

# 基于碱金属辅助电离的双锥标模 MHD 实验流场数值分析\*

罗仕超 何林 孔小平 龚红明 常雨†

(飞行器流体物理全国重点实验室, 绵阳 621000)

(2025 年 12 月 5 日收到; 2026 年 1 月 12 日收到修改稿)

临近空间高速飞行器正不断突破现有飞行边界, 伴随存在高焓激波/边界层干扰现象, 威胁飞行器飞行安全. 磁流体控制技术在相关领域具备潜在的应用前景, 膨胀管是少数几种能模拟相关流动状态的地面设备之一. 基于多组分热化学非平衡 MHD 数值模型, 针对膨胀管高焓条件下双锥标模流动开展了系统的数值研究, 分析了碱金属“种子粒子”对 MHD 流动控制效果的影响. 研究表明: 建立的数值计算方法能准确模拟不同焓值来流状态下双锥复杂激波/边界层干扰流动; 双锥标模三波交汇点附近及激波-激波干扰下游存在明显的热化学非平衡效应, 相关区域流场电导率达到峰值; 膨胀管风洞高焓运行状态, 被驱动段加入碱金属粒子辅助电离, 可显著增强 MHD 控制效果, 质量分数 0.1% “种子粒子”作用下, 分离区尺度变大, 壁面热流密度峰值降低超过 50%, 随着“种子粒子”增加, 磁控性能的提升存在“饱和”现象.

**关键词:** 热化学非平衡, 磁流体动力学, 流动控制, 双锥

**DOI:** 10.7498/aps.75.20251675

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251675

## 1 引言

随着临近空间高速飞行器速度边界、巡弋空间边界的不断突破, 高焓激波/边界层干扰 (shock wave/boundary layer interaction, SWBLI) 流动问题成为近年来研究热点<sup>[1,2]</sup>. 飞行器高马赫飞行时, 由于激波压缩和黏性阻滞产生高温高压的气动热环境, 引起空气分子一系列复杂物理化学反应现象, 例如分子振动激发、离解甚至电离, 产生高温真实气体效应, 改变激波层厚度和激波干扰局部形状, 同时波后化学非平衡流的松弛效应可能导致波后气流速度变化, 显著影响对边界层内的速度剖面及热化学状态, 有必要开展高焓 SWBLI 相关问题研究.

高效主动流动控制技术是提升飞行器综合性能的重要途径, 主要是通过对流体施加质量、动

量、能量等方式来改变其流场结构及流动参数, 从而进一步实现调整气动力/热的目的. 近年来, 随着人工电离技术以及超导磁体技术的突飞猛进, 磁流体流动 (magnetohydrodynamic, MHD) 控制技术迎来了研究热潮, 而高焓 SWBLI 局部“热电离条件”下, 流场周围电导率较高, 为 MHD 控制技术的应用提供了直接工作环境, 相关学者提出了将 MHD 技术应用于控制高超声速激波/边界层相互作用的设想, 并开展了大量的研究<sup>[3]</sup>. 例如, 剑桥大学 Muira 和 Nikiforakis<sup>[4]</sup> 基于 19 组分、单温度 MHD 模型, 分析了磁场配置、半锥角等对双锥标模高焓流场 MHD 控制效果影响机制. 中国科学院力学研究所罗凯等<sup>[5]</sup> 数值研究不同磁场强度、布置方式对高焓双锥分离结构及流场电子数密度分布的影响机理和规律. 结果表明, 逆流洛伦兹力分量的主导作用将扩大电子数密度覆盖区域. 实验方面, 激

\* 四川省科技计划 (批准号: 2024NSFSC1378) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: changyu\_my@163.com

波加热类高焓脉冲风洞是支撑 MHD 控制机理研究的主要地面实验设备. Lefevre 等<sup>[6,7]</sup> 基于 X2 膨胀管风洞开展了一系列高焓流场 MHD 控制实验, 实验工质为空气/氩气, 磁源选用铷铁硼永磁体, 端面峰值磁场强度可达 0.8 T, 在毫秒量级时间内能够发现明显的磁控激波效果. 此外, 该团队开展了 MHD 控制气动力实验研究<sup>[8]</sup>, 建立了相应测力系统, 首次在高焓空气来流中系统验证了 MHD 气动力操控的可行性.

由于空间环境的特殊性, 以及对磁场系统尺寸和重量的限制, 目前国际上主要通过提高空气电导率来增强 MHD 流动控制效果, 常用的人工电离方法有三种<sup>[9]</sup>: 1) 等离子体喷流; 2) 高能电子束诱导电离; 3) “种子粒子”辅助电离. 等离子体喷流高马赫数状态下对飞行器整体力学特性影响较大, 而高能电子束所需功率较高. 因此众多流场电导率增强方案中, 研究最多的是“种子粒子”方案, 以碱金属作为“种子粒子”的方法可以降低混合气体的电离门槛. Braun 等<sup>[10]</sup> 研究表明, 高速飞行器  $H = 30$  km,  $Ma = 16$  的飞行工况, 添加质量分数 0.1% 的钾粒子后, 头部区域弓形激波后的气体电导率可以提高约 20 倍. Macheret 等<sup>[11]</sup> 研究表明使用 1% 钾粒子作为“种子粒子”的方法可以显著增强磁流体发电效率. Bisek 等<sup>[12]</sup> 对浸渍碱金属热解材料方案做过一些 MHD 控制方案研究, 通过表面烧蚀向流场注入碱金属粒子, 进而改变控制区域局部流场电导率, 提高飞行器舵前缘热防护效率. 曾学军和李海燕<sup>[13]</sup> 开展了含碱金属杂质碳酚醛烧蚀对再入飞行器等离子体鞘套电磁参数分布影响研究, 发现烧蚀材料中的碱金属元素电离使等离子体电子数密度增加可达 2—3 个量级.

基于前人的研究成果, 可以看出, MHD 控制技术在高焓 SWBLI 控制的应用中具有广阔的前景, 采用碱金属“种子粒子”显著增强高温流场电导率, 直接影响 MHD 控制效果. 但其内在关键影响因素、影响权重、作用机理等还未被充分认识清楚, 尚不能满足技术有效性评估需求. 亟需结合风洞实验, 多次迭代、验证和改进, 厘清耦合作用规律、提升调控效果. 因此, 本文基于低磁雷诺数假设下的 MHD 五波方程模型, 建立多组分热化学非平衡 MHD 流动数值模拟方法, 针对膨胀管风洞实验流场, 开展双锥标模构型碱金属“种子粒子”干扰下等离子体流场与磁场耦合效应数值模拟研究, 以期高焓 SWBLI 流场 MHD 控制实验方案设计、工程应用提供科学依据和技术支持.

## 2 实验设备及气流参数

### 2.1 高焓膨胀管风洞

膨胀管风洞是目前国内外能够产生超高速实验流场的少数地面实验设备之一<sup>[14]</sup>, 其结构与反射型激波风洞类似, 在激波管被驱动段串联一个等截面的膨胀加速段, 通过主激波波后气体的非正常膨胀使气流速度和焓值进一步提高, 得到高速、高焓实验气流. 中国空气动力研究与发展中心膨胀管风洞 (图 1) 具备第二宇宙速度模拟能力 (模拟来流速度可达 12.0 km/s), 可满足高焓 MHD 流动控制实验研究需求.

### 2.2 喷管出口流场参数

实验设计综合考虑流场重复性, 工况选定电

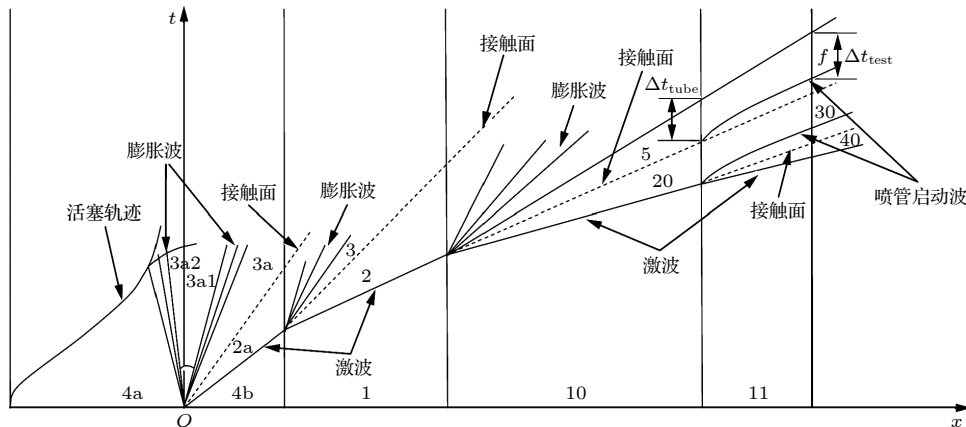


图 1 高焓膨胀管风洞波系示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 1. High enthalpy expansion tunnel<sup>[15]</sup>.

离程度较高的 8.96 km/s 来流条件, 如表 1 所列. 流场校测测量得到的排架不同位置测点皮托压力曲线如图 2 所示, 图中双竖线之间为有效实验流场并标注了有效实验时间值, 双竖线之前曲线流场为喷管启动流场及膨胀加速段气体形成流场. 流场有效实验时间约为 200  $\mu\text{s}$ ; 有效实验时间内, 皮托压力曲线平直, 各传感器曲线一致, 说明流场均匀性良好, 后续 MHD 计算分析选用该工况自由流参数.

表 1 高焓实验流场参数

Table 1. Flow field parameters of high enthalpy experiment.

参数	符号	值
速度/( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$V_\infty$	8.96
来流温度/K	$T_\infty$	1011
静压/Pa	$P_\infty$	102.5
马赫数	$Ma$	13.51
来流密度/( $10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\rho_\infty$	3.102
总焓/( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$H_0$	43.47

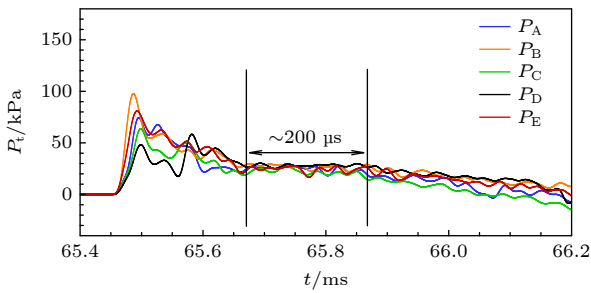


图 2 喷管出口皮托压力测量曲线

Fig. 2. Pitot pressure history at the exit of expansion nozzle.

### 3 数值计算方法及验证

#### 3.1 多组分 MHD 控制方程

磁雷诺数可以定义为  $R_m = V_\infty L \varepsilon_0 \sigma$ , 其中,  $L$  为参考特征长度,  $V_\infty$  代表自由流速度,  $\varepsilon_0$  为真空磁导率,  $\sigma$  代表流场电导率. 文献 [4,16] 指出, 高焓等离子体通常处于低磁雷诺数状态, 即  $R_m \ll 1$ . 与施加的磁场相比, 电流密度感应的感应磁场足够小, 可以忽略不计. 低磁雷诺数假设下, 考虑电磁效应、振动激发与化学反应的轴对称守恒形式 MHD 流动方程 [17-19] 如下:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial r} + \frac{\mathbf{G}}{r} = \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial r} + \frac{\mathbf{G}_v}{r} + \mathbf{W} + \mathbf{S}_{\text{MHD}}, \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{G}$  为对流通量矢量;  $\mathbf{F}_v$ ,  $\mathbf{G}_v$  代表黏性通

量矢量;  $\mathbf{W}$  为化学反应和振动能量源项矢量 [20], 外加磁场后附加了一个电磁源项  $\mathbf{S}_{\text{MHD}}$ ,

$$\mathbf{W} = (\dot{\omega}_s, 0, 0, 0, 0, S_v)^T, \quad (2)$$

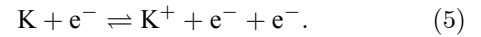
$$\mathbf{S}_{\text{MHD}} = [0, (\mathbf{J} \times \mathbf{B})_x, (\mathbf{J} \times \mathbf{B})_r, \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}, \gamma_{\text{ev}} \mathbf{J} \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})]^T, \quad (3)$$

其中  $\dot{\omega}_s$  代表组元的质量生成率,  $S_v$  为振动能量源项,  $\mathbf{u}$  为速度矢量,  $\mathbf{E}$  为电场强度矢量,  $\mathbf{J}$  为电流密度矢量,  $\mathbf{B}$  为磁场强度矢量,  $\gamma_{\text{ev}}$  表征不同非平衡模式间的电磁能量分配 [18],  $\gamma_{\text{ev}} \in [0, 1]$ . 流场求解中热力学模型采用双温度模型, 化学反应模型为 Gupta 11 组元 20 反应模型 [21].

添加碱金属“种子粒子”后, 需额外耦合求解一个组分方程 [22], 张量形式如下:

$$\frac{\partial \rho_{\text{seed}}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{\text{seed}} u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \left( \rho D_{\text{seed}} \frac{\partial c_{\text{seed}}}{\partial x_j} \right)}{\partial x_j}, \quad (4)$$

式中,  $\rho_{\text{seed}}$ ,  $c_{\text{seed}}$  和  $D_{\text{seed}}$  分别代表碱金属“种子粒子”的密度、质量分数和扩散系数. 碱金属粒子通常选用 K 原子, 电子与 K 原子碰撞电离反应方程为



引入广义欧姆定律, 电流密度矢量为

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}). \quad (6)$$

参考文献 [23] 可知, 绝缘壁面条件下, 霍尔效应可忽略. 该假设下, 电磁能量源项为 0, 即流动功全部转化为焦耳热耗散, 即  $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = 0$  [24,25]. 丁明松等 [26] 指出对于含多种离解、电离组分的高温气体流动来说, 采用基于多电离组分迁移碰撞的电导率模型, 计算与试验一致性最好, 故本文电导率由 Fujino [27] 拟合模型求得, 表达式为

$$\sigma = \frac{n_e e^2}{m_e \sum_{i \neq e} v_{e,i}}, \quad (7)$$

其中  $m_e$  代表电子质量,  $e$  为电子电量,  $n_e$  为电子数密度,  $v_{e,i}$  代表电子与其他粒子的有效碰撞频率.

电子与离子碰撞时, 碰撞频率为

$$v_{e,s} = 6\pi \left( \frac{e^2}{12\pi\varepsilon_0 k_B T_v} \right)^2 \ln \left[ 12\pi \left( \frac{\varepsilon_0 k_B}{e^2} \right)^{1.5} \sqrt{\frac{T_v^3}{n_e}} \right] \times n_s \sqrt{\frac{8k_B T_v}{\pi m_e}}. \quad (8)$$

电子与中性粒子碰撞时, 碰撞频率为

表 2 LENS-XX Run 1—Run 4 自由流工况<sup>[29]</sup>

Table 2. Freestream conditions for the LENS-XX Run 1—Run 4.

工况	$Ma_\infty$	$V_\infty/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$T_\infty/\text{K}$	$\rho_\infty/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	$h_0/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$Re_\infty/(\times 10^5 \text{m}^{-1})$
Run 1	12.20	3.246	175	0.499	5.44	1.4
Run 2	10.90	4.303	389	0.984	9.65	1.9
Run 3	13.23	6.028	521	0.510	18.70	1.1
Run 4	12.82	6.497	652	0.964	21.77	2.0

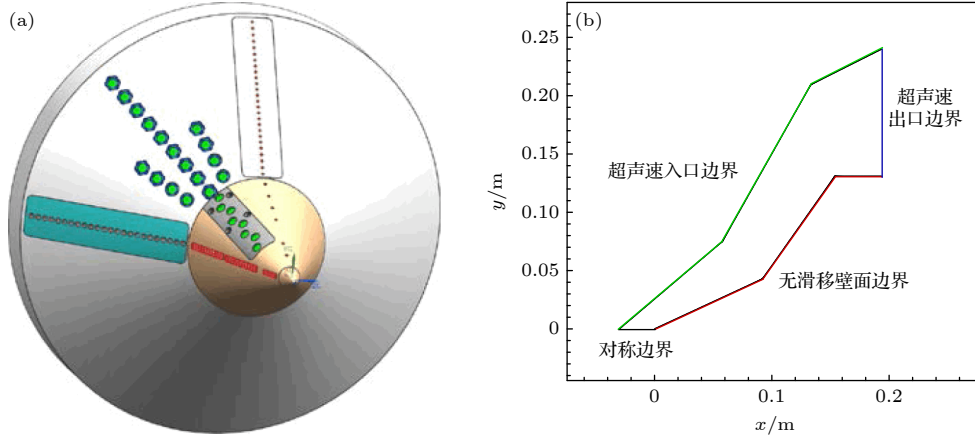


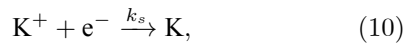
图 3 25°/55°双锥构型模型 (a) 及计算边界条件设置示意图 (b)

Fig. 3. Schematic of the 25°/55° double-cone geometric configuration (a) and boundary conditions (b).

$$v_{e,s} = \frac{4}{3} \sigma_{e,s} n_s \sqrt{\frac{8k_B T_v}{\pi m_e}}. \quad (9)$$

这里,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\sigma_{e,s}$  表示电子-中性粒子有效能量传递截面积,  $k_B$  表示玻耳兹曼常数,  $n_s$  为组分  $s$  的数密度,  $T_v$  为振动温度.

流场外加 K 原子后, 电离反应产生的  $K^+$  在壁面附近催化复合释放热量, 需额外考虑反应 (10):



其中  $k_s$  为化学反应速率常数.

### 3.2 网格无关性分析

尖双锥是高焓 SWBLI 验证确认研究的基准外形之一, 国内外广泛用于考核物理模型和数值方法<sup>[28-30]</sup>. 美国嘉斯班大学布法罗研究中心 Holden 等<sup>[31]</sup> 针对双锥构型在 LENS-XX 膨胀管风洞中开展了系列实验, 测量了不同焓值条件下双锥模型的表面压力及热流, 实验来流条件见表 2, 壁面温度为 300 K, 实验气体为空气. 图 3 给出了 25°/55° 双锥构型尺寸参数, 选定等温壁双锥 Run 3 计算工况进行网格无关性验证.

热化学非平衡流场热流预测结果与第一层网格高度及网格规模密切相关<sup>[32]</sup>. 如表 3 所列, 选用

四套网格, 验证网格无关性, 近壁面区域、拐角区域网格加密. 图 4 和图 5 分别表示不同网格壁面压力、热流分布计算结果, 可以看出, 网格 Case\_M3 与 Case\_M4 网格下的壁面参数计算结果相对误差不超过 1%, 达到网格收敛性要求, 后续计算选用的计算网格为 Case\_M3.

表 3 计算网格

Table 3. Details of grids used for the simulations.

工况	网格规模	法向网格高度 $\Delta n / \text{mm}$
Case_M1	100 × 260	0.1
Case_M2	150 × 390	0.05
Case_M3	200 × 520	0.01
Case_M4	250 × 650	0.005

### 3.3 数值计算方法验证

在以往的工作中, 作者所在研究团队验证了耦合磁场的热化学非平衡流动等计算模块的可靠性<sup>[33,34]</sup>. 本节主要是针对高焓 SWBLI 流场方面的校验. 采用高温热化学非平衡模型对不同总焓 4 个工况均进行了数值模拟, 图 6 为 Run 1—Run 4 工况双锥表面压力、热流计算结果与文献<sup>[31]</sup> 实验结果、文献<sup>[29]</sup> 计算结果的对比. 由图 6 可以看到,

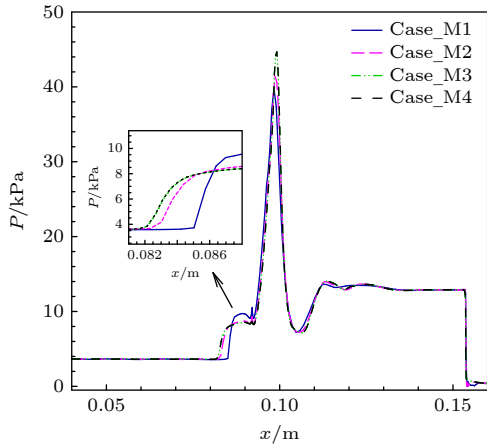


图 4 不同网格尺度下壁面压力分布结果

Fig. 4. Surface pressure distributions with different levels of the grids.

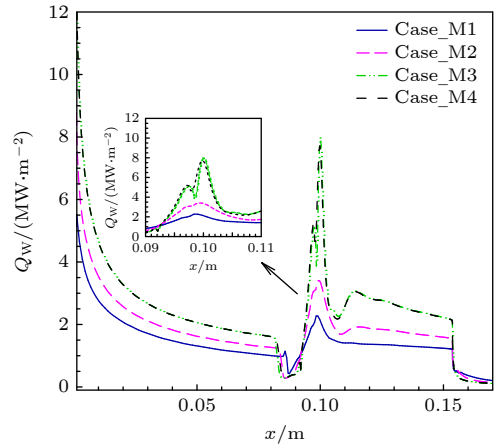


图 5 不同网格尺度下壁面热流分布结果

Fig. 5. Heat flux distributions with different levels of the grids.

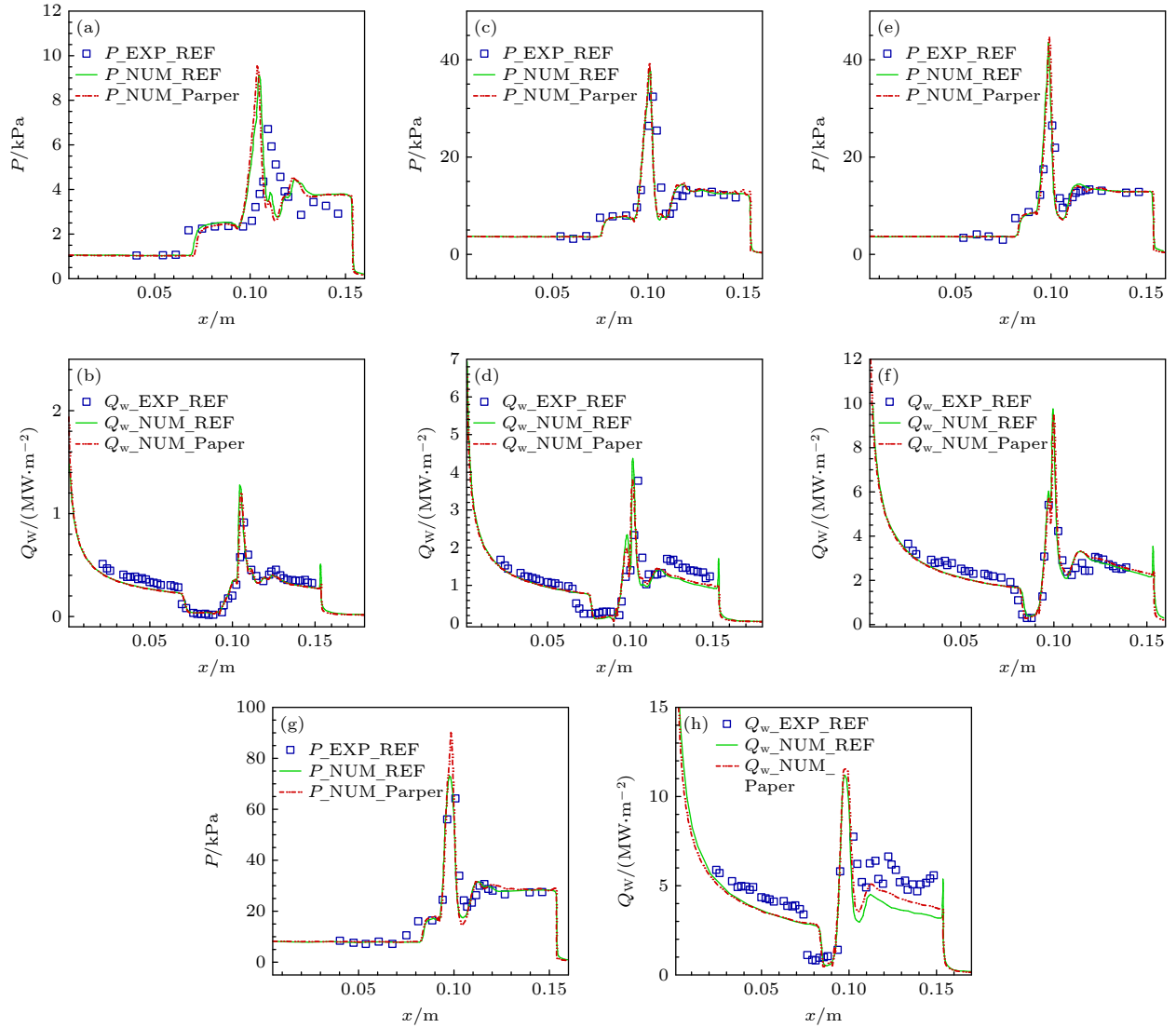


图 6 壁面压力与热流分布 (a), (b) Run 1 壁面压力与热流分布; (c), (d) Run 2 壁面压力与热流分布; (e), (f) Run 3 壁面压力与热流分布; (g), (h) Run 4 壁面压力与热流分布

Fig. 6. Comparison of surface pressure and heat flux: (a), (b) Surface pressure and heat flux of Run 1; (c), (d) surface pressure and heat flux of Run 2; (e), (f) surface pressure and heat flux of Run 3; (g), (h) surface pressure and heat flux of Run 4.

本文程序计算结果与参考文献 CFD 计算结果符合较好, 一定程度验证了程序可用于模拟不同焓值来流状态下双锥复杂激波/边界层干扰流动. 壁面压力及热流峰值计算结果与实验数据总体符合较好, 但高焓工况下分离区大小预测值与实验值相比偏小, 可能是由于测量误差及化学反应模型差异导致<sup>[35]</sup>.

#### 4 碱金属“种子粒子”干扰下 MHD 结果与分析

本节主要针对典型双锥标模构型, 开展实验状态热化学非平衡磁控流场计算对比分析, 用于指导后续风洞实验, 模型表面镀绝缘膜, 计算分析忽略霍尔效应的影响. 图 7 显示了膨胀管风洞高焓实验流场 ( $H_0 = 43.47 \text{ MJ/kg}$ ) 双锥标模马赫数分布云图. 前锥形成前缘斜激波, 后锥由于半锥角较大, 压缩来流产生弓形脱体激波. 前锥产生的斜激波与后锥产生的脱体激波相互干扰并形成局部高压区, 逆压梯度影响下前后锥交接点附近产生流动分离. 分离区下游由于激波干扰, 在三叉点处形成透射激波. 分离区后的流动经过透射激波后, 气流方向偏转打向锥面, 进而产生超音速射流现象.

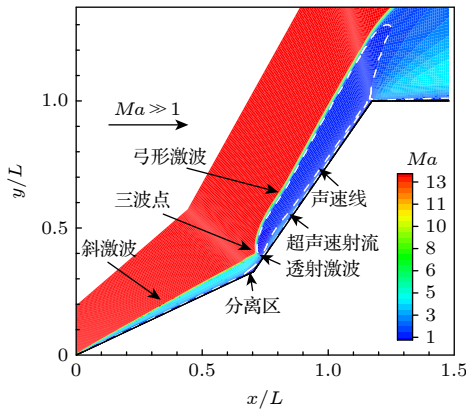


图 7 高焓实验流场双锥标模马赫数分布云图  
Fig. 7. Mach contours of double-cone standard model in high-enthalpy experimental flow field.

图 8 上半部分为膨胀管风洞实验工况 (表 1) 计算得到的平动-转动温度与振动-电子温度差值的云图. 可以看出, 分离区上游区域, 热振动轻微激发, 三波交汇点下游区域存在较大的温度差值, 即存在明显的热力学非平衡效应, 膨胀拐角后缘平动-转动温度低于振动-电子温度. 图 8 下半部分表示的是双锥 NO 质量分数等值线图. 可以看出,

NO 峰值出现在三波交汇点附近及激波-激波干扰下游, 该组分是流动中化学反应的有效标志物, 由氧、氮离解后原子交换反应 (或原子组分直接复合) 生成. 氮气和氧气的离解反应是强吸热过程, 可以降低无反应流动的峰值温度, 但随着流动靠近物面, 温度下降而发生逆向反应, 因此壁面区域 NO 质量分数较低.

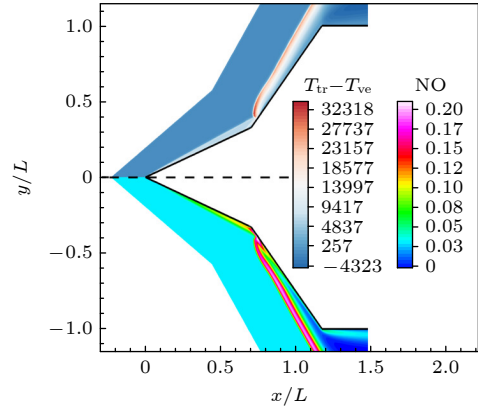


图 8 平动-转动温度与振动-电子温度差值及 NO 质量分数云图  
Fig. 8. Difference between translational-rotational temperature and vibrational-electronic temperature and contours of NO fraction distributions.

基于膨胀管风洞开展高焓流场 MHD 控制实验研究, 有效实验时间为毫秒量级, 模型表面温升较小, 远低于磁铁工作的居里温度, 故磁源可选用钕铁硼永磁体, 端面磁场强度最高可达 0.8 T. 永磁体磁场分布可用磁偶极子磁场表征, 偶极子磁场位于  $x = 0.15 \text{ m}$ ,  $r = 0.0 \text{ m}$  位置, 表达式为

$$B_r = -\frac{B_0}{2(x^2 + r^2)^{3/2}} \frac{3xr}{x^2 + r^2},$$

$$B_x = -\frac{B_0}{2(x^2 + r^2)^{3/2}} \frac{(2x^2 - r^2)}{x^2 + r^2}. \quad (11)$$

图 9 为不同网格尺度下 MHD 流场壁面热流计算结果. 可以看出, 外加磁场计算工况下 Case\_M3 同样满足网格收敛性要求.

磁相互作用参数  $Q_M$  表征洛伦兹力和惯性力的比值, 表达式如下:

$$Q_M = \sigma_{\text{ref}} B_{\text{ref}}^2 L_{\text{ref}} / \rho_{\text{ref}} u_{\text{ref}}, \quad (12)$$

其中  $B_{\text{ref}}$  为特征磁场强度;  $L_{\text{ref}}$  表示模型参考长度;  $\rho_{\text{ref}}$ ,  $u_{\text{ref}}$  分别为喷管出口流场密度、速度;  $\sigma_{\text{ref}}$  表征波后流场电导率. 对于特定的流场, 提高磁控效果主要可通过提高目标控制区域磁场强度和流场电导

率来实现. 受限于目前的磁铁技术, 提高磁场强度的难度更大, 且存在磁体封装、冷却等问题. 因此, 提高MHD 相互作用效果的行之有效的办法是增强空气电导率, 以少量低电离电位的碱金属作为“种子粒子”的方法提高气体电导率. 地面风洞实验中, 可在膨胀管风洞被驱动段气体中添加低电位碱金属(如图 10)作为“种子粒子”的方法, 增强控制效果.

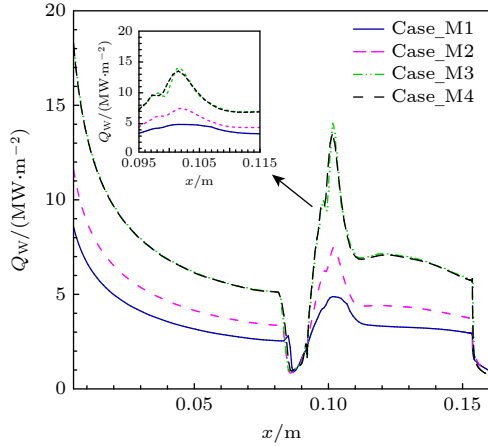


图 9 不同网格尺度下 MHD 流场壁面热流分布结果  
Fig. 9. Heat flux distributions with different levels of the grids with MHD control.

高焓流场经激波压缩热电离形成导电流体, 导电流体与外加磁场相互作用产生洛伦兹力, 主要改

变流场激波三叉点及其下游流动参数, 本节计算结果仅为低  $R_{m}$  近似下的定性趋势分析. 图 11 为“种子粒子”质量分数  $c_{seed} = 0.001$ ,  $B = 0.8$  T 工况与无外加磁场条件下压力、振动-电子温度及 NO 质量分数云图分布对比. 可以看出, MHD 作用下, 激波形状及分离泡大小发生明显变化, 流场高温区增大, NO 质量分数峰值区域随激波面外推.

碱金属粒子对高温等离子体的影响极其显著, 碱金属“种子粒子”与高温流场热电离产生的电子发生碰撞电离反应, 流场中电子数密度迅速升高, 气体电导率增大, 进而导致逆流洛伦兹力峰值急剧升高, 后锥激波面更远离壁面, 显著地影响分离区尺度与壁面热流. 图 12 表示有/无“种子粒子”双锥流场电导率分布. 可以看出, 三波交汇点附近及激波-激波干扰下游流场电导率达到峰值, 当  $c_{seed} = 0.001$  时, 流场电导率峰值约为无种子粒子的 2.5 倍. 图 13 为有/无“种子粒子”双锥流场洛伦兹力矢量分布,  $B = 0.8$  T 有“种子粒子”工况三波点附近洛伦兹力峰值约为无“种子粒子”工况 2.0 倍.

图 14 是有/无“种子粒子”对双锥流场壁面系数分布影响. 相较于外加磁场无“种子粒子”工况, 添加 0.1% “种子粒子”即可显著增强 MHD 控制效果, 分离点向上游移动, 压力平台区变大, 热流密

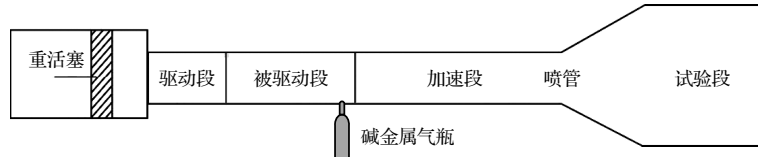


图 10 高焓膨胀管风洞结构  
Fig. 10. Schematic of the high enthalpy expansion tunnel.

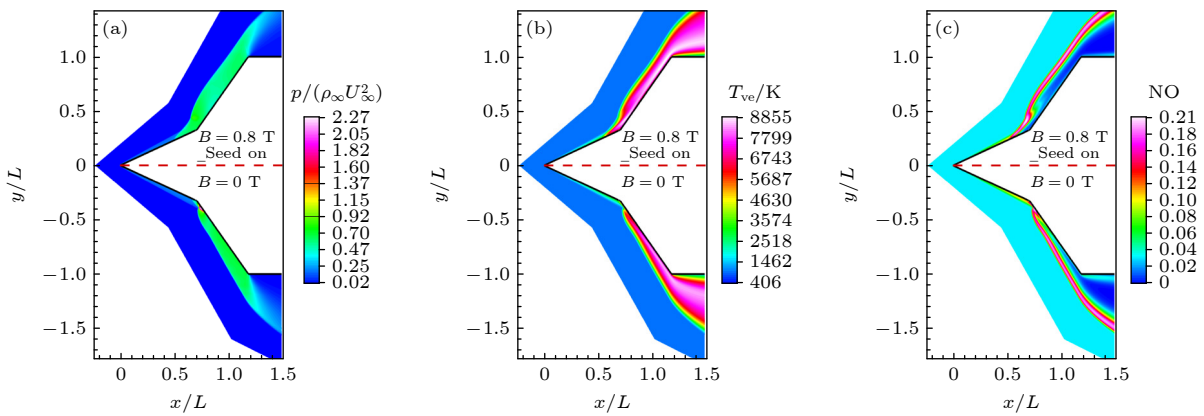


图 11 有/无外加磁场条件下双锥标模流场云图分布对比 (a) 压力云图; (b) 振动-电子温度云图; (c) NO 质量分数分布云图  
Fig. 11. Flow field contour structure induced by a double-cone standard model with or without MHD control: (a) Pressure contour map; (b) vibration-electronic temperature contour map; (c) contour map of NO mass fraction distribution.

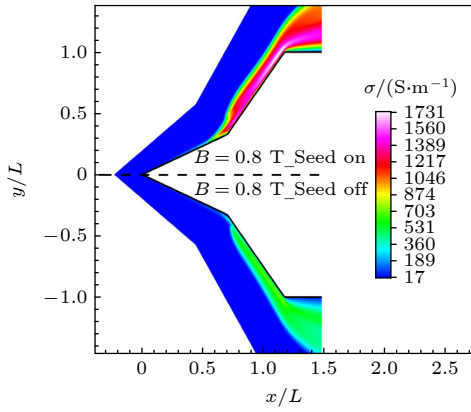


图 12 有/无“种子粒子”双锥流场电导率分布

Fig. 12. Electrical conductivity distribution of flow field of a double-cone standard model with or without the effect of seed particles.

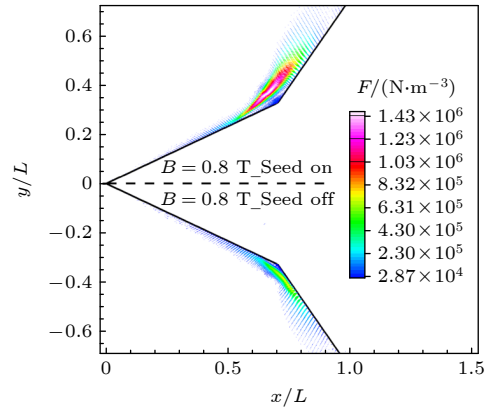


图 13 有/无“种子粒子”双锥流场洛伦兹力矢量分布

Fig. 13. Lorentz force vector distribution of flow field of a double-cone standard model with or without the effect of seed particles.

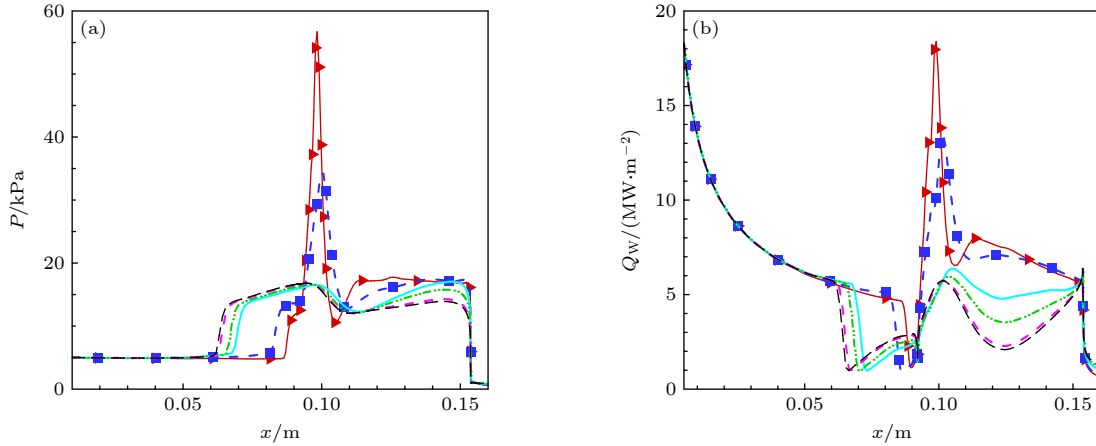
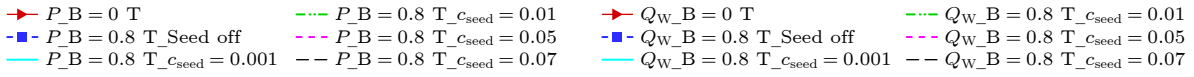


图 14 “种子粒子”对双锥流场壁面系数分布影响 (a) 壁面压力分布; (b) 壁面热流分布

Fig. 14. Wall coefficient distribution of flow field of a double-cone standard model with or without the effect of seed particles: (a) Pressure distribution; (b) heat flux distribution.

度峰值降低超过 50%。更重要的是，磁控性能的提升对于“种子粒子”量存在“饱和”效应，即当  $c_{\text{seed}} = 0.05$  后，继续增加“种子粒子”质量分数，壁面压力及热流变化不大。

## 5 结 论

低磁雷诺数假设下，建立了多组分热化学非平衡流场耦合电磁场数值计算方法，分析了碱金属“种子粒子”干扰下膨胀管风洞实验流场双锥标模 MHD 流动控制效果，研究结果表明：

1) 建立的双温度热化学非平衡数值计算方法能较为准确地模拟不同焓值双锥标模气动环境，壁

面压力、热流计算结果与参考文献计算结果符合较好，验证了程序的可靠性；激波层内热电离导电液体与外加磁场相互作用产生洛伦兹力，改变流场激波三叉点及其下游流动参数。MHD 作用下，激波形状及分离泡大小发生明显变化，流场高温区增大。

2) 膨胀管风洞高焓运行状态，被驱动段加入碱金属粒子辅助电离， $c_{\text{seed}} = 0.001$  时，流场电导率峰值约为无“种子粒子”的 2.5 倍，相应洛伦兹力峰值增加为无“种子粒子”工况 2.0 倍；实验时间为毫秒量级，壁面温升较小，远低于磁铁工作的居里温度，故不需要考虑冷却问题。

3) 添加“种子粒子”显著增强 MHD 控制效果，压力平台区变大；分离点向上游移动，再附点位置

向下游移动, 分离区尺度变大, 热流密度峰值降低. 碱金属“种子粒子”质量分数对于磁控性能的提升存在“饱和”效应. 从经济适用角度考虑, 种子粒子的量为  $c_{\text{seed}} = 0.001$  即可实现较好的 SWBLI 磁控热防护效果.

后续, 研究团队将利用相关设备开展 MHD 流动控制基础实验研究, 获取实验标模, 对高焓磁流体多物理场耦合预测计算程序进行验证, 提升现有模型、手段的预测能力.

## 参考文献

- [1] Dai C L, Sun B, Zhuo C F, Zhuo C S, Yue L J 2022 *Aerosp. Sci. Technol.* **124** 107526
- [2] Hao J, Fan J H, Cao S B, Wen C Y 2022 *J. Fluid Mech.* **935** A8
- [3] Luo S C, Wu L Y, Chang Y 2023 *Aerosp. Sci. Technol.* **132** 108041
- [4] Muira H A, Nikiforakis N 2022 *Phys. Fluids* **34** 107114
- [5] Luo K, Wang Q, Li J P, Zhao W 2020 *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* **43** 727718 (in Chinese) [罗凯, 汪球, 李进平, 赵伟 2020 航空学报 **43** 727718]
- [6] Lefevre A, Gildfind D E, Gollan R J 2021 *AIAA J.* **59** 3228
- [7] Lefevre A, Gildfind D E, Gollan R J 2022 *AIAA J.* **60** 5046
- [8] Smith D R, Gildfind D E, Mee D J 2020 *Exp. Fluids* **61** 180
- [9] Luo S C 2021 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [罗仕超 2021 博士学位论文 (长沙: 国防科技大学)]
- [10] Braun E M, Lu F K, Wilson D R 2008 *39th Plasmadynamics and Lasers Conference* Seattle Washington, USA, June 23–26, 2008 pAIAA 2008–3788
- [11] Macheret S O, Shneider M N, Candler G V 2004 *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* Reno, Nevada, USA, January 5–8, 2004 pAIAA 2004–1024
- [12] Bisek N J, Gosse R, Poggie J 2013 *J. Spacecraft Rockets* **50** 927
- [13] Zeng X J, Li H Y 2017 *J. Astronaut.* **38** 109 (in Chinese) [曾学军, 李海燕 2017 宇航学报 **38** 109]
- [14] Luo S C, Yang Y G, Zhang Z G, Liu J, Wu L Y, Hu S C, Kong X P, Huang C Y 2025 *J. Astronaut.* **46** 1047 (in Chinese) [罗仕超, 杨彦广, 张志刚, 柳军, 吴里银, 胡守超, 孔小平, 黄成扬 2025 宇航学报 **46** 1047]
- [15] Lü Z G, Gong H M, Chang Y, Liao Z Y, Zhong Y 2022 *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* **43** 727729 (in Chinese) [吕治国, 龚红明, 常雨, 廖振洋, 钟涌 2022 航空学报 **43** 727729]
- [16] Ding M S, Jiang T, Liu Q Z, Dong W Z, Gao T S, Fuyang A X 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 134702 (in Chinese) [丁明松, 江涛, 刘庆宗, 董维中, 高铁锁, 傅杨奥骁 2020 物理学报 **69** 134702]
- [17] Lefevre A, Lock S G, Gildfind D E 2025 *J. Spacecraft Rockets* **62** 236
- [18] Sharma V, Giangaspero V F, Poedts S 2024 *Phys. Fluids* **36** 036103
- [19] Li Y, Wang Q, Luo K 2022 *J. Spacecraft Rockets* **59** 1372
- [20] Li K 2017 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [李开 2017 博士学位论文 (长沙: 国防科技大学)]
- [21] Gupta R N, Yos J M, Thompson R, Lee K P 1990 *A Review of Reaction Rates and Thermodynamic and Transport Properties for an 11-species Air Model for Chemical and Thermal Nonequilibrium Calculations to 30000 K* Report No. NASA RP1232
- [22] Tian W 2007 *Ph. D. Dissertation* (USA: University of Minnesota)
- [23] Fujino T, Funaki I, Sugita H 2004 *35th AIAA Plasma dynamics Lasers Conference* Portland, Oregon, USA, June 28–July 1, 2004 pAIAA 2004–2561
- [24] Li K, Liu J, Liu W Q 2017 *Acta Astronaut.* **133** 14
- [25] Li K, Liu W Q 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 064701 (in Chinese) [李开, 刘伟强 2016 物理学报 **65** 064701]
- [26] Ding M S, Jiang T, Liu Q Z, Dong W Z, Gao T S 2019 *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* **40** 123009 (in Chinese) [丁明松, 江涛, 刘庆宗, 董维中, 高铁锁 2019 航空学报 **40** 123009]
- [27] Fujino T, Shimosawa Y 2016 *J. Spacecraft Rockets* **53** 528
- [28] Holloway M E, Chaudhry R S, Boyd I D 2022 *J. Spacecraft Rockets* **59** 389
- [29] Zuo F Y, Hu S L 2021 *Acta Astronaut.* **182** 179
- [30] Hao J, Wang J Y, Lee C H 2017 *AIAA J.* **55** 2471
- [31] Holden M S, Maclean M, Wadhams T P, Durfren A 2013 *21st AIAA Computational Fluid Dynamics Conference* San Diego CA, USA, June 24–27, 2013 pAIAA 2013–2837
- [32] Luo S C, Liu J, Jiang H 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 285502
- [33] Luo S C, Wu L Y, Hu S C, Gong H M, Lü M L, Kong X P 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 024701 (in Chinese) [罗仕超, 吴里银, 胡守超, 龚红明, 吕明磊, 孔小平 2025 物理学报 **74** 024701]
- [34] Luo S C, Hu S C, Liu J, Wu L Y, Kong X P, Chang Y, Lü M L 2024 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **54** 274711 (in Chinese) [罗仕超, 胡守超, 柳军, 吴里银, 孔小平, 常雨, 吕明磊 2024 中国科学: 物理学 力学 天文学 **54** 274711]
- [35] Ray J, Blonigan P, Phipps E T 2023 *AIAA J.* **61** 3298

# Numerical analysis of MHD experimental flow field of double-cone standard model based on alkali-metal-assisted ionization<sup>\*</sup>

LUO Shichao   HE Lin   KONG Xiaoping   GONG Hongming   CHANG Yu<sup>†</sup>

(National Key Laboratory of Aerospace Physics in Fluids, Mianyang 621000, China)

( Received 5 December 2025; revised manuscript received 12 January 2026 )

## Abstract

The development of a new-generation hypersonic vehicle is constantly breaking through the boundary of flight speed and cruising space, experiencing high-enthalpy shock wave/boundary layer interaction (SWBLI) during flight, which poses a serious threat to the vehicle's flight safety. The kinetic energy is transformed into internal energy because of the strong shock wave and viscous retardation created by high-enthalpy SWBLI. These thermochemical non-equilibrium conditions can greatly impact the flow structure and surface properties of the vehicle, which require further investigation. Flow control technology is an important way to improve the comprehensive performance of hypersonic vehicles. Under the local thermal ionization condition of the high-enthalpy SWBLI flow field, the conductivity around the flow field is high, which provides a direct working environment for the application of magnetohydrodynamic (MHD) control technology. An expansion tube is one of the few qualified test facilities on the ground to simulate the hypervelocity high-temperature flow environment. Numerical simulations based on the multicomponent thermochemical non-equilibrium MHD model are adopted to analyze the double-cone standard model flow in an expansion tube under high-enthalpy conditions. The influences of alkali metal "seed particles" on the control effect are discussed. Results demonstrate that the developed numerical calculation method accurately predicts the complex SWBLI flow field of a double-cone under different enthalpy incoming flow conditions. Near the triple point and downstream of shock-shock interference, the intensity of the thermochemical non-equilibrium effect is the strongest, and the conductivity of the flow field in related areas reaches the peak. In the high-enthalpy operation state of expansion tube wind tunnel, adding alkali metal particles to the driven section to assist ionization can significantly enhance the MHD control effect. Under the action of 0.1% "seed particles", the separation zone is increased, and the peak heat flux decreases by about 50%, which meets the engineering application requirements. Moreover, a saturation effect exists in the seeding amount for the MHD control effect.

**Keywords:** thermochemical non-equilibrium, magnetohydrodynamic, flow control, double-cone

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251675](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251675)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251675](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251675)

<sup>\*</sup> Project supported by the Sichuan Science and Technology Program, China (Grant No. 2024NSFSC1378).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [changyu\\_my@163.com](mailto:changyu_my@163.com)

## 基于碱金属辅助电离的双锥标模MHD实验流场数值分析

罗仕超 何林 孔小平 龚红明 常雨

### Numerical analysis of MHD experimental flow field of double-cone standard model based on alkali-metal-assisted ionization

LUO Shichao HE Lin KONG Xiaoping GONG Hongming CHANG Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 091002 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251675

CSTR: 32037.14.aps.75.20251675

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251675>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 壁面催化对高温非平衡流场磁控效果影响分析

Analysis of wall catalytic effects on magnetohydrodynamic control of high-temperature non-equilibrium flow field

物理学报. 2025, 74(2): 024701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241307>

#### 高超声速湍流流动磁流体动力学控制机理

Mechanism analysis of magnetohydrodynamic control in hypersonic turbulent flow

物理学报. 2022, 71(21): 214702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220941>

#### 飞翼模型纵向气动特性等离子体流动控制试验

Experiment on longitudinal aerodynamic characteristics of flying wing model with plasma flow control

物理学报. 2022, 71(2): 024702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211425>

#### 基于变换流体动力学的文丘里效应旋聚器的设计与非互易特性研究

Venturi-effect rotating concentrators and nonreciprocity characteristics based on transformation hydrodynamics

物理学报. 2022, 71(10): 104701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212361>

#### 基于准简谐格林-久保理论结合流体动力学外推方法的非晶二氧化铪导热机制研究

Research on thermal transport mechanism of amorphous hafnia based on quasi-harmonic Green-Kubo theory combined with hydrodynamic extrapolation method

物理学报. 2025, 74(11): 116302 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250350>

#### 激波与轻质气柱作用过程的磁场抑制特性

Magnetic field suppression characteristics in interaction process between shock wave and light gas cylinder

物理学报. 2024, 73(8): 084701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231916>