

# 横向磁场对电离非平衡高速气流的作用

高温气体动力学与等离子体技术研究实验室\*

(中国科学院力学研究所)

**摘要** 本项工作从实验和理论两方面研究横向磁场对电离非平衡高速气流的作用。在小型电弧风洞中可以将试验气流的电子密度降低约一个数量级,为部分地控制低密度电弧风洞气流的电特性品质提供了一种技术途径。

## 一、引言

在再入飞行物理现象的实验研究中,对电弧风洞等气动模拟设备中试验气流的品质有一定的要求。例如,进行再入通讯和目标识别等问题研究时,需要模拟高速飞行器周围的等离子鞘,常常希望工作介质为空气,并要求风洞试验气流中自由电子的摩尔分数与真实飞行条件下的相同等。为了探求控制试验气流品质的途径,我们对降低电弧风洞试验气流中的电子密度进行了尝试,其方案是利用横向磁场。这样既可以减少电子密度值,同时又不改变空气介质的化学成分。开始,我们在现有的H-4电弧风洞上进行试验,其中试验段气流的电子密度值的量级为 $10^{12}$  1/厘米<sup>3</sup>。在该风洞喷管的中段加上强磁场,但降低电子密度的效果不明显。因此又建立了一套小型简易试验装置,即低密度小型电弧风洞和高强直流电磁铁,诊断工具是静电探针和微波透射仪。我们通过一系列的试验和讨论,对于电离非平衡高速气流与横向磁场的相互作用进行了分析。

## 二、实验装置

整个实验的布置如图1所示。其中试验段为耐热玻璃管,这是一种绝缘壁面;在实验

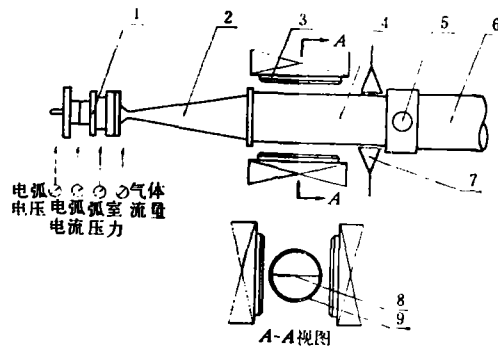


图1 降低电子密度试验布置简示

1. 加热器 2. 喷管 3. 电磁铁 4. 试验段 5. 测量段 6. 扩压器及冷却器  
7. 微波喇叭 8. 静电探针 9. 金属衬筒

\* 本文由吴承康、王柏懿执笔完成,参加本项研究实验工作的还有林治楷、嵇震宇、谈洪等同志。本文于1981年8月20日收到。

中,还可以在玻璃管内衬上整个的或两个半圆形的金属铝筒,这便构成了导体壁面. 直流电磁铁可以提供强度可变的磁场,最高达 10,000 高斯左右<sup>[2]</sup>. 磁场方向与试验气流方向垂直. 实验中,加热器的工况基本稳定,其运行参数为: 电弧电压 60 伏, 电弧电流 120 安, 弧室气压 1 个大气压, 气体流量 0.3 克/秒. 工作介质为空气.

### 三、实验过程和结果

在上述装置中,我们进行了如下几组试验:(1) 在玻璃绝缘壁面条件下,外加磁场保持不变,测量加磁场前后电子密度的变化. 结果表明,当磁场为 5,000 高斯时电子密度大约减少 30%. (2) 采用加衬整个金属铝筒的导体壁面. 测量表明,同样在 5,000 高斯的磁场条件下,电子密度可下降 70% 左右(图 2). (3) 在导体壁面条件下,保持气流条件不变,改变磁场强度进行试验. 结果表明,磁场越强,降低的效果越好. (4) 在导体壁面条件下,改变加热器的气体流量(相当于改变试验段气流的密度)进行试验. 结果表明,气流密度越低,效果越好(以上见图 3). (5) 采用加衬两个半圆形金属铝筒的试验段,外加磁场为 9,000 高斯. 试验中除测量电子密度的变化外(图 4),还测出两个衬筒间的开路电压为 10 伏左右,短路电流约为 16 毫安. (6) 在两个半圆衬筒的条件下,另外在外回路中

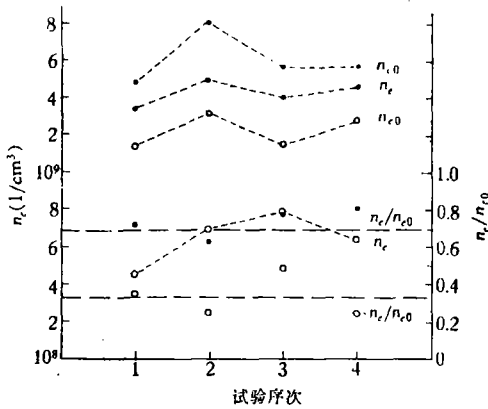


图 2 磁场为 5,000 高斯时的实验结果

● 绝缘壁面 ○ 导体壁面

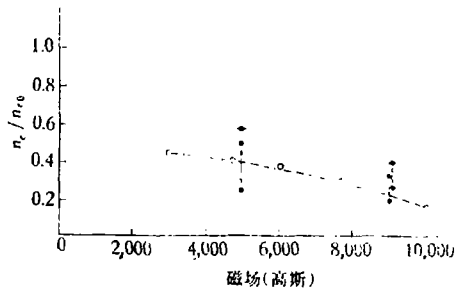


图 3 整个衬筒导体壁面的实验结果

● 小流量 ○ 中流量 ◆ 大流量

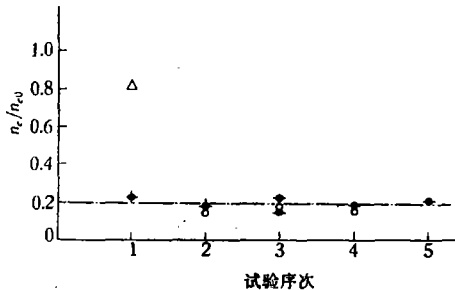


图 4 两个半圆衬筒壁面的实验结果

▲ 只加电场 ◆ 只加磁场(接电流表) ◆ 只加磁场(接电压表) ○ 加电、磁场

串入一个直流电源,分别测出不加电、磁场,只加电场(45 伏),只加磁场(9,000 高斯)以及同时加电场和磁场时几种不同情况下的电子密度值。结果表明,在正交的横向电场和磁场共同作用下,降低电子密度的效果比单独加横向磁场的稍好些(见图 4)。

总结全部试验结果表明:在现有实验条件下,利用导体壁面,当外加横向磁场为 10,000 高斯时,可以将气流的电子密度值下降一个数量级。

#### 四、机理探讨

带电粒子在外界电磁场等因素的作用下,将发生下述几种形式的运动:

1. 回旋运动 带电粒子进入磁场区域后,将束缚在磁力线周围作回旋运动。其回旋频率为  $\omega = (eB)/m$ , 相应的回旋半径为  $r = u/\omega$  (其中  $e, m, u$  分别为带电粒子的电荷、质量和线速度,  $B$  为外加磁场)。这样使粒子在垂直磁场方向上的运动受到滞止。

2. 漂移运动 如果带电粒子还承受其它外力的作用,则它还会在与磁场  $B$  和外力  $F$  都垂直的方向上形成漂移。回旋中心的漂移速度为  $V_d = (F \times B)/(eB^2)$ 。静电场对带电粒子的静电力、中性气体分子与带电粒子之间的碰撞力,都可引起这种漂移运动。霍耳参数  $\beta = \omega/\nu$  ( $\nu$  为带电粒子的碰撞频率)可以表明磁场和碰撞两种因素所造成影响的相对重要性。

3. 扩散运动 当带电粒子的密度有梯度时,它们将沿梯度方向扩散。在等离子体情况下,则发生双极扩散。双极扩散系数  $D = (\mu_i D_e + \mu_e D_i)/(\mu_i + \mu_e)$  (其中  $D_e, D_i, \mu_e, \mu_i$  分别为电子和正离子的自扩散系数及迁移率)。在有磁场时,带电粒子的扩散是各向异性的,上式仅表示沿磁力线方向上的扩散系数。由于磁场使带电粒子滞止,其定向速度显著减小,停留时间增加,从而会使扩散造成的电子密度下降效应有所增强。

总之,在电离非平衡的高速气流中,由于化学反应的非平衡性,电子和正离子在气流内的体复合过程相当缓慢。但外加横向磁场可以产生滞止、漂移及增强扩散等效应。这样将使带电粒子到达壁面附近,再通过中和、复合等过程变为中性分子,从而使电子密度下降。这里可分成三种情况:(1)  $\beta_i \gg 1$  时,电子和正离子都被磁场有效地滞止,它们凭借热运动而双极扩散,在壁面附近复合。采用绝缘壁面的试验就是这种“复合”机制的作用。(2)  $\beta_e \approx 1$  时,磁场的约束不很有效,碰撞引起的漂移逐渐显著,电子和离子将分别偏转到两个侧壁然后借助导体壁面而中和。在半圆形衬筒的两组试验中,测得了开路电压和短路电流,便证实了“中和”机理。比较所有整个或两个半圆衬筒的试验结果表明它们降低电子密度的效果大致相当。这说明在导体壁面附近总是存在着电位差,它是由于电荷不完全中和或气体与导体壁之间的接触电位所致。如果注意改善壁面对气体的导电性能,使其间的接触电位显著减少,可望更有效地降低气流中的电子密度。(3)  $\beta_e \gg \beta_i \approx 1$  时,磁场对电子的束缚是有效的,但不能有效地束缚正离子。离子在碰撞作用下发生漂移,和电子分离,这样所形成的静电场又会影响离子和电子的运动。此时“中和”和“复合”两种效应均需计入。在本实验的导体壁面情况下,主要是中和机制降低电子密度,碰撞和磁场的共同作用造成漂移。但若碰撞作用过强,带电粒子将无法滞止并被气流带往下游区。H-4 风洞横向磁场试验中降低电子密度的效果不明显,就是因为气流密度比小风洞高得多(约高 2 个量级),带电粒子与中性粒子的碰撞频繁,霍耳参数远小于 1。这样带电

粒子的“滞止”效果不明显。在小型电弧风洞中的磁场试验证实了我们对降低电子密度机理的分析。

## 五、讨 论

根据实测的加热器运行参数,并按照一维定常等熵喷管流动理论,可以估算出小型风洞试验段的气流状况:静压  $p = 100$  牛顿/米<sup>2</sup>,静温  $T = 500$  度(绝对温标),速度  $u = 1000$  米/秒,密度  $\rho = 4 \times 10^{-8}$  克/厘米<sup>3</sup>,中性气体分子数密度  $n_n = 10^{15}$  1/厘米<sup>3</sup>。另外,实测的电子密度  $n_e = 8 \times 10^9$  1/厘米<sup>3</sup>,电子温度  $T_e = 7000$  度。这样,当磁场为 10,000 高斯(1 韦伯/米<sup>2</sup>)时,可得:  $\omega_e = 1.8 \times 10^{11}$  1/秒,  $\omega_i = 3.8 \times 10^6$  1/秒,  $\nu_e = 3.0 \times 10^{10}$  1/秒,  $\nu_i = 9.2 \times 10^7$  1/秒。于是可知:  $\beta_e = 5.9$ ,  $\beta_i = 4.2 \times 10^{-2}$ 。因此在现有的试验条件下有  $\beta_i \ll \beta_e \sim 1$ , 是中和机理起主要作用。

作为粗略估算,现将试验段内气流与横向磁场的相互作用按一维定常等截面磁流体管道流问题来处理(图5)。设来流的定向速度沿  $x$  轴方向,磁场沿  $z$  方向。上下两块极板为导电壁,另外一对为绝缘壁。管道的宽度为  $d$ ,高度为  $h$ 。另外还有如下假设:(1) 气体弱电离,宏观上为电中性,其粘性、热传导可忽略不计。(2) 感应磁场足够小,可以忽略。这时磁流体力学的基本方程组为<sup>[3]</sup>:

$$\text{质量方程 } \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

$$\text{动量方程 } \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

$$\text{能量方程 } \rho \left( \frac{D\varepsilon}{Dt} + \frac{1}{2} \frac{Du^2}{Dt} \right) = \mathbf{E} \cdot \mathbf{j} - \nabla(\rho u)$$

$$\text{欧姆定律 } \mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} - \mathbf{u} \times \mathbf{B}) - \beta_e \mathbf{j} \times \frac{\mathbf{B}}{B} + \beta_i \beta_e \left[ \frac{\mathbf{B}}{B} \left( \frac{\mathbf{B}}{B} \cdot \mathbf{j} \right) - \mathbf{j} \right]$$

其中  $\varepsilon$  为单位体积气体的内能,  $\mathbf{E}$  为电场,  $\mathbf{j}$  为电流密度,  $\sigma = \frac{n_e e^2}{m_e \nu_e}$  为电导率。由于本实验条件下有  $\beta_e \beta_i = 0.2$ , 故可忽略离子滑流效应。此时在一维情况下的欧姆定律可简化为

$$j_{ex} = \frac{\sigma}{1 + \beta_e^2} [E_x - \beta_e(E_y - uB)]$$

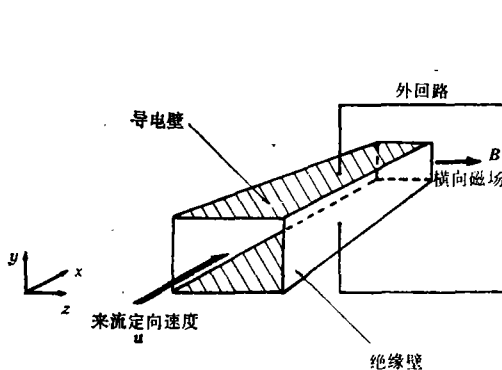


图5 一维定常等截面磁流体管道流

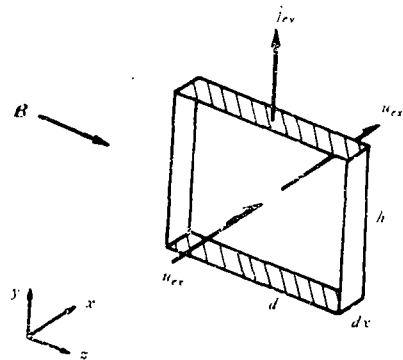


图6 磁流体力学管道流微元

$$i_{ey} = \frac{\sigma}{1 + \beta_c^2} [(E_y - uB) - \beta_c E_x]$$

当导电壁为连续电极型式时有  $E_x = 0$ , 则  $E_y = k u B$ , 其中  $k (0 \leq k \leq 1)$  是与壁面导电性能有关的常数。因此我们可得:

$$i_{ex} = \frac{\beta_c}{1 + \beta_c^2} (k - 1) \sigma u B, \quad i_{ey} = \frac{1}{1 + \beta_c^2} (k - 1) \sigma u B$$

根据电流密度的定义  $\mathbf{j}_e = -n_e e \mathbf{V}_e$ , 其中  $\mathbf{V}_e = \mathbf{u}_e - \mathbf{u}$  为电子的宏观平均扩散速度。这样便有:

$$\frac{u_{ex}}{u} = \frac{1 + k\beta_c^2}{1 + \beta_c^2}, \quad \frac{u_{ey}}{u} = \frac{(1 - k)\beta_c}{1 + \beta_c^2}$$

现在取一个管道元(图 6), 由于带电粒子数守恒, 可知:

$$n_e(x) \cdot h d \cdot u_{ex} = [n_e(x) + dn_e(x)] \cdot h d \cdot u_{ex} + n_e(x) \cdot d \cdot dx \cdot u_{ey}$$

因此

$$-\frac{dn_e(x)}{n_e(x)} = \frac{(1 - k)\beta_c}{1 + k\beta_c^2} \frac{dx}{h}$$

两边积分可得

$$\frac{n_e(x)}{n_e(0)} = \exp \left[ -\frac{(1 - k)\beta_c}{1 + k\beta_c^2} \frac{x}{h} \right]$$

现可利用上式来估算磁场降低的电子密度值, 在这里  $h = 0.05$  米,  $d = 0.1$  米,  $L = 0.14$  米,  $k = 0.22$ , 代入上式可得  $n_e(L)/n_e(0) = 0.20$ 。此值与实验数据的量级相符。

## 六、结 束 语

从理论分析和实验结果可以表明, 横向磁场能使高速非平衡气流中的带电粒子产生滞止、漂移、增强扩散等作用, 使之中和、复合, 因此降低气流中的电子密度。这种作用在强磁场和低密度条件下较为显著。在小型低密度电弧风洞中得到了电子密度降低一个数量级的结果。

## 参 考 文 献

- [1] 王柏懿, 铱丝静电探针及其在高温风洞中的应用, 力学学报, 1(1982).
- [2] 嵇震宇、王柏懿, 水冷式大气隙高强直流电磁铁的研制, 精密机械, 3(1981).
- [3] Sutton, G. W. and Sherman, A., *Engineering Magnetohydrodynamics*, McGraw-Hill Book Company (1965).

## THE EFFECTS OF A TRANSVERSE MAGNETIC FIELD ON A NON-EQUILIBRIUM IONIZED HIGH-VELOCITY GAS STREAM

Research Laboratory of High Temperature Gasdynamics and Plasma Technology

*(Institute of Mechanics, Academia Sinica)*

### Abstract

The effects on a non-equilibrium, ionized, high-velocity gas stream of a strong magnetic field normal to the stream are studied by experiment and analysis. The electron density in the test stream of a small arc tunnel was reduced by an order of magnitude by this method, indicating that this is one way to partially control the electrical parameters in a low-density arc-heated wind tunnel.