

脉冲风洞自由飞动态标模设计与制作

孙英英, 潘文欣, 谷笏华, 苑朝凯

(中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京海淀区 100190)

摘要 本文详细描述了用作脉冲风洞模型自由飞动态试验标模的 10° 尖锥模型的设计及制作工艺。采用硬质聚氨酯泡沫塑料模注塑成型法制作 10° 尖锥模型的外壳, 以圆柱体钨钨合金配重为其核心, 调整所要求的重量和重心位置, 根据估算在 JF-8A 风洞所提供的典型试验气流状态条件下 ($M_\infty=9.29$, $Re_\infty=1.1 \times 10^7/m$, $q_\infty=0.384 \text{Kg/cm}^2$, $V_\infty=1446 \text{m/s}$, 试验时间 $t=25 \text{ms}$) 可以获得 6 个周期的模型角运动。

关键词 脉冲风洞, 模型自由飞, 动态稳定性, 标模

引言

风洞自由飞试验技术是 20 世纪 60 年代发展起来的风洞试验技术。其主要优点是没有任何支架的干扰, 这对获得静、动态气动系数很有实用价值。常规风洞自由飞技术首先由美国喷气推进实验室于 1962 年成功地在超声速风洞中进行试验^[1]。此后, 国外许多国家和我国先后都发展了风洞自由飞技术。尤其对飞行器动稳定性的研究而言, 风洞自由飞试验技术具有很好的应用前景。

自上世纪 70 年代开始^[2], 中国科学院力学研究所的科研人员针对高超声速脉冲风洞研究和开发了轻模型自由飞测力技术, 经过多年的努力逐步建立起一套从静态到动态, 从测量到辨识的比较完整配套的高超声速脉冲风洞模型自由飞测力技术^[3]。

笔者在相关高超声速飞行领域国家重大专项经费和中科院力学所 LHD 重点实验室开放课题经费的支持下, 开展了恢复和发展脉冲风洞模型自由飞试验技术的工作。首先在高超声速脉冲风洞 JF8A 中开展 10° 尖锥高超声速动态试验标模的气动特性验证性实验, 以便与国内外实验数据进行比较分析, 考验测量系统的可靠性。

由于高超声速脉冲风洞的准定常工作时间仅十几毫秒至几十毫秒, 用模型自由飞方法测量动态气动力特性的关键问题之一是合理设计模型, 使其在脉冲风洞短暂的工作时间内获取

足够多的角运动周期数 (一般需要在 3 个周期以上), 以利于提高动态气动特性参数的辨识精度。因此, 模型的设计和制作是脉冲风洞模型自由飞动态试验技术中的一个重要环节, 模型质量的优劣将直接影响到整个试验能否取得有效数据。本文主要叙述 10° 尖锥自由飞动态试验标模的设计及制作。

1 10° 尖锥动态试验标模的设计

10° 尖锥是文献[4]提出的高超声速动态试验标模, 国内外多以此为标模, 以便于试验结果的比较^[2-3, 5-6]。

在设计自由飞模型时, 首先要估计模型的运动。对于俯仰平面内模型的力矩方程, 忽略其阻尼项, 得到模型在飞行距离为 S 的过程中角运动周期数 N 为^[1]:

$$N = \frac{1}{\pi} \left(-\frac{C_{m\alpha}}{C_{D\text{eff}}} \cdot S \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{m}{I} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

(1) 上式中:

N : 模型在俯仰平面内的角运动周期数;

$C_{m\alpha}$: 模型的俯仰静稳定性导数;

$C_{D\text{eff}}$: 实验条件下模型的有效阻力系数;

S : 模型因阻力而飞越的距离;

d : 模型的特征尺寸, 为底部直径;

m : 模型的质量;

I : 模型绕过重心横轴的转动惯量。

其中,

$$S = \frac{C_{D\text{eff}} \cdot q \cdot A \cdot t^2}{2m} \quad (2)$$

(2) 式中：

t ：风洞的准定常工作时间；

q ：试验气流的动压；

A ：模型的底部面积。

对于一定外形的模型， $C_{m\alpha}$ 和 $C_{D\text{eff}}$ 为常数。在风洞实验条件及模型外形尺寸确定的情况下，基本上是模型的质量 m 和转动惯量 I 这两个因素决定模型角运动周期数 N 的多少。

模型设计的准则是，在风洞的准定常工作时间内，既使模型飞越的距离不超出观察窗可摄视场范围，又使模型有尽可能多的角运动周期数。由 (1)、(2) 两式可知，这就要求模型具有一定的质量和尽量小的转动惯量。因此，合理的模型结构形式应该是由一个重的核心和轻的外壳组合而成。

借鉴以往的模型制作经验，拟采用硬质聚氨酯泡沫塑料模注成型法制成极轻的薄壁外壳（密度约为 $0.1 \sim 0.25 \text{ g/cm}^3$ ），以高密度的钨铈合金配重（密度为 $18 \sim 19 \text{ g/cm}^3$ ）作为核心来调整所要求的重量和重心位置，所设计的 10° 尖锥动态试验标模的结构及外形尺寸如图 1 所示。

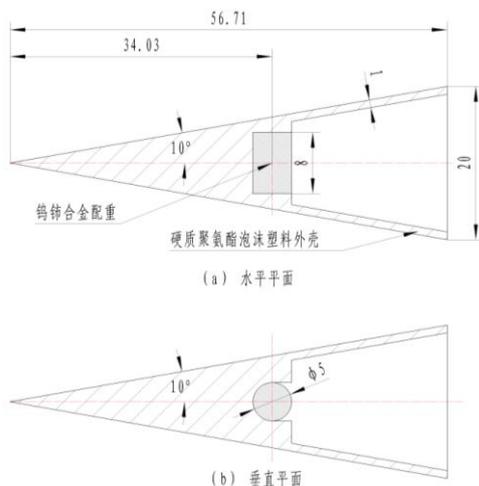


图 1 10° 尖锥动态试验标模的结构及外形尺寸

从工艺上考虑，配重一般设计成圆锥体、球体、圆台或圆柱体。本设计方案采用圆柱体

配重，在相同的配重质量条件下，采用圆柱体配重可以使模型在俯仰平面内绕过重心横轴的转动惯量最小，利于模型获得较多的角运动周期数。

所设计的 10° 半锥角尖锥模型，相对重心位置为 0.6，最薄处的壁厚为 1.0mm，底部直径 20mm，长度 56.7mm。在 JF-8A 风洞所提供的典型试验气流状态条件下 ($M_\infty=9.29$, $Re_\infty=1.1 \times 10^7/\text{m}$, $q_\infty=0.384 \text{ Kg/cm}^2$, $V_\infty=1446 \text{ m/s}$, 试验时间 $t=25 \text{ ms}$)，根据公式 (1) 估算，可以获得 6 个周期的模型角运动。

2 模具的制作

模型的制作采用硬质聚氨酯泡沫塑料模注成型的工艺。由于模型是在有精确尺寸的模具中成型、老化，因此有很好的外形重复性及尺寸精度，表面光洁度也很高，是一种较为理想的模型制作工艺。

为了获得轻巧且外形准确的模型，模具需由阴模、阳模两部分组成。

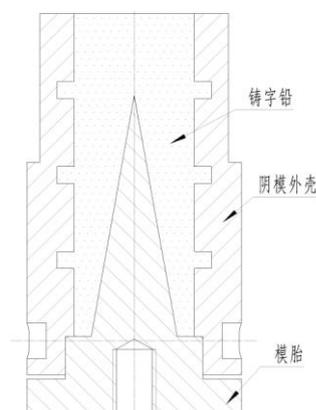


图 2 阴模浇注示意图

模具制作的主要困难在于获得尺寸准确、内表面光洁度高的阴模具。阴模具的加工可采用机械加工、电镀和低熔点合金滑铸等方法。以往的实践经验表明低熔点合金滑铸法较为理想。该方法是先用黄铜材料精密机械加工一个与 10° 尖锥模型外形相同的模胎，然后将其置入钢制阴模外壳中浇入熔融的铸字铅（参见图 2），待冷却后取出模胎便可获得阴模模具。其工艺方框图如下：



图3 阴模浇注工艺方框图

模胎组是指模胎、阴模外壳及其紧固件。

用上述方法制成的阴模外形尺寸比直接加工制成的精确，而且光洁度高，加上铸字铅熔点低并可以反复使用，是个经济性好又简单易行的好办法。

阳模具外表面尺寸根据所需模型壁厚而定。由于阳模的外表面成型为模型的内表面，因此无较高的特殊要求，可以由一般机械加工得到。阳模具制成后需在其端部打几个均匀分布的排气孔，以便发泡时气体和多余的聚氨酯原料排出，并且有助于分模时模型脱离阴模。图4是模胎和阳模的照片。



图4 模胎(左)和阳模(右)照片

3 脱模剂

脱模剂的作用在于使泡沫塑料模型与模具易于脱离，为了既不改变模型外形尺寸又要使模型表面保持光洁，脱模剂必须选择的十分得当，并且一定要涂得均匀和极薄。

将蜂蜡溶于溶剂汽油之中制成的汽油稀释蜂蜡液是一种理想的脱模剂，汽油与蜂蜡的比例为 100:5~10，在室温下可见到蜂蜡沉淀，使用时先用热水隔水加热，使蜂蜡在汽油中的溶解度加大，从而使沉淀消失，再涂在模具上，待汽油挥发后，在模具表面留下极薄的一层蜂

蜡。用此脱模剂获得的模型表面光洁、外形尺寸的重复性好。

4 模型的制作

采用硬质聚氨酯泡沫塑料模注成型法制作10度尖锥模型的外壳，其制作工艺方框图如下：

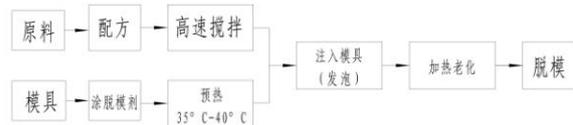


图5 模型外壳制作工艺方框图

硬质聚氨酯泡沫塑料的原料为以 PAPI（多次甲醛多苯基异氰酸酯）和聚醚（季戊四醇聚醚或甘油聚醚）为主体的两种原料，简称为黑料和白料，它们分别是添加了多种化学成分组成的复合剂。当这两种原料按照 1:1 的体积比混合，经高速搅拌混合均匀后，迅速注入阴模具中，随即将阳模扣上并用螺钉紧固以防发泡时的膨胀力顶开模具。混合好的聚氨酯原料很快在阴模和阳模之间的间隙中发泡成型为模型外壳，多余的原料从排气孔排出（参见图6）。要求两种原料混合搅拌的速度要快，仅在几秒钟内完成。

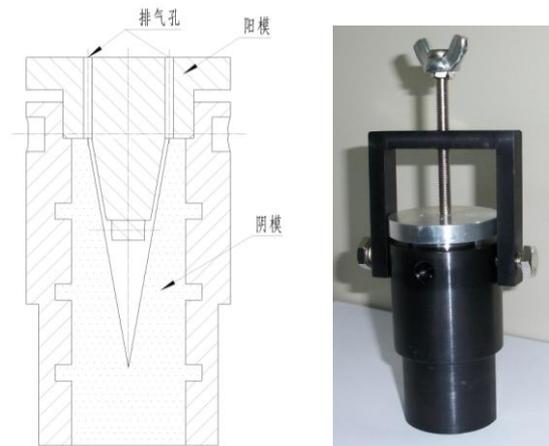


图6 阴模、阳模装配图及照片

在常温下，硬质聚氨酯发泡材料经过 10 分钟左右就能固化，然后将模具加热至 65℃ 左右脱模。加热的目的有两个，一是可以使模具内的聚氨酯材料很快老化，提高模型材料的强度；二是作为脱模剂的蜂蜡在 65℃ 时融化，使

模型很容易从模具中脱出。图 7 是制成的 10° 尖锥模型外壳的照片。



图 7 10° 尖锥模型外壳照片

发泡作为一种化学反应过程，与反应物所处的环境温度，模具温度有关；而搅拌的均匀性则影响反应的完全程度和发泡后材料的均匀性。为达到充分发泡以得到轻质模型，发泡时的环境温度应控制在 $20\sim 25^\circ\text{C}$ 之间，模具温度宜控制在 40°C 以下。

采用直径为 5mm 的钨铈合金棒，经线切割工艺加工成所需尺寸的小圆柱作为 10° 尖锥动态试验标模的配重。将配重用 502 胶水按照图 1 所示位置与模型外壳粘合，即完成了 10° 尖锥动态试验标模的制作。

5 结束语

本文论述了 10° 尖锥自由飞动态试验标模的设计及制作工艺。为了获得定量的气动力系数，模型重心必须配置在一定位置，因此在模型制作完成后还必须精确地测定它们的重量、重心位置以及转动惯量等特性参数。

致谢：在 10° 尖锥自由飞动态试验标模的设计及制作过程中，笔者与马家欢研究员进行了有益的讨论，马老师提出了许多宝贵建议，谨致谢意。

参考文献

- 1 Bain Dayman, Jr. Simplified Free-Flight Testing in a Conventional Wind Tunnel. JPL TR 32-346, 1962, N62-16382
- 2 马家欢, 唐宗衡, 张小平, 郭燕萍. 激波管风洞中锥模型静、动稳定性导数的测量. 力学学报, 1980, (1): 84~89
- 3 马家欢, 潘文欣, 翟曼玲, 陈素贞. 10° 尖锥标模高超声速动导数的实验测量. 空气动力学学报, 1997, 15 (4): 452-457
- 4 Fail R, Garner HC. Calibration Models for Dynamic Stability Tests. AGARD Reports 563, 1968
- 5 Hobbs Jr RB. Hypersonic Dynamic Stability, Part II. Conical Body Experimental Program. AD-650866, 1967
- 6 Welsh CJ, et al. Free Flight Investigation of the Aerodynamic Characteristics of a Cone at High Mach Numbers. AIAA J., 1970, 8 (2): 294-300

DESIGN AND MANUFACTURE OF A CALIBRATION MODEL FOR FREE-FLIGHT DYNAMIC STABILITY STUDY IN IMPULSE TYPE WIND TUNNEL

SUN Yingying PAN Wenxin GU Jiahua Yuan Chaokai

(State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Rd, Beijing 100190, China)

Abstract Design and manufacture of a 10° semiangle cone were depicted in detail, as a calibration model for free-flight dynamic stability measurement in hypersonic impulse type wind tunnel. The shell of the 10° semiangle cone was made by the rigid polyurethane foam, using a tungsten-cerium cylinder as a core to adjust the weight and the location of gravity center. It was estimated that the designed 10° semiangle cone could obtain six cycles of angular motion under the JF-8A tunnel typical flow condition with $M_\infty=9.29$, $Re_\infty=1.1 \times 10^7/\text{m}$, $q_\infty=0.384\text{Kg}/\text{cm}^2$, $V_\infty=1446\text{m}/\text{s}$, and flow duration $t=25\text{ms}$.

Key words impulse type wind tunnel, model free-flight, dynamic stability, a calibration model