

# 吸波材料的设计和应用前景\*

郑长进 李家俊 赵乃勤 郭新权

(天津大学材料学院, 天津 300072)

**文 摘** 较系统地论述了吸波材料设计的理论基础,介绍了基体和损耗介质的选用,探讨了拓宽吸波频带的几种可行途径,并对吸波材料的应用前景作了概要叙述。

**关键词** 吸波材料,设计,应用

## Design and Application of Microwave Absorbing Materials

Zheng Changjin Li Jiajun Zhao Naiqin Guo Xinquan

(School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** The fundamental theories of designing microwave absorbing materials are reviewed. The matrix materials and dissipation mediums used by microwave absorbing materials are introduced. A number of methods for broadening the bandwidth are discussed. The applications of microwave absorbing materials are also described.

**Key words** Microwave absorbing material, Design, Application

### 1 前言

微波吸收材料,简称吸波材料,是一种能有效吸收入射雷达波,并使其散射大幅度衰减的功能复合材料。新一代的吸波材料要求衰减能力强、吸收频带宽、质轻、红外和微波吸收兼容以及综合力学性能优良。目前,有关吸波材料的报道多集中于传统损耗介质的改性和新型损耗介质的研制方面,而论述吸波材料设计理论的相对很少。基于这一点,本文较系统地论述吸波材料设计的理论基础,介绍基体和损耗介质的选用,探讨拓宽吸波频带的几种可行途径,并对吸波材料的应用前景作概要叙述。

### 2 吸波材料设计的理论基础

研究吸波材料的目的是为了改变微波的辐射分布,使雷达接收到的反射波大幅度地减少。达到这

一目的的途径有三种:材料损耗、相位对消和扩散。

#### 2.1 材料损耗

材料损耗是指电磁波进入吸波材料内部,其能量被材料有效吸收,转化为热能或其他形式能量而耗散掉。设计这种类型的吸波材料一般需要考虑两个方面:阻抗匹配设计和衰减设计。阻抗匹配设计是指创造特殊的边界条件使入射电磁波在材料介质表面的反射系数  $R$  最小(理想情况  $R = 0$ ),从而使电磁波最大程度地进入材料内部。根据电磁场理论<sup>[1]</sup>,当电磁波由阻抗为  $Z_0$  的自由空间垂直入射到阻抗为  $Z$  的半无限介质表面时,其反射系数  $R$  满足:

$$R = (Z - Z_0) / (Z + Z_0) \quad (1)$$

式中,  $Z = \sqrt{\mu/\epsilon} = \sqrt{\mu_r \mu_0 / \epsilon_r \epsilon_0}$  为介质波阻抗;

收稿日期:2003 - 10 - 08;修回日期:2004 - 03 - 03

\*天津市自然科学基金资助:013 616 911

郑长进,1979年出生,硕士研究生,主要从事吸波材料的研究工作

宇航材料工艺 2004年 第5期

$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 376.7$  为自由空间波阻抗。

当介质有损耗时,相对磁导率  $\mu_r$  和相对介电常数  $\epsilon_r$  表示为复数  $\mu_r = \mu' - j\mu''$ ,  $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ 。其中,实部  $\mu'$  和  $\epsilon'$  表征了材料的储能容量,如磁化能和电容,而虚部  $\mu''$  和  $\epsilon''$  为极化损耗。由公式(1)很容易推得,理想情况下的阻抗匹配公式:

$$\begin{cases} \mu' = \mu_0 \\ \mu'' = \mu_0 \end{cases} \quad (2)$$

然而,由于  $\mu'$  和  $\mu''$  都是与频率有关的函数,同一介质的各个频率的  $\mu'$  和  $\mu''$  难以都满足公式(2),因此该公式是相当苛刻的。为此,秦柏、秦汝虎等人提出一种更容易让人接受的阻抗匹配公式,即“广义匹配定律”: $Z = \mu'/\mu''$ ,并且指出该公式可以作为有效地选择材料和材料厚度的判据,利用该公式容易获得展宽、减轻、减薄的吸收剂<sup>[2]</sup>。

衰减设计是指合理选用或设计损耗介质(吸收剂),并精心设计材料结构特征,以便使进入材料内部的电磁波迅速地最大限度地衰减掉。损耗介质对电磁波的衰减能力常用电损耗角正切  $\tan \delta_e = \epsilon''/\epsilon'$  和磁损耗角正切  $\tan \delta_m = \mu''/\mu'$  来表示,其值越大,衰减能力越强。从这一点来看,似乎意味着介质的  $\mu'$  或  $\epsilon'$  越大,吸波能力越强。然而,损耗介质的选用和材料的结构设计往往是紧密联系在一起的,实际工作中,常常根据不同的结构设计方案来选用具有合适电磁参数的损耗介质。因此,一心追求大的  $\mu'$  或  $\epsilon'$  的做法是不对的。目前,研究较多的吸波材料的结构形式主要有单层结构和多层组合结构两类;其中,多层组合结构又可分为叠层结构(由透波层、阻抗变换层、吸波层和反射被衬构成)、层片复合结构(由预先制成的复合材料和吸波材料片用粘接剂粘接而成)和夹芯结构(由透波面板、芯、衰减片或电阻片构成)。有关这几类结构形式的吸波材料的设计原则,国内外工作者都作了大量的研究<sup>[3~7]</sup>,其理论依据主要为传输线理论和遗传算法。在具体设计过程中,常常借助于计算机辅助设计。通过计算机辅助设计可以做到:根据材料的电磁参数,可以计算出材料在给定厚度、频率下的吸波性能;给定最大允许反射系数,可设计在某频率范围或某中心频率附近的最大工作带宽与相应的材料参数;给定最大允许反射系数与带宽,可以设计材料的电磁参数。

此外,还需要明确的是,对于单一组元的吸收体,阻抗匹配设计和衰减设计往往是矛盾的,不能同时满足<sup>[8]</sup>。通常需要进行材料的多元复合,以便调节电磁参数,在尽可能满足阻抗匹配条件下,提高材料的吸波能力。

## 2.2 相位抵消<sup>[9]</sup>

相位抵消型吸波材料是按照电磁波相干涉原理设计的。现以单层涂层吸波材料为例加以说明。把吸波涂料涂覆在金属基体上,当涂层厚度满足:

$$d = \lambda_0/4 = \lambda_0/4 \sqrt{\mu} \quad (3)$$

式中,  $d$  为涂层的厚度;  $\lambda_0$  为电磁波在真空中的波长;  $\epsilon$  为涂层的相对介电常数;  $\mu$  为涂层的相对磁导率;  $\lambda$  为电磁波在涂层中的波长。

这时,涂层与金属基体的界面和涂层表面反射的两列电磁波将发生干涉现象,从而使总的反射波衰减。由公式(3)可知,当涂层厚度  $d$  一定,则能发生干涉的波长也一定,当波长发生变化时,涂层的总反射率就会急速上升,因此这种涂层的工作频带很窄。通常,许多薄层吸波涂层以公式(3)进行设计。

同样,干涉原理也可以用于结构吸波材料的设计。例如,在多层夹芯结构吸波材料(由复合面板、夹芯和衰减片组成)中,控制衰减片(起主要的吸波作用)的阻抗和衰减片之间的距离,使各次反射波相位相反,就可以产生相消干涉,从而衰减反射波的能量。

## 2.3 扩散

当电磁波入射到这类微波吸波材料时,反射波的方向偏离了接收机的方向,全发生了扩散。这些电磁波并未被吸收,只是被改变方向传到其他地方去了。最近发展起来的等离子隐身技术就部分利用了这一原理。当雷达波与等离子相互作用时,一部分被吸收,一部分改变传播方向,急剧降低了雷达接收机的反射信号,使得雷达荧光屏的信号消失,从而达到隐身的目的。

设计吸波材料时,可以不同程度地综合运用以上三种途径,以达到性能最优的设计。

## 3 基体的选用

基体是吸波材料的重要组成部分,是影响材料力学性能的关键组分。基体的选用原则为:尽量减小对吸波材料中损耗介质的影响,以充分发挥损耗

介质的性能;根据吸波材料所需达到的力学性能、物理和化学性能(如密度、机械强度、附着力、弹性、耐候性等)以及工艺加工要求来考虑;要具有合适的电磁参数,以便与自由空间的波阻抗相匹配。基体一般为高分子材料,分为橡胶型和树脂型两类。橡胶型基体如聚异丁烯、氯丁橡胶、丁腈橡胶和硅橡胶等,特点是弹性高、阻尼大、耐震动。树脂型基体可分为热塑性树脂和热固性树脂两类。热塑性树脂包括聚乙烯、聚氯乙烯、聚丙烯酸酯和聚碳酸酯等,它们吸波性能都不理想,但可用作透波材料;热固性树脂包括环氧树脂、酚醛树脂、聚氨酯和硅树脂等。不同树脂体系对吸波材料吸波性能的影响已有人作了较系统的研究<sup>[10]</sup>。欧阳国忠等研制出一种介电常数较低、损耗角正切值较高、耐热性和强度较高的结构吸波材料用高性能树脂<sup>[11]</sup>。

#### 4 损耗介质的选用

损耗介质是决定吸波材料吸波性能的关键组分。目前,已研制开发并成功应用于吸波材料中的损耗介质有几十种<sup>[12]</sup>。按照吸波机理的不同,损耗介质可分为电损耗型、磁损耗型和介电损耗型三类。非磁性金属粉、炭黑、各种导电纤维、导电高分子等属于电损耗型,电磁能主要衰减在材料电阻上;磁性金属粉、铁氧体、羰基铁、多晶铁纤维等属于磁损耗型,吸波机理主要归结为磁滞损耗和铁磁共振损耗;SiC陶瓷、钛酸钡陶瓷、煤矸石<sup>[13]</sup>等属于介电损耗型,其吸波机理为介电极化弛豫损耗。此外,据报道,手性材料<sup>[14,15]</sup>、电路模拟材料<sup>[16]</sup>、纳米材料<sup>[17]</sup>也均可作为吸波材料用损耗介质。目前,介绍吸波材料用损耗介质的文献很多<sup>[12,17~20]</sup>,限于篇幅,这里不想再赘述,只想结合本课题组的研究情况介绍一下碳纤维损耗介质。

碳纤维是指纤维化学组成中碳元素占总质量90%以上的纤维,电阻率在 $10^{-5} \text{ } \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^{-2} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ 之间<sup>[21]</sup>。由于碳纤维高的电导率,接近于金属,因此经高温石墨化处理的普通碳纤维对电磁波几乎是全反射的,不具备吸波性能。但是,罗发、周万诚等报道了未经高温石墨化处理的碳纤维在电场垂直入射时具有吸波功能<sup>[22]</sup>。目前,人们主要通过碳纤维进行特殊的表面处理(如镀镍、沉积一层微小孔穴的碳粉、在表面涂覆含有电磁损耗物质的树脂等)以

及改变纤维横截面形状和大小,来调节电阻率和电磁参数,使其具有吸波功能<sup>[12,23,24]</sup>。本课题组对碳纤维/环氧树脂复合吸波材料作了大量研究,发现通过改变碳纤维的排布方式(平行排布、垂直排布、正交排布以及复合排布等)、截面形状、含量可以显著影响材料的吸波性能。例如:当碳纤维平行排布时,材料的最大吸收峰值随纤维间距的减小而向高频移动,随纤维含量的增大而下降;当碳纤维垂直-平行复合排布时,材料在8 GHz~18 GHz频带范围,反射衰减几乎均在-10 dB以下,综合吸波性能优于平行排布方式和垂直排布方式<sup>[25]</sup>;由非圆截面的粘胶基碳纤维纺织而成的碳毡和环氧树脂复合制成的材料,最大衰减达-30 dB,有效带宽大于7 GHz<sup>[26]</sup>。此外,通过向碳纤维/环氧树脂复合材料中添加铁氧体粉、乙炔导电炭黑可以明显改善材料的吸波性能<sup>[26]</sup>。

#### 5 拓宽吸波频带的途径

##### 5.1 对常规损耗介质进行合理复合,制备复合型损耗介质

单一型损耗介质往往只具有单一的吸波性能,很难达到宽频带吸收的效果,通过对常规损耗介质进行多元复合,制备复合型损耗介质,可以明显改善吸波性能,拓宽吸波频带。娄明连、阚涛报道了通过向用铁砂替代 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 制备的尖晶石型铁氧体中添加介电型( $\text{BaTiO}_3$ )和电阻型介质(SiC)各10%(质量分数),制成了铁氧体基复合损耗介质,把这种损耗介质按一定比例掺入水泥中,制成建筑吸波材料,该材料最大吸收量由22.5 dB增加到25.3 dB,15 dB的带宽增加一倍多<sup>[27]</sup>。汪国强等利用“包埋法”通过液相掺杂MnZn铁氧体于苯胺中,制成MnZn铁氧体-苯胺复合损耗介质,该介质与环氧树脂制成的吸波涂层材料大于10 dB的带宽达11 GHz<sup>[28]</sup>。

##### 5.2 对常规损耗介质进行表面改性处理

通过对常规损耗介质进行特殊的表面改性处理(如:镀磁性金属层、化学气相沉积 $\text{B}_4\text{C}$ 层、以及涂覆电磁损耗介质层等),可以有效调节介质的电磁参数,改善吸波性能,拓宽吸波频带。B. Chambers等人通过在单覆层均匀类吸波材料(Salisbury screen)表面涂覆一层适当厚度的高介电常数的电介质层,使材料-20 dB的频带宽度从3 GHz增大到9 GHz<sup>[29]</sup>。杨孚标等报道了采用化学气相沉积的方法,在连续

碳化硅纤维的表面沉积一层  $B_4C$  涂层,处理后的纤维电损耗大,且介电常数的实部随频率升高而降低,对展宽吸波频带有利<sup>[30]</sup>。

### 5.3 开发具有全新吸波概念的损耗介质

一般损耗介质的磁导率和介电常数都有随着频率的变化而改变的特性,这就是电磁参数的频散效应。如果能开发出一种损耗介质,它的磁导率和介电常数与电磁波频率无关,那么当频率减小时,材料的反射率将降低。也就是说,当某一频率的反射率符合要求时,此频率以下的各频段电磁波的反射率全都会符合要求,从而保证了宽频带吸收的可能性。纳米材料损耗介质很可能具有这种特性<sup>[31]</sup>,这当然还需进一步研究。据报道,法国科学家研制成功一种宽频带微波吸收涂层,该涂层由粘接剂和纳米级微屑填充材料构成,填充微屑由 3 nm 超薄不定形磁性薄膜及 5 nm 绝缘层堆叠而成,绝缘层可以是碳或无机材料。这种由多层膜叠合而成的夹层结构与粘接剂复合而成的材料在 50 MHz ~ 50 GHz 具有良好的吸波性能<sup>[17]</sup>。

### 5.4 改变吸波材料的结构设计

单层结构吸波材料,如“Salisbury screen”,吸波特性是在某一对应的中心频率有一强吸收峰,而有效吸波频带宽度很窄;为此,人们研制出“Jaumann”吸波材料,它是一种由多层阻抗片构成的吸波材料,阻抗片间填充低损耗、低介电常数的介质,如:泡沫材料、蜂窝材料等。通过合理选择各阻抗层的阻抗值,并控制填充介质的厚度为吸波材料中心工作频率对应波长的  $1/4$ ,来达到最佳的吸波性能<sup>[6]</sup>。阻抗片的层数显著地影响材料的吸波频带宽度,一般来说,层数越多,吸波频带越宽。此外,B. Chambers 提出一种对称雷达吸波结构,其两个外表层为纤维增强塑料,中间为多个阻抗层,阻抗层间为低损耗介质,通过合理设计,这种结构的吸波材料在 8 GHz ~ 18 GHz 的反射率均低于 -15 dB<sup>[32]</sup>。

## 6 吸波材料的应用前景

军事隐身领域仍是吸波材料最重要的应用领域。随着军事高新技术的飞速发展,世界各国防御体系的探测、跟踪、攻击能力越来越强,陆、海、空各兵种地面军事目标的生存能力以及武器系统的突防能力日益受到严重威胁,为此,必将大力发展隐身技术。隐身技术分为外形隐身和材料隐身两个方面,

其中材料隐身就是指在军事目标上大量使用吸波材料来衰减入射雷达波,减小雷达散射截面。这必将促进吸波材料的应用和发展。目前,吸波材料已广泛应用在飞机隐身、舰船隐身、飞行导弹隐身以及坦克隐身等领域。例如:美国 B-2 战略轰炸机大量采用了石墨/碳纤维及其他先进复合材料、蜂窝状雷达吸波结构、雷达吸波材料涂层以及锯齿状雷达散射结构,大大减少了雷达散射截面。据说,在正常探测距离下,B-2 飞机的雷达反射截面与一只小鸟相当;英国道提特征管理公司(Dowty Signature Management)研制了一种称为“FLEXIRAM”的雷达吸波材料,在海湾战争期间曾用在英国军舰上层建筑和武器装备上,减少了舰艇的雷达散射界面<sup>[33]</sup>。1993年4月11日,美国海军第一艘隐身战舰“海影”号首次亮相,其独特的外形和广泛使用的吸波材料使敌方雷达和导弹难以跟踪。俄罗斯的 T-90 主战坦克,采用特殊的工艺涂漆,达到隐身目的。GAMMA 公司采用多晶铁纤维损耗介质制备的吸波涂层已应用于法国国家战略防御部队的导弹和飞行器,同时正在验证用于法国下一代战略导弹弹头的可能性<sup>[34]</sup>。

民用领域成为吸波材料新的应用领域,主要有以下几类。

(1) 微波暗室材料,把碳系导电材料或铁氧体材料制成棱锥形或楔形,可用于建筑无反射的微波暗室,来替代开阔场地以进行电磁干扰性能的测试。

(2) 电磁防护材料,可以把吸波材料用在手机<sup>[35]</sup>、电视、计算机、服装<sup>[36]</sup>等上面,以减少电磁波辐射对人体的伤害。

(3) 建筑吸波材料,把具有吸波功能的混凝土材料用于建筑行业,以减少高大建筑物的电波反射作用,提高广播、电视播放质量<sup>[31]</sup>。

(4) 把吸波材料用在微电机及其他电子设备上,以减少电磁干扰引起的电子电器失误。

(5) 把吸波材料用在波导或同轴衰减器的吸收负载上,作为微波衰减器,具有良好的吸收性能和稳定性。

### 参考文献

- 1 毕德显. 电磁场理论. 北京:电子工业出版社,1985: 450 ~ 454
- 2 秦柏,秦汝虎,金崇君.“广义匹配规律”的论证及在宇航材料工艺 2004 年 第 5 期

- 隐身材料中的应用. 哈尔滨工业大学学报, 1997; 29(4): 115 ~ 117
- 3 Gao Maosheng, Qin Ruhu, Qiu Chengjun, Zhu Jing. Matching design and mismatching analysis towards radar absorbing coatings based on conducting plate. *Material and Design*, 2003; 24(5): 391 ~ 396
  - 4 Chambers B. Optimum design of a Salisbury screen radar absorber. *Electronics Letters*, 1994; 30(16): 1 353 ~ 1 354
  - 5 Knott E F, Lunden C D. The two-sheet capacitive Jaumann absorber. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995; 43(11): 1 339 ~ 1 343
  - 6 Chambers B, Tennant A. Optimised design of Jaumann radar absorbing materials using a genetic algorithm. *IEE Proc. - Radar, Sonar Navig.*, 1996; 143(1): 23 ~ 30
  - 7 车孟刚, 杨建生, 聂嘉阳, 华宝家. 多层蜂窝夹芯结构吸波材料电匹配设计研究. *宇航材料工艺*, 1989; 19(4, 5): 74 ~ 78
  - 8 周克省, 黄可龙, 孔德明, 尹荔松. 纳米无机物/聚合物复合吸波功能材料. *高分子材料科学与工程*, 2002; 18(3): 15 ~ 18
  - 9 周馨我. 功能材料学. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 240
  - 10 王俊山, 杨建生, 聂嘉阳, 华宝家. 树脂体系对吸波材料吸波性能的影响. *宇航材料工艺*, 1989; 19(4, 5): 52 ~ 58
  - 11 欧阳国忠, 王小元. 结构吸波材料的高性能树脂基体研制. *国防科技大学学报*, 1991; 13(4): 74 ~ 78
  - 12 曾祥云, 马铁军, 李家俊. 吸波材料(RAM)用损耗介质及 RAM 技术发展趋势. *材料导报*, 1997; 11(3): 57 ~ 60
  - 13 甘永学. 含谐振子的电磁波功能复合材料的研究. 北京航空航天大学博士论文, 1992
  - 14 葛副鼎, 库万军, 朱静. 手性材料及其在隐身吸波材料中的应用. *材料导报*, 1999; 13(1): 10 ~ 11
  - 15 Wong T C P, Chambers B, Anderson A P, Wright P V. Fabrication and evaluation of conducting polymer composites as radar absorbers. In: *Eighth international conference on antennas and propagation*, Edinburgh UK, 1993: 934 ~ 937
  - 16 饶克谨, 赵伯琳, 高正平. 电路模拟吸收材料——原理、特性及设计方法. *电子科技大学学报*, 1995; 24(2): 164 ~ 169
  - 17 焦桓, 罗发, 周万城. 纳米吸波材料研究与发展趋势. *宇航材料工艺*, 2001; 31(5): 9 ~ 11
  - 18 罗发, 周万城, 焦桓, 赵东林. 高温吸波材料研究现状. *宇航材料工艺*, 2002; 32(1): 8 ~ 11
  - 19 方亮, 龚荣州, 官建国. 雷达吸波材料的现状与展望. *武汉工业大学学报*, 1999; 21(6): 21 ~ 24
  - 20 宫清, 方正, 张劲松. 雷达波吸收材料的研究进展. *材料导报*, 2002; 16(11): 45 ~ 47
  - 21 王曙中, 王庆瑞, 刘兆峰. 高科技纤维概论. 上海: 中国纺织大学出版社, 1999: 235 ~ 236
  - 22 罗发, 周万诚, 赵东林. 结构吸波材料中纤维的电性能和吸波性能. *材料工程*, 2000; (2): 37 ~ 40
  - 23 曾祥云, 李家俊, 师春生. 碳纤维在电磁功能复合材料中的应用. *材料导报*, 1998; 12(1): 64 ~ 67
  - 24 赵东林, 沈曾民. 碳纤维结构吸波材料及其结构设计. *兵器材料科学与工程*, 2000; 23(6): 53 ~ 57
  - 25 曹婷. 碳纤维(碳毡)/环氧吸波复合材料的制备及性能研究. 天津大学硕士研究生论文, 2002
  - 26 邵蔚. 含不同吸波剂的树脂类复合材料的制备及吸波性能研究. 天津大学硕士研究生论文, 2003
  - 27 姜明连, 阚涛. 复合磁介质吸波材料. 磁性材料及器件, 2002; 33(5): 13 ~ 15
  - 28 王国强, 刘祖黎, 邹勇, 廖海星. 复合轻型吸波涂层电磁参数及吸波性能的研究. *华中理工大学学报*, 2000; 28(7): 111 ~ 113
  - 29 Chambers B, Tennant A. Characteristics of a salisbury screen radar absorber covered by a dielectric skin. *Electronics Letters*, 1994; 30(21): 1 797 ~ 1 798
  - 30 杨孚标, 李永清, 程海峰, 车仁超, 肖加余. SiC 纤维的 B<sub>4</sub>C 涂层的研究. *功能材料*, 2002; 33(3): 286 ~ 287
  - 31 张雄, 习志臻. 建筑吸波材料及其开发利用前景. *建筑材料学报*, 2003; 6(1): 72 ~ 75
  - 32 B. Chambers. Symmetrical radar absorbing structures. *Electronics Letters*, 1995; 31(5): 404 ~ 405
  - 33 孙社营. 吸波材料及其在舰船上的应用. *材料开发与应用*, 1996; 11(4): 43 ~ 48
  - 34 张卫东, 冯小云, 孟秀兰. 国外隐身材料研究进展. *宇航材料工艺*, 2000; 30(3): 1 ~ 4, 10
  - 35 陶松垒, 陶均炳. 手机微波防护器的研究与测试. *微波学报*, 2002; 18(2): 94 ~ 96
  - 36 陈小力, 阎克路, 赵择卿. 纳米吸波材料在人体防护中的应用现状及其发展方向. *纺织科学研究*, 2002; 13(2): 27 ~ 30

(编辑 李洪泉)