

等离子体隐身技术在航空领域的应用探索*

刘海涛 刘汝兵

(福建省等离子体和磁共振重点实验室、厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 阐述了研究等离子体隐身技术的重要意义和等离子体的基本概念以及等离子体隐身的基本原理和优点, 并介绍了国内外等离子体隐身技术在飞行器军事科技方面的研究现状和前景展望。

关键词: 等离子体; 隐身技术; 飞机; 电磁波

中图分类号: V218 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4801(2011)03-042-05

隐身技术又称为目标特征信号控制技术, 是指综合利用各种反探测手段降低己方目标的电磁、声、热、视觉等信号特征, 使之难以被发现、识别、跟踪和打击的低可探测性技术的统称。根据探测器种类的不同, 隐身技术可分为雷达隐身、红外隐身、声隐身和视频隐身等^[1]。

在现代及未来战争中, 由于雷达具有探测距离远、抗干扰能力强、全天候等特点, 仍将是探测目标的最主要手段。因此隐身技术的研究是以雷达特征信号控制为重点, 雷达隐身是隐身领域最活跃、也是研究最多的隐身方法。

雷达隐身技术的核心是减少雷达散射截面(RCS), 也就是降低目标对雷达信号的反射。RCS越小, 被雷达探测到的距离越近, 目标的生存能力就越高。目前实现雷达隐身技术的手段主要有外形隐身技术、材料隐身技术、等离子体技术、对消技术、微波传播技术等。

传统的隐身技术大多以改变飞机的几何外形和降低气动性能为代价, 大量采用独特的多面体外形(如F117)严重影响了飞机的气动性能, 飞机表面涂敷的吸波材料不仅维护复杂、价格昂贵, 而且增加了飞机的自身重量。

等离子体隐身技术是指利用等离子体规避雷达探测系统的一种新型有源隐身技术, 与外形隐身、材料隐身和结构隐身等传统的隐身技术相比, 等离子体隐身技术具有许多独特的优势, 是21世纪隐身技术的重要发展方向。

在当今军事科技迅猛发展的时代, 以牺牲飞机的气动性能为代价来降低雷达散射截面(RCS)的传统隐身技术正面临挑战。等离子体雷达隐身理论和技术的日益成熟引起了国内外的广泛关注和高度重视, 西方军事强国竞相开展等离子体隐身技术的应用研究, 离子体隐身技术正成为一个

热门的研究课题, 已逐步从实验室走向实用化。

1 等离子体概述

1.1 等离子体的基本概念

当任何不带电的普通气体在受到外界的高能激励作用(如对气体施加高能粒子轰击、强激光或 α 射线照射、气体放电、热致电离等方法)后, 部分原子中的电子会脱离原子核束缚成为自由电子, 原子因失去电子而成为带正电的离子, 这样原来的中性气体就因电离而转变成由大量自由电子、正离子和部分中性原子组成的宏观仍呈电中性的电离气体, 这类气体称为等离子体^[2]。它是继固态、液态和气态三种形态之外的又一种物质凝聚态, 又称为物质的第四态或等离子态。

等离子体广泛存在于宇宙空间, 从电离层到宇宙深处物质几乎都是电离状态, 宇宙空间可见物质中99%是等离子体。地球表面几乎没有自然存在的等离子体, 只存在于闪电和实验室中气体放电等情形下。

1.2 等离子体的特性

等离子体是由电子、离子等带电粒子以及中性粒子(原子、分子、微粒等)组成的尺度大于德拜长度的宏观中性电离气体, 其运动主要受电磁力的支配, 并表现出显著的集体行为。尽管等离子体在整体上呈电中性, 却具有了很好的导电性, 在电磁性能上完全不同于普通气体。普通气体中如有0.1%的气体被电离, 这种气体就具有很好的等离子体特性, 如果电离气体增加到1%, 这样的等离子体便成为导电率很大的理想导体。

1.3 等离子体的分类

等离子体按热力学平衡可以分为3类:

(1) 完全热力学平衡等离子体。也称为高温等离子体, 是完全电离的核聚变等离子体, 温度

*基金项目: 福建省自然科学基金(1010014)

作者简介: 刘海涛(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 等离子体放电特性研究。

高达 10^8K 数量级。此类等离子体中电子温度、离子温度、气体温度完全一致。

(2) 局部热力学平衡等离子体。也称为热等离子体, 热力学温度为 $10^3\sim 10^5\text{K}$ 。由于等离子体中各物质通常很难达到严格的热力学一致性, 当其电子、离子和中性粒子温度局部达到热力学一致性时, 称之为局部热力学平衡等离子体。

(3) 非热力学平衡等离子体。也称为冷等离子体, 其电子温度为 $3\times 10^2\sim 10^5\text{K}$, 此类等离子体内部电子温度很高, 可达上万开尔文, 而离子及气体温度接近常温, 从而形成热力学上的非平衡性。

2 等离子体隐身技术的基本原理

等离子体隐身技术是指利用等离子体回避雷达探测系统的一种技术, 与常规隐身技术完全不同, 这种隐身技术不需要改变飞行器的外形结构便可大幅度降低飞行器的 RCS 值。利用等离子体发生器、发生片或放射性元素在飞行器的表面形成一层等离子云, 通过控制等离子体的能量、电离度、振荡频率等特征参数, 使照射到等离子云上的雷达波一部分被吸收, 一部分改变传播方向, 这样一方面可以减少飞行器的雷达散射截面 (RCS), 另一方面可以通过改变反射信号的频率, 使雷达难以探测, 以达到隐身目的。此外还可以通过改变反射信号的频率, 使敌方雷达测出错误的飞行器的位置和速度数据, 获得虚假信号, 以实现信息欺骗, 从而达到隐身的目的。

等离子体隐身技术的机理有很多, 最常见的是折射隐身和吸收隐身。

2.1 折射隐身

通过非均匀等离子体对入射电磁波的折射使电磁波传播轨迹发生弯曲, 雷达回波偏离敌方雷达的接受方向, 从而使目标难以被敌方雷达发现。不均匀非磁化等离子体中电磁波的传播主要取决于等离子体的折射率, 考虑电磁波在等离子体中传播时可以忽略等离子体碰撞, 此时其折射率 n 可近似表示为:

$$n = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)^{1/2} = \left(1 - \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e \omega^2}\right)^{1/2}$$

式中, ω 为电磁波角频率; ω_p 是等离子体频率; n_e 是等离子体自由电子密度; e 是单位电子电量 ($e = -1.60\times 10^{-19}\text{C}$); m_e 是单位电子质量 (m_e

$=9.11\times 10^{-31}\text{kg}$); ϵ_0 是真空中介电常数, $\epsilon_0 = 8.854\times 10^{-12}\text{F/m}$ 。

由于等离子体的折射率与等离子体自由电子密度有关, 通过控制等离子体密度分布, 使入射到等离子体内部的雷达电磁波向外发生弯曲, 减小目标与雷达的相互作用, 即可实现对雷达波的折射隐身^[3]。

2.2 吸收隐身

等离子体能以电磁波反射体的形式对雷达进行电子干扰, 同时对入射到等离子体内部的电磁波通过碰撞吸收其大部分的能量。等离子体能够吸收或反射入射的电磁波, 等离子体对电磁波的吸收作用与等离子体频率密切相关。当电磁波频率高于等离子体频率时, 电磁波能进入等离子体内部, 相当大部分将被等离子体吸收。当电磁波频率低于等离子体频率时, 电磁波不能在等离子体中传播, 电磁波将被等离子体完全反射。当入射电磁波的频率等于等离子体频率时, 等离子体对电磁波的衰减主要是共振吸收, 此时电磁波的衰减很大。

等离子体对电磁波的吸收机理可分为正常吸收和反常吸收, 最主要的是正常吸收。正常吸收是指电磁波的电场使等离子体中电子加速获得动量, 电子再通过与其他粒子的有效碰撞, 把这种能量转换为粒子无规则运动的能量, 即电子对电磁波的碰撞吸收。反常吸收指电磁波与离子体集体相互作用, 在等离子体中形成等离子体波动, 从而导致雷达波的吸收或部分吸收, 达到对雷达波的隐身效果。

等离子体吸收电磁波受许多因素影响, 如等离子体层的厚度、能量等, 等离子体密度是等离子体吸收电磁波的又一重要参数。在等离子体临界密度附近和以下的区域内对入射的电磁波均有隐身作用, 而临界密度又与入射电磁波波长的平方成反比。因此, 只要等离子体密度分布适当, 就可能在很宽的频率范围内对电磁波有隐身作用。

此外, 等离子体的隐身机理还有很多。例如, 等离子体中的波与入射电磁波相互作用产生其他频率的电磁波、等离子体中粒子与电磁波的相互作用、等离子体的共振吸收、时变等离子体隐身、磁化等离子体隐身等。

2.3 隐身等离子体的产生

目前产生隐身等离子体的方法主要有两种:

一种是利用等离子体发生器产生等离子体,即在低温下,通过电源以高频高压形式提供的高能量产生间隙放电、沿面放电等形式,将气体介质激活、电离形成等离子体;

另一种是在飞行器的特定部位如强雷达散射区,涂一层放射性同位素,它的辐射剂量应确保它的 α 射线在电离空气时所产生的等离子体云具有足够的电子密度和厚度,以确保对雷达电磁波具有足够的吸收和散射能力。

与前者相比,后者维护困难且电子密度和厚度难以保证,并且对机场地勤人员健康有较大影响。

2.4 等离子体隐身的实现

等离子体可以采用外部开放式或密闭腔式布置来实现飞行器的隐身。

外部开放式布置是将等离子体发生器布置于飞机的强反射部位,如机翼前缘、发动机进气口等位置,使产生的等离子体云覆盖强反射部位。该方法在飞机低速飞行时效果较好,高速时等离子体云会被迎面气流吹散,流场难以维持稳定,很难在飞机强反射部位形成大面积均匀等离子体包层。

密闭腔式等离子体隐身技术是将目标的强反射区的单层蒙皮改作双层结构,最外层采用玻璃钢等高强度透波材料制造,等离子体产生于双层蒙皮之间,将重点部位屏蔽,从而减小目标的雷达散射截面。腔体里面可以灌注氩气或氦气等易电离气体,可以显著降低等离子体电源的能耗。

相对开放式设备,这种密闭腔式结构具有很多优点:解决了等离子体表面分布不均的难题;不会对己方形成屏蔽和干扰;在真空和低空环境中,产生和维持等离子体变得简单;减小了等离子体对人员与装备的利影响;显著降低了等离子体电源的能耗;克服了外置等离子体辐射可见光的问题。

当然,采用闭式等离子体技术也产生了一些新问题,如增加了载体的体积、重量、加大了飞机的能耗、也增加了飞机的设计复杂度等。相信随着技术的不断进步,这些问题会逐步解决。

3 等离子体隐身技术的优点

等离子体的隐身特性是其它隐身方法所不及的,只要等离子体包层参数适当,大部分电磁波

会被等离子体吸收。未被等离子体吸收的电磁波会绕过等离子体或者产生折射而改变传播方向,因而返回到雷达接收机的电磁能量就很小,使雷达难以发现隐藏在等离子云中的飞行器而实现隐身。相对于其他常规隐身技术,等离子体隐身技术具有以下优点:

- (1) 吸波频带宽,吸收率高,隐身性能好。等离子体不仅可吸收微波,还能吸收红外辐射;
- (2) 使用简便、性价比高,使用时间长。由于没有吸波材料涂层,大大降低了维护费用;
- (3) 无需改变飞机的气动外形,不影响飞机的飞行性能,外部开放式布置时还可大大降低飞行阻力。俄罗斯的风洞实验表明,利用等离子体隐身技术同时可降低飞行阻力30%以上;
- (4) 对飞机外形没有特殊要求,可以把不具备隐身性能的现有飞机改装成隐身飞机;
- (5) 由于等离子体是宏观呈电中性的优良导体,极易用电磁的办法加以控制,只要控制得当,还可以扰乱敌方雷达波的编码,使敌方雷达系统测出错误的飞行器位置和速度数据以实现隐身;
- (6) 等离子体包层能很快地产生和消逝,只需突防的时候开启等离子体激励器,消耗的能量比较少,不会对己方形成屏蔽和干扰。

4 国内外研究现状

等离子隐身技术目前在理论和试验上已经获得成功,如果在工程上大规模应用,将对未来空战产生革命性的影响。自上世纪八十年代起,美国、前苏联等军事强国投入巨资对等离子体性能(特别是隐身方面)进行大量研究,并于九十年代开始投入实用。目前,俄、美两国在等离子体隐身方面取得了突破性的进展,英、日、德、法等国也投巨资加紧了对等离子体隐身技术的研究。

最近,澳大利亚国立大学研制了一种等离子体无线电隐身天线。该天线外观像长方形日光灯管,管内密封有惰性气体,管状外壳采用耐冲击性玻璃,底部装有一个金属电极。与常规天线相比,省去了大部分金属材料。该天线最大的特点是当不用或需要隐蔽时,只要将天线基部的金属电极关闭,被电离的惰性气体就会立刻恢复正常状态,使敌方的雷达难以发现。

法国航空航天研究院采用等离子体平面天线替代传统的平板式和抛物面天线,研制成功了全

隐身的等离子体雷达天线，该天线的分辨率及性能优于常规天线。目前，其最佳工作频率范围8~15 GHz，还可扩展至更宽的频段。在分米波上可扩展至更长波长，在毫米波上可扩展至100 GHz。法国海军将该等离子体天线用于防御超声速反舰导弹，天线结构紧凑，发射和接收距离约为300 km。法国达索飞机公司正在进行等离子体技术对飞机隐身特性的影响的研究，其目前关注的是尾喷管装置的隐身^[4]。

在等离子体隐身技术的研究方面，俄罗斯走在世界前列。俄罗斯斯克尔德什研究中心已开发出等离子体隐身系统，并在飞机上试验成功。他们的等离子体隐身系统可减弱敌方雷达反射信号；第二代系统不仅能减弱敌方雷达反射信号，还能改变反射信号的频率，甚至发出假信号，使敌方雷达测出错误的飞机位置和速度数据；依据新的物理原理，现正在研制的第三代等离子体隐身系统可能是利用飞行器周围的静电能量来减小雷达散射截面积。

据俄罗斯的最新试验表明：应用第三代等离子体隐身技术，在4~14 GHz频率范围内可以使米格飞机的RCS值减少到原来的1%，显著缩短了飞机被雷达发现的距离。这与美国F-117隐形战斗机和B-2隐形轰炸机在雷达上反映出的效果大致相同，但性价比更高，且没有刻意去改变飞机的气动性能。

美国在等离子体隐身技术研究领域处于世界领先水平，已成功研制出等离子体隐身天线等设备。美国海军正在开发一种称为“快镜”(AgileMirror)的等离子体雷达，该型雷达是利用电离等离子体的超导特性来反射雷达波束。等离子体雷达可在十亿分之一秒内重新定向，改变所监视的目标，而传统雷达约需1~10 s，极大的缩短了发现目标的时间。该雷达体积小、功率大，且不必安装传统雷达的抛物面天线，它能以几乎无限快的速度跟踪来袭的导弹等目标，并可进一步提高雷达和舰艇的隐身性^[5]。

另外，据美国《航空周刊与航天技术》2006年3月报道，美国海空军已研制成功AGM-158A型隐身(等离子体、材料和结构隐身)远程导弹(Jassm)，价值54.4万美元，具有很好的隐身突防作战效能。

我国尽管对隐身飞机的复合电磁吸收材料及表面涂层等方面有一定的研究，但对等离子体隐

身技术的研究却还处于起步阶段。国防科技大学电子科学与工程学院庄钊文、袁乃昌等人进行了电磁散射与等离子体隐身方面的工作，并取得了较好的效果。西北工业大学杨涓等人进行了磁化等离子体对电磁波反射系数的计算分析和真空环境中等离子体喷流对反射电磁波衰减及跨大气层飞行器等离子体隐身技术等方面的实验研究。航天14所也开展了微波等离子体天线罩隐身原理方面的研究。

5 应用前景展望

虽然等离子体隐身技术已经取得了初步进展，但是等离子体隐身技术也面临着相当多的问题。等离子体对雷达波的吸收能力在不同条件下相差非常大，与多方面的因素有关，如等离子体的密度、碰撞频率、厚度等，入射电磁波频率、电磁波入射角和极化方向等，如何在应用中实现最佳参数并随外界条件进行调节，还需进一步深入研究。

等离子体隐身技术是一项十分复杂的系统工程，涉及到大气等离子体技术、高电压技术、电磁理论与工程、空气动力学、机械与电气工程等学科等，具有很强的学科交叉性。存在的主要问题是：所需电源功率较高，设备庞大和等离子体浓度偏低。目前等离子体发生器一般采用气体放电法产生非热力学平衡冷等离子体，这类发生器很大的重量、体积和功耗是阻碍等离子体隐身技术实用化的主要问题。因为等离子体隐身所需要的电子密度和振荡频率较高，若要覆盖Ku波段以前的所有雷达电磁波，所需要的等离子体电子密度为 $4 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 量级，相应的电子与中性粒子的碰撞频率为50~200 GHz——这比当前工业上使用的发生器能力高出1~2个量级。

因此，在满足对等离子体包层厚度的要求下，必须降低等离子体发生器的电源功耗和减小设备体积，同时提高等离子体的电子密度。如何设计一种能够适应于各种飞行系统平台、并且易于控制的等离子体发生器，是一个亟需关注的问题。要重点研究等离子体流产生技术、可控调节技术，减小等离子体发生器体积和产生单位等离子体的功率功耗。

此外，对于外置开放式等离子体，飞行速度对等离子体复合速率和均匀性的影响很大。飞机上安装等离子体发生器的部位本身无法雷达隐

