

# 隐身技术与隐身材料

胡国有 陈 强 胡志翔

(南京大学化学系 210008)

**摘要** 本文介绍了隐身技术的军事作用、隐形因素、材料的吸波原理、应用及其展望。

## 一、引言

当人们谈论1991年初春海湾战争中的先进武器时,都免不了要提到隐身战斗机F-117A。隐身飞机的英文名称是stealthy aircraft,也可译成隐形飞机。设计者的主导思想是力图降低飞机在航行过程中的目标特性,以提高它的突防能力和攻击能力。隐身技术、星球大战和核技术被美国列为国防的三大高科技领域。

飞机隐身有六大要素:雷达、红外、视觉、噪音、烟雾、凝迹。早期的隐形措施是:1. 使发动机排气更干净,烟道气更淡; 2. 蒙皮染成灰色,提高视觉隐形; 3. 提高升限和飞行速度。但这些还不是真正的隐身飞机。F-117A是第一种真正的隐身战斗机。其隐身的具体措施是: 1. 设计成独特的气动外形。当入射的无线电波远小于飞机尺寸时,根据几何光学原理,可以看成独立反射的集合,并尽量使反射信号相互干涉。2. 为防止进气道、发动机、压气机反射雷达波,两侧设有条形隐蔽网状格栅栅条,能屏蔽10 cm或更长的雷达波。 3. 采用能够吸收雷达波的复合材料和吸波涂料。 4. 采用有源或无源电子干扰。 5. 在红外隐身方面,主要是降低飞机的红外辐射,其具体措施是降低发动机的喷口排气温度和采用屏蔽技术。

从以上几项措施可以看到:1. 隐身技术主要是指降低飞机的雷达反射截面积和红外特征。 2. 隐身技术是一种综合技术。在进行雷达波隐身技术研究中,最重要的是改进飞行器的气动外形设计,其次是吸波材料的选用。 3. 隐身技术是一种探测对抗技术。在一切军事行动中,交战双方的行为都具有很大的保密性、多样性。不同的隐身技术都是针对现有探测技术而发展起来的,这是隐身和反隐身技术发展的动力源泉。

隐身飞机是80年代崛起的新型武器系统。除隐身飞机已投入使用,其它隐形武器和装备正在积极研制中。研究和发展隐身和反隐身技术,对于未来的反侵略战争具有重大意义。

## 二、微波干涉、吸收隐身原理

雷达,原义为无线电侦察和定位。一般系指利用无线电波发现目标并测定目标位置的装备。其组成部分主要有发射机、无线电接收机和显示器等。发射机产生高频脉冲,由天线集束成无线电波束,按一定方向连续或间歇地向空间发射。通常,天线不断旋转,波束碰到目标物,其中一小部分反射回来,被原天线接收,经接收机检波、放大后,目标物的方向、高度、距离或景象等在显示器上显示出来。表1列出了各种无线电波的波长范围和主要用途。

由表1可知,雷达波的频率高、波长短。所以称雷达探测为微波探测。

表 1 各种无线电波波长与主要用途

名称	长波	中波	中短波	短波	超短波	分米波	厘米波	毫米波
波长	30000~3000 米	3000~200 米	200~50 米	50~10 米	10~1 米	1~0.1 米	10~1 厘米	10~1 毫米
频率	10~100 kHz	100~1500kHz	1.5~6 MHz	6~30 MHz	30~300 MHz	300~3000 MHz	3~30 GHz	30~300 GHz
主要用途	越洋长距离通讯和导航	无线电广播	电报通讯	无线电广播和电报通讯	调频无线电广播、电视广播、无线电导航	电视、雷达、无线电导航		

微波具有类似于光波的特性,它是直线传播的,因此特别适合于无线电定位即雷达技术的需要。因为雷达为了正确测定目标位置,就必须发射窄波束,而天线的波束宽度正比于工作波长( $\lambda$ )和天线口径( $D$ )之比,同时,为了能发现目标,要求有强的目标反射,而回波强度将取决于目标尺寸( $L$ )与工作波长( $\lambda$ )之比。因此只有采用微波才能很好满足雷达技术的要求。可以设想,如果目标物采用了散射、干涉等隐身技术处理,使反射截面积减小三个数量级,则能使接收讯号衰减 30 分贝(db)。

电磁波具有一定能量。根据光子理论,每个光子能量大小与波长有关,表达式如下:

$$E = h\nu = h \frac{C}{\lambda} \quad (1)$$

式中,  $E$ :普朗克常数,  $E = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $\nu$ :电磁波的辐射频率,  $C$ :真空中电磁波传播速度  $C = 2.998 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\lambda$ :电磁波波长

由此我们可以算得,波长 1 mm—10 cm 的微波(频率 300—3 GHz),其单个光量子的能量为  $1.24 \times 10^{-3} - 1.24 \times 10^{-5} \text{ eV}$ (或 120—1.2 J/mol)

具有一定能量的电磁波,当其进入吸波材料内部时,推动组成材料分子内的离子、电子运动或电子能级间跃迁而被吸收。

### 三、 聚合物吸波材料吸波原理

目前研制和应用的吸波材料主要有两类:一类是介质吸波材料,其制造方法是在高分子介质中添加电损耗性物质,如碳纤维、导电炭黑、碳化硅等,依靠电抗损耗入射能量;另一类是电磁性吸收材料,系通过添加铁氧体等磁性物质到基体中,依靠电磁损耗入射能量。

对于介质吸波材料来说,其介质损耗来自物质的极化效应,与材料的电阻率有关;实验证明:1. 当材料的电导率  $\sigma < 10^{-4} \text{ s/cm}$  时,材料吸波性能不显著,呈现一般有机高分子材料的特性。绝缘材料的透波性,可用电容器对交流电是通路一样获得解释; 2. 当  $10^{-3} \text{ s/cm} < \sigma < 1 \text{ s/cm}$  时,材料具有较好的吸波特性; 3. 当  $\sigma > 1 \text{ s/cm}$  时,对微波几乎全反射呈典型的金属特性。

电磁性吸波材料是利用铁氧体在高频电磁场作用下电磁损耗原理制成的一类材料。根据电磁场理论,一般用复介电常数  $\epsilon$  和复数磁导率  $\mu$  来描述吸波材料的电磁性能。

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon'(1 - i\text{tg}\delta_\epsilon) \quad (2)$$

$$\mu = \mu' - i\mu'' = \mu'(1 - i\text{tg}\delta_\mu) \quad (3)$$

$$\text{tg}\delta_\epsilon = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\mu} = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (5)$$

为了得知这些参数对材料中电磁波传输的影响,首先应了解电磁波在吸波材料中的传输特性。吸波材料中的传波矢量是个复数矢量,可表示为

$$K = \alpha + i\beta \quad (6)$$

实部  $\alpha$  为衰减常数,虚部  $\beta$  为相位常数。为了简化,假设传播方向与衰减方向相同,这时可去掉矢量符号。

$$\alpha + i\beta = \omega \sqrt{\epsilon' \mu'} \quad (7)$$

将(2)(3)代入(7)式,并使(7)式两边相等,得

$$\alpha = \frac{\pi f}{2} \sqrt{\mu' \epsilon'} \left[ 2(1 + \operatorname{tg}^2 \delta_e \operatorname{tg}^2 \delta_{\mu} + \operatorname{tg}^2 \delta_e + \operatorname{tg}^2 \delta_{\mu})^{\frac{1}{2}} + \operatorname{tg} \delta_e \operatorname{tg} \delta_{\mu} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中  $\epsilon' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ ,  $\mu' = \frac{\mu}{\mu_0}$  分别为材料的相对介电常数和相对磁导率。(8)式表明,如果仅仅着眼于对电磁波的吸收,应尽可能增加  $\epsilon'$ ,  $\mu'$ ,  $\operatorname{tg} \delta_e$ ,  $\operatorname{tg} \delta_{\mu}$  的值。但是,只有电磁波透入材料内部,材料内部的各种吸收机制才能发挥作用。而入射到材料表面上的能量能否透入材料内部,有多大比例的入射波能量可以透入材料中去,完全取决于材料与自由空间的界面上的输入波阻抗。只有当材料与自由空间阻抗匹配或接近匹配时,入射电磁波能量才能透入材料或较多地透入材料中传播。研究证明,一种均匀材料充满半无限空间的情况下,材料与自由空间阻抗匹配的条件为:

$$\begin{cases} \epsilon' = \mu' \\ \operatorname{tg} \delta_e = \operatorname{tg} \delta_{\mu} \end{cases} \quad (9)$$

综合(8)和(9)式可得知,在保持复数介电常数和复数磁导率实部和虚部分别相等的条件下,并增加这些参数的值,就可以降低入射波的反射系数和提高材料的吸波性能。

综上所述,研制电磁波材料的主要任务,就电性而言是:1. 研制新型具半导体介质材料和强磁性材料;2. 对现有电磁材料优化设计组合,降低入射波的反射系数,提高材料吸波性能并扩展其频宽。

1986 年报道了一种视黄基席夫碱式盐聚合物,这种聚合物分子结构为多共轭烯烃结构并含有一群高氯酸抗衡离子。这些抗衡离子由三个氧原子和一个氯原子组成,并在两处松散地高挂在碳原子骨架上。这种电连接非常弱,一个光子都有可能把抗衡离子从一个位置移到邻近一个位置。这种位移,使它能很快(几分之一秒)将电磁能转换成热能散开。这就是它具有极好吸收电磁波能的原因。

#### 四、吸波材料应用现状

如前所述,目前使用的吸波材料按工作原理分有磁性吸收体和介电吸收体两大类。按使用形式分有:涂层、贴片、结构泡沫(蜂窝)材料、结构复合材料。在飞机上,以涂层和结构复合材料为最常见。按使用的材料分:高分子材料有涂料、橡胶、结构(热塑性和热固性)复合材料。填料有玻璃纤维、碳纤维、有机纤维、混杂纤维、碳化硅纤维、金属纤维、尖晶石型铁氧体、导电炭黑等。

用于隐身材料的种类很多,牵涉面极广,它与飞行器的应用部位有关。本文仅就雷达波吸波涂料和结构吸波材料作一简介。

1. 吸波涂料 过去,隐身技术用的吸波涂料大都是含铁氧体系涂料。典型的涂层由三层

组成,即在两层雷达波反射层之间夹一层电介质材料。但这种材料的可使用频带狭窄,实际效果差。近十几年来,许多国家都在寻找使用频带宽、密度低、厚度薄、吸收能力强的吸波涂料。例如,美国已研制出一系列层状含铁氧体涂料,应用到 B-1B 飞机的进气口和 A-7, F-14 飞机的某些表面。在 F-19A 飞机的机身外表面涂有日本研制定型并由美国生产的尖晶石型铁氧体为主的微波吸收涂料。而且在可能构成雷达波反射体的内部金属部件表面也涂敷了这种涂料。日本研制出一种宽频高效吸波涂料,它是由阻抗变换层和低阻抗谐振层组成的双层结构。变换层是铁氧体和树脂的混合物,谐振层则是铁氧体、导电短纤维与树脂的混合物。其配比是经过电子计算机精确设计的。当采用五种不同厚度此类结构时,可吸收 1—20 GHz 的雷达波,衰减率在 20 分贝(db)以上。

视黄基席夫碱式盐是一类非铁氧体系吸波材料。它的吸波性能相当或优于铁氧体系材料而重量仅为它的 1/10。这类盐能吸收射频 80% 的能量,转换成热能后释放的热量很小,只能使飞机蒙皮的表面温度提高约 0.006°C,因而不会增强飞机的红外特征。

2. 结构吸波材料 所谓结构吸波材料是指具有承载和吸波双重功能的复合材料。在美国, B-2 轰炸机和正在研制的新一代战斗机均大量采用复合材料。

这类材料主要由合成树脂和增强纤维组成,并添有电磁波吸收体。主要选用树脂品种有环氧树脂、聚酰亚胺树脂和先进的热塑性树脂:如聚醚醚酮(PEEK)、聚苯硫醚(PPS)、聚芳酯(PAR)、聚醚砜(PES)、聚芳砜(PAS)、聚苯并咪唑(PBI)、聚醚亚胺(PEI)、聚酰胺酰亚胺(PAI)等。主要选用的纤维有碳纤维、Kevlar 纤维、混杂纤维等。

为什么要选用这类复合材料?(1) 因为这类非金属材料具有密度低、比强度和比模量高等特点,可以承载负荷,而且大大降低飞机的重量。这对提高飞行器的机动性能和降低油耗是有益的。(2) 这类材料具有透波或吸波特性。例如,基体树脂是电绝缘体,体积电阻率在  $10^{14}$ — $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$  之间,碳纤维是电的良导体,体积电阻率在  $0.8$ — $1.8 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  之间由它们组成的复合材料有一定的导电能力,介于导体和绝缘体之间。当然,并不是所有的碳纤维品种都可被选作吸波材料;而只有经过特殊处理的碳纤维(其电阻值在  $10^3$ — $10^9 \Omega$  之间)制成的复合材料才具有高的  $\text{tg} \delta$  值。再如,用 Kevlar-49 增强环氧树脂复合材料,其特点是在 1 KHz—10 GHz 范围内,介电常数低,具有优异的雷达波可透性。(3) 非金属材料 and 粘接技术的应用,减少或排除了飞行器表面使用金属铆接零件,这无疑是提高隐身性能的一个重要原因。

作为一种隐身结构材料,除了应满足一定的电性能和力学强度性能外,还应考虑其它性能。如美国对 ATF 飞机设计曾提出如下要求:(1) 电性能:在 2.6—26.5 MHz 频率范围内,衰减量  $> 7$ —8 db。(2) 密度  $\leq 1.5 \text{ g/cm}^3$ 。(3) 在 150—176°C 下能长期工作。(4) 材料拉伸模量  $> 3.1 \text{ GPa}$ 。(5) 冲击后剩余压缩强度  $\geq 207 \text{ MPa}$ 。(6) 延伸率  $> 0.6\%$ 。(7) 层间断裂韧性 0.7—1 kJ/m<sup>2</sup>,而这些性能指标并非一般材料所能达到的。

美国首次在 A12/SR-71 等机种上成功地应用了结构复合材料,其中一种是由透波的 Kevlar 蒙皮和浸渍导电碳黑的泡沫芯式蜂窝组成;另一种则为多层结构,每一层针对一个频率。

文献指出, B-2 轰炸机上非金属复合材料占飞机重量的 50% 以上,机身表面的大部分由吸波的碳纤维蜂窝夹层结构制成。据报道,为减少雷达波散射截面,飞翼的前后沿由一连串拇指大小的六角形小室构成,每个六角形小室内填充有吸波材料,材料密度从外向内递增,它们用多层吸波材料覆盖。入射的雷达波先投射在翼的表面上,然后被多层覆盖层部分地吸收。剩

余的信号进入六角形小室内,经过小室曲折返回使反射信号继续被吸收。采用这些技术措施几乎可消除来自飞翼前后雷达波反射。

## 五、 结构复合材料研究新进展

美国先进技术战斗机(ATF)验证机选材的方案(称 YF-22A 选材方案)如下:

材料	质量百分数	材料	质量百分数
热塑性复合材料	44%	钢	6%
金属基复合材料	12%	先进铝合金	5%
其它复合材料	6%	其它	12%
钛合金	15%		

从以上数字可以看出,与现有先进战斗机相比,ATF 选材有重大的变化。选用有隐身能力的复合材料达 50%,而且热塑性复合材料所占比重增大。由于热塑性树脂具有成型前已完成聚合过程的特点,在熔融态进行加工成型仍存在一些技术问题。考虑到热塑性复合材料的特点和存在的问题以及热固性塑料在塑性、韧性以及耐高温性能等方面近年来不断取得进展,今后两者之间的关系不是取而代之,而是互补。从目前发展水平来看,有人估计,在 2000 年内,航空、航天用复合材料中,环氧材料将占 80%,双马来酰亚胺及聚酰亚胺约占 12—15%,热塑性复合材料将占 5—8%,但在个别机种上,热塑性复合材料有可能用得较多。

## 参 考 文 献

- 1 Leibstone M. *Military Technology*, 1986; 9: 219—224
- 2 Alans B A. *Aerospace America*, 1987; 4: 16—22
- 3 *Popular Science*, 1988; 7
- 4 裘镜蓉. 宇航材料工艺, 1989; 4—5: 114—117
- 5 赵云峰. 宇航材料工艺, 1989; 4—5: 108—113
- 6 石卿. 国际航空, 1992; 4: 33—35
- 7 海英. 国际航空, 1992; 5: 33—36
- 8 唐汉. 微波原理. 南京大学出版社, 1990
- 9 沈明岐. 现代作战飞机的高新设计技术, 1992; 9: 9—11
- 10 徐汉泽. 隐身飞机. 西北工业大学出版社, 1988
- 11 顾振军, 王寿泰. 聚合物的电性和磁性. 上海交通大学出版社, 1990

(上接第 4 页)

- 7 van Gunsteren W F. *Protein Eng.*, 1988; 2: 5
- 8 Brooks B R, Bruccoleri R E, Olafson B D, States D J, Swaminsthsn S, Karplus M. *J. Comp. Chem.*, 1988; 4: 187
- 9 Cohen F E, Abarbanel R M, Kuntz I D and Fletterick R. *J. Biochem*, 1986; 25: 266
- 10 Qian N, Sejnowski T L. *J. Mol. Biol.*, 1988; 202: 865
- 11 邓巧临, 来鲁华, 徐筱杰. 百科知识. 1991; 49
- 12 北京大学蛋白质分子设计系统用户指南. 1990

(上接第 21 页)

## 参 考 文 献

- 1 周公度. 结构化学基础. 北京大学出版社, 1989; 374
- 2 徐光宪, 王祥云. 物质结构. (第二版), 高等教育出版社, 1987; 549
- 3 北京师范大学等校编. 无机化学. 高等教育出版社, 1987; 312
- 4 过康民. 分子科学与化学研究, 1984; 1: 65
- 5 宋溪明, 刘祁涛. 化学通报, 1988; 1: 16