



# 航天技术中的等离子体

曹金祥 刘万东

(中国科学技术大学等离子体物理实验室 合肥 230026)

等离子体是继固体、液体、气体之后物质的第四种形态。在这种物态中,存在一定数量的自由带电粒子,带电粒子间以及它们与电磁场的长程电磁相互作用使得等离子体有别于其他物质形态。等离子体的最常见形式是电离气体,能使气体电离的机制则是多种多样的。当气体被加热到数千度时,气体中分子间的碰撞使得其中部分分子(或原子)电离,电离度随温度的升高而迅速增大,这种电离称之为热电离或热平衡电离。通过电子、光、放射性射线和电磁场对气体作用也可以使气体产生部分电离,这种情况下等离子体中的各种粒子之间通常不能达到热平衡,属于非热平衡电离。航天技术中许多问题涉及等离子体物理和技术领域,从地球的大气层向外,宇宙空间基本处于等离子体状态,航天飞行器的飞行环境是等离子体环境;飞行器在稠密的大气层中与空气“摩擦”飞行会形成等离子体;推进器等高技术更离不开等离子体技术。一定程度上我们可以说,不发展等离子体物理和技术,航天技术的发展必将受到严重的制约。

**空间飞行器的等离子体环境** 空间飞行器的飞行环境大多处于大气层外,绕地球飞行的飞行器通常处于电离层中。电离层是来自太阳辐射和宇宙射线与高空的稀薄气体作用而产生的低密度等离子体,人造卫星、飞船在这种低密度等离子体中飞行,等离子体产生的电磁阻力会对其飞行姿态和速度产生显著影响。尤其是当飞行器进入空间尘埃等离子体区时,不但带电尘埃颗粒会形成对其表面产生侵蚀,而且带电粒子的注入还可引起飞行器表面电荷的积累

而产生静电放电,直接威胁到飞行器的安全以及内部仪器的正常工作。地球的磁场、太阳风等会影响电离层的等离子体状态,空间飞行器的安全、寿命则制约于等离子体环境。太阳的亚爆引起的高温等离子体和带电尘埃是造成航天器异常工作的重要原因之一。要使飞行器在大气层外正常工作,除飞行器本身的结构和性能具有特殊设计外,关键还要了解飞行器与空间辐射和等离子体相互作用机制以及所伴随的问题。

**飞行器的等离子体鞘套** 当飞行器重返(再入)地球大气层时,其速度可达到甚至超过陨星坠落的速度(约20马赫数,即为声速的20倍)。飞行器周围的空气被剧烈地压缩,其头部所受到的压强可达100多个大气压。当飞行器速度锐减后,大部分动能转化为热能,使飞行器周围空气的温度迅猛增加(可达几千度),从而使气体发生电离并在飞行器周围形成等离子体。此时的等离子体就像一个“鞘套”一样包着飞行器作再入飞行,这个“鞘套”通常称之为等离子体鞘套。它的存在除直接影响到飞行器的气动加热效应的热传导特性外,更重要的是还可能造成飞行器与地面的通讯被严重干扰甚至中断,形成所谓的“通讯黑障”现象。等离子体存在一个与密度相关的特征等离子体频率,当电磁波频率高于它时可以通过等离子体,而低于它时则被等离子体反射。例如当飞行器天线窗口处的等离子体密度为 $10^{-18}\text{m}^{-3}$ 时,可以屏蔽频率小于10GHz的电磁波,也就是说,若飞行器与地面间的通讯频率低于10GHz,就会使飞行器(比如导弹弹头)上的遥测系统、引信控制系统以及通讯系统等信号全部中断,将严重影响导引和对目标的命中精度。

**飞行器的等离子体尾迹** 再入飞行器的等离子体鞘套在沿流场方向流到飞行器尾部后,就会形成类似于流星状的长尾巴的“等离子体尾迹”,其长度可达2—3千米,其中等离子体密度可达 $10^{-17}\text{m}^{-3}$ . 等离子体尾迹相对于雷达频段的电磁波是一种较强的反射体,可使雷达的反射截面成倍增加,如洲际导弹弹体的雷达反射截面约为100平方米,但其等离子体尾迹的雷达有效反射截面则有几百至几千平方米. 同时,等离子体尾迹也是一个强辐射源,它的存在为雷达和红外探测系统的跟踪、识别提供了一个重要的信息,它可使超视距雷达的探测距离增大2—3倍,大大提高了防空预警系统监视空中来袭导弹的能力. 从攻击方的角度来说,等离子体尾迹的存在使导弹的突防成功率大大降低. 根据等离子体尾迹的特点,西方军事强国为加强本国空间飞行器的防御和进攻能力,一方面采用等离子体技术降低飞行器等离子体鞘套和尾迹的等离子体密度以缩小其雷达反射截面,减小辐射强度来保护自己,另一方面利用等离子体来模拟空间飞行器,将它做成强微波、红外、紫外辐射源,作为诱饵吸引对方攻击力量以达到以假乱真保护自己的目的.

**等离子体推进器** 航天器或卫星在飞行中的加速、减速、变向操作,需要辅助推进器来完成. 我们知道,推进器产生的冲量(推力)等于排出物质的质量和速度之积,高的喷出速度是高效推进器的关键所在. 带电、高温的等离子体一方面可以将热运动能量部分转化成定向运动能量,另一方面可以容易地通过电磁场作用获得加速,所以辅助推进器通常采用等离子体发动机. 空间等离子体推进器可分为等离子体喷注,等离子体电磁加速、脉冲放电加速等类型. 用于航天器轨道的提升和南北位置保持的通常用电弧等离子体加热喷气型发动机,它采用直流放电产生高温等离子体电弧,在热压力和自感磁场产生的电磁力作用下等离子体被加速喷出. 等离子体发动机可以脉冲工作且元冲量可以做得很小,能够在恒定的脉冲下线性地调节推力,因此它可以用于空间飞行器的精确定点和控制. 寻找高效

推进器的工作物质增加等离子体的密度、提高工作效率和减轻推进器重量,一直是物理和工程工作者致力于研究的问题.

**空间飞行的地面模拟及等离子体理论** 早期的航天试验中,飞行器生存能力很弱,人们为此付出了沉重的代价,其中一个重要原因是人们未能充分了解与飞行器相关的等离子体特性. 现在地面等离子体模拟已经是航天飞行器研制过程中的一个重要手段. 人们利用各种放电技术产生等离子体,建立了不同类型的地面等离子体模拟实验. 用形态各异的高温、高焓和高马赫数的等离子体风洞模拟再入大气层的飞行器环境;利用直流或射频辉光放电技术建立大空间等离子体实验室,模拟大气层外空间环境的各种电磁、电离以及等离子体环境系统;采用光、电、热和力等现代测试手段探索各种极端条件下飞行器的生存能力和条件. 这些地面模拟极大加深了人们对航天领域等离子体问题的了解,同时理论和计算机模拟也是一个重要的手段.

航天技术中所遇到的等离子体属于低温等离子体,粒子之间的碰撞起主导作用,除了导电以外它和普通气体有许多相似之处,通常理论上可以用传统的流体力学加上经典的电磁场理论为框架的磁流体力学方程组对它作描述和处理. 由于等离子体中通常有多种成分,而各成分间往往不能达到热力学平衡,许多情况下需要采用双流体(电子、离子)或多流体模型. 用统计力学的方法来描述等离子体的理论称为等离子体动力理论,是一种精确处理等离子体问题的方法,但总是需要适当的约化才能应用于实际问题之中.

