

# 若干特种测试技术在高超声速流中的应用

林贞彬 竺乃宜 葛学真 余西龙 郭大华

中国科学院力学研究所，北京 100080

**摘要** 本文结合力学所高温气体动力学开放实验室的工作和国外动态讨论若干特种测试技术在高超声速流中的应用。报告强调这类技术对高焓流动实验研究的重要性，描述其基本工作原理和实验方案，并通过实例展望其发展趋势。

**关键词** 高焓流动；高温真实气体效应；平面激光荧光技术；电子束荧光技术；吸收光谱技术

**中图分类号**

## 0、真实气体效应需要新的测试技术

随着战略武器的不断改进，新一代飞行器再入大气层时的速度将大大提高，飞行器周围流场温度可高达几千至上万度。高温引发空气组分的解离、电离等化学反应，导致气流组分的变化和物性参数的改变，从而影响飞行器特性。即所谓“高温真实气体效应”。研究这种效应对气动力、气动热和气动物理性能的影响，为新一代弹头及航天飞行器的设计提供准确的依据是非常重要的。

为了开展高温真实气体效应研究并给我国新一代航天飞行器的研制提供相应的地面模拟设备，在俞鸿儒院士主持下，中科院力学所研制成功 JF-10 爆轰驱动激波风洞，这是一座新型的脉冲式高焓风洞，它利用氢氧爆轰波产生的高温、高压气体为驱动气体，建立高总焓及高驻室压力的气流状态。这座风洞还在不断优化。

现在当我们讨论高焓风洞中的实验研究时，事实上已经踏进了一个新的研究领域。通常一谈到高超声速流动，就会想到高马赫数；而当马赫数趋于无限时，流场趋于某一极限状态。这种想法会过分低估了空气动力学在航天领域的重要性。其实这种观念只有飞行速度在 2 公里 / 秒以下时才近似成立。真实气体效应与速度绝对值（或总焓）密切相关，当速度越来越大时，介质组分与特性并不趋于某个极限状态。相反，它卷入越来越多化学与物理的变化。正因为如此，我们需要通过实验探索新现象、了解新规律；也正因为如此，我们需要新型的风洞、新的实验方法以及新的测试手段。

## 1、几种主要测试技术及其特点

在本文中，我们把可能用于高焓风洞的物理化学变化的测量手段列在特种测试手段的

名下。它与非接触测量技术虽然有共通之处，但是从高焓风洞实验的角度看问题。它们的优点不单是“非接触”。

下表引自 1992 年 C.Dankert 等人的文章，列入了当时几种主要的测试技术，至今还有参考价值。其中我们已经考虑到这几年发展情况略有修改，如把电子束荧光技术列到激光诱导荧光之后。下列的叙述也主要以这几方面为主。

表 1 几种非接触测量技术的概况

测量技术	流动特性	空间分辨率能力	时间分辨率	实验室经验	风洞经验	飞行经验	期望
激光诱导荧光	密度，速度，平动温度，转动温度，振动温度	点，一维，二维，三维*	高，脉冲工作	广泛	中等	无	风洞更多使用，以验证 CFD
电子束荧光技术	密度，速度，平动温度，转动温度，振动温度	点，一维，二维	高，连续工作，脉冲工作**	广泛	有些	8 次飞行	需要发展，将在几年内提供飞行实验
激光吸收光谱	密度，速度，平动温度，转动温度，振动温度	沿光程	中，连续工作	中等	有些	无	初步用于内流
相干反斯托克斯拉曼光谱 (CARS)	密度，速度，平动温度，转动温度，振动温度	点	高，连续工作	中等	有些	无	进一步发展，风洞使用高密度情况
激光瑞利散射光谱	密度，速度，平动温度，	点，一维，二维	高，连续工作	有些	很少	无	风洞使用高密度情况
激光拉曼散射光谱	密度	点	高，连续工作	很少	无	无	风洞使用高密度情况

\* 三维是本文作者加的，是指平面激光荧光。

\*\* 脉冲工作是本文作者加的，是指使用新型的脉冲式强电流电子枪。

在这里我们把激光荧光、电子束荧光和吸收光谱等放在一起讨论，因为它们有共同特点，如：

1、都具有诊断测量密度、组分浓度、速度、温度（平动 / 转动温度、振动温度）的能力或潜力。这在高焓实验研究中是非常重要的。

- 2、直接透露出来的都是微观过程的信息，正是我们研究化学反应流中所缺的。
- 3、以辐射作为信息的载体，都是非接触测量手段。
- 4、可以用在热 / 化学非平衡流动中使用。
- 5、时间响应极快，在工作时间很短的风洞中（脉冲式高焓风洞正是这种情况）也能获得大量的数据。
- 6、有的还可以作为高超声速的流场显示手段。

从上述特点可以说明这些诊断测量手段在研究真实气体效应是非常必要的，非常适合于高焓风洞。但是也不能希望用一种手段就能实现各种参数的测量，不同的测试手段之间需要相互配合、相互验证、取长补短。

C. Danert 等人的文章中还给出另一张图（即图 1），说明不同密度区域各种技术的难易程度是不同的。好在在我们所需要的密度范围，大多数技术是能够实现的。图中唯一的例外是电子束荧光技术。但是它的最新发展有可能弥补这一不足。

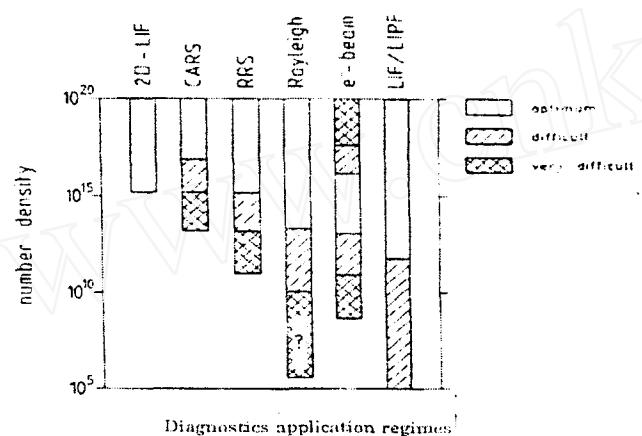


图 1 不同诊断方法的使用范围

## 2、测量的物理基础：分子的能级跃迁

在测量中我们常常碰到双原子分子，这里我们即以双原子分子为例讨论这些测量手段的物理基础。从量子力学我们获得如下的知识：

- 1、分子有四种自由度的运动：分子的平动、转动、振动以及外层电子的运动与本问题有关。分子所处的微观状态相应的能量是这四种能量之和。
- 2、后三种能量都不是连续变化的，而是分立的，各有各的量子数。

$$T = T_e + G + F$$

- 3、当一个分子吸收能量时从低能态跃迁到高能态；相反，从高能量跃迁到低能态时发

出能量(辐射)。在这个过程中分子吸收或发射的能量等于上下能级之间的能量差。即

$$\Delta T = (Te_1 - Te_L) + (G_1 - G_2) + (F_1 - F_2)$$

所以这能量差 $\Delta T$ 也是分立的,与上、下能级的各量子数变化有关。

4、辐射光的波数与能量成正比,比例系数只与光速及普朗特常数有关。

5、各量子数的变化有一定规则,叫选择定则。

6、上述能量关系与分子结构参数有关,所以分子吸收和发出的辐射能的谱线序列对每种分子都是特定的。辐射能的波长及其强度都是特定的。

基于上述各点,我们可以用激光或电子束穿过气体介质让分子吸收,从而把分子激发到高能态,再让他们自发地跃迁到低能态,测量其特定波长的辐射强度就可以诊断某种分子的组分浓度。这分别是激光荧光与电子束荧光技术的物理基础。我们也可以用特定波长的辐射让分子吸收,测量其吸收的能力,由此诊断该种分子的组分浓度,这就是吸收光谱技术的物理基础,如果把同一种技术用在同一种气体介质的两条谱线上,那么这两个发射或吸收强度之比含有一个因子 $Exp\left[-\frac{\Delta E}{kT}\right]$ 。其中 $\Delta E$ 是两条谱线之间的能量差。这就是它们测温度技术的物理基础。其中 $k$ 是玻尔兹曼常数, $T$ 是温度。两条谱线差别在于转动量子数,测到的是转动温度。同理还有振动温度和电子温度。测速度的方法有的利用多普勒效应,有的利用脉冲式荧光余辉在流场中移动的速度来测量等等。

### 3、平面激光荧光技术

平面激光诱导荧光技术。其设计原理参见图2。将指定被长的片状激光脉冲射入含有特定组分的气流,被测组分分子吸收入射激光的能量向高的能级跃迁。当这些分子从高能级向低能级跃迁时发出诱导荧光。常用的激发NO的激光波长在226nm附近,而激发OH的激光波长在282nm、306nm附近。诱导荧光的强度不仅与入射激光强度有关,而且还与气流的温度、压力、被探测组分的含量有关。近几年的研究结果表明,诱导荧光强度 $S_f$ 有如下关系:

$$S_f = \frac{E_p}{A_{laser}} \cdot \frac{X_a P}{K T} \cdot f_B B g \left[ \frac{A}{A+Q} \right] \cdot C_{opt}$$

其中 $E_p$ 是入射激光脉冲的能量, $A_{laser}$ 是激光片状截面的面积, $X_a$ 是被测组分的摩尔浓度分数, $P$ 是压力, $T$ 是温度, $K$ 是玻尔兹曼常数, $f_B$ 是吸收态的玻尔兹曼分数, $B$ 是爱因斯坦系数, $g$ 是谱叠加系数, $A$ 是发射速率, $Q$ 是碰撞熄火速率, $C_{opt}$ 是光路效率常数。

当这套设备发挥流场显示功能用以显示流动整体物理图象时,测量的是各种波面和流动区域间的定量的几何关系。这时要求 $S_f$ 足够大使图象清晰。被测组分也可以是事先加入

气流的敏感的物质，除 NO 之外还有 I、Na<sup>+</sup>、OH 等。

从原理上说，知道有关常数在特定状态下的值，并且知道温度、压力和组分中的两个参数，就可以从荧光信号获得第三个参数的数值。如果已经测到气流的压力分布，我们可以在气流中注入已知含量的组分作为示踪组分，就可以诊断温度，也可以对同一气流在不同波长下做两次实验，从荧光强度之比得到温度。如果温度和压力已知，在不引入示踪组分的情况下，可以诊断反应流中生成物的组分含量。

图 2 是结合氢氧爆轰驱动高焓激波风洞说明它的系统配置。在别的气动设备上使用，虽然产生高焓高速反应流过程不相同，但这套测试设备的技术方案是类似的。

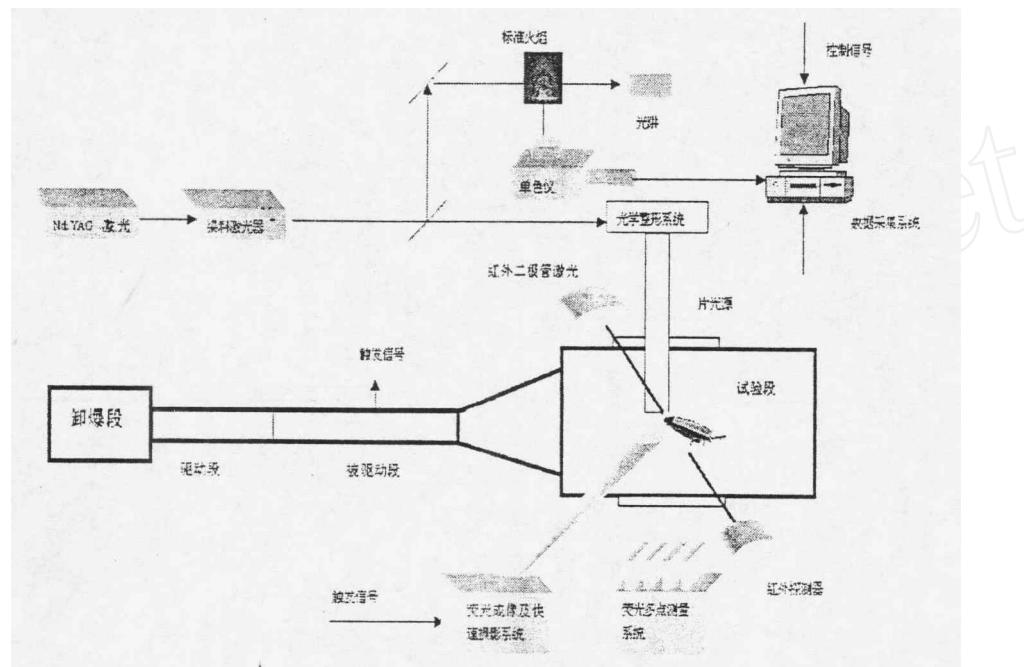


图 2 平面激光荧光技术方案示意图

#### 4、吸收光谱技术

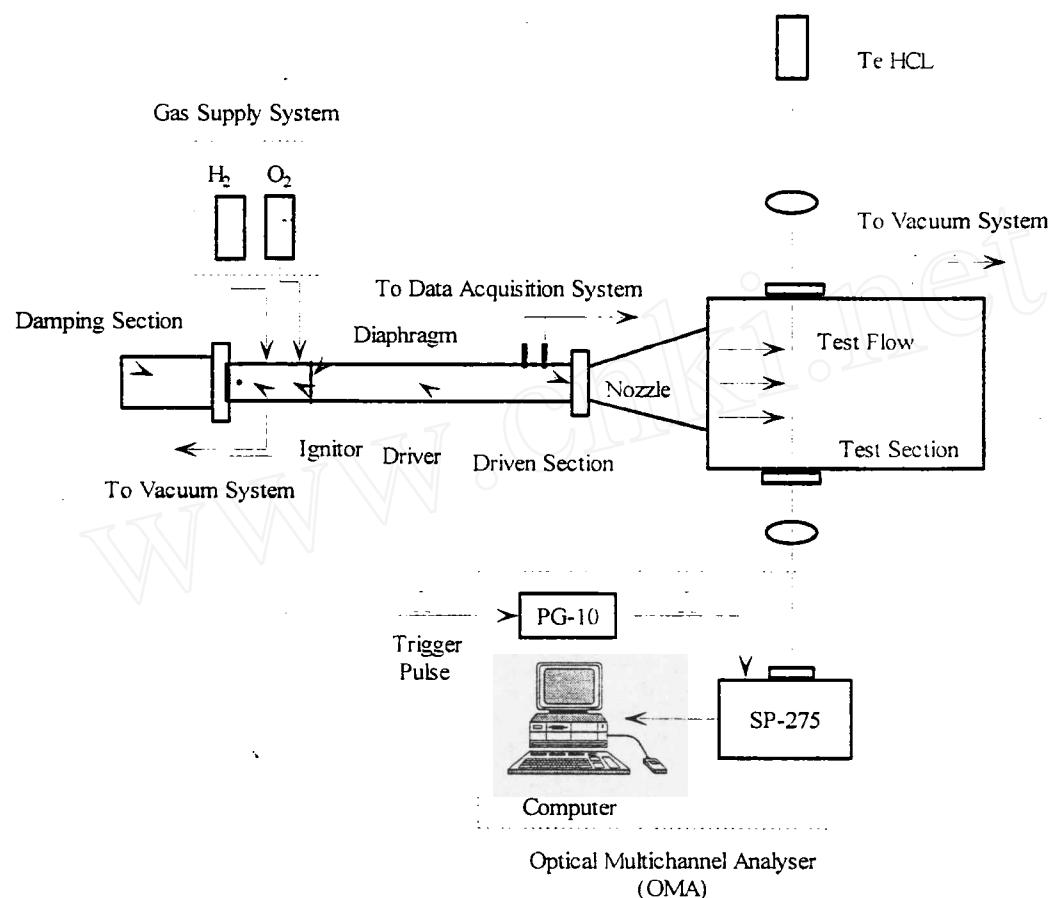
光线通过均匀气体时，光的吸收由 Beer-Lambert 定律描述

$$I_\lambda = I_\lambda^0 \exp(-k_\lambda \rho_{abs} l)$$

式中  $I_\lambda^0$  为进入介质的波长为  $\lambda$  的光束强度；  $I$  为射出介质的光束强度；  $l$  为光束在介质中经过的路径长度 (cm)；  $\rho_{abs}$  是对光束有吸收组分的密度；  $k_\lambda$  称为吸收系数，取决于浓度、介质的性质以及介质温度等，当导致吸收的分子跃迁的共振频率与光束频率相吻合时，即产生共振吸收时， $k_\lambda$  的作用就明显地显现出来，对于组元分子不同量子数之间的跃迁这

种吸收系数是由吸收线强度和吸收线型两个函数来描述，谱线的吸收系数是通过标定实验确定的。

我们在诊断氢氧爆轰驱动高焓激波风洞自由流中 NO 含量时使用了差比式的吸收光谱技术，即使用对 NO 吸收灵敏度相关悬殊的两条独立的谱线同时进行测量，其中不敏感的谱线主要用于测定微粒等遮挡影响，而敏感谱线的输出信号中既有遮挡的影响，同时包含 NO 的吸收信号，这两条谱线透射率的比值，只与 NO 的吸收有关。图 3 给出了我们在 JF-10 氢氧爆轰激波风洞中诊断一氧化氮含量测量方案示意图。

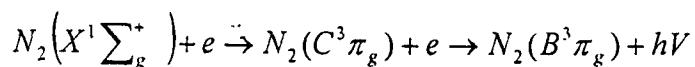


JF-10 shock tunnel and nitric oxide concentration measurement system

图 3 JF-10 氢氧爆轰激波风洞中一氧化氮诊断方案示意图

## 5、电子束荧光技术

在使用电子束荧光技术测密度时，利用电子束与实验气体的非弹性碰撞，将实验气体分子激发到了高能级，当受激发的气体分子回到低能态时要发射光子，即荧光，通过测量荧光的强度，利用荧光强度和测量气体密度的关系，获得被测气体的密度。实验气体的纯氮气荧光一般主要来自 N<sub>2</sub>(2+) 和 N<sub>2</sub>(1-) 两个谱系，在感兴趣的密度内只有 N<sub>2</sub>(2+) 是重要的。其激发的过程可以写成

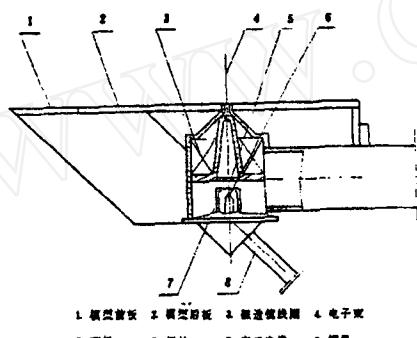


在沿着电子束方向上的一个或更多位置上用适当的光学系统和快速响应的光电检测系统来接收荧光信号。对  $N_2$  密度测量常通过滤光片收集  $N_2(2+)$  谱系中波长为 337.1nm 的荧光。它对温度变化不敏感。荧光强度与单位时间中从  $N_2(C^3 \pi u)$  能级跃迁到  $N_2(C^3 \pi g)$  能级的分子数目成正比，整个过程要遵循某种类似化学动力学规律，其中牵涉到双体碰撞，所以该跃迁分子数目与密度关系包含密度平方项，在密度稍高时标定曲线是非线性的。输出的电信号和被测气体密度之间的关系可以写成如下形式：

$$\frac{V_s}{I} = \frac{A\rho + B\rho^2}{1 + C\rho} \cdot e^{-k\theta}$$

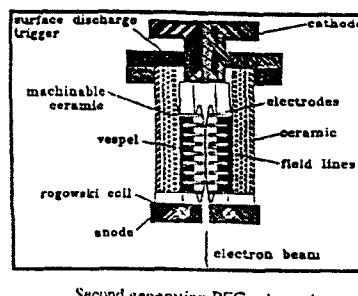
$$\theta = \int_0^y \rho dy$$

图 4 是我们实验室原先在炮风洞中测边界层密度剖面时用的内秉式的电子枪。如果有朝一日想把它用到高焰风洞的模型实验中去，还要克服一个困难，即避免在密度接近年  $10^{18}$  分子 /  $\text{cm}^3$  时电子束散开。同时还希望在这个密度范围荧光强度与密度之间呈线性关系。



electronic beam and model

图 4 连续电子束测量系统



Second generation PEG schematic.

图 5 强脉冲电子枪

E. P. Muntz 1995 年公布新型的脉冲式的电子枪，电子束持续时间只有 10ns 量级，但电流 100—1000A 量级，用的电压与我们相当，即 35—50KV。这种脉冲式电子束与气体相互作用时可以避免上述 2 个缺点。图 5 是脉冲式电子枪的结构简图。1994 年 Muntz 与 R. K. Hanson, M. S. Holden 联合发表的在 LENS 上的工作已使用这项技术。

## 6. 进展的实例

这些技术目前的主要工作是在小实验室中开展技术本身的探索，但也已陆续在高焰风洞中进行实际测量，而且也积极与数值模拟结果进行对比和验证。虽然研究工作还比较分散，

但有的结果还是很有意义的。

例如 1995 年 C. I. Morris, M. R. Kamel, R. K. Hansan 在 Stanford 大学高温气动实验室把平面激光荧光用在膨胀管中测量 OH, 获得的高速数字图象描绘了带 35° 角的台阶的前沿乙  
烯 / 氧当量混合物发生爆轰的演变过程 (见图 6)。

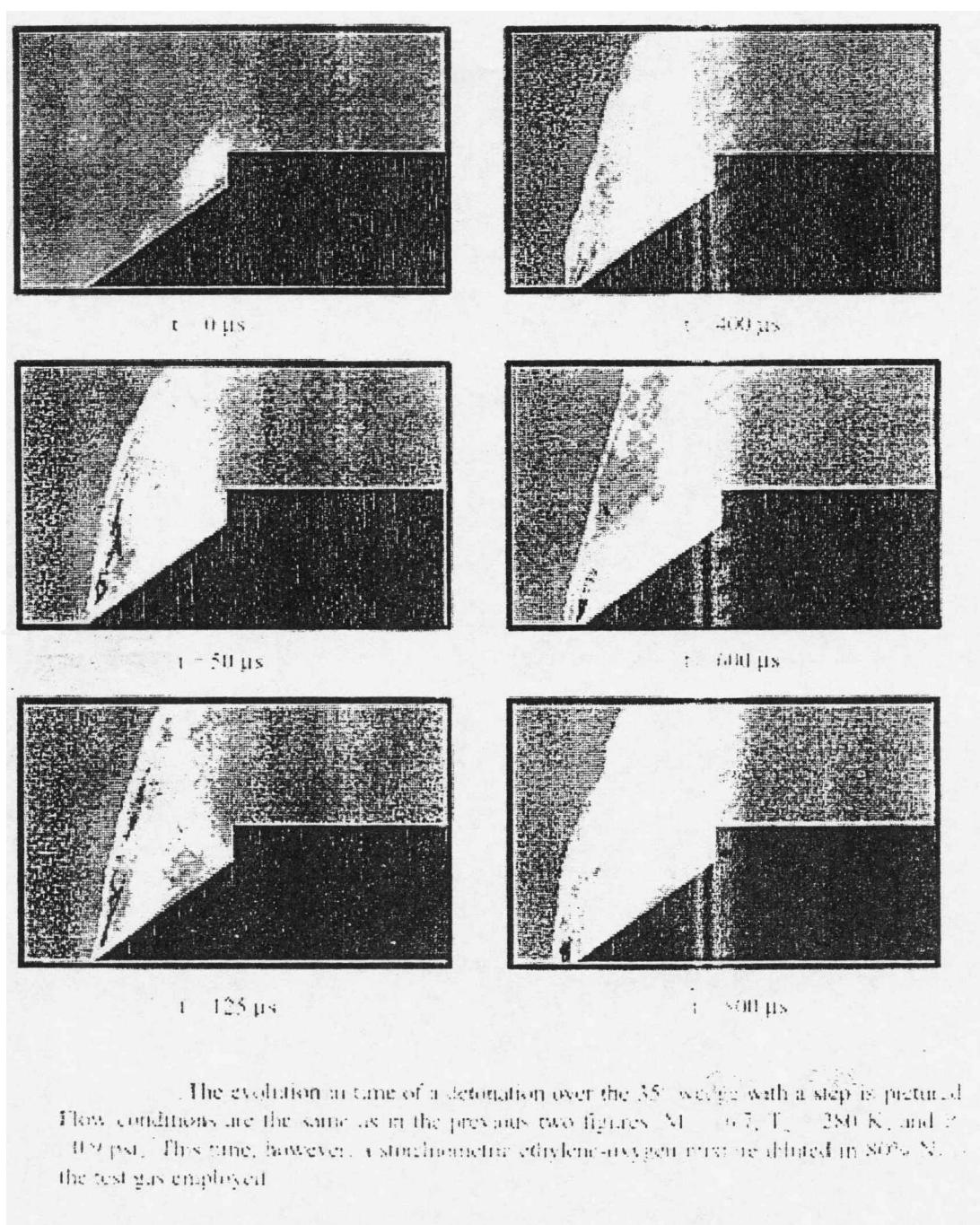


图 6 台阶前沿乙烯 / 氧当量混合物发生爆轰的演变过程

又如, 1997 年 A. F. P. Houwing, P. M. Daney, P. C. Palma 等人在 T<sub>2</sub> 自由活塞激波风洞

上用平面激光荧光技术获得半球头前沿激波层中振动温度分布(见图7)。

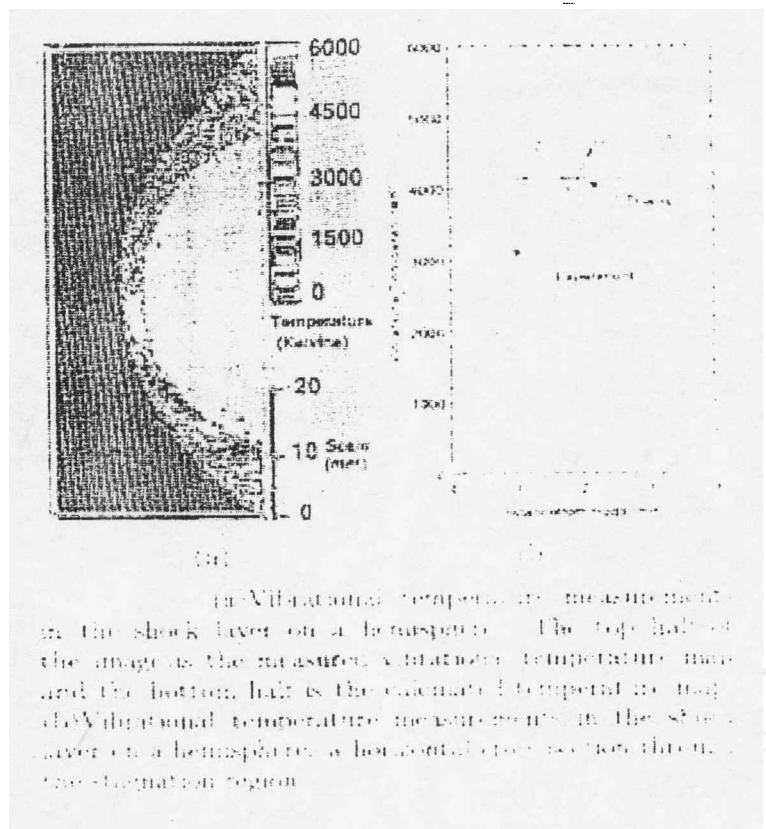
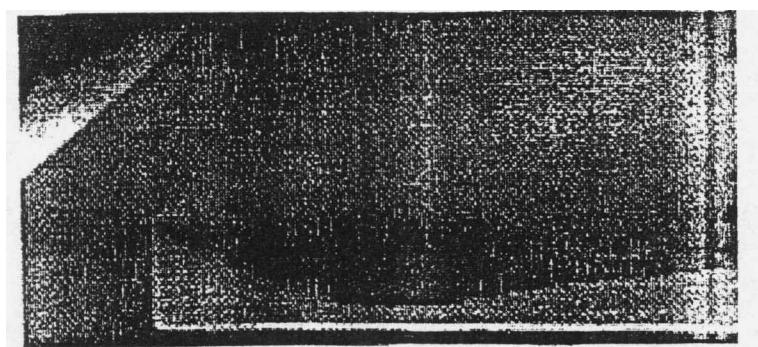


图7 平面激光荧光用在T2 激波风洞获得振动温度分布

1999年0' Byrne与Cooper等人在T2风洞上,用NO平面激光荧光得到斜楔底部分离流的流场显示图像(见图8)。

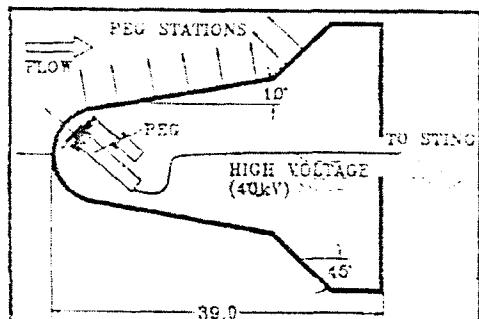


PLIF visualisation of separated flow at the base of a wedge.

图8 平面激光荧光得到斜楔底部分离流的流场显示图像

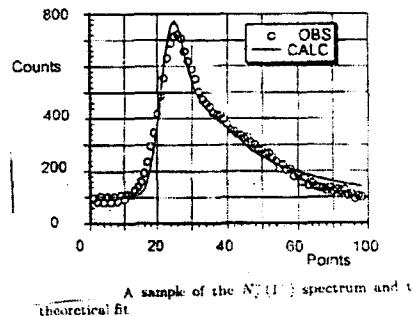
1999年J.K.Harvey等人,在Calspan的LENS激波风洞上,用强脉冲电子枪装在

气动模型内部(见图9),获得 $N_+^+(1^-)$ 谱强度沿法向有规律的分布(见图10),由此可以得到温度分布及其他有价值的数据。



PEG mounted within test model.

图9 强脉冲电子枪装在LENS激波风洞的  
气动模型内部



A sample of the  $N_+^+(1^-)$  spectrum and the theoretical fit

图10  $N_+^+(1^-)$ 谱强度沿法向的分布

上述例子说明这些技术正在走向成熟。加上高焓风洞技术也在迅速发展,预计再经过5年时间的努力,国际上高焓流动实验将可能涌现大量的新的数据,并开展大量的程序验证实验。到时高焓领域的研究水平目前可能难以预估。

## 参考文献

- 1、姜宗林,赵伟,林贞彬,俞鸿儒,爆轰驱动高焓激波风洞及其瞬态测量技术的研究与进展,力学进展,Vol.31,No.2,2001,pp312-317
- 2、林贞彬,葛学贞,余西龙等,“高焓激波风洞自由流一氧化氮含量的诊断”,力学学报,2001,No.1
- 3、林贞彬,葛学贞,竺乃宜,余西龙等,“JF-10氢氧爆轰激波风洞自由流的实验研究”,流体力学实验与测量,Vol.14,No.31,2000
- 4、林贞彬,郭大华,余西龙等,“利用电子束荧光技术测量高超声速边界层中的扰动现象”,流体力学实验与测量,Vol.14,No.4,2000
- 5、C.Dankert,R.J.Cattolica and W.L.Sellers, “Local measurements of temperatures and

- concentrations: a review for hypersonic flows". A.Boutier(ed.)New Trends in Instrumentation for Hypersonic Research,p563-582 1992.
- 6、J K Harvey,M S Holden,R Deleon, R C Bergman, Measurements of Thermodynamic Nonequilibrium in Hypervelocity flows using Electron Beam Fluorescence and Direct Radiance,Proceedings of ISSW22,1999,pp363-368
- 7、R.K.Hanson, "Laser-based diagnostics for hypersonic flows". A Boutier(ed.) New Trends in Instrunention for Hypersonic Research,p185-194 R.J.Exton, "Absorption, scattering, and fluorescence techniques for hypersonic flow measurements". A.Boutier (ed.)New Trends in Instrunentation for Hypersonic Researchp205-214
- 8、G. Eitelberg , "Calibration on the HEEEG and Its Use for Verification of Real Gas Effects in High Enthalpy Flow"AIAA93-5170
- 9、Y.Wen, "Recent Results from Hypervelocity Research in T<sub>3</sub>".AIAA94-2523
- 10、A.F.P.Houwing,P.M.Danehy, "Fluorescence-imaging-based flow diagnostics: applications to free-piston shock tuunel flows" ,proceedings of ISSWZZ,1999,pp15-22
- 11、P.Boubert, A.Chikhaoui, "NO LIF measurements in a bow shock layer", proceedings of ISSWZZ,1999,pp1613-1618