

利用强反射稀疏波冷却的激波管方法 研究电离复合非平衡过程动力学

王苏, 崔季平, 范秉诚, 何宇中

中科院力学所高温气体重点实验室 北京 100080

摘要: 介绍一种研究高温气体电离复合动力学利用反射稀疏波冷却的激波管方法。首先通过反射激波加热使试验气体电离, 随后利用在激波管高压室端部反射的强稀疏波使反射激波后 5 区离化气体快速冷却, 由于稀疏波的冷却速度达到 10^6 K s^{-1} , 创造出使离化气体处于以电离复合为主的非平衡过程的条件。

Abstract: A shock tube method is introduced to study the ionization-recombination kinetics of high temperature gases, in which a test gas is heated and ionized by a reflected shock wave and subsequently quenched by a strong rarefaction wave reflected on the end wall of the driver section. As the quenching speed of the strong rarefaction wave reaches 10^6 K s^{-1} , a nonequilibrium ionization-recombination process takes place, during which the ion recombination with electrons dominates.

Key words: ionization-recombination, rarefaction wave, shock tube

1. 引言

现代科技的发展, 在电弧放电、等离子体化工、等离子体气相化学沉积, 以及航天高超声速飞行产生的等离子体鞘层与电离尾迹的增强与减弱等技术都与高温气体的电离动力学特性密切相关, 建立细致的研究方法并掌握高温下电离动力学性质的规律, 向工程设计部门提供高温下离化气体电离、复合机制, 以及电离和复合速率系数等基本动力学参数是非常有意义和必要的。

在研究电离复合过程传统的电弧放电方法中, 气体分子是处于常温而只是改变入射电子的能量, 很难达到在原子分子热激发状态下动力学数据的测量, 而内态激发对动力学过程的影响是重要的。如崔季平等人在测定低能下慢电子散射截面时明显观察到氮分子的振动激发对散射截面的影响^[1]。电弧放电方法的另一个困难是难于得到很好控制的低能量电子。火焰方法也是研究电离复合过程的重要手段。但状态参数的调节需要改变燃气的组成, 火焰中复杂的化学反应也构成对研究体系的干扰。高温气体的电离复合动力学问题具有特殊的复杂性, 在高速流动条件下, 将有气体动力学与高温下气体内态激发和电离动力学之间的耦合, 激波管实验方法是目前最有效的一种研究手段。优点是状态参数可以相当好地用气体动力学手段控制和确定, 电离环境相对更为干净。在这方面的例子如美国 CALSPAN 实验室的 Dunn & Lordi^[2-4]利用激波管反射激波加热气体达到高焓电离状态后, 通过一个喉道进入一个扩张喷管, 经过定常高速膨胀气体密度和温度迅速下降, 温度下降速度可达 $10^5 \sim 10^6 \text{ K s}^{-1}$, 在喷管下游处

测量过剩电子浓度来获得电离复合速率。

本文将介绍一种研究高温气体电离复合动力学利用反射稀疏波冷却的激波管方法。它是首先通过反射激波加热使试验气体电离，随后利用在激波管高压室端部反射的强稀疏波使反射激波后 5 区离化气体快速冷却，创造出使离化气体处于以电离复合为主的非平衡过程的条件，再通过诸如 Langmuir 静电探针等测试手段监测稀疏波冷却过程中 5 区离子数密度的变化，以实现气体电离复合过程动力学的研究。传统的激波管方法是在有复杂流动的情况下进行测量研究，流动的非理想性（如边界层、粘性效应等）将给测量和数据分析带来困难和误差。利用稀疏波冷却的激波管方法与 Dunn & Lordi 所用喷管膨胀冷却方法相比，其优点是设备简单易于操作，而且在一个测点上即可监测同一微团气体由初始的高温电离状态到经受稀疏波冷却进入逆向电离复合的非平衡过程，实现了在近静止的条件下研究气体离化性质随时间的演变。由于排除了复杂流体运动的影响，更有利于对动力学过程进行精确的测量和分析。

通过调节激波管高、低压室的长度比，可以控制激波和稀疏波的反射时间，使在高压室端部反射的稀疏波头部与在低压室尾部反射的激波几乎同时与接触面碰撞，此时将有两道稀疏波同时射入 5 区，使反射激波衰减，创造出使 5 区气体快速冷却的条件，这是利用稀疏波冷却的激波管方法研究电离复合动力学过程需要达到的目标。在激波管高压室安装一个位置可调的活塞控制稀疏波的反射时间就可以实现这一目标。反射稀疏波到达 5 区的时间可以由安装在低压室尾盖上的压电探头记录的 5 区压力变化反映出来，据此可以方便地获得稀疏波的最佳反射时间。在力学所 LHD 单脉冲化学激波管上经过实验确定活塞最佳位置是距膜片 0.83m。该激波管高压室内径 44mm、长 1.2m，低压室内径 44mm、长 1.8m。在低压室近膜片处连接有一个 20L 的容纳室（也称魔洞），容纳室与低压室起始压力相同，其作用是吸收二次激波脉冲，消除了二次激波加热对动力学过程研究的影响。图 1 是激波管高压室长度为 0.83m 时低压室尾盖上压电探头记录的 5 区压力变化的典型记录。从图中可以看出，当稀疏波达到后 p_5 迅速衰减。

2. 激波管运行状态

在典型实验条件下：低压室试验气体为氩气 $p_1 = 4\text{KPa}$ ， $T_1 = 343\text{K}$ ，高压室长度为 0.83m，高压室驱逐气为氢气，激波 Mach 数 $M_s = 3.5$ ，我们初步分析计算了所用单脉冲激波管中波系的运动状态。计算中气体视为理想气体。容纳室的存在相当于在低压室入口处有一膨胀段，可以等效地用一维定常膨胀来描述，实验确定本激波管等效定常膨胀截面比为 1.8。对实验 Mach 数在 3~4 之间，计算分析表明，膜片处 6 将达到临界声速，呈现跨声速膨胀，随后将出现一道激波 S' 调整气流速度使之与 3 区缝合，7 为激波 S' 的波前状态，如图 2 所示。计

算得到理论 $p_4 = 236.6\text{KPa} = 2.33\text{atm}$ 。在实际实验中，为获取 Mach 数为 3.5，需高压室起始压力约为 3atm。计算的 p_4 小于实际实验值是由于破模能耗和流动的非理想性所致。

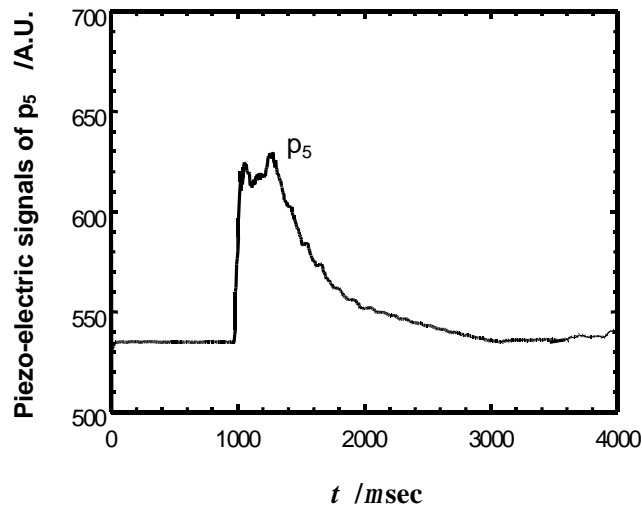


Fig. 1 Record of the piezo-electric signal of p_5 at the length of the high pressure section being 0.83m

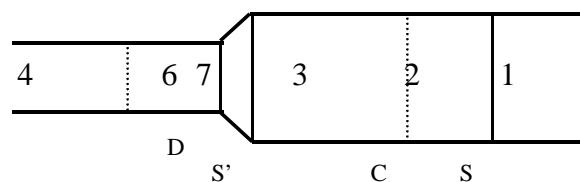


Fig. 2 Schematic diagram of the equivalent flow in a shock tube with a magic hole (S, S' : shock waves, D: diaphragm, C: contact surface)

依据以上对本论文典型实验条件 $M_s = 3.5$ 计算所得运行参数，将高压室长度为 0.83m 时本实验所用单脉冲激波管的运行波系图表示在图 3 中。反射稀疏波将以速度 $a + u$ 相对于管壁运动，因而反射稀疏波头的速度将从高压室管壁处的 a_4 上升到膜片处的 $a_6 + u_6$ ，穿过激波 S' 后再以速度 $a_3 + u_3$ 向右运动直至与接触面 C 相交。此后，稀疏波穿过接触面进入激波 S 后 2 区并以速度 $a_2 + u_2$ 运动，

同时在接触面上将产生一个反射波。由于 $a_2 < a_3$ ，进入 2 区的稀疏波因减小的声速而被减速，最后与反射激波相交进入 5 区。入射激波 S 被管壁反射后形成的反射激波 S_R 与接触面 C 相交后，一道激波 S_T 被发射进入 3 区，一道稀疏波 R' 被反射回 5 区。由于实际流动中存在边界层效应，激波 S 被减速，接触面 C 被加速，2 区收缩，反射稀疏波头将与接触面 C 相交在比图 3 中所示更晚的时间，结果是反射稀疏波头 R 、反射激波 S_R 和接触面 C 同时相交。反射稀疏波头 R 将与反射激波和接触面作用时产生的稀疏波 R' 汇合形成一道强稀疏波射入 5 区，使 5 区气体快速冷却，这正是我们在实验中希望达到的效果。图 3 还显示 5 区的有效观测时间约为 0.5ms，与 5 区压力记录图 1 相一致。

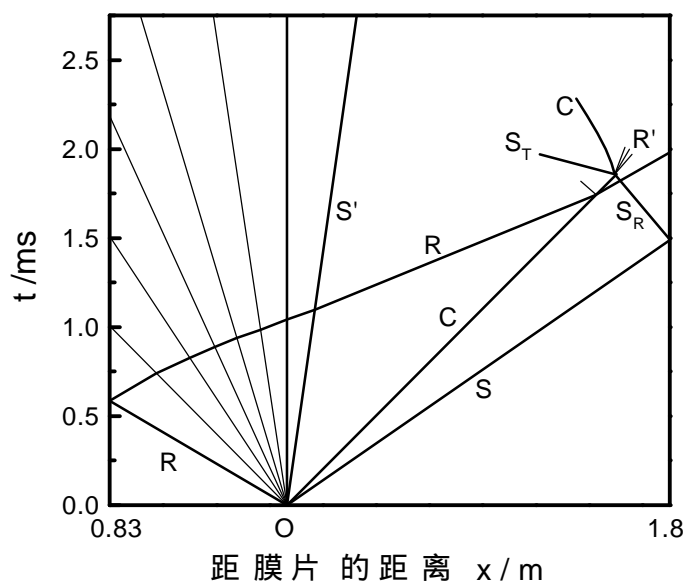


Fig. 3 Wave diagram of the single pulse shock tube with a magic hole ($M_s = 3.5$, S , S' , S_R , C and R denote the incident shock, the second shock, the reflected shock, the contact surface and the rarefaction wave head, respectively; S_T , R' denote the shock wave transmitted into the region 3 and the rarefaction wave reflected back into the region 5 after the collision of the reflected shock with the contact surface, respectively; O denotes the position of the diaphragm)

3. 稀疏波的冷却速度

利用安装在低压室尾盖上的压电传感器记录 5 区压力的变化，通过对实验数据的分析可以得出稀疏波的冷却速度。图 4 是稀疏波冷却过程中 5 区密度变化速度与温度的关系。首先由每次破膜实验记录的 5 区压力变化历史，利用绝热关系

$$\frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}_{50}} = \left(\frac{p}{p_{50}} \right)^{\frac{1}{g}}, \quad \frac{T}{T_{50}} = \left(\frac{p}{p_{50}} \right)^{\frac{g-1}{g}} \quad (1)$$

计算出密度和温度变化历史，再通过密度对时间求导得到密度变化速度 $\frac{d \ln \mathbf{r}}{dt}$ ，因而可以把每次破膜实验记录的压力变化换算成 $\frac{d \ln \mathbf{r}}{dt}$ 随温度的变化。绝热关系中的 g 是 Ar 的比热比。图 4 中包括了 Mach 数从 3.1 到 3.8 范围内的 21 次破膜实验数据。

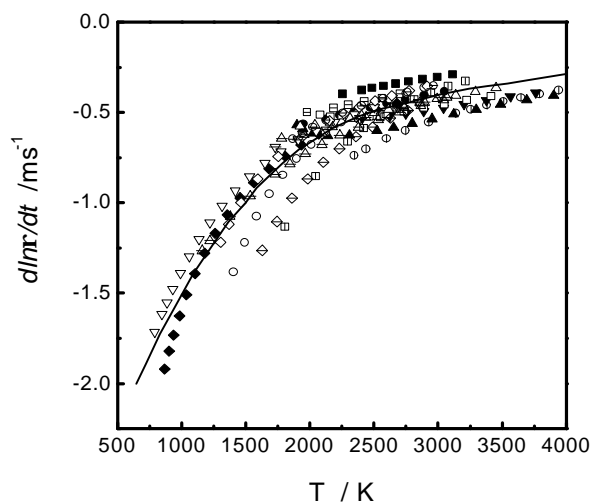


Fig. 4 Variation of $\frac{d \ln \mathbf{r}}{dt}$ with temperature

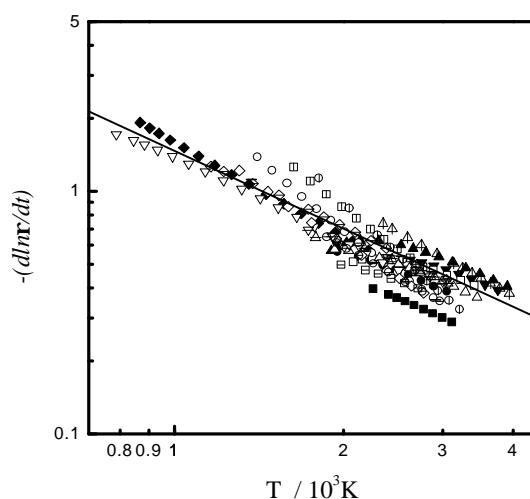


Fig. 5 Variation of the quantity $\lg\left(-\frac{d \ln \mathbf{r}}{dt}\right)$ with $\lg T$

用图 4 中的数据以 $\lg\left(-\frac{d \ln r}{dt}\right)$ 对 $\lg T$ 作图, 数据分布呈线性关系, 如图 5 所示。最小二乘拟合结果为

$$\lg\left(-\frac{d \ln r}{dt}\right) = -1.068 \lg T + (3.371 \pm 0.114) \quad (2)$$

再次使用绝热关系得到

$$\frac{dT}{dt} = -(1.62 \pm 0.42) \times 10^6 T^{-0.068} \text{ Ks}^{-1} \quad (3)$$

由此看出, 对不同 Mach 数下的实验数据拟合得出在本文实验中 $\frac{dT}{dt}$ 为一常数, 基本与温度无关。利用这一关系可在实验数据分析中将对温度的导数转换为对时间的导数。而且, 在本文实验条件下 (温度 600 ~ 4000 K), 由 (3) 式得出本论文实验中稀疏波冷却速度达到 10^6 Ks^{-1} 量级。在本论文实验的实验时间 3ms 内, 这一冷却速度可使 5 区温度从 3000K 下降到 600K 附近。这一稀疏波冷却速度与 Dunn & Lordi 所用喷管膨胀达到的冷却速度相当。

严格地说, 在本单脉冲激波管中存在三个冷却过程: 第一道冷却波是由高压室反射回来的稀疏波; 第二道冷却波是反射激波穿过非缝合接触面反射回来的稀疏波; 第三道冷却波是反射激波跨越容纳室时由容纳室发出的稀疏波。第三个过程对反应区的冷却作用不大, 而反射稀疏波强度大是主要的冷却波。用反射稀疏波作主冷却波比利用反射激波穿过亚缝合接触面运行条件给出的稀疏波作为主冷却波更好。因为在激波管中接触面不是一个面, 特别是对化学激波管而言, 不可避免地运行在湍流边界层条件下, 激波有衰减, 接触面有混合亦不可避免, 因此这种不可控的条件可能会引起不同运行条件下实验时间的起伏变化。采用反射稀疏波作为主冷却波, 保证了实验时间相对地稳定和重复。

4. 结论

本文介绍了一种研究高温气体电离复合动力学的激波管方法。其特点是利用反射激波后的高焓条件电离试验气体, 随后采用在激波管高压室端部反射的稀疏波作为主冷却波, 汇同反射激波穿越接触面时产生的稀疏波一起射向 5 区, 使 5 区气体快速冷却。为了达到最佳反射时间以获得最大的冷却速度, 通过在激波管高压室安装位置可调的活塞以改变激波管高、低压室的长度比, 使在高压室端部反射的稀疏波与在低压室尾盖反射的激波同时与接触面碰撞, 产生出一道强稀疏波射向 5 区。通过对典型实验条件下激波管中波系运动的分析计算和实验观测, 证明了这一方法的可行性, 并得出最佳活塞位置是距膜片 0.83m。通过分析计算实验记录的 5 区压力变化, 得出本实验中稀疏波的冷却速度达到约 10^6 Ks^{-1} , 与 Dunn & Lordi 采用的喷管膨胀冷却方法获得的冷却速度相同。但

采用稀疏波冷却具有设备简单易于操作，在一个测点上即可监测同一微团气体的整个变化过程，实现在近静止的条件下研究气体离化性质随时间的演变，排除了复杂流体运动的影响，更有利于对动力学过程进行精确的测量和分析。利用这一激波管方法，我们测定了 NO^+ 、 Na^+ 、 F 与电子复合的速率系数^[5,6,7]。

参考文献

- [1] 崔季平, 何宇中, 范秉诚: 用磁探针测定慢电子平均散射截面, 核聚变与等离子物理, Vol.4, 1984, p.24-30
- [2] Dunn M. G. and Lordi J. A., Measurement of Electron Temperature and Number Density in Shock Tunnel Flows, Part 2, $\text{NO}^+ + e$ Dissociative Recombination Rate in Air, AIAA J., Vol.7, 1969, p.2099-2104
- [3] Dunn M. G. and Lordi J. A., Measurement of $\text{N}_2^+ + e$ Dissociative Recombination in Expanding Nitrogen Flows, AIAA J., Vol.8, 1970, p.339-345
- [4] Dunn M. G. and Lordi J. A., Measurement of $\text{O}_2^+ + e$ Dissociative Recombination in Expanding Oxygen Flows, AIAA J., Vol.8, 1970, p.614-618
- [5] Cui J. P., Fan B. C., He Y. Z., Wang S. and Wang J., Shock Tube Studies on Dissociative Recombination of NO^+ and Electrons, Proc. 22nd Int. Symp. on Shock Waves, Imperial College, London, UK, 1999, p.69
- [6] WANG Su(王苏), CUI Ji-Ping(崔季平), HE Yu-Zhong(何宇中), FAN Bing-Cheng(范秉诚), WANG Jing(王静), Shock Tube Studies on Recombination Kinetics of Sodium Ion with Electron, Chinese Physics Letters, Vol.18, 2001, p.289
- [7] 王苏, 崔季平, 何宇中, 范秉诚: 氟原子在高温非平衡条件下亲电动力学的实验研究, 第十届物理气体动力学专业委员会会议论文集, 2001年, 厦门, p.89