

超高速流动实验研究

周凯, 胡宗民, 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, 北京 100190)

摘要 超高速流动是指速度超过 5 公里/秒的流动, 由于流动具有高速高焓的特点, 模拟超高速流动的地面试验设备面临极大挑战, 目前, 激波-膨胀管(风洞)是少数具备超高速流动复现能力的地面试验设备之一。中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室(LHD), 通过将正向爆轰驱动技术和膨胀管结合在一起, 建成了可实现 8 公里/秒高品质超高速试验气流的爆轰驱动激波-膨胀管(JF-16), 并成功开展了典型模型试验。同时, 本文介绍了针对激波-膨胀管的相关数值方法, 对超高速流动条件下的尖锥模型进行了数值模拟, 数值模拟结果提供了一些试验结果难以获取的流场信息, 并很好的解释了试验中获取的流场结构照片, 体现了数值方法在高超声速流动中的辅助分析作用。

关键字 超高速, 激波-膨胀管, 数值方法

一、引言

由于驱动能力或者高温高压气源的限制, 以及设备材料的强度束缚, 在地面上完整复现真实超高速飞行的来流条件和尺度仍然是一个非常具有挑战性的课题。应用爆轰驱动技术, 中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室在 2008 年首次建成了爆轰驱动激波-膨胀管 JF-16, 实现了超轨道速度的高焓试验气流, 并通过典型模型试验对流场进行了诊断, 并进行了流场显示研究。同时, 开展了对激波-膨胀管的数值方法研究, 对典型模型在超高速流动中的激波脱体问题进行了数值模拟, 并将试验观测结果与数值模拟进行了对比分析。

二、爆轰驱动激波-膨胀管 JF-16

爆轰驱动激波-膨胀管 JF-16 主要包括四个部分, 即爆轰段、激波管段、膨胀加速段和真空罐, 如图 1 所示, 其中试验段嵌入膨胀加速段。爆轰段、激波管段和膨胀加速段之间通过两道膜片分开。爆轰段充入氢氧混合物, 激波管内充入试验气体, 膨胀加速段内一般为处于高真空度的空气, 称为加速气体。

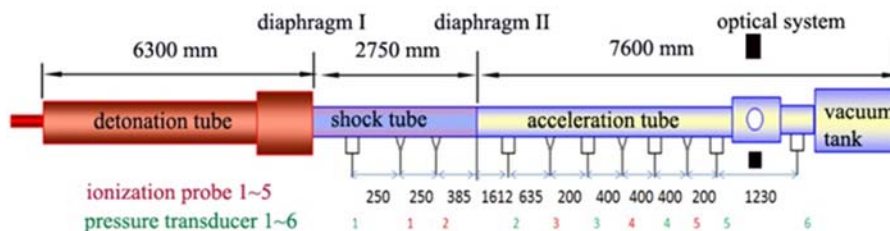


图 1 JF-16 结构简图及测点布置

三、超高速模型试验及数值辅助分析

对于激波-膨胀管的数值模拟应用了多组分 Euler 控制方程以及空气的五组分 17 基元反应模型, 空气及离解产生的原子成分的热力学参数则温度相关的多项式给出, 对 Euler 方程对流项的离散应用了频散可控耗散格式(DCD)^[1,2]。通过进行典型模型的超高速试验^[3], 我们得到了相关领域内极为少见试验结果, 图2为尖锥模型试验结果。图3为尖锥数值模拟结果。

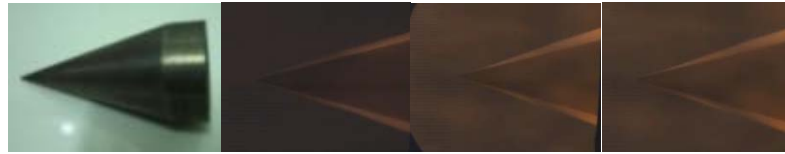


图 2 JF-16 模型试验照片($u_\infty=8.1 \text{ km/s}$)^[23]

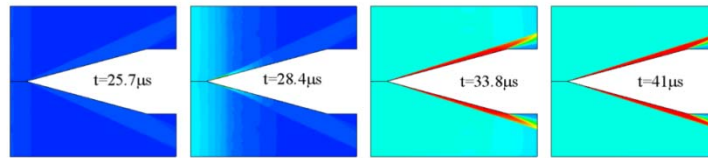


图 3 试验气流模型流场的数值密度云图

四、结论

本文介绍了爆轰驱动激波-膨胀管的建立和运行机理, 通过超高速模型试验, 在超高速流场显示技术方面取得了重大进展, 并阐述了超高速试验流场的数值方法, 对超高速流动条件下的尖锥模型进行数值模拟, 与试验结果进行对比, 指出由于加速气流密度很低, 气流自发光现象难以捕捉, 试验捕捉到的照片是试验气流下模型的流场, 数值模拟和试验结果得到的激波倾角几乎吻合。

参 考 文 献

- 1 Jiang, Z.L., Takayama, K., Chen, Y.S. Dispersion conditions for non-oscillatory shock-capturing schemes and its applications. *Comput. Fluid Dyn. J.* 2 (1995)137–150.
- 2 Jiang, Z.L. On the dispersion-controlled principles for non-oscillatory shock-capturing schemes. *Acta Mech. Sin.* 20(1) (2004) 1–15.
- 3 武博. 《强激波现象与超高速流动实验技术研究》, 博士论文, 中国科学院力学研究所, 2012. (B. Wu, Study on the interaction of strong shock wave and the hypervelocity experimental method, PhD Thesis, Institute of Mechanics, Beijing, China, (2012))