

尘埃粒子对等离子体衰减特性的影响研究

姚长江 杨翠红 陈云云*

南京信息工程大学物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044

摘要 通过比较研究,讨论了尘埃粒子的存在对等离子体衰减特性的影响。主要讨论了三种情况下的衰减系数:1)仅考虑粒子间的碰撞;2)考虑粒子间的碰撞以及电子、离子对尘埃粒子的充电;3)在2)的基础上考虑背景等离子体电势的影响。在推导出衰减系数的基础上,选取火箭喷焰为典型实例,详细给出了衰减系数随温度、压强以及频率变化趋势。研究表明:在微波段低频区时,温度、压强皆有临界值,使得对应的衰减系数变化产生低谷。当温度、压强一定时,尘埃等离子体的衰减系数峰值出现在共振频率附近,峰值与共振频率之间的距离取决于温度、压强对共振频率的影响;温度、压强、频率相同时,计算三种情况下的衰减系数,第三种总是大于前两种的,且所得衰减系数正好处在实测范围内。所以,在计算衰减系数时需要考虑背景等离子体电势的影响。

关键词 光谱学;尘埃等离子体;衰减系数;电势影响因子;电导率

中图分类号 O539 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.023005

Influence of Dust Particles on Attenuation Characteristic of Plasma

Yao Changjiang Yang Cuihong Chen Yunyun

Institute of Physics and Optical Engineering, Nanjing University of Information

Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract The effect of dust particles on the attenuation characteristic of plasma is discussed in three kinds of situation: 1) considering the collision between particles only; 2) considering both the particles' collision and the charging of the charged particles (electrons and ions) on the dust particle; 3) considering the effect of the electrical potential based on 2). Based on the calculation of the attenuation coefficient, the rocket exhaust plume is taken as an example on further analysis and discussion. The attenuation coefficient has a critical value with temperature and pressure, when in the low frequency of microwave band, and the corresponding attenuation coefficient produces a trough. The attenuation peaks appears near the dusty plasma resonant frequency. The distance between the position of the peak value and the resonant frequency is determined by the effect of the temperature and pressure on resonance frequency. At a given temperature, pressure and frequency, the attenuation coefficient of the third is larger than the other two and in the area of the experimental data. So, the effect of the electrical potential impact factor needs to be considered in the calculation.

Key words spectroscopy; dusty plasma; attenuation coefficient; electrical potential impact factor; conductivity

OCIS codes 300.1030; 350.5400; 300.6370

1 引言

近年来,等离子体技术在很多方面都有应用,例如击穿光谱技术^[1]、单向激发等离子体^[2]、等离子光谱学^[3]等。航空技术中,在分析火箭发动机喷焰成分时,将喷焰看作一种尘埃等离子体,研究其衰减特性^[4-7]。火箭发动机喷焰对微波的衰减是航天通信研究领域非常值得关注的问题。事实上,尘埃等离子体的电磁特性与一般等离子体有很大不同。在分析尘埃等离子体对微波的衰减和色散特性时,以往的等离子体理论由于

收稿日期: 2015-06-23; 收到修改稿日期: 2015-08-17; 网络出版日期: 2016-01-08

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20131428)

作者简介: 姚长江(1992—),男,硕士研究生,主要从事尘埃等离子体的衰减特性方面的研究。E-mail: 1273905937@qq.com

导师简介: 杨翠红(1978—),女,教授,博士生导师,主要从事低维材料光电输运性能理论方面的研究。

E-mail: yangcuihong1978@163.com

*通信联系人。E-mail: yunqq321@sina.cn

忽视了尘埃粒子的影响,结果造成微波衰减的理论值远小于实际测量值^[8]。他们主要研究其纵波不稳定性、尘埃粒子晶体特性以及电磁波散射等^[9-11]。尘埃等离子体衰减特性方面的研究近些年才有相关报道。国内李芳等^[12-13]曾研究了等离子体中尘埃粒子对电磁波的吸收效应,他们在对尘埃粒子引入充电频率的概念后,通过求解无碰撞项的Vlasov方程得到了尘埃等离子体的低频纵介电常量。可以看出,其衰减特性的得出来源于电导率及复介电常数的计算。但是在推导过程中忽略了尘埃粒子与背景等离子体之间的电势差,即未考虑背景电势的影响。陈云云等^[14]提出电势影响因子对复数电导率的影响,对电导率模型进行了完善,研究了电导率特性。然而,他们并没有进一步探究电势影响因子对尘埃等离子体衰减系数的影响。基于此,围绕仅考虑碰撞、同时考虑碰撞和充电、和在考虑碰撞和充电的基础上加上背景等离子体的电势的影响等三种情况,研究不同温度、压强和频率下,等离子体衰减系数的变化情况。

2 基本理论

在研究衰减系数特性的时候,通常先求解复杂介质中的电导率、介电常数,然后利用结果计算出衰减系数。这种复杂介质中电导率的计算,需要分三个阶段考虑。

1) 在仅考虑碰撞时的电导率,由玻尔兹曼方程和欧姆定律得复电导率^[15]

$$\sigma_{\text{ecomplex}} = \varepsilon_0 \left(\frac{\omega_{\text{pe}}^2 v_{\text{eff}}}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} - i\omega \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} \right), \quad (1)$$

式中 $\omega_{\text{pe}} = \sqrt{N_e e^2 / \varepsilon_0 m_e}$ (N_e 为电子数密度, m_e 为电子质量, e 为电子电量) 是电子等离子频率, ε_0 是真空介电常数, ω 是入射电磁波角频率, $v_{\text{eff}} = 2 \times 10^7 P T^{-1/2}$ ^[16] (P 为环境压强, T 为环境温度) 是有效碰撞频率。

2) 同时考虑碰撞和充电,利用 Shukla 方程得尘埃粒子复电导率^[16]

$$\sigma_{\text{cd}} = \varepsilon_0 v_{\text{eff}} \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + \eta_{\text{cd}} \frac{\omega^2 - v_{\text{eff}} v_{\text{ch}}}{(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)} \left(\frac{\omega}{k} \right) + i\omega \left[\eta_{\text{cd}} \frac{v_{\text{eff}} + v_{\text{ch}}}{(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)(\omega^2 + v_{\text{eff}}^2)} \left(\frac{\omega}{k} \right) - \frac{\varepsilon_0 \omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} \right], \quad (2)$$

式中 $v_{\text{ch}} = \frac{r_d}{\sqrt{2\pi}} \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{V_{T_i}} \left(1 + \frac{T_i}{T_e} + \frac{Z e^2}{4\pi \varepsilon_0 r_d \kappa T_e} \right)$ ^[13] (κ 为玻尔兹曼常数, T_i 为离子温度, T_e 为电子温度, Z 为尘埃等离子体的电荷数, r_d 为尘埃粒子半径) 是充电频率, k 是波矢大小, $V_{T_i} = \sqrt{\kappa T_i / m_i}$ (m_i : 离子质量) 是离子热速度,

$\eta_{\text{cd}} = \frac{3N_e N_d \pi r_d^2 e^2}{m_e}$ (N_d : 尘埃粒子数密度) 是充电相应因子。其中,因为考虑电子离子温度差对最终结果影响很小,可以将电子温度与离子温度认为近似相等。

3) 当电子碰撞尘埃粒子的最小速度 $v_e^m = 0$ 时,尘埃粒子的电势为 $\phi_d = \frac{Z e}{4\pi \varepsilon_0 r_d}$,则尘埃粒子复电导率^[14]

$$\sigma_{\text{cd}} = \frac{(\eta_{\text{cd}} + \eta_{\phi d})(\omega^2 - v_{\text{eff}} v_{\text{ch}})}{(\omega^2 + v_{\text{eff}}^2)(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)} \frac{\omega}{k} + \frac{i\omega(\eta_{\text{cd}} + \eta_{\phi d})(v_{\text{eff}} + v_{\text{ch}})}{(\omega^2 + v_{\text{eff}}^2)(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)} \frac{\omega}{k}, \quad (3)$$

式中 $\eta_{\phi d} = \frac{e^4}{2\varepsilon_0 m_e \kappa} \frac{Z N_e N_d r_d}{T_e}$ 是尘埃粒子的电势影响因子。电势影响因子与尘埃粒子的大小、数密度、电荷数以及背景等离子体的电子温度和数密度都有关。比较充电响应因子和电势影响因子,可以发现,尘埃粒子大小对充电响应因子的影响比电势影响因子的影响更明显。

根据纵波在尘埃等离子体中的相速 $v_\phi = \omega/k$ 。做近似处理,认为 $\omega/k = c$,则 σ_{cd} 可以表示为

$$\sigma_{\text{cd}} = \varepsilon_0 v_{\text{eff}} \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + (\eta_{\text{cd}} + \eta_{\phi d}) \frac{\omega^2 - v_{\text{eff}} v_{\text{ch}}}{(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)} c + i\omega \left[(\eta_{\text{cd}} + \eta_{\phi d}) \frac{v_{\text{eff}} + v_{\text{ch}}}{(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)(\omega^2 + v_{\text{eff}}^2)} c - \frac{\varepsilon_0 \omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} \right]. \quad (4)$$

3 衰减特性研究

3.1 衰减系数

众所周知,电导率和介电常数之间有着密切关系。在各向同性有耗电介质中,横向相对复介电常数与复电导率的关系为^[17]

$$\varepsilon^{\text{lr}} = \varepsilon_r - \frac{i\sigma}{\varepsilon_0 \omega}, \quad (5)$$

式中 ε 是介质介电常数, ε_r 是相对介电常数。等离子体的横向相对复介电常数与复电导率的关系为^[17]

$$\varepsilon^{\text{lr}} = 1 - \frac{i\sigma_{\text{ecomplex}}}{\varepsilon_0 \omega}. \quad (6)$$

1) 仅考虑碰撞。这种情况下的衰减系数为^[17]

$$\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{\sqrt{\left(\varepsilon_r\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}\right)^2} - \varepsilon_r}. \quad (7)$$

将(1)式带入(6)式中,对比(5)式得出相对介电常数 ε_r 与电导率 σ ,代入(7)式中得到衰减系数^[17]

$$\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_{\text{pe}}^2 v_{\text{eff}}}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}\right)^2} - \left(1 - \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2}\right)}. \quad (8)$$

2) 考虑碰撞和充电,同样,将(2)式带入(6)式中,得出相对介电常数 ε_r 与电导率 σ ,代入(7)式中得到衰减系数^[17]

$$\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + \varepsilon_{\text{dr}}\right)^2 + \left(\frac{\omega_{\text{pe}}^2 v_{\text{eff}}}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} + \frac{\sigma_{\text{d}}}{\varepsilon_0 \omega}\right)^2} - \left(1 - \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + \varepsilon_{\text{dr}}\right)}, \quad (9)$$

式中 $\varepsilon_{\text{dr}} = \frac{\eta_{\text{ed}}c}{\varepsilon_0} \frac{v_{\text{eff}} + v_{\text{ch}}}{(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)(\omega^2 + v_{\text{eff}}^2)}$ 为尘埃相对介电常数, $\sigma_{\text{d}} = \eta_{\text{ed}}c \frac{\omega^2 - v_{\text{eff}}v_{\text{ch}}}{(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)(\omega^2 + v_{\text{eff}}^2)}$ 为尘埃电导率。

3) 考虑电势影响因子,将(4)式代入(6)式中,得横向相对复介电常数

$$\varepsilon^{\text{lr}} = 1 - \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + \frac{(\eta_{\text{ed}} + \eta_{\text{fd}})c}{\varepsilon_0} \frac{v_{\text{eff}} + v_{\text{ch}}}{(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)(\omega^2 + v_{\text{eff}}^2)} - \frac{i}{\varepsilon_0 \omega} \left(\frac{\varepsilon_0 \omega_{\text{pe}}^2 v_{\text{eff}}}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + (\eta_{\text{ed}} + \eta_{\text{fd}})c \frac{\omega^2 - v_{\text{eff}}v_{\text{ch}}}{(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)(\omega^2 + v_{\text{eff}}^2)} \right), \quad (10)$$

相对介电常数与电导率分别为

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + \frac{(\eta_{\text{ed}} + \eta_{\text{fd}})c}{\varepsilon_0} \frac{v_{\text{eff}} + v_{\text{ch}}}{(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)(\omega^2 + v_{\text{eff}}^2)}, \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0 \omega_{\text{pe}}^2 v_{\text{eff}}}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + (\eta_{\text{ed}} + \eta_{\text{fd}})c \frac{\omega^2 - v_{\text{eff}}v_{\text{ch}}}{(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)(\omega^2 + v_{\text{eff}}^2)}, \quad (12)$$

可以容易看出,若式子中 ε_r 与 σ 不考虑 η_{fd} 则退化到第二种情况。将这两项都带入(7)式中,简化得

$$\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + \varepsilon_{\text{dr}}\right)^2 + \left(\frac{\omega_{\text{pe}}^2 v_{\text{eff}}}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + \frac{\sigma_{\text{d}}}{\varepsilon_0 \omega}\right)^2} - \left(1 - \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + v_{\text{eff}}^2} + \varepsilon_{\text{dr}}\right)}, \quad (13)$$

式中 $\varepsilon_{\text{dr}} = \frac{(\eta_{\text{ed}} + \eta_{\text{fd}})c}{\varepsilon_0} \frac{v_{\text{eff}} + v_{\text{ch}}}{(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)(\omega^2 + v_{\text{eff}}^2)}$ 为尘埃相对介电常数, $\sigma_{\text{d}} = (\eta_{\text{ed}} + \eta_{\text{fd}})c \frac{\omega^2 - v_{\text{eff}}v_{\text{ch}}}{(\omega^2 + v_{\text{ch}}^2)(\omega^2 + v_{\text{eff}}^2)}$ 为尘埃电导率。

3.2 分析和讨论

以火箭喷焰为典型实例,分析尘埃粒子以及背景电势对衰减系数的影响。部分典型喷焰参数^[18]:尘埃粒子数密度 $N_{\text{d}} = 10^{14} \text{ m}^{-3}$, 尘埃粒子半径 $r_{\text{d}} = 10^{-6} \text{ m}$, 电子温度 $T_{\text{e}} = 2000 \text{ K}$, 尘埃数密度 $N_{\text{e}} = 1.332 \times 10^{19} \sqrt{pW_{\text{A}} \sqrt{T}} \exp\left(\frac{-5805I}{T}\right)$ ^[19], 火箭喷焰中对电子浓度贡献起决定作用的几种碱金属是钾、钠、铝。其中,碱金属体积分数为 $W_{\text{k}} = 3 \times 10^{-5}$ 、 $W_{\text{Na}} = 1 \times 10^{-4}$ 、 $W_{\text{Al}} = 1 \times 10^{-3}$;钾的电离电位势是 4.339 eV, 钠的电离电位势是 5.138 eV, 铝的电离电位势是 5.9797 eV。

可以看出,温度、压强的变化会引起火箭喷焰中电子浓度、电子与分子的碰撞频率以及尘埃粒子充电频率发生变化,这使得喷焰尘埃等离子体的电导率发生变化,从而衰减系数也发生变化。同时,入射频率对衰减系数也会有很大影响。因此,下面将具体分析和讨论衰减系数随温度、压强和频率之间的关系。

3.2.1 微波段

1) 特定频率下, 衰减系数受温度、压强的影响

取入射频率为 1 GHz, 讨论衰减系数随温度和压强的变化。温度为 1000 K~3000 K, 压强为 $0.01 \times 10^5 \sim 1 \times 10^5$ Pa。

从图 1 可以看出, 仅考虑碰撞时与其他两种情况, 计算结果衰减系数有很大的差异, 而考虑背景电势、考虑碰撞和充电时的总体变化趋势类似, 只是数值上, 考虑背景电势时, 衰减最大。这是因为, 忽略了尘埃粒子充电影响而仅仅考虑碰撞, 使得计算结果不能代表整体的衰减情况, 衰减系数会小很多; 引入背景电势影响因子, 使得尘埃相对介电常数和尘埃电导率在相同温度、压强下更大, 进而使得衰减系数更大。考虑了背景电势时的衰减系数正好处在实测范围内^[17,20-23]。

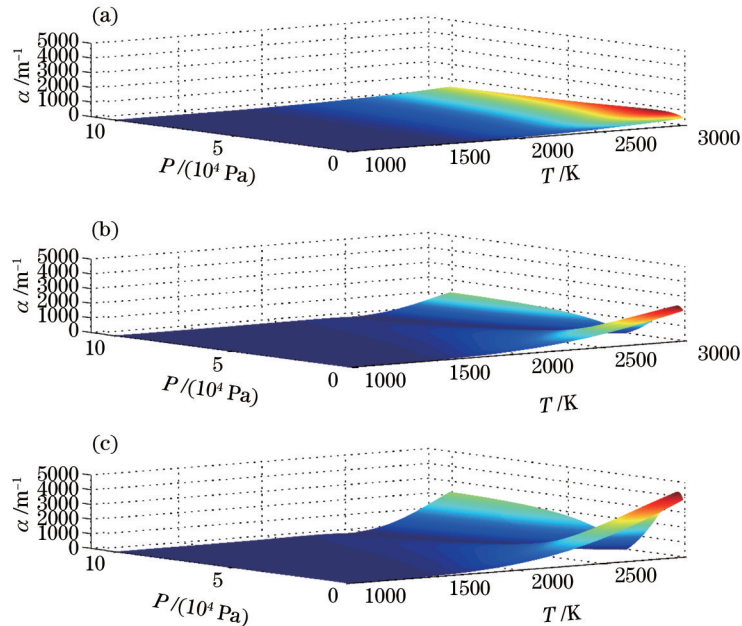


图 1 1 GHz 下衰减系数与压强、温度的关系。(a) 仅考虑碰撞; (b) 考虑碰撞和充电; (c) 考虑 η_{d}

Fig.1 Attenuation coefficient as a function of pressure and temperature at the 1 GHz for three cases. (a) Only considering the collision; (b) considering both the particles' collision and the charging of the charged particles on the dust particle; (c) considering the effect of the electrical potential η_{d}

为了进一步了解特定频率下, 衰减系数受温度、压强的影响, 再选取入射频率为 10 GHz 进行分析。为了方便比较, 温度范围依然取 1000 K~3000 K, 压强取 $0.01 \times 10^5 \sim 1 \times 10^5$ Pa。

分析图 1 和图 2 可以得出: 在特定频率下, 三种情况下的衰减系数变化明显; 在不同频率下, 温度、压强对衰减系数的影响有很大差异。

2) 在不同频率下, 考虑温度和压强一定时, 衰减系数的变化

选取典型的温度、压强数值, 将微波段的衰减情况展示出来, 具体结果如图 3 所示, 其中角频率区间为 $\omega = 1.89 \times 10^9 \sim 1.89 \times 10^{12}$ Hz。

由图 3 可见:

1) 温度升高, 衰减系数增大; 压强增大, 低频区衰减系数随之减小, 高频区衰减系数随之增大。原因是当温度升高、压强增大, 对应的电子数密度较大, 使得充电频率变大, 充电效率提高, 所以衰减增大; 在微波频率较低且在共振频率附近时, 衰减系数受有效碰撞频率的影响较大, 压强增大使得碰撞频率变大, 从而衰减系数减小。

2) 不同频率下, 衰减应该在等离子体的共振频率附近产生峰值, 但实际情况, 衰减的峰值偏离共振频率的位置。这是因为在实际计算中用电子的共振频率作为整个尘埃等离子体的共振频率, 存在一定的近似。同时, 也因为尘埃粒子的存在改变了背景等离子体的吸收特性。

3) 温度升高、压强变大后, 衰减系数的峰值与共振频率之间距离明显变大。因为, 在一定的温度和压强

范围内,随着温度升高、压强增大,电子数密度增大,这会导致电子与中性粒子、尘埃的碰撞几率增加,从而导致偏离变大。

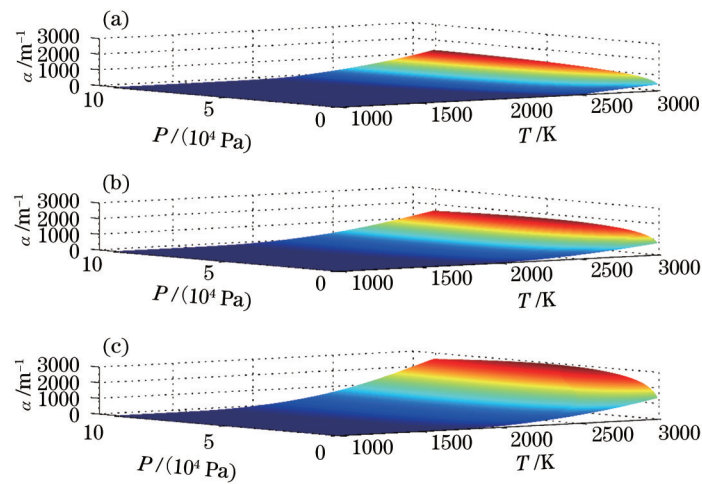
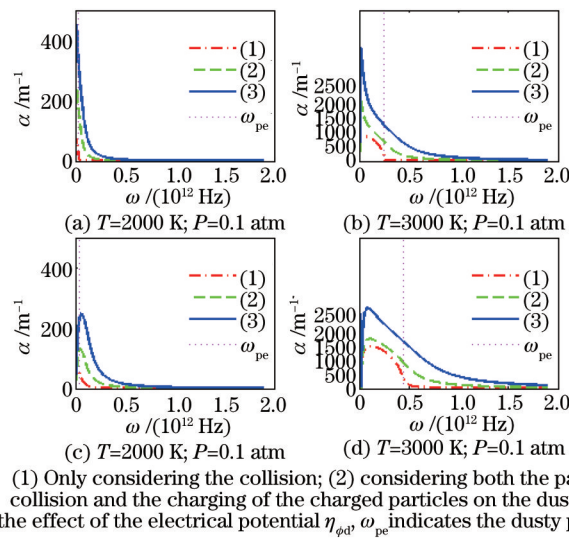


图2 10 GHz下衰减系数对压强、温度的关系。(a)仅考虑碰撞;(b)考虑碰撞和充电;(c)考虑 $\eta_{\phi d}$

Fig.2 Attenuation coefficient as a function of pressure and temperature at the 10 GHz for three cases. (a) Only considering the collision; (b) considering both the particles' collision and the charging of the charged particles on the dust particle; (c) considering the effect of the electrical potential $\eta_{\phi d}$



(1) Only considering the collision; (2) considering both the particles' collision and the charging of the charged particles on the dust particle; (3) considering the effect of the electrical potential $\eta_{\phi d}$, ω_{pe} indicates the dusty plasma resonant frequency

图3 不同温度、压强下,衰减系数对频率的关系(微波段)

Fig.3 Attenuation coefficient as a function of microwave frequency with different pressure and temperature 以图4(考虑背景电势时的衰减系数)为例,进一步分析在给定不同频率下,衰减系数受温度、压强的影响。

表1 不同温度下,衰减系数产生极大值或极小值对应的压强(1 GHz)

Table 1 Pressure correspond to the attenuation coefficient with the maximum or minimum value with different temperatures at 1 GHz

Temperature /K	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
(Maximum value α) P /Pa	5980	5120	5060	—	—	—	—
(Minimal value α) P /Pa	—	—	—	95990	27370	122	7181

为了清晰看出图4(a)中出现的极值,表1给出了不同温度下衰减系数的极值。由图4(a)和表1可以看出,微波为1 GHz时,当温度在特定临界值(图中为2500 K)以上时,衰减系数在某段压强有极小值,并且随着温度的升高,产生极小值时的位置向左移动。当温度小于临界值时,衰减系数在某段压强有极大值,产生极大值的位置也逐渐向左移动。

表2 不同压强下,衰减系数产生极大值或极小值对应的温度(1 GHz)

Table 2 Temperature correspond to the attenuation coefficient with the maximum or minimum value with different pressure and at 1 GHz

Pressure /Pa	0.01×10^5	0.05×10^5	0.1×10^5	0.5×10^5	1×10^5
(Maximum value α) T /K	3568	3179	2972	3640	3478
(Minimal value α) T /K	—	—	—	2723	2484

图5(a)中出现了极值,相应地表2给出了在不同压强下极值的数值大小。从图5(a)和表2可以看出,微波为1 GHz时,当压强小于临界值(图中为 0.1×10^5 Pa)时,衰减系数在某段温度内有极大值,并且随着压强的增大,极大值的位置向左移动;当压强大于临界值时,温度变化对应衰减系数产生极小值与极大值,并且,随着压强的增大,极小值的位置向左移动,极大值的位置也向左移动。

从图4(b)和图5(b)可以看出,微波为10 GHz时,衰减系数基本上与温度成正比,与压强也成正比。

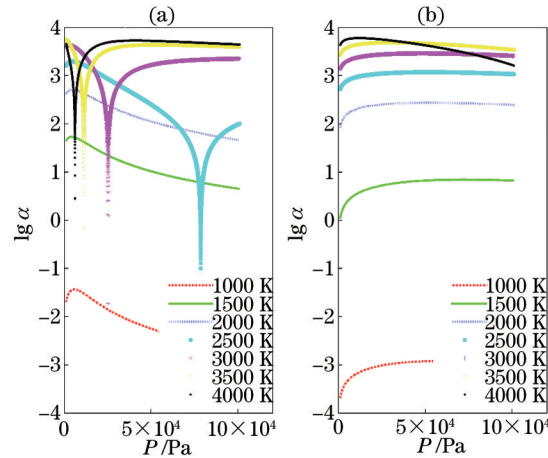


图4 不同温度和频率[(a) 1 GHz, (b) 10 GHz]下,衰减系数随压强的变化

Fig.4 Attenuation coefficient as a function of pressure with different temperatures and two fixed frequency (a) 1 GHz and (b)10 GHz. Here the numerical results include the effect of the electrical potential

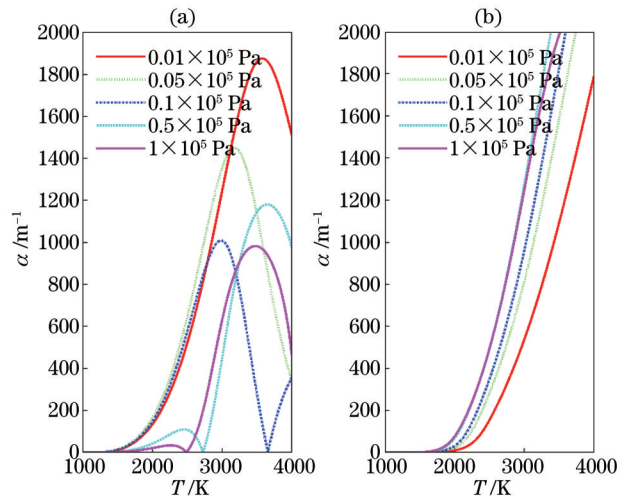


图5 不同压强和频率[(a) 1 GHz, (b) 10 GHz]下,衰减系数随温度的变化

Fig.5 Attenuation coefficient as a function of temperature at different pressures and two fixed frequency of 1 GHz (a) and 10 GHz (b). Here the numerical results include the effect of the electrical potential

综上所述,在微波段低频区时,温度、压强皆有临界值。当温度小于临界值,衰减随压强的升高反而降低;当温度大于临界值,在某一段压强范围内产生低谷,然后继续减小。压强小于临界值时,衰减随温度的升高而升高;当温度较高时,在某一段温度范围内产生低谷,然后继续增大。在微波段高频区时,衰减系数基本上与温度成正比,与压强也成正比。

3.2.2 太赫兹波段

太赫兹波(THz Wave),是频率为 0.1~10 THz、波长介于 $30 \mu\text{m} \sim 3 \text{mm}$ 范围内的电磁波。太赫兹波的研究介于光子学与电子学、宏观与微观的过渡区。与微波相比,太赫兹波有更大的传输带宽,因而传输效率相对来说更高。

同样,在太赫兹波段下,不同条件下的衰减特性也需要逐一分析。选取 1 THz 来分析研究特定频率下,衰减系数受温度、压强的影响,具体如图 6 所示。

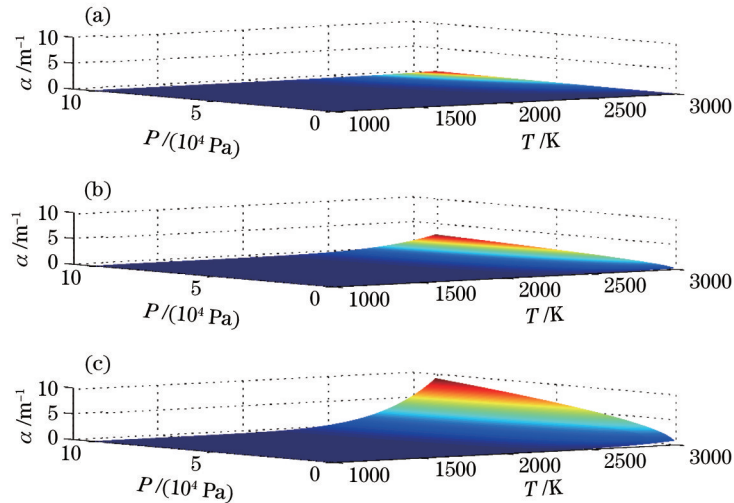


图 6 (a) 仅考虑碰撞; (b) 考虑碰撞和充电; (c) 考虑 η_{ϕ} , 1 THz 下衰减系数对压强、温度的关系

Fig.6 Attenuation coefficient as a function of pressure and temperature at 1 THz. (a) Only considering the collision; (b) considering both the particles' collision and the charging of the charged particles; (c) considering η_{ϕ}

从图 6 可以看出,整体上,温度、压强的变化使得衰减系数的变化与微波段高频区相类似。对比图 1 和图 2,不同频率对衰减系数的影响:太赫兹波段,衰减系数相对于微波段小很多;同时,为看清在不同频率太赫兹波段下,温度和压强一定时,衰减系数的变化,选取典型的温度、压强数值,将太赫兹波段的衰减情况展示出来,结果如图 7 所示 [(a) $T=2000 \text{ K}$, $P=1 \times 10^4 \text{ Pa}$; (b) $T=3000 \text{ K}$, $P=1 \times 10^4 \text{ Pa}$; (c) $T=2000 \text{ K}$, $P=1 \times 10^5 \text{ Pa}$; (d) $T=3000 \text{ K}$, $P=1 \times 10^5 \text{ Pa}$],其中角频率区间为 $\omega = 6.28 \times 10^{11} \sim 6.28 \times 10^{13} \text{ Hz}$ 。

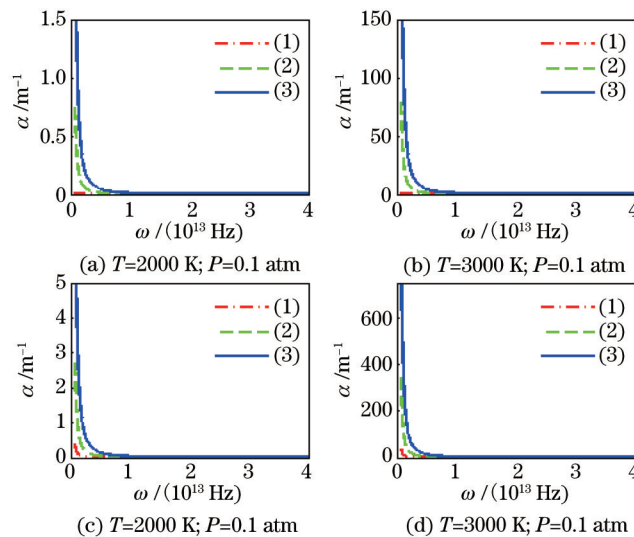


图 7 不同温度、压强下,衰减系数对频率的关系(太赫兹波段)。(a) 仅考虑碰撞; (b) 考虑碰撞和充电; (c) 考虑 η_{ϕ}

Fig.7 Attenuation coefficient as a function of tera-hertz wave frequency with different pressures and temperatures. (a) Only considering the collision; (b) considering both the particles' collision and the charging of the charged particles; (c) considering η_{ϕ}

图7可以看出,不同频率下,太赫兹波段对衰减系数的影响与微波段高频区相类似,温度和压强相同时,随着频率的变大,衰减系数一直变小;频率相同,衰减系数与温度成正比,与压强也成正比;频率相同,三种情况下,衰减系数从大到小依次为:考虑 η_{coll} 时的衰减系数,考虑碰撞和充电时的衰减系数,仅考虑碰撞时的衰减系数。数值上面,尘埃粒子的引入,对微波衰减影响很大,一般比普通等离子体给出的结果大几个量级。将化学反应动力学理论给出的电子浓度代入尘埃等离子体给出的微波衰减公式计算,得到的衰减系数正好处在实测范围内^[17,20-23]。

4 结 论

综上所述,尘埃粒子的存在对等离子体衰减特性有重要影响,其衰减系数分别受温度、压强和频率的影响,具体如下:

1) 特定频率下,衰减系数受温度、压强的影响,在微波段低频区时,温度、压强皆有临界值,而在微波段高频区及太赫兹波段时,衰减系数与温度成正比,与压强也成正比。

2) 不同频率下,温度和压强一定时,衰减在尘埃等离子体共振频率附近,衰减达到峰值,并且衰减系数的峰值与共振频率之间的距离与温度压强有很大关系,温度、压强越大,距离越大。

3) 相同温度、压强、频率时,三种情况下的衰减系数,在考虑尘埃粒子的电势影响下的结果总是大于其他两种情况,并且数值上正好处在实测范围内。

总之,在考虑尘埃等离子体的衰减特性时,背景电势不可以忽略。本研究将有利于完善尘埃等离子体的衰减特性模型。

参 考 文 献

- 1 Shen Yueliang, Li Xu, Liu Yaming, *et al.*. Study on plasma characteristics of fly ash in different gas environments[J]. Chinese J Laser, 2014, 41(5): 0515002.
沈跃良, 李 旭, 刘亚明, 等. 不同环境气体下飞灰等离子体特性分析[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0515002.
- 2 Chen Quansheng, Tong Yuying, Zhuang Yuan, *et al.*. Unidirectional excitation of surface plasmon based on metallic slit-groove structure[J]. Chinese J Laser, 2014, 41(5): 0510001.
陈全胜, 佟玉莹, 庄 园, 等. 基于金属狭缝-凹槽结构单向激发表面等离子体[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0510001.
- 3 Wang Hongjian, Xiao Shali, Ye Yan, *et al.*. Diagnosis of X-Ray backlighter based on laser plasma[J]. Chinese J Laser, 2014, 41(3): 0315001.
王洪建, 肖沙里, 叶 雁, 等. 激光等离子体X射线背光源诊断研究[J]. 中国激光, 2015, 41(3): 0315001.
- 4 E C Whipple. Potentials of surfaces in space[J]. Reports on Progress in Physics, 1981, 44(11): 1197-1250.
- 5 C K Goertz. Ion-acoustic higher order non-linear structures in quantum dusty plasma[J]. Reviews of Geophysics, 1989, 27: 271-292.
- 6 Fan Chuanxin. Review on radiation characteristics and temperature measurement techniques for exhaust flames of solid rockets[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, 27(3): 238-241.
范传新. 固体火箭羽焰的辐射特性及其温度测量技术评述[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(3): 238-241.
- 7 Zhang Wei, Cao Taiyue, Wang Ningfei, *et al.*. Calculating study on combustion of aluminium particle and nucleation of aluminium oxide[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1997, 20(2): 43-46.
张 炜, 曹泰岳, 王宁飞, 等. 铝粉颗粒燃烧及其燃烧产物凝聚成核计算研究[J]. 固体火箭技术, 1997, 20(2): 43-46.
- 8 Wang Changqi. Studies on the microwave attenuation of solid rocket motor plume: a review[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1992, 2: 14-20.
王长起. 固体火箭喷焰发动机微波衰减的研究[J]. 固体火箭技术, 1992, 2: 14-20.
- 9 Hong Xueren, Duan Wensan, Sun Jian'an, *et al.*. The propagation of solitons in an inhomogeneous dusty plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(11): 2671-2677.
洪学仁, 段文三, 孙建安, 等. 非均匀尘埃等离子体中孤子的传播[J]. 物理学报, 2003, 52(11): 2671-2677.
- 10 Wang Zhengxiong, Liu Jinyuan, Zou Xiu, *et al.*. The bohm criterion for a plasma sheath with two species of charged dust particles[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(3): 793-797.
王正汹, 刘金远, 邹 秀, 等. 两种带电颗粒的尘埃等离子体鞘层的玻姆判据[J]. 物理学报, 2004, 53(3): 793-797.

- 11 Li Jiawei, Li Zhongyuan. Charging process of space dust and its dependence upon plasma parameters[J]. Chinese Journal of Space Science, 2004, 24(5): 321-325.
李嘉巍, 李中元. 空间尘埃的充电过程及与等离子体参数的关系[J]. 空间科学学报, 2004, 24(5): 321-325.
- 12 Li Fang, Li Lianlin, Sui Qiang. Absorption effect of dust particles on electromagnetic wave in plasma[J]. Science in China (E), 2004, 34(7): 832-840.
李 芳, 李廉林, 隋 强. 等离子体中尘埃粒子对电磁波的吸收效应[J]. 中国科学(E), 2004, 34(7): 832-840.
- 13 Li Fang, Lü Baowei, Havnes O. Charge density fluctuation of low frequency in a dusty plasma[J]. Science in China (series A), 1997, 40(2): 206-213.
- 14 Chen Yunyun, Zheng Gaige, Gu Fang, *et al.*. Effect of dust particle potential on plasma conductivity[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(15): 154202.
陈云云, 郑改革, 顾 芳, 等. 尘埃粒子电势对等离子体电导率的影响[J]. 物理学报, 2012, 61(15): 154202.
- 15 V L Ginzburg. The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasma[M]. Qian shanxie, translation, Beijing: Science Press, 1978.
金兹堡. 电磁波在等离子体中的传播[M]. 钱善璿, 译, 北京: 科学出版社, 1978.
- 16 Shi Yanxiang, Ge Debiao, Wu Jian. Influence of pressure of environment on conductivity of solid rocket exhaust plume[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(6): 1115-1118.
石雁祥, 葛德彪, 吴 健. 环境压强对固体火箭喷焰电导率的影响[J]. 电波科学学报, 2008, 23(6): 1115-1118.
- 17 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.
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.
- 18 Shi Yanxiang, Ge Debiao, Wu Jian. Theoretical analysis of microwave attenuation constant of weakly ionized dusty plasma [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(4): 1005-1010.
石雁祥, 葛德彪, 吴 健. 尘埃等离子体微波衰减常数的理论分析[J]. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1005-1010.
- 19 Liu Qingyun, Zhang Ping, An Dongmei. Parameters identification of alkalimetal impurities of solid properties of exhaust after burning[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(3): 26-32.
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): 26-32.
- 20 Ely O P. Rocket exhaust effects on radio frequency transmission[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1966, 3: 310-314.
- 21 Abe T, Fujita K, Ogawa H, *et al.*. Microwave telemetry breakdown caused by rocket plume[J]. AIAA, 2000: 2484-2492.
- 22 Seliga T J. Rocket exhaust plume radar attenuation and amplitude/phase noise[J]. Journal of Spacecraft and rockets, 1967, 4(6): 774-780.
- 23 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.

栏目编辑: 刘丰瑞