

# 高温空气电子浓度的实验测定 及对理论图表的检验

竺乃宜 李学芬

(中国科学院力学研究所)

**文摘** 本文总结了近几年来在 $\phi 800\text{mm}$ 激波管上对高温空气电子密度所做的大量测量工作。在 $P_1=1.3\text{--}133$ 帕斯卡,  $M_2=9\text{--}22.5$ 的范围内,使用了近自由分子流 Langmuir 探针、普通微波透射仪、高灵敏度微波透射仪和反射仪、微波干涉仪等对正激波后的电子密度进行了系统地测量。在各种参数状态下,全部实验数据均符合在同一激波马赫数下 $n_e$ 正比于 $P_1$ 的经验规律。实验测量结果与目前工程上常用的各种理论计算图表进行了对比,验证了这些图表的可用性。

**主题词** 高温空气, 电子密度, 测量, 激波管, 微波干涉仪, 应用。

## 一、引言

激波管做为研究高温气体性质的基本实验工具之一,已在国内外得到了广泛的发展和应用。我们利用 $\phi 800\text{mm}$ 激波管<sup>[1]</sup>中正激波后的高温电离区来研究高温气体的电离现象。国外虽有不少作者对电子密度做了测量,但都是在局部的马赫数和密度参数下进行的,且尚未得出系统的规律和明确的结论。我们则在很宽的马赫数和密度参数范围内做了系统的测量和研究,并得出了较好的规律。

Lin<sup>[2]</sup>在激波管中首先采用微波反射法来测量空气中较高马赫数下(密度较低)正激波后的电子密度。Важенова<sup>[3,4]</sup>则用微波吸收法测量了较低马赫数下的电子密度。Locke<sup>[5]</sup>用电探针也在低马赫数低密度下做了测量。DeBoer<sup>[6,7]</sup>等用离子蒐集探针,在低马赫数和较宽密度范围做了测量。

我们过去曾使用近自由分子流 Langmuir 探针<sup>[8]</sup>和微波透射仪<sup>[9]</sup>、反射仪、简单干涉仪等对 $\phi 800\text{mm}$ 激波管中的电子密度进行了广泛的测量。我们的实验结果<sup>[8,9,10]</sup>在整个马赫数和密度范围内都与工程上常用的理论计算图表Hilsenrath<sup>[11]</sup>、Предводителев<sup>[12]</sup>等相接近。在低马赫数下与DeBoer<sup>[6,7]</sup>及Locke<sup>[5]</sup>的实验结果能够衔接。但是在高马赫数低密度下则比Lin<sup>[2]</sup>微波反射法的测量结果要低。

一般说来,电探针、微波反射法和微波吸收法的测量精度都不太高。当等离子体中的电子密度起伏较大时,微波简单干涉仪也变得不太可靠了。因此,近两年我们又将 $3\text{cm}$ 和 $8\text{mm}$

本文1985年8月13日收到。

微波条纹干涉仪用于激波管中电子密度的测量<sup>[13]</sup>。微波条纹干涉仪具有较高的灵敏度和可靠性。现在我们有可能会对以前一系列的实验结果进行对比总结,找出其规律,并且有可能对已有的理论图表进行检验。

## 二、实验测量结果

我们使用近自由分子流Langmuir探针、3 cm和8 mm微波透射仪,3 cm混频接收式微波透射仪,8mm混频接收式微波反射仪,3 cm微波简单干涉仪,3 cm和8 mm微波条纹干涉仪等测量手段,在 $P_1=1.3-133$ 帕斯卡, $M_1=9-22.5$ ,参数范围内对正激波后峰值电子密度进行了系统地测量。

图1给出了 $P_1=133$ 帕斯卡状态下, $n_e$ 的八个实验值及其随马赫数的变化。图中也列出了据文献[11],[12],[14],图表计算得到的 $n_e$ 值随 $M_1$ 变化的曲线。图2给出了 $P_1=40$ 帕斯

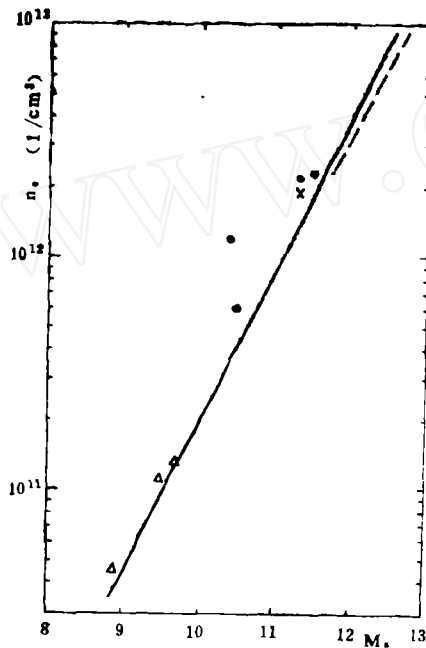


图1 高温空气正激波后电子密度随马赫数的变化,  $P_1=133$ 帕斯卡  
 ● 8 mm微波透射仪; × 8 mm微波条纹干涉仪; △ 3 cm微波条纹干涉仪;  
 ——N. B. S. AEDC-TR-65-58(1965)<sup>[11]</sup>;  
 - - - - - A. H. CCCP(1962)<sup>[12]</sup>。

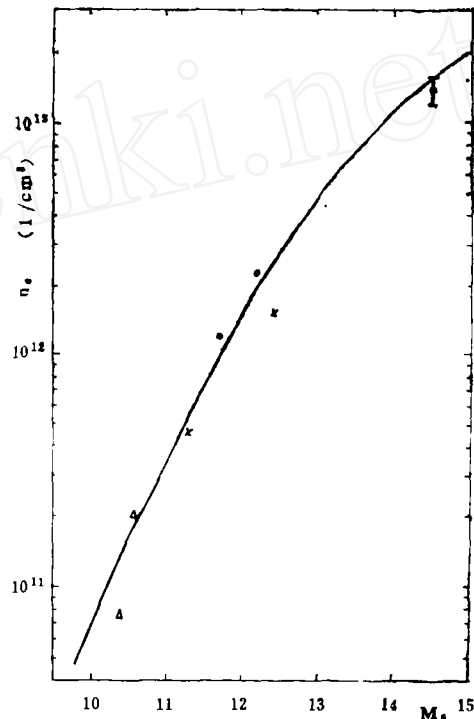


图2 高温空气正激波后电子密度随马赫数的变化,  $P_1=40$ 帕斯卡  
 ● 8 mm微波透射仪; × 8 mm微波条纹干涉仪; △ 3 cm微波条纹干涉仪;  
 ——N. B. S. AEDC-TR-65-58 (1965)<sup>[11]</sup>

卡状态下 $n_e$ 的七个实验值及其随马赫数的变化。图中也列出了据文献[11],[14]图表计算得到的 $n_e$ 值随 $M_1$ 变化曲线。图3给出了 $P_1=13$ 帕斯卡状态下, $n_e$ 的十二个实验值及其随马赫数

的变化。图中也列出了据文献[11], [12], [14]图表计算得到的 $n_e$ 值随 $M_s$ 变化的曲线。图4给出了 $P_1=2.6$ 帕斯卡状态下 $n_e$ 的十五个实验值及其随马赫数的变化。图中也列出了据文献

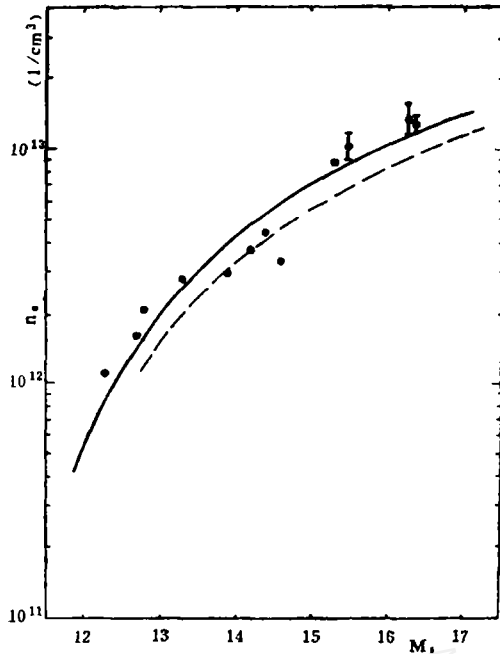


图3 高温空气正激波后电子密度随马赫数的变化,  $P_1=13$ 帕斯卡  
● 8 mm微波透射仪; ——N.B.S. AEDC-TR-65-58(1965)<sup>[11]</sup> - - - - - A.H. CCCP(1962)<sup>[12]</sup>

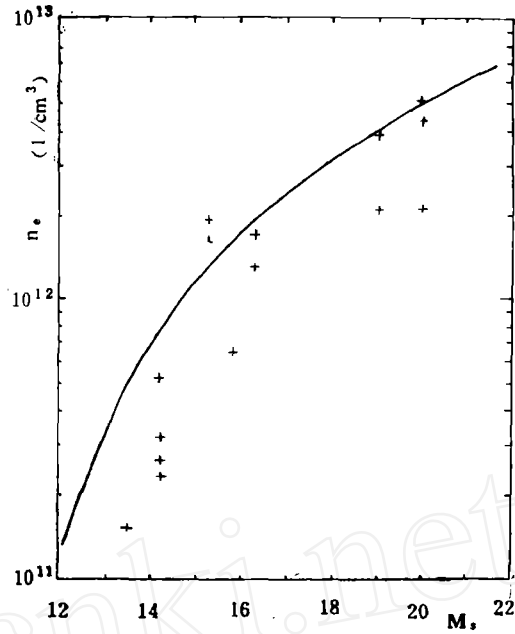


图4 高温空气正激波后电子密度随马赫数的变化,  $P_1=2.6$ 帕斯卡  
+ 近自由分子流Langmuir探针 ——N.B.S. AEDC-TR-65-58(1965)<sup>[11]</sup>

[11], [14]图表计算得到的 $n_e$ 值随 $M_s$ 变化的曲线。图5给出了 $P_1=1.3$ 帕斯卡状态下, $n_e$ 的十八个实验值及其随马赫数的变化,图中也列出了据文献[11], [12], [14], 图表计算得到的 $n_e$ 值随 $M_s$ 变化的曲线。从图1至图5可以看出不同的测量手段所得到的测量结果是一致的,表明了实验测量结果的可靠性。在各种状态下所测得的 $n_e$ 值都与文献[11], [12]等工程上常用的图表所计算得到的高温空气平衡电子密度 $n_e$ 值相近,说明文献[11], [12]等图表基本可靠,可供工程计算使用。

图6中以 $n_e$ 和 $M_s$ 为坐标,按照我们所得到的在同一 $M_s$ 下 $n_e \propto P_1$ 的经验规律<sup>[13]</sup>,将 $P_1=1.3-133$ 帕斯卡, $M_s=9-22.5$ 的全部实验点,都约化成 $P_1=13$ 帕斯卡状态下。从图中清楚地看到,几乎全部实验点都落在 $P_1=13$ 帕斯卡状态理论计算曲线(据文献[11], [14]的图表计算而得)的附近。图中也将 $P_1=1.3$ 帕和 $P_1=133$ 帕的理论计算曲线(据文献[11][14]的图表计算而得)按照同一 $M_s$ 下 $n_e \propto P_1$ 的关系约化到 $P_1=13$ 帕状态下。从图中可以看到三条理论曲线相互很接近,进一步表明了实验规律与理论计算结果的一致性。同时在图中我们还将崔季平<sup>[15]</sup>等同志用磁探针和离子蒐集器等不同手段在 $\phi 800$ mm激波管中所得到的 $n_e$ 的全部实验点也按照同一 $M_s$ 下, $n_e \propto P_1$ 的经验规律归一化到 $P_1=13$ 帕状态下。其结果也与我们的实验结果符合得较好。表明了 $\phi 800$ mm激波管中,在 $P_1=1.3-133$ 帕斯卡, $M_s=9-22$ 宽阔的工作参数范围内,同一 $M_s$ 下,正激波后 $n_e \propto P_1$ 是一个良好的经验规律。

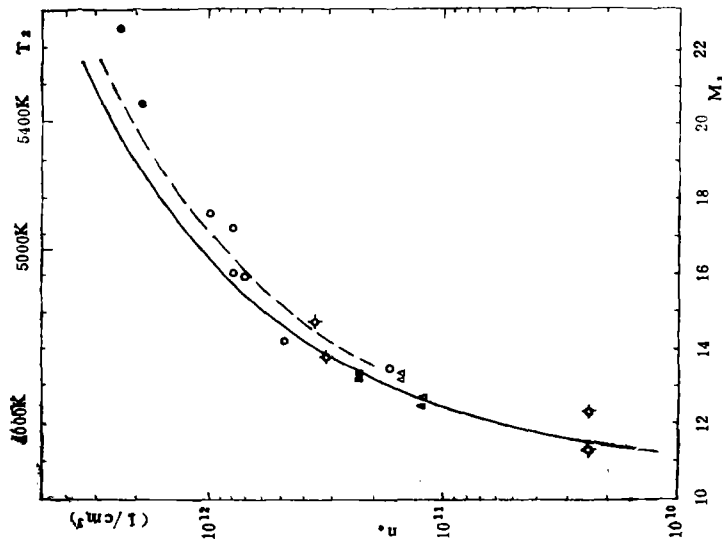


图5 高温空气正激波后电子密度随马赫数的变化,  $P_1=1.3$ 帕斯卡  
 ○ 3 cm微波透射仪; ● 8 mm微波透射仪; ◊ 3 cm微波普通干涉仪; △ 3 cm混频接收透射仪; ■ 8 mm混频接收透射仪;  
 ——N.B.S. AEDC-TR-65-58 (1965)<sup>[13]</sup> - - - - -  
 A.H.CCCP (1962)<sup>[12]</sup>

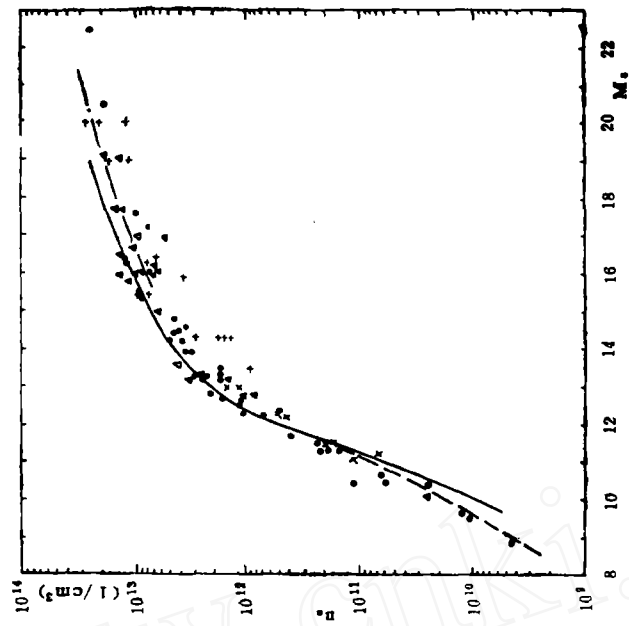


图6  $\phi 800$  mm激波管中空气正激波后峰值电子密度  $n_e$  随  $P_1$ ,  $M_1$  变化规律。将各种  $P_1$  下的  $n_e$  值都按照同一  $M_1$  下  $n_e \propto P_1$  的关系约化到  $P_1=13$ 帕斯卡状态—— $n_e$ , 理论 ( $P_1=13$ 帕); - - - - -  
 1- $n_e$ , 理论 ( $P_1=133$ 帕) - · - · - 理论 ( $P_1=1.3$ 帕); ● 微波  
 十 近自由分子流 Langmuir 探针; △ 磁探针<sup>[13]</sup> × 离子采集器<sup>[12]</sup>

### 三、理论图表的检验

关于高温气体平衡电子浓度的数值，一般工程上常用的图表有Hilsenrath<sup>[11]</sup>(N.B.S) ( $T=1500-15000\text{K}$ ,  $\Delta T=100\text{K}$ ,  $\rho/\rho_0=10^{-7}-10^2$ ,  $\Delta \log_{10} \rho/\rho_0=0.2$ , 表格形式); Пp-едводителей<sup>[12]</sup> (A.H.CCCP) ( $T=4500-6000\text{K}$ ,  $P=1-10^5$ 帕,  $T=6000-20000\text{K}$ ,  $\Delta T=100\text{K}$ ,  $P=10^2-10^8$ 帕, 表格形式); Arave<sup>[16]</sup> ( $T=4000-25000\text{K}$ ,  $\rho/\rho_0=10^{-5}-10^1$ ,  $\Delta \log \rho/\rho_0=1$ , 曲线形式); GImore<sup>[17]</sup>(其有关电子浓度的值与文献[11]相近); Кузнецов<sup>[18]</sup> ( $T=3000-3 \times 10^6$ ,  $\log \rho/\rho_0=-6-1.5$ ,  $\Delta \log \rho/\rho_0=0.5$ , 表格形式)。

1. 从图1至图6实验结果与理论计算曲线的对比中可以清楚地看到，在 $P_1=1.3-133$ 帕斯卡， $M_1=9-22$ 的宽阔参数范围内， $\phi 800\text{mm}$ 激波管中的全部实验测量结果都与按Hilsenrath<sup>[11]</sup> (N.B.S. AEDC-TR-65-58) 表格计算的平衡电子浓度值相接近。而且，在我

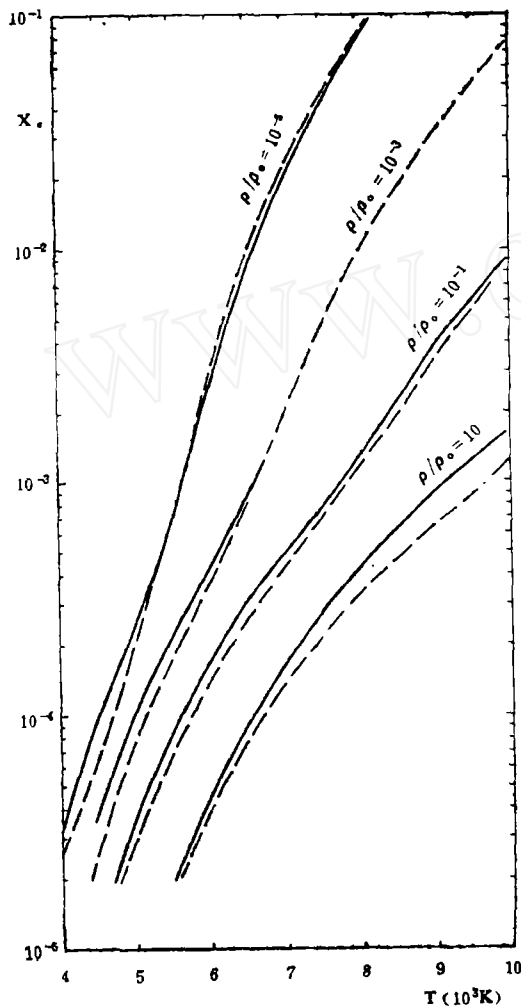


图7 高温空气平衡状态下电子克分子分数随  $T$  和  $\rho/\rho_0$  的变化——N.B.S. AEDC-TR-65-58<sup>[11]</sup> ----- Arave<sup>[16]</sup>

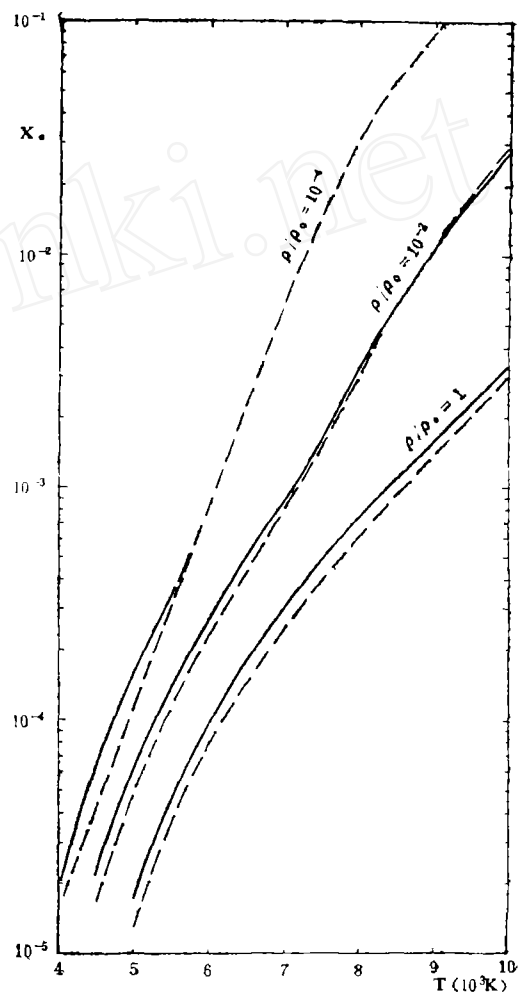


图8 高温空气平衡状态下电子克分子分数随  $T$  和  $\rho/\rho_0$  的变化——AEDC-TR-65-58<sup>[11]</sup> ----- Arave<sup>[16]</sup>

们工作所关心的领域内，文献[11]表相对于其他图表来说，给出了最宽的温度和密度范围，同时又给出了最细的温度和密度间隔。显然，文献[11]是目前工程计算中最合用的表。

2. 在图1, 3, 5中也列出了按 Предводителев<sup>[12]</sup> (A.H. СССР) 表格计算的平衡电子浓度，其数值一般比文献[11] (N.B.S) 表的计算值低20~25%，二者差别不太大，这在一般工程计算中是允许的，文献[12]未能给出 $T=4500^{\circ}\text{K}$ 以下的电子密度数据是一个缺陷，但是它以 $T$ 、 $P$ 为参数，在某些实际问题中使用起来也有其方便之处。

3. 在图7和8中以 $T$ 和电子克分子分数 $X_e$ 为坐标，将Arave<sup>[6]</sup>与文献[11](N.B.S)的值进行了对比，在整个 $T$ 、 $\rho$ 范围内，二者偏差一般均小于30%。Arave图线的参数范围虽然较窄，但它是以曲线形式给出，因此在某些实际问题中也有使用的优点。

4. 在下面表1中我们将Кузнечов<sup>[18]</sup>表所给出的 $\alpha_e$ 值与文献[11] (N.B.S) 的值做了对比。 $n_K$ 为单位体积中第 $K$ 种组元的粒子数， $\alpha_e = \frac{n_e}{n_0} \cdot \frac{\rho}{\rho_0}$ 。表1中所列N.B.S的值是经过换算而得到的。

对比结果表明这两种表之间的差别很小，一般都小于3%。只是文献[18]所给的参数变化间隔太稀了一些，使用起来不如[11]。但是，从表中查出 $\alpha_e$ 以后可以很容易地算出 $n_e$ 值，因此也有其简便之处。

表 1

| $\alpha_e$ |      | $T$                   |                       |                       |                       |                       |                       |
|------------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|            |      | 3000°K                | 3400°K                | 4000°K                | 5000°K                | 6000°K                | 6500°K                |
| -1         | [18] |                       | $2.7 \times 10^{-7}$  | $3.2 \times 10^{-6}$  | $4.2 \times 10^{-5}$  | $2.1 \times 10^{-4}$  | $4.1 \times 10^{-4}$  |
|            | [11] |                       | $2.64 \times 10^{-7}$ | $3.3 \times 10^{-6}$  | $4.2 \times 10^{-5}$  | $2.2 \times 10^{-4}$  | $4.1 \times 10^{-4}$  |
| -2         | [18] | $7.9 \times 10^{-8}$  | $7.2 \times 10^{-7}$  | $6.8 \times 10^{-6}$  | $7.7 \times 10^{-5}$  | $3.8 \times 10^{-4}$  | $7.4 \times 10^{-4}$  |
|            | [11] | $7.84 \times 10^{-8}$ | $7.2 \times 10^{-7}$  | $6.9 \times 10^{-6}$  | $7.8 \times 10^{-5}$  | $3.9 \times 10^{-4}$  | $7.5 \times 10^{-4}$  |
| -3         | [18] | $2.1 \times 10^{-7}$  | $1.5 \times 10^{-6}$  | $1.3 \times 10^{-5}$  | $1.4 \times 10^{-4}$  | $7.0 \times 10^{-4}$  | $1.66 \times 10^{-3}$ |
|            | [11] | $2.04 \times 10^{-7}$ | $1.54 \times 10^{-6}$ | $1.33 \times 10^{-5}$ | $1.38 \times 10^{-4}$ | $7.2 \times 10^{-4}$  | $1.64 \times 10^{-3}$ |
| -4         | [18] | $4.4 \times 10^{-7}$  | $2.9 \times 10^{-6}$  | $2.3 \times 10^{-5}$  | $2.3 \times 10^{-4}$  | $1.63 \times 10^{-3}$ | $4.7 \times 10^{-3}$  |
|            | [11] | $4.4 \times 10^{-7}$  | $2.9 \times 10^{-6}$  | $2.34 \times 10^{-5}$ | $2.36 \times 10^{-4}$ | $1.64 \times 10^{-3}$ | $4.7 \times 10^{-3}$  |

参 考 文 献

[ 1 ] 竺乃宜, 李红德, 邹惠良, 李连祥: «力学学报», Vol. 10, No. 3, (1978) 234.  
 [ 2 ] Lin, S.C. etc.: Physics of Fluids, Vol. 5, No. 12, (1962) p.1633.  
 [ 3 ] Баженова, Т.В. Лобастов, Ю.С.: Физическая газодинамика Теплообмен и термодинамика газов высоких температур, А.Н. СССР, (1962) 120.  
 [ 4 ] Баженова, Т.В. Лобастов, Ю.С.: Физическая газодинамика и свойства газов при высоких температурах, (1964) 17.  
 [ 5 ] Locke E. etc.: AIAA J., Vol. 5, No. 7, (1967) p. 1350.  
 [ 6 ] de Boer, P.C.T.: The Review of Scientific, Vol. 37 No 6, (1966) p. 775.  
 [ 7 ] Frohn, A. and de Boer, P.C.T.: AIAA J Vol. 5 No 2, (1967) p. 261.  
 [ 8 ] 竺乃宜, 李连祥: «力学学报», 特刊(1981) 252.  
 [ 9 ] 竺乃宜, 李学芬: «力学学报», Vol. 13, No 5 (1981) 507.

- [10] Zhu Nai-yi and Li Xue-fen: Proceedings of the 13th International Symposium on Shock Tubes and Waves, New York, (1981) p. 528.
- [11] Hilsenrath, J.H. Klein, M : N.B.S. AEDC-TR-65-58, (1965), AD-612301.
- [12] Предводителев, А С : Таблицы Термодинамических Функций Воздуха, А Н СССР, (1962)
- [13] 竺乃宜, 李学芬: «力学学报», Vol. 16, No. 1, (1984) 85.
- [14] Feldman, S.: Hypersonic Gas Dynamic Charts For Equilibrium Air, AVCO RL, (1957).
- [15] 崔季平, 何宇中, 范秉诚: «力学学报», Vol. 16, No. 1, (1984) 81.
- [16] Arave, R.G. etc: AD-438260.
- [17] GImore, F.R.: RM-1543, (1955).
- [18] Кузнецов, Н М : Термодинамические Функции и Ударные Адиабаты Воздуха При Высоких Температурах, (1965)

## MEASUREMENTS OF ELECTRON DENSITY IN HIGH TEMPERATURE AIR AND INSPECTIONS OF THEORETICAL CHARTS

Zhu Naiyi Li Xuefen

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

**ABSTRACT** This is the final report on the measurements of the electron density of the high temperature air in the  $\phi 800$  mm shock tube. The electron density behind normal shock waves has been measured systematically, over the range of  $P_1 = 1.3—133$ Pa,  $M_s = 9—22.5$ , by the use of the near-free-molecular Langmuir probes, the ordinary microwave transmission, the special highly sensitive microwave transmission and microwave reflection, and the microwave interferometer. By using our whole experimental data, an approximate equation  $n_e \propto P_1$  is obtained for constants  $M_s$ .

Comparisons of the experimental data and the theoretical charts in common use indicate that: These theoretical charts are usable.

**SUBJECT TERM** High-temperature air, Electron density, Measurement, Shock tube, Microwave interferometer, Application.