

# 爆轰驱动膨胀管 JF-16 流场诊断及喷管设计\*

周凯 胡宗民 刘云峰 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** 超高速流动是飞行器再入大气层时必须面临的物理流动环境,一般指速度超过 5 km/s 的流动,由于流动具有高焓高速的特点,模拟超高速流动的地面试验设备面临极大挑战。膨胀管(风洞)是少数几种具备超高速流动模拟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,建成了可实现最高速度 10 km/s 超高速试验气流的爆轰驱动膨胀管(JF-16)。通常膨胀管的试验时间仅为微秒量级,对传统试验测试手段提出了挑战,通过数值模拟辅助分析试验气流参数,以评估 JF-16 的性能指标。同时,为了扩大中心均匀试验流场的尺寸,LHD 对 JF-16 进行了升级改造,为其设计加工了锥形喷管,改造后 JF-16 以膨胀风洞模式运行,并对喷管流场进行了初步评估。

**关键词:** 超高速,膨胀管,数值模拟,流场参数,锥形喷管。

## 一、引言

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)在 2008 年建成了爆轰驱动膨胀管 JF-16,并通过典型模型试验对流场进行了初步诊断与流场显示研究<sup>[9-12]</sup>,目前,JF-16 已成功获得速度超过 10 km/s 的超高速试验气流<sup>[13]</sup>。

## 二、爆轰驱动膨胀管 JF-16 原理

JF-16 主要包括四个部分,即爆轰段(detonation tube,  $\Phi 105 \times 5600$  mm)、激波管(shock tube,  $\Phi 68 \times 2750$  mm)、加速段(acceleration tube,  $\Phi 68 \times 7600$  mm)和真空罐(vacuum tank),其中试验段嵌入加速段。爆轰段、激波管和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,加速段内一般为处于高真空度的空气,称为加速气体。

## 三、数值方法

对于膨胀管的数值模拟忽略了粘性和热传导,采用了多组分 Euler 方程,二维的控制方程如下:

---

\*  
参加优秀研究生论文评选。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S_c \quad (1)$$

## 四、膨胀管流场分析

采用上节介绍的数值方法,选取典型试验工况条件:  $P_4=1.5\text{Mpa}$ 、 $P_1=4000\text{Pa}$ 、 $P_5=13\text{Pa}$ ,对膨胀管流场进行数值模拟,如图3所示。

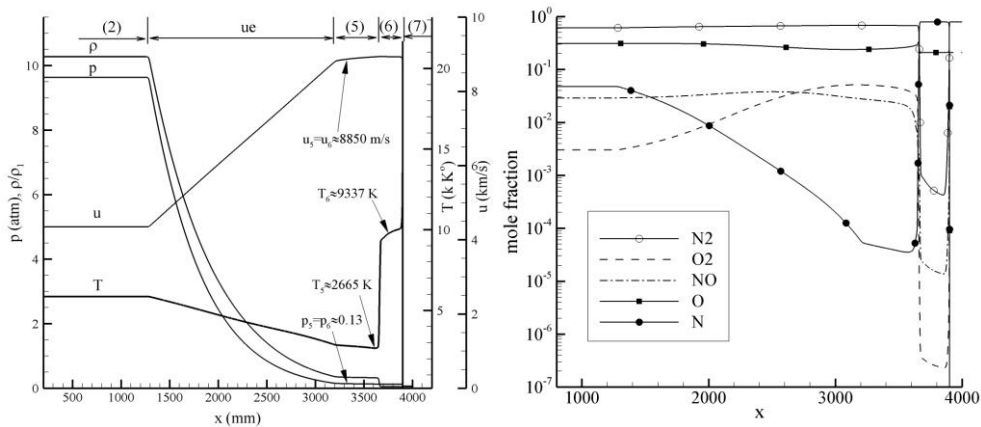


图3 加速段瞬态波系结构: (1)气流参数分布(2)化学组分分布

## 五、喷管设计和校核

喷管外形尺寸确定之后,需要对内部流场进行全面评估,分析喷管加装后出口流场均匀情况,图5是计算得到的喷管全流场马赫数分布图。

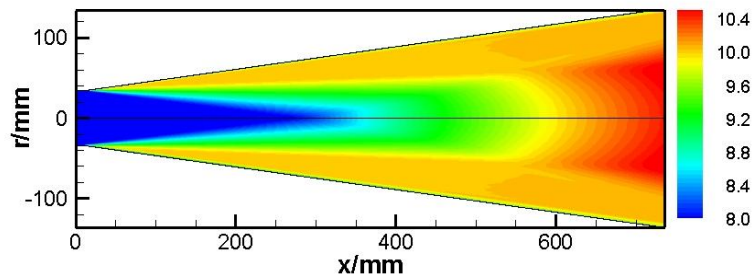


图5 喷管全流场马赫数分布图

## 六、结论

本文简单介绍了爆轰驱动膨胀管 JF-16 的运行机理、数值方法、流场分析及升级改造工作。膨胀管内强激波压缩引起波后气体温度急剧上升,导致热化学真实气体效应明显,可以显著降低波后气体温度并提高密度。试验气流的温度和化学成分与真实飞行条

件有所偏离,通过喷管定常膨胀可以进一步提高试验气流品质。采用数值模拟计算三组喷管流场结构,选择 $8^{\circ}$ 锥形喷管作为最优外形,此时喷管出口流场均匀区域直径约为140 mm,有效试验流场范围得到了明显扩大,且试验气流经过喷管膨胀加速,静温降低,马赫数增加,品质得到提升。

### 参 考 文 献

- 1 Neely A J, Morgan R G. The superorbital expansion tube concept, experiment and analysis. *Aeronautical Journal*, 1994, 98(973):97-105.
- 2 Schmisser J, Knight D, Longo J, et al. Assessment of aerothermodynamic flight prediction tools through ground and flight experimentation. RTO Technical Report, RTO-TR-AVT-136, 2011.