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(1): 84-98. (in Chinese)
- [12] 闵景新, 魏英杰, 王聪, 等. 潜射导弹垂直发射过程流体动力特性数值模拟[J]. 兵工学报, 2010, 30(10): 1303-1309.
Min Jingxin, Wei Yingjie, Wang Cong, et al. Numerical simulation on hydrodynamic characteristics of submarine missile in the vertical launch process [J]. Acta Armamentarii, 2010, 30(10): 1303-1309. (in Chinese)
- [13] 王一伟, 黄晨光, 杜特专, 等. 航行体垂直出水载荷与空泡溃灭机理分析[J]. 力学学报, 2012, 44(1): 39-48.
Wang Yiwei, Huang Chenguang, Du Tezhuan, et al. Mechanism analysis about cavitation collapse load of underwater vehicles in a vertical launching process [J]. Acta Mechanica Sinica, 2012, 44(1): 39-48. (in Chinese)
- [14] Yanpeng Wei, Xin Fang, Chenguang Huang, et al. A scaled underwater launch system accomplished by stress wave propagation [J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(2): 024601.
- [15] 王一伟, 黄晨光, 方新, 等. 水下回转航行体的云状空化回射流运动特征研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2013, 28(1): 23-29.
Wang Yiwei, Huang Chenguang, Fang Xin, et al. Characteristics of the re-entry jet in the cloud cavitation flow over a submerged axisymmetric projectile [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(1): 23-29. (in Chinese)
- [16] Kim J H, Holl J W. Water tunnel simulation study of the later stages of water entry of conical head bodies [DB]. Applied Research Laboratory, Technical Memorandum, 1975, [http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA015129 & Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf](http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA015129&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf), 1975-6-18.
- [17] GSinghal A K, Athavale M M, Li H, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model [J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 617-624.

(上接第 32 页)

- [10] 徐春风, 黄佩珍. 力、电、热作用下晶内微裂纹的演化[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 6-10.
Xu Chunfeng, Huang Peizhen. The evolution of intragranular microcracks induced by stress, electro, and thermo-migrations [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 6-10. (in Chinese)
- [11] Xia L, Bower A F, Suo Z, Shih C F. A finite element analysis of the motion and evolution of voids due to strain and electromigration induced surface diffusion [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1997, 45(9): 1473-1493.
- [12] Sun B, Suo Z. A finite element method for simulating interface motion-II. Large shape change due to surface diffusion [J]. Acta Materialia, 1997, 45(12): 4953-4962.
- [13] Herring C. Some theorems on the free energies of crystal surfaces [J]. American Physical Society's New Journal, 1951, 82(1): 87-93.
- [14] 郭建伟. 多场诱发表面扩散、晶界扩散下微裂纹的演化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
Guo Jianwei. The microcrack evolution due to surface diffusion and grain-boundary diffusion induced by multi-physical fields [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [15] 黄鹏. 内压对电场下晶内微裂纹演化的影响[J]. 计算力学学报, 2012, 29(4): 620-624.
Huang Peng. The effects of the internal pressure on the evolution of intragranular microcracks under electric field [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(4): 620-624. (in Chinese)