

文章编号: 1000-4874(2001)03-0374-08

小攻角带空泡细长体的试验研究

谢正桐¹, 何友声², 朱世权²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080;

2. 上海交通大学工程力学系, 上海 200030)

摘 要: 本文对小攻角带空泡细长体进行了较为细致的试验研究。其中包括水洞三分力天平的研制与测力系统的建立, 空泡起始、发展空泡形态观测, 空泡几何特征的测量和定常来流中空泡水动力的测量, 对试验结果进行深入的研究和分析, 以揭示其中某些内在的规律性, 同时为进一步的研究提供经验。

关键词: 空泡; 细长体; 试验研究

中图分类号: O 352 **文献标识码:** A

1 试验设备

该部分的试验工作是在上海船舶运输科学研究所的 K15 空泡水洞中完成的。水洞洞体全部采用不锈钢材料, 配有减压箱和除气装置, 具有很好的可控性。水洞工作段长 2.6m, 横截面为 0.6m × 0.6m 的方形, 并安装有 8 块可装卸的有机玻璃观察窗。有关水洞参数见图 1。试验过程中, 最高流速达 9m/s。调压范围是 (7.093~101.325)kPa, 最低空泡数达 0.3。在正常的实验环境下, 试验开始和结束时用 van Slyke 型空气含量仪测量了水中的空气含量, 变化范围为 0.39~0.42。

2 试验模型及安装

根据有关工程单位的要求, 试验选用了几种形状的头体, 后接细长圆柱体。本文仅给出装配 60°锥头的细长体的试验结果。模型见图 2, 模型的直径为 80mm, 细长比达 1:6.5, 其中段圆柱体长 314mm。中段圆柱体用铜加工, 锥头和尾体均用硬铝加工, 表面粗糙度为 3.2μm。模型的圆柱体表面标有尺寸刻度, 便于空泡长度测量。为了方便改变攻角, 我们设计了变攻角装置。在水洞外有相应的刻度盘, 可以方便地调整轴对称体的攻角。模型、天平及支撑系统的装

收稿日期: 1998-11-03

基金项目: 教育部博士点基金和国防科学技术预研基金资助项目

作者简介: 谢正桐(1968~), 男, 副研究员, 博士。

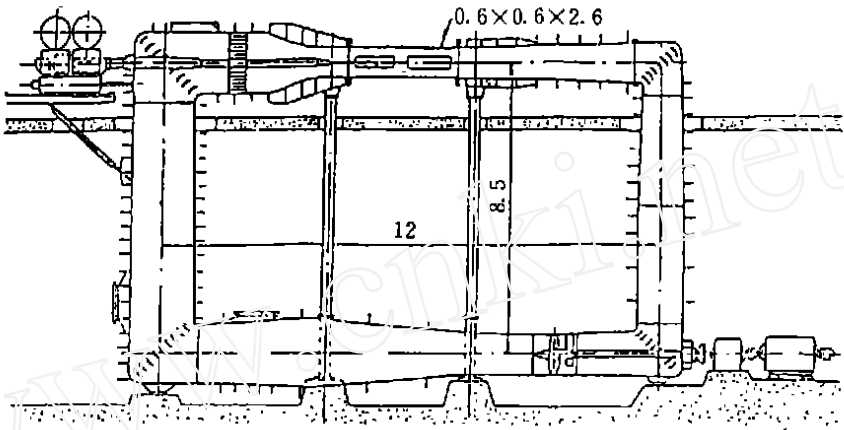


图1 K15 空泡水洞

配图见图3。整个装置固定在一块胶木工作窗上,安装在水洞底面。把三分力天平安置在水洞外,这样可以减少天平在水洞内引起的一些麻烦。

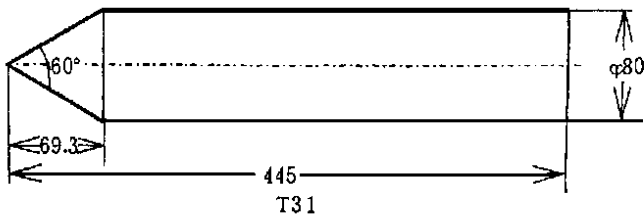


图2 测量模型简图

3 测量系统及试验过程

3.1 测量系统

根据试验要求,作者委托上海船研所设计并研制了一架三分力天平(图3),建立了有攻角情况下轴对称体的水动力测量系统。系统框图见图4。下面就各组成单元作简要介绍。用两个 SEMENS 7MF1104-A 电容压差式传感器来测量水洞的流速和压力,传感器具有较高的灵敏度和分辨率。模型受到的水动力可以分为阻力、侧向力(或升力)及侧向力矩。三个力通过水洞三分力天平实现实时测量。三分力天平的量程为:阻力 0~147N,侧向力 0~147N,力矩 0~24.5N·m(相对天平中心)。

3.2 采样处理软件

实时采样软件对于定常水动力及流速、压力的测量采样间隔为 0.014s,每次每个通道分别采 30 个点,然后去掉最高的 5 个点,取平均值。

3.3 试验过程

这里以试验内容来划分,分别简述有关试验过程。

(1) 空泡起始试验。在不同攻角情况下对轴对称体的空泡起始观测中,先调好流速,然后逐渐减小水洞压力,直接在频闪灯下肉眼观测到空泡出现。此时,用定常的测量系统采样水洞流速及压力,并求出空泡数(σ)。实验条件为

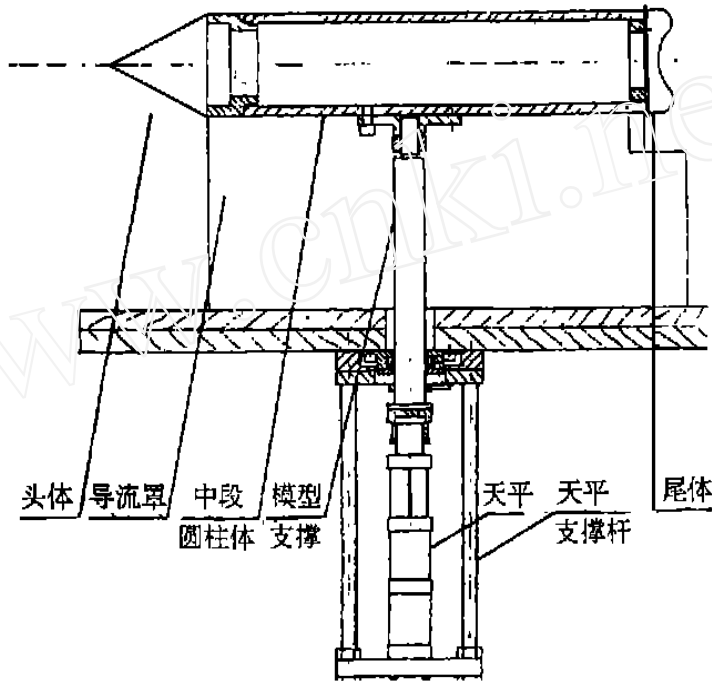


图3 模型、天平及支撑系统装配图

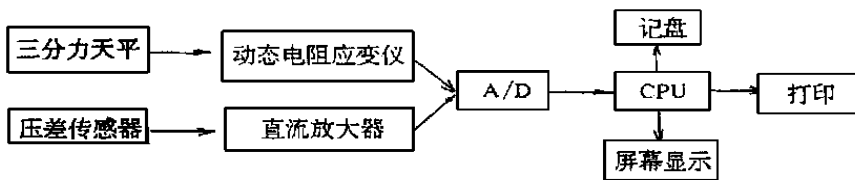


图4 测量系统框图

$R_{ed} = (0.80 \sim 0.90) \times 10^6$ 以中段圆柱体截面直径为参考长度

$R_{el} = (4.04 \sim 5.85) \times 10^6$ 以模型全长为参考长度

(2) 发展空泡观测。采用普通相机拍摄各种典型空泡形态, 共约 160 张记录。拍摄时, 用三角架把照相机固定在水洞上方, 频闪灯置于水洞侧窗。为了减小变形误差, 一方面尽量使镜头正对着试验模型, 另一方面, 在模型上面画有刻度线, 以便测量读数。同时, 对空泡的起始、发展进行了录像。

(3) 水动力测量。对所有模型, 用三分力天平测量了各种攻角、空泡数条件下的定常水动力, 其中包括阻力、侧向力和侧向力矩。

4 小攻角下轴对称体的空泡起始试验

对零攻角情况, 空泡的起始依赖于轴对称形态、雷诺数 (Re)、含气量、气核谱及来流的湍流度等因素。随着攻角的出现, 流场失去其轴对称性, 头体上的最低压力及位置也产生了变化,

从而导致起始空泡数的变化, 这已在实验观察中得到证实。本文所定义的起始空泡数是指在一定的水洞流速下, 随着水洞压力的逐渐减小, 用肉眼观测到有空泡出现。表 1 给出了观测到不同攻角及不同流速情况下的起始空泡数。以下对这些数据进行补充说明、分析。

表 1 起始空泡数

模型	攻角 ($^\circ$)	来流速度 (m/s)	起始空泡数
T31	0	6.998	1.917
T31	3	6.993	2.028
T31	7	6.994	2.103

起始空泡数 σ 定义为

$$\sigma_i = \frac{P - P_0}{\rho V^2} \quad (1)$$

这里 P 为饱和蒸汽压, P_0 为水洞环境压力, V 为来流速度, ρ 为流体密度。

T31 (60°锥) 是一种有剧烈分离流动的头体, 在肩部表面曲率变化剧烈。零攻角时, 空泡起始位置并不位于肩部, 而是在肩部下游约 3mm 处, 当攻角增大, 起始空泡数增大, 并且在背流面起始空泡的位置有向肩部靠近的趋势。

5 小攻角下轴对称体上发展空泡形态试验研究

5.1 发展空泡形态 (主要针对肩空泡讨论)

当攻角不为零时, 发展空泡的形态具有三维结构。T31 肩空泡形态具有许多有趣的现象。肩空泡脱体点位于肩部下游 3mm 处, 随着空泡数降低, 脱体点位置向肩部靠近。零攻角情况下, 当 $\sigma = 0.56$ 时, 肩空泡表面都是粗糙、白沫状不透明的, 攻角对空泡面的粗糙度有明显的影响。在空泡数较高时, 迎流侧和背流侧的肩空泡表面都是粗糙的, 但是当攻角 $\alpha = 3^\circ$ 空泡数 $\sigma = 0.63$ 时, 迎流面空泡变得透明, 空泡的尾部区域仍有一小块不透明白沫状区, 背流面空泡面为粗糙、不透明。随着空泡数进一步的降低, 当空泡数 $\sigma = 0.53$ 时, 空泡的迎流面和背流面表面都变为光滑透明, 可以很清楚地看见空泡所包围的模型, 但在空泡的尾部仍有一段白沫状不透明的区域。

5.2 空泡几何特征量试验结果

本文采用现场目测、摄影及录像记录相结合的方法, 对 T31 模型在不同空泡数、不同攻角下进行了肩空泡形态的观察。通过分析和整理, 分别给出了相对空泡长度 L_d/d 、 L_u/d 及相对空泡厚度 H_d/d 、 H_u/d 与空泡数及攻角的关系。下标 u 和 d 分别代表背流面和迎流面, 见图 5 所示。

图 6 和图 7 给出了攻角为 $\alpha = 0^\circ, 3^\circ, 7^\circ$ 时 T31 背流侧的相对空泡长度、相对空泡厚度与空泡数的关系。图 8, 9 给出了攻角为 $\alpha = 3^\circ, 7^\circ$ 时 T31 迎流侧的相对空泡长度、相对空泡厚度与空泡数的关系。实验观测还表明, 对于 60°锥头, 脱体点并非严格地位于肩部曲率突变处。当攻角 α 一定时, 脱体点随空泡数的减小而略有前移, 逼近肩部; 当空泡数一定时, 若增大攻角 α , 背流侧的脱体点前移, 而迎流侧的脱体点后移。脱体点处空泡自由流线和模型中段圆柱体物面的夹角近似为 30° ; 也即该处自由流线和 60°锥头的锥面是近似平行的。

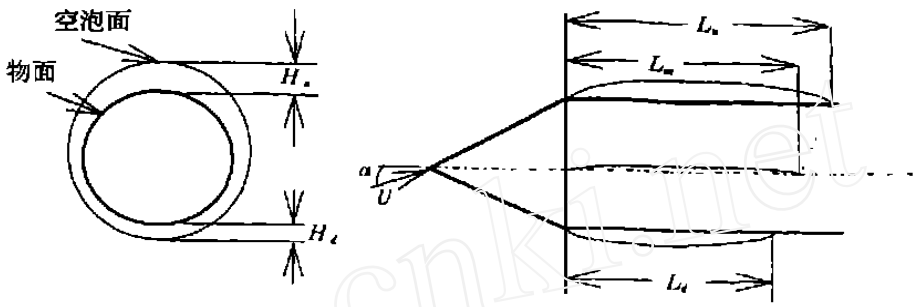


图5 空泡迎流面和背流面示意图

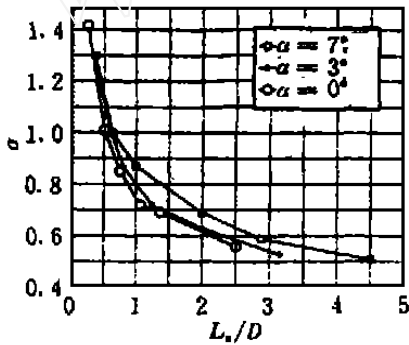


图6 T31 不同攻角下背流面相对空泡长度和空泡数关系

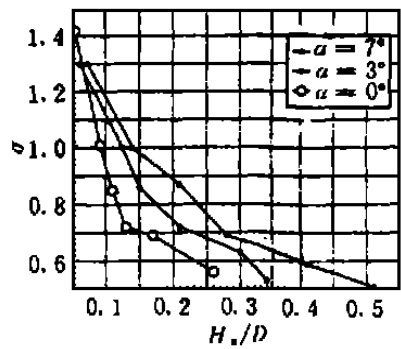


图7 T31 不同攻角下背流面相对空泡厚度和空泡数关系

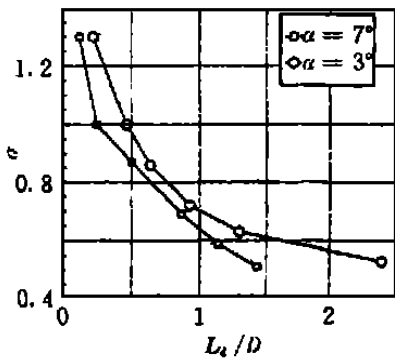


图8 T31 不同攻角下迎流面相对空泡长度和空泡数关系

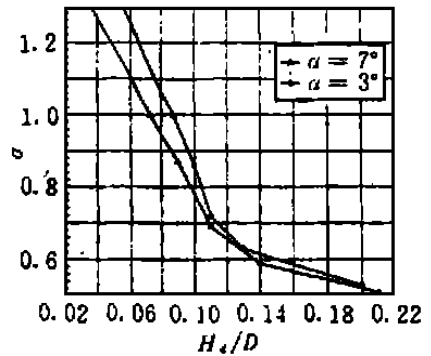


图9 T31 不同攻角下迎流面相对空泡厚度和空泡数关系

6 小攻角下定常来流中带空泡轴对称体的水动力试验研究

6.1 测力系统的校准

用水洞三分力天平作传感器,应用微机进行采样与处理,建立了水洞三分力天平的校准系统。这里仅给出三分力天平的校准结果。

$$F_x = 7.6528\Delta n_x - 0.1027F_z - 0.00705M_y \quad (2)$$

$$F_z = 0.1343F_x + 5.7546\Delta n_z + 0.0007M_y \quad (3)$$

$$M_y = 0.0098F_x + 0.0021F_z + 0.1888\Delta n_m \quad (4)$$

其中 F_x (N) 为阻力, F_z (N) 为侧向力(或升力), M_y (N·m) 为力矩(图 10), Δn_x (V), Δn_z (V), Δn_m (V) 分别为三对桥路输出电压与没有力作用时天平的基准电压之差。上述校准公式需要迭代求解。校准是以天平中心点作为天平测量载荷的参考点。

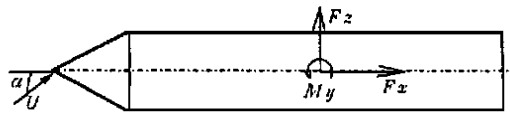


图 10 水动力方向

6.2 定常水动力系数的试验结果

天平校准中心距离 T31 模型顶端点为 0.273m。定义水动力系数如下:

阻力系数

$$C_D = \frac{F_x}{0.5\rho V^2 S_B} \quad (5)$$

升力系数

$$C_L = \frac{F_z}{0.5\rho V^2 S_B} \quad (6)$$

力矩系数

$$C_M = \frac{M_y}{0.5\rho V^2 S_B L} \quad (7)$$

其中 S_B 为中段圆柱体的横截面积, L 为模型的全长。T31 全长为 0.445m。图 11, 12, 13 分别给出了 T31 在攻角 $\alpha = 0^\circ, 3^\circ, 7^\circ$ 时 C_D, C_L, C_M 与空泡数的关系曲线。在攻角为零时, 在空泡数 $\sigma = 0.52 \sim 2.0$ 范围内, 阻力特性基本上表现为部分空泡的阻力特性。阻力随空泡数的降低而增加。但是在攻角 $\alpha = 3^\circ, 7^\circ$ 时, C_D 在 $\sigma = 0.55$ 左右出现峰值。当 $\sigma = 0.55$ 时, 阻力有随 σ 的减小而减小的趋势, 此时, 实验中观察到背流面肩空泡的长度几乎发展到模型尾部。 C_L 在 $\sigma = 1.0$ 时, 对 σ 的变化不敏感, 当 $\sigma < 1.0$ 时, 开始有较大的变化, 随空泡数的减小而增大, 在 $\sigma = 0.55$ 左右曲线有一个峰值, C_M 在 $\sigma = 1.0$ 左右似有一个负峰值。当 $\sigma < 1.0$ 时, C_M 随 σ 增大而显著减小。

以上给出了模型在不同的空泡发展情况下和不同攻角下所受到的水动力状况。下面对小攻角下轴对称体的空泡水动力变化特征及诸影响因素作进一步的分析。由图 11, 12, 13 可知, 攻角越大, 在相同的空泡数下, C_L 及 C_M 的绝对值也越大。在同一攻角下, C_L, C_M 随 σ 的变化也有显著的变化。 C_L 在 $\sigma = 1.0$ 时, 基本上保持为一常数。此时空泡长度 $l_c = 0.5D$, 物面绝大部分为湿面。当 $\sigma < 1.0$ 时, 随着空泡数降低, 升力明显上升, 这是因为随空泡数降低, 肩空泡在

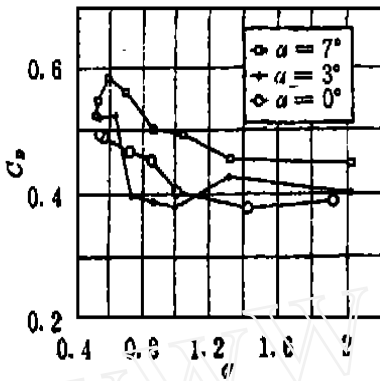


图 11 T31 在不同攻角下阻力系数

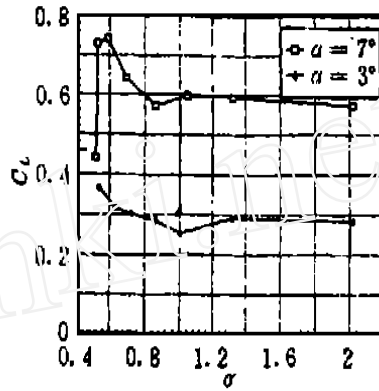


图 12 T31 在不同攻角下侧向力系数

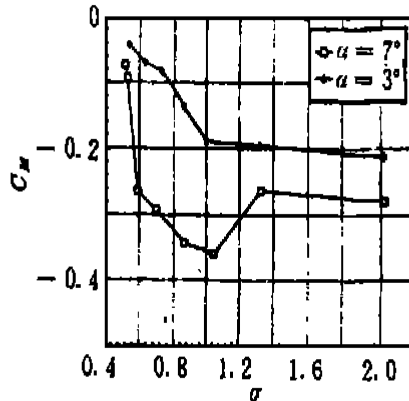


图 13 T31 在不同攻角下力矩系数

迎流侧和背流侧不一致程度增大, 攻角越大, 这种变形也越严重, 使迎流面湿面积大大超过背流面湿面积。因此产生很大的升力。 $\alpha = 7^\circ$ 时, 在 $\sigma = 0.53$ 附近有一峰值, 当空泡数再降低时, 升力急剧下降。因为此时迎流面和背流面的肩空泡长度随着空泡数的稍减小而急剧增长, 以至迎流面湿面积急剧减少, 迎流面和背流面都主要为空泡面所覆盖。

7 总结

小攻角下带空泡轴对称细长体的水动力试验研究, 是在上海船舶运输科学研究所的 K15 空泡水洞中完成的。主要有三个方面的结论:

(1) 空泡的起始不仅依赖于绕流体的形态、 Re 数、含气量、气核谱及来流的湍流度等因素, 也与攻角有关。

(2) 虽然 T31 (60°锥) 是一种有剧烈分离流动的头体, 在肩部表面曲率变化剧烈, 空泡的起始位置也随攻角和空泡数的变化而变化。细长体肩空泡无量纲长度与空泡数的关系曲线呈双曲线形状, 在背流面随攻角的变化不大, 而在迎流面较为明显。攻角对肩空泡厚度的影响很大, 同时, 需要指出的是, 空泡厚度的测量技术有待于提高。

(3) 对 T31 模型, 在同一攻角下, 当 $\sigma = 0.53$ 时, 空泡数的变化对 C_L, C_M 产生显著的影响。

响, 同一空泡数下, 攻角对 C_L, C_M 产生很大的影响。在同一攻角下, $\sigma = 0.53$ 时, C_D 随 σ 的增大而减小, 表现为部分空泡的阻力特性。当 $\sigma < 0.53$ 时, C_D 随 σ 减小而减小, 表现为超空泡的阻力特性。

致谢

作者感谢上海船舶运输科学研究所的胡天群高工等同仁在试验中提供的帮助。在本文的成文过程中, 航天部一院的沈正研究员等提出了宝贵的建议。试验过程中一直得到刘桦博士和徐能军同志的协助, 在此一并致谢。

参 考 文 献:

- [1] ACOSTA A J, PARK N B R. Cavitation inception—a selective review [J]. J. of Ship Research, 1975, 19(4): 193-205
- [2] 何友声, 王国强. 螺旋桨激振力[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
- [3] 李战华, 鄂学全. 用于水下测量的二分力天平[R]. 北京: 中国科学院力学研究所报告, 1988
- [4] 刘桦, 朱世权, 何友声. 系列头体的空泡试验研究——初生空泡的发展空泡形态[J]. 中国造船, 1995, 128(1): 1-10
- [5] MAY A. Water Entry and Cavity-Running Behavior of Missiles[R]. AD-A 020429, 1975
- [6] 吴品奇, 孙伯起. 回转体零攻角超空泡绕流[A]. 第二届全国空化学术讨论会论文集[C]. 1978
- [7] 谢正桐. 零攻角与小攻角下带空泡轴对称细长体的水动力计算和试验研究[D]. 上海交通大学博士学位论文, 1995

An experimental study on cavitating slender body at small angles of attack

XIE Zheng-tong¹, HE You-sheng², ZHU Si-quan²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080;

2. Shanghai Jiao tong University, Shanghai 200030)

Abstract The cavitation inception, the developed cavitation shape and the steady hydrodynamic forces and moment on cavitating slender axisymmetric bodies at small angles of attack in the K15 cavitation tunnel were experimentally studied and reported in the present paper. A three components strain balance was designed to measure the drag, lift and moment on axisymmetric cavitating bodies. Using the automatic sampling and processing system, the hydrodynamic coefficients were obtained. The results were investigated and analyzed in detail. This paper furnishes experience for the further investigation as well.

Key words: cavitation; slender body; experimental study