

文章编号: 1672-9897(2010)05-0079-04

高焓风洞中带翼钝锥体尾流 电子密度的测量与分析

廖 光, 林贞彬, 郭大华, 林建民

(中科院力学研究所高温气体动力学实验室, 北京 100190)

摘要:报道了在爆轰驱动高焓激波风洞中开展带尾翼钝锥体电子密度测试的相关研究工作进展。试验气流为 4km/s, 密度为 0.001kg/m³。诊断尾翼对尾流的影响时, 为不影响流场并获得足够的空间分辨率采用针状静电探针; 实验结果给出带尾翼模型对尾流电子密度影响的定量结果及受影响的空间区域。

关键词:高焓激波风洞; 爆轰驱动; 钝锥体; 电子密度; 尾流

中图分类号: V211.751 文献标识码: A

Measurement and diagnosis of the wake electron density in high enthalpy wind tunnel

LIAO Guang, LIN Zhebin, GUO Dahu, LIN Jianmin

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: It is reported that the electron density measurement in the flow field of blunt cone body which modeled in detonation-driven high enthalpy shock tunnel. The test flow velocity is 4km per second and the flow density is 0.001kg per cubic meter. In order to obtain high resolution data, needle probe is used for the diagnosis of the wake flow of the tailed model. Results are given for the description of the wake electron density when there is a tail on the blunt cone body.

Key words: high enthalpy shock tunnel; detonation-driven; blunt cone body; electron density; wake

0 引 言

高超声速飞行器再入大气层时, 周围气体被强烈压缩并与飞行器表面剧烈摩擦, 使得温度变得很高, 由此导致气体部分组分离解甚至电离, 飞行器周围覆盖有发生复杂物理化学过程的等离子体。关于这种等离子体电子密度分布^[1]与流场结构的研究, 是高温真实气体效应实验研究的重要课题之一, 在有尾翼的情况下问题更加复杂。

由于尾翼尺寸较之飞行器本身小得多, 要使得尾翼存在对流场的影响能够被测出, 要求地面模拟设备不仅能产生品质较高的高超声速气流, 还要求形成的流场区域足够大。

为满足以上要求, 实际中模拟设备是中科院力学所的 JF10 爆轰驱动高焓激波风洞。采用对流场影响

较小的针状探针开展带尾翼钝锥体模型尾流中电子密度的测量工作。下面对这一基础性的工作进行介绍, 对针状探针数据的处理也进行了讨论, 最后在相关实验结果基础上对流场结构进行分析。

1 实验安排

1.1 实验设备

中科院力学所的 JF-10 爆轰驱动激波风洞(如图 1)是新型的暂冲式高焓风洞^[2]。它利用氢氧点火产生爆轰波, 由此产生的高温、高压气体作为驱动气体, 建立高总焓气流状态, 再经喷管在试验段产生高超声速气流, 用来开展飞行器再入大气层时的真实气体效应及相关课题的实验研究。风洞主体结构长约 40m, 它由爆轰段、卸爆段、被驱动段、喷管、实验段、真空容器及真空抽气机组成。根据爆轰驱动激波风洞的操

收稿日期: 2009 11 30; 修订日期: 2010 03 30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10762170, 10472125)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作需要,还有氢氧气体充气系统、液压加载和移动系统、各段管体小型真空抽气系统、点火起爆系统、与设备运行有关的压力和激波马赫数测量装置、数据采集处理系统以及膜片预成型装置等附属子系统。实验中采用半锥角 φ 锥形喷管,出口直径 500mm,试验段有效试验气流区为长 1200mm、直径 400mm 的圆柱体,有效实验时间为 7ms。风洞实际运行参数见表 1。



图 1 高焓激波风洞实验现场全景

Fig. 1 View of high enthalpy detonation driven shock tunnel

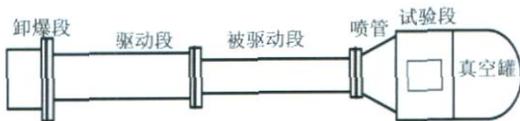


图 2 高焓激波风洞结构示意图

Fig. 2 Sketch of high enthalpy detonation driven shock tunnel

表 1 风洞运行参数表

Table 1 Parameter of shock tunnel

物理量	状态
总温 T_0 (K)	6000
总焓 H_0 (MJ/kg)	10.6
总压 P_0 (MPa)	20
喷管出口直径 d (mm)	500
皮托压力 P_t (Pa)	12500
静压 P_∞ (Pa)	115
速度 u_∞ (km/s)	4.0
密度 ρ_∞ (kg/m ³)	0.00103
温度 T_∞ (K)	340
马赫数 M_∞	11

1.2 实验模型与测点布置

实验模型是一个自行设计的小球状钝头双锥带尾翼的硬质铝制模型。模型的前锥角约为 15° , 后锥角 5° , 长度为 350mm, 底部直径为 100mm。模型设计得比较粗短, 是为了使头激波与自由流边沿相互作用后产生的干扰波不致影响近尾流测量位置的流场。模型支撑在流线型的模型支架上。后锥面上对称安装着 4 个三角形的尾翼, 分别处于垂直与水平面上。尾翼的翼根与背面也呈三角状, 翼根部长 80mm, 最厚处 7.0mm, 翼展 35mm。模型及实验测点布局示意图如图 3。

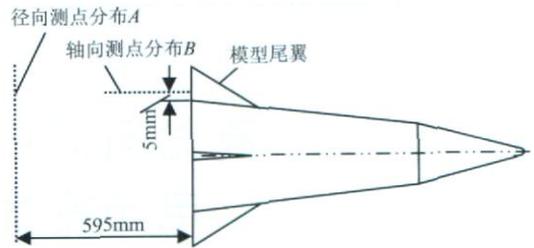


图 3 模型及实验布局

Fig. 3 Configuration of the model and the test

实验使用针状的电离探针, 在径向测量平面 A 处测量尾流径向电离特性分布; 轴向测量平面 B 研究尾翼对尾流流场结构的影响及范围。下面将叙述它们的测试方法与结果。

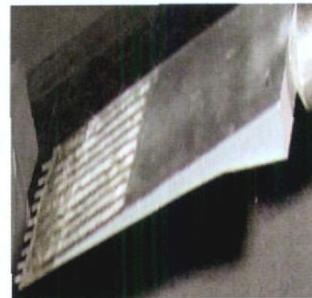


图 4 静电探针靶实物图(针状探针靶)

Fig. 4 View of probes for test

2 实验结果与分析

2.1 针状探针测量径向尾流电子密度

测量尾流径向电离特性时采用的是针状式的静电探针点阵。就是在平板前方平行安装的一组针状探针。测量尾流径向电子密度分布时, 针状探针长度为 7mm, 根部直径 0.30mm, 相邻针尖横向距离 10mm。轴向测量尾翼对正后方电子密度影响时, 使用的针状探针长度为 5mm, 根部直径 0.30mm, 针尖横向距离 5mm。探针之间以及探针与平板之间电绝缘。平板接地, 在探针上施加指定的负偏压, 用于收集实验气流中的运动电荷, 产生的电流经过各自的负载电阻获得电压信号, 送到数据采集系统记录与储存。采用相关的经验公式对数据进行处理。Boyer 等人阐述了在高超声速风洞中用平板齐平探针测量电子密度的相关结果^[3]。参考该文中涉及到的激波风洞的部分实验结果, 参照关联数据的方法, 给出如下经验公式

$$\frac{J_i \cdot (S_a \cdot Re_x)^{1/2}}{N_e \cdot e \cdot u} \approx 1.8 \left(\frac{\lambda_D}{R_p} \right)^{1/3} (-x_p)^m \quad (1)$$

这里 J_i 为探针表面单位面积离子电流; S_a 为离子的 Schmidt 数; Re_x 是探针所在平板位置的雷诺

数; N_e 为电子数密度(cm^{-3}); u 为速度(cm/s); R_p 为探针的直径(cm); λ_D 为 Debye 长度, 即 $\lambda_D = \sqrt{\epsilon_0 k T_e / (e^2 N_e)}$; k 是玻尔兹曼常数; T_e 是电子温度(K), 在本问题中它是接近于静温的; ϵ_0 是真空电介常数; x_p 为归一化探针电位, 即 $x_p = e\phi_p / k T_e$, ϕ_p 是探针表面所加的电压。

在上述经验公式中, 尚留着伏安特性曲线方次有关的参数 m , 通过实验确定。为此专门设计了一些实验, 将探针耙置于均匀流场中, 对规格相同的多路探针施加不同负偏压, 通过收集到得电信号获得其伏安特性。典型的结果见图 5, 结果表明 m 接近于 1。

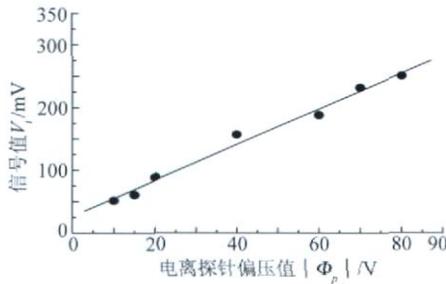


图 5 静电探针伏安特性实验曲线

Fig. 5 Experimental current voltage (CV) curve

定义无量纲电子密度为

$$N_e^* = \frac{N_e \cdot u^{1.2}}{T_e \cdot (S_a \cdot R_{ex})^{0.6}} \quad (2)$$

(1) 式中 J_i 通过实际探针电路后与测得的电压信号 V_i 关联, 代入电路及探针相关参数后结合(2)式得到以下结果

$$N_e^* = 0.735 \times 10^{14} \left(\frac{V_i}{\phi_{pf}} \right)^{1.2} \quad (3)$$

其中 f 是与电极形状有关的因子, 知道无量纲电子密度以后, 如已知流场压力、密度等相关参数, 利用(2)式可以获得电子密度绝对值 N_e 。

对于针状探针, 电极形状近似认为是细长锥, 得到 f 的表达式为

$$f = \frac{6}{7} \pi a^{\frac{2}{3}} L \quad (4)$$

这里 a 是针状电极根部直径, L 是探针的长度。在得到 f 的表达式时, 需要沿探针长度方向积分, 每一积分微元中不仅考虑电极局部表面积除以特征长度(当地直径)的 $1/3$ 次方这一因素, 还要考虑当地雷诺数的变化。具体形式为

$$f = L^{\frac{1}{2}} \int_0^L \frac{\pi a(x)}{x^{\frac{1}{2}} [a(x)]^{1/3}} dx \quad (5)$$

在上面工作的基础上, 对模型尾流电子密度的分布开展实验测量。这里测量剖面距离模型底部 595mm, 测量剖面内电离耙安放的位置如图 6 所

示, 水平放置时有 3 个不同的高度, 外加在对称面内的垂直位置, 不同位置分次进行实验。图 7 给出相关测量结果, 其中已经把各个测点按其上下左右位置换算成横坐标 r , 即图 6 中示意的测点与模型轴线的径向距离。

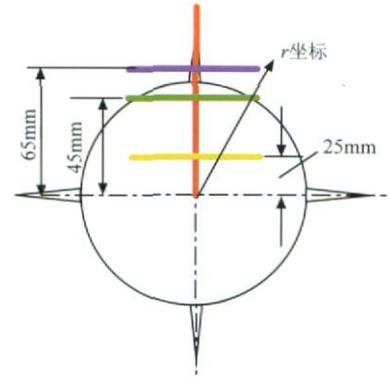


图 6 电离耙的安装位置示意图

Fig. 6 Position of the rake for ionization measurement

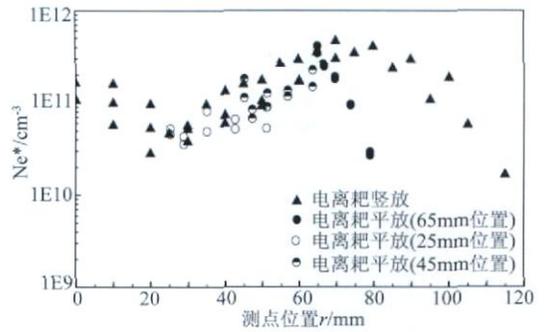


图 7 尾流电子密度变化

Fig. 7 Electron density in the wake

从图 7 中可以看到, 距离模型底部 595mm 处的尾流区域, 数据呈有规律的分布。在半径 r 不大于 70mm 的范围内电子密度基本不受尾翼影响; r 大于 70mm 小于 110mm 时, 测量结果受不受影响取决于测点的位置。电离耙平放的测量结果受尾翼影响很小, 无量纲电子密度在 r 约 70mm 处达到峰值。而竖直放置时有部分测点位置正好处于尾翼的后方, 测量结果说明尾翼的存在导致电子密度在各个位置均有不同幅度的提升。这一节的实验结果一方面说明模型尾流在没有尾翼干扰的情况下呈现有规律的对称分布。另一方面又说明尾翼对模型尾流的影响, 直至距底部近 600mm 处依然强烈。

2.2 针状探针测量尾翼后方轴向电子密度

研究尾翼对模型尾流影响从尾翼背面开始如何发展的, 以及影响区域的大小。为观测尾翼正后方电离特性随轴向与径向位置的变化情况, 使用尺寸更小、位置更密的针状探针进行诊断。实际实验中一次给出尾翼后方某个轴向位置 7 个径向位置的电离信

号。通过轴向移动电离探针靶, 得到不同轴向位置的电离信号, 相关结果见图 8。横坐标的零点为图 3 中所示的轴线测点分布 B 所在的高度, 纵坐标为无量纲电压信号。 V_i 表示 $\pm 10\text{mm}$ 和 $\pm 15\text{mm}$ 4 个横坐标位置上电压信号的平均值。在这里, 纵坐标可以衡量同一剖面上不同测点的电离特性受尾翼的影响程度。从图 8 中可以看出, 尾翼正后方电子密度不同径向位置变化非常剧烈, 但基本上集中在一个不大的区域。而且还与测量剖面与尾翼底部距离有很大关系。

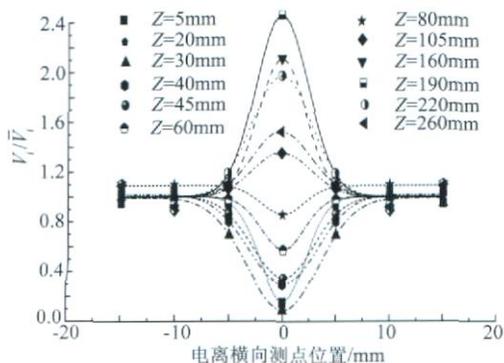


图 8 尾流流场电子密度随空间位置变化

Fig. 8 Electron density in the wake in radial and axial direction

为了更清晰地显示尾翼正后方电离状态沿轴向位置的变化情况, 图 9 中给出在尾翼正后方下游测点的电离信号随轴向距离的变化情况。结果表明影响最强烈的地方不在紧跟尾翼后面的地方, 而是在距尾翼背面约 190mm 之处。这种影响从前向后先呈上升的趋势, 以后开始下降, 但下降速度渐趋缓慢。

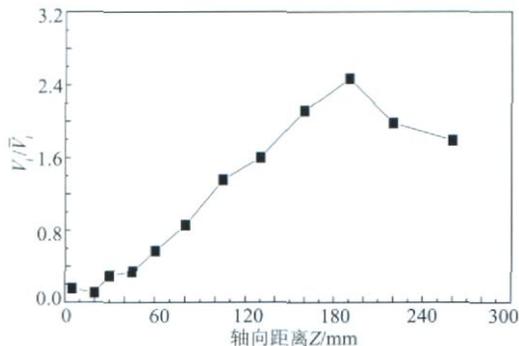


图 9 尾流电子密度随轴向位置变化曲线

Fig. 9 Electron density in the wake in axial direction

为说明这种影响确是尾翼造成的, 作了有尾翼和无尾翼对比实验。图 10 是距尾翼底部 190mm 处有尾翼与没有尾翼时电离信号的比较。其横坐标的零点为图 3 中所示的轴线测点分布 B 所在的高度。从图中可看出, 有尾翼与无尾翼电离信号在零点附近 $\pm 5\text{mm}$ 范围内有较大差异。尾翼的存在导致在这个范围内的电离信号明显上升。

综合两个方面的实验结果, 可以看出尾翼对模型尾流产生了明显的三维效应, 它使模型尾流不再是轴对称流动。

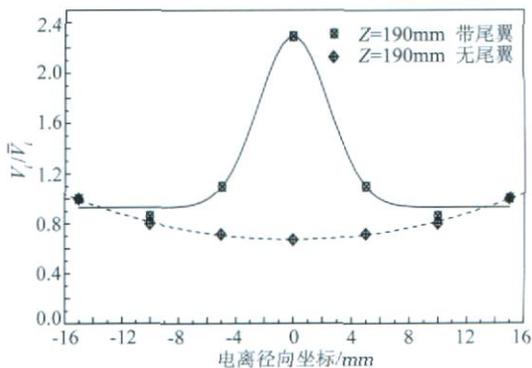


图 10 有尾翼与无尾翼电子密度的比较

Fig. 10 Tailed and tailless model electron density comparison

3 结论

(1) 爆轰驱动激波风洞与电离探针技术相结合, 能够获得高焓高速流动中有关尾流电离特性与流场结构的有用结果;

(2) 尾翼的存在导致模型近尾流流场电离特性及流场结构的明显的、且很有规律的变化, 尾翼存在的影响在流动方向波及得很远。

致 谢:

我们的研究工作得到张志成研究员的大力支持, 在此表示衷心的感谢, 他对尾流特性的许多深刻见解使我们深受启发。同时, 也非常感谢俞鸿儒院士, 他在氢氧爆轰激波风洞驱动技术方面获得的重要进展是这项实验工作的前提条件。

参考文献:

- [1] 乐嘉陵等. 再入物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] 俞鸿儒, 赵伟. 氢氧爆轰驱动激波风洞的性能[J]. 气动实验与测量控制, 1993, 7(3): 38-42.
- [3] BOYER D W, TOURYAN K J. Experimental and numerical studies of flush mounted electrostatic probes in hypersonic ionized flows[R]. AIAA, 1972, No. 72-0104.
- [4] 林贞彬, 郭大华, 竺乃宜, 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.

作者简介:



廖 光(1982), 男, 湖北洪湖市人, 博士。研究方向: 高超声速与高温气体动力学。通讯地址: 北京市北四环西路 15 号中科院力学所高温气体动力学实验室 (100190)。联系电话: 010-82544036, 13651052372, E-mail: lgdindon@126.com