

# 超高速试验气流的建立与分析\*

胡宗民<sup>†</sup> 姜宗林

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 100190)

**摘要** 激波风洞是高超声速地面试验设备的主力, 包括反射型激波风洞和激波-膨胀管(风洞)。然而, 对于超高速( $>5\text{km/s}$ )流动来说, 试验气流在前者的喷管喉道上游驻止, 高总温高总焓条件给试验设备带来严重挑战, 如驻室材料毁、试验气流污染热/化学非平衡的激发与冻结等现象, 引起试验条件的不确定。激波-膨胀管的工作原理不同于反射型激波风洞, 它不需要试验气流驻止, 可以在一定程度上缓解上述问题, 提供相对稳定和洁净的高总温高总焓的试验气流。然而, 膨胀管的有效试验时间非常短, 运行条件诊断以及测量的技术难度非常大。本文利用数值分析技术, 结合部分易测试验数据, 对激波-膨胀管运行条件进行初步分析, 并对模型试验进行计算/试验比较研究。

**关键词:** 超高速, 试验状态, 激波-膨胀管, 数值分析

## 一、引言

从结构上来讲, 激波-膨胀管就是把典型激波风洞的喉道去掉, 在激波管后直接续接一段膨胀加速管。从原理上讲, 它改掉了激波风洞在Laval喷管中的定常膨胀过程, 利用了激波在加速管破膜后的非定常膨胀, 使试验气流不驻止而直接达到超高速。超高速试验气流是返回式或者星际太空飞行器(如美国的火星探测器和我国的神舟飞船等)地面试验必须的。世界上运行的激波-膨胀风洞首先由澳大利亚Queens Land大学建成, 为X-2<sup>[1]</sup>以及升级版X-3, 后来有日本的JX-1<sup>[2]</sup>, 美国CURBC最近也改进了LENS-X/LENS-XX<sup>[3]</sup>等。我国的高温气体动力学国家重点实验室也成功建造了国内首座爆轰驱动激波-膨胀管JF-16<sup>[4]</sup>, 目前已成功实现 $8\text{km/s}$ 以上的超高速试验气流。

## 二、物理问题与计算/试验互补分析

激波-膨胀管JF-16的结构及工作原理图见图1(左), 结构上主要包括爆轰驱动段、激波管段、膨胀加速段和真空罐四部分, 试验模型就安装在加速段。该膨胀管的主要实测运行参数见表1,  $V_{\text{psw}}$ 为主入射激波速度,  $V_{\text{ssw}}$ 为次入射激波速度, 它们分别由安装在激波管和膨胀管壁的电离探针测得。在如此高的气流速度下, 试验时间在微妙量级, 因此其他参数的测量非常困难, 特别是试验气流的热/化学状态更难以确定, 这给超高速模型试验带来严重不确定因素。但是电离探针所测激波速度非常可靠, 利用这些有限的的数据, 结合巧妙设计的数值模拟, 可以推演试验无法得到的参数, 从而使我们能在一定程度上对超高速试验气流的运行参数有所把握。

\*本文研究受国家自然科学基金(11142006)资助。

<sup>†</sup>报告人简介: 1970.11-, 流体力学专业, 副研究员: huzm@imech.ac.cn

激波-膨胀管的运行中存在复杂的强激波现象，例如激波后的热/化学非平衡、激波冲破膜片进入膨胀管时的超大流场梯度等，因此，对计算格式的稳定性与流场分辨能力提出了严重挑战。本文应用了鲁棒的激波捕捉格式——频散可控耗散格式（DCD）和多组分化学反应流动控制方程，实现了对超高速激波-膨胀管运行条件的分析。通过数值/试验相互比较，验证了数值分析的可靠性，见图 1（右，模型为半锥角  $15^\circ$  的尖锥，为高速相机拍摄的气流自发光照片）。数值模拟简化模型见图 1（左）中的虚线框内部分，包括部分激波管段和整个膨胀加速段，而驱动段与真空罐暂不考虑，因此主入射激波参数将作为数值模拟的输入参数。

表 1 JF-16 试验状态 1 的主要参数

试验参数	$p_1$	$P_7$	$V_{psw}$	$V_{ssw}$
实测值	30mm Hg	0.1mm Hg	4.81 km/s	8.16 km/s

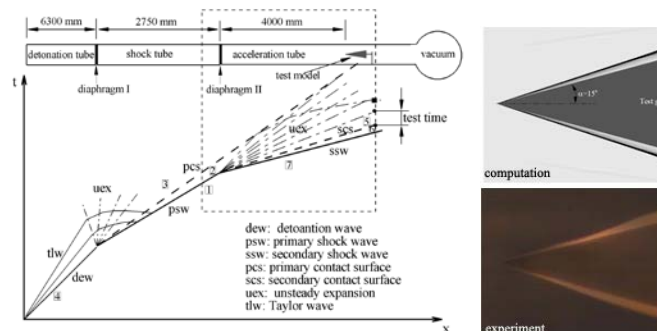


图 1 激波膨胀管结构及工作原理示意图（左）；超高速模型计算/试验对比（右）

### 三、初步结论

数值计算发现，试验气流可达到超轨道速度，约为  $8.8 \text{ km/s}$ ，这是国内首次得到如此高速的试验气流。有效试验时间约为  $60 \mu\text{s}$ ，试验气流的温度约为  $2665 \text{ K}$ ，静压约为  $0.13 \text{ atm}$ ，试验气流的成分并非预期的纯净空气，其中氧几乎全部离解为原子，氮仍保持在分子状态。这表明该设备仍存在获得更高速试验气流的潜力。

### 参 考 文 献

- 1 Morgan R. G., Stalker R. J. Double diaphragm driven expansion tube. 18th International Symposium on Shock Waves, Sendai, Japan, 1991
- 2 Sasoh A., Ohnishi K., Koremoto K., Takayama K. Operation design and performance of a free piston driven expansion tube. 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition, Reno, Nevada, AIAA paper 99-0825, January 1999
- 3 Holden M. S., Wadhams T. P., MacLean M., Mundy E. Experimental studies in the LENS I and X to evaluate real gas effects on hypervelocity vehicle performance. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, AIAA paper 2007-204, January 2007
- 4 Jiang Z. L., Gao Y. L., Zhao W. Performance Study on Detonation-driven Expansion Tube. 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Bremen, Germany, October 2009.