

文章编号:1000-8055(2009)03-0705-06

固体火箭发动机排气羽流对微波衰减的计算方法

张 硕¹, 魏志军², 王宁飞², 张 平²

(1. 中国航天科工集团 第三研究院, 北京 100074;

2. 北京理工大学 宇航科学技术学院, 北京 100081)

摘 要: 研究了弱电离的羽流等离子体对平面正弦微波的衰减机理,应用羽流等离子体电磁场标准 Maxwell 方程,结合颗粒相产物充放电的 Shukla 方程,给出有效用于微波衰减的预估方法;编制了(Radio frequency attenuation calculation,简称 RFAC)羽流场微波衰减计算软件;分析了羽流场各特性参数对复电导率及微波衰减常数的影响规律,并结合 ThermoCalc 推进剂热力学评估系统计算了两种不同推进剂配方下,喷管出口羽流场对微波制导信号的衰减,计算结果与文献中的实验结果符合较好。

关 键 词: 微波衰减; 排气羽流; 固体火箭发动机; 电导率; 衰减常数

中图分类号: V435

文献标识码: A

Calculation method of microwave attenuation by exhaust plume of solid rocket motors

ZHANG Shuo¹, WEI Zhi-jun², WANG Ning-fei², ZHANG Ping²

(1. The 3rd Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100074, China;

2. School of Aerospace Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The attenuation mechanism of microwave was investigated according to the standard Maxwell equations of exhaust plume plasma. With a reference to the Shukla charging equation of particle components, the prediction method of microwave attenuation by weakly ionized exhaust plume plasma was presented. Radio frequency attenuation calculation (RFAC) software was designed and used to calculate the rules of complex conductivity and microwave attenuation constant that are influenced by some special exhaust plume field parameters. The RFAC and ThermoCalc propellant thermo evaluation system was used comprehensively to calculate the microwave attenuation by nozzle exhaust plume field that comes from two different kinds of propellant. The calculation consequences are in well agreement with the experimental results in citation.

Key words: microwave attenuation; exhaust plume; solid rocket motor; conductivity; attenuation constant

收稿日期: 2008-01-27; **修订日期:** 2008-04-08

基金项目: 国防基础科研项目(B2220060060)

作者简介: 张硕(1983-),男,辽宁沈阳人,博士生,主要从事推进技术与固体火箭发动机排气羽流制导信号衰减预估技术的研究。

为了提高固体推进剂的能量,控制不稳定燃烧以及改善推进剂的某些性能,通常在配方中加入铝粉和碱金属燃料.推进剂燃烧过程中,铝粉、碱金属以及其他中性粒子的高温电离使发动机排气羽流中产生一定浓度的自由电子和离子,此外由于排气羽流的一次烟、二次烟以及二次燃烧等特征信号效应的存在,使固体火箭发动机排气羽流表征为带有三氧化二铝、碳颗粒等固相或凝相颗粒的弱电离的等离子体.因此固体火箭发动机排气羽流对微波制导信号有强烈的衰减作用,衰减强度由几分贝到几十分贝,严重时可使微波制导信号中断.因此研究排气羽流对微波制导信号的衰减机理,对降低微波制导信号的衰减,提高制导精度有着重要的意义.排气羽流对微波的衰减主要受到自由电子浓度,三氧化二铝等颗粒相产物的浓度以及分布状况有关.文献[1-2]提出了以自由电子导电为主的微波衰减模型,当自由电子浓度增大时,微波衰减增大;但通过实验对比,发现计算值通常小于实测值,主要原因是忽略了颗粒相对微波衰减的影响.文献[3-4]指出当推进剂中铝粉含量较大时,推进剂的能量增大,燃烧温度提高,铝的电离能上升,它对自由电子的贡献不可忽视,同时三氧化二铝等颗粒相产物的浓度也随之增大,排气羽流对微波的衰减也会增大,但并没有给出合理且有效的计算方法.

本文以排气羽流等离子体电磁场的标准 Maxwell 方程为基础,结合颗粒相产物充放电的 Shukla 方程,考虑铝等金属燃料颗粒相产物对微波衰减的影响因素的情况下,给出了弱电离排气羽流等离子体的复电导率及微波衰减常数的计算方法;同时,分析电子浓度、颗粒浓度等羽流各参数对复电导率及微波衰减常数的影响规律,编制考虑颗粒衰减情况下的排气羽流微波制导信号衰减计算软件,力争实现界面友好、简单易用、结果准确.此外,同步开发的 ThermoCalc 推进剂热力学评估系统是专门用于推进剂配方选取及发动机热力计算的软件,应用它可以方便的得到不同压力及配方条件下,发动机的热力学性能参数,将结果代入(Frequency attenuation calculation, RFAC)排气羽流微波衰减计算软件,计算出采用不同推进剂配方的某发动机排气羽流的微波衰减特性.

1 微波在排气羽流中的衰减

当正弦平面微波 $E = E_0 e^{-\alpha z}$ 入射到排气羽流

场中时,由于排气羽流的衰减效应,使得微波的能量减小为 E_0 ,则 $E/E_0 = e^{-\alpha z}$,衰减因子 A 定义为

$$A = 20 \lg(E/E_0) = -8.686 \alpha z$$

其中 α 为微波衰减常数,单位为 dB/m, z 为微波在羽流场经过的距离,单位为 m, A 的单位为 dB.

1.1 微波衰减常数 α

对于固体火箭发动机排气羽流等离子体电磁场,Maxwell 方程的表示形式是

$$\nabla \times H = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma_r E + \sigma_i E \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\mu_r \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad \nabla \cdot E = 0 \quad (3)$$

其中 H 为磁场强度矢量; E 为电场强度矢量; σ_r 为与电子碰撞相关的复电导率,单位为 S/m; σ_i 为与电子对颗粒相产物充电相关的复电导率; t 表示时间; ϵ_0 为真空介电常数 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; μ_r 为羽流等离子体的磁导率; ϵ_r 为相对介电常数,它是表征介质极化性质的物理量.

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \quad \omega_p = \frac{e \sqrt{N_e}}{\sqrt{m_e \epsilon_0}} \quad (4)$$

其中 ω_p 为羽流等离子体的自振频率; ω 为微波入射频率; $\nu = \nu_e + \nu_i + \nu_n$ 为自由电子与电子、离子及中性分子和的有效碰撞频率之和; N_e 为羽流等离子体中的自由电子数密度; e 为单个自由电子的带电量 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, m_e 为自由电子的质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

假设入射羽流场中的微波为正弦波

$$E = E_0 \exp(i\omega t) \quad (5)$$

则式(1)可按照文献[1]的方法表示为

$$\nabla^2 E = -\omega^2 \mu_0 \left[\epsilon_0 \epsilon_r - i \frac{\sigma_r + \sigma_i}{\omega} \right] E \quad (6)$$

令

$$\gamma^2 = -\omega^2 \mu_0 \left[\epsilon_0 \epsilon_r - i \frac{\sigma_r + \sigma_i}{\omega} \right] \quad (7)$$

令

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad (8)$$

假设入射微波为平面波, E 和 H 是坐标 z 和 t 的函数,则式(6)的解为

$$E(z, t) = E_0 \exp(-\alpha z) \exp[i(\omega t - \beta z)] \quad (9)$$

其中 α 为羽流等离子体对微波的衰减常数, β 为相位常数.

由于光速

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (10)$$

因此衰减常数 α 如 (11) 式所示,它是入射微波频率,电子与中性分子的碰撞频率,颗粒相产物的充电频率以及羽流等离子体的自振频率四者的函数。

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0^2 + \left[\frac{\alpha_R + \alpha_{IR}}{\omega \epsilon_0} \right]^2} - \epsilon_0 \quad (11)$$

1.2 复电导率 α

假设羽流等离子体系统中的离子是一次电离的,对于正弦波电磁场,自由电子的速度分布也服从正弦规律变化,则

$$eE = m_e V_e (i\omega + \nu) \quad (12)$$

由欧姆定律可知,自由电子的电导率等于自由电子的电流密度 I_e 除以电磁场强度 E ,则

$$\alpha = \frac{I_e}{E} \quad \text{并且} \quad I_e = eN_e V_e \quad (13)$$

其中 N_e 为自由电子的电子数密度,则将 (12) 式和 (13) 式联立可得

$$\alpha = \frac{e^2 N_e}{m_e (\nu + i\omega)} = \epsilon_0 \frac{\omega_p^2}{\nu + i\omega} = \frac{\epsilon_0 \omega_p^2 \nu}{\nu^2 + \omega^2} - i \frac{\omega \epsilon_0 \omega_p^2}{\nu^2 + \omega^2} \quad (14)$$

因为 α 是一个复电导率,令 $\alpha = \alpha_R + i\alpha_I$, α_R 为复电导率的实部, α_I 为复电导率的虚部,实部表示实际电导率,而虚部表示极化率。

1.3 复电导率 α

颗粒相产物的充放电过程满足 Shukla 方程^[6-7],它描述了颗粒相产物的充放电过程。

由欧姆定律

$$I_d = \alpha_d E \quad (15)$$

式中 I_d 为由于电子及离子对颗粒相产物充放电效应产生的电流密度。

由文献[8]可知,假设颗粒相产物具有平均粒径大小 r_d 且带电量均相同,则

$$I_d = (-1) \frac{N_d}{i\omega + \nu_{ch}} \cdot \frac{Q_{ed} \epsilon_0 \omega_p^2 E}{i\omega + \nu} \quad (16)$$

Q_{ed} 为电子对颗粒相产物的碰撞截面, ν_{ch} 是颗粒相产物的充电频率, N_d 为颗粒数密度,由颗粒摩尔分数 x_d 求出;同样在正弦电场的作用下,由 (15) 式和 (16) 式及 $Q_{ed} = \pi r_d^2$ ^[2] 可知

$$\alpha_d = (-1) \frac{N_d N_e \pi r_d^2 e^2}{m_e (i\omega + \nu_{ch}) (i\omega + \nu)} \quad (17)$$

因为 α 是一个复电导率,令 $\alpha = \alpha_R + i\alpha_I$, α_R 为复电导率的实部, α_I 为复电导率的虚部,实部表示实际电导率,而虚部表示极化率。

羽流等离子体的实际电导率为

$$\alpha_R + \alpha_{IR} = \frac{e^2 N_e \nu}{m_e (\nu^2 + \omega^2)} + \frac{N_d N_e e^2 \pi r_d^2 (\omega^2 - \nu_{ch} \nu)}{m_e (\omega^2 + \nu_{ch}^2) (\omega^2 + \nu^2)} \quad (18)$$

由上式可以看出,排气羽流对微波的衰减的影响主要有两部分,电子及颗粒相。这样就很好解决了此前只考虑电子导电影响因素的情况下,衰减计算值略小的问题,同时也给出了考虑颗粒相情况下的电导率的计算方法,计算结果也将更为合理和准确。

1.4 自由电子数密度及影响因素

通常羽流场计算得到的是自由电子的摩尔分数,为了计算上的方便,根据阿佛加德罗定律必须转换为电子的数密度^[9] ($1/\text{cm}^3$)。

$$N = 0.737 \times 10^{22} x_e p / T \quad (19)$$

式中 x_e 为排气羽流场中自由电子的摩尔分数, p 为羽流等离子体的压力 (Pa), T 为羽流区域的温度 (K)。

1.5 羽流等离子体碰撞频率

碰撞频率是羽流等离子体的一个重要参数。碰撞频率是指单位时间内自由电子与中性分子、原子及带电粒子团的碰撞次数。由于排气羽流是一种弱电离的等粒子体,自由电子的碰撞频率主要由几种中性分子的碰撞频率决定,因此主要考虑自由电子与中性分子之间的碰撞频率。对于一般的导弹发动机排气羽流而言,这几种中性分子是 CO , CO_2 , H_2O , HCl , N_2 和 H_2 。中性分子、原子的运动速度远比自由电子小,可以认为他们相对于自由电子是静止的。根据经典电动力学可得到电子与中性分子的碰撞频率为

$$\nu = \frac{4.57 \times 10^{27} p \sum_{i=1}^n x_i Q_{ei}}{\sqrt{T}} \quad (20)$$

式中 x_i 为某一中性分子的摩尔分数, n 为中性分子的种类, Q_{ei} 为自由电子与该中性分子的碰撞截面 (cm^2),它与自由电子的速度有关,文献[10]列出了排气羽流中几种主要成分的碰撞截面。

电子对颗粒相产物的充电频率是羽流等离子体的又一重要特性。当电子与颗粒相产物进行充电碰撞时,颗粒相产物会偏离其平衡位置,表面电荷也会引起扰动,有效碰撞截面发生了变化。扰动

后的颗粒产物要恢复到其平衡状态时的快慢就定义为颗粒相产物的充电频率 u_{ch} 。由充电平衡条件以及羽流等离子体中性条件可以得到颗粒产物粒子的充电频率为

$$u_{ch} = \frac{e|I_{e0}|}{r_d} \left[\frac{1}{KT} + \frac{1}{KT} \left(\frac{e\phi_d}{r_d} \right) \right] \quad (21)$$

式中 $|I_{e0}|$ 为带电颗粒相粒子处于平衡时的电子电流, K 为玻尔兹曼常数。

2 羽流场各参数对电导率及衰减常数的影响

结合上面给出的羽流等离子体对微波衰减的计算方法,作者编制了 RFAC 衰减计算软件;通过计算给出了羽流场各参数对实际电导率及衰减常数的影响规律;此外为了形成一套完整的微波衰减预估系统,作者还编制了 ThermoCalc 推进剂热力学评估软件用于推进剂的热力学计算,并将计算结果代入 RFAC 衰减计算软件用于微波衰减计算。

1) 颗粒平均半径对衰减常数的影响:给定微波入射频率为 20 GHz,羽流场压强为 0.2 MPa,羽流场温度为 2000 K, CO , CO_2 , H_2O , HCl , N_2 和 H_2 六种产物的浓度分别为:0.03, 0.02, 0.09, 0.08, 0.06 和 0.01,自由电子的浓度为 1.0×10^{-5} ,颗粒相摩尔浓度为 0.002,通常,固体火箭发动机排气羽流颗粒相产物的粒径在 $1 \sim 10 \mu m$ 范围内,且呈正态分布。假定颗粒相分别在在 $1 \sim 2 \mu m$, $1 \sim 3 \mu m$, $1 \sim 4 \mu m$, $1 \sim 5 \mu m$, $1 \sim 6 \mu m$, $1 \sim 7 \mu m$, $1 \sim 8 \mu m$, $1 \sim 9 \mu m$ 和 $1 \sim 10 \mu m$ 范围内呈标准正态分布,平均粒径由 Rosin-Rammler 分布求出,计算结果如图 1 所示。可以看出随着颗粒平均半径的增加,羽流场微波衰减常数逐渐增大。

2) 电子的浓度对衰减常数的影响:羽流场中电子的浓度由推进剂中的碱金属含量,羽流温度及压强等因素的影响,通常在 10^{-15} 到 10^{-4} 之间。计算中分别取 10^{-5} , 10^{-6} 和 10^{-7} ,其它给定条件与 1) 相同,结果如图 2 所示。可以看出随着自由电子的浓度的增加,衰减常数逐渐增大。

3) 颗粒的浓度对衰减常数的影响:颗粒的浓度由 0.0001 增大到 0.003,其他给定条件与 1) 相同,结果如图 3 所示。可以看出随着颗粒的浓度的增加,衰减常数逐渐增大。

4) 微波入射频率对衰减常数的影响:颗粒相的浓度分别为 0.02, 0.002 和 0,微波入射频率由 20 GHz 逐渐增大到 60 GHz,颗粒半径范围 $1 \sim 10$

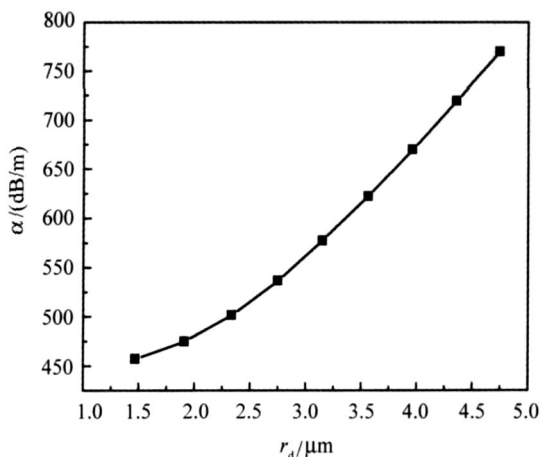


图 1 衰减常数随颗粒平均半径的变化

Fig. 1 Attenuation constant versus average radius of particle

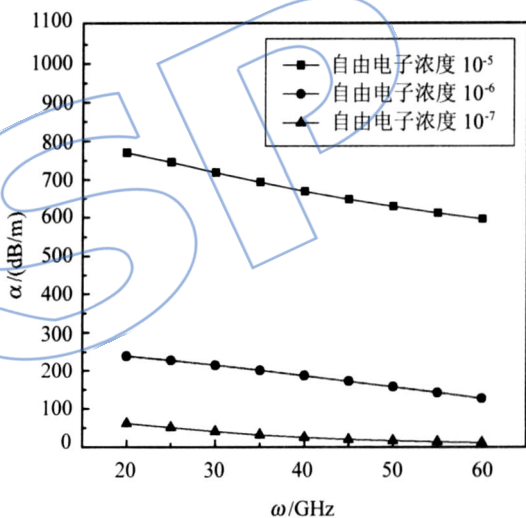


图 2 衰减常数随电子摩尔浓度的变化

Fig. 2 Attenuation constant versus molar concentration of electron

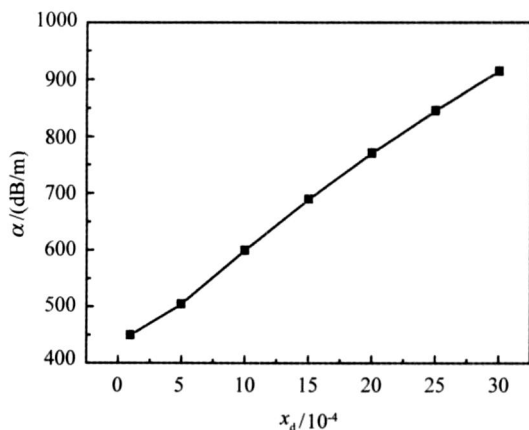


图 3 衰减常数随颗粒摩尔浓度的变化

Fig. 3 Attenuation constant versus molar concentration of particle

μm ,其它给定条件与 1) 中相同,结果如图 4 所示.可以看出随着微波入射频率的增加,微波衰减常数不断减小,随着颗粒相的浓度的降低而减小,并且考虑颗粒相时的衰减常数远大于不考虑颗粒相时的衰减常数.因此微波衰减计算中,颗粒相的影响是不能忽略的.

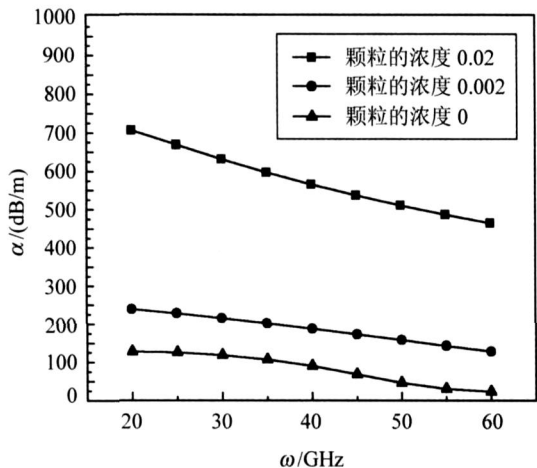
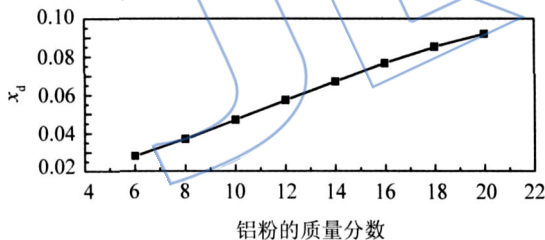


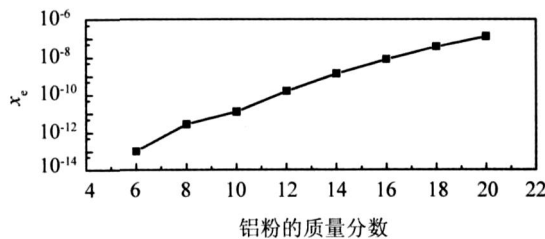
图 4 微波入射频率对衰减常数的影响

Fig. 4 Influence of microwave frequency on attenuation constant

5) 文献[1-2,10]认为,电子浓度主要受到碱金属含量的影响,但实际上,固体推进剂中碱金属的含量很少,而真正影响电子浓度的是推进剂中



(a)



(b)

图 5 铝粉含量对自由电子及颗粒浓度的影响

Fig. 5 Influence of aluminum content on electron and particle concentration

铝粉的含量,由 ThermoCalc 的计算结果可知(如图 5 所示),随着铝粉含量的增加,自由电子浓度显著增大,同时铝粉含量的增加也导致流场温度的升高,也会导致自由电子数密度升高.随着自由电子摩尔浓度的升高,微波衰减常数也不断增大.

6) 铝粉含量对衰减常数的影响:自由电子的浓度为 10^{-5} ,计算结果如图 6 所示,随着铝粉含量的增加,微波衰减常数显著增大.

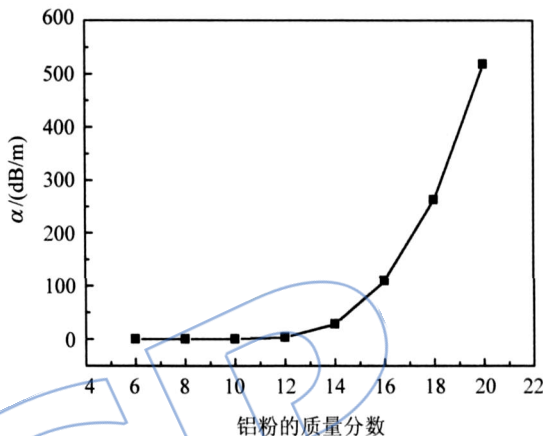


图 6 铝粉含量对衰减常数影响

Fig. 6 Influence of aluminum content on attenuation constant

3 应用实例

应用 ThermoCalc 推进剂热力学评估系统及 RFAC 微波衰减预估软件对某发动机推进剂进行了热力计算以及喷管出口处的微波衰减计算,选用的进剂配方如表 1 所示,喷管出口压强为 0.3 MPa,颗粒范围为 $1\sim 10\mu\text{m}$,微波入射频率为 20 GHz,喷管出口处羽流各参数及微波衰减计算结果如表 2 所示.可以看出配方 2 相对于配方 1 减少了黑索金的含量而增加了铝粉的含量,产物中自由电子摩尔浓度以及三氧化二铝颗粒的浓度显著增大,喷管出口处羽流场温度增加,羽流等离子体碰撞频率与自振频率增大,实际电导率及微波衰减常数显著提高.文献[11]实验数据给出在相同的外部环境下,当铝粉百分含量为 11~13.7 的固体火箭发动机燃烧时,其排气羽流对微波的衰减为 10~15 dB,当微波通过羽流场的距离为 0.3 m 时,其衰减常数为 30~45 dB/m,与配方 1 计算得到的微波衰减常数接近,证明本文的计算结果是合理的.

表 1 计算中使用的推进剂配方

Table 1 Double propellant prescription using in calculation

配方 1				
RD X(黑索金)	Al(铝粉)	N H ₄ ClO ₄ (A P)	HTPB(端羟基聚丁二烯)	其他
30.4	15	40.6	8.9	5.1

配方 2				
RD X(黑索金)	Al(铝粉)	N H ₄ ClO ₄ (A P)	HTPB(端羟基聚丁二烯)	其他
39.4	6	40.6	8.9	5.1

表 2 羽流各参数及衰减计算结果

Table 2 Parameters of plume and attenuation calculation result

	自由电子 摩尔分数	颗粒摩尔 分数	羽流场 温度/ K	自由电子数 密度/ (1/ m ³)	实际电导 率/ (S/ m)	微波衰减常 数/ (dB/ m)
配方 1	2.0899×10^{-9}	0.072	2667	1.76×10^{15}	0.225	37.02
配方 2	1.729×10^{-13}	0.028	1997	1.93×10^{11}	8.67×10^{-6}	8.347×10^{-3}

4 结 论

1) 本文在分析了固体火箭发动机排气羽流对微波制导信号衰减机理的基础上,给出了排气羽流等离子体复电导率及微波衰减常数的计算方法,编制了 RFAC 微波衰减计算软件。

2) 应用 RFAC 微波衰减计算软件计算了羽流场中各参数对电导率及微波衰减常数的影响。得出电导率及微波衰减常数随着自由电子浓度、颗粒相浓度以及颗粒平均半径的增加而增大,随微波入射频率的增加而减小;考虑颗粒相时的衰减常数远大于不考虑颗粒相时的衰减常数,因此微波衰减计算中,颗粒相的影响是不能忽略的。

3) 结合某型号发动机推进剂,应用 ThermoCalc 推进剂热力学评估系统以及 RFAC 软件计算了排气羽流对微波制导信号的衰减,并与文献的实验结果进行了比较,验证了计算结果的合理性。此外,文中计算采用的是喷管出口处的各参数的平均值,后续工作将考虑衰减截面上各羽流场参数的分布情况,并采用积分求和的方法计算衰减值。

参考文献:

[1] 刘青云. 火箭喷焰微波衰减的预示技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 1999.

LIU Qingyun. Study on the technology for prediction of microwave attenuation of rocket exhaust plumes[D]. Bei-

jing: Beijing Institute of Technology, 1999. (in Chinese)

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

[3] 王长起. 固体火箭发动机喷焰微波衰减的研究[J]. 固体火箭技术, 1992, (2) : 14-20.

WANG Changqi. Studies on the microwave attenuation of solid rocket motor plume [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1992, (2) : 14-20. (in Chinese)

[4] 刘运明. 运载火箭尾焰对电磁波干扰特性研究[D]. 北京:装备指挥技术学院, 2007.

LIU Yunming. Research on RF interference with carrier rocket plume[D]. Academy of Equipment Command and Technology, 2007. (in Chinese)

[5] 袁敬, 莫怀德. 等离子体中的波[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1990.

YUAN Jing, MO Huaide. Waves in plasmas[M]. Chengdu: Publishing of University of Electronic Science and Technology, 1990. (in Chinese)

[6] Shukla P K. Introduction to dusty plasma physics[M]. London: IOP Publishing Ltd, 2002.

[7] Shukla P K. A survey of dusty plasma physics[J]. Physics of Plasmas, 2001, 8(5) : 1971-1803.

[8] Ma J X, Yu M Y. Langmuir wave instability in a dusty plasma[J]. Physical Review E, 1994, 50(4) : 2431-2433.

[9] Mikatarian R R, Kan C J. A fast computer program for non-equilibrium rocket plume predictions[R]. Final Report, AD751984, 1972.

[10] Holland J M, Jessup H A. Predicting radar attenuation[J]. AIAA 65-180.

[11] Baghdady E J, Ely O P. Effects of exhaust plasmas upon signal transmission to and from rocket powered vehicles [J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54 (9) : 1134-1146.