

文章编号: 1000-6893(2003)06-0503-04

大迎角细长旋成体绕流结构演变过程实验研究

刘沛清, 邵延峰, 邓学莹, 马宇

(北京航空航天大学 流体力学研究所, 北京 100083)

Experimental Study of the Evolutionary Process of the Flowfield Around Slender Body at High Angle of Attack

LIU Pei qing, SHAO Yan feng, DENG Xue ying, MA Yu

(Fluid Mechanics Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 通过烟流显示和测压实验, 系统地观察和分析了尖拱头细长旋成体绕流结构随迎角的演变过程。实验发现在不同迎角下, 不仅细长旋成体绕流结构形态不同, 而且不同流态结构的演变过程所含迎角范围较小, 几乎在几度迎角内就可完成。

关键词: 细长旋成体; 非对称涡; 大迎角; 流动显示; 非定常性

中图分类号: V211.7 文献标识码: A

Abstract: Based on visualizing and tracking the flow by smoke stream and surface pressure measurement, the entire process of the flow behavior around a slender ogive cylinder at angles of attack from 0° to 90° is observed and analyzed systematically. It is found that in the experiment, at various angles of attack, the structure of the flowfield around the slender body is different and the range of the angles of attack involved by the evolution process is small. The evolution process can mainly be finished in a small range of angles of attack.

Key words: slender body; asymmetric vortices; high angle of attack; flow visualization; unsteady character

对细长旋成体大迎角绕流问题, 随着迎角的增大, 绕流流场的纵向分量逐渐减弱, 横向分量不断增强, 导致绕流结构由对称涡系发展到非对称涡系, 最后当迎角大于 75° 以后, 绕流场呈现完全非定常的湍尾流结构, 并出现明显的涡脱落现象。实验还发现, 时均侧向力非零值区主要出现在 $\alpha \approx 30^\circ \sim 70^\circ$ 范围内, 在此迎角范围内横流分量起主控作用, 分离背涡出现明显非对称涡系结构, 如图 1 所示。在特大迎角 ($\alpha \approx 70^\circ \sim 90^\circ$) 下, 横流分量起完全控制作用, 从物面上分离的边界层以类似于二维圆柱绕流的 Karman 涡街形式周期脱落, 此时时均侧向力趋于零值。

在侧向力非零值区^[1], 实验表明不同迎角下截面侧向力系数沿轴向分布是不同的(如图 2 所示), 与此相应的涡系结构沿轴向演变过程是, 由头部区域的对称涡系, 发展到非对称 2 涡系、3 涡系..., 最终演变为湍尾流结构(或 Karman 涡结构), 如图 3 所示^[2]。但是, 不同涡系结构的演变机理如何至今尚未清楚, 本文基于烟流显示结果和测压试验, 系统研究不同迎角下绕流结构的演变规律。

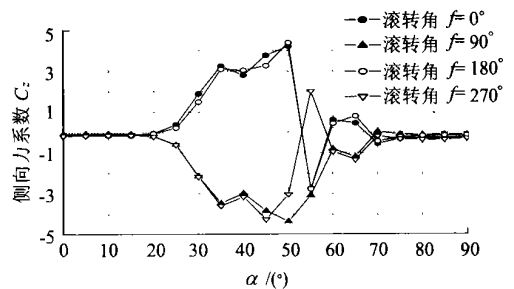


图 1 锥柱模型时均侧向力系数随迎角的变化曲线
Fig. 1 Side force variation with attack angle

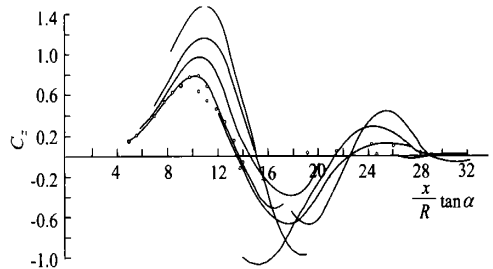


图 2 拱柱模型不同迎角下截面侧向力系数沿轴向的变化曲线
Fig. 2 C_s-x/d of ogive models with angles of attack

1 实验模型及其测试技术

实验模型(如图 4 所示)为木制的, 采用细长尖拱头旋成体, 头部长度为 $3d$ (d 为后体直径, $d = 60\text{mm}$), 后体长度为 $9.8d$ 。

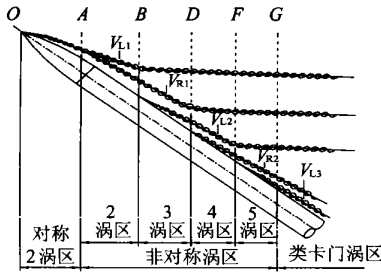


图3 细长旋成体大迎角背涡结构示意图

Fig. 3 Physical model of asymmetric vortices structure

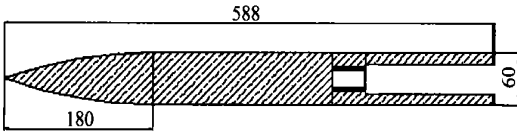


图4 尖拱模型

Fig. 4 Ogive cylinder model

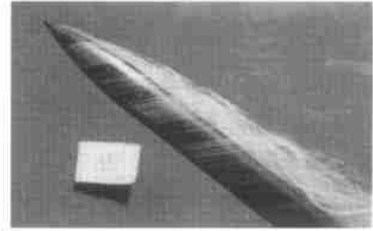
实验是在北京航空航天大学低速风洞中进行的, D1 风洞为单回流开口风洞, 实验段为 $1.02\text{m} \times 0.76\text{m}$ 的椭圆截面, 风洞实验段最大平均速度为 50m/s , 湍流度为 1% , 可通过风洞开关档来调整实验段风速。烟流实验的迎角范围为 20° 到 90° , 实验段平均风速为 1.5m/s , 对应的 Re 数为 6200 。

2 实验结果与分析

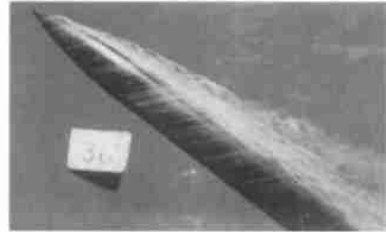
实验时, 详细地观察了不同迎角下细长体绕流的演变过程, 特别是不同流态结构演变的细节。以下利用烟流显示和测压结果, 系统分析了不同迎角下绕流结构的演变规律。

(1) 由二涡系向三涡系的演变过程(迎角范围 35° 到 38°) 如图 5(a) 所示, 当迎角大于 35° 时, 细长体绕流尾部开始出现非对称二涡系结构(但不明显, 一侧涡大约在 $7d$ 处抬起)。随着迎角的增大, 涡抬起的位置不断向前发展推进。图 5 表明, 在迎角 35° 到 38° 之间涡结构的演变过程, 说明非对称涡的发展是较快的。在迎角 37° 时, 第 1 个涡的抬起位置约在 $6d$, 而在 38° 时(第 1 个涡的抬起位置约在 $5d$) 非对称的三涡系结构已很明显。由图 5(d) 给出的在迎角 38° 时截面侧向力系数沿轴向的变化曲线也清楚地说明, 此时在实验模型范围内表现出明显的三涡系结构。其中, 侧向力系数的第 1 个峰值发生在 $5d$ 处(第 1 个涡抬起), 而第 2 个负峰值发生在 $8.5d$ 处(第 2 个涡抬起), 这和显示结果是吻合的。由侧向力系数分布曲线和流动显示结果可见, 在 $1d$ 到 $5d$ (第 1

个涡抬起位置) 之间为非对称二涡系, 在 $5d$ 到 $8.5d$ 之间为非对称的三涡系。此外, 在该迎角范围内, 模型截面侧向力系数峰值并未达到最大值。



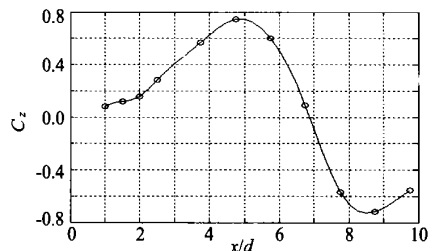
(a) 35° 迎角



(b) 36° 迎角



(c) 38° 迎角



(d) 38° 迎角时截面侧向力系数分布

图5 非对称二涡系到三涡系的演变过程

Fig. 5 Evolvement process from asymmetric twin vortices to asymmetric triple vortices

(2) 三涡系向四涡系的演变过程(迎角范围 39° 到 45°) 如图 6 所示, 在该迎角范围内模型背部主要呈现非对称三涡系结构的发展过程。如在 40° 时第 1 个涡抬起的位置约在 $4.5d$ 处, 涡的轨迹很清晰, 且第 2 个涡抬起的位置也向模型头部推进, 在第 3 个涡抬起后模型背部将呈现四涡系结构。随着迎角地增加, 这种四涡系结构逐渐向模型头部发展, 在 41° 时第 2 个涡抬起位置在 $8d$, 在 43° 时该涡抬起的位置约 $7.5d$, 这些和截面侧向力系数分布结果吻合程度尚好。由图 6(f) 截面侧向力系数的分布曲线可见, 在该迎角范围内, 第 1 峰值和第 2 峰值均在增大, 说明涡的强度大

于由二涡系向三涡系的演变时的涡强度。

(3) 多涡与湍尾涡混合结构演变过程(迎角范围 55° 到 60°) 如图 7 所示, 在此迎角范围内, 模型背部主要呈现多涡系(四涡系)和湍尾流的混合结构, 在模型的前部分涡系结构明显, 而在模型后部将呈现湍尾流, 类似于 Karman 涡脱落, 此时时均截面侧向力趋向零值。如在迎角 57° 时, 第 2 个涡抬起的位置约 $5d$ 处, 以后烟流很不清晰, 无明显涡结构, 说明出现湍尾流结构, 且随着迎角的增加湍尾流结构逐渐向模型头部推进。实验表明, 这种复杂流动结构的演变过程从 55° 到 58° 之间基本完成。从 57° 迎角截面侧向力系数分布曲

线表明, 第 1 个侧向力系数峰值达到最大, 但第 2 个和第 3 个峰值均较小, 特别是第 3 个峰值更小(说明已进入尾流区)。关于截面侧向力系数沿轴向的变化原因, 文献[3]给出详细分析。值得注意的是, 从 58° 开始, 尾涡的界线不断摆动, 这正反映了大迎角下旋成体绕流的非定常性。

(4) 由混合结构向完全湍尾流结构的演变过程(迎角范围 70° 到 74°) 如图 8 所示, 随着迎角的增大, 模型背部的尾流区逐渐向头部推进, 当迎角为 70° 时, 烟流显示只能在非常靠近模型的头部区看出明显的两个集中涡, 而模型的大部分区均处于湍尾流区(Karman 涡区), 此时时均侧向力

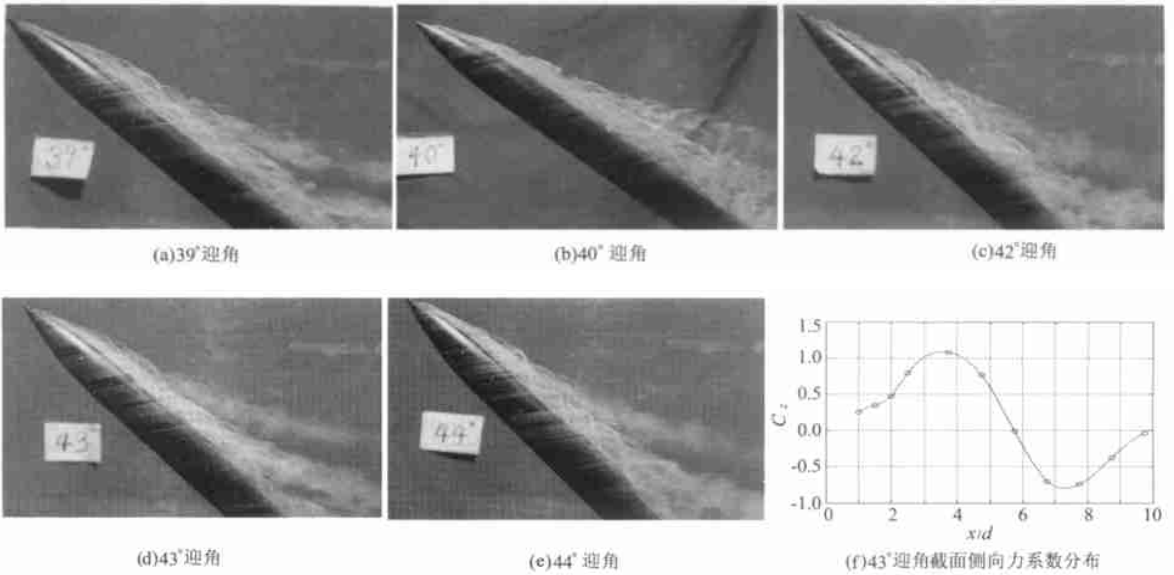


图 6 非对称三涡系向四涡系的演变过程

Fig. 6 Evolution process from asymmetric triple vortices to asymmetric four vortices

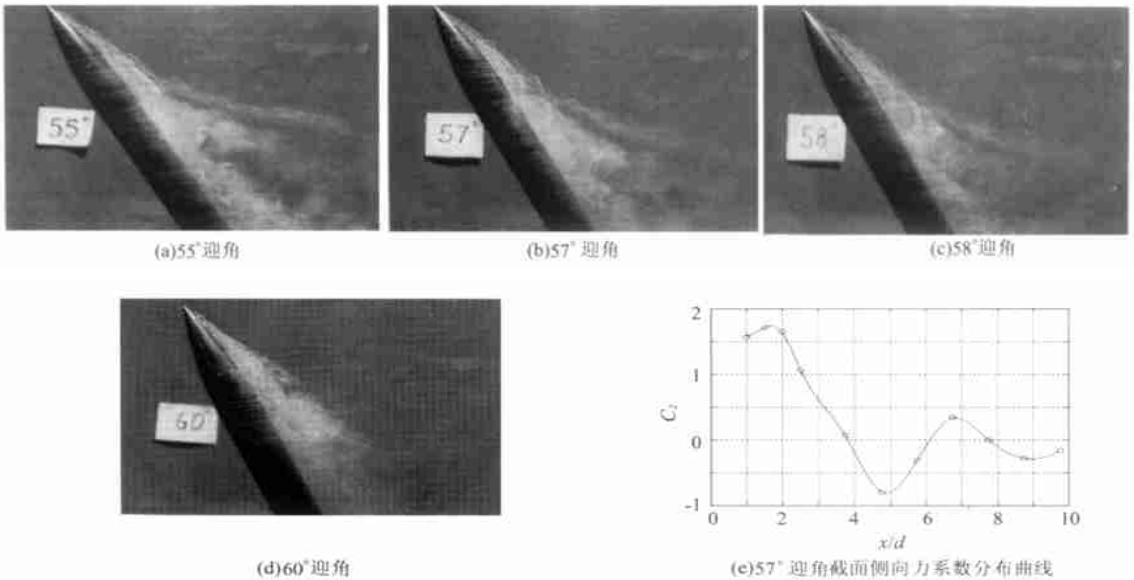


图 7 多涡系与湍尾流演变过程

趋向于零值。随着迎角进一步增大,头部的集中涡不断抬起, Karman 涡区也不断向头部推进,最后当迎角达到 74° 时,头部集中涡完全消失,整个

模型的时均侧向力变为零,这和测力结果是吻合的。从 74° 到 90° 迎角范围(如图 8(d)~(f)),绕流场均处于 Karman 涡区。

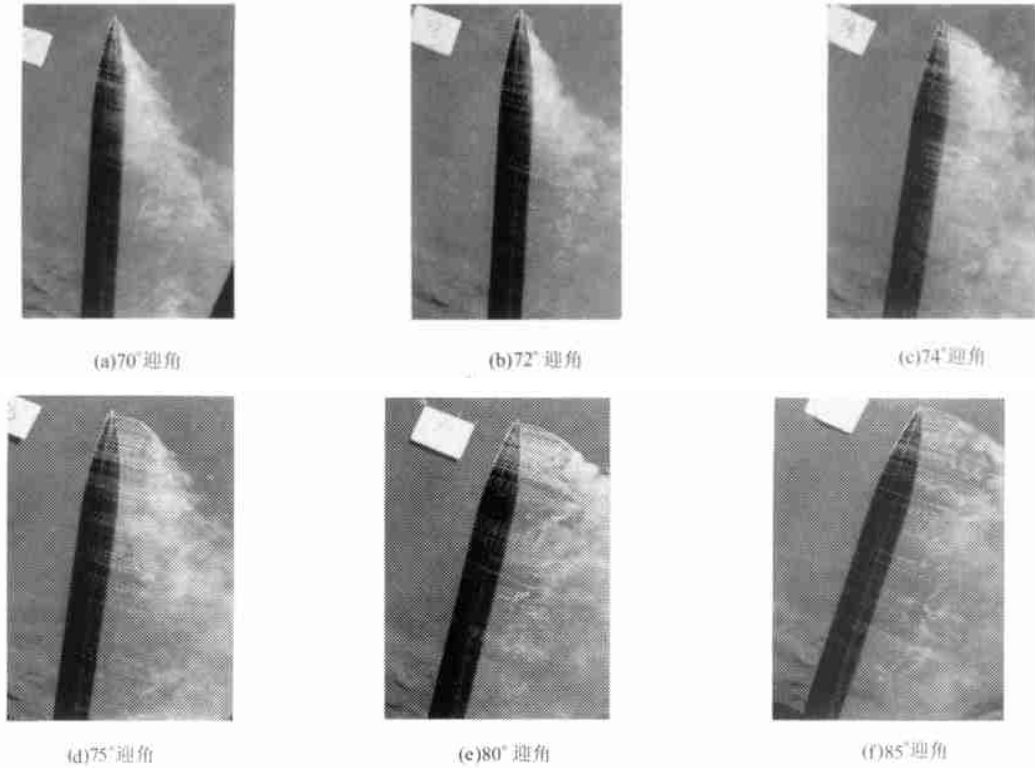


图 8 混合结构向完全湍尾流结构的演变过程

Fig. 8 Evolvement process from turbulent wake to wake

参 考 文 献

- [1] Thomson K D, Morrison D F. The spacing, position and strength of vortices in the wake of slender cylindrical bodies at large incidence[J]. J Fluid Mech, 1971, 50: 751-783.
- [2] 邓学莹. 细长旋成体大迎角流场结构与分区特性研究[R]. 第十四届全国风洞实验大会报告. 四川绵阳, 2001. (Deng X Y. The study of the flowfield structure and zonal analysis of slender bodies at high angles of attack[R]. Mi anyang: The fourteenth National Wind Tunnel Conference, 2001.)
- [3] 刘沛清, 邓学莹. 大迎角细长体绕流背涡结构与气动特性分析[J]. 力学学报, 2002, 34(2): 248-255. (Liu P Q, Deng X Y. Lee side vortex structure and aerodynamic characteristics analysis over a slender cylinder at high incidence[J]. Acta Mechanica Sinica, 2002, 34(2): 248-255.)

作者简介:



刘沛清(1960-) 男,山西人,清华大学博士毕业。现为北京航空航天大学教授、博导,飞行器设计与应用力学系研究生指导主任。长期从事水动力学及飞机先进气动布局研究。目前研究兴趣主要为机体大攻角非对称涡的非正常性及鸭式布局飞机的气动特性等。电话:(010) 82317524, bhlpq@



邵延峰(1974-) 女,生于陕西,1996年毕业于北京航空航天大学,2000年起在北京航空航天大学飞行器设计及应用力学系攻读硕士学位。电话:82317524, shaoyf@263.net



邓学莹(1941-) 男,生于苏州,1963年毕业于北京航空学院。现任北京航空航天大学教授、博士生导师。兼任中国空气动力学会副理事长、力学学报副主编等职。长期从事旋涡分离流、激波/边界层干扰、矢量喷流干扰等复杂流动领域的研究。近期的研究兴趣主要是大迎角非对称涡、机翼摇摆及先进气动布局的机理研究。电话:(010) 82317524, Dengxueying@vip.sina.com.cn.



马宇(1973-) 男,山西晋城人,北京航空航天大学飞行器设计及应用力学系博士研究生。联系电话010-82317524

(责任编辑:吴小勇)