

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0668

# MHD 控制弱电离子体射流

罗卫东<sup>1</sup>, 李锋<sup>\*1</sup>, 孙佰刚<sup>2</sup>, 赵凯<sup>1</sup>, 熊溢威<sup>1</sup>, 王昌胜<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191 2. 空军指挥学院, 北京 100097)

**摘 要:** 为了研究磁流体动力学(MHD)控制低温弱电离子体射流, 实现推力矢量的可行性, 提出了一种基于MHD控制等离子体流动理论的试验方法, 建立了种子(碱金属盐)诱导燃气电离的MHD流动控制试验台, 研究了不同温度和不同磁场方向条件下射流偏转向角, 并用用户自定义函数(UDF)加载MHD模型求解三维N-S方程, 探究了数值研究MHD控制的可行性. 结果表明: 向燃烧室内注入低电离能种子能够诱导燃气电离, 形成磁流体, 在磁场作用下实现推力矢量控制; 等离子体射流偏转的数值模拟结果与试验结果在一定程度上是一致的, 说明数值模拟MHD流动控制具有一定的可信度.

**关键词:** 磁流体动力学(MHD); 等离子体; 诱导电离; 推力矢量; 数值模拟

**中图分类号:** V11

**文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5965(2015)09-1758-07

工业等离子体主要是利用电弧加热和激波加热等技术产生局部热平衡状态等离子体, 或者通过辉光放电和电晕放电等技术产生非平衡态等离子体; 燃烧等离子体方案主要通过添加电离种子的方式强化燃气电离<sup>[1]</sup>. 低温气体只有在高能电极放电和电子束照射时才会出现微弱电离, 这需要大量的外部能量输入, 但只能获得很小的电离度和电导率<sup>[2-4]</sup>. 这意味着虽然电子和离子能够和电磁场相互作用, 与电中性气体直接进行动量和能量交换, 但交换量远小于高速气流的动量和能量输运. 所以从工程实际看, 由于碱金属盐类诱导电离不需要大量外部能量输入, 所以最有可能在实际方案中被采纳. 该方法主要借助碱金属元素电离能比常见气体分子电离能小、容易电离的特性, 利用碱金属盐类充当诱导电离种子.

随着磁流体动力学(Magnetohydrodynamic, MPH)的发展, 磁流体技术被广泛应用于电力、航空、航海等领域. 美国国防部的综合高性能涡轮发

动机技术(IHPTET)计划、美国国家航空航天局(NASA)、美国空军(USAF)都将等离子技术视为未来先进吸气式战斗机引擎的关键技术<sup>[5-6]</sup>. 国外的MHD磁控等离子体推力矢量技术目前正处于预研论证阶段. 美国的Lineberry团队<sup>[7]</sup>向高焓燃气添加NaK合金种子诱导燃气电离(电导率为10 S/m), 借助喷管加速到 $Ma = 3.3$ , 高超声速燃气等离子体通过横向磁场, 利用电磁耦合作用, 从气流中提取电能. Corke和Jumper<sup>[8]</sup>应用辉光放电等离子体技术实现机翼扰流分离控制和射流偏转控制. 中国空军工程大学李应红团队<sup>[9]</sup>利用喷管加速含诱导种子的燃气至 $Ma = 2.2$ , 通过电极向诱导等离子体中注入电流, 应用电磁作用加速工质. 相比于机械式流动控制方法, MHD流动控制方式可将控制装置设计在机体内部, 规避了控制方式对发动机流道设计的影响, 同时也降低了控制装置本身设计难度; 相比于气动式流动控制方法, MHD流动控制方式无需额外配置引气/排气装置, 有利于飞

收稿日期: 2014-10-28; 录用日期: 2015-03-05; 网络出版时间: 2015-04-28 19:19

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20150428.1919.002.html

基金项目: 国家自然科学基金(90716025)

作者简介: 罗卫东(1989—), 男, 硕士研究生, 甘肃定西人, luo\_wd@126.com

\* 通讯作者: 李锋(1966—), 男, 湖南资兴人, 教授, lifeng1966@263.net, 主要研究方向为等离子流动控制及推力矢量技术研究.

引用格式: 罗卫东, 李锋, 孙佰刚, 等. MHD控制弱电离子体射流[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(9): 1758-1764.

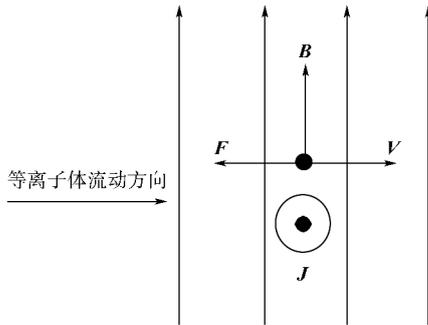
Luo W D, Li F, Sun B G, et al. MHD control of weakly ionized plasma jet flows [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(9): 1758-1764 (in Chinese).

行器/发动机结构紧凑化设计. 因此 MHD 控制技术在将来有广阔的发展空间<sup>[10-12]</sup>.

# 1 MHD 控制理论

## 1.1 MHD 控制等离子体流动原理

运用 MHD 原理,通过电磁场向喷流场内输入电磁能量,当气流充分电离后,磁场对垂直流过的带电粒子产生洛仑兹力,洛仑兹力提供了带电粒子做回旋运动的向心力. 由于磁场中正离子与分子是流体质量的主体,所以正离子浓度足够高时,正离子的运动将对流体运动起主导作用,宏观气流运动状态主要由正离子运动状态决定. 正离子在洛仑兹力作用下偏转运动,与水平向前运动的分子和中性粒子发生碰撞,进行能量和动量运输. 碰撞之后的正离子在磁场作用下继续偏转运动,分子和中性粒子则获得偏转方向的动量,沿着偏转方向运动. 由于电子的质量非常小,碰撞过程中的动量和能量运输相当有限,可以忽略不计. 所以喷流内部带电粒子间,及带电粒子与中性粒子间相互吸引的内力耦合作用,对喷流形成了偏转诱导力及偏转力矩,使射流偏离轴心方向,形成射流偏角,产生推力矢量效用. MHD 流动控制原理如图 1 所示.



F—电磁力; B—磁场; J—感生电流; V—来流速度.

图 1 MHD 流动控制原理简图

Fig. 1 MHD flow control principle schematic

气体在高温中电离,形成带电粒子. 电离度可以评估气体的电离能力,定义为单位体积中电离气体粒子数量  $n_i$  与中性粒子数量  $n_n$  的比值. 电离度  $\alpha$  由萨哈方程给出:

$$\alpha = \frac{n_i}{n_n + n_i} \approx \frac{n_i}{n_n} = 3 \times 10^{15} \frac{T^{3/2}}{n_i} \exp(-E_i/T) \quad (1)$$

式中:  $E_i$  为电离能;  $T$  为总温. 在温度为 300 K 时,空气的电离度仅为  $10^{-122}$ ; 当温度达到 11 600 K 时,空气电离度达到  $10^{-3}$ ,近似于等离子体,而且能够表现出等离子体状态时的电磁特性,其导电

能力可以用电导率  $\sigma$  表示:

$$\sigma = \frac{ne^2(m_e + m_i)}{m_e m_i v_{ei}} \approx \frac{ne^2}{m_e v_{ei}} \quad (2)$$

$$v_{ei} = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{4\sqrt{2\pi}n_e Z_e^4 \ln \Lambda}{3m_e^{1/2} T_e^{3/2}} \quad (3)$$

$$\ln \Lambda = \ln\left(\frac{4\pi(\epsilon_0 T)^{3/2}}{e^3 n^{1/2}}\right) \quad (4)$$

式中:  $n$  为单位体积中电子数目;  $e$  为电子带电量;  $m_e$  为电子质量;  $m_i$  为中子质量;  $v_{ei}$  为电子和中子的平均碰撞频率;  $\epsilon_0$  为介电常数;  $T_e$  为电子温度, eV;  $Z_e$  为离子电荷数;  $\Lambda$  为等离子体参数.

## 1.2 低温微电离等离子体的实现

航空发动机尾喷燃气温度一般低于 2 500 K,在这种温度下,燃气电离度很小,不具有导电特性. 为了将此温度范围的燃气转化为磁流体,在电磁场作用下改变气流的运动状态,设计了发动机燃烧室试验台,组成磁流体推力矢量控制系统. 通过向喷流中添加低电离能的化学物质作为电离种子来提高气体的总体电离度<sup>[13]</sup>.

电离能  $E_i$  随原子序数  $Z$  的周期性变化规律如图 2 所示. 在元素周期表里碱金属的电离能最小,所以着重对其电化学性质进行研究.

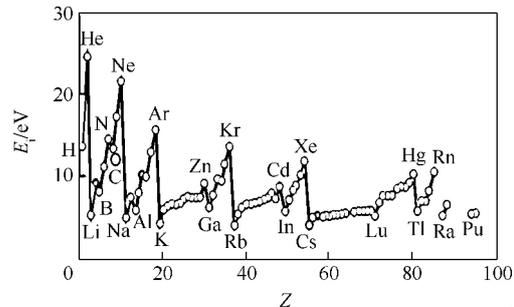


图 2 电离能周期性变化规律

Fig. 2 Ionization energy cyclical change rules

表 1 为碱金属的相关电化学性质. 由表 1 可知,碱金属的标准电极电势都在 -3.000 V 左右,表明其单质很容易失去电子. 而且随着核电荷数增加,电离能和电子亲和能不断递减,说明失去电子的能力不断增强.

表 1 碱金属的相关电化学性质

Table 1 Electrochemical properties of alkali metal

素	第一电离能/eV	标准电极电势/V	电子亲和能/eV
Li	526.41	-3.040	59.6
Na	502.04	-2.714	52.9
K	425.02	-2.936	48.4
Rb	409.22	-2.943	46.9
Cs	381.90	-3.027	45.5

虽然碱金属元素电离(换算温度在 10 000 K 以上)仍远大于高超声速飞行条件下流场特征温

度,但由于粒子的能量由图3所示的Maxwell-Boltzman分布函数描述,因此会有一小部分碱金属盐类粒子的能量超过其自身电离电位,少量碱金属盐类发生电离释放出自由电子,使气流宏观上呈现为弱电离等离子体,从而在较低温度条件下达到等离子状态.碱金属单质化学性质不稳定,因此选取碱金属盐  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  作为催化电离种子添加剂.在高温燃气中  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  反应过程为

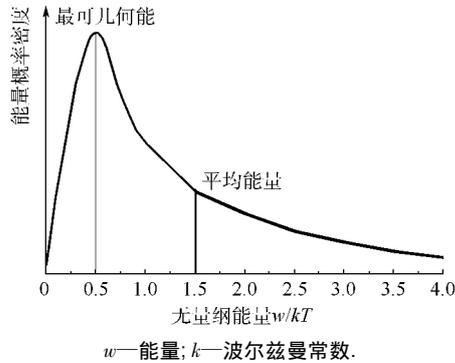
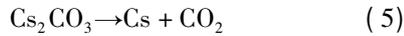


图3 Maxwell-Boltzman 能量分布函数

Fig. 3 Maxwell-Boltzman energy distribution function

## 2 等离子体射流偏转的试验研究

### 2.1 试验装置

MHD 控制推力矢量试验台如图4所示,主要包括:高温燃烧室、矩形截面喷管和电磁控制组件.



图4 MHD 控制推力矢量试验台

Fig. 4 MHD control thrust vector test rig

考虑到电离平台需要营造高温环境和试验段的绝缘要求,燃烧系统必须进行有效地冷却而又不破坏试验系统的绝缘性,鉴于冷却系统的复杂性,特别是冷却系统将会降低喷管近壁流体的温度,从而减弱喷流的电离度,所以在试验设计过程中燃烧室、喷管和试验段均采用双层套管结构,内层为磁阻很小的耐高温陶瓷衬套,用于降低试验系统的冷却和绝缘要求;外层为不导奥氏体不锈钢,起到固定和连接陶瓷试验件的作用.其中,喷管出口截面尺寸为  $60\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ ,磁场由喷管周

围高强磁性的钕铁硼永磁体提供,两块磁板之间距离  $100\text{ mm}$ ,壁面中心附近磁场强度为  $0.5\text{ T}$ .在试验段侧壁安装热电偶温度测量系统和信号采集系统,通过监测主流温度调节燃油供应量,并观察壁面电压信号.进口速度为  $105 \sim 115\text{ m/s}$ ,环境压力为  $1.04 \times 10^5\text{ Pa}$ ,出口温度在  $1600 \sim 2500\text{ K}$  之间.磁控推力矢量试验简图如图5所示.

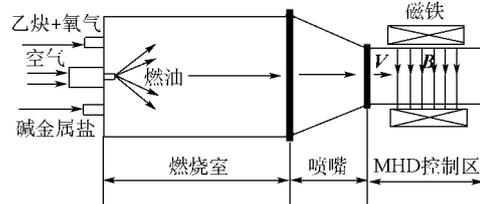


图5 磁控推力矢量试验简图

Fig. 5 Magnetic control thrust vector test schematic

### 2.2 试验方法

试验过程中,气源由一台流量为  $0.25\text{ kg/s}$ 、最高压力为2个大气压的压气机提供,气流经管道流入燃烧室头部稳压腔,经各个气流孔进入燃烧室.点燃的4只火焰枪可以作为燃油的点火源,同时形成一个高温区(在加注燃油之后此区域最高温度超过  $2500\text{ K}$ ).电离种子被吹入燃烧室之后,在该区域迅速气化电离,形成磁流体从喷管喷出.试验过程主要为:

- 1) 打开氧气乙炔阀门,启动点火器电源,点燃乙炔高温割据枪,调节乙炔和氧气流量,使火焰达到最佳高温状态.
- 2) 点燃4只高温火焰枪之后,启动空气压气机,向燃烧室输入空气,然后启动空气压气机,调节压气机流量,使温度稳定在  $1400 \sim 1500\text{ K}$  范围内.
- 3) 打开燃油阀门,向燃烧室内喷注燃油,调节供油量,根据不同的试验工况,控制出口温度在  $1800 \sim 2500\text{ K}$  之间.
- 4) 打开种子粉末试验瓶气源,将粉末吹入燃烧室,进行分解电离反应,控制调节  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  粉末供应量.

### 2.3 试验结果及分析

#### 2.3.1 电离种子对射流状态影响

比较图6和图7可以看出,在外加磁场作用下,当不添加电离种子时,尾喷流在喷出后沿着出口轴线平直状态延伸,喷流火焰状态基本稳定;当添加电离种子后,尾喷流在磁场作用下偏离喷管中心轴线,形成一定角度的射流偏转.金属铯的质量分数为  $2.5\%$  时,如果只是其本身发生了电离,根据离子碰撞理论可以求出在一个大气压,  $2400\text{ K}$  条件下,燃气电离度只有  $8.23 \times 10^{-14}$ ,则在电磁场中由离子引起的的动量交换不足以改变

主流的动量运输,不能实现主流偏转.这说明当  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  电离种子进入高温燃烧室之后,强化了燃气电离特性,形成中性离子、电子和离子组成的“低温”等离子体,燃气电离度达到可观的  $10^{-4} \sim 10^{-3}$ . 燃气等离子体流经试验段时,在磁场作用下呈现出 MHD 流动控制效果.

从粒子电性角度来看,正离子数密度大于电子数密度;从粒子质量角度来看,正离子和负离子质量远大于电子质量.这就决定了正离子主要承担动量运输的功能,而电子主要起到运输电量的作用.前者主要表现为 MHD 作用下射流偏转现象,后者可以从 MHD 能量提取过程中捕获到的电压信号中得以说明.



图 6 出口温度 2400 K 无种子时尾流形状

Fig. 6 Plume shape without seed at 2400 K of outlet

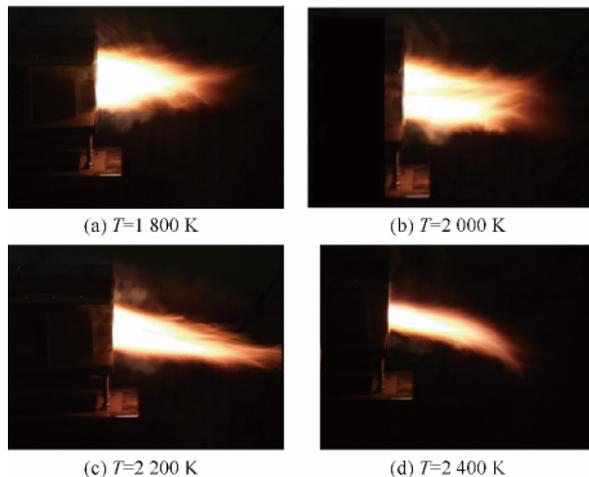
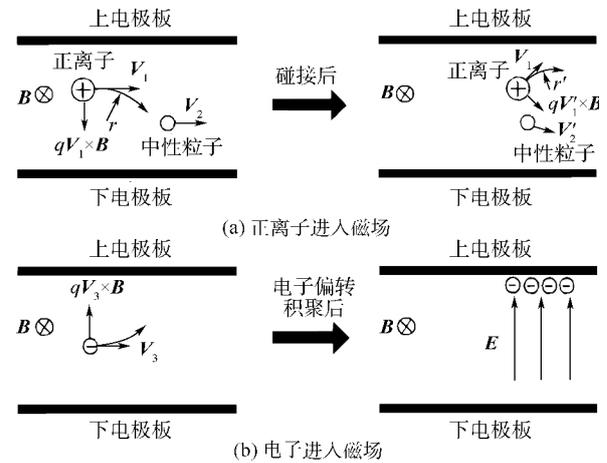


图 7 种子含量 2.5% 时不同温度下尾流形状

Fig. 7 Plume shape with 2.5% seed at different temperature

当正离子进入磁场时,在洛伦兹力作用下不断地旋转运动、碰撞传递动量,使中性离子整体呈

现向下偏转的流动特征,如图 8(a) 所示.当电子进入磁场时,在洛伦兹力作用下沿逆时针方向做旋转运动.由于电子的质量远小于正离子质量,所以它的旋转半径也远小于正离子的旋转半径,这导致电子将积聚在上电极板上游附近,而正离子将积聚在下电极板下游附近(大部分正离子被其他质量较大的离子夹带处试验段),将形成感生电场,变现为图 8(b) 所示的电压信号.感生电场将对正离子的旋转运动产生一定的抑制作用,但是在无外加电场的情况下,感生电场较弱,等离子体运动状态主要由洛伦兹力决定.



$V_1, V_1'$ —正离子在与中性粒子碰撞前后的速度;  $V_2, V_2'$ —中性粒子在与正离子碰撞前后的速度;  $V_3$ —电子速度;  $E$ —电场强度;  $qV_i \times B$ —洛伦兹力  $i=1, 2, 3$ ;  $q$ —带电粒子电荷量;  $r, r'$ —正离子进入磁场前后的轨道半径.

图 8 等离子体在磁场中的受力分析

Fig. 8 Force analysis of plasma in magnetic field

### 2.3.2 温度对射流状态影响

当温度低于 1800 K 时,尾喷流沿中心轴线对称分布,火焰表面有明显的颤动和破裂现象,但没有明显的偏折运动;当喷流温度高于 2000 K 时,火焰表面变得光滑,火焰面被逐渐压缩,尾喷流在磁场作用下逐渐偏离喷管中心轴线,向主流靠拢,形成一定角度的偏转射流.结合表 2 中试验参数之间的关系可以看出,随着温度升高,燃气等离子体的电离特性增强,燃气中离子浓度增大,电导率量级明显增加,磁流体喷流所受磁场力增大,使得射流偏转角度增大.

表 2 试验参数

Table 2 Parameters of test

温度 / ( $10^3 \text{K}$ )	燃油流量 / ( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ )	乙炔流量 / ( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ )	氧气流量 / ( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ )	空气流量 / ( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ )	电离度	电导率 / ( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )	矢量角 / ( $^\circ$ )
1.8	2.08	7.5	28.2	75.2	$10^{-7}$	10.1	0
2.0	2.95	7.5	28.2	75.2	$10^{-6}$	32.5	3.7
2.2	3.80	7.5	28.2	75.2	$10^{-5}$	111.9	6.8
2.4	4.74	7.5	28.2	75.2	$10^{-4}$	204.7	11.1

### 2.3.3 磁场方向对射流状态影响

在出口温度为 1800 K 条件下改变磁场方向,保持其他参数不变,比较图 7(b) 与图 9 的火焰形状可以看出,火焰偏转方向随着磁场方向的改变而改变,均向着磁场负极方向偏转.因为磁场方向改变,由洛伦兹力提供磁流体偏转所需的向心力也随之发生改变.



图9 出口温度 2000 K 电离种子含量 2.5% 磁场反向时尾流形状

Fig.9 Plume shape with 2.5% seed at 2000 K of outlet and reverse magnetic field

## 3 等离子体射流偏转的数值模拟

### 3.1 控制方程

在 MHD 作用下,等离子体同时服从电磁场方程和流体力学方程,完整的磁流体力学 Navier-Stokes 方程<sup>[14-15]</sup>为

连续方程:

$$\rho \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

动量方程:

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla P + \nabla \cdot (2\mu_t \mathbf{S}) - \frac{2}{3} \nabla(\mu_t \nabla \cdot \mathbf{V}) + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

能量方程:

$$\rho \frac{d\varepsilon_t}{dt} = -p \nabla \cdot \mathbf{V} + \Phi + \mu_t (\nabla \cdot \mathbf{V})^2 + \lambda_t \nabla T^2 + \frac{J^2}{\sigma}$$

状态方程:

$$p = \rho RT$$

麦克斯韦:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

方程:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_t \mathbf{J} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned}$$

欧姆定律:

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$$

其中:  $\rho$  为介质密度;  $t$  为时间;  $p$  为压强;  $R$  为摩尔体积常数;  $\mu_t$  为黏度系数;  $\mathbf{P}$  为应力张量;  $\Phi$  为耗散系数;  $\nabla$  为哈密顿算子;  $\varepsilon_t$  为内能;  $\mathbf{J}$  为电流密度;  $\mathbf{S}$  为变形速率;  $\lambda_t$  为热传导系数.

### 3.2 计算域和网格

计算模型为常规二元喷管,长 100 mm,横截面积为 60 mm × 45 mm,计算域网格如图 10 所示.在试验过程中,燃烧只是为了营造燃气电离的高温环境,形成等离子体,对计算 MHD 控制等离子体流动本质并没有影响.所以,为了消除燃烧模型在计算过程中带来的误差,直接给定燃气温度为 2400 K,所以计算域只选取喷管、试验段和远场.喷管壁面考虑附面层影响,划分边界层.在喷管出口速度梯度较大区域,适当加密网格.网格无关性分析之后,计算域全部用六面体正交网格,网格总数为 120 万.

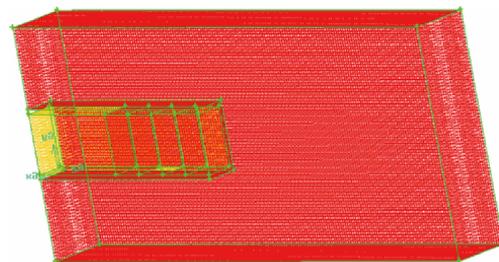


图10 计算域整体网格

Fig.10 Global grid of computational domain

### 3.3 边界条件和流动模型

应用流体动力学(CFD)软件 FLUENT 来模拟复杂流动现象,通过用户自定义函数(UDF)加载 MHD 模型解三维 Navier-Stokes 方程,选择标准  $k-\varepsilon$  模型模拟湍流现象,二阶迎风格式离散偏微分方程组.喷管进口为速度入口,具体参数如表 3 所示;出口和侧壁设为压力远场,温度为 300 K,压力为 101 325 Pa.磁场区域宽 40 mm,近壁面磁场强度峰值  $B_{max} = 0.5$  T.

表3 进口边界条件

Table 3 Inlet boundary condition

进口边界条件	速度 / (m · s <sup>-1</sup> )	温度 / K	电导率 / (S · m <sup>-1</sup> )	磁场强度 / T
数值	110	2400	200	0.5

### 3.4 计算结果分析

根据图 11 和图 12 所示的 MHD 作用下的速度和温度分布云图可见,由于在燃气中添加了一定浓度的碱金属电离种子,2400 K 时燃气形成临界等离子体态,具有磁流体的电磁特性.在 MHD 控制系统作用下,受到流体运动偏转的向心力,当其喷出喷管时产生了偏转.图 13 MHD 作用下的

速度矢量图中,由于喷管出口上下壁面间的压差,在靠近磁场负极(上壁面)区域形成低速阻流区域,靠近正极(下壁面)区域流速增大,逐渐产生射流偏转。

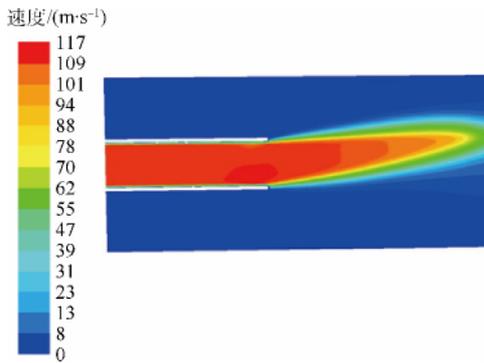


图 11 MHD 作用下速度云图

Fig. 11 Velocity contours with MHD

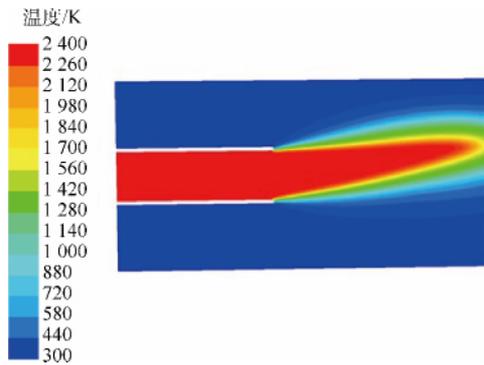


图 12 MHD 作用下温度云图

Fig. 12 Temperature contours with MHD

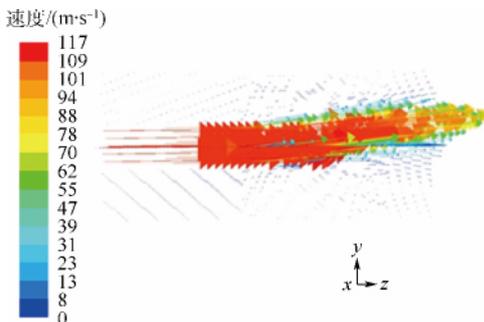


图 13 MHD 作用下速度矢量分布

Fig. 13 Velocity vector distribution with MHD

## 4 结 论

提出了一种低温状态下(2500 K 以内) MHD 控制微电离等离子体射流,实现推力矢量的本文方法.分析了磁流体动力学的理论基础,并进行了等离子体射流偏转的数值模拟和试验研究.结果表明:

1) 在 2400 K 的低温条件下,燃气的电离度很低,不具有电磁特性;添加低电离能催化种子使得燃气电离度达到可观的  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  量级,燃气

接近等离子体状态,显示出电磁特性。

2)  $\text{CS}_2\text{CO}_3$  诱导燃气等离子体在温度高于 1800 K 以后逐渐表现出电离特征,而且燃烧温度越高,电离特征越明显,射流的偏转角度越大。

3) 变换磁场 N-S 级方向,高温磁流体射流偏转方向发生相应改变,说明理论分析中带电粒子所受洛伦兹力的分析及喷流中质量远大于电子的正离子所受的磁场力主导射流运动的分析是合理的。

4) 等离子体流动偏转的试验结果与数值模拟结果在一定程度上是一致的,说明用数值模拟 MHD 流动控制具有一定的可信度。

## 参考文献 (References)

- [1] 郑春开. 等离子体物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 70-76.  
Zheng C K. Plasma physics [M]. Beijing: Higher Education Press 2009: 70-76 (in Chinese).
- [2] Sergey O M, Ikhail N S, Richard B M, et al. Magneto-hydrodynamic and electrohydrodynamic control of hypersonic flows of weakly ionized plasmas, AIAA-2004-0427 [R]. Reston: AIAA, 2004.
- [3] Peter P, Rodney M, Elke P, et al. MHD effect on a supersonic weakly ionized flow [C] // 33rd Plasmadynamics and Lasers Conference. Reston: AIAA, 2002: 2002-2246.
- [4] Murray R C, Vasilyak L, Carraro M R, et al. Observation of MHD effects with nonequilibrium ionization in cold supersonic air flows, AIAA-2004-1025 [R]. Reston: AIAA, 2004.
- [5] Kuranov A L, Sheikin E G. MHD control on hypersonic aircraft under AJAX concept: Possibilities of MHD generator [C] // AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 2002: 14-17.
- [6] Vatazhin A, Kopchenov V, Gousskov O. Some estimations of possibility to use the MHD control for hypersonic flow deceleration, AIAA-1999-4972 [R]. Reston: AIAA, 1999.
- [7] Lineberry J T, Begg L L, Castro J H, et al. Scramjet driven MHD power demonstration: HVEPS project overview, AIAA-2006-8010 [R]. Reston: AIAA, 2006.
- [8] Corke T C, Jumper E J. Application of weakly-ionized plasmas as wing flow-control, AIAA-2002-0305 [R]. Reston: AIAA, 2002.
- [9] 李益文, 李应红, 张百灵等. 基于激波风洞的超声速磁流体动力技术实验系统 [J]. 航空学报, 2011, 32(6): 1015-1024.  
Li Y W, Li Y H, Zhang B L, et al. Supersonic magnetohydrodynamic technical experimental system based on shock tunnel [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(6), 1015-1024.
- [10] Mikhail N S, Sergey O M. Hypersonic aerodynamic control and thrust vectoring by nonequilibrium cold-air MHD devices [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(3): 490-497.
- [11] Macheret S O, Shneider M N, Miles R B. Magneto-hydrodynamic control of hypersonic flows and scramjet inlets using electron beam ionization [J]. AIAA Paper 2002(40): 74-81.

- [12] 赵青. 等离子体技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 56-62.  
Zhao Q. Plasma technology and its applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press 2009: 56-62( in Chinese) .
- [13] Sun B G ,Li F ,Yang H. Experiment investigation of plasma plume deflection with MHD[C] // Proceedings of International Conference on Electronics and Optoelectronics. Piscataway ,NJ: IEEE Press 2011 ,1: 142-145.
- [14] Sun B G ,Yang H ,Liu Y B. Numerical investigation of plasma plume deflection with MHD control [J]. Advanced Materials Research 2012 ,588-589: 1372-1375.
- [15] Sun B G ,Li F ,Zhang S S ,et al. Numerical investigation of plasma active flow control[J]. Plasma Science and Technology , 2010 ,12( 6) : 723-728.

## MHD control of weakly ionized plasma jet flows

LUO Weidong<sup>1</sup> , LI Feng<sup>\* 1</sup> , SUN Baigang<sup>2</sup> , ZHAO Kai<sup>1</sup> , XIONG Yiwei<sup>1</sup> , WANG Changsheng<sup>1</sup>

( 1. School of Energy and Power Engineering , Beijing University of Aeronautics and Astronautics , Beijing 100191 , China;

2. Air Force Command College , Beijing 100097 , China)

**Abstract:** In order to study the feasibility of the thrust vectoring using magnetohydrodynamic( MHD) control weakly ionized plasmas at low temperature , the experimental method based on the MHD control plasma flow theory was put forward. We established a MHD flow control experiment platform of seeds ( alkali metal salts) induced gas ionization to research jet deflection vector angle under the condition of different temperature and different magnetic direction , and explored the feasibility of the numerical study MHD control by user defined function ( UDF) loading the MHD model to solve the three-dimensional Navier-Stokes equations. It is demonstrated that injecting low ionization energy seed into the combustor can induce gas ionization , forming magnetic liquid and achieving thrust vector control under magnetic field; the numerical simulation results and experimental results of plasma flow deflection are consistent , meaning numerical simulation MHD flow control has a certain credibility.

**Key words:** magnetohydrodynamic ( MHD) ; plasma; induced ionization; thrust vectoring; numerical simulation