

文章编号:1000-8055(2013)12-2849-08

微波在液体火箭发动机真空羽流中的衰减

王虹玥, 唐振宇, 贺碧蛟, 蔡国飙
(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 为研究液体火箭发动机真空羽流对微波的衰减作用,以某双组元液体火箭发动机为对象,使用热力计算程序对燃烧室内的电子数密度进行了计算,使用冻结假设和有限化学反应速率假设两种情况对喷管内带电粒子的电离和再结合过程进行了模拟,并对羽流中带电粒子数密度和 5~30 GHz 微波穿过羽流的衰减量进行了估算. 研究结果显示:该发动机燃烧室和喷管出口的电子数密度量级分别为 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 和 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, K, Na 等碱金属为主要电子释放剂, Cl^- , OH^- 等基团为主要电子吸收剂;低频微波在羽流中衰减更严重, 5 GHz 微波的衰减可达 4.5 dB;微波斜穿羽流的衰减通常大于横穿情况.

关 键 词: 微波衰减; 液体发动机; 羽流; 碱金属; 电子数密度

中图分类号: V434.13

文献标志码: A

Microwave attenuation in vacuum plume of the liquid-propellant rocket engine

WANG Hong-yue, TANG Zhen-yu, HE Bi-jiao, CAI Guo-biao

(School of Astronautics,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The microwave attenuation in the vacuum plume of the liquid-propellant rocket engine was studied. Based on a sample of the bipropellant engine, the electron number densities in the chamber was calculated using a thermodynamic calculation code. The ionization and recombination processes in the nozzle were simulated under the assumption of frozen components or limited reaction rate. The electron number densities in the plume and the microwave attenuation of 5–30 GHz were estimated. It is shown that the number densities are within the range of $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ and $10^{10} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, respectively, for the chamber and the exit of the nozzle. The alkali metals, K and Na, are main contributors of electrons while Cl^- and OH^- are main electron absorber. The attenuation is more serious for the microwave of lower frequency and oblique path, as high as 4.5 dB in case of 5 GHz.

Key words: microwave attenuation; liquid-propellant engine; plume; alkali metal; electron number density

液体火箭发动机作为空间姿态轨道控制发动机、着陆反推力发动机等在真空中工作时,喷流在真空环境下膨胀扩散,形成真空羽流. 在高温、高压的燃烧室内,推进剂内一些微量杂质,如碱金属、NO 等,会部分电离为带电粒子. 这些带电粒

子经喷管喷出,会改变发动机喷口附近及航天器周围的电磁环境,干扰航天器的通讯、导航等信号的传输,影响航天器的正常工作. 国内外之前对发动机喷焰及羽流衰减问题的研究主要集中在固体火箭发动机领域^[1-12],而针对液体火箭发动机的

收稿日期:2012-11-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131111.1602.029.html>

作者简介:王虹玥(1985—),女,山东平原人,博士生,研究方向为发动机真空羽流.

研究相对较少,因此,有必要对液体火箭发动机真空羽流的微波衰减问题进行研究。

微波衰减分析主要包括两部分:其一是羽流电离作用和带电粒子密度水平计算;其二是不同带电粒子数密度下微波衰减量的计算。Smoot等^[1-2]在研究大气中固体火箭发动机羽流电磁衰减问题时,将气体流动和电离分为燃烧室区、喷管区、无黏羽流区和羽流-空气混合后燃区共4个区域。真空中工作的发动机没有后燃问题,故可分为燃烧室平衡电离区、喷管内再结合区以及羽流冻结扩散区3个区域。

本文用热力计算处理燃烧室平衡电离过程,用成分冻结和有限化学反应速率方法计算喷管内流动和电子数密度分配,而羽流区使用冻结假设,着重研究了液体火箭发动机内部及真空羽流中的电子数密度变化。微波的衰减量的计算是通过电子碰撞频率、朗缪尔频率和微波频率得到。最后分析了微波频率和斜穿角度等因素对衰减量的影响。

1 研究模型与计算方法

发动机的真空羽流是一种高温稠密的弱电离等离子体,微波在其中传播时会引起带电粒子的共振而吸收微波能量,造成衰减。由于电子质量小,较易受高频弱电场作用,因此在微波衰减中起主要作用。本文亦着重研究羽流中电子对微波的衰减,其他带电粒子的衰减作用暂不考虑。

计算模型中3个区域的划分如图1所示。

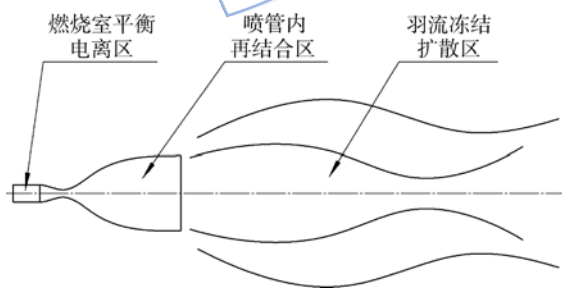


图1 电离过程示意图

Fig. 1 Diagram of ionization process

1.1 燃烧室平衡电离模型^[2]

在发动机的内外流场中,气体电离程度最高的位置出现在高温、高压的燃烧室内。燃气在燃烧室内流速慢,停留时间长,且燃烧室内温度和压强相对稳定,因此燃气的电离反应与其他化学反应一样,可视为达到平衡状态,可用改进后的热力计

算程序^[12]获得气体中带电粒子的数密度。

1.2 喷管内再结合过程

在喷管内,燃气温度和压强迅速下降。一方面,带电粒子数密度随主流密度发生剧烈变化;另一方面电离平衡也会发生移动,中性粒子电离速度小于带电粒子重新结合的速度,带电粒子数密度减少。在此区计算带电粒子数密度时,采用成分冻结和有限化学反应速率两种情况。冻结假设认为带电粒子相关反应不发生,直接用燃烧室内电子密度与气体总密度的比值计算出口截面带电粒子数密度的上限。有限化学反应速率假设认为,在喷管内气体先收缩再扩张,速度不断增加,温度、压强不断降低,导致带电粒子间发生再结合反应。

喷管内气体流动与离子再结合过程的计算使用商业软件 Fluent 进行。在求解包含电子、CO、CO₂、H₂、H₂O、O₂、H、H⁺、O、N、NO、NO₂、NH₃、Cl、HCl、K、K⁺、Na⁺、Na、Cl⁻、NaOH、KOH、KOH⁺、NaCl、KCl、N₂等29种气体组分的多组分 N-S 方程基础上,通过有限化学反应速度假设计算表1所列出的8种与离子有关的化学反应。表1同时列出了有限化学反应速率假设中考虑的电离、再结合反应及反应速率常数^[1]。其中反应的速率常数为 $k_{f,r} = AT^3$,单位为 cm³/s,含义为反应物数密度均为 1.0 cm⁻³时,单位时间单位体积内发生该反应的次数;A为拟合系数;T为温度(K)。

在采用冻结假设时,则忽略“再结合”过程,认为从燃烧室流出的气体成分不变,得到的喷管出口电子数密度比实际情况偏大,相应微波衰减计算结果也应偏大。

1.3 羽流区电子数密度计算

在出口截面之后,由于气体较稀薄,带电粒子再结合过程所需的三体碰撞不易发生。故假设气体中各成分的电离度不再改变。首先在喷口截面进行平均得到电子在喷流中的质量分数,并假设羽流场中各处的电子密度按照此质量分数随气体总密度变化。气体总密度通过求解中性气体羽流场得到。中性气体羽流场较稀薄,无法用通常的连续流气体动力学方法处理,故采用直接模拟的蒙特卡洛技术(DSMC)计算。液体发动机羽流中含量最多的粒子是 H₂O、CO₂、CO、H₂ 和 N₂ 共5种中性粒子,这里亦只考虑这5种粒子。利用 DSMC 技术求解的中性气体流场结果直接作为输入条件,计算方法参见文献[13]。

表 1 喷管中的离子反应及反应速率常数的系数

Table 1 Ionic reaction and the coefficient of reaction rate constants in the nozzle

序号	反应式	反应类型	A	β
1	$K^+ + e^- + M \rightarrow K + M$	三体再结合	1.5×10^{-22}	-3/2
2	$Na^+ + e^- + M \rightarrow Na + M$	三体再结合	0.75×10^{-22}	-3/2
3	$K^+ + Cl^- \rightarrow K + Cl$	再结合	1.3×10^{-6}	-1/2
4	$K^+ + OH^- \rightarrow K + OH$	再结合	1.3×10^{-6}	-1/2
5	$Na^+ + Cl^- \rightarrow Na + Cl$	再结合	1.3×10^{-6}	-1/2
6	$Na^+ + OH^- \rightarrow Na + OH$	再结合	1.3×10^{-6}	-1/2
7	$Cl + e^- + M \rightarrow Cl^- + M$	三体结合	1.0×10^{-28}	-1/2
8	$OH + e^- + M \rightarrow OH^- + M$	三体结合	1.0×10^{-28}	-1/2

1.4 微波衰减模型

计算微波在弱电羽流中的衰减时,采用以下 3 点假设:①等离子体在局部是各向同性且均匀的;②微波是小振幅的;③在等离子体内传播的微波为平面波,且沿直线传播.在此假设下,微波在等离子体中的衰减因子和相位常数如式(1)、式(2)^[14]

$$\alpha = \frac{\omega}{c_0 \sqrt{2}} \left\{ \left[\frac{\omega_p^2}{\nu^2 + \omega^2} - 1 \right] + \sqrt{\left[1 - \frac{\omega_p^2}{\nu^2 + \omega^2} \right]^2 + \left[\frac{\omega_p^2 \nu}{\omega(\nu^2 + \omega^2)} \right]^2} \right\}^{1/2} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c_0 \sqrt{2}} \left\{ \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\nu^2 + \omega^2} \right] + \sqrt{\left[1 - \frac{\omega_p^2}{\nu^2 + \omega^2} \right]^2 + \left[\frac{\omega_p^2 \nu}{\omega(\nu^2 + \omega^2)} \right]^2} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

其中 α 为微波衰减因子,含义是微波在该介质中传播长度为 $1/\alpha$ 的距离,振幅衰减为原来的 $1/e$,相应的衰减量以 dB 表示为 $20 \lg e = 8.69 \text{ dB}$; β 为波数(也称相位常数),在真空中 $\beta_0 = \omega/c_0$; ω 为微波圆频率(rad/s), ω_p 为等离子体圆频率(rad/s). ν 为电子与其他粒子的有效碰撞频率,计算如下:

$$\nu = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{8\kappa T}{\pi m_e}} \sum n_i Q_i \quad (3)$$

κ 为 Boltzmann 常数, T 为气体平均温度(假设电子温度和气体平均温度相等), n_i , Q_i 分别为与电子碰撞的各种粒子的数密度和碰撞截面面积.碰撞截面数据参见表 2.

v_e 表示自由电子平均速度,根据下式计算:

$$v_e = \left(\frac{8\kappa T}{\pi m_e} \right)^{1/2} \quad (4)$$

假设微波沿直线传播.将微波的传播路径分为若干小段,在每段上计算出衰减因子和该段的衰减和相移量,并在整个传播路径上积分,即得到总衰减和相移量.

表 2 电子与中性粒子的碰撞截面^[2]

Table 2 Collision crosses between electrons and neutrals

粒子种类	碰撞截面面积 Q_e/m^2
CO	$2.08 \times 10^{-25} v_e + 2.46 \times 10^{-20}$
CO ₂	$4.7 \times 10^{-14}/v_e$
H ₂ O	$5.9 \times 10^{-8}/v_e$
N ₂	$3.29 \times 10^{-25} v_e$
H ₂	$1.45 \times 10^{-26} v_e + 8.9 \times 10^{-20}$

这里所用的微波衰减模型忽略了两个可能的影响因素:其一,尽管等离子体参数在微波传播路径上梯度不大,但仍不是完全均匀的,因此微波会受到反射;其二,同样由于等离子体的不均匀性,微波的传播路径可能弯曲.要获得更精确的计算结果,可通过时域有限差分(FDTD)等方法对空间电磁场进行数值解算.

2 输入条件

研究对象选择某双组元发动机,推进剂为一甲基肼(MMH)和四氧化二氮(N₂O₄),推力约为 150 N,喷管出口直径约为 120 mm.

在推进剂中杂质为 K 和 Na 两种元素的化合物,以单质、氯化物和高氯酸盐 3 种形式存在.设 MMH 中的 Na 元素质量浓度为 $0.52 (\mu\text{g}/\text{mL})$,此质量浓度与文献[15]中的实验测量值相近. N₂O₄ 中引入 K 及其化合物杂质, K 元素在推进剂中的质量分数取 $0, 10^{-5}, 10^{-4}$ 三个水平分别计算.

微波频率选择 5, 10, 30 GHz 这 3 个典型值.微波入射路径与发动机的相对位置如图 2 所示.微波路径与发动机对称轴在同一平面内,入射路径与喷口截面的夹角 θ 为 $0^\circ \sim 75^\circ$.

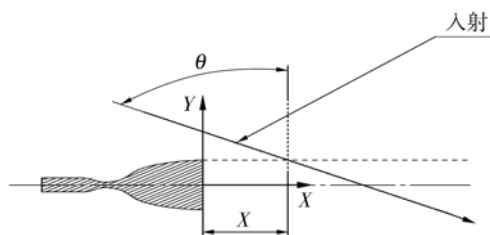


图2 微波入射路径与发动机相对位置

Fig. 2 Position of the microwave in relation to the engine

3 结果分析

3.1 燃烧室平衡电离计算结果

燃烧室热力计算得到的电子数密度结果如表3,各组结果均在 $10^{13} \sim 10^{14}$ 之间.从表3中可以看出,相同K元素质量分数不同存在形式的算例结果相近,而K元素质量分数从0增加至 10^{-4} 使电子数密度上升了一个数量级.图3~图5为Na,K以氯化物形式存在时燃烧室主要电离产物数密度 n ,以其他形式存在时的结果与此类似.从图中可以看出, K^+ 和 Na^+ 是主要的电子释放剂,两者的总和加起来占了释出电子总量的绝大部分.而Cl元素存在时, Cl^- 是主要的电子捕获剂,但最大的电子捕获量也只有 10^{12} cm^{-3} 数量级,对降低燃气中的自由电子数密度作用较小.因此,碱金属的存在形式的不同对最终计算结果影响很小,在推进剂中加入单质碱金属的结果比加入高氯酸盐或氯化物略高,其余产物的数密度均在 10^{12} cm^{-3} 以下,对自由电子数密度结果影响很小.

表3 燃烧室电子数密度

Table 3 Electron number densities in the combustion chamber

存在形式	Na 元素质量浓度/($\mu\text{g/mL}$)	K 元素质量分数	电子数密度/ cm^{-3}	算例标号
单质	0.52	0	1.714×10^{13}	A1
	0.52	10^{-5}	3.264×10^{13}	A2
	0.52	10^{-4}	1.031×10^{14}	A3
高氯酸盐	0.52	0	1.706×10^{13}	A4
	0.52	10^{-5}	3.238×10^{13}	A5
	0.52	10^{-4}	1.013×10^{14}	A6
	0.52	0	1.703×10^{13}	A7
氯化物	0.52	10^{-5}	3.235×10^{13}	A8
	0.52	10^{-4}	1.012×10^{14}	A9

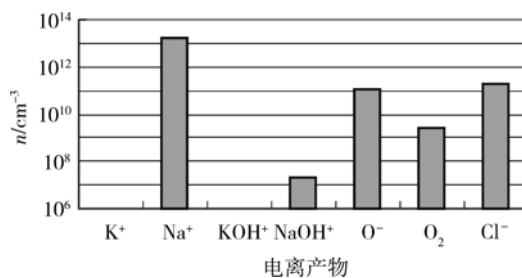


图3 燃烧室主要电离产物数密度(A7)

Fig. 3 Number densities of the main ionization product in the combustion chamber (A7)

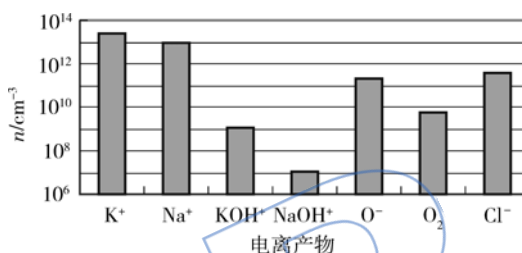


图4 燃烧室主要电离产物数密度(A8)

Fig. 4 Number densities of the main ionization product in the combustion chamber (A8)

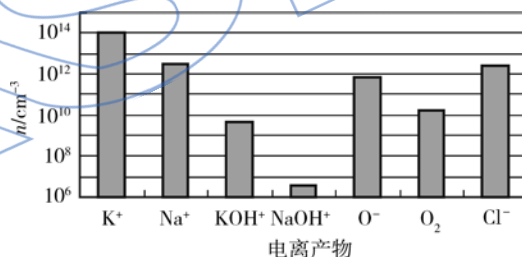


图5 燃烧室主要电离产物数密度(A9)

Fig. 5 Number densities of the main ionization product in the combustion chamber (A9)

3.2 喷管内电离和再结合过程

根据冻结假设和有限化学反应速率假设两种情况计算,得到的发动机喷管出口电子数密度 N_e .如图6.冻结假设情况选择了3.1节中杂质以K,Na形式存在的燃烧室电离产物成分作为输入条件(A1~A3组).由于忽略了喷管中的“再结合”过程,因此估算值较高,可视作电子数密度的上限.而有限化学反应速率假设情况选择杂质以KCl,NaCl形式存在的电离成分输入条件(A7~A9组),理论上计算结果应更接近真实值.

从图6上来看,出口电子数密度在 $0.9 \times 10^{10} \sim 3 \times 10^{11}$ 之间变化.有限化学反应速率假设的电子数密度计算结果明显小于冻结假设,前者的大小在后者的10%~50%之间,且杂质质量分数多时

差别更大. 喷管轴线周围和壁面边界层附近密度较小, 两者之间有一个峰值, 沿径向变化在大部分的区域内不超过一个数量级. 杂质质量分数对电子数密度的影响则也因算法不同而有区别, K 质量分数 ω_K 从 10^{-5} 增加至 10^{-4} 时, 有限反应速率假设的计算结果变化不大, 冻结假设的结果大幅上升.

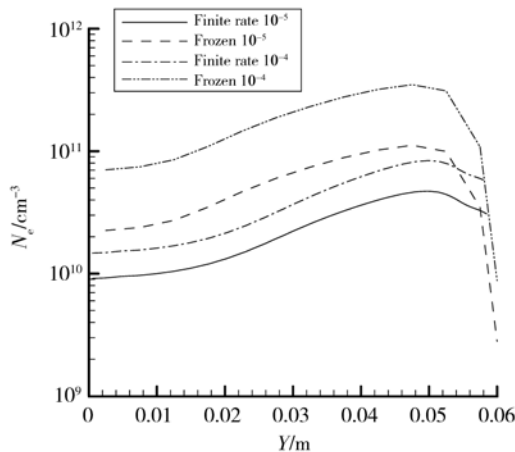


图 6 出口电子数密度

Fig. 6 Electron number densities at the exit

图 7 和图 8 是有限化学反应速率假设下, 150 N 发动机喷管出口处电离产物的数密度 n . 如图所示, 在杂质质量分数较低时, K^+ , Na^+ 两种正离子作为电子源, 其摩尔分数均大于其他粒子. 与燃烧室内不同, OH^- 是主要的电子吸收剂. 当 K 杂质质量分数提高时, K^+ 的数密度也相应大幅上升, 但 Na^+ 数密度则有所下降, 甚至低于两种电子捕获剂. 图 9 和图 10 是 K 质量分数为 10^{-5} 时喷管内 K^+ , Na^+ 两种离子的摩尔分数 x_{K^+} , x_{Na^+} ;

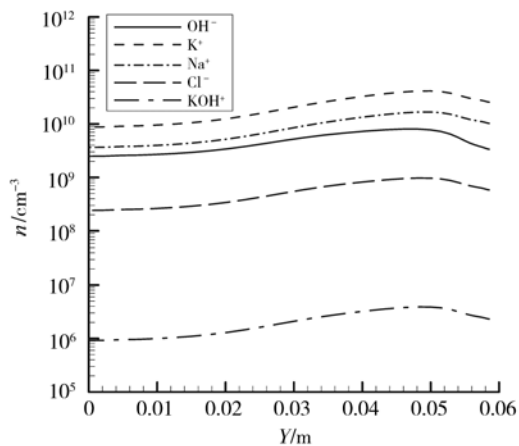


图 7 出口电离产物数密度(K 质量分数为 10^{-5})

Fig. 7 Number densities of the ionization product at the exit (mass fraction of K is 10^{-5})

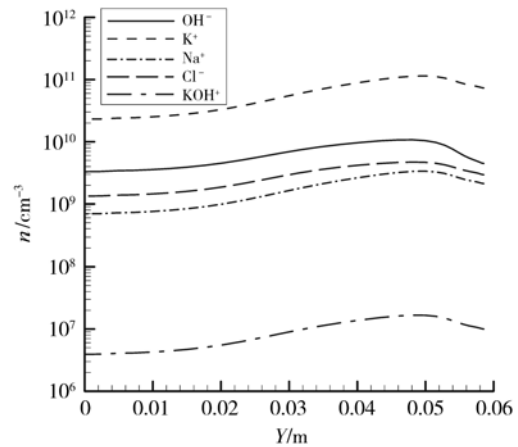


图 8 出口电离产物数密度(K 质量分数为 10^{-4})

Fig. 8 Number densities of the ionization product at the exit (mass fraction of K is 10^{-4})

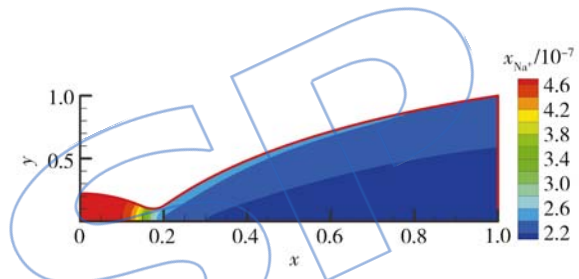


图 9 喷管内 Na^+ 摩尔分数(K 质量分数为 10^{-5})

Fig. 9 Mole fraction of Na^+ in the nozzle (mass fraction of K is 10^{-5})

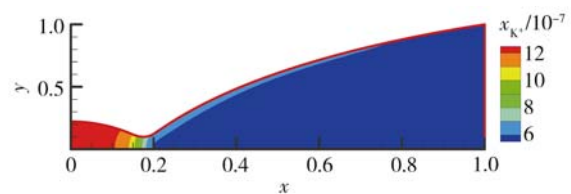


图 10 喷管内 K^+ 摩尔分数(K 质量分数为 10^{-5})

Fig. 10 Mole fraction of K^+ in the nozzle (mass fraction of K is 10^{-5})

图中横、纵坐标 x , y 为无量纲化, 相对应的喷管尺寸也为无量纲化结果; 喷管入口和出口分别对应横轴坐标值 0 和 1.0, 喷管中心和出口外径处分别对应纵轴坐标分别为 0 和 1.0. 易见离子摩尔分数下降主要发生在喉部, 原因之一是这两种组分也随工质气体膨胀; 原因之二是主要的“再结合”反应大多发生在喉部.

图 11~图 18 是 K 质量分数 10^{-5} 时, 表 1 所列的各喷管内离子反应速率. 这里只给出了喉部附近的结果, 喷管尺寸为类似图 9 和图 10 的无量纲化值. 易见除了反应 5 和反应 10 主要发生在喉

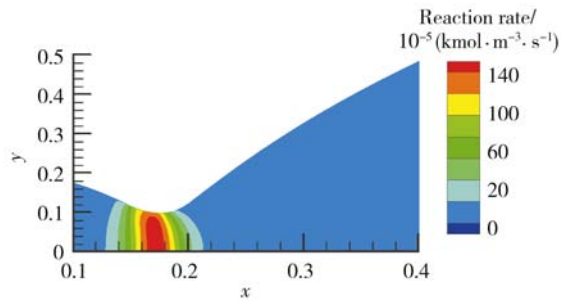
图 11 喷管内反应速率-反应 1(K 质量分数为 10^{-5})

Fig. 11 Reaction rate in the nozzle-reaction 1
(mass fraction of K is 10^{-5})

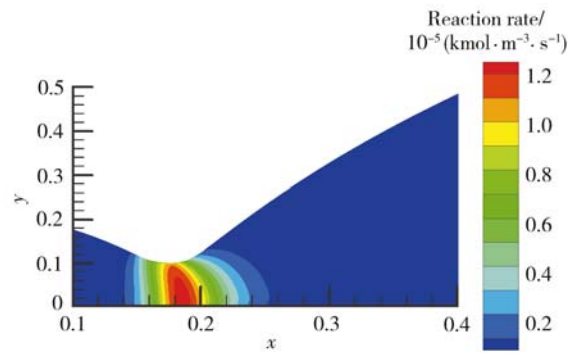
图 15 喷管内反应速率-反应 5(K 质量分数为 10^{-5})

Fig. 15 Reaction rate in the nozzle-reaction 5
(mass fraction of K is 10^{-5})

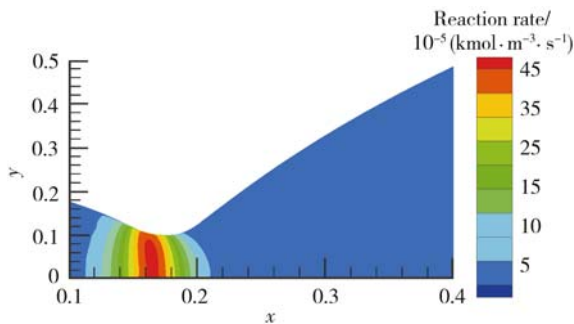
图 12 喷管内反应速率-反应 2(K 质量分数为 10^{-5})

Fig. 12 Reaction rate in the nozzle-reaction 2
(mass fraction of K is 10^{-5})

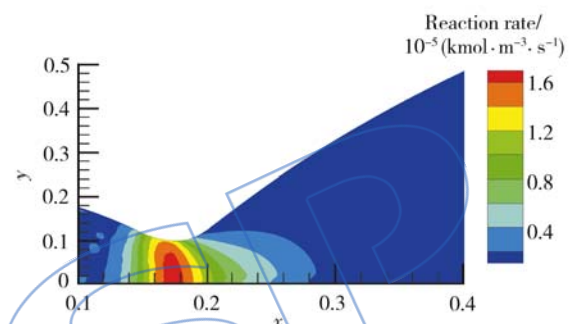
图 16 喷管内反应速率-反应 6(K 质量分数为 10^{-5})

Fig. 16 Reaction rate in the nozzle-reaction 6
(mass fraction of K is 10^{-5})

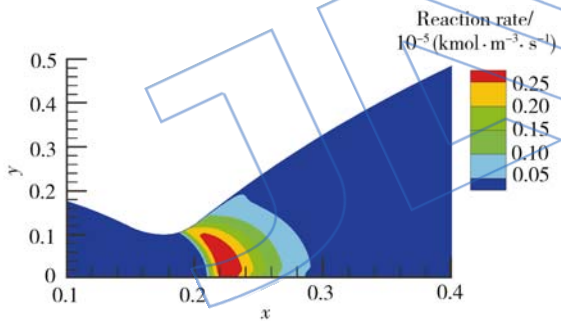
图 13 喷管内反应速率-反应 3(K 质量分数为 10^{-5})

Fig. 13 Reaction rate in the nozzle-reaction 3
(mass fraction of K is 10^{-5})

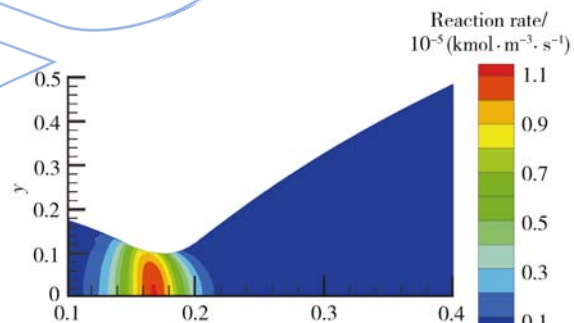
图 17 喷管内反应速率-反应 7(K 质量分数为 10^{-5})

Fig. 17 Reaction rate in the nozzle-reaction 7
(mass fraction of K is 10^{-5})

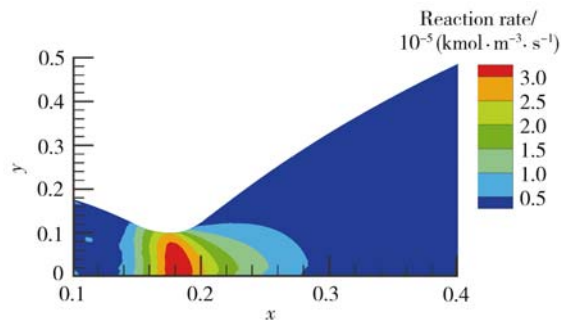
图 14 喷管内反应速率-反应 4(K 质量分数为 10^{-5})

Fig. 14 Reaction rate in the nozzle-reaction 4
(mass fraction of K is 10^{-5})

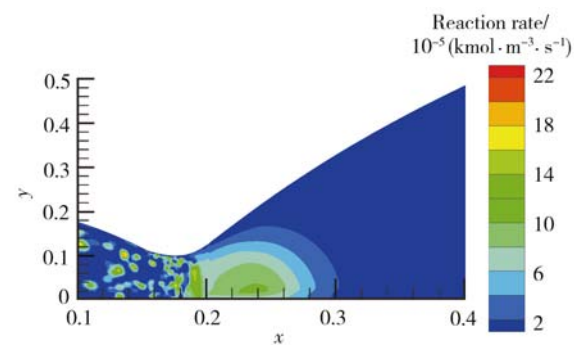
图 18 喷管内反应速率-反应 8(K 质量分数为 10^{-5})

Fig. 18 Reaction rate in the nozzle-reaction 8
(mass fraction of K is 10^{-5})

部之后扩张段前端以外,其余大部分反应都几乎只在喉部快速进行.4种三体反应的反应速率明显大于其他反应,是影响出口电子数密度的主要控制反应.由于喉部气体密度远高于喷管其他区域,发生三体反应所需的催化剂在此区域数密度很高,故反应得以迅速进行.

3.3 羽流微波衰减

图 19 是 A8(K 质量分数为 10^{-5}) 和 A9(K 质量分数为 10^{-4}) 算例中羽流区电子数密度,图中几何尺寸为用出口半径 r_{exit} 进行无量纲化的结果.电子数密度最大值出现在喷口外沿附近,分别为 4.0×10^{10} 和 $7.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.羽流形状在喷口后 $2r_{\text{exit}}$ 左右明显收窄,电子数密度也大幅下降.

图 20 是 A8 和 A9 算例中 5, 10 GHz 和 30 GHz 微波平行于出口截面横穿羽流时的衰减量.从图中可以看出,不同频率微波在羽流中的衰减量相差很大.低频微波较高频更易受到干扰,5

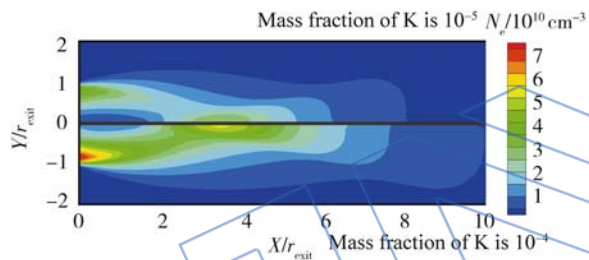


图 19 羽流区电子数密度

Fig. 19 Electron number densities in the plume

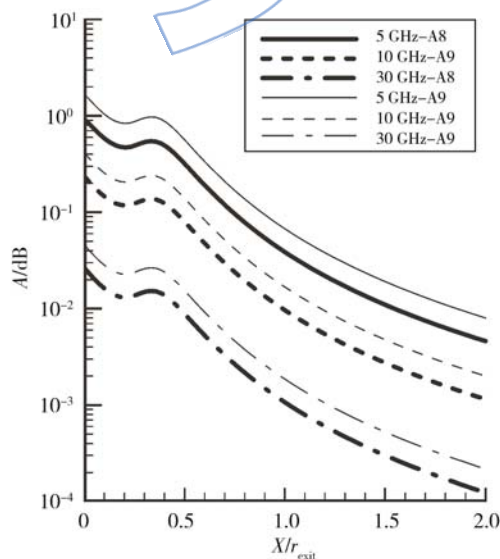


图 20 5~30 GHz 微波横穿羽流衰减量

Fig. 20 Microwave attenuation of 5~30 GHz along the oblique path

GHz 微波衰减量级在几个 dB 左右,而频率在 10 GHz 以上时衰减很小.杂质含量的增加也会增强衰减作用.图 21 是 A9 算例中羽流从不同角度穿过羽流的情况,微波路径与发动机的相对位置参见图 2.在大部分区域里,随着微波斜穿羽流的角度增大,总微波衰减量有所增加,这可能是由于斜穿路径较横穿路径相对较长.但入射角度的改变还不足以引起量级变化.最大衰减量为 4.5 dB.

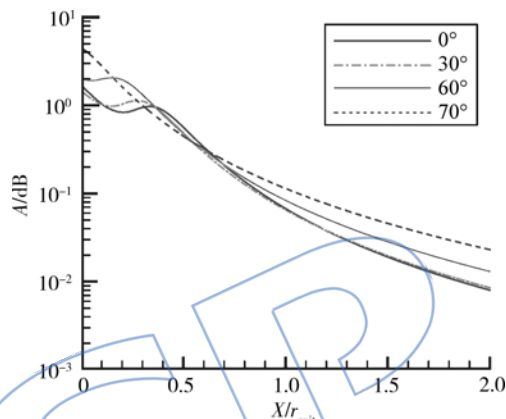


图 21 5 GHz 微波以不同角度穿过羽流的衰减量(A9)

Fig. 21 Microwave attenuation of 5 GHz from different directions (A9)

4 结 论

通过上述分析可以得出如下结论:

1) 燃烧室电子数密度量级为 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.碱金属元素是主要的电子释放剂,其质量分数是决定电子数密度的主要因素,元素存在形式的影响则很小.Cl 是主要电子吸收剂.

2) 电子数密度在喷管内下降,出口数密度量级为 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$,靠近外壁区域较中心区域密度高.涉及 K, Na, Cl, OH 的 4 种三体结合反应是主要的控制反应.

3) 低频微波较高频微波更易衰减量,而微波斜穿羽流时路径较长,衰减比横穿时略大.在较高推进剂杂质质量分数下,本文所研究的发动机对微波的衰减可达到 4.5 dB.因此在实际工程应用中,当信号可能经过液体火箭发动机羽流时,有必要对可能的衰减进行评估.

参考文献:

- [1] Smoot L D, Underwood D L, Schroeder R G. Prediction of microwave attenuation characteristics of rocket exhausts [R]. AIAA 65-181, 1965.
- [2] Smoot L D, Underwood D L. Prediction of microwave at-

- tenuation characteristics of rocket exhausts[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1996, 3(3): 302-309.
- [3] Hughes R C, Landrum D B. Computational investigation of electron production in solid rocket plumes[R]. AIAA 93-2454, 1993.
- [4] Copper D A, Frederick R A. The measurement of electron density in a rocket motor plume[R]. AIAA 93-2453, 1993.
- [5] Mikatarian R R, Pergament H S. Effects of altitude on radar attenuation in nonequilibrium afterburning rocket exhaust plumes[J]. AIAA Journal, 1969, 7(1): 159-161.
- [6] 刘青云, 张平, 安冬梅. 固体推进剂碱金属杂质及喷焰后燃效应的参数辨识研究[J]. 推进技术, 1999, 20(3): 45-49, 77. LIU Qingyun, ZHANG Ping, AN Dongmei. Parameters identification of alkali metal impurities of solid propellant and properties of exhaust afterburning[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(3): 45-49, 77. (in Chinese)
- [7] 张平, 崔继嵩, 刘青云. 二维火箭喷焰流场的化学组份和电磁特性计算[J]. 推进技术, 1993, 8(4): 8-13. ZHANG Ping, CUI Jisong, LIU Qingyun. Two-dimensional calculation of chemical species and electrical properties in rocket exhaust plume flow fields[J]. Journal of Propulsion Technology, 1993, 8(4): 8-13. (in Chinese)
- [8] 王华峰, 李疏芬. 固体火箭发动机喷焰对微波的衰减[J]. 固体火箭技术, 1989, 13(4): 1-12.
- [9] 张硕, 魏志军, 王宁飞, 等. 固体火箭发动机排气羽流对微波衰减的计算方法[J]. 航空动力学报, 2009, 24(3): 705-710. ZHANG Shuo, WEI Zhijun, WANG Ningfei, et al. Calculation method of microwave attenuation by exhaust plume of solid rocket motors[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(3): 705-710. (in Chinese)
- [10] 张硕, 王宁飞, 张平, 等. 固体火箭发动机排气羽流对红外制导信号衰减的计算方法[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(5): 408-411. ZHANG Shuo, WANG Ningfei, ZHANG Ping, et al. Calculation method on infrared signal attenuation caused by exhaust plume of solid rocket motor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2007, 30(5): 408-411. (in Chinese)
- [11] 石雁祥, 王菊, 葛德彪, 等. 火箭喷焰微波衰减特征的理论研究[J]. 固体火箭技术, 2008, 31(4): 421-424. SHI Yanxiang, WANG Ju, GE Debiao, et al. Theoretical study on attenuation characteristics of microwave in rocket exhaust plume[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008, 31(4): 421-424. (in Chinese)
- [12] 李宜敏, 张中钦, 张远君. 固体火箭发动机原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991.
- [13] Bird G A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flow[M]. New York: Oxford University Press Inc, 1994.
- [14] Russo A J. Estimates of attenuation and reflection of telemetry signals by ionized flow fields surrounding typical reentry bodies[R]. Washington DC: Langley Research Center, National Aeronautics and Space Administration, NASA Technical Note D-1778, 1963.
- [15] 曹晔, 徐蕴芝, 李志鲲, 等. 原子吸收光谱法测定无水肼中杂质金属钠[J]. 航天发射技术, 2003, 4(2): 42-44.