

聚变等离子体中尘埃杂质的带电和运动 特性及温度变化研究*

刘金远¹⁾ 陈 龙¹⁾ 王 丰^{1)†} 王 楠¹⁾ 段 萍²⁾

1) (大连理工大学物理与光电工程学院, 大连 116024)

2) (大连大学物理科学与技术学院, 大连 116622)

(2009 年 12 月 31 日收到; 2010 年 6 月 23 日收到修改稿)

研究了在磁约束聚变环境中不同等离子体参数下尘埃粒子的带电、运动及温度特性. 研究表明: 电子温度与离子温度比对尘埃带电量有明显的影响; 二次电子发射会显著减少尘埃带电量; 尘埃充电的弛豫时间比在实验室加工等离子体中要短得多. 在考虑离子拖曳力作用下, 尘埃粒子的速度可达 $10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的量级; 针对碳材料计算得到粒子的寿命达毫秒量级. 这些数值研究结果与实验观测结果相一致.

关键词: 尘埃, 聚变等离子体, 充电方程

PACC: 5225Z, 5240, 5265, 2852

1. 引 言

聚变能将是一种潜在的、能够长期稳定供给的能源. 目前国际上已有两个大型的磁约束装置托卡马克聚变试验反应堆 (TFTR) 和联合欧洲环 (JET) 能产生聚变能. 国际热核实验反应堆 (ITER) 已完成设计, 设计功率为 1500 MW. 但开发核聚变能源还存在许多有待探索和研究的课题, 如存在于磁约束聚变装置中的边界等离子体及周围器壁材料为高温芯部等离子体与周围环境之间提供了一个缓冲区, 边界等离子体与器壁材料表面相互作用会严重影响芯部等离子体特性及装置的工作性能. 而等离子体对器壁的腐蚀决定了器壁的使用寿命, 腐蚀过程中产生的杂质会稀释等离子体并使等离子体降温; 等离子体沉积到器壁上, 会改变材料表面化学成分并导致大量氦元素的累积; 来自器壁的尘埃杂质具有与器壁或沉积材料相同的材质, 这些杂质会造成氦的滞留和等离子体的污染等. 这些都是影响托卡马克装置的重要物理问题. 因此, 研究边界等离子体与器壁材料相互作用的机制并提出有效的解决方案对实现商用聚变反应堆以及参与完成

ITER 计划具有重要意义.

托卡马克装置中边界等离子体与器壁是一个强耦合相互作用系统. 在该相互作用过程中, 许多托卡马克装置 (如 DIII-D^[1], TFTR^[1], Alcator-Cmod^[1], JET^[2], TEXTOR^[3,4], Tore Supra^[5,6] 以及 NOVA^[7] 等) 里都会产生尘埃杂质. 在 JT60 装置中的 1/36 环向区域收集到的尘埃为 170 mg, 这些尘埃大约半数分布在偏滤器板下面, 其中 95% 分布于偏滤器板的 W 区域下面^[2]. JT60 装置中的尘埃产生率约为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$, 尘埃的半径从几十纳米到十几微米, 尘埃中的氦原子浓度为 $3 \times 10^{13} \text{ g}^{-1}$. 而在 JET 装置氦氖反应中收集到的尘埃为 2.29 mg, 尘埃的平均半径为 2 μm . JET 装置中尘埃的化学组成为 80.3% C, 16.7% Fe, 1.3% Cr, 1.2% Ni, 0.2% Co, 0.03%—0.7% Be, 尘埃中的氦原子浓度为 $8 \times 10^{12} \text{ g}^{-1}$. 在 JET 装置的环向限制器底部 (石墨材料) 发现的尘埃杂质最多, 约为 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 尘埃中的化学组成主要为 85% C 和 11% Be.

目前国际上有关尘埃特性的实验研究已经在多个聚变装置中开展, 主要有三方面的研究工作. 首先是聚变装置中尘埃的产生机制^[8]. 尘埃产生的主要机制是边界等离子体与第一壁材料相互作用

* 国家自然科学基金 (批准号: 10875024, 10975026)、辽宁省高等学校科研计划 (批准号: 2008S059)、辽宁省自然科学基金 (批准号: 20082146) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2009GB105004, 2009GB106002) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: fengwang@mail.dlut.edu.cn

引起的包括沉积层的起泡和破裂、边界等离子体中的化学反应、起弧、非理想表面的爆炸、碎裂和蒸发材料的成核等。其次为聚变装置的安全性和运行性能问题^[8-10]。在聚变装置中进行的 D-T 实验过程中, 氦滞留是十分重要的安全问题。器壁材料在高等离子体的作用下具有较高的腐蚀率, 因而会产生大量尘埃杂质, 导致放射性、化学毒性和化学反应等问题。最后是尘埃特性的研究^[11-14], 包括尘埃的半径、形状、密度分布、成分和氦含量以及尘埃的速度、寿命和单粒子运动轨迹等。对多个聚变装置中的尘埃密度、大小、表面积、多孔性及化学成分进行了测量, 这些研究结果反映了第一壁的形貌、材料、破裂历史以及等离子体条件。

以上关于聚变装置中尘埃粒子的产生、生长、充电、输运、化学反应、辐射、尘埃与边界等离子体的相互作用、尘埃与第一壁材料的相互作用及尘埃对反应堆安全性能影响的研究还不够深入^[12-16], 许多关键性问题还没有得到令人满意的解释。例如, 在聚变装置中尘埃的形成是体积过程为主还是表面过程占优, 是温和的沉积膜起泡、破碎还是激烈的电弧过程; 尘埃在聚变装置边界等离子体中的输运特性和对等离子体性质的影响也未研究清楚; 另外, 氦的滞留、大破裂、杂质控制、边缘局域模、剥离层中输运和尘埃杂质的产生、生长和输运等问题, 国内到目前为止也未有这方面研究工作的报道, 而现有的研究还仅限于对实验室尘埃等离子体的研究^[17-25]。因此, 本文主要针对尘埃带电、运动和温度特性等问题从理论上半定量地进行研究并与一些装置实验给出的诊断结果相比较^[2], 为进一步建立系统的理论模型和进行数值模拟研究提供理论基础。

2. 聚变装置中尘埃粒子的带电特性

2.1. 特征参量

尘埃粒子在聚变等离子体中的特征参量包括大小、带电量、受力以及运动特性等。为了在聚变等离子体环境下对这些参量进行理论估计, 本文采用尘埃等离子体研究领域惯用的物理量单位, 尘埃粒子半径 a 的单位为 μm , 尘埃粒子质量 m_d 的单位为 g , 尘埃密度 ρ_d 的单位为 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 尘埃等离子体频率 ω_{pd} 的单位为 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$, 尘埃声速 c_{ds} 的单位为

$\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 粒子数密度 n 的单位为 cm^{-3} , 粒子温度 T 的单位为 eV , 力的单位为 N 。

下面首先给出尘埃的一些特征参量的定义。尘埃的质量为

$$\begin{aligned} m_d &= \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_d \\ &= 4.19 \times 10^{-12} (a^3 \rho_d). \end{aligned}$$

设 ϕ_d 为尘埃表面电势, 则

$$\phi_d = q_d/a,$$

其中 q_d 为尘埃带电量。无量纲化的尘埃表面电势为

$$\Phi_d = \frac{e\phi_d}{T_e} = \frac{q_d}{ze},$$

其中无量纲参数 $z = T_e a/e^2$, T_e 为电子温度, e 为点电荷的带电量。尘埃所带的电荷量为

$$Z_d = |z\Phi_d|.$$

尘埃等离子体的频率为

$$\begin{aligned} \omega_{pd} &= \left(\frac{4\pi q_d^2 n_d}{m_d} \right)^{1/2} \\ &= 0.578 T_e |\Phi_d| \left(\frac{n_d}{a\rho_d} \right)^{1/2}, \end{aligned}$$

其中 n_d 为尘埃的粒子数密度。尘埃声速为

$$\begin{aligned} c_{ds} &= \left(\frac{zT_e}{m_d} \right)^{1/2} \\ &= 16.27 T_e a^{-1} \rho_d^{-1/2}. \end{aligned}$$

取 f_0 作为力的无量纲单位, f_0 的表达式为

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{zT_e}{\lambda_e} \\ &= 1.5 \times 10^{-17} (aT_e^{3/2} n_e^{1/2}), \end{aligned}$$

其中 n_e 为电子的粒子数密度, λ_e 为电子德拜长度,

$$\lambda_e = \left(\frac{T_e}{4\pi n_e e^2} \right)^{1/2}.$$

2.2. 尘埃收集电子、离子带电

在聚变装置中的边界等离子体区, 等离子体的粒子数密度约为 10^{13}cm^{-3} , 温度约为 $10-50 \text{eV}$, 离子的热速度约为 $3 \times 10^4 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 环向等离子体宏观流动速度约为 $5 \times 10^3 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 极向等离子体宏观流动速度约为^[2] $10^3 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在这种等离子体环境下, 不但等离子体参数与普通的低温加工等离子体参数大不相同, 且尘埃带电特性也与其有很大不同。

2.2.1. 电子、离子充电电流

利用轨道限制理论, 可以得到带电粒子的充电电流为^[26]

$$I = nq\pi a^2 \left(\frac{8T}{\pi m}\right)^{1/2} \left\{ \frac{1}{2} e^C \left[\frac{v_{\min}}{v_0} \sinh(A) + \cosh(A) \right] + \left[\frac{1}{2} + (Bv_0)^2 - \frac{qq_d}{aT} \right] \right. \\ \left. \times \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\operatorname{erf}[B(v_0 + v_{\min})] + \operatorname{erf}[B(v_0 - v_{\min})]}{2Bv_0} \right\}, \quad (1)$$

其中

$$A = \frac{mv_{\min}v_0}{T},$$

$$B = \left(\frac{m}{2T}\right)^{1/2},$$

$$C = -\frac{m}{2T}(v_0^2 + v_{\min}^2),$$

$\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数, m 为充电粒子(电子或离子)的质量, q 为充电粒子的电荷, v_0 为充电粒子的定向速度, v_{\min} 为充电粒子的最小速度. 对于吸引势, 充电粒子的最小速度 $v_{\min} = 0$; 对于排斥势, 充电粒子的最小速度 $v_{\min} = \left(\frac{2qq_d}{aT}\right)^{1/2}$.

对没有定向流动的充电粒子(热电子或热离子), $v_0 = 0$, 因而其充电电流为

$$I = nq\pi a^2 \left(\frac{8T}{\pi m}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{mv_{\min}^2}{2T} - \frac{qq_d}{aT}\right) \\ \times \exp\left(-\frac{m}{2T}v_{\min}^2\right). \quad (2)$$

这是一个很有意义的结果. 例如, 当尘埃带负电时, 对离子是吸引势, 取 $v_{\min} = 0$, (2) 式可化简为

$$I_i = n_i e \pi a^2 \bar{v}_i \left(1 - \frac{eq_d}{aT_i}\right), \quad (3)$$

其中

$$\bar{v}_i = \left(\frac{8T_i}{\pi m_i}\right)^{1/2};$$

尘埃对电子是排斥势, 取 $v_{\min}^2 = \frac{-2eq_d}{am_e}$, (2) 式可化简为

$$I_e = -n_e e \pi a^2 \bar{v}_e \exp\left(\frac{eq_d}{aT_e}\right) \\ = -n_e e \pi a^2 \bar{v}_e \exp(\Phi_d), \quad (4)$$

其中

$$\bar{v}_e = \left(\frac{8T_e}{\pi m_e}\right)^{1/2}.$$

当充电粒子对尘埃具有相对定向运动时, 对于吸引势, 取 $v_{\min} = 0$, (1) 式可化简为

$$I = nq\pi a^2 \left(\frac{8T}{\pi m}\right)^{1/2}$$

$$\times \left[\frac{1}{2} e^{-\xi^2} + \left(\frac{1}{2} + \xi^2 - \frac{qq_d}{aT}\right) \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\operatorname{erf}(\xi)}{\xi} \right], \quad (5)$$

其中

$$\xi = \sqrt{\frac{m}{2T}} v_0.$$

2.2.2. 充电平衡条件下尘埃的带电量及表面电势

当尘埃只收集电子、离子带电时, 尘埃的充电方程为

$$\frac{dq_d}{dt} = I_i + I_e. \quad (6)$$

尘埃充电平衡时, 充电电流满足

$$I_i + I_e = 0. \quad (7)$$

对于定向速度 $v_0 = 0$ 的情况, 将(3)和(4)式代入(7)式, 化简后可得到尘埃充电平衡式为

$$(1 - \beta_T \Phi_d) = \sqrt{\beta_T \beta_m} \exp(\Phi_d). \quad (8)$$

这里 β_m 为离子质量与电子质量比, β_T 为电子温度与离子温度比, $\beta_m = m_i/m_e$, $\beta_T = T_e/T_i$, 其中 m_i 为离子质量, m_e 为电子质量, T_e 为电子温度, T_i 为离子温度. 由(8)式可以得到尘埃表面电势 Φ_d 与 β_T 的关系, 结果如图1、图2所示.

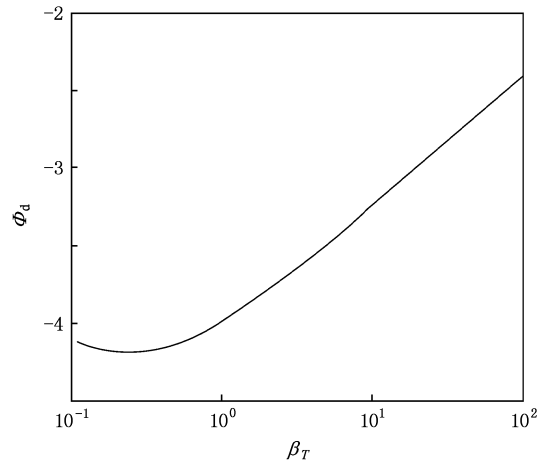


图1 氩等离子体中尘埃的表面电势 Φ_d 与 β_T 的关系

由图1、图2可以看出, 当电子温度 T_e 与离子温度 T_i 相同时, 氢等离子体中的尘埃表面电势为 -2.5 , 而氩等离子体中尘埃表面电势为 -4.0 . 电子

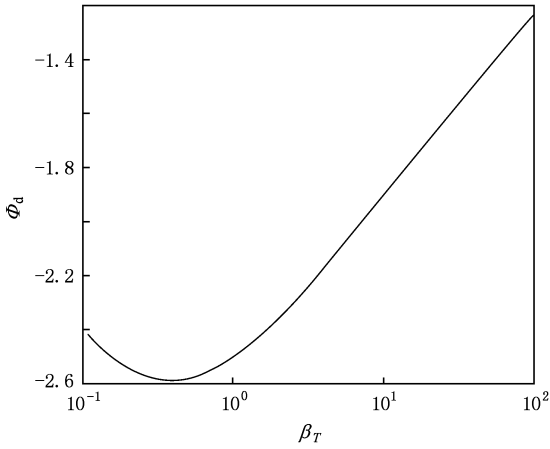


图2 氢等离子体中尘埃的表面电势 Φ_d 与 β_T 的关系

温度与离子温度比 β_T 对尘埃的带电量有明显的影
响,尘埃表面电势在 $\beta_T \Phi_d = e\phi_d/T_i = -1$ 的条
件下存在极值,该条件相当于尘埃带电的“玻姆条件”.
对于氢等离子体,当 $\beta_T = 0.39$, $\Phi_d = -2.59$ 时,尘
埃表面电势存在极值;对于氦等离子体,当 $\beta_T =$
 0.24 , $\Phi_d = -4.19$ 时,尘埃表面电势存在极值. 在电
子温度 $T_e = 10$ eV 的氦和氢等离子体中,半径 $a =$
 $1 \mu\text{m}$ 尘埃的电荷量 Z_d 与 β_T 的关系如图 3 和图 4 所
示. 由图 4 可知,在聚变装置中,微米量级尘埃的电
荷量在 10^4 量级.

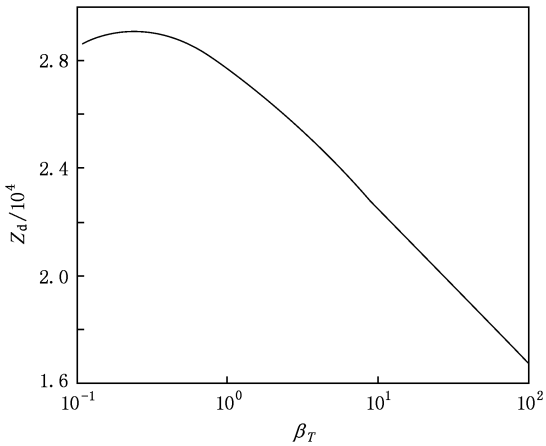


图3 氦等离子体中 $a = 1 \mu\text{m}$ 尘埃的电荷量 Z_d 与 β_T 的关系

2.2.3. 离子定向速度对尘埃表面电势的影响

在等离子体中对具有定向速度的离子,可由
(5)式得到其充电电流为

$$I_i = n_i e \pi a^2 \bar{v}_i \times \left[\frac{1}{2} e^{-\xi^2} + \left(\frac{1}{2} + \xi^2 - \beta_T \Phi_d \right) \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\xi)}{2 \xi} \right], \quad (9)$$

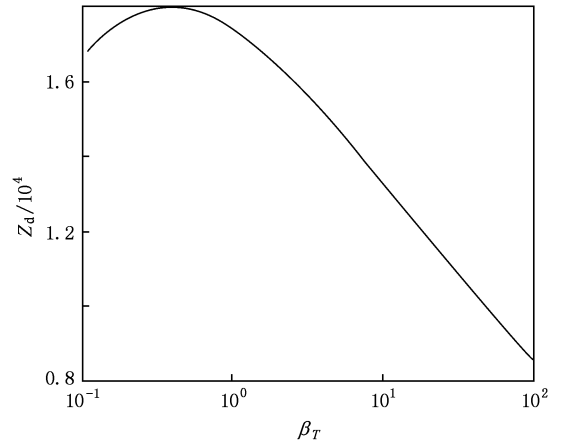


图4 氢等离子体中 $a = 1 \mu\text{m}$ 尘埃的电荷量 Z_d 与 β_T 的关系

其中

$$\xi = \sqrt{\frac{m_i}{2T_i}} v_0.$$

将(4),(9)式代入(7)式,并假设等离子体满足准
中性条件 $n_i = n_e$,则(7)式可简化为

$$\pi a^2 \bar{v}_i \left[\frac{1}{2} e^{-\xi^2} + \left(\frac{1}{2} + \xi^2 - \beta_T \Phi_d \right) \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\xi)}{2 \xi} \right] = \pi a^2 \bar{v}_e \exp(\Phi_d). \quad (10)$$

图 5 所示为 $\beta_T = 1$ 时尘埃表面电势 Φ_d 与氢等
离子体中离子定向速度 v_0 的关系. 由图 5 可知,离
子的定向速度对尘埃充电有一定的影响.

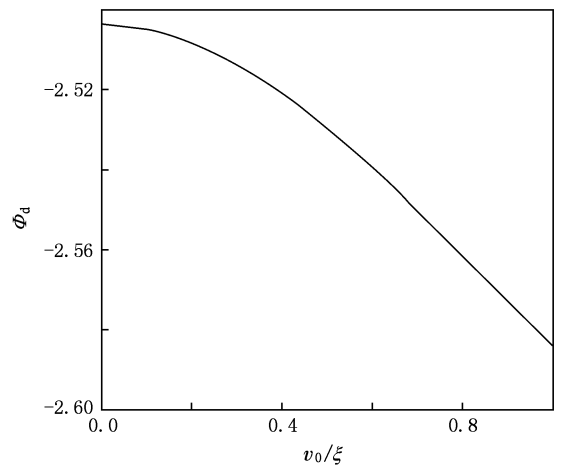


图5 $\beta_T = 1$ 时,离子定向速度 v_0 对尘埃表面电势 Φ_d 的影响

2.2.4. 等离子体无定向流动速度时尘埃充电弛豫过程

将(3)和(4)式代入(6)式,得到等离子体无定

向流动速度时尘埃充电的弛豫过程为

$$\frac{dq_d}{dt} = n_i e \pi a^2 \bar{v}_i (1 - \beta_T \Phi_d) - n_e e \pi a^2 \bar{v}_e \exp(\Phi_d). \quad (11a)$$

取 t_0 作为时间 τ 的无量纲单位,

$$t_0 = 2\pi/\omega_{pi},$$

其中 ω_{pi} 为离子等离子体频率,

$$\omega_{pi} = \left(\frac{4\pi e^2 n_i}{m_i} \right)^{1/2}.$$

化简得

$$t_0 = 4.762 \times 10^{-3} \sqrt{\mu/n_i},$$

其中 μ 为离子质量数. (11a) 式无量纲化后为

$$\frac{d\Phi_d}{d\tau} = \left[\frac{2\pi}{\beta_T} \left(\frac{a}{\lambda_e} \right) \times [1 - \beta_T \Phi_d - \sqrt{\beta_T \beta_m} \exp(\Phi_d)] \right]. \quad (11b)$$

对于氢等离子体, 质量数 $\mu = 1$, 取 $n_i = 3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 可得 $t_0 = 8.694 \times 10^{-10} \text{ s}$. 取 $T_e = T_i = 10 \text{ eV}$, 可得 $\lambda_e = 4.3 \text{ }\mu\text{m}$. 取 $\beta_T = 1, \beta_m = 1836$, 数值求解(11b)式, 所得结果如图6和图7所示.

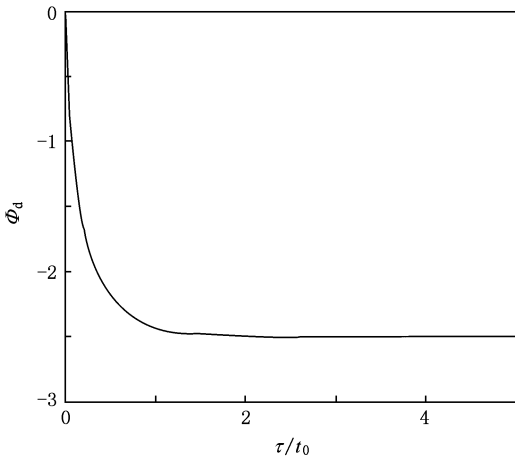


图6 氢等离子中 $a = 1 \text{ }\mu\text{m}$ 尘埃的表面电势 Φ_d 随时间的演化

图6和图7示出了在氢等离子体中半径 a 分别为1和0.01 μm 的尘埃表面电势 Φ_d 随时间的演化过程. 由图6可知, 在聚变环境下, 微米量级尘埃粒子的充电弛豫时间约为 $3 \times 10^{-9} \text{ s}$, 接近离子等离子体波动时间. 由图7可知, $a = 0.01 \text{ }\mu\text{m}$ 尘埃粒子的充电弛豫时间约为 $3 \times 10^{-7} \text{ s}$. 而在实验室加工等离子体中, 微米量级尘埃粒子的充电弛豫时间约为微秒量级, $a = 0.01 \text{ }\mu\text{m}$ 尘埃粒子的充电弛豫时间约为毫秒量级.

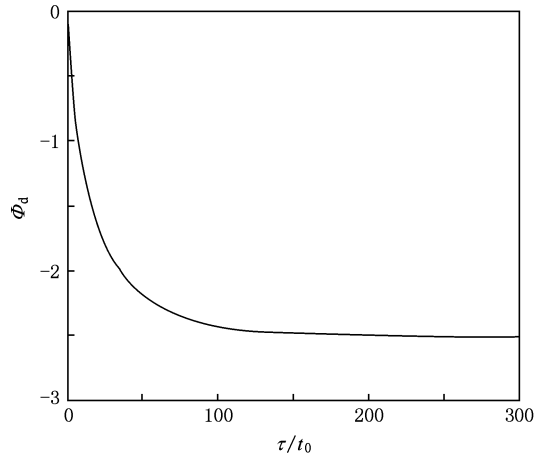


图7 氢等离子中 $a = 0.01 \text{ }\mu\text{m}$ 尘埃的表面电势 Φ_d 随时间的演化

2.3. 二次电子发射对尘埃带电量的影响

在聚变装置中, 由于等离子体温度非常高, 与尘埃碰撞会产生二次电子发射. 二次电子发射系数 δ 与初级电子能量 E 的关系为^[27,28]

$$\delta(E) = 7.4\delta_m \left(\frac{E}{E_m} \right) \exp \left[-2 \left(\frac{E}{E_m} \right)^{1/2} \right], \quad (12)$$

其中 δ_m 为最大二次电子发射系数, E_m 为对应于最大二次电子发射系数的初级电子能量. 对于碳材料尘埃, $\delta_m = 1, E_m = 250 \text{ eV}$ ^[26]. 将(12)式对电子的麦克斯韦分布进行积分, 可得二次电子发射的电流密度为(主要考虑电子碰撞的二次电子效应)

$$J_{sec} = 3.7\delta_m F_5 \left(\frac{E_m}{4T_e} \right) n_e \left(\frac{T_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \times \exp \left(\frac{e\Phi_d}{T_e} \right) \quad (\Phi_d < 0), \quad (13)$$

其中^[26]

$$F_5(x) = x^2 \int_0^\infty u^5 \exp[-(xu^2 + u)] du.$$

对半径为 a 的尘埃粒子表面进行积分, 结合(4)式可得尘埃发射二次电子的电流为

$$I_{sec} = 4\pi a^2 e J_{sec} = -3.7\delta_m F_5 \left(\frac{E_m}{4T_e} \right) I_e. \quad (14)$$

因此充电平衡式为电子、离子和二次电子的共同贡献, 即 $I_e + I_i + I_{sec} = 0$, 无量纲化后为

$$(1 - \beta_T \Phi_d) = (1 - \delta) \sqrt{\beta_T \beta_m} \exp(\Phi_d), \quad (15)$$

其中 $\delta = 3.7\delta_m F_5 \left(\frac{E_m}{4T_e} \right)$. 图8给出了尘埃表面电势

及二次电子发射系数与电子温度的关系.

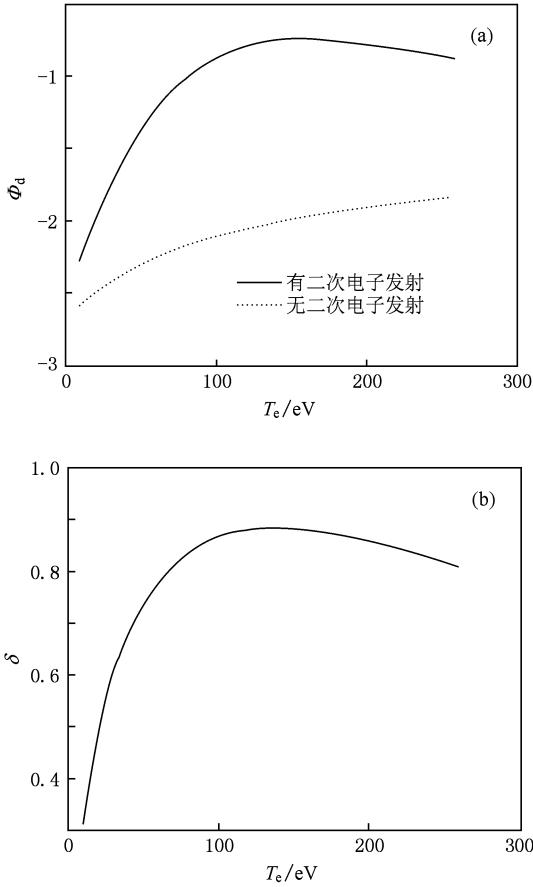


图8 在氢等离子体中尘埃表面电势 Φ_d 及二次电子发射系数 δ 与电子温度 T_e 的关系 (a) 尘埃表面电势与电子温度的关系, (b) 二次电子发射系数与电子温度的关系

由图8(a)可知,对于聚变等离子体,二次电子发射对尘埃的表面电势 Φ_d 影响非常大. 当电子温度 $T_e = 20$ eV 时,二次电子发射使尘埃表面电势 Φ_d 的绝对值从 $|-2.5|$ 减少到 $|-2.0|$. 而当 $T_e \geq 150$ eV 以后,由于二次电子发射截面的降低,尘埃表面电势 Φ_d 的绝对值又升高了.

3. 尘埃粒子的受力和运动特性

尘埃颗粒在等离子体环境中会受到多种力的作用,包括静电力、重力、离子拖曳力、中性分子拖曳力以及热泳力等,这里主要考虑在重力和离子拖曳力作用下尘埃粒子的运动特性. 取典型的聚变边界等离子体参数,等离子体的粒子温度 $T_e = T_i = 10$ eV,粒子数密度 $n = 3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. 下面分别估算重力和离子拖曳力的大小.

尘埃所受的重力为

$$\begin{aligned} f_g &= m_d g \\ &= \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_d g, \end{aligned} \quad (16)$$

碳材料尘埃密度 $\rho_d = 2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,对于半径 $a = 1 \text{ } \mu\text{m}$ 的尘埃粒子,由(16)式计算可得 $f_g = 8.378 \times 10^{-14} \text{ N}$.

尘埃所受的离子拖曳力为^[9]

$$f_i = m_i n_i v_i^2 \pi a^2 \left[1 - \left(\frac{2b_0}{a} \right) + \left(\frac{2b_0}{a} \right)^2 \Gamma \right], \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{eq_d}{m_i v_i^2}, \\ \Gamma &= \frac{1}{2} \ln \left(\frac{b_0^2 + \lambda_e^2}{b_0^2 + b_{\text{coll}}^2} \right), \\ b_{\text{coll}} &= a \left(1 - \frac{2b_0}{a} \right)^{1/2}. \end{aligned}$$

对于氢等离子体环境,若取离子速度 $v_i = c_{is} = \sqrt{T_e/m_i} = 3.1 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (其中 c_{is} 为离子声速),尘埃表面电势 $\Phi_d = -2.5$,则 $b_0 = -2.5a$, $b_{\text{coll}} = \sqrt{6}a$, $\lambda_e = 4.3 \text{ } \mu\text{m}$, $\Gamma = 0.35$,得到离子拖曳力 $f_i = 2.224 \times 10^{-9} \text{ N}$. 由此可知,相对于离子拖曳力,重力是可以忽略的. 通过估算可得,在离子拖曳力作用下的尘埃运动时间 $\Delta t = 1 \text{ ms}$,速度可达到 $v_d = f_i \Delta t / m_d \approx 266 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 这与聚变装置中实验观测数据^[2]基本相符(尘埃的运动时间为 10^{-3} s 量级,运行速度为 $10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级).

4. 尘埃粒子温度随时间的演化关系

尘埃收集电子和离子带电的同时,电子、离子也将能量沉积到尘埃上,使尘埃的温度升高. 可对沉积到尘埃上的能量进行估算. 电子、离子碰撞尘埃传递能量的功率为

$$\begin{aligned} p &= n \int \frac{1}{2} m v^2 v f(v) \sigma(v) dv \\ &= \frac{1}{2} m n \left(\frac{m}{2\pi T} \right)^{3/2} \iiint \pi a^2 \left(1 - \frac{2qq_d}{amv^2} \right) v^5 \\ &\quad \times \exp \left(-\frac{mv^2}{2T} \right) \sin\theta d\theta d\varphi dv \\ &= 2\pi^2 n m a^2 \left(\frac{2T}{\pi m} \right)^{3/2} \int_{v_{\min}}^{\infty} \left(v^2 - \frac{qq_d}{aT} \right) v^3 \\ &\quad \times \exp(-v^2) dv \end{aligned}$$

$$= n\pi a^2 T \left(\frac{8T}{\pi m} \right)^{1/2} \times \left[1 + \left(1 + \frac{mv_{\min}^2}{2T} \right) \left(1 + \frac{mv_{\min}^2}{2T} - \frac{qq_d}{aT} \right) \right] \times \exp(-v_{\min}^2), \quad (18)$$

其中 $\sigma(v)$ 为碰撞截面. 取 $v_{\min} = \sqrt{\frac{-2eq_d}{am_e}}$, 得到电子对尘埃的加热功率为

$$p_e = n_e \pi a^2 T_e \left(\frac{8T_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} (2 - \Phi_d) \exp(\Phi_d). \quad (19)$$

取 $v_{\min} = 0$, 得到离子对尘埃的加热功率为

$$p_i = n_i \pi a^2 T_i \left(\frac{8T_i}{\pi m_i} \right)^{1/2} (2 - \beta_T \Phi_d). \quad (20)$$

将电子加热功率与离子加热功率加和, 可得到电子和离子对尘埃加热的总功率为

$$p = n\pi a^2 T_e \left(\frac{8T_e}{\pi m_e} \right)^{1/2}$$

$$\times \left[(2 - \Phi_d) \exp(\Phi_d) + \frac{2 - \beta_T \Phi_d}{\sqrt{\beta_T^3 \beta_m}} \right]. \quad (21)$$

假设尘埃材料的比热容为 c , 则尘埃温度 T_d 随时间的演化关系可表示为

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{3nT_e}{4a\rho_d c} \left(\frac{8T_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} \times \left[(2 - \Phi_d) \exp(\Phi_d) + \frac{2 - \beta_T \Phi_d}{\sqrt{\beta_T^3 \beta_m}} \right]. \quad (22)$$

设 w 为尘埃的寿命, 由于以上已讨论过充电时间是离子运动时间尺度, 则可近似认为

$$\frac{dT_d}{dt} \approx \frac{T_s - T_{d0}}{w},$$

其中 T_{d0} 为尘埃的初始温度, T_s 为尘埃的升华温度. 假设尘埃温度达到升华温度即认为尘埃熔化, 则可估计尘埃的寿命为

$$w = \frac{4a\rho_d c (T_s - T_{d0})}{3nT_e \left(\frac{8T_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} \left[(2 - \Phi_d) \exp(\Phi_d) + \frac{2 - \beta_T \Phi_d}{\sqrt{\beta_T^3 \beta_m}} \right]}. \quad (23)$$

由此可知, 尘埃的寿命与尘埃半径成正比. 对于碳材料, 比热容 $c = 502 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 升华温度 $T_s = 3640 \text{ K}$. 图 9 所示为不同大小的碳材料尘埃在 $T_e = T_i = 10 \text{ eV}$, $n = 3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 的聚变等离子体中寿命

的数值结果, 这些结果与国外实验装置上观测得到的结果几乎一致.

5. 结 论

本文研究了聚变环境中尘埃粒子的带电、运动和温度特性. 研究表明: 电子温度与离子温度比对尘埃表面电势有影响, 并且表面电势的绝对值存在极大值, 将相应的条件称为尘埃带电量的“玻姆条件”; 在聚变环境中, 尘埃的充电弛豫时间远小于在实验室加工等离子体中的时间, 达到离子的时间尺度, 这将影响聚变环境中等离子体的集体运动模式; 电子碰撞产生的二次电子发射对尘埃带电量有很大影响; 聚变装置中离子对尘埃的拖曳力非常显著, 在毫秒的时间尺度内就可使尘埃的速度达到 $10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的量级. 根据电子和离子对尘埃的加热功率, 估算出尘埃在聚变装置中的寿命为毫秒量级. 这些数值研究结果与已有的实验观测结果基本一致.

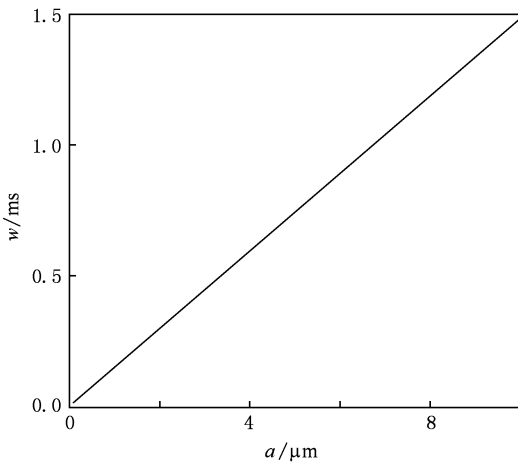


图 9 尘埃寿命 w 与尘埃半径 a 的关系

- [1] Carmack W J, Anderl R A, Pawelko R J, Smolik G R, McCarthy K A 2000 *Fusion Eng. Des.* **51**—**52** 477
- [2] Peacock A T, Andrew P, Cetier P, Coad J P, Federici G, Hurd F H, Pick M A, Wu C H 1999 *J. Nucl. Mater.* **266** 423
- [3] Winter J 2000 *Phys. Plasmas* **7** 862
- [4] Winter J, Gebauer G 1999 *J. Nucl. Mater.* **266** 228
- [5] Chappuis P, Tsitron E, Mayne M, Armand X, Linke H, Bolt H, Petti D, Sharpe J P 2001 *J. Nucl. Mater.* **290** 245
- [6] Sharpe J P, Chappuis P, Petti D A 2001 *Fusion Technol.* **39** 1061
- [7] Sharpe J P, Carmack W J, Petti D A 2001 *Fusion Technol.* **39** 1066
- [8] Sharpe J P, Petti D A, Bartels H W 2002 *Fusion Eng. Des.* **63**—**64** 153
- [9] McCarthy K A, Petti D A, Carmack W J, Smolik G R 1998 *Fusion Eng. Des.* **42** 45
- [10] Piet S J, Costley A, Federici G, Heckendorn F, Little R 1998 *17th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering* (San Diego: IEEE) pp167—170
- [11] Rubel M, Ceconello M, Malmberg J A, Sergienko G, Biel W, Drake J R, Hedqvist A, Huber A, Philipps V 2001 *Nucl. Fusion* **41** 1087
- [12] Tanaka Y, Pigarov A Y, Smirnov R D, Krasheninnikov S I 2007 *Phys. Plasmas* **14** 052504
- [13] Krasheninnikov S I, Tomita Y, Smirnov R D, Janev R K 2004 *Phys. Plasmas* **11** 3141
- [14] Pigarov A Y, Krasheninnikov S I, Soboleva T K, Rognlien T D 2005 *Phys. Plasmas* **12** 122508
- [15] Smirnov R D, Pigarov A Y, Rosenberg M, Krasheninnikov S I, Mendis D A 2007 *Plasma Phys. Contr. Fusion* **49** 347
- [16] Pigarov A Y, Smirnov R D, Krasheninnikov S I, Rognlien T D, Rosenberg M, Soboleva T K 2007 *J. Nucl. Mater.* **363** 216
- [17] Duan P, Liu J Y, Gong Y, Zhang Y, Liu Y, Wang X G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7090 (in Chinese) [段 萍、刘金远、宫 野、张 宇、刘 悦、王晓钢 2007 物理学报 **56** 7090]
- [18] Wang Z X, Liu J Y, Zou X, Liu Y, Wang X G 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 793 (in Chinese) [王正涵、刘金远、邹 秀、刘 悦、王晓钢 2004 物理学报 **53** 793]
- [19] Shi Y X, Ge D B, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5318 (in Chinese) [石雁祥、葛德彪、吴 健 2006 物理学报 **55** 5318]
- [20] Chen G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1539 (in Chinese) [陈 光 2006 物理学报 **55** 1539]
- [21] Wu J, Zhang P Y, Song Q L, Zhang J L, Wang D Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4794 (in Chinese) [吴 静、张鹏云、宋巧丽、张家良、王德真 2005 物理学报 **54** 4794]
- [22] Shi Y X, Wu J, Ge D B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5507 (in Chinese) [石雁祥、吴 健、葛德彪 2009 物理学报 **58** 5507]
- [23] Yang X F, Wang X G, Liu Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4938
- [24] Wang Z X, Liu Y, Liu J Y, Wang X G 2005 *Phys. Plasmas* **12** 014505
- [25] Wang Z X, Wang X G, Ren L W, Liu J Y, Liu Y 2005 *Phys. Lett. A* **339** 96
- [26] Liu J Y 1998 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [刘金远 1998 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [27] Goertz C K 1989 *Rev. Geophys.* **27** 271
- [28] Vernet N M 1982 *Astron. Astrophys.* **105** 98

Characteristics of charging, motion and temperature of dust particulates in magnetic fusion devices^{*}

Liu Jin-Yuan¹⁾ Chen Long¹⁾ Wang Feng^{1)†} Wang Nan¹⁾ Duan Ping²⁾

1) (*School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

2) (*College of Physics Science and Technology, Dalian University, Dalian 116622, China*)

(Received 31 December 2009; revised manuscript received 23 June 2010)

Abstract

Characteristics of dust particulates (charging, movement and temperature) in magnetic fusion devices with different plasma parameters are discussed. It is shown that the charge quantity of dust particulates is obviously influenced by the ratio between electron and ion temperatures; secondary electron emission reduces the charge quantity; the charging relaxation time of dust particulates in fusion plasma is much shorter than in laboratory plasma; dust particulates speed reach hundreds of meters per second under the action of ion drag force; the lifetime of carbon dust in fusion plasma is on the millisecond scale. The results are consistent with experimental observations.

Keywords: dust, fusion plasma, charging equation

PACC: 5225Z, 5240, 5265, 2852

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10875024, 10975026), the Scientific Research Program of Institution of Higher Education of Liaoning Province, China (Grant No. 2008S059), the Natural Science Foundation of Liaoning Province, China (Grant No. 20082146) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2009GB105004, 2009GB106002).

[†] Corresponding author. E-mail: fengwang@mail.dlut.edu.cn