

文章编号:1007-3124(2000)03-0012-06

JF-10 氢氧爆轰驱动激波风洞 自由流的测量和诊断

林贞彬, 郭大华, 竺乃宜, 葛学真, 余西龙, 杨乾锁, 姜乃波

(中国科学院力学研究所高温气体动力学研究开放实验室, 北京 100080)

摘要:针对 JF-10 氢氧爆轰驱动风洞运行的高焓高速状态, 采用吸收光谱技术、皮托压力瞬态测量技术、电离探针等的测试方法, 测量了自由流中一氧化氮的含量和离子浓度、皮托压力及其沿喷管出口半径方向的分布。并根据以上各项测量结果判断了自由流的非平衡程度。

关键词:氢氧爆轰驱动激波风洞; 吸收光谱; 一氧化氮浓度; 皮托压力; 离子浓度; 非平衡流

中图分类号: V211.751; V211.71 文献标识码: A

The measurement and diagnostics in free stream of JF-10 hydrogen oxygen detonation driven shock tunnel

LIN Zhen-bin, GUO Da-hua, ZHU Nai-yi, GE Xue-zhen,

YU Xi-long, YANG Qian-suo, JIANG Nai-bo

(Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Series advanced measurement techniques, such as absorptive spectroscopy technique, pitot pressure measurement and ion probes are applied to measure properties of free stream in JF-10 hydrogen oxygen detonation driven shock tunnel, which can run at high enthalpy condition. Concentration of nitric oxide in free stream. spatial distribution of pitot pressure at nozzle exit and ion density are presented. The nonequilibrium degree is also evaluated.

Key words: hydrogen oxygen detonation driven shock tunnel; absorptive spectroscopy tech-

收稿日期: 2000-04-07; 修订日期: 2000-06-10

基金项目: 中国科学院“九五”基础性研究项目基金(KJ951-1-202-1)及国家航天高技术基金资助项目(863-2-2)

作者简介: 林贞彬(1943-), 男, 福建福州市人, 中国科学院力学研究所研究员、博导。

nique; concentration of nitric oxide in free stream; pitot pressure; ion density; nonequilibrium flow

0 引言

航天飞行器速度的不断提高,使高速空气动力学面临新的发展机遇。当高速飞行器返回地球大气层时,飞行器外面流场中的空气温度非常高,致使空气介质的组分与属性发生强烈的变化,从而影响飞行器的气动性能^[1,2]。

为了开展有关的地面模拟实验,中国科学院力学研究所于1998年建立了氢氧爆轰驱动激波风洞。笔者探讨了该风洞自由流测量和诊断的初步结果。

1 风洞设备

JF-10 爆轰驱动激波风洞是新型的脉冲式高焓风洞,利用氢氧爆轰产生的高温、高压气体作为驱动气体,建立高总焓及高驻室压力的气流状态,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。

该风洞外观和总体配制见图1。设备主体结构长度约40m,总重量约60t。它由爆轰段、卸爆段、被驱动段、喷管、试验段、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、点火起爆系统以及设备运行有关的压力、激波马赫数测量及数据采集处理系统等。设备的结构和运行性能的详细资料见文献^[1,3,4]。

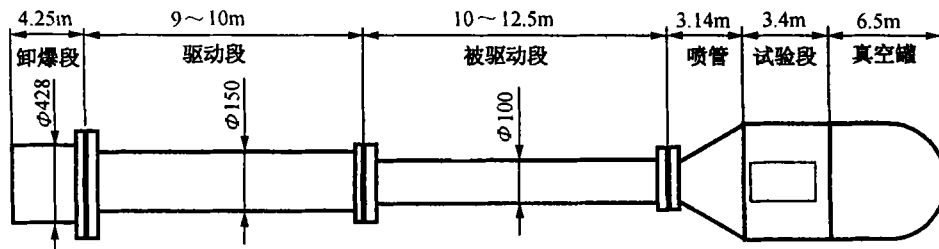


图1 JF-10 爆轰驱动风洞设备

Fig. 1 Facility of JF-10 shock tunnel with detonation driver

驱动段中试验气体被强激波压缩,可产生高焓(总温 $T_0 = 8000\text{K}$, 总压 $P_0 = 80\text{MPa}$)、高 Re 数(总压 $P_0 = 120\text{MPa}$)两种试验气流气源(在这次试验中总温 $T_0 = 8500\text{K}$, 总压 $P_0 = 21.6\text{MPa}$)。

2 实验的运行状态

实验的运行状态是在氢氧爆轰驱动激波管配套成氢氧爆轰驱动激波风洞以后,第一次对风洞运行状态进行调试,获得的缝合运行状态。使用的是前向爆轰驱动方式。

图2提供了这次实验运行状态在爆轰模式参数关系图中的位置。图3提供了驻室压力(p_s)随时间的动态响应曲线。从图3可以看到气流驻室压力较平坦的时间可以达

到 1.5ms。实验高焓激波风洞运行状态各有关参数为:氢氧混合比 = 5:1,其初始压力 = 2MPa;被驱动气体初始压力 = 0.01MPa;被驱动段激波马赫数 $M_s = 11.85$;驻室总压 = 21.6MPa,驻室总温 = 8500K,驻室总焓 = 19.7MJ/kg,驻室气体持续时间 = 1.5ms。

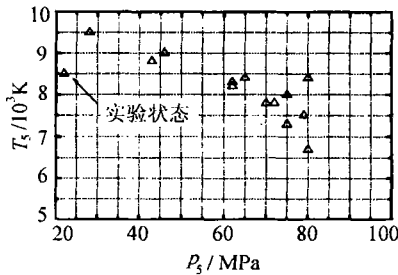


图2 前向爆轰模式的 $p_5 \sim T_5$ 关系图

Fig.2 P_5 versus T_5 of forward detonation driven mode

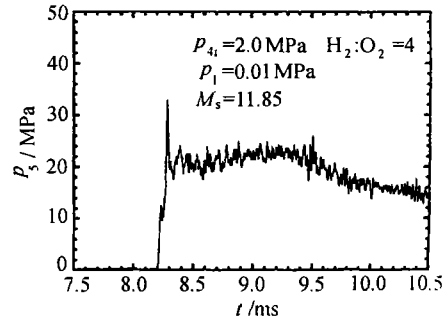


图3 缝合贮室压力 $p_5 \sim T_5$ 图

Fig.3 P_5 versus time at stagnation chamber

3 测试技术^[5~7]

在高焓激波风洞自由流中开展测量和诊断,和传统的激波风洞相比,对测试技术有了更高的要求,需要发展新的测试技术。

3.1 皮托压力测量技术^[5]

新设计的皮托压力传感器的皮托压力敏感元件采用压阻元件,其结构特点包括:(1)设置抗击屏以避免高温气体和微粒子直接冲击到敏感部件。(2)气流压力经过两次转折加载到施压腔体。(3)在真空条件下用防护液灌满传感器,防护液同时起热防护和传递载荷的作用。

3.2 吸收光谱技术^[8]

以往激波风洞总焓低,自由流接近于理想气体,一般忽略非平衡效应。可是在高总焓条件下判断自由流非平衡程度成为普遍关心的问题。而 NO 组分存在与否及其含量是其中重要标志之一,为此采用吸收光谱技术。

吸收光谱是一种非接触测量技术,是以辐射为信息传送的载体,因此不干扰流场。它与激光诱导荧光那样昂贵的技术相比,技术的难度和经济上的压力都相对减少。

吸收光谱的光源,经过各种试验最后选择 Te(碲)元素空心灯的两条谱线,即 214nm(称为 Te(I))和 225.9nm(称为 Te(II))。Te 的 214nm 谱线实际上由 214.72 nm 和 214.28nm 两条非常接近的发射谱线

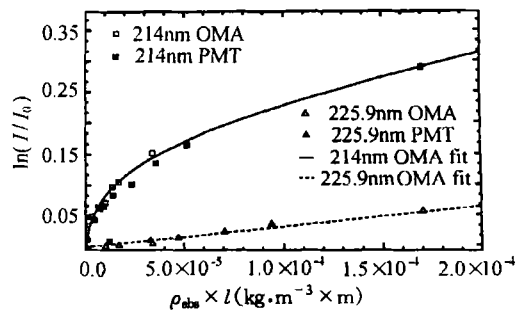


图4 透射光强随 $\rho_{\text{abs}} l$ 的变化曲线

Fig.4 The curve of transmittance light intensity versus $\rho_{\text{abs}} l$

构成。在低 NO 含量时前者在吸收中起主要作用。与 Te 灯谱线对应的分别有 NO γ 带

$P_{21} + Q_{11}$ (13.5)、 $P_{21} + Q_{11}$ (23.5) 和 $P_{21} + Q_{12}$ (17.5) 谱线参与吸收。图 4 为静标曲线中 ρ_{NO} 在 $2.32 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ 以下时的静标结果。它表明对低含量的 NO, 这两条谱线吸收特性差别非常大。NO 对 Te(I) 吸收非常敏感, 而对 Te(II) 的吸收灵敏度要低一个量级。这两条谱线吸收强度的悬殊为我们在风洞自由流中判断 NO 微含量提供了依据。将用来判断高焓风洞自由流中 NO 的微含量。

3.3 电离特性诊断技术^[9]

以往激波风洞自由流接近于理想气体流, 可忽略电离效应, 因此也不对它的电离特性进行诊断。在高焓风洞条件下, 自由流是从驻室高温高压的平衡气体膨胀而来, 其电离特性需要量级的诊断, 以此作为判断实验气流的非平衡程度的手段之一。

为此研制了针状电离探针传感器, 用于诊断电离特性。它从小钝锥侧部向前迎来流方向伸出约 30mm 长的纤细探针, 探针与小钝锥体之间互相绝缘, 并加以稳定的直流电压。探针接触电离气体的瞬间时刻导通, 以诊断电离的程度。

4 自由流的测量诊断的初步结果

4.1 皮托压力

皮托压力传感器安装在一个半径为 9.5mm 球头圆柱体正前方。皮托压力测量点距喷管出口 650mm, 皮托压力典型曲线见图 5。从曲线可以看到经过短暂的频响动态过程之后, 曲线均趋于较为稳定的数值。从曲线开始响应算起加上以后稳定的区间, 可用气流持续时间约 1.5ms, 这与驻室压力曲线大体吻合。

6 个皮托压力传感器安装在皮托耙上同时进行测量。测量初步结果表明, 在 600mm 区域内流场大体上是均匀的。喷管出口直径是 860mm, 均匀区约占喷管出口直径的 70%, 见图 6。

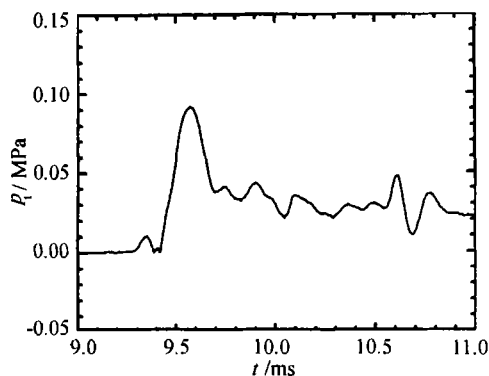


图 5 皮托压力随时间的变化

Fig.5 Measured pitot pressure versus time

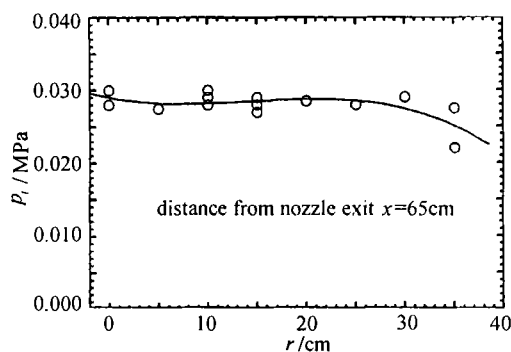


图 6 喷管出口自由流皮托压力沿喷管半径方向的变化

Fig.6 Spatial distribution of pitot pressure at nozzle exit

4.2 吸收光谱的诊断结果

图 7 提供了使用 OMA(进口的多通道光学分析仪)现场拍摄的光谱相对强度分布。其中右边谱峰波长为 225.9nm, 在标定中已知它对 NO 吸收不敏感, 左边谱峰波长 214nm 在 NO 含量不高时对微量 NO 非常敏感。图 7 中实线是实验以前拍摄的, 虚线是

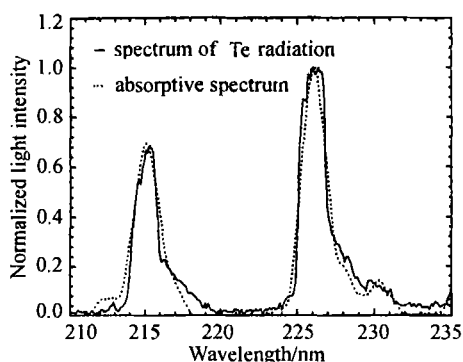


图7 Te发射光谱和自由流一氧化氮的吸收光谱(激波风洞实验)

Fig.7 Spectrum of Te HCL and absorptive spectrum of nitric oxide(shock tunnel operation)

处。探测结果表明自由流中电离信号约为尾流的1/20。根据该锥体尾流中底部已知的电子密度推算^[9],自由流电子密度小于 1×10^{10} 电子/cm³。

把曝光时间选在皮托压力稳定区域 $400\mu\text{s}$ 中在实验气流透射后拍摄的。两条曲线已分别用各自右峰值归一化。所以两根曲线左峰峰高的变化与NO吸收有关,综合吸收光谱的静标、动标与风洞结果表明NO含量的浓度应在 2.0×10^{14} 个分子/cm³左右。

4.3 电离特性的诊断结果

图8为自由流与尾流中电离特性的诊断结果。右图是针状电离传感器在自由流中输出信号,已经放大30倍。左图是同样的传感器在半锥角 10° ,长150mm的小钝锥尾流中输出信号,钝锥底部直径约为50mm。尾流测量点在底部距后端约2倍底部直径

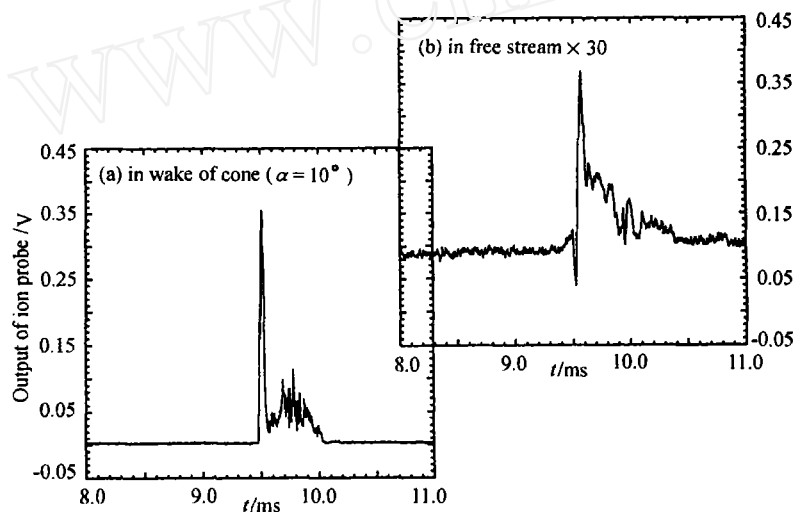


图8 自由流和锥体尾流中电离探针输出的比较

Fig.8 Output signal of ion probe

以上两种独立的测量诊断结果倾向于说明自由流中NO组分和电子含量甚微,自由流接近于准平衡状态。NO和电子的存在对今后的风洞实验应当不致产生显著的影响。

上述测试和诊断结果是初步的,今后在测试诊断手段和对流动的认识上都有待进一步开展研究工作。

致谢:林建民、李仲发、谷笏华三位副研究员和赵伟博士在设备配套、状态调试和风洞运行中做出富有成效的贡献。本实验室的技术人员王杰、王书庆、张小鹏三位同志为这项研究工作付出了艰辛的劳动。在此均表示由衷的感谢。

参考文献:

- [1] 俞鸿儒,林建民,赵伟,等. 真实气体效应实验研究(863-2-6-3-11)项目研制报告(一). 中国科学院力学研究所激波管激波风洞实验室爆轰驱动激波风洞课题组,1998.
- [2] 林贞彬,郭大华. 高温真实气体效应及其在航天高技术发展中的作用. 高温非平衡流动及其在重大工程中的应用前景,1996年夏季高级研讨会文集.
- [3] 俞鸿儒,林建民,赵伟,等. 真实气体效应实验研究(863-2-6-3-11)项目研制报告(二). 中国科学院力学研究所激波管激波风洞实验室爆轰驱动激波风洞课题组,1998.
- [4] 俞鸿儒,林建民,赵伟,等. 真实气体效应实验研究.(863-2-6-3-11)项目研制报告(三). 中国科学院力学研究所激波管激波风洞实验室爆轰驱动激波风洞课题组,1998.
- [5] 林贞彬,郭大华. 高温真实气体效应实验研究的方案论证.(YB)863-2-6-96.
- [6] 林贞彬,郭大华. 真实气体效应的测量与诊断. 高温气体动力学研究与发展,1997年夏季高级研讨会文集.
- [7] 林贞彬,郭大华. 关于高温真实气体效应的物理背景与研究方法. 863-2-6学术讨论会,1996.
- [8] 林贞彬,葛学真,郭大华,等. 一氧化氮吸收光谱动态测量技术研究. 中国科学院力学研究所,IMCAS STR-98008,1998.
- [9] 竺乃宜,李学芬. 低电子密度诊断技术研究. 气动实验与测量控制,1996,10(2):24~28.

(上接第11页)

参考文献:

- [1] STEFANICK T. The nonacoustic detection of submarine. *Scientific American*. 1988,258.
- [2] MILES J W. Internal waves generated by a horizontally moving source, *Geoph. Fluid Dynamics*,1971,2:63~87.
- [3] KELLER J B,MUNCK W H. Internal wave wakes of a body moving production in a stratified fluid, *Wave Motion*, 1981,3:1425~1431.
- [4] ROBNEY H F. The generation of internal waves by a towed sphere and its wake in a thermocline, *Phys. Fluids*,1997, 9(11):3353~3367.
- [5] 王日新. 分层流体中物体兴波特性的理论分析和数值计算方法研究:[博士学位论文]. 天津大学,1997.