



尘埃等离子体电磁特性研究

陈晨¹, 姚静锋^{1,2,3}, 李辉⁴, 吴健⁴, 袁承勋^{1,2,3*}

1. 哈尔滨工业大学物理学院, 哈尔滨 150001

2. 黑龙江省等离子体物理与应用技术重点实验室, 哈尔滨 150001

3. 黑龙江省等离子体物理与应用创新研究中心技术, 哈尔滨 150001

4. 中国电波传播研究所, 北京 100000

*联系人, E-mail: yuanxc@hit.edu.cn

收稿日期: 2024-09-09; 接受日期: 2025-01-02; 网络出版日期: 2025-04-11

国家自然科学基金(编号: 12105251, 12175050, 12205067)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2022YFE0204100)资助项目

摘要 在等离子体的实际应用中, 研究人员在对天体物理、空间通信、航空航天、工业生产等研究领域逐步发现尘埃等离子体, 如飞行器的再入过程、火箭尾焰微波异常衰减现象中产生通信干扰, 以及夏季极区电离层回波信号的异常等现象均是由尘埃等离子体造成的。尘埃等离子体是指在等离子体中浸入微米或纳米级的微小颗粒, 这些微小颗粒会在等离子体中与其他带电粒子相互作用, 且在不同的物理环境中的电磁特性不同, 具有复杂性。本文简要介绍了尘埃等离子体的研究历程、研究方向、基本电磁特性、与电磁波相互作用机制等方面, 简要概括近些年理论上和实验上在分析实际研究中遇到问题。其中较为突出的问题是理论计算不均匀尘埃等离子体的不精准、理论研究与特定情况下的实验研究仍有差距、特定环境下的尘埃等离子体与电磁波相互作用的实验开展难度高。最后, 本文给出尘埃等离子体未来的发展方向, 以供尘埃等离子体与电磁波相互作用的研究参考。

关键词 尘埃等离子体, 电磁特性, 电磁波

PACS: 52.27.Lw, 13.40.-f, 52.35.Hr

1 引言

Langmuir等人^[1]在1928年将等离子体定义为Plasma, 为等离子体物理学奠定了基础。自然界中等离子体通常包含有多种类、多尺寸的微小的带电颗粒, 这种复杂的等离子体形态被称作尘埃等离子体, 相比于只包括中性分子、电子、离子的等离子体, 多了部分携带一定电荷量的尘埃颗粒, 也称作复杂等离子体^[2],

如图1所示。这种尘埃颗粒的形状不具备规则性, 且介质材料不限, 这些颗粒不仅受到重力的影响, 还受到等离子体及电磁力的作用, 具有复杂的电磁特性^[3]。尘埃等离子体在宇宙中扮演着重要的角色, 广泛存在于星际云、行星环、星际介质等多种天体环境中。早在1983年, 旅行者2号飞船向地球传回土星环的珍贵照片, 揭示了土星环中存在径向辐条状的结构, 产生这一现象的原因是尘埃微粒对太阳光的米氏散射效

引用格式: 陈晨, 姚静锋, 李辉, 等. 尘埃等离子体电磁特性研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 105205

Chen C, Yao J, Li H, et al. Study on electromagnetic properties of dusty plasma (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 105205, doi: [10.1360/SSPMA-2024-0378](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0378)

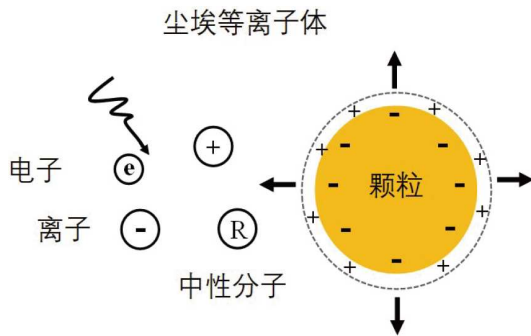


图 1 (网络版彩图) 尘埃等离子体微粒组成示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the structure of dusty plasma particles.

应, 这为科学家们研究尘埃等离子体的动态行为对星际环境中物理过程产生的影响提供了重要线索, 这一现象从侧面证实了尘埃颗粒携带电荷的特性^[4,5]. 除此之外, 1989年, Selwyn等人发现用等离子体刻蚀技术处理半导体芯片时, 会发生氧化反应形成二氧化硅杂质颗粒, 发现在这一过程中的尘埃颗粒是带电的, 与在空间环境中观测到的尘埃颗粒一致^[6]. 对于尘埃等离子体的研究追溯已久, 早期研究主要集中在以下几个方面: (1) 空间尘埃颗粒所携带电荷极性的问题以及其在整个系统中发挥的作用; (2) 尘埃颗粒携带的电荷对等离子体中的颗粒聚集或分散的动态行为的影响; (3) 尘埃颗粒之间的相互作用力对尘埃等离子体中的粒子在电场中行为的影响; (4) 带电的尘埃颗粒在天体现象中等离子体环境下的复杂的电动力学过程; (5) 复杂等离子体中的非线性现象的研究等^[7-10]. 而这些现象不仅激发了众多研究学者对尘埃等离子体的浓厚兴趣, 也引领了相关领域的深度探索和发展.

尘埃颗粒在近地空间形成的尘埃等离子体对于电磁环境和航空航天的通信会产生显著影响, 如夏季时常发生的极区中层夏季回波, 该现象通常出现在一些欧洲国家的极区, 由于大气中层的气温较低, 导致冰晶颗粒的形成, 对电磁波产生的影响在雷达探测时尤为明显, 可产生雷达回波现象^[11]. 除了通过地面雷达去探索, 还可以用火箭探测器进一步揭示中层区域内带电尘埃颗粒的存在, 证实了该区域同时存在带负电和正电的尘埃颗粒^[12,13]. 这一发现为尘埃等离子体中微粒带电的特性提供了重要依据. 随着航空航天技术的发展, 由尘埃等离子体引起的航天器“黑障”现象已成为科研领域所面临的关键挑战之一. 返回舱在以高

速接近地球表面时, 与大气层中的气体发生剧烈摩擦, 产生大量热能, 在此高温条件下, 飞行器表面的耐热涂层会产生烧蚀, 并形成悬浮的不均匀的尘埃等离子体环境^[14,15]. 研究表明, 高温下产生的尘埃等离子体围绕着返回舱, 呈现出类似于一个鞘套形状, 屏蔽电磁信号, 使得电磁波信号振荡和衰减, 干扰信号的传播, 当屏蔽作用达到一定强度时, 地面与飞行器之间的通信信号会被鞘套阻断, 形成“黑障”现象, 这一现象不仅影响数据传输, 还会对飞行员的生命安全构成严重威胁, 因此亟须在相关研究领域展开深入研究. 除此之外, 如固体火箭喷焰中包含大量的 Al_2O_3 尘埃颗粒形成尘埃等离子体, 会严重地衰减电磁波信号, 导致信号失真甚至中断^[16,17]. 火箭喷焰对电磁波信号的异常散射问题也已经困扰航天领域多年. 人们逐渐发现近地空间的尘埃等离子体, 强烈地影响空间通信. 尽管在实际应用中, 这些问题已经困扰科研工作者多年, 但现有的理论模型和实验数据仍然不能充分解释尘埃颗粒对电磁波传播的影响机制, 对于尘埃等离子体的电磁特性以及对电磁波的影响规律, 仍然缺乏深入而系统的研究.

在解决实际中的空间通信等问题前, 首先需要从物理层面了解尘埃等离子体的电磁特性. 而与自然界中不稳定的空间尘埃等离子体相比, 实验室往往可以形成稳定且易于研究的尘埃等离子体, 为研究其电磁特性提供稳定的环境. 而随着研究的不断深入, 关于实验室尘埃等离子体的文献报道逐渐增多^[18]. 实验室中尘埃等离子体通常是在特定条件下形成的, 比如在高电压、高温、高功率微波、气体化学反应作用下等. 在众多的实验装置中, 直流气体放电中的尘埃等离子体研究尤为广泛. 最初, Langmuir等人^[1]在气体放电的等离子体中观测肉眼可见的缓慢运动的球状体, 此现象在1927年首次被报道在一篇论文中, 这是最早关注尘埃等离子体的实验的研究. Fedoseev等人^[19,20]分别从实验和理论上进行了对在氦气直流辉光正柱区分层放电时尘埃云以及尘埃空洞的形成进行一系列研究, 测量不同气压下垂直放电管中悬浮的尘埃云的大小和形状, 并建立了尘埃等离子体参数的径向分布理论模型, 如图2(a)所示. 此实验中得到的实验数据和理论模型, 为进一步研究原始等离子体和含尘埃等离子体的直流辉光放电等离子体参数等提供可靠参考. 在尘埃等离子体的飞速发展的过程中, 还发现了尘埃晶

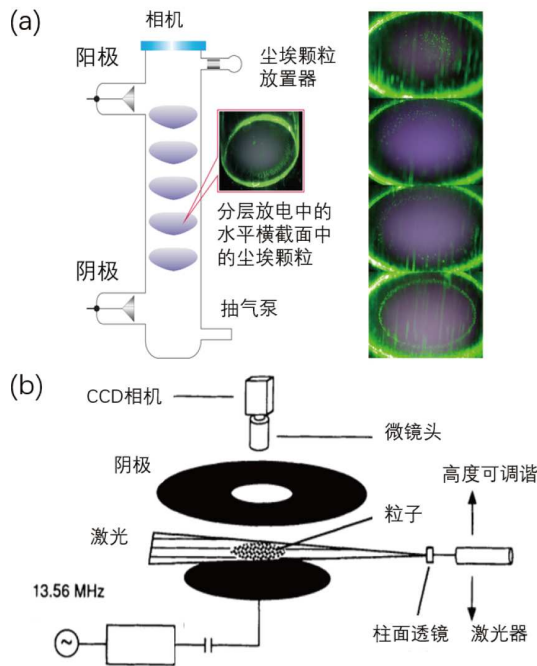


图 2 (网络版彩图)实验室尘埃等离子体示意图. (a) 直流辉光放电中的尘埃颗粒云的实验装置与实验照片^[19]. (b) 射频放电下的尘埃云^[22]

Figure 2 (Color online) Diagram of laboratory dusty plasma. (a) Experimental equipment and photos of dust particle clouds in DC glow discharge^[19]. (b) Dusty cloud under radio-frequency discharge^[22].

格中的低频波现象^[21]. Thomas等人^[22]首次通过氩气射频放电, 在实验中观测到半径为 $7\ \mu\text{m}$ 左右的尘埃颗粒悬浮在等离子体中形成的尘埃晶格的有序结构, 如图2(b)所示. 这些研究可用于多学科交叉领域去解释空间物理、流体力学、非线性物理等一系列科学问题.

尘埃等离子体研究与空间物理的发展有着紧密的联系, 为了研究相关的科学问题, 通常会在实验室创造微重力条件, 形成稳定的尘埃云团为实验研究奠定基础, 而其中尘埃颗粒的运动及云团的形状与尺寸通常可以通过对周围等离子体环境改变进行调控^[19]. 这是由于在实验室环境下与太空中形成的尘埃等离子体不同, 地球引力会对尘埃颗粒施加外部应力, 因此要构造微重力环境去研究尘埃等离子体的特性. 最初在Mir空间站上利用直流放电为尘埃等离子体提供微重力环境^[23-25]. Plasma Kristall-4 (PK-4)主要利用直流放电等离子体为尘埃颗粒提供一个微重力的环境, 形成稳定的尘埃等离子体去研究各种动力学现象^[26-31], 这种腔室的形状是由很多因素尤其是空间装置的有限尺寸决

定的, 这些结果为研究直流辉光放电尘埃等离子体提供参考.

尘埃等离子体不仅在空间物理中扮演重要角色, 其颗粒带电的独特特性使得其为研究相位转换, 输运、非线性物理等提供了一个理想的模型系统. 如在微重力条件下, 尘埃等离子体是一个开放的耗散系统和混沌研究的完美平台. Sheridan等人^[32,33]自2005年对于尘埃等离子体中的混沌动力学进行研究, 通过驱动三个尘埃颗粒, 观察尘埃颗粒的质心模式确定了其周期性的运动. 2020年, 贺亚峰课题组^[34]通过改变等离子体的条件, 在实验中通过电极上的非对称锯齿控制数百个尘埃颗粒的流动方向, 并继续进行了一系列的深入研究^[35]. 结合尘埃等离子体内的颗粒的电磁特性, 使得尘埃等离子体是进行很多研究的理想平台, 为许多其他交叉领域提供灵感与参考.

对尘埃等离子体的基础的重要研究主要集中在以下四个方面, 也为研究尘埃等离子体的电磁特性奠定了理论基础. (1) 研究在自然界中广泛存在的尘埃等离子体, 这对于近地通信, 空间通信等具有重要意义^[36,37]; (2) 研究在不同的放电条件下, 对形成的尘埃等离子体的种类及其相关的电磁特性的基础研究也是十分重要的, 这为接下来的电磁特性研究奠定基础; (3) 在微重力条件下研究等离子体对单个尘埃颗粒的作用, 或是浸入等离子体中的颗粒之间的相互作用, 在尘埃等离子体搭建的平台上深入研究其中的物理机制^[38,39]; (4) 通过简单光学手段准确地、清晰地观察单个微粒的实时行为^[34], 这也需要对尘埃等离子体的电磁特性有深入的理解. 这些特征不仅使得复杂等离子体成为一个强有力的跨学科研究领域, 还为尘埃等离子体的电磁特性研究奠定基础. 综上所述, 尽管近年来尘埃等离子体的研究和航天事业都取得了迅猛发展, 但是尘埃等离子体复杂的电磁特性研究仍处于初步阶段, 在实际应用中仍有许多关键问题亟待解决, 尤其是在等离子体与电磁波相互作用方面.

2 尘埃等离子体电磁特性研究历程

近些年来, 地球电离层以及“黑障效应”等近地通信问题引起研究人员的广泛注意. 在这个过程中, 微波与等离子体的相互作用理论已经得到了广泛的研究, 尤其是在色散理论模型方面, 相关研究取得了初步

的结果. 但目前一些自然界中的通信问题仍然未得到解决, 需要完善的等离子体与电磁波相互作用的理论模型^[40], 因此其电磁特性仍需进一步探索, 本节主要叙述尘埃等离子体的电磁特性的研究历程.

在前期基础的理论研究中, 对于带电尘埃颗粒的计算往往会将其类比于等离子体中质量更大的离子, 初期, Tsytovich等人^[41]通过等离子体动力学方程, 融入尘埃颗粒表面电荷涨落的物理过程的计算中去, 推导出在理想条件下其纵向介电系数. Bingham等人^[42]在此研究的基础上拓展, 计算了纵波散射截面, 进一步地研究了电磁波在尘埃颗粒影响下的散射问题. 与此同时, Tsytovich等人^[43-47]继续在尘埃等离子体中深入研究本征波动与不稳定性等方面的问题, 如研究等离子体中单个非线性屏蔽尘埃颗粒中的散射. 大部分的前期研究集中在单个带电尘埃颗粒在等离子体中的散射与吸收问题, 随后人们开始研究多个颗粒系统中的电磁特性. 2001年, Fortov等人^[48]尝试从实验上测量尘埃颗粒所带电荷量, 如图3(a)所示, 通过CCD相机, 结合电场强度大小, 可以测量得到尘埃颗粒返回所消耗的时间, 计算出颗粒电荷量, 但这一过程中的尘埃颗粒带电后形成的结构, 明显对等离子体内电场大小产生影响, 导致实验与理论不吻合, 偏差较大. 在2013年, Fedoseev等人^[49]研究了轴向放置的放电管在直流辉光放电时, 其中等离子体参数和尘埃颗粒径向分布的关系, 并提出了含尘埃颗粒的直流辉光放电正柱区的自洽非局域模型. 2021年, Li等人^[50,51]研究了不同空间下, 不同的电子密度下, 尘埃等离子体在直流辉光放电条件下的EEDF的变化, 确定了只有在极高的密度下, 尘埃颗粒会影响其中的高能电子, 使得等离子体中的双极性电势发生转变, 进而影响EEDF. Ding等人^[52-54]继续模拟了四种常见的颗粒数密度分布下, 尘埃等离子体在双极电场中实现了对颗粒的稳定捕获, 并且设计了捕获尘埃颗粒的实验装置, 实现颗粒稳定悬浮在等离子体中, 产生稳定的尘埃等离子体, 分析其捕获机制. 实现不同方向放置的放电管主动控制捕获尘埃颗粒并控制形成的尘埃云团的形状. 但这些研究无论是实验还是仿真均只关注尘埃等离子体自身的电磁特性, 未能解决实际中的科学问题.

研究尘埃等离子体的电磁特性的最终目的是研究电磁波对其的影响以及二者之间的相互作用, 大量的研究人员也关注到这一点. 1995年, Shukla等人^[55]利

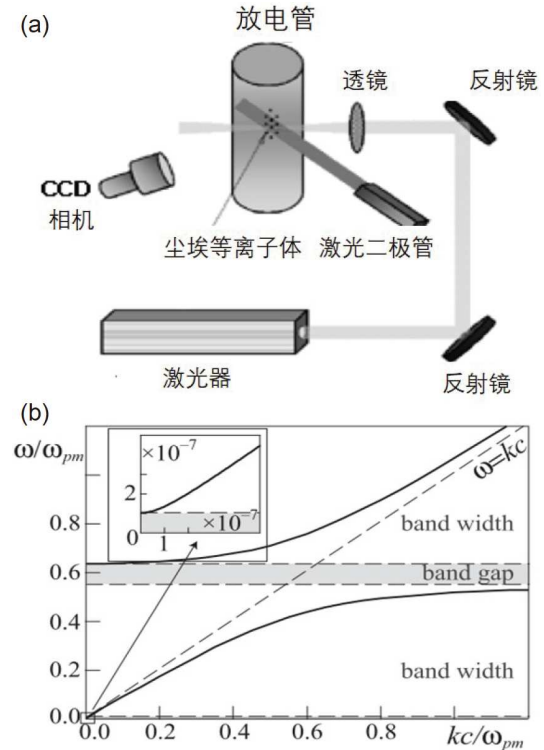


图 3 (a) 尘埃颗粒电荷测量装置示意图^[48]. (b) 计算在球形金属颗粒的尘埃等离子体中电磁色散曲线^[62]

Figure 3 (a) Scheme of the setup for measuring the charge on dust particles ^[48]. (b) The electromagnetic dispersion curve is calculated in a spherical metal dusty plasma ^[62].

用流体模型和泊松-麦克斯韦方程, 在考虑到尘埃等离子体中电磁波受激散射的不稳定条件下, 精确推导出高频电磁波与慢运动尘埃等离子体之间的非线性耦合方程. 随后, 进一步深入研究了颗粒在等离子体中的集体效应和电磁特性^[56-59]. 同时, Morfill等人^[60]也深入研究非线性相互作用关系在电磁波与尘埃等离子体相互作用中的表征. 随后, 俄罗斯科学家Tolias等人^[61]通过动力学模型, 进行了无碰撞尘埃等离子体中电磁波散射问题的理论研究. 2016年, Vladimirov等人^[62]研究了金属或电介质的球形尘埃颗粒在等离子体中形成稳定的尘埃等离子体后的介电特性, 重点研究了宏观粒子表面等离子体共振对电磁波传播的影响, 并在尘埃等离子体中观测到了带隙结构, 如图3(b)所示. 人们将目光逐步放置到结合外加电磁场与尘埃等离子体本身的电磁特性, 进行了更为复杂的理论研究, 但仍需理论与实验结合的进一步的深入探索, 提供具备普适性的实验结果也是至关重要的. 根据尘埃等离子体的研究

历程可以发现, 早期对尘埃等离子体电磁特性的研究方向较为分散, 有人从理论和实验上去研究尘埃颗粒在等离子体中携带电荷量的问题, 有人研究尘埃颗粒分布情况与等离子体参数之间的联系, 有人研究不同的颗粒分布对电场的影响, 也有人研究不同种类尘埃颗粒形成的尘埃等离子体的基本介电特性和带隙结构的问题, 但大部分研究人员的研究集中于单个或多个颗粒在等离子体中的电磁特性, 或是外加电磁场后的散射或吸收衰减的问题. 以上研究为后续分析电磁波在尘埃等离子体传播问题提供理论基础.

下面简要介绍尘埃等离子体的充放电过程的理论模型, 也是后面计算尘埃等离子体介电常数的基础. 在尘埃等离子体中, 颗粒容易与电子和离子结合, 这些带有高电荷的颗粒是尘埃等离子体的典型物理特征之一. 尘埃颗粒的电荷量不仅受到其特性、形状、尺寸显著影响, 还会被所处等离子体环境内部的物理参数变化影响, 该参数变化还会影响在等离子体中颗粒的充放电过程和颗粒的物理特性. 因此, 尘埃颗粒在等离子体中的充放电问题一直是物理研究中的重点之一.

尘埃颗粒的带电过程十分复杂, 包括多个过程, 如电子和离子结合、被紫外辐射所激发的电子发射以及二次电子激发等. 当忽略复杂的电光效应时, 尘埃颗粒的带电过程主要受到等离子体中电子和离子流的影响, 由于等离子体中电子的无规则热运动远远大于离子, 尘埃颗粒通常带负电, 会对电子产生排斥效应, 吸引离子靠近. 但等离子体在总体上保持电中性, 最终导致尘埃颗粒表面的电子流和离子流达到平衡状态, 形成稳态.

在计算尘埃颗粒的带电过程中还需要掌握等离子体中的屏蔽势, 即带电粒子之间的相互作用. 且带电粒子的四周也会存在着大量的带电粒子形成电荷云, 通过对粒子受力分析, 结合玻尔兹曼分布函数, 对经过电荷屏蔽的带电粒子的电势, 即等离子体屏蔽势做简单的统计, 可以计算出围绕在点电荷周围的电子和离子的数量. 利用泰勒展开在假设扰动势能小于热能的条件, 近似表示出等离子体中离子与电子数量^[63], 且满足泊松方程, 根据球对称性、变量替换后等可以计算出库仑屏蔽势能. 在尘埃颗粒带电机制研究中, 通常将单个颗粒视作球形探针建立理论框架. 基于有限轨道理论(Orbit Motion Limited Theory, OML)^[64,65],

其中 $r_d \ll \lambda_D \ll l_m$ 是该理论适用的基本条件, 可以建立颗粒表面电子流和离子流方程. 其中粒子半径为 r_d , l_m 是中性气体与电子或离子之间的平均自由程, 可根据OML方法计算尘埃颗粒表面所携带的电荷^[66,67]. 如图4所示, OML需要满足基本的三个假设: (1) 尘埃颗粒之间相互孤立, 即忽略其他尘埃颗粒的影响, 假设周围的电子和离子运动不受到影响; (2) 在靠近颗粒时, 其他粒子均不发生碰撞; (3) 不存在有效势垒. OML理论满足以上基本条件. 2021年, Li等人^[68]基于OML理论, 结合直流放电的流体模型, 建立了一维直流尘埃等离子体的理论模型, 在直流辉光放电的条件下, 定量计算尘埃等离子体在不同的电子密度的分布下, 尘埃颗粒的径向空间分布情况, 以及其对双极性电场和正柱区的影响, 揭示了尘埃等离子体中电子密度分布与颗粒分布之间的物理机制. 探索颗粒的分布对电子密度的影响, 为研究不均匀的尘埃等离子体中电磁波的传输机制奠定基础.

理想的尘埃颗粒充放电物理模型假设表面电势相等, 且颗粒附近的轨道运动会影响吸附在其表面的电子和离子. 假设等离子体中带电粒子的运动速率为 v , 可得尘埃颗粒与电子和离子的充电截面为 $\sigma_a^d = \pi b_a^2$ ^[69,70], 通常情况下只有满足轨道参数 $b \leq b_a$ 条件时, 等离子体中的电子或离子才有可能对尘埃颗粒的充电做出贡献. 尽管当 $b > b_a$ 情况下, 轨道虽然对尘埃颗粒充电过程无贡献, 但会屏蔽空间电荷. 根据OML近似理论可以得到与粒子速度相关的充电截面. OML近似理论具有的一个明显优势是, 充电截面与尘埃颗粒周围的等离子体电势分布无关, 但这恰恰间接证明了OML近似理论的局限性^[2]. 根据能量守恒和角动量守恒, 可以推导方程, 当颗粒表面的负电荷随着

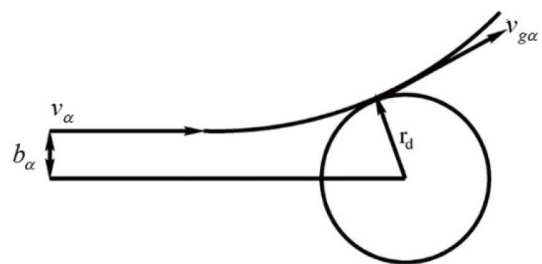


图 4 等离子体尘埃颗粒与带电微粒子的充电示意图
Figure 4 Schematic diagram of charging dust particles and charged particles in plasma.

时间积累越来越多, 电子电流下降的同时会伴随着离子电流的增强, 最终达到充电平衡, 即电子电流等于离子电流. 在理论上, 尘埃等离子体中的带电颗粒要想达到充电平衡需要时间积累, 若是满足OML理论模型假设条件, 尘埃颗粒上的动态积累电荷过程等可以得到颗粒表面携带的电荷数与尘埃半径之间的关系. 进而得到结论: 尘埃颗粒的半径越大, 尘埃表面所携带的电荷数就会越多. 而尘埃颗粒携带电荷会影响尘埃等离子体中的电磁场的分布, 因此这一结论说明在理论研究和实验设计中, 对于尘埃颗粒半径的选取要慎重, 要针对实际问题选取合适的尺寸的尘埃颗粒.

3 尘埃等离子体与电磁波相互作用的研究

3.1 尘埃等离子体与电磁波相互作用理论研究进展

在尘埃等离子体物理领域中, 以往的大多数研究关注于空间尘埃等离子体充放电的基本物理过程特性. 该领域通过大量的实验验证了尘埃颗粒散布在等离子体中会显著地改变其电磁特性, 进而影响电磁波的散射特性. 然而, 当科研人员继续深入研究时, 因尘埃等离子体导致电磁波非正常传输的诸多复杂机制, 发现突破现有的理论较为困难, 诸多问题不能解决. 因此近二十年来, 为研究微波在尘埃等离子体中的传输规律, 人们从相对简单的微波波段入手, 致力于建立尘埃等离子体电磁特性理论模型. 在这一过程的探索中展开了一系列的深入算法研究, 如传输矩阵、射线追踪、Rayleigh近似、Born近似、FDTD算法、WKB等方法, 对不同的数值模拟和计算方法的探索是为了更精确描述并解释电磁波在尘埃等离子体中的传播特性. 这些研究往往需要复杂的数学模型和计算方法, 旨在揭示尘埃等离子体介电常数、传输特性以及与电磁波相互作用的规律. 早期国外对尘埃等离子体电磁特性的研究是基于经典的米氏德拜散射模型, 而国内的研究形式也与国外保持同步, 致力于进一步优化散射模型. 早在2004年, 李芳等人^[71]就提出了“不可忽略”论: 尘埃粒子Debye球产生的无旋散射场对电磁波的吸收截面是不可忽略的. 李江挺等人^[72]以米氏德拜散射模型为基础得到了空间尘埃等离子体的数值模拟结果. 他们计算了在不同频率下的电磁波的散射特性, 并进一步分析了尘埃颗粒尺寸对电磁波传输的影响.

2017年, Guo等人^[73]继续通过So-FDTD计算了不同尘埃颗粒的尺寸大小、颗粒浓度、电子密度和温度等参数的变化, 对三维等离子体随时间变化的雷达反射截面的影响, 尝试去研究非均匀弱电离子尘埃等离子体中鞘层部分的电磁波时空散射特性^[74]. 随后Rashad^[75]开展了关于微波在尘埃等离子体中传输的研究, 他设计了一种柱形等离子体束, 意在模拟火箭喷射尾焰, 计算微波在火箭喷焰中的散射效应. 这些研究集中于尘埃等离子体的散射特性, 也是采取了不同的计算方法与模型进行分析, 且关注影响因素也是不同的, 不仅仅是考虑单一或多个粒子对电磁波的散射问题, 而是将电磁波对尘埃颗粒电磁特性的影响考虑进去. 但这与解决实际问题的方向仍然有部分的偏差.

在此基础上, 国内研究人员将目光投入到推导尘埃等离子体的相对介电常数中去, 研究电磁波在尘埃等离子体中的空间和实验室环境中的反射、透射和吸收问题, 为解决尘埃等离子体的实际问题提供参考. 2007年, 石雁祥等人^[76,77]仍以尘埃颗粒的充电方程为基础, 初步求解弱电离子尘埃等离子体的介电常数和电导率, 并进一步根据色散关系计算电磁波在尘埃等离子体中传输的衰减常数和相位常数, 模拟了电磁波在火箭喷焰时的传输过程与特性. 但这一计算过程十分复杂, 需要将等离子体的介电方程与尘埃颗粒之间的充放电公式联合求解动力学方程, 可以得到弱电离子尘埃等离子体的相对介电常数^[78]. 由玻尔兹曼方程推导, 需要注意的是, 当电磁波与尘埃等离子体相互作用时, 即加入外部电磁场后会影响到充电电流, 根据欧姆定律, 并且进一步根据电荷守恒等公式, 可以得到考虑颗粒碰撞的弱电离子尘埃等离子体的介电常数, 表示为

$$\varepsilon_d' = \varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0 \omega_{pa}^2}{\omega^2 + \nu_{eff}^2} + C' \varepsilon_0 \omega_{pa}^2 \omega_d \cdot \left[\frac{(\nu_{eff} + \nu_{ch})}{(\omega^2 + \nu_{eff}^2)(\omega^2 + \nu_{ch}^2)} - \frac{i}{\omega} \left(\frac{\varepsilon_0 \nu_{eff} \omega_{pa}^2}{\omega^2 + \nu_{eff}^2} + C' \varepsilon_0 \omega_{pa}^2 \omega_d \frac{\omega^2 - \nu_{eff} \nu_{ch}}{(\omega^2 + \nu_{eff}^2)(\omega^2 + \nu_{ch}^2)} \right) \right], \quad (1)$$

其中, $\omega_d = \frac{\omega}{k} n_d \pi r_d^2$ 是尘埃等离子体频率, ν_{eff} 是有效碰撞频率, n_d 是尘埃颗粒数密度, ν_{ch} 是尘埃颗粒的充电频率, ω_{pa} 是尘埃等离子体中不同粒子的振荡频率. 根据严格的理论推导, 式(1)是弱电离子尘埃等离子体的介电

常数, 其电磁特性与尘埃颗粒的数密度、半径大小等物理参数有关, 这些基本的理论为电磁波在弱电离尘埃等离子体中的传输奠定基础. 但在实际应用中的条件更为复杂, 需要针对具体情况去修正. 尘埃等离子体的介电常数难以计算, 在实际的仿真中是一个棘手的难题, 因其复杂的电磁特性不能等效为等离子体的介电常数. 该系列公式的提出解决了仿真计算电磁波经过一维、二维或是三维均匀尘埃等离子体时的复杂问题. Jia等人^[79-82]通过该模型计算了一维模型下加入尘埃颗粒对电磁波的传输产生影响, 发现其几乎不会影响等离子体的整体性质, 但尘埃颗粒的大小、数量等参数的变化会对电磁波的反射、透射等产生显著的影响, 并采纳分层阻抗法去计算尘埃等离子体的纵向介电常数, 得到全电离和弱电离尘埃等离子体的透射率. 2016年, Li等人^[83,84]基于尘埃电荷的增减过程, 求解得到弱电离尘埃等离子体的横向介电常数, 在不同尘埃颗粒的大小和密度分布情况下, 理论上模拟这些参数对微波传输特性的影响. 2017年, Hong等人^[85]继续修正了尘埃等离子体的介电常数公式, 研究尘埃颗粒对电磁波在不同种类的尘埃等离子体中传播的影响. 这些研究集中在均匀的尘埃等离子体中不同的尘埃颗粒的尺寸、密度等因素对电磁波的传播特性的影响, 逐步完善弱电离尘埃等离子体介电常数的公式, 但这一模型方法仅适用于均匀的尘埃等离子体, 非均匀尘埃等离子体的介电常数仍然有待探索, 且对于非均匀尘埃等离子体中电磁波的传播特性的研究更适用于解决实际困难.

2012年李林茜等人^[86]证明了不均匀尘埃等离子体中电磁波的反射和透射系数, 均能由时域有限差分方法计算得到, 且该方法高效、可靠. 2013年, 俄罗斯Prudskikh等人^[87]提出了当背景为多分散尘埃等离子体时, 电磁波在尘埃等离子体沿外磁场任意角度的色散关系, 并分析粒径分布函数特性对电磁波色散的影响. Senol及其团队^[88]通过模拟三维电磁波的传输计算模型, 解释了火箭喷射尾焰影响, 得到了该环境下的电磁波折射和衍射效应. 2018年, 针对完全电离尘埃等离子体, Li等人^[89]研究了其中的电磁波传输特性, 并通过传输矩阵法得到微波透射反射模拟结果. 2021年, Kim等人^[90]基于双线性变换技术提出了更加精准并且有效的BT-FDTD方法, 数值模拟了电磁波在尘埃等离子体中的传播. 随后又提出相比于So-FDTD方法效率更

高的双线性变化和状态空间法的FDTD模型, 模拟电磁波在时变的尘埃等离子体中的传播^[91]. 2023年, Zhang等人^[92]采用散射矩阵法及WKB模型研究斜入射的太赫兹波在磁化的尘埃等离子体中的传播, 并假设三种电子密度分布不均匀的情况, 系统地研究了外部磁场、尘埃颗粒密度以及尘埃颗粒半径对太赫兹波透射的影响. 以上对不均匀尘埃等离子体的研究基于不同的计算方法、背景、维度等因素, 但研究的情形更贴合于实际. 尽管已经取得了部分成果, 但是尘埃等离子体在不同的环境下的机制、特性等仍然充满了未知与挑战, 但在这一过程中如何准确理解、模拟、预测、解决特定环境下的通信问题仍是该领域面临的困难.

近些年来, 尘埃等离子体对电磁波的衰减吸收等影响已经得到广泛的研究, 而在黑障问题的研究中, 人们发现尘埃等离子体对天线也会产生影响, 黑障效应的出现不仅是因为尘埃等离子体对电磁波的衰减, 还有天线信号频移的因素. 天线通常在转换正常空间中传播的电磁波与电路中电磁信号中发挥作用, 其设计的优劣直接影响整个通信系统的质量, 是移动通信系统中一个不可或缺的部分^[93]. 且天线辐射场的分布会因为环境介质的变化产生巨大影响, 不仅影响天线的谐振点, 使得频率发生偏移, 还会影响天线工作的稳定性. 因此设计性能优异的天线能够在尘埃等离子体中传输信号是十分重要的. 近些年来, 大量的研究人员研究了电磁波与尘埃等离子体的相互作用后, 又将目光集中在尘埃等离子体对天线的影响中. 在2021年, Guo等人^[94]采用射线追踪法获得了在传统等离子体和尘埃等离子体以及不同尘埃颗粒参数下的扰动电场, 并定量分析了尘埃等离子体对天线辐射的影响, 结果表明产生的尘埃颗粒在电磁计算中是不可忽视的. 2023年, 毛鹏荣等人^[95]通过仿真与实验表征了半波偶极子天线的性能, 发现在弱电离尘埃等离子体不仅会衰减电磁波的信号, 改变天线的谐振频率, 偏移较大, 且发现双频微带天线也是如此. 可见不同的环境条件, 如介质、温度、气压等可能均会影响对天线辐射性能, 因此尘埃等离子体对天线的辐射特性的影响不可忽略. 亟须设计在复杂环境中也具有较好的方向性、效率、增益的天线系统, 我们课题组在这一背景下, 研究了通过激发在等离子体中激发环形偶极子, 增强局域电磁场, 实现在尘埃等离子体中稳定传输的多频

可动态调谐的等离子体天线^[96]。以上研究不再局限于单纯的尘埃等离子体与电磁波相互作用到的机制上的研究,而是结合实际的器件,为解决黑障现象提供思路。

国内外在尘埃等离子体电磁特性的理论研究方面相对成熟,早期的国外研究使用经典的米氏德拜散射模型,主要集中于尘埃颗粒带电后形成的电子德拜屏蔽云对电磁波的散射。与此同时,国内的研究也与国外趋势一致,致力于进一步优化散射模型。然而,在21世纪初,国内研究团队改变了研究方向,他们开始关注等离子体介电模型与尘埃颗粒充放电之间的相关联系,直接从宏观上去研究尘埃颗粒充放电过程与电磁波之间相互作用时的影响。在不同的情况下,当考虑电磁波对尘埃颗粒的电磁特性影响时,可以利用各类碰撞项去计算玻尔兹曼方程近似解去计算其加入尘埃后的介电常数。之后大多采用此种方法计算相对介电常数,并通过时域有限差分法、有限元法、传输矩阵法等模拟计算电磁波的传输特性。上述理论的主要局限性在于它们大多是在理想条件下建立的,未考虑实际情况的影响因素,相关的理论模型十分冗杂,难以投入到实际应用中去,因此,研究的重心更应该从理论转向实验,在实验中探究理论,在理论上分析实验,彼此互补,才能更好地分析尘埃等离子体电磁特性。

3.2 尘埃等离子体与电磁波相互作用实验研究进展

在解决黑障问题的过程中,了解尘埃等离子体与电磁波相互作用理论机制,解释产生黑障效应的器件原因等有助于我们从根本上解决这一难题,但仅局限在理论上的研究远远不够。尘埃等离子体中的尘埃颗粒具有不同的尺寸、种类、密度以及形状等,且结合不同背景下的复杂电磁特性更为困难。因此针对黑障问题、火箭尾焰问题以及PMSE等实际应用中的问题,在实验上模仿研究尘埃等离子体对电磁波的影响也是十分重要的。

美国于2009年首次开展了大型微波波段下空间尘埃等离子体实验。该实验首先对电离层进行了大规模的带电粒子喷洒,后通过地面监测雷达监控并分析该电离层的电磁散射特性,这对于尘埃等离子体的空间实验是里程碑式的进步。六年后,美国尝试在电离层再次喷洒尘埃颗粒,继续通过雷达测量多频段通过电

离层的电磁波信号。这两次大型的尘埃等离子体喷洒实验对于研究尘埃等离子体与微波相互作用具有重要意义,尤其是在空间通信干扰以及航天通信等方面^[97-99]。随后,Kinefuchi和他的团队^[100,101]将实验环境放到海上。他们利用全尺寸固态火箭发动机的静态点火,开展针对微波在火箭喷射尾焰行为的研究,测量得到了在多个频段的相位延迟和微波衰减。同时,2015年美国海军研究所Gillman等人^[102]测试了磁约束尘埃等离子体对GPS波段的电磁波影响。他们搭建的装置通过在氩气中的直流放电产生等离子体,并通过振动向其中洒落尘埃,测量洒落后尘埃等离子体对微波透射产生的影响,发现尘埃会对透射率产生衰减,且朗缪尔探针也显示了等离子体中的电子密度会随着尘埃颗粒的洒落而下降。2016年,Jia等人^[82]不仅通过数值诊断同轴网格空心阴极放电产生的尘埃等离子体,还通过氦气放电产生等离子体,通过朗缪尔探针测量等离子体的参数,等离子体密度大约为 10^{17} m^{-3} ,通过尘埃洒落装置洒落半径为30 nm的尘埃颗粒,尘埃颗粒密度大约在 10^{12} m^{-3} ,通过矢量网络分析仪和4-6 GHz的天线进行测量,实验装置如图5(a)和(b)所示,测量得到了不同气压和功率下的尘埃等离子体对微波产生了明显的衰减,实验中电磁波的衰减与理论计算基本一致,如图5(c)所示^[79]。2019年,Xia阳等人^[103]继续提出了一种实验装置,如图6所示,可以通过振动筛网产生高密度连续且均匀的尘埃等离子体,且通过天线连接矢量网络分析仪测量可测得尘埃颗粒对实验室等离子体中微波传输的影响,测量得到了不同的种类的尘埃颗粒对电磁波透射的影响很大,如图6(c)所示,实验结果验证了尘埃颗粒的密度、颗粒种类等因素均会影响电磁波在其中的传输特性。

国内外的研究学者针对空间通信的问题,进行了大量的尘埃等离子体与电磁波相互作用的实验研究,巧妙地设计了在地面条件下的尘埃等离子体中电磁波传输实验。但是目前由于空间等各种问题的影响,对实验室内产生的尘埃等离子体的种类和尺寸施加了限制,进而对测量数据的范围也产生了显著的约束。且在实验室条件下,大多数颗粒只能悬浮在鞘层区,要想在这一很小的区域内实现微波传输和诊断是十分困难的,这种情况下产生的尘埃等离子体与要解决的实际问题的实验环境偏差也是很大的。除此之外,不稳定的环境也是实验的困难之一,如在地面环境的重力,

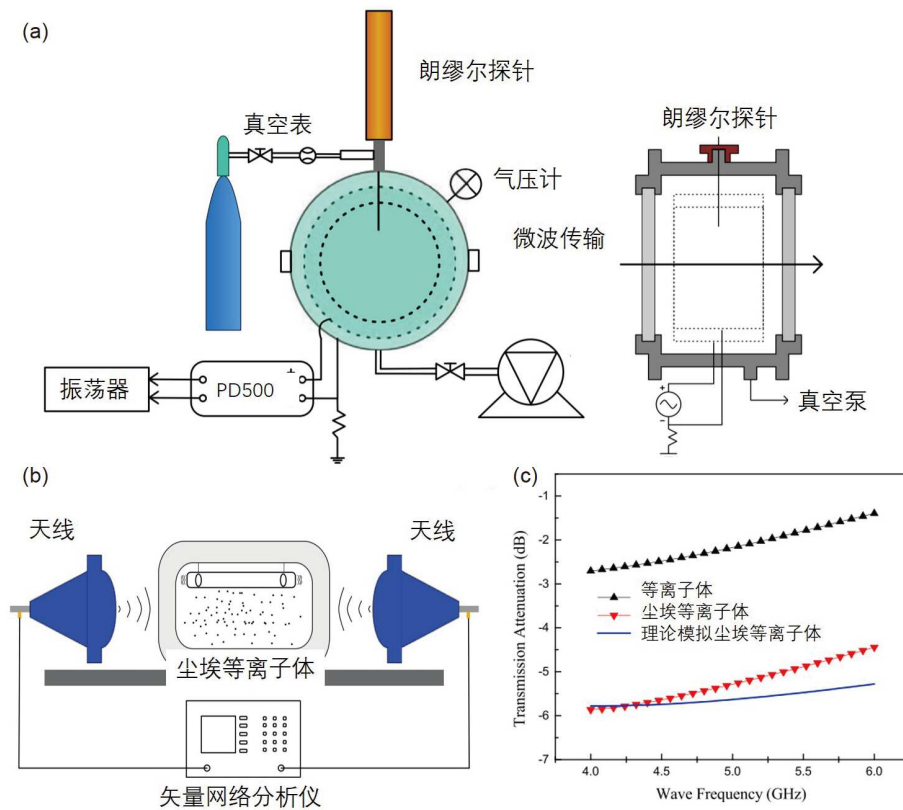


图 5 (网络版彩图) 天线微波在尘埃等离子体中的传输装置^[79]. (a) 辉光放电尘埃等离子体装置示意图. (b) 尘埃等离子体与电磁波相互作用的实验示意图. (c) 在 4–6 GHz 的透射衰减曲线

Figure 5 (Color online) Transmission device of antenna microwave in dusty plasma [79]. (a) Schematic diagram of glow discharge dusty plasma device. (b) Experimental schematic diagram of the interaction between dusty plasma and electromagnetic waves. (c) The transmission attenuation curve of 4–6 GHz.

形成不具备稳定性的尘埃等离子体, 实验上很难复现各类假设下推导的理论模型的理想实现. 但是可以小范围地产生稳定的尘埃等离子体装置为我们的实验研究提供思路, 如利用 PK-4 装置去影响电磁波, 模拟在电离层的尘埃等离子体微重力状态, 最大程度地模拟真实的尘埃等离子体影响电磁波传输的环境, 为微波在尘埃等离子体中的传播特性研究提供参考. 可见无论尘埃等离子体与电磁波相互作用理论上如何发展, 最终都要回到实验手段上去解决实际中的问题, 但截至目前我们仍旧缺乏充分的实验结果验证, 需要更多的科研人员针对具体的实际问题进行深入研究.

4 总结与展望

近些年来, 人们不断地提出各种各样的理论模型和计算方法去研究尘埃等离子体的电磁特性和与电磁

波相互作用机制, 也不断优化计算模型的速度, 提高计算速度. 现有的理论模型可以为解决黑障问题提供部分参考. 理论研究可以为优化实验设计提供有力支撑, 帮助科研人员进一步了解电磁波在尘埃等离子体中的传输特性, 但目前的研究并不完善. 根据目前国内外研究情况, 早期对于尘埃等离子体的研究关注的是单个颗粒对电磁波的散射产生的影响, 并未从宏观上考虑多个尘埃颗粒, 即整个系统对电磁波传输的影响. 但是截至目前, 电磁波在尘埃等离子体中的传输机理仍然不清晰. 针对近地空间通信和火箭尾焰异常吸收等问题, 首先从理论基础出发, 探究了尘埃等离子体本身的电磁特性外, 研究尘埃颗粒对电磁波的散射机制取得初步结果后, 国内研究人员又将目光转投向尘埃等离子体的介电特性的研究中去, 理论研究紧跟实际研究. 但这一过程中的缺陷就是在计算过程中, 大部分的现有理论是围绕数目不多的实验现象展开的, 且

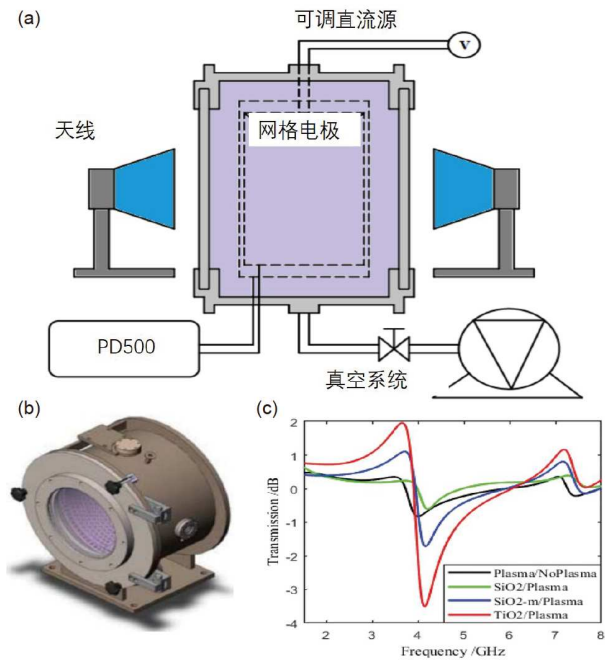


图 6 (网络版彩图)测量微波在尘埃等离子体中的传播^[103]. (a) 实验装置; (b) 等离子体放电腔; (c) 不同种类的尘埃颗粒下对应的微波在尘埃等离子体中的透射图谱

Figure 6 (Color online) Measurement of microwave transmission in dusty plasma ^[103]. (a) Experimental equipment; (b) plasma discharge chamber; (c) transmission profiles of microwaves in dusty plasma corresponding to different types of dust particles.

是基于尘埃等离子体是均匀分布或者给定的电子密度

分布的假设, 这些假设不能够精确完善地模拟出真实情况下的尘埃等离子体的复杂结构和性质, 与实际中电磁波在尘埃等离子体中传播存在较大的偏差, 因此得到的结果或是结论并不具备普适性, 尤其不适用于去研究自然界产生的尘埃等离子体引起的空间通信等问题. 因此相关科研人员不仅开展了理论计算和推导, 还进行了飞行试验和地面模拟实验等工作, 开展测量与诊断等离子体参数、研究烧蚀颗粒与等离子体中粒子之间的碰撞, 探索尘埃等离子体中电磁波传播特性、天线特性等过程中, 获得了真实有效的宝贵实验数据, 积累了相关经验与技术手段.

要解决重大工程领域中与尘埃等离子体电磁波传播有关的科学问题, 仍然缺乏有针对性的理论支持. 目前相关的理论研究填补了部分尘埃等离子体与电磁波相互作用领域的空白, 但在实际应用的研究中不确定因素太多, 如忽略重力作用在空间站开展的实验研究, 主要针对的是空间尘埃等离子体, 不仅实验难度较大, 环境苛刻, 且研究成本极高. 因此在未来的研究中, 应从实际应用角度出发, 对算法模型进行基于实际情况的修正与优化, 准确地模拟空间通信中电磁波在尘埃等离子体传播的特性. 进而结合理论和模拟仿真结果, 搭建针对实际问题的实验平台, 这对于系统地探索电磁波与尘埃等离子体相互作用具有深远的意义, 也是空间通信领域必须克服的难题.

参考文献

- Langmuir I. Oscillations in ionized gases. *Proce Natl Acad Sci USA*, 1928, 14: 627–637
- Fortov V, Ivlev A, Khrapak S, et al. Complex (dusty) plasmas: Current status, open issues, perspectives. *Phys Rep*, 2005, 421: 1–103
- Bonitz M, Horing N, Ludwig P. *Introduction to Complex Plasmas*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2010
- Havnes O, Aslaksen T, Hartquist T W, et al. Probing the properties of planetary ring dust by the observation of Mach cones. *J Geophys Res*, 2012, 100: 1731–1734
- Grün E, Morfill G E, Terrile R J, et al. The evolution of spokes in Saturn's B ring. *Icarus*, 1983, 54: 227–252
- Selwyn G S, Singh J, Bennett R S. *In situ* laser diagnostic studies of plasma-generated particulate contamination. *J Vacuum Sci Tech A*, 1989, 7: 2758–2765
- Feng Y, Huang D, Li W. Adiabatic bulk modulus of elasticity for 2D liquid dusty plasmas. *Phys Plasmas*, 2018, 25: 057301
- Feng Y, Lin W, Li W, et al. Equations of state and diagrams of two-dimensional liquid dusty plasmas. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 093705
- Kalman G J, Hartmann P, Donkó Z, et al. Two-dimensional Yukawa liquids: Correlation and dynamics. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 065001
- Khrapak S, Morfill G. Basic processes in complex (dusty) plasmas: Charging, interactions, and ion drag force. *Contrib Plasma Phys*, 2009, 49: 148–168
- Cho J Y N, Kelley M C. Polar mesosphere summer radar echoes: Observations and current theories. *Rev Geophys*, 2010, 31: 243–265
- Havnes O, Kassa M, La Hoz C. Time evolution of artificial electron heating in polar mesosphere summer echo layers. *J Geophys Res*, 2007, 112:

2006JD007660

- 13 Rapp M, Hedin J, Strelnikova I, et al. Observations of positively charged nanoparticles in the nighttime polar mesosphere. [Geophys Res Lett](#), 2005, 32: 2005GL024676
- 14 He G, Zhan Y, Zhang J, et al. Characterization of the dynamic effects of the reentry plasma sheath on electromagnetic wave propagation. [IEEE Trans Plasma Sci](#), 2016, 44: 232–238
- 15 Lin T C, Sproul L K. Influence of reentry turbulent plasma fluctuation on EM wave propagation. [Comput Fluids](#), 2006, 35: 703–711
- 16 Binauld Q, Lamet J M, Tessé L, et al. Numerical simulation of radiation in high altitude solid propellant rocket plumes. [Acta Astronaut](#), 2019, 158: 351–360
- 17 Shi Y X, Ge D B, Wu J. Theoretical analysis of microwave attenuation constant of weakly ionized dusty plasma. *Chin J Geophys-Chin Ed*, 2007, 50: 1005–1010
- 18 Vasilyak L M, Polyakov D N, Fortov V E, et al. Parameters of the positive column of glow discharge with dust particles. [High Temp](#), 2011, 49: 623–628
- 19 Fedoseev A V, Sukhinin G I, Dosbolayev M K, et al. Dust-void formation in a dc glow discharge. [Phys Rev E](#), 2015, 92: 023106
- 20 Fedoseev A V, Salnikov M V, Demin N A, et al. Experimental and numerical study of a dust cloud formation in the stratified positive column of a dc glow discharge in helium. [Phys Plasmas](#), 2018, 25: 083710
- 21 Merlino R L, Meyer J K, Avinash K, et al. Coulomb fission of a dusty plasma. [Phys Plasmas](#), 2016, 23: 064506
- 22 Thomas H, Morfill G E, Demmel V, et al. Plasma crystal: Coulomb crystallization in a dusty plasma. [Phys Rev Lett](#), 1994, 73: 652–655
- 23 Fortov V E, Vaulina O S, Petrov O F, et al. Dynamics of macroparticles in a dusty plasma under microgravity conditions (First experiments on board the ISS). [J Exp Theor Phys](#), 2003, 96: 704–718
- 24 Nefedov A P, Vaulina O S, Petrov O F, et al. The dynamics of macroparticles in a direct current glow discharge plasma under microgravitation conditions. [J Exp Theor Phys](#), 2002, 95: 673–681
- 25 Petrov O F, Vaulina O S, Fortov V E, et al. Transport of microparticles in weakly ionized gas-discharge plasmas under microgravity. [Microgravity sci Technol](#), 2005, 16: 311–316
- 26 Pustynnik M Y, Pikalev A A, Zobnin A V, et al. Physical aspects of dust-plasma interactions. [Contrib Plasma Phys](#), 2021, 61: e202100126
- 27 Fortov V, Morfill G, Petrov O, et al. The project ‘Plasmakristall-4’ (PK-4)—a new stage in investigations of dusty plasmas under microgravity conditions: First results and future plans. [Plasma Phys Control Fusion](#), 2005, 47: B537–B549
- 28 Ratynskaia S, Khrapak S, Zobnin A, et al. Experimental determination of dust-particle charge in a discharge plasma at elevated pressures. [Phys Rev Lett](#), 2004, 93: 085001
- 29 Thoma M H, Mitic S, Usachev A, et al. Recent complex plasma experiments in a DC discharge. [IEEE Trans Plasma Sci](#), 2010, 38: 857–860
- 30 Thoma M H, Thomas H M, Knapek C A, et al. Complex plasma research under microgravity conditions. [npj Microgravity](#), 2023, 9: 13
- 31 Fink M A, Thoma M H, Morfill G E. PK-4 science activities in micro-gravity. [Microgravity Sci Technol](#), 2010, 23: 169–171
- 32 Sheridan T E, Theisen W L. Transition to chaos in a driven dusty plasma. [Phys Plasmas](#), 2010, 17: 013703
- 33 Sheridan T E. Center-of-mass and breathing oscillations in small complex plasma disks. [Phys Rev E](#), 2005, 72: 026405
- 34 He Y, Ai B, Dai C, et al. Experimental demonstration of a dusty plasma ratchet rectification and its reversal. [Phys Rev Lett](#), 2020, 124: 075001
- 35 Zhang S, Wang S, Yao T, et al. Height-modulating horizontal transport of dust particles in a dusty plasma ratchet. [Plasma Sources Sci Technol](#), 2024, 33: 055008
- 36 Horányi M, Hartquist T W, Havnes O, et al. Dusty plasma effects in Saturn’s magnetosphere. [Rev Geophys](#), 2004, 42: 2004RG000151
- 37 Pandey B P, Vladimirov S V. Dust modification of the plasma conductivity in the Earth’s mesosphere. [J Atmos Sol-Terrestrial Phys](#), 2018, 175: 24–30
- 38 Abdirakhmanov A R, Bastykova N K, Kodanova S K, et al. Rotation of dust particles in an inhomogeneous weak magnetic field in a DC glow discharge. [Phys Plasmas](#), 2021, 28: 074503
- 39 Fedoseev A V, Salnikov M V, Vasiliev M M, et al. Structural properties of a chain of dust particles in a field of external forces. [Phys Rev E](#), 2022, 106: 025204
- 40 Ulwick J C, Baker K D, Kelley M C, et al. Comparison of simultaneous mst radar and electron density probe measurements during state. *J Geophys Res: Atmospheres*, 1988, 93: 6989–7000
- 41 Tsyтович V N, de Angelis U. Kinetic theory of dusty plasmas. I. General approach. [Phys Plasmas](#), 1999, 6: 1093–1106

- 42 Bingham R, de Angelis U, Tsytovich V N, et al. Electromagnetic wave scattering in dusty plasmas. *Phys Fluids B-Plasma Phys*, 1991, 3: 811–817
- 43 Tsytovich V N. Note on scattering of electromagnetic waves by nonlinearly screened dust grains in plasmas. *Contrib Plasma Phys*, 2015, 55: 664–670
- 44 Tsytovich V N, de Angelis U, Bingham R. Low-frequency responses and wave dispersion in dusty plasmas. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 185003
- 45 Tsytovich V N, de Angelis U, Bingham R. Low frequency responses, waves and instabilities in dusty plasmas. *Phys Plasmas*, 2002, 9: 1079–1090
- 46 Tsytovich V N, Vladimirov S V, Morfill G E, et al. Theory of collision-dominated dust voids in plasmas. *Phys Rev E*, 2001, 63: 056609
- 47 Tsytovich V N, Gusein-zade N G. Nonlinear screening of dust grains and structurization of dusty plasma. *Plasma Phys Rep*, 2013, 39: 515–547
- 48 Fortov V E, Nefedov A P, Molotkov V I, et al. Dependence of the dust-particle charge on its size in a glow-discharge plasma. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 205002
- 49 Sukhinin G I, Fedoseev A V, Antipov S N, et al. Dust particle radial confinement in a dc glow discharge. *Phys Rev E*, 2013, 87: 013101
- 50 Li S, Rabadanov K M, Bogdanov E A, et al. Features of the EEDF formation in the dusty plasma of the positive column of a glow discharge. *Plasma Sources Sci Technol*, 2021, 30: 047001
- 51 Li S, Ding Z, Rabadanov K M, et al. Specificities of the nonlocal EDF formation in a dusty plasma with the different spatial distribution of the microparticle density. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2022, 50: 1653–1660
- 52 Ding Z, Yao J, Rabadanov K M, et al. Specificity of the EEDF formation in a dusty plasma with nonmonotonic profiles of charged particles and reversal ambipolar field. *Chin J Phys*, 2022, 77: 36–44
- 53 Ding Z, Kudryavtsev A A, Saifutdinov A I, et al. The influence of the ambipolar field on the levitation conditions of dust particles in the positive column of the glow discharge with a change the spatial orientation of the discharge tube. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2019, 47: 4391–4395
- 54 Ding Z, Yuan C, Zhou Z, et al. Ambipolar trap for dust particles in a V-shaped homogeneous positive column of glow discharge at low and medium pressures. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2021, 49: 997–1000
- 55 Shukla P K, Vladimirov S V. Stimulated scattering of electromagnetic waves in collisional dusty plasmas. *Phys Plasmas*, 1995, 2: 3179–3183
- 56 Shukla P K, Nosenko V Y, Shukla P K, et al. Experiments and theory of dusty plasmas. In: *The Proceedings of Plasmas: Basic and Interdisciplinary Research: Sixth International Conference on the Physics of Dusty Plasmas*. Melville, 2011. 1397: 11–23
- 57 Misra A P, Adhikary N C, Shukla P K. Ion-acoustic solitary waves and shocks in a collisional dusty negative-ion plasma. *Phys Rev E*, 2012, 86: 056406
- 58 Shukla P K. Twisted electrostatic ion-cyclotron waves in dusty plasmas. *Phys Rev E*, 2013, 87: 015101
- 59 Abdelsalam U M, Moslem W M, Khater A H, et al. Solitary and freak waves in a dusty plasma with negative ions. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 092305
- 60 Popel S I, Morfill G E, Shukla P K, et al. Waves in a dusty plasma over the illuminated part of the Moon. *J Plasma Phys*, 2013, 79: 1071–1074
- 61 Tolias P, Ratynskaia S. Scattering of radiation in collisionless dusty plasmas. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 043706
- 62 Vladimirov S V, Ishihara O. Electromagnetic wave band structure due to surface plasmon resonances in a complex plasma. *Phys Rev E*, 2016, 94: 013202
- 63 Chung P M, Talbot L, Touryan K J. *Electric Probes in Stationary and Flowing Plasmas*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1975
- 64 Allen J E. Probe theory—the orbital motion approach. *Phys Scr*, 1992, 45: 497–503
- 65 Laframboise J G. *Theory of Spherical and Cylindrical Langmuir Probes in a Collisionless, Maxwellian Plasma at Rest*. Toronto: University of Toronto, 1966
- 66 Delzanno G L, Tang X Z. Comparison of dust charging between orbital-motion-limited theory and particle-in-cell simulations. *Phys Plasmas*, 2015, 22: 113703
- 67 Tang X Z, Luca Delzanno G. Orbital-motion-limited theory of dust charging and plasma response. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 123708
- 68 Li S, Bogdanov D V, Kudryavtsev A A, et al. Influence of the spatial distribution of the dust particle density on the radial profile formation of particles and fluxes in a dusty plasma of DC glow discharge. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2020, 48: 375–387
- 69 Shukla P K, Mamun A A. *Introduction to Dusty Plasma Physics*. New York: CRC press, 2015
- 70 Vladimirov S V. *Physics and Applications of Complex Plasmas*. London: Imperial College Press, 2015
- 71 Li F, Li L L, Sui Q. Absorption effect of dust particles on electromagnetic wave in plasma (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2004, 34: 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. 中国科学: 技术科学, 2004, 34: 832–840]
- 72 Li J T, Guo L X, Hu H Q, et al. Study on electromagnetic scattering characteristics of space dusty plasma (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2010, 53: 2829–2835 [李江挺, 郭立新, 胡红桥, 等. 空间尘埃等离子体电磁散射特性研究. 地球物理学报, 2010, 53: 2829–2835]
- 73 Guo L, Wei C, Li J. Research on the scattering characteristics of electromagnetic waves in time-varying and weakly collisional and fully ionized dusty in plasma. *IET Microwaves Antenna Prop*, 2018, 12: 742–748
- 74 Guo L, Chen W, Li J, et al. Scattering characteristics of electromagnetic waves in time and space inhomogeneous weakly ionized dusty plasma sheath. *Phys Plasmas*, 2018, 25: 053707
- 75 Rashad A R M. Rocket exhaust scattering effects on incident microwave propagation characteristics. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 1966, AES-2: 425–429
- 76 Shi Y X, Ge D B, Wu J. Theoretical analysis of microwave attenuation constant of dusty plasma (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2007, 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. 地球物理学报, 2007, 4: 1005–1010]
- 77 Shi Y X, Wu J, Ge D B. The research on the dielectric tensor of weakly ionized dust plasma (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2009, 58: 5507–5512 [石雁祥, 吴健, 葛德彪. 弱电离尘埃等离子体的介电张量研究. 物理学报, 2009, 58: 5507–5512]
- 78 Vladimirov S V. Propagation of waves in dusty plasmas with variable charges on dust particles. *Phys Plasmas*, 1994, 1: 2762–2767
- 79 Jia J, Yuan C, Gao R, et al. Transmission characteristics of microwave in a glow-discharge dusty plasma. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 073705
- 80 Jia J, Yuan C, Gao R, et al. Propagation of electromagnetic waves in a weakly ionized dusty plasma. *J Phys D-Appl Phys*, 2015, 48: 465201
- 81 Jia J, Yuan C, Liu S, et al. Propagation of electromagnetic waves in a weak collisional and fully ionized dusty plasma. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 043302
- 82 Jia J, Yuan C, Kudryavtsev A A, et al. Numerical and experimental diagnostics of dusty plasma in a coaxial gridded hollow cathode discharge. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2016, 44: 2973–2978
- 83 Li H, Wu J, Zhou Z X, et al. The dielectric function of weakly ionized dusty plasmas. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 073301
- 84 Li H, Wu J, Zhou Z, et al. Propagation of electromagnetic wave in dusty plasma and the influence of dust size distribution. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 073702
- 85 Hong Y, Yuan C, Jia J, et al. Propagation characteristics of microwaves in dusty plasmas with multi-collisions. *Plasma Sci Technol*, 2017, 19: 055301
- 86 Li L Q, Shi Y X, Wang F, et al. SO-FDTD method of analyzing the reflection and transmission coefficient of weakly ionized dusty plasma layer (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2012, 61: 125201 [李林茜, 石雁祥, 王飞, 等. 弱电离尘埃等离子体层反射与透射的SO-FDTD方法分析. 物理学报, 2012, 61: 125201]
- 87 Prudskikh V V, Shchekinov Y A. Electromagnetic waves in a polydisperse dusty plasma. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 102106
- 88 Senol A J, Romine G L. Three-dimensional refraction/diffraction of electromagnetic waves through rocket exhaust plumes. *J Spacecraft Rockets*, 1986, 23: 39–46
- 89 Li D, Guo L X, Li J T. Propagation characteristics of electromagnetic waves in dusty plasma with full ionization. *Phys Plasmas*, 2018, 25: 013707
- 90 Kim Y J, Jung K Y. Accurate and efficient finite-difference time-domain formulation of dusty plasma. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2021, 69: 6600–6606
- 91 Kim Y J, Cho J, Jung K Y. Efficient finite-difference time-domain modeling of time-varying dusty plasma. *J Electromagn Eng Sci*, 2022, 22: 502–508
- 92 Zhang L, Wu Y, Wan X, et al. Application of the scattering matrix method for investigating the propagation characteristics of terahertz waves in magnetized dusty plasma. *Phys Plasmas*, 2023, 30: 013703
- 93 Zhang Y, Li S, Yang Z, et al. A coplanar waveguide-fed flexible antenna for ultra-wideband applications. *Int J RF Microw Comput Aided Eng*, 2020, 30
- 94 Guo L, Guo L, Gan L. Influence of dusty plasma on antenna radiation. *Phys Plasmas*, 2021, 28: 083701
- 95 Mao P R, Gao C G, Xu B, et al. Radiation characteristics of antenna in weakly ionized dusty plasma environment (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2023, 38: 1057–1063 [毛鹏荣, 郜参观, 徐彬, 等. 弱电离尘埃等离子体环境下天线辐射特性研究. 电波科学学报, 2023, 38: 1057–1063]
- 96 Chen C, Wang Y, Chu Z, et al. Excitation and manipulation of toroidal dipole response in an antenna. *Phys Scr*, 2024, 99: 105560
- 97 Rapp M, Lübken F J. Polar mesosphere summer echoes (PMSE): Review of observations and current understanding. *Atmos Chem Phys*, 2004,

- 4: 2601–2633
- 98 Bernhardt P A, Ballenthin J O, Baumgardner J L, et al. Ground and space-based measurement of rocket engine burns in the ionosphere. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2012, 40: 1267–1286
- 99 Scales W A, Mahmoudian A. Charged dust phenomena in the near-Earth space environment. *Rep Prog Phys*, 2016, 79: 106802
- 100 Kinefuchi K, Funaki I, Abe T. Frequency-dependent FDTD simulation of the interaction of microwaves with rocket-plume. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2010, 58: 3282–3288
- 101 Kinefuchi K, Funaki I, Shimada T, et al. Experimental investigation on microwave interference in full-scale solid rocket exhaust. *J Spacecraft Rockets*, 2010, 47: 627–633
- 102 Gillman E D, Williams J, Compton C S, et al. Microparticle injection effects on microwave transmission through an overly dense plasma layer. *Phys Plasmas*, 2015, 22: 043706
- 103 Xia H, Wang Y, Yuan C, et al. Measurement of microwave propagation in weakly ionized dusty plasma. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2019, 47: 109–112

Study on electromagnetic properties of dusty plasma

CHEN Chen¹, YAO Jingfeng^{1,2,3}, LI Hui⁴, WU Jian⁴ & YUAN Chengxun^{1,2,3*}

¹ School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

² Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Plasma Physics and Application Technology, Harbin 150001, China

³ Heilongjiang Provincial Innovation Research Center for Plasma Physics and Application Technology, Harbin 150001, China

⁴ China Research Institute of Radio Waves Propagation, Beijing 100000, China

*Corresponding author (email: yuancx@hit.edu.cn)

In the practical application of plasma, dusty plasma has been increasingly recognized in various research fields such as astrophysics, space communication, aerospace, and industrial production. Significant phenomena associated with dusty plasma include aircraft reentry processes, communication interference due to microwave abnormal attenuation in rocket tail flames, and summertime anomalies in ionospheric echo signals. Dusty plasma is characterized by micro or nano-sized particles suspended within a plasma medium. These particles interact with other charged particles in the plasma, exhibiting unique electromagnetic properties across different physical environments. This paper provides an overview of the historical trajectory of dusty plasma research, its current research directions, fundamental electromagnetic attributes, and interaction mechanisms with electromagnetic waves. It also highlights challenges faced in both theoretical and experimental analyses, particularly the imprecision in theoretical calculations for inhomogeneous dusty plasma, inconsistencies between theoretical and experimental outcomes under specific conditions, and the complexities associated with conducting experiments on dusty plasma-electromagnetic wave interactions in particular settings. The paper concludes by offering insights into potential future trajectories for dusty plasma research, focusing on its interactions with electromagnetic waves.

dusty plasma, electromagnetic properties, electromagnetic waves

PACS: 52.27.Lw, 13.40.-f, 52.35.Hr

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0378](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0378)