

等离子体对含硼两相流扩散燃烧特性的影响

张鹏 洪延姬 丁小雨 沈双晏 冯喜平

Effect of plasma on boron-based two-phase flow diffusion combustion

Zhang Peng Hong Yan-Ji Ding Xiao-Yu Shen Shuang-Yan Feng Xi-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 205203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.205203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.205203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

航空发动机喷流起电机理建模与试验研究

Modeling and experimental study of the mechanism of electrification from aero-engine jet

物理学报.2013, 62(22): 225201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.225201>

弱电离子大气等离子体电子碰撞能量损失的理论研究

Theoretical study on the energy loss induced by electron collisions in weakly ionized air plasma

物理学报.2013, 62(20): 205201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.205201>

棒-板电极直流负电晕放电特里切尔脉冲的微观过程分析

Numerical simulation of Trichel pulse characteristics in bar-plate DC negative corona discharge

物理学报.2013, 62(11): 115201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.115201>

流体-亚稳态原子传输混合模型模拟空心阴极放电特性

Simulation of hollow cathode discharge by combining the fluid model with a transport model for metastable Ar atoms

物理学报.2013, 62(11): 115203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.115203>

弱电离子大气等离子体电子能量分布函数的理论研究

Theoretical study on the electron energy distribution function of weakly ionized air plasma

物理学报.2013, 62(1): 015201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.015201>

等离子体对含硼两相流扩散燃烧特性的影响*

张鹏¹⁾ 洪延姬^{1)†} 丁小雨¹⁾ 沈双晏¹⁾ 冯喜平²⁾

1)(装备学院, 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

2)(西北工业大学, 燃烧、热结构与内流场重点实验室, 西安 710072)

(2014年10月9日收到; 2015年5月11日收到修改稿)

为排除来流空气对含硼燃气的掺混效应, 研究等离子体对含硼富燃料推进剂在补燃室二次燃烧过程的影响, 建立了含硼两相流平行进气扩散燃烧物理模型. 利用高速摄影仪拍摄了含硼燃气在补燃室二次燃烧的火焰图像, 分析了该物理模型的扩散燃烧特性和硼颗粒的二次点火距离. 采用硼颗粒的King点火模型、有限速度/涡耗散模型、颗粒轨道模型和RNG $k-\varepsilon$ 模型以及等离子体模型, 模拟了一定条件下等离子体对含硼两相流扩散燃烧过程的影响. 结果表明, 依据含硼燃气二次燃烧图像得到的硼颗粒二次点火距离, 与数值模拟结果基本一致, 保证了该物理模型和计算方法的可靠性. 含硼两相流经过等离子体区域后, 硼颗粒在运动轨迹上颗粒温度明显增加, 颗粒直径明显减小, B_2O_3 的质量分数分布区域明显扩增, 70%的硼颗粒在到达补燃室2/3尺寸前燃烧效率已达到100%, 硼颗粒充分燃烧释放出更多热量导致中心流线区域温度增加近1/2, 可见等离子体可以明显强化含硼两相流的燃烧过程, 提高硼颗粒的燃烧效率.

关键词: 等离子体, 硼颗粒, 两相流, 扩散燃烧

PACS: 52.30.Ex, 47.70.Fw, 52.25.Dg

DOI: 10.7498/aps.64.205203

1 引言

硼具有较高的质量热值和体积热值, 是一种理想的固体燃料添加剂, 有望应用于提高固体冲压发动机的性能和比冲上, 成为近年来的研究热点^[1,2]. 但由于硼颗粒熔点高、沸点高、表面覆盖的氧化硼(B_2O_3)容易造成颗粒结团抑制燃烧以及在补燃室的滞留时间仅有几个毫秒等, 导致硼的点火性能差、燃烧效率低, 从而影响其能量的高效释放和发动机的整体效率^[3,4].

国外学者自20世纪60年代开始研究硼颗粒, Macek和Semple^[5]于1969年实验发现硼在空气中的燃烧分为两个阶段: 点火阶段(点火至1800—2000 K)出现发亮炽热随后熄灭, 燃烧阶段(温度高于2000 K)出现持续明亮现象. 理论上发展了硼颗粒点火燃烧的King模型、以Glassman, Li和Williams为代表的L-W模型和以Yeh和Kuo

为代表的Y-K模型等^[6]. 文献^[7,8]实验发现增加温度、压强以及添加水、氟、氮气等可以缩短硼颗粒的点火燃烧时间. 通常, 促进硼颗粒点火燃烧的方法有调整推进剂配方和改变发动机机构型. 调整含硼推进剂配方是指添加易燃金属、催化剂、包覆、氟等, 如文献^[9]的研究, 但必然会相对减少硼颗粒的质量分数; 改变发动机机构型是指改变进气道结构或位置, 提高掺混效率延长硼颗粒在补燃室的滞留时间, 如文献^[10,11]的研究, 但必然会加大阻力增加系统损失. 因此, 需要探索新的强化点火和助燃方法. 近年来, 研究者发现等离子体具有强化点火和助燃的特性^[12], Inomata等^[13]于1983年发现等离子体可以增加火焰传播速度和燃烧效率等. 2004年, Starikovskaya等^[14-16]开始研究等离子体点火助燃, 指出等离子体基于热效应和化学动力学效应为点火过程提供必须的活性粒子从而加速化学反应进程, 并相继建立了在烷烃中放电的反应机理. 2013年, Andrey和Nickolay^[17]总结了近十余年等

* 国家自然科学基金(批准号: 11372356)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hongyanji@vip.sina.com

离子体对气体、液体点火助燃方面的理论与实验进展, 指出等离子体点火助燃的热效应和化学效应使其在提高燃烧效率和扩宽燃烧极限等方面应用前景广阔.

目前等离子体强化点火和助燃的研究工作主要集中在气相、液相和固体凝聚相燃料上^[18-22], 尚未发现对具有流动性的含硼固体稀疏相(含硼两相流)的等离子体强化点火助燃特性的研究报道. 本文主要建立了含硼两相流扩散燃烧物理模型, 通过高速摄影仪测量了热流状态下含硼扩散燃烧的火焰图像, 初步分析该模型的扩散燃烧特性和硼颗粒的二次点火距离; 分析了 King 模型、两相流模型和等离子体模型, 数值模拟了等离子体条件下的压强、温度变化, 硼颗粒的温度、直径和燃烧效率以及 B₂O₃ 的质量分数的变化, 得到了等离子体对含硼燃气二次燃烧特性的影响.

2 理论模型与计算方法

2.1 物理模型

为减小掺混效应, 突出等离子体的强化点火和助燃特性, 建立了含硼两相流与来流空气的扩散燃烧模型. 燃气经中心长尾管进入补燃室, 空气经环形入口进入补燃室, 在组分梯度的作用下形成扩散燃烧, 燃烧产物经尾喷管喷出, 二维轴对称物理模型如图 1 所示, 等离子体区域为截面半径 30 mm、厚 10 mm 的圆柱体.

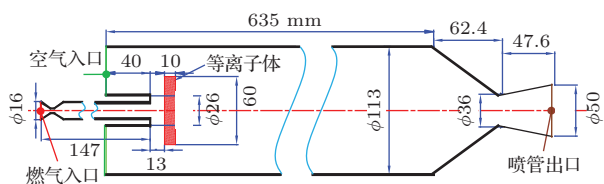


图 1 (网刊彩色) 计算模型 (单位为 mm)

Fig. 1. (color online) Calculation model (in mm).

实验中补燃室采用横截面 100 mm × 100 mm、长 635 mm 的长方体结构, 但考虑到数值模拟涉及两相、流动、燃烧等复杂问题, 简化为等流通面积的圆柱体.

2.2 数学模型

2.2.1 基本假设

1) 补燃室燃气为准定常流动, 符合理想气体状态方程, 与外界无热交换;

2) 忽略燃气各组分之间的辐射作用, 忽略重力的影响;

3) 忽略气相、颗粒相体积力的作用;

4) 硼颗粒为表面包覆氧化层 B₂O₃ 的球形硼颗粒, 粒径一致, 且不发生转动、碰撞等物理过程.

2.2.2 湍流模型

采用基于质量、动量和能量守恒规律的欧拉法描述气相运动, 采用轨道颗粒模型模拟颗粒运动, 采用 RNG (renormalization-group) *k-ε* 模型作为湍流模型使方程组封闭, 具体参数及意义参考文献^[23].

2.2.3 燃烧模型

1) 气相燃烧模型

采用有限速率/涡团耗散模型作为气相燃烧模型, 其中 Arrhenius 速率和涡耗散速率都进行计算, 净反应速率取两个速率中较小的.

2) 碳颗粒燃烧模型

碳颗粒燃烧模型采用动力学/扩散控制反应速率模型, 反应速率

$$\frac{dm_C}{dt} = -\pi d_C^2 P_{Ox} \frac{D_C R_C}{D_C + R_C},$$

式中, m_C , d_C , P_{Ox} , D_C , R_C 分别表示碳颗粒的质量、直径、气相氧化剂分压、扩散速率系数、动力学反应系数.

3) 硼颗粒点火燃烧模型

硼颗粒的点火模型采用 King 模型, 硼颗粒表面覆盖氧化硼, 氧化硼的消耗主要是通过 B₂O₃ 的汽化以及与水蒸气的反应, 而外界的氧扩散至 B-B₂O₃ 界面才会与硼反应生成氧化硼, 当氧化硼的消耗大于生成时认为硼点火成功, 当氧化硼消耗完毕后开始进入硼的燃烧阶段, 如图 2 所示.

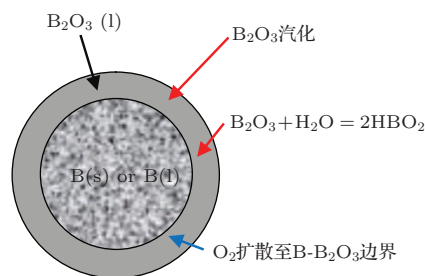
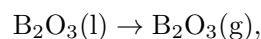


图 2 King 模型点火示意图

Fig. 2. King ignition model.

a) 硼表面氧化硼的汽化过程

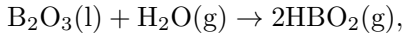


$$Q_E = +3.78 \times 10^5 \text{ J/mole.}$$

反应速率:

$$R_E = \frac{0.32 \times 10^9 \pi d_P^2 Nu T_P^{0.5}}{T_P Nu + 887 P d_P} \exp\left(-\frac{44000}{T_P}\right).$$

b) 氧化硼与水蒸气的反应过程

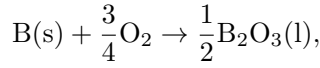


$$Q_H = +3.15 \times 10^5 \text{ J/mole.}$$

反应速率:

$$R_H = 4.575 \times 10^{-3} \frac{Nu}{P} d_P T_P^{0.5} \times \exp[18.1(1 - 2100/T_P)] \times \left\{ -0.15 + \{0.0225 + 0.987 X_{H_2O} P \times \exp[-18.1 \times (1 - 2100/T_P)]\}^{0.5} \right\}.$$

c) 氧扩散至 B-B₂O₃ 界面与硼反应



$$Q_B = -6.132 \times 10^5 \text{ J/mole.}$$

反应速率:

$$R_B = 0.16 \times 10^{-12} (d_P^2/\delta) T_P X_{O_2} P e^{-22600/T_P}.$$

根据前面氧化层消耗和生成理论, 得到硼颗粒半径和氧化层厚度以及温度与传热方程描述如下:

$$\begin{aligned} d_P &= d_B + 2\delta, \\ \frac{dr_B}{dt} &= -\frac{R_B M_B}{4\pi r_B^2 \rho_B}, \\ \frac{d\delta}{dt} &= -\frac{(R_B/2 - R_E - R_H) M_{B_2O_3}}{\pi d_B^2 \rho_{B_2O_3}}, \\ \frac{dT_P}{dt} &= \frac{\dot{Q}}{(\pi d_B^3/6) c_{PB} \rho_B + \pi d_B^2 \delta c_{PB_2O_3} \rho_{B_2O_3}}, \\ T_P &< 2450 \text{ K}, \\ \frac{df}{dt} &= \frac{\dot{Q}}{(\pi d_B^3/6) \rho_{PB} \Delta H_M}, \quad T_P = 2450 \text{ K}, \\ \frac{dT_P}{dt} &= \frac{\dot{Q}}{(\pi d_B^3/6) c_{PB(l)} \rho_{B(l)} + \pi d_B^2 \delta c_{PB_2O_3} \rho_{B_2O_3}}, \\ T_P &> 2450 \text{ K}, \\ \dot{Q} &= (R_E Q_E + R_H Q_H - R_B Q_B) \\ &\quad + \pi d_P^2 [h(T_\infty - T_P) + \sigma \epsilon_B (T_{RAD}^4 - T_P^4)], \end{aligned}$$

式中, d_P , d_B , r_B , δ 分别表示硼颗粒直径、纯净硼直径和半径、氧化层厚度; T_P , T_∞ , T_{RAD} 分别表示硼颗粒温度、环境温度和周围辐射温度; P , X_{H_2O} , X_{O_2} 表示环境压强、水和氧气的摩尔分数; M_B , ρ_B , $M_{B_2O_3}$, $\rho_{B_2O_3}$ 分别表示硼和二氧化三硼的摩尔质

量和密度; \dot{Q} 表示点火过程中能量的变化, 包括反应释放热量及与周围环境之间的对流换热和辐射换热; c_{PB} , $c_{PB_2O_3}$ 分别表示硼和二氧化三硼的比热; f , ΔH_M 表示硼的熔化分数、蒸发潜热; Nu , h , σ , ϵ_B 分别表示努赛尔数、对流换热系数、辐射常数、辐射换热系数.

氧化层消耗尽后进入纯净硼的燃烧阶段, 反应速率遵从有限速率模型:

$$R = k \pi d_B^2/4,$$

式中, k 为遵从 Arrhenius 定律的反应速率.

利用 SIMPLE 算法对离散方程进行迭代求解, 实现在求解过程中硼颗粒与气相反应的耦合计算 [24,25].

2.2.4 等离子体模型

补燃室含硼燃气中的固体颗粒属于稀疏相, 与空间连续分布的固体凝聚相的等离子体点火理论不同, 稀疏相颗粒受流动影响较大. 此时等离子体可以看作是激发态粒子在一定空间内的集合, 采用动力学理论 [26] 表示空间位置、速度和时间的分布函数 $f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)$ 描述, 演变过程用玻尔兹曼方程表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \mathbf{v}_\alpha \cdot \frac{\partial f_\alpha}{\partial \mathbf{x}} + \frac{q_\alpha}{m_\alpha} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_\alpha \times \mathbf{B}) \cdot \frac{\partial f_\alpha}{\partial \mathbf{v}} \\ = \left. \frac{\partial f_\alpha}{\partial t} \right|_{\text{collisions}}, \end{aligned}$$

式中, 等离子体 α 表示活性粒子, 存在电磁场时则可将玻尔兹曼方程与麦克斯韦方程组耦合并描述等离子体的动力学过程.

玻尔兹曼零阶矩方程表示活性粒子的数密度变化,

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i \mathbf{v}_i) = 0,$$

式中, n_i , \mathbf{v}_i 为活性粒子的数密度和速度, $n = \rho/m$.

玻尔兹曼一阶矩方程表示动量方程, 且认为等离子体不可压, 有

$$\begin{aligned} n_i m_i \left[\frac{\partial v_i}{\partial t} + (v_i \cdot \nabla) v_i \right] \\ = -\nabla p_i + n_i e (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) + \mathbf{R}_i, \end{aligned}$$

式中, \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 为电场强度和磁场强度, p_i 为活性粒子的局部压强, \mathbf{R}_i 为活性粒子的动量传递矢量, 由于等离子体假设为理想导体, 此项为零.

玻尔兹曼二阶矩方程表示能量方程, 且假定绝热, 有

$$\frac{1}{\gamma - 1} n_i \left[\frac{\partial T_i}{\partial t} + (v_i \cdot \nabla) T_i \right] = -p_i \nabla \cdot \mathbf{v}_i,$$

式中, T_i 为活性粒子的温度, γ 为比热比, 温度与局部压强有关 $P_i = n_i T_i$.

由控制方程可知, 等离子体可以看作是在高压放电过程中产生的一种具有高温、高导电性, 且均匀分布在一定空间内的理想活性粒子.

含等离子体源项的 Navier-Stokes 控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h'_j J'_j + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right) + S_h,$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}, \quad h = \sum_j Y'_j h'_j,$$

$$h'_j = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{pj'} dT,$$

式中, ρ , P , T , h 为密度、压强、温度、显焓; T_{ref} 为

298.15 K, k_{eff} 为有效热传导系数, $(\tau_{ij})_{\text{eff}}$ 为黏性应力系数; Y'_j , h'_j , J'_j , $c_{pj'}$ 分别为组分 j' 的质量分数、显焓、扩散流量、比热; u_i , u_j 为坐标下的速度分量; 方程右边分别为热传导、组分扩散和黏性耗散引起的能量输运以及能量源项.

2.3 边界条件

热流实验参数: 空气流量为 0.34 kg/s, 流速 12.6 m/s, 温度 573 K; 燃气发生器喉径 4 mm, 压强 1.8 MPa, 燃气流量为 0.034 kg/s, 流速 135 m/s, 温度 1773 K, 空燃比为 10; 颗粒相采用离散相、面入射、随机轨道模型, 初始粒径为 10^{-5} m, 速度 100 m/s, 温度 1773 K; 补燃室压强 0.42 MPa, 绝热壁面温度 298 K, 出口压强 0.1 MPa, 温度 298 K.

某含硼富燃料推进剂在相同压强下实验测得的一次燃烧产物主要成分列于表 1.

表 1 一次燃烧产物的主要成分
Table 1. Major components of primary combustion products.

成分	气相/体积比				颗粒相/质量比		
	H ₂	N ₂	CH ₄	CO	B	C	其他
含量/%	57	16	22	5	32	35	33

注: 一次燃烧产物中质量比: 气相 25%, 颗粒相 75%.

3 实验验证

实验中为重点观测该模型补燃室含硼扩散燃烧过程的火焰图像, 补燃室采用横截面 100 mm × 100 mm、长 635 mm 的长方体结构, 其中观察窗内层采用 12 mm 厚的石英玻璃用作耐高温层, 外层采用 10 mm 厚的有机玻璃用作保护层, 从而提高玻璃窗整体的耐温性和耐冲击性, 具体实验系统如图 3 所示, 高速摄像机采用 Vision Research 公司生产的型号 Phantom v640, 尼康 50 mm f/1.8 D AF Nikkor 镜头, 图片分辨率 800 × 600, 每秒 50 帧, 曝光时间 300 μs.

一次燃气经长尾管喷出后沿中心轴线向外扩散, 来流空气向内扩散, 当硼颗粒到达燃气与来流空气的交界处时, 满足其高温富氧的点火条件, 从而发生二次点火燃烧. 实验条件下含硼扩散燃烧过程稳定时的火焰图像见图 4, 可以看出, 长尾管出口处亮度降低, 但经过一段距离后火焰亮度突然增

强, 为燃气与来流的交界处, 长尾管出口至燃烧亮度增强点即为硼颗粒的二次点火距离.

图 5 为同样初始条件下进行数值模拟得到的 B₂O₃ 的质量分布云图, 有 B₂O₃ 生成说明硼颗粒点火燃烧成功, 从 B₂O₃ 的质量分布可以看出硼颗粒的二次点火距离以及硼颗粒在补燃室的分布范围.

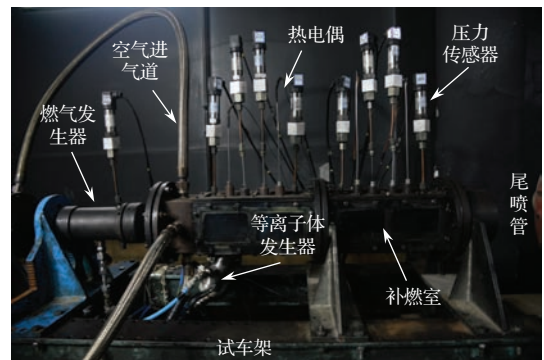


图 3 实验系统图

Fig. 3. Experimental system diagram.

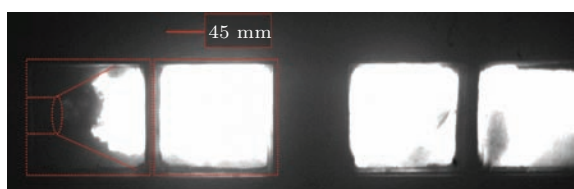


图4 含硼扩散燃烧稳定时的火焰图像
Fig. 4. Flame image of boron-based gas secondary combustion in the after-burning chamber.

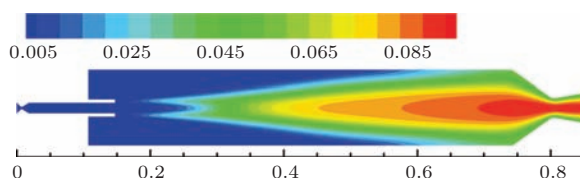


图5 (网刊彩色) B_2O_3 质量分布云图
Fig. 5. (color online) Mass distribution of B_2O_3 .

对比图5和图4可以看出,数值模拟的硼颗粒的二次点火距离在50 mm,与实验所得45 mm相差10%,主要原因在于实验火焰图像中是一次燃气的二次点火距离,一次燃气包括硼颗粒以及氢气、一氧化碳等组分,氢气和一氧化碳等组分更易达到燃烧条件,在较短的距离内发生二次点火燃烧.但在补燃室前端,实验所得火焰图像与数值模拟 B_2O_3 质量分布图像的形状基本一致,可以看出燃气从长尾管喷出后沿中心轴线流动,同时快速向外扩散,空气迅速向内扩散,中心燃气区域呈逐步扩大趋势,符合自由射流的流体特性;燃气与来流空气交界处发生扩散燃烧,符合扩散燃烧特性.

4 数值模拟结果

以热流条件参数为边界条件,加入硼颗粒的点火燃烧模型和等离子体模型,模拟加入等离子体前后补燃室中含硼两相流扩散燃烧特性的变化.

图6为加入等离子体前后的温度(静温)云图.在补燃室的燃气和空气入口处,由于燃气与空气未掺混和燃烧,温度分别由燃气温度和空气温度决定;当加入等离子体后,该区域出现明显的高温区,并沿轴向逐渐减小,燃气轴向速度大,与等离子体高温区的热交换快,因而中心轴处温度下降比上下区域快.未加入等离子体时,最高温度2600 K出现在补燃室尾部,与纵向受限射流扩散燃烧火焰结构相同,高温区沿着燃气出口中心轴线硼颗粒集中区域附近分布.随着燃气出口距离的增加,硼颗粒温度增加燃烧更充分,区域温度升高.加入等离子体

后,燃气经过等离子体区域温度最高达到3800 K,且高温区域沿径向扩展,这是由于硼颗粒经过等离子体区域温度明显增加,燃烧更加充分,释放更多热量.

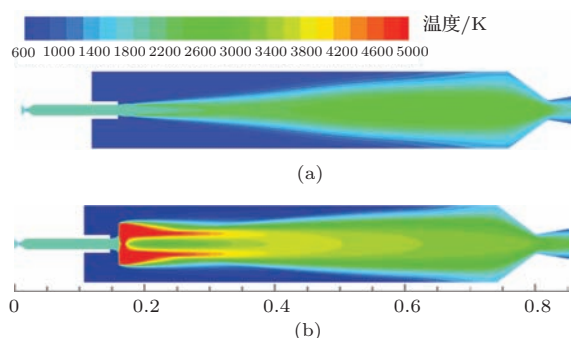


图6 (网刊彩色) 温度云图 (a) 未加入等离子体; (b) 加入等离子体
Fig. 6. (color online) Temperature nephogram: (a) No plasma; (b) adding plasma.

图7为加入等离子体前后硼颗粒温度的轨迹图.正如前面分析,硼颗粒经过等离子体区域温度增加至2800 K,与来流空气接触的硼颗粒燃烧更加充分,释放出更多热量.

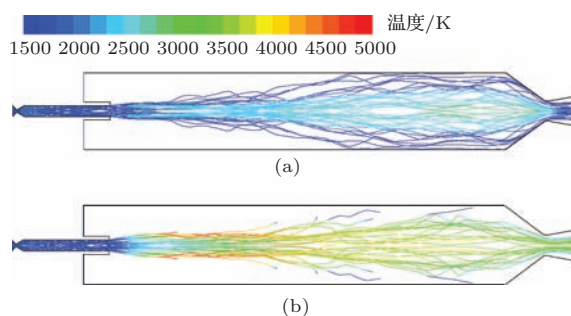


图7 (网刊彩色) 硼颗粒温度的轨迹云图 (a) 未加入等离子体; (b) 加入等离子体
Fig. 7. (color online) Trajectories and temperature of boron particles: (a) No plasma; (b) adding plasma.

图8为加入等离子体前后硼颗粒直径的变化.加入等离子体后,硼颗粒温度增加,与来流空气接触的硼颗粒消耗得更快,集中在中心轴线区域的硼颗粒由于不满足其燃烧所需的富氧环境,直径变化较小.

图9为加入等离子体前后 B_2O_3 质量分布云图.硼颗粒在距离补燃室入口一定距离后发生二次点火,开始大量生成 B_2O_3 ,随着硼颗粒燃烧效率的提高, B_2O_3 质量继续增加,到达尾喷管达到最大值.加入等离子体后未能缩短硼颗粒的二次点火距离,但增加了 B_2O_3 质量的径向分布区域,说明等离子体可以增加硼颗粒的径向运动,提高硼颗粒的燃烧效率.

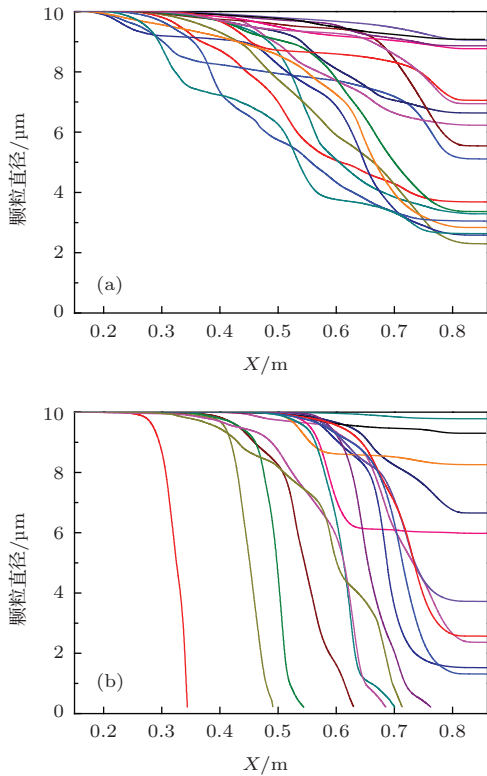


图8 (网刊彩色) 硼颗粒直径变化 (a) 未加入等离子体; (b) 加入等离子体
Fig. 8. (color online) Diameter variation of boron particles: (a) No plasma; (b) adding plasma.

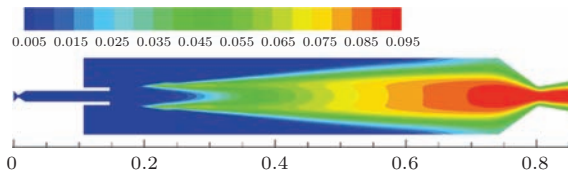


图9 (网刊彩色) 添加等离子体后 B_2O_3 质量分布云图
Fig. 9. (color online) Mass distribution of B_2O_3 with adding plasma.

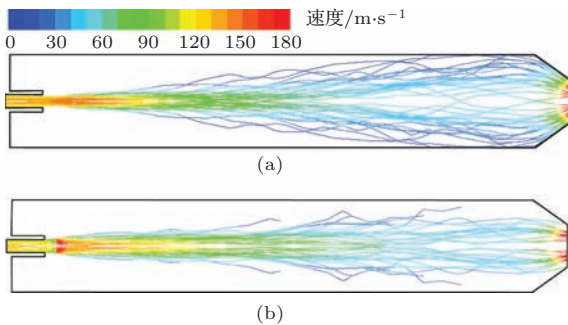


图10 (网刊彩色) 数值模拟中硼颗粒的轴向速度和运动轨迹 (a) 未加入等离子体; (b) 加入等离子体
Fig. 10. (color online) Trajectories and velocity of boron particles: (a) No plasma; (b) adding plasma.

图10为加入硼颗粒在补燃室的速度分布云图. 未加入等离子体时, 硼颗粒在燃气出口处达到最大

值 140 m/s; 加入等离子体后, 硼颗粒在等离子体区域轴向速度明显增加到 180 m/s.

图11为硼颗粒的燃烧效率随轴向长度的变化. 燃烧效率定义为 $(m_0 - m_i)/m_0$, m_0 为硼颗粒的初始质量, m_i 为硼颗粒在不同轴向长度上的质量. 由图11可知, 加入等离子体后, 硼颗粒燃烧效率更高, 超过 70% 的硼颗粒在达到轴向长度三分之二前已经充分燃烧; 而未加入等离子体时, 几乎没有硼颗粒在补燃室中完全燃烧.

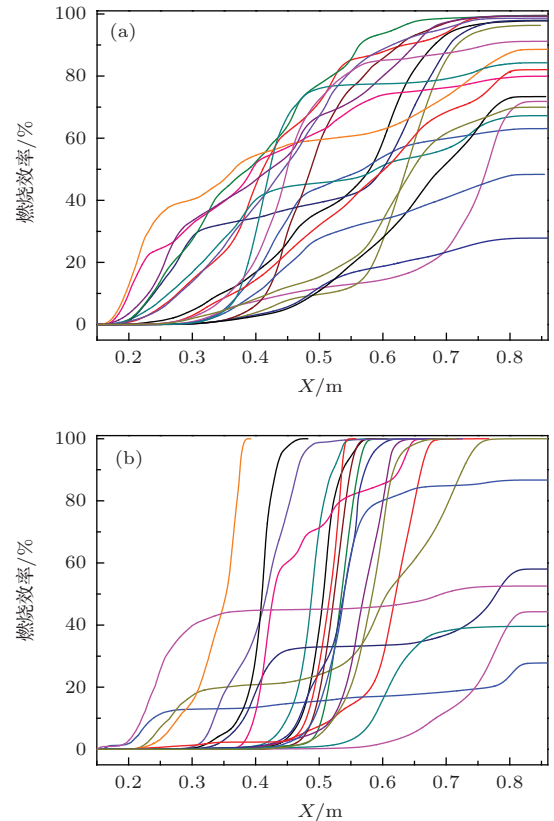


图11 (网刊彩色) 硼颗粒的燃烧效率图 (a) 未加入等离子体; (b) 加入等离子体
Fig. 11. (color online) Combustion efficiency of boron particles: (a) No plasma; (b) adding plasma.

5 结 论

通过含硼燃气实验和数值模拟对建立的含硼两相流扩散燃烧物理模型进行了验证, 并研究了等离子体对补燃室含硼燃气燃烧过程的影响, 得到以下结论:

1) 含硼燃气实验较真实地反映了含硼两相流扩散燃烧特性, 燃气进入补燃室后符合自由射流特征和扩散燃烧特征, 物理模型满足含硼两相流扩散燃烧的实验要求;

2) 控制方程较准确地反映了含硼两相流的扩散燃烧特性, 由实验测得二次点火距离验证了数

值模拟的可靠性, 以及硼颗粒 King 点火模型、有限速度/涡耗散模型、颗粒轨道模型以及 RNG $k-\varepsilon$ 模型在此条件下模拟含硼两相流扩散燃烧过程的准确性;

3) 在含硼两相流扩散燃烧模型的基础上添加等离子体控制方程, 模拟结果表明, 等离子体条件下, 硼颗粒在运动轨迹上温度明显增加、直径明显减小, 轴向速度增加了 40%, 产物 B_2O_3 的质量分数分布区域明显扩增, 中心流线区域温度增加近二分之一, 70% 的硼颗粒在补燃室全尺寸的三分之二前的燃烧效率已达到 100%, 可见等离子体可以明显强化含硼两相流的燃烧过程, 提高硼颗粒的燃烧效率释放更多能量.

参考文献

- [1] Beckstead M W, Puduppakkam K, Thakre P, Yang V 2007 *Prog. Energ. Combust.* **33** 497
- [2] Yu D, Kong C D, Zhuo J K, Yao Q, Li S Q 2015 *J. Engineer. Thermophys.* **36** 922 (in Chinese) [于丹, 孔成栋, 卓建坤, 姚强, 李水清 2015 工程热物理学报 **36** 922]
- [3] Fry R S 2004 *J. Propul. Power* **20** 1
- [4] Jain A, Anthonysamy S, Ananthasivan K 2010 *Thermochim. Acta* **500** 1
- [5] Macek A, Semple J M 1969 *Combust. Sci. Technol.* **1** 181
- [6] Ao W, Yang W J, Han Z J, Liu J Z, Zhou J H, Cen K F 2012 *J. Solid Rocket Technol.* **35** 361 (in Chinese) [敖文, 杨卫娟, 韩志江, 刘建忠, 周俊虎, 岑可法 2012 固体火箭技术 **35** 361]
- [7] King M K 1982 *J. Spacecraft Rockets* **19** 294
- [8] Young G, Sullivan K, Zachariah M R, Yu K 2009 *Combust. Flame* **156** 322
- [9] Wang Y H, Li B X, Hu S Q 2004 *Chin. J. Explos. Propel.* **27** 44 (in Chinese) [王英红, 李葆萱, 胡松起 2004 炸药学报 **27** 44]
- [10] Liu J, Li J X, Feng X P, Zheng Y 2011 *J. Propulsion Technol.* **32** 355 (in Chinese) [刘杰, 李进贤, 冯喜平, 郑亚 2011 推进技术 **32** 355]
- [11] Hu J X 2006 *Ph. D Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [胡建新 2006 博士学位论文 (长沙: 国防科技大学)]
- [12] Ju Y 2014 *Adv. Mech.* **44** 20
- [13] Inomata T, Okazaki S, Moriwaki T, Suzuki M 1983 *Combust. Flame* **50** 361
- [14] Starikovskaya S M, Kukaev E N, Kuksin A Y 2004 *Combust. Flame* **139** 177
- [15] Starikovskaia S M, Kosarev I N, Popov N A, Starikovskii A Yu 2009 *40th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference* San Antonio, June 22–25, 2009 p3595
- [16] Starikovskiy A 2012 *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition* Nashville Tennessee, 2012 p244
- [17] Andrey S, Nickolay A 2013 *Prog. Energ. Combust.* **39** 61
- [18] Sun W, Won S H, Ombrello T 2013 *P. Combust. Inst.* **34** 847
- [19] Aleksandrov N L, Kindysheva S V, Kochetov I V 2014 *Plasma Sources Sci. T.* **23** 015017
- [20] Zhang P, Hong Y J, Sheng S Y, Ding X Y 2014 *High Volt. Engin.* **40** 2125 (in Chinese) [张鹏, 洪延姬, 沈双晏, 丁小雨 2014 高电压技术 **40** 2125]
- [21] Lan Y D 2011 *Ph. D Dissertation* (Xian: Air Force Engineering University) (in Chinese) [兰宇丹 2011 博士学位论文 (西安: 空军工程大学)]
- [22] Xie Y S, Zhang X B, Yuan Y X, Zhou Y 2003 *J. Propulsion Technol.* **24** 275 (in Chinese) [谢玉树, 张小兵, 袁亚雄, 周跃 2003 推进技术 **24** 275]
- [23] Hu J X, Xia Z X, Zhang W H, Fang Z B, Wang D Q, Huang L Y 2012 *Int. J. Eng. Sci.* **2012** 160620
- [24] Hussmann B, Pfitzner M 2010 *Combust. Flame* **157** 803
- [25] Hussmann B, Pfitzner M 2010 *Combust. Flame* **157** 822
- [26] Shumlak U, Loverich J 2003 *J. Comput. Phys.* **187** 620

Effect of plasma on boron-based two-phase flow diffusion combustion*

Zhang Peng¹⁾ Hong Yan-Ji^{1)†} Ding Xiao-Yu¹⁾ Shen Shuang-Yan¹⁾ Feng Xi-Ping²⁾

1) (State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Equipment Academy, Beijing 101416, China)

2) (Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermal-Structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 9 October 2014; revised manuscript received 11 May 2015)

Abstract

A parallel intake diffusion combustion physical model is designed to study the influence of plasma on the secondary combustion of boron-based gas in the after-burning chamber, with excluding mixing effects of the intake air. The flame images of the diffusion combustion of the boron-based gas in the after-burning chamber are obtained by a high-speed photographic apparatus. The diffusion combustion characteristics of the physical model and the secondary ignition distance of boron particles are analyzed. The King ignition model, finite-rate/eddy-dissipation model, particle-trajectory model, RNG $k-\varepsilon$ model, and plasma model are adopted to simulate the influence of plasma on the diffusion combustion of boron-based two-phase flow in a certain condition. The results show that the secondary ignition distance of boron particles, which is based on the boron-based flame image, is consistent well with the numerical simulation result, which verifies the accuracy of the boron-based two-phase flow diffusion combustion numerical model and the calculation method. When the boron-based gas passes through the plasma area, the temperature of the boron particles increases while the diameter decreases significantly on their trajectory. The distribution area of the B_2O_3 mass fraction increases significantly, and more than 70% boron particles reach a 100% combustion efficiency before they arrive at the area of the two-thirds after-burning chamber. More heat is released by fully burning the boron particles under the influence of plasma, which results in a half increase of the central area. It can be indicated that plasma can obviously enhance the combustion process of the boron-based gas, which improves the combustion efficiency of boron particles and releases more energy.

Keywords: plasma, boron particles, two-phase flow, diffusion combustion

PACS: 52.30.Ex, 47.70.Fw, 52.25.Dg

DOI: [10.7498/aps.64.205203](https://doi.org/10.7498/aps.64.205203)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11372356).

† Corresponding author. E-mail: hongyanji@vip.sina.com