

文章编号: 1672-9897(2005)04-0069-05

高焓风洞中钝体近尾流红外辐射测试技术

杭建, 林贞彬, 郭大华, 林建民, 曾明, 黄德, 葛学真

(中国科学院力学研究所高温气体动力学实验室, 北京 100080)

摘要:介绍在 JF-10 氢氧爆轰驱动高焓激波风洞中开展再入流场红外辐射测量的实验技术。风洞试验状态的驻室总压为 19.6MPa, 驻室总温为 7920K。实验以球头钝锥体为试验模型, 测量其近尾流红外辐射能量通量的横向分布。测量采用插入式铽化钬多元红外成像系统, 波段范围为 2.27 ~ 6.0 μm 。试验数据呈现明显的规律性。试验结果表明: 利用这一测量技术能够提供高焓条件下有较高空间分辨率的、较为准确的红外实验数据。

关键词:氢氧爆轰驱动激波风洞; 再入流场; 红外辐射; 钝体; 尾流

中图分类号: V211.751 **文献标识码:** A

Experimental technique on infrared radiation in wake of blunt cone in high-enthalpy tunnel

HANG Jian, LIN Zhen-bin, GUO Da-hua, LIN Jian-min,

ZENG Ming, HUANG De, GE Xue-zhen

(LHD Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: This paper mainly introduces the experimental technique of infrared radiation from 2.27 to 6.0 μm in wake of blunt cone acting as reentry model in JF-10 oxygen hydrogen detonation driven shock tunnel. The total pressure P_0 is 19.6MPa. The total temperature T_0 is 7920K. The result shows obvious regularity, proving that, this technique can provide experimental infrared radiation data which is correct enough and have space distinguishing power.

Key words: oxygen hydrogen detonation driven shock tunnel; reentry flow; infrared radiation; blunt cone; wake

0 引言

当飞行器再入大气层时, 空气经过头部激波压缩产生高温, 高温引发一系列复杂的物理化学过程, 使再入流场中气体组分与常温空气有很大不同。某些组分在高温条件下产生强烈的辐射。研究再入流场中尾流红外辐射的规律, 在学术与工程应用上都有重要意义。

开展这方面实验研究需要高焓地面设备。以前的实验研究主要在弹道靶中进行^[1,2]。由于弹道靶

只能使用小尺寸简单模型, 红外测量的空间分辨率难以提高, 因而所能提供的实验数据是有限的, 不能满足深入的机理研究与计算程序验证的要求。这些年来, 经过技术人员的不断努力, 中科院力学所氢氧爆轰驱动高焓激波风洞取得了很大进展。它不仅能模拟再入问题需要的高焓高速飞行环境, 而且实验气流有很宽的均匀区, 可采用外形复杂的有较大尺寸的再入模型。的研究目的在于发展一种适用于该风洞工作环境, 又有足够高的空间分辨率的红外测试技术。同时以钝体为再入模型对近尾流红外特性的分布规

• 收稿日期: 2004-12-07; 修订日期: 2005-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目, 项目批准号: 10472125

作者简介: 杭建(1980-), 男, 山东德州人, 硕士。研究方向: 再入光电特性实验研究。

律进行初步的实验探索。

1 JF-10 氢氧爆轰驱动激波风洞

JF-10 爆轰驱动激波风洞采用氢氧爆轰和前向驱动方式获得高总焓的实验气流。经过技术人员的不懈改进^[3-4],实验气流的品质也不断提高。风洞结构如图1所示。

这项实验采用直径11mm的喉道。喷管呈锥形,

其出口直径为500mm。该风洞已彻底排除了有机化合物膜片,采用金属破膜技术,以保证获得干净的气流。风洞驱动段氢氧混合气体初始压力3.0MPa,氢氧比例是4:1;被驱动段气体初始压力11kPa。风洞驻室总压为19.6MPa,驻室总温为7920K。驻室压力(P5)典型信号、实验段皮托压力典型信号及其径向分布分别表示在图2~4。皮托压力分布测量表明,自由流均匀区直径超过400mm。

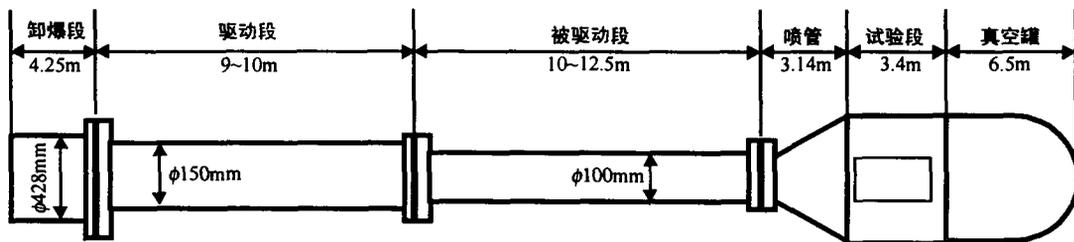


图1 风洞结构示意图
Fig.1 Structure of tunnel

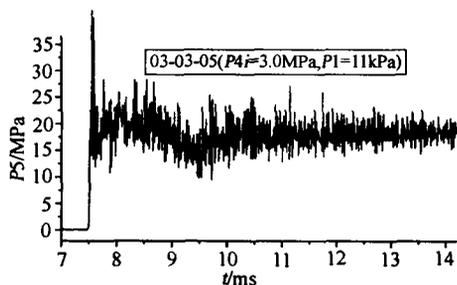


图2 典型的P5信号
Fig.2 Signal of P5

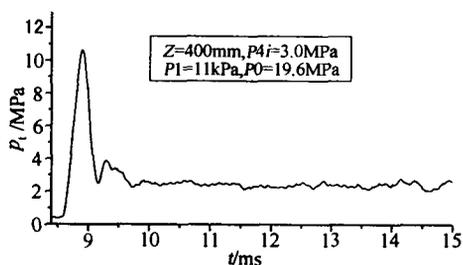


图3 典型的实验段皮托压力信号
Fig.3 Signal of Pt in test domain

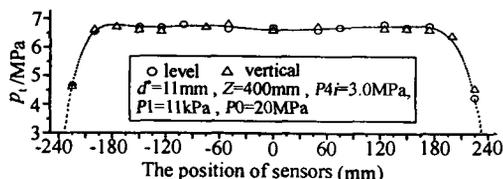


图4 实验段皮托压力空间分布图
Fig.4 Distribution of Pt in test domain

2 实验技术和设备

这项测试技术以伏安型探测器对红外辐射的光电转换为基础,建立“插入式碲化铋多元红外成像系统”。按功能可分为导流片、导光光路、红外探测器以及放大采集设备4个部分组成。其工作原理如图5所示。

导流片位于这个测试系统的最前端,它设计成扁平流线型的半圆形小薄片,插入风洞实验段,刚好伸过自由流的边沿。小薄片沿气流方向的坡度小于当地的马赫角,其位置尽可能远离被测的对象。导流片的对称面内隐藏着一道狭缝,用于接收光线。导流片后面连接一个四周屏蔽且表面发黑的光通道。光通道内部固定着氟化钙光路,它将辐射引导出风洞实验段以外,并成像在红外探测器之上。探测器是30个伏安型碲化铋探测单元构成的一维阵列。其作用是将接收到的红外辐射能量转化为电信号,其照片和光谱特性如图6所示。探测器响应时间小于1μs,敏感的波段范围为2.272~6.0μm。实验时利用液氮提供77K的低温工作环境。每个探测单元面积为0.165mm×0.145mm,间隔0.015mm。这项研究中的每次风洞实验可同时提供6#~24#双数号单元的十个数据。光学放大倍数是0.163。在这样的实验安排下,测量到的物理量是单位时间内到达某一探测单元的辐射能量;它是被测气体中沿着一根微光柱的气体辐射强度的积分,而微光柱的截面积为0.900mm²。

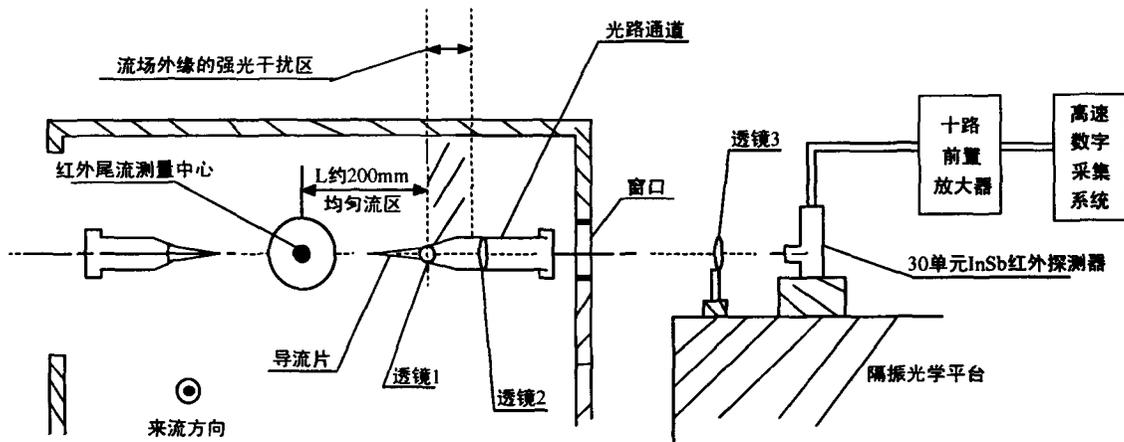


图 5 红外阵列成像系统

Fig.5 The system of measuring infrared radiation

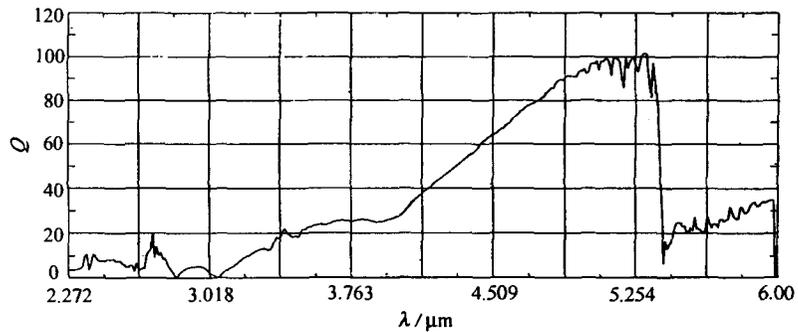


图 6 InSb 红外探测器及其光谱特性

Fig.6 Sketch of InSb infrared detectors and its spectrum characteristics

探测器后接 10 路前置放大器,它除了把信号放大到适当的幅度,更重要的是实现电流到电压的变换,使探测到的能量与输出电压之间从强对数关系转变成线性关系。放大后的信号最后由高速数字采集系统采集并处理。

3 探测系统的标定

探测系统在实验之前进行原位标定,标定时的情況如图 7 所示。标定时黑体炉出口置于风洞中央对称面内,代替尾流中被测气体作为红外的辐射源。辐射源的强度由黑体辐射的普朗克公式获得,这与厂家的做法一致。但是在我们的工作中还要计入频率响应的影响、光路的影响、探测单元(相对于光轴的)偏位移的影响。

由普朗克公式知,波长为 λ 和温度为 T 的黑体

辐射强度是
$$B_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1)} \quad (1)$$



图 7 红外阵列成像系统的标定

Fig.7 Calibration of the measuring system

某一探测单元接收到的辐射热流量的单色强度为

$$dI = 37.58Af(\lambda) B_{\lambda} \cos\beta \frac{d\sigma}{L^2} d\lambda \quad (2)$$

其中 A 为探测单元的面积, 37.58 是光学放大倍数平方的倒数, $f(\lambda)$ 为探测器频谱响应函数, $\frac{d\sigma}{L^2}$ 是立体角, $d\sigma$ 是透镜 1 的感光面积, $\cos\beta$ 近似取 1。将(1)式带入(2)式, 并对(2)式数值积分, 可求出 I , 单位为 W 。由之确定响应率, 单位为 W/V 。

黑体标定首先提供中心探测单元的响应率, 如图 8 所示; 在此基础上给出别的单元与中心单元响应率之比, 如图 9 所示。从图上可以看出它接近于高斯分布。

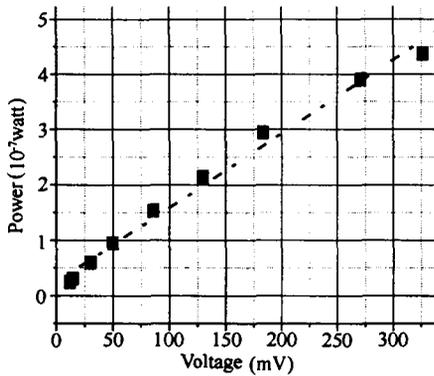


图 8 光轴单元信号与黑体炉被测辐射的关系
Fig.8 Relation of output(mv) and Power

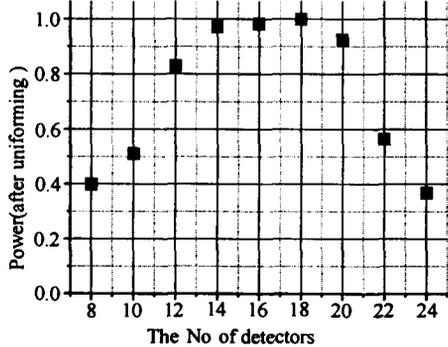


图 9 均匀光下各单元信号与偏位移的关系
Fig.9 Relation of output and detector's location

原位标定和风洞试验时测试系统的实验安排是一样的, 这保证了各种影响因素(包括放大器放大倍数、灵敏度、各单元光路采光效率、 CaF_2 玻璃对辐射的吸收、空气中 CO_2 的辐射吸收等等)在标定中都已考虑在内。原位标定之后, 把各种因数的具体数据代入反推出厂指标, 与厂家提供的响应率数据相比是一致的。

4 风洞实验及其结果

风洞试验采用的气动模型为硬铝制作的球头钝锥如图 10 所示。球头半径与底部半径之比为 0.514, 锥体前部直径与底部半径之比是 1.071。在模型锥面的近尾流中测量红外辐射时, 被测剖面与模型底部的距离为底部半径的 4.286 倍。实验过程中测试系统位置固定不变, 始终保持标定时状况。上下移动模型位置获得该剖面不同位置的红外数据, 多炮测量可以获得该剖面详细红外特性分布规律。

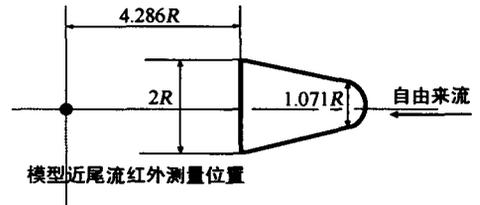


图 10 实验模型和红外测点分布
Fig.10 Model and measuring location

图 11 是实验中得到的红外辐射强度相对空间分布。其中横坐标 r 为剖面上测点到尾流中心轴线的距离。纵坐标为归一化后的测点被测辐射功率。

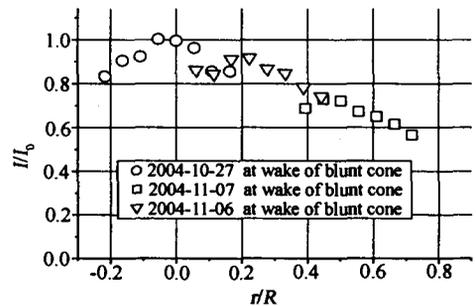


图 11 模型在 C 处(尾流)的红外辐射强度相对空间分布
Fig.11 Relation of location measured and its power in test

由图 11 可以看出, 近尾流红外辐射的空间分布, 在尾流中心附近区域的最大。在 $r/R = 0 \sim 0.7$ 之间的区域, 红外辐射强度随着到径向距离的增大而减小。

5 实验结论

- (1) 氢氧爆轰驱动激波风洞适合开展再入红外辐射特性的实验研究;
- (2) 该实验技术可以在氢氧爆轰驱动激波风洞测量得到有较高空间分辨率的红外数据;

(3) 近尾流被测位置红外辐射的变化趋势,核心辐射较强,两边辐射逐渐减弱。

致谢:感谢俞鸿儒院士对这项工作的大力支持,他在高焓爆轰驱动领域成功的开拓是这项研究的前提条件。感谢张志成研究员在红外测试排除风洞自由流边界干扰方面的深刻见解,这对于实验成功是非常重要的。感谢瞿章华教授在粘性相互作用方面的深入研究,他的研究对于我们深入理解高焓流动自由流特性是不可缺少的。感谢葛学真研究员在红外测试方面的丰富经验,这为获取可靠的实验数据提供了坚实的基础。

参考文献:

- [1] C. F. HANSEN, R. I. PRIMICH. Measurement and analysis of optical and microwave observable in flow about hypersonic models [J]. AIAA, 63-204, 1963.
- [2] 葛学真, 赵成修, 竺乃宜, 张正信. 弹道靶红外辐射测量 [J]. 流体力学实验与测量, 2002, 16(1): 74 ~ 79.
- [3] 高冰, 杭建, 林贞彬, 郭大华等. 高温真实气体效应中催化效应对气动热影响的实验探索 [J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(2): 55 ~ 58.
- [4] 林贞彬, 郭大华等. JF-10 氢氧爆轰驱动激波风洞自由流的测量和诊断技术 [J]. 流体力学实验与测量, 2000, 14(3): 12 ~ 17.

