文章编号:1007 - 4252(2024)02 - 0002 - 053 DOI: 10.20027/j.gncq.2024.0013

电磁波吸波材料吸波原理、制备技术及发展方向

袁宇洋[1,*]
(1. 大连理工大学 力学与航空航天学院 116000)

摘要:吸波材料是一种电磁功能材料,在电子对抗上面有着广泛的应用。针对材料吸波原理、制备及改性技术开展相关研究,对于完善吸波理论,指导吸波结构件设计具有重要意义和参考价值。总结了吸波材料的吸波原理、微观损耗机制。对吸波材料进行分类,可大致分为:铁氧体类、导电高聚物类、气凝胶类,以及新兴的有机金属碳化物氮化物(MXene)类、高熵陶瓷类和超材料类等。对每一类吸波材料的优缺点进行了研究,包括每一类材料的应用背景、现有制备合成工艺、吸波性能等。分析了改善材料的吸波性能的方法,可以通过表面改性、掺杂、微观结构调控的方式改性,从而提高电导率、磁导率等。对低频吸波材料的未来发展趋势提出了展望。吸波材料设计正在向“材料-结构-制造”一体化的方向发展,吸波材料目前正向着复合化、多元化、微型化、智能化的方向发展。

关键词:电磁功能材料;电磁兼容设计;吸波材料;隐身材料;纳米材料
中图分类号:TB34 **文献标志码**:A

Absorbing principle, preparation technology and development direction of electromagnetic wave absorbing materials

Yuan Yuyang[1,*]
(1. College of Mechanics and Aerospace, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

Abstract: Wave absorbing material is a kind of electromagnetic functional material, which has been widely used in electronic countermeasures. It is of great significance and reference value to carry out relevant research on the principle, preparation and modification technology of absorbing material for improving the absorbing theory and guiding the design of absorbing structural parts. The absorbing principle and micro loss mechanism of the absorbing materials are summarized. The wave absorbing materials can be roughly divided into ferrites, conductive polymers, aerogels, and emerging organometallic carbides nitride (MXene), high entropy ceramics and metamaterials. The advantages and disadvantages of each kind of absorbing materials were studied, including the application background, the existing synthesis process and the absorbing properties of each kind of materials. The methods to improve the absorbing properties of the materials are analyzed, which can be modified by surface modification, doping and micro - structure control, so as to improve the electrical conductivity and magnetic permeability. The future development trend of low frequency absorbing materials is prospected. The

收稿日期:2024-03-01; **修订日期**:2024-04-01
作者简介:袁宇洋(1999-), 男, 四川成都人,硕士研究生在读,主要研究方向为航空工程(E-mail:yyyuan@mail.dlut.edu.cn).

design of absorbing materials is developing in the direction of " material – structure – manufacturing" integration, and absorbing materials are currently developing in the direction of compound, diversified, miniaturized and intelligent.

Key words: Electromagnetic functional materials; Electromagnetic compatibility design; Absorbing material; Stealth material; Nanomaterials

0 引言

电磁功能材料是一类值得引起关注的信息功能材料,它可以分为电磁屏蔽材料和电磁波吸波材料两类。对于飞行器来说,辐射源主要有两类,一类是由气动加热造成的红外辐射,一类是由电磁波散射造成的电磁辐射,这两类辐射源的存在会增加飞行器被雷达探测到的概率,随着合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar,SAR)、超视距(厘米波、毫米波)雷达在现代战争中的应用,目标检测手段越发先进,如何提高生存率,缩短探测距离,减小雷达散射截面(Radar Cross Section,RCS)成为很重要的研究内容,特别是研究可用于电磁隐身的吸波材料成为一个重要的发展方向。为了减少被探测概率,一些电磁隐身手段就需要在飞机的总体结构设计中有所体现,并从结构设计或者材料选择的角度提出相应的解决方案[1-2]。

从结构设计而言,可以说降低目标散射场强是吸波材料研究发展的关键,电磁波与被探测目标的相互作用引起了研究者广泛关注。目前雷达观测的目标大多位于光学散射区(类似于红外辐射的三个大气窗口),该区段内散射体的几何细节起着重要影响作用,目标的 RCS 主要取决于其形状和表面粗糙度[2-3]。从结构设计出发并不能完美地解决“散射”问题,除了结构设计外,材料的选择也是至关重要的。就材料的选择而言,吸波材料的吸波性能与电磁波频率密切相关,与电磁损耗的方式密切相关。没有一种材料是通用于所有波段的,同一种材料在不同波段下吸收性能是不同的,不同材料在同一波段下的吸波性能也是不同的。对于适用于飞行器的吸波材料目前得到应用的有:采用氮化硅(或者石英)制作战斗机、卫星雷达罩和导弹天线罩,在 S 形进气道内表面涂覆铁氧体吸波涂层,或者在飞机座舱表面镀上一层氧化铟锡膜等,这些都可以实现很好的吸波效果。目前研究的低频雷达吸波材料主要集中在空基雷达的 X(8-12GHz)、Ku(12-18GHz)波段[1-3]。

本文描述了吸波材料在飞行器中的实际应用场景和潜在的应用价值,分析了吸波材料用于飞行器电磁隐身的意义。对不同种类吸波材料的吸波机理进行了介绍和分析,介绍了吸波材料的设计目标和评价标准。比较了不同种类吸波材料的异同。围绕“电磁损耗”这一中心展开分析讨论,损耗机制可以分为电损耗机制、磁损耗机制以及电磁协同机制三类,而绝大多数材料的损耗机制都是电磁协同机制。对于吸波体的结构设计而言,材料的选择是结构设计得以应用的前提条件。分析了电磁波频率这一关键变量对吸波材料吸波性能的影响,吸波材料设计应用和性能测试分析必须考虑这一关键影响因素,因为不同频率下,材料的吸波性能是不同的,应用场景也是不同的,这为材料的设计制造提供参考标准和依据。为了进一步改善吸波性能,讨论了微观形貌和制备方法对吸波性能产生的影响,列举分析了每一类吸波材料吸波性能的改进方法,对不同种类吸波材料的制备技术和吸波结构体的优缺点进行分析讨论,这对节省资源、提高产量、工艺的选择和优化以及大规模的工业应用提供了帮助。阐释了不同种类吸波材料之间的共性和区别,以及在制备当中存在的困难和挑战,及一些解决问题的策略。提供了一些富有创新性的研究角度、研究思路,指明了吸波材料未来潜在的研究热点、发展方向和应用场景。

1 吸波的物理原理

电磁波在左手、右手材料中能够传播,而在单负材料中不能传播,以倏逝波的形式存在。电磁波入射到各向异性材料表面会发生反射、折射和透射,电磁波总能量为这三者的和[4]。斜入射的电磁波与材料相互作用后,其振幅和相位会发生变化,如下图 1 所示。

反射损耗为反射波与入射波功率之比的常用对数。

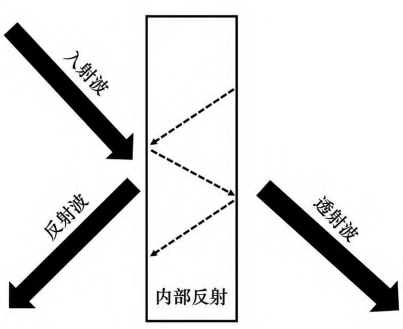

图 1　电磁波与材料相互作用

Fig. 1 Electromagnetic wave and material interaction

$$R_L = 10\lg\frac{P_r}{P_i} \tag{1}$$

Pr 为反射波功率,P_i 为入射波功率。其中一般来说,当反射损耗 R_L<−10dB 时,电磁波有超过 90% 被吸收,对应的频率范围为有效吸收带宽(Effective Absorption Bandwidth,EAB)[5-7]。

吸波材料的吸收机制有以下几类:第一类是利用波的干涉,类似于偏振片设计,靠四分之一波长干涉相消,干涉厚度 d_m 如下式:

$$d_m = \frac{2n+1}{4}\frac{c}{f\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}} \tag{2}$$

n 为自然数,f 为电磁波的频率,c 为电磁波的传播速度,ε_r 为材料复介电常数,μ_r 为材料复磁导率。这种材料吸收频带较窄。第二类是通过阻抗匹配将电磁波导入波导,在波导内部发生多次反射,导致入射波幅度、相位变化,在色散媒质中,电磁波的相速具有随频率而变化的性质,振幅随传播距离的增加指数衰减,传输线工作在行驻波状态下,具有较低的品质因数,从而引起电磁波衰减震荡,将电能转化为热能,实现电磁波的吸收[8-10]。

阻抗匹配就是负载阻抗与特性阻抗相等,良好的阻抗匹配是吸波材料设计需要优先满足的条件。基于电磁波传播的传输线理论,吸波材料的反射系数由界面波阻抗 Z_{in} 和自由空间阻抗 Z_0 决定[11]。对于厚度为 d 的单层吸波材料:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \tag{3}$$

$$R_L = 20\lg\left|\frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}\right| \tag{4}$$

$$Z_{in} = Z_0\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\tanh\left[j\left(\frac{2\pi fd}{c}\right)\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}\right] \tag{5}$$

ε_0 为真空介电常数,μ_0 为真空磁导率。Ma[12] 等人提出阻抗匹配程度函数|Δ|如下:

$$|\Delta| = |\sinh^2(Kfd) - M| \tag{6}$$

其中 K、M 均是复介电常数、复磁导率的函数。|Δ|数值减小材料和自由空间阻抗更加接近,同时也将表现出更低的反射系数。阻抗匹配程度|Δ|函数越接近于零,匹配性越好。

一般来说,可以通过介电常数、磁导率、损耗角正切等物理参数评价材料吸波性能的好坏。其中实部表示电磁场能量的储存,虚部表示电磁场能量的损耗。由频散模型,即洛伦兹-德鲁德(Lorenz-Drood)模型可知[13],材料的复介电常数会随着频率变化,电阻损耗与介电极化损耗共同构成复介电常数的虚部。而对于磁性材料而言,损耗伴随磁化弛豫过程发生,磁化弛豫将导致磁频散。低频区主要发生磁后效损耗,而高频区发生的损耗有铁磁共振损耗、自然共振损耗、畴壁共振损耗等。然而当电场强度进一步增强的时候,也就是在高功率微波作用下,有可能发生电介质击穿。

复介电常数 ε_r 如下式:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon' \tag{7}$$

复磁导率 μ_r 如下式:

$$\mu_r = \mu' - j\mu' \tag{8}$$

损耗角正切 tanδ 如下式:

$$\tan\delta = \tan\delta_e + \tan\delta_m \tag{9}$$

电损耗 $\tan\delta_e$、磁损耗 $\tan\delta_m$ 如下式:

$$\tan\delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{10}$$

$$\tan\delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \tag{11}$$

材料的复介电常数、复磁导率随频率的变化如下图 2、图 3 所示。复数磁导率随频率的变化称为磁谱。复介电常数随频率的变化如图 2 所示,图中从低频到高频依次发生离子极化($< 10^5Hz$)、偶极子极化($< 10^6Hz$)、原子极化($< 10^{12}Hz$) 和电子极化($< 10^{16}Hz$)。复磁导率随频率的变化如图 3 所示,图中从低频到高频分为五个区域,依次为:低频阶段($f < 10^4Hz$)、中频阶段($10^4Hz < f < 10^6Hz$)、高频阶段($10^6Hz < f < 10^8Hz$)、超高频阶段($10^8Hz < f < 10^{10}Hz$) 和极高频阶段($f > 10^{10}Hz$)。

损耗要大,则要求介电常数、磁导率均负数且损耗角正切尽可能大。在微波波段,可用德拜

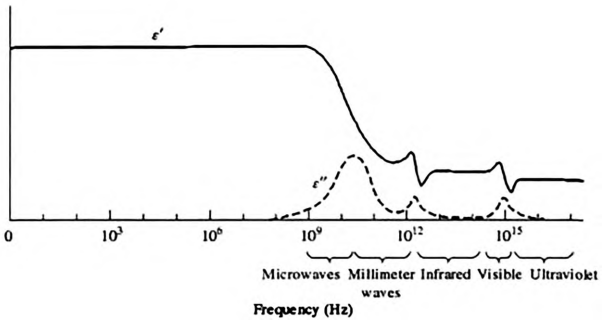

图 2 复介电常数随频率变化图[14]

Fig. 2 Variation of complex permittivity with frequency

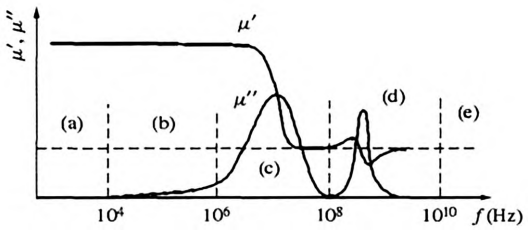

图 3 磁导率实部、虚部随频率变化图[14]

Fig. 3 Variation of real and imaginary parts of permeability with frequency

(Debye)弛豫理论描述复介电常数,一个完整的极化过程 $\varepsilon'-\varepsilon''$图中会一个或者多个出现科尔(Cole-Cole)半圆,在低频和高频段表现出不同的特性,用于判断电介质是否存在松弛极化,如下式:

$$\left[\varepsilon'-\frac{(\varepsilon_s+\varepsilon_\infty)}{2}\right]^2+(\varepsilon'')^2=\left(\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\infty}{2}\right)^2 \quad (12)$$

其中 ε_s 表示静态介电常数,ε_∞ 表示光频介电常数[15]。

损耗包括两大类,一类是电损耗,一类是磁损耗,在不同的频率下,电磁损耗的机制是不同的,在电磁场的作用下,电损耗的微观机制是通过弛豫极化作用来完成的,比如偶极子极化、离子位移极化、电子位移极化、界面极化,电损耗可分为介电损耗和极化损耗两类,介电损耗是指在电场的作用下一部分电荷载流子形成电流,在传导的过程中将能量耗散掉;磁损耗的微观机制是通过磁畴壁的移动和磁畴的旋转来完成的,在交变磁场作用下,磁损耗可分为磁滞损耗、涡流损耗、共振损耗、剩余损耗四类。绝大多数材料的损耗机制是以上几种机制的共同作用[15]。

电磁波进入有损耗特性的介质之后,随着传输距离的变化按指数规律衰减,其渗透的深度往往会存在"趋肤效应"。其中电磁波衰减系数 α 用于表示单位长度上电磁波的衰减能力[15],如下式:

$$\alpha=\frac{\sqrt{2}\pi f}{c}\sqrt{(\mu''\varepsilon''-\mu'\varepsilon')^2+\sqrt{(\mu'\varepsilon''+\mu''\varepsilon')^2+(\mu''\varepsilon''-\mu'\varepsilon')^2}} \quad (13)$$

衰减常数越大,说明色散越大。我们不希望发生吸收峰值大,频宽窄或者频宽大、峰值小的情况。为了满足低频雷达防护的需要,需要增加吸收频带宽度,吸收峰也应该移向低频。以上就是从电损耗的角度出发研究的吸波材料的吸波原理,从中可以获得的启示是:在设计吸波材料的时候,可以考虑通过掺杂的方式改变材料的能带结构,从而改变吸波材料的导电性,改善吸波性能。

2 常见的电磁波吸波材料

吸波材料正朝着"厚度薄、质量轻、频带宽、吸收强"的方向发展,并实现"透波-吸波"一体化设计。研究人员比较关注吸波材料的损耗,希望能找到一种使得电磁波容易进入且快速衰减的吸波材料。吸波材料一般为复合材料,是多组元的,既存在吸波的组分,也存在透波的组分。传统的吸波材料大多体积庞大而且十分笨重,不适合应用于飞行器,吸收频带不宽,而且损耗机制也比较单一,这就需要研究一些新的可适用于飞行器的吸波材料。吸波材料的应用类型有以下三种:①吸波型,包括介电吸波型和磁性吸波型;②谐振型;③衰减型。常见的电磁波吸波材料有铁氧体类、导电高聚物类、气凝胶类、过渡金属碳化物氮化物类、高熵陶瓷类、超材料类等。铁氧体材料可以制作飞行器进气道或飞行器表面的铁氧体涂层,气凝胶可以作为多层天线罩结构内层蜂窝或者其它点阵桁架结构的填充物,导电高聚物类可以应用于飞机舱门结构或者吸波锥结构,过渡金属碳化物氮化物类有望应用于飞行员身上的柔性可穿戴传感器,高熵陶瓷类有望应用于尾喷管结构,FSS 等超材料类可应用于雷达罩或者天线罩结构。每一类吸波材料的损耗机制是不同的,磁损耗仅仅存在于磁性材料中,而吸波材料的设计讲究的是电磁协同,即既有电损耗又有磁损耗,有的时候还会考虑涡流损耗以及涡流损耗带来的趋肤效应,而材料的吸波性能与材料的化学组成、制备工艺和使用频率密切相关。下面将从铁氧体材料吸波原

理、各类材料的制备方法、制备成本、微观形貌等进行对比分析。另一方面,吸波材料按照成型工艺和承载能力,可以分为涂覆型吸波材料和结构型吸波材料[8-9],例如碳纤维板、玻璃纤维复合材料。(夹芯采用蜂窝夹芯、波纹以及角锥等结构形式)吸波材料按类型可分为功能吸波材料和结构吸波材料,吸波材料结构设计一般来说采用分层结构、介孔结构或者谐振腔结构等,分层结构一般分为三层,最外层是匹配层,中间是吸收层,底部是反射层;介孔结构利用的是表面极化和电磁波在材料内部的多次散射实现吸波;而对于谐振腔结构而言,可以分为开腔、半开腔和闭腔三种结构,用于吸波材料的谐振腔大多为开腔或者半开腔结构。谐振腔设计可以采用反向设计的思想,使谐振腔工作区域位于双曲线图的不稳定区域。谐振腔的形状对吸波性能的影响是至关重要的,因为吸波性能会受到电磁波频率的影响,而矩形、球形、圆柱形微波谐振腔的截止频率和受到电磁波模式以及微腔几何尺寸的影响。谐振腔壁可以由材料内部的孔隙壁构成的,材料内部的孔隙由气体填充,多个孔隙之间还会存在谐振腔的相互耦合(对应"电容-电感"耦合网络)。所以孔隙的平均尺寸大小、比表面积、体积、微观形貌等参数对于吸波材料设计至关重要,而这些参数与材料的制备工艺之间是密不可分的[1-3]。对各类吸波材料的吸波原理及每一类材料的优缺点进行了归纳总结,如表 1 所示;对各类吸波材料制备方法进行了归纳总结,如表 2 所示。本文将从制备工艺和结构设计等方面分门别类展开叙述。

表 1　各类材料吸波原理及优缺点的归纳总结

Table 1 Summarizes the absorption principles and advantages and disadvantages of variousmaterials

材料分类	吸波原理	优点	缺点
铁氧体类	磁后效型损耗和共振损耗	高电阻及弱趋肤效应	密度大,抗氧化能力弱
导电高聚物类	界面极化和介电损耗	电磁参量可控,密度低	不耐高温,热稳定性差
气凝胶类	界面极化和多重散射	介电常数较低,连续可调	易开裂,发生骨架坍缩,制备成本较高
MXene 类	屏蔽效应比吸波效应明显	种类繁多,用途广泛	合成方法不够环保,产物分散不均,产率低
高熵陶瓷类	介电损耗、能级分裂及 John-Taller 效应	耐高温、抗氧化、耐烧蚀,可以多种吸波机制并存	密度大,力学性能不好,容易发生脆性断裂
超材料类	调控电磁波幅值相位与极化特性	可以人工设计,实现宽频带吸收	制备成本较高

表 2　各类吸波材料制备方法归纳总结

Table 2 Summary of preparation methods of various wave absorbing materials

材料分类	制备方法归纳总结
铁氧体类	与纳米材料制备方法类似,可分为:物理法、化学法、综合法
导电高聚物类	共混、聚合反应法
气凝胶类	模板法、溶胶凝胶法
MXene 类	刻蚀法
高熵陶瓷类	微波烧结法、热压烧结法、包埋法
超材料类	化学电镀法、等离子刻蚀法、光刻法(光掩模法)

2.1　铁氧体材料类

磁性材料可以分为抗磁性、顺磁性、铁磁性、反铁磁性、亚铁磁性、自旋玻璃和混磁性、超顺磁性这几类[16-17]。物质的磁性是物质的内禀属性,磁性调控主要通过改变电子的自旋状态得以实现,自旋状态改变后,量子力学相互作用积分、交换积分会发生改变。如表 3 所示,量子力学的交换作用理论来自于外斯分子场理论。交换作用分为直接交换作用、间接交换作用、超交换作用、巡游电子作用、RKKY 作用等[16-17]。材料在纳米尺度下会反生明显的尺寸效应,比如减小至临界尺寸后,磁性粒子由多畴态转变为单畴态,从而具有顺磁效应等,而矫顽力的变化却不是线性的[17]。这些现象可以从铁氧体的能带结构中获得解释,包括电导率和磁导率。

表 3 各种交换作用

Table 3 Various exchange effects

交换作用类型	交换作用介绍
直接交换作用	直接交换作用:两个磁性离子靠的很近,交换积分可正可负。
间接交换作用	间接交换作用:两个磁性离子靠的较远,需要通过中间的阴离子(氧负离子)作为媒介,发生作用。
超交换作用	超交换作用:以阴离子为媒介,影响相邻金属阳离子的外层电子自旋方向,进而影响磁矩排列。
巡游电子作用	巡游电子作用:对磁性有贡献的电子 d 电子并不完全是局域电子。
RKKY 作用	RKKY 作用:用于解释稀土金属磁性,自旋极化中的传导电子与临近原子中的局域电子发生交换作用。

$$H_{ex} = -\sum_{ij} J_{ij} s_j \cdot s_j \tag{14}$$

H_{ex}叫做哈密顿量;J_{ij}叫做交换作用积分;

s_i、s_j 叫做自旋波函数。

Rozanov[18]已从理论证实磁性吸收材料具备更大的带宽厚度比,并对其极限值进了深入的研究,提出了可近似描述带宽厚度比极限值的公式,如下式:

$$|\ln p_0|\ (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) < 2\pi^2 \mu_s d \tag{15}$$

P_0 为目标反射率;μ_0 为起始磁导率;d 为吸波材料厚度;$\lambda_{\max}$ 为最大波长;$\lambda_{\min}$ 为最小波长。因此,采用高磁导率的磁性吸收剂更有利于实现低频吸波材料轻、薄的特点。初始磁导率 μ_i 计算公式如下:

$$\mu_i = \frac{M_s^2}{akH_C M_S + b\zeta} \tag{16}$$

a、b 由材料组分决定的常数;k 是磁致伸缩系数;ζ 是晶体的弹性应变参数;Ms 为饱和磁化强度;Hc 是矫顽力。

Snoek[19]发现了各向同性球形吸收剂磁共振频率与初始磁导率之间的乘积是一个常数,该常数与材料的饱和磁化强度相关。

$$(\mu_i - 1) f_r = \frac{\gamma}{3\pi} M_S \tag{17}$$

μ_i 为起始磁导率;f_r 是共振频率;γ 为旋磁比;

M_S 为饱和磁化强度。采用高饱和磁化强度的材料有利于提升磁导率。研究进一步发现,初始磁导率与磁共振频率之间的关系随着吸收剂形貌的改变发生巨大的改变[20]。

对于片状粒子或者铁磁薄膜而言,二者的关系如下式:

$$(\mu_i - 1) f_r^2 = \left(\frac{1}{2\pi}\gamma M_S\right)^2 \tag{18}$$

可知相对于球形吸收剂粒子,片状吸收剂在同样的共振频率条件下,材料的磁导率大大提高,易突破各向同性吸波材料磁性能的 Snoek 极限。由此可知,吸收剂的成分和形状各向异性是获得高磁导率、高磁损耗的关键[21-22]。铁氧体类吸波材料分为磁铅石型、尖晶石型(化学通式:AB_2O_4)、石榴石型(化学通式:$Me_3Fe_5O_{12}$)。吸波铁氧体以立方晶系尖晶石,六角晶系磁铅石型为主。常用的掺杂元素包括过渡金属 Zn、Co、Mn、Ni,可以改变晶格常数、晶格尺寸的具有较大离子半径的稀土元素 Nd、La、Ce 等。尖晶石型铁氧体如 Co^{2+}、Mg^{2+}等,可用 Ni、Fe 等部分或全部取代[21-22]。其饱和磁化强度高,电导率高,化学稳定性好,易于合成,但其匹配厚度较大,适用频带窄;六方晶系磁铅石型铁氧体可分为 M、W、X、Y、Z、U 六种类型,现阶段研究最多的是 M 型和 W 型,W 型铁氧体磁晶各向异性场高,具有高的饱和磁化强度。磁铅石型铁氧体矫顽力大,自然共振频率和晶体磁各向异性较高[22-23],随掺杂元素含量增加,其矫顽力和磁化强度均下降。吸波铁氧体的微观形貌包括:片状、针状、球状、棒状等。片状铁氧体具有较大表面积,可产生较大偶极矩,而且片状材料有更低频的吸收峰和更高的吸收强度,具有较好的高频吸波性能。针状晶体存在磁晶各向异性,长轴方向磁导率高[24]。铁氧体吸波材料设计的关键是提高磁导率和电导率。形状各向异性、较小矫顽力、良好的软磁性能是获得低频高磁导率的关键。晶粒细化有利于提升材料的饱和磁化强度和交换耦合共振[23-24]。铁氧体材料的优缺点如表 4 所示。

制备纳米粒子的方法大致分为三类:物理法、化学法和综合法[25]。制备核壳相铁氧体方法有:化学镀、溶胶-凝胶法、原位聚合法、水热法、高频沉积法、电弧镀方法等;纤维状铁氧体大多采用静电纺丝、熔融纺丝制备;制备钡铁氧体方法有:化学共沉淀、水热法、微乳液法、自蔓延高温合成法、溶胶-凝

胶法等[26-29]。而进一步改善铁氧体的吸波性能需要超细化铁氧体颗粒并多孔化,与羰基铁材料复合或者采用包覆技术制备磁性微球等[30]。这急需要克服纳米粒子因为范德瓦尔斯力造成的分散不均匀与团聚现象(控制粒度和聚集度),解决纳米纤维的排列问题[31]。

表 4　铁氧体材料优缺点

Table 4 Advantages and disadvantages of ferrite materials

铁氧体材料优点	铁氧体材料缺点
(1)发展最早、研究较多。	(1)密度大,铁氧体涂层抗氧化性差,不耐腐蚀。
(2)磁导率高。	(2)热膨胀系数不匹配,涂层内应力大,高温下易开裂、脱落。
(3)匹配厚度薄、吸收频带宽、吸波率高。	(3)电磁损耗匹配性差、磁电协同较差。
(4)多磁畴向单磁畴转变,矫顽力升高,三价铁离子易于被其他离子取代。	(4)单一组元性能不佳,复合材料吸收效果较好,而复合材料之间粘结效果不好。
(5)制备工艺简单、成本低廉。	(5)纳米薄膜生长机理、成膜具体过程、形貌控制、大面积均匀成膜工艺不成熟,有待进一步研究[26-30]。
	(6)制备温度高、颗粒易团聚。

2.2　导电高聚物材料类

常见的导电高聚物(多为杂环化合物)有聚苯胺(PANI)、聚吡咯(PPy)、聚噻吩(PTH)等,可以采用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、硅烷偶联剂(KH-550),钛酸酯偶联剂、γ 射线等对其进行表面改性。

导电高聚物的定义是具有 π 电子的共轭体系经化学或者电化学掺杂(提供电子受体、电子供体)后由绝缘体转化为导体[32],导电高聚物普遍接受的导电机制:掺杂导电高聚物的载流子一定是孤子、极化子、双极化子等[33],导电高聚物可分为:电子导电型、氧化还原型和离子导电型。掺杂的方式可以是引入对阴离子(p-型掺杂)或者对阳离子(n-型掺杂),共轭 π 电子体系为导电聚合物提供了较大离域能,其表面积大,存在大量的界面、缺陷,有利于界面极化[34]。其内部具有很多不导电的孔隙和空腔,可以形成“电容—电感”耦合导电网络。其电导率可以在绝缘体、半导体和金属态之间变化[35]。高聚物由 π—共轭高聚物链和一价对离子构成,无化学键合,仅仅是正负电荷平衡,掺杂/脱掺杂完全可逆[34-35]。例如聚吡咯掺杂机理:包括氧化还原掺杂和质子酸掺杂。掺杂的本质是掺杂剂在主链上进行氧化或者还原反应。聚合物分子链中损失或者获得电子,产生带电的缺陷形成电荷转移络合物[36]。复合材料的导电机理有以下几种学说:其中逾渗理论发展较为成熟,对于导电性的提高而言,逾渗阈值越早发生越好。剩下的还有:导电通道学说、隧道效应学说、电场发射学说等[36-38]。构成高聚物如聚苯胺(PANI)主链的碳原子有四个价电子,其中三个为 σ 电子,余下一个为 π 电子,经掺杂形成激发态[39-40]。不同的掺杂比例,吸波效果是不同的。

2.3　气凝胶类

气凝胶是由纳米粒子或分子链聚集而成的具备三维纳米结构的介孔材料,孔隙中充满着气态介质,有“固态烟雾”之称,又叫做“蓝烟”、“冻烟”[41]。因为其具有极低的密度、极高的比表面积、低折射率、低热导率、低介电常数、低声阻抗等一系列特性而在航空航天、石油化工、环境保护、建筑保温、能量储存与转化等诸多领域有着广阔的应用前景[42]。气凝胶材料通常采用溶胶-凝胶、老化(去浆)、溶剂置换并结合有机溶剂(如 CO_2、CH_3OH、C_2H_5OH 等)超临界干燥、亚临界干燥、冷冻干燥或常压干燥等过程制备。气凝胶材料制备成本较高,主要体现在:有机硅源比较昂贵和干燥条件比较苛刻两方面[43]。超临界干燥在高压反应釜中进行,涉及到高温高压。目前针对这两个不利因素的解决手段是:单一有机硅源采用复合硅源代替,用在常压下有机溶剂真空升华干燥的方法代替超临界干燥[44]。气凝胶具有高度脆性,强度较低,容易开裂,这主要是由于干燥过程中的毛细管压力引起的表面张力的变化所导致凝胶骨架的坍塌[45]。

气凝胶材料按照组成可分为单组分气凝胶和多组分气凝胶,一些生物质气凝胶如木质素类、纤维素类、海藻酸盐类、淀粉类、壳聚糖类、甲壳素类因其原材料来源广泛也受到了广泛关注。用于吸波的气凝胶往往是几种组元复合的气凝胶,比如石墨烯气凝胶(RGO)、CNTs/石墨烯气凝胶、SiCnw/GA、CF/MXene 等[46-47]。

气凝胶吸波材料的优点有:介电常数低、介电常

数连续可调[48]。纳米孔径、孔隙率高、比表面积大。密度低、质量轻。隔热性能优良,具有吸声效果,疏水性能较好[49]。气凝胶很好的超级电容器材料。纳米尺度内电子定域性(库伦堵塞效应)、相干性增加,会发生小尺寸效应、表面效应和宏观量子隧穿效应[15-16]。纳米材料尺度远小于红外及雷达波波长,能级由连续谱变为分裂能级,分裂的能级间隔正处于与微波对应的能量范围内,增加共振吸收概率[15-16]。纳米材料比表面积大、表面不饱和键和悬挂键多,易于电磁波透过,可以形成界面极化,存在多重散射效应,提高了电磁能转化为热能的效率。而且纳米尺度电子自旋扩散长度增加,这都是有利于材料吸波特性的[15-16]。

2.4 过渡金属碳化物氮化物(MXene)类

人们参考石墨烯的分离经验,发现了更多的新型 2D 材料。2011 年,美国德雷塞尔大学的 Gogotsi 教授团队发现了一种新型的 2D 材料群体,它们是过渡金属碳化物或氮化物,并将其命名为 MXenes[50-52]。已经在锂离子电池、钠离子电池、超级电容器、氢储存、传感器、电催化、光催化、离子吸附、生物医用、微波吸收和电磁干扰屏蔽等方面取得了一系列的成果,具有极高的研究价值[51]。

材料制备过程发生的总反应式为:

$$M_{n+1}AX_n \rightarrow M_{n+1}X_nT_x(n=1,2,3)$$

T:表面引入的亲水官能团,也是 Ti 表面处存在的终止官能团(羟基、氟、羰基氧)

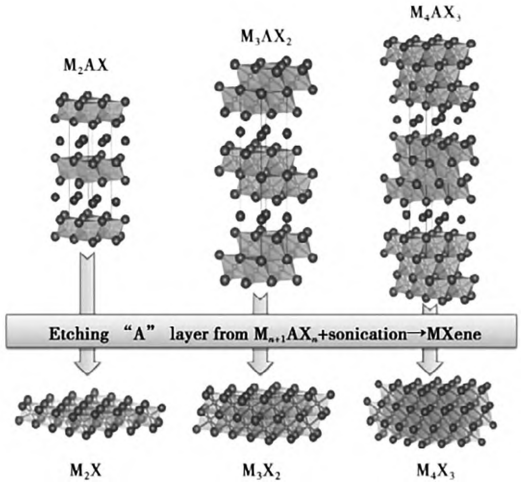

图 4 Max 相及相应的 MXene 结构图[50]

Fig. 4 Max phase and corresponding MXene structure diagram

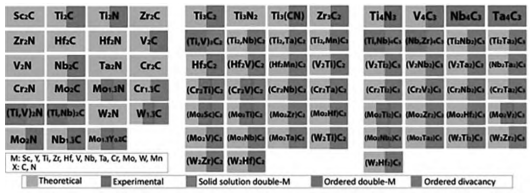

图 5 迄今为止报道的 MXene 成分[52]

Fig. 5 MXene composition reported to date

MXene 中,M 为过渡族元素,A 为 VI 族元素一般为 Al,X 为碳和氮[52-55]。其结构如图 4 所示,图 5 是迄今为止报道的 MXene 成分。

MXene 与前驱体导电陶瓷相 MAX 一致,六方晶系,M 原子六方紧密堆积,X 原子填充八面体空隙。M 原子与 X 原子以共价键方式连接成 MX-6 八面体,层片间以范德华力结合。如表 5 所示,A 原子位于 MX 的层间,A 片层与 MX 片层结合力较弱,M-A 之间的键合力小于 M-X 之间的键合力,利用 MAX 相可以有选择地去除 A 层原子,不破坏 M-X 键[52-55]。

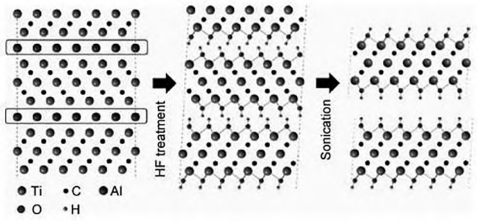

图 6 MAX 陶瓷相经 HF 酸化制备 Ti3C2(MXene)的过程示意图[51]

Fig. 6 Schematic diagram of preparation of Ti3C2(MXene) by HF acidification of MAX ceramic phase

表 5 不同种类层间相互作用[51-59]

Table 5 Interactions between layers of different species

连接方式	键的种类	键的强弱
M-X(Ti-C)	共价键和离子键	强
M- A (TI-Al)	金属键	弱
A- A(Al-Al)	金属键	弱

MXene 的刻蚀过程如图 6 所示,表 6 为不同刻蚀剂及其效果分析。

表 6　不同刻蚀剂及其效果分析[51-59]

Table 6 Analysis of different etching agents and their effects

刻蚀剂种类	刻蚀效果分析
HF	有空洞,MXene 作为增强相,内部存在 MAX 相。
LiF+HCl	形貌不明显,许多掉落的小片状,形成 5 层以下的片层状结构,Li^+、Na^+、K^+插层到层间,使得 MXene 间距显著增大。
NH_4HF_2(氟化氢铵)	产物中含有一定量的杂质$(NH_4)_3AlF_6$难以去除。
路易斯酸氯化物熔融盐	不能高温加热,也不能氯气刻蚀,因为高温加热形成 MX 岩石(脱钛矿)结构,氯气刻蚀形成碳化物衍生炭结构。

2016 年,Qing 等首次研究 MXene 的吸波性能,并发现经过刻蚀的 MXene 在 12.4 ~ 18.0GHz 频率范围的 R_L 值超 -11dB,具有一定的吸波能力;但 MXene 过高的电导率和介电常数会导致电磁波界面反射高、阻抗匹配差,影响电磁波的吸收[53-58]。

MXene 具有储能、催化、储氢、吸附等多功能;具有极高的弹性模量,柔顺性好、导电性好。采用表面修饰、插层、掺杂、改性的方法可以改善层间距、提高导电性。但是目前合成方法不够环保、产率较低、副产物对人体有害。不含 Al 的 MAX 相,不含 F 的刻蚀剂成为研究的热点,如表 4 所示。含氟官能团影响 MXene 性能,使得电化学活性降低,载流子密度、迁移率下降。无官能团的 MXene 具有金属性质,带有官能团的 MXene 则是半导体。MXene 材料具有亲水性,需要在黑暗、低温的环境下储存,对诱导缺陷效应来说,阴离子研究较多,而阳离子研究较少。刻蚀得到的薄片都是多层的,分散不均,容易团聚,如何更安全地制备单层 MXene 值得进一步研究[53-58]。

2.5　高熵陶瓷类

高熵陶瓷主要指五种或五种以上陶瓷组元形成的固溶体材料。因其独特的热力学高熵效应,结构的晶格畸变效应(空位、间隙原子、杂质),动力学的迟滞扩散效应和组元之间的协同增效作用而受到广泛关注。由于不同尺寸、晶格结构的组元固溶在一起,材料的局部化学环境可以产生强烈的晶格畸变和应力涨落,从而增强电子散射作用,增加介电损耗能力[60]。

高熵陶瓷吸波材料的分类如表 7 所示。高熵陶瓷类吸波材料主要包括:过渡金属碳化物、过渡金属二硼化物、稀土金属六硼化物、稀土金属四硼化物类。其吸波机理包括:杂质或者缺陷态在外磁场作用下会发生能级分裂;晶体场效应;d 电子、f 电子可能会发生简并态消除以及低能态向高能态的跃迁包括八面体场能级分裂 John-Taller 效应[61]。

单相 HfC、TaC 吸波性能较好,合金化之后,密度有所下降,TiC 元素的存在会影响吸波性能,所以可以把 Ti 换成 Cr。高熵过渡金属碳化物、高熵过渡金属二硼化物密度较大,绝大多数高熵陶瓷材料的 Curie 点低于室温,以上因素限制了高熵陶瓷的应用。陶瓷材料可以作为磁性吸波材料的包覆物。陶瓷材料具有优良的高温力学性能,例如蠕变低、强度高、耐高温、抗氧化、耐烧蚀和线膨胀系数低等优点。除此之外,陶瓷的脆性、气孔率仍然是限制其应用的关键所在,陶瓷材料能够在吸波中得到应用首先就要解决陶瓷的增韧机制,对于复合材料力学性能,例如断裂韧性、抗弯强度和加工性能的实验数据仍然需要积累和有待进一步研究[60-61]。

表 7　高熵陶瓷吸波材料分类

Table 7 Classification of high entropy ceramic absorbing materials

碳化物类	硼化物类	元素组成
HE TMC-1	HE TMB_2-1	Ti Zr Hf Nb Ta
HE TMC-2	HE TMB_2-2	Ti Zr Hf Nb Ta
HE TMC-3	HE TMB_2-3	Cr Zr Hf Nb Ta

2.6　超材料类

近年来,随着对吸波材料研究的深入,研究人员也开发出一系列新型的具有特殊用途的吸波材料,例如等离子隐身吸波材料、人工表面等离激元、光子晶体、复合吸波结构体和超材料等,超材料结构也可以实现飞行器减缩 RCS 的目标[62-63]。一系列神奇的物理现象因为超材料、超表面的研究而得以实现并得到应用,用光学变换法实现二维、三维宽带“隐身衣”设计、透镜天线、电磁黑洞等,由于经典的吸波结构体存在带宽窄、厚度大、不灵活的问题,而超材料的研制极大地丰富了吸波材料和隐身设计的研究领域和研究内容[62-63]。

超材料是一类可以人工设计的但是在自然界中

并不存在的材料,具有在三维空间中周期或者非周期排列的亚波长的尺寸结构,超材料是一类单负、双负材料或零折射率材料,具有一些特殊的性质,例如逆多普勒效应、逆斯奈尔效应、逆切伦科夫效应、完美透镜效应和电磁涡旋波产生等[63-70]。俄罗斯科学家 Veselago 于 1965 年最早提出左手材料这一概念,之后左手材料的因果性、能量守恒性得以验证。1999 年英国的 Pendry 教授设计了金属线阵列和开口谐振环阵列,从理论上证实了负折射率这一概念,随后 Falcone 等人基于经典的巴卑涅原理提出互补超表面。2001 年,Eshelby 等首次用实验证实负折射现象。2003 年,完美平板成像得以实现。2006 年,Pendry 等人基于光学变换法设计了世界上第一件隐身衣。2008 年,Landy 基于电磁谐振的理念设计出“完美”吸波体。2011 年,美国的 Capasso 教授提出广义斯奈尔定律,设计不同张角和朝向的 V 型单元阵列用于波束的偏折和聚焦[64-65]。超材料可以突破光学衍射极限,用“超透镜”实现“超分辨”平板成像,超材料利用空间相位累积来实现对电磁波的调控,可以在厘米波和毫米波段实现宽频段的电磁波吸收,但是其在太赫兹、红外、光频波段的应用受到一定限制,受 Snoek 极限理论的影响,超材料在低频范围内仍然受到限制[69-72]。在超材料研究的早期,人们关注如何解决高损耗和强色散问题。超表面的设计需要遵循的原则是:保证散射体的自谐振频率远小于第一个可传播的高阶 Floquet-Bloch 模式。如此,就有希望实现多频点谐振。对于超材料和超表面而言,其几何厚度依然是影响吸波性能的重要物理参量[71]。

研究者们采用等效媒质理论、等效电路模型、多级反射干涉理论研究超材料模型[72-73]。目前常见的超材料结构是三明治模型,即“金属—绝缘介质—金属”模型[65]。常用的超材料例如 FSS(普遍为手性结构),可用于多层介质天线罩中,其最主要的特征是特定频率入射的电磁波产生谐振,选择性地反射或透射某个频段或多个频段的电磁波,可以看做一种空间滤波器[72-73]。FSS 大致可分为孔径型和贴片型两类。林为干[74]等人研究了 FSS 贴片单元周期尺寸、开口尺寸、间隙尺寸、铁氧体衬底厚度等对电磁波吸收性能的影响。刘宁[75]等人研究了导弹天线罩 FSS 的快速设计方法,实现了“带内高透波、边缘陡截止、带外宽频带抑制”的设计效果。张明习[76]等人研究了阵列规模、排布方式、边缘截断及曲率对 FSS 阵列电磁特性的影响规律。顾超[67]等人用电阻膜结构代替金属结构,将传统的电磁谐振转化为电路谐振,其设计的吸波超材料具有宽频带、极化不敏感、宽入射角的特点,在自由空间内实现更宽频的阻抗匹配特性,在 7.0—27.5GHz 频段下实现了电磁波的强吸收。莫漫漫[68]等人用拓扑优化的方法制备了一种宽频吸波复合材料,仿真及测试的结果表明,该吸波复合材料在 2—18GHz 频段内的平板测试反射率均小于 -12dB。崔铁军[69]等人在 2013 年提出了一种印刷在超薄柔性介质(聚酰亚胺)上的具有单负介电常数的梳状结构,其优良的传输特性及柔性、超薄及易于加工的性质,将为微波电路的设计带来变革。2014 年,崔铁军[69]等人提出了可编码的二维超表面用以实现单波束、多波束及随机漫反射功能。超材料作为一种新兴材料,正在蓬勃发展,但是目前理论上尚未获得重大突破。此外,完美吸波体的设计,仍然存在带宽窄、极化敏感、角度敏感、调控不灵活等关键技术问题[64],这些问题,制约着吸波超材料的发展,是亟待突破的技术难题和技术瓶颈,目前超材料吸波体的发展向着低频超薄宽带超材料吸波体、多功能集成化超材料吸波体、特殊结构超材料吸波体和动态可调超材料吸波体的方向发展[65]。目前,需要加强理论研究、结构与实验研究、应用与测试技术研究等。

3 总结与展望

目前吸波材料正在朝着“结构-材料-制造”一体化的方向发展,向着复合化、多元化、微型化、智能化的方向发展,这就需要让吸波材料的损耗机制更加丰富。“薄、轻、宽、强”和“吸波—透波”一体化,仍然是不断追求的目标。目前梯度设计的吸波材料的性能优化研究较少,而且实验的可重复性较低。存在这样一个反问题,就是已知材料功能和服役环境,如何设计化学键、原子结构和物理性能。未来的发展方向仍然是需要与计算材料学相结合开展多学科交叉研究,可以考虑用遗传算法设计多层材料的吸波涂层厚度,用粒子群、蚁群算法等优化 FSS 的透波结构。可以考虑用递归类算法计算多层吸波材料的透射或者反射系数。吸波材料与大数据、人工智能、物联网技术的结合较少,研究吸波材料基因组,用高通量技术筛选吸波材料成为了未来的研究

热点。

(1)吸波材料的吸波性能与电磁波入射角度之间的相关性;吸波材料的吸波性能与电磁波极化方式:直线极化、圆极化、椭圆极化之间的相关性;吸波材料吸波性能与 TE/TM 极化方式之间的相关性值得进一步探索。

(2)吸波材料中的多物理场协同作用:类比“磁—光”、“热—电”、“光—电”相互协同,“吸波—隔热”一体化、“吸波—吸声”一体化、“红外—吸波”一体化等多物理场协同作用的吸波材料,有待进一步的研究。

(3)很多吸波材料都是纳米材料(微纳米量级),而纳米材料制备工艺复杂,成本较高,产率较低。如何缩短设计周期,降低复合材料的制备成本,改善制备工艺,提高产率,这急需要克服纳米粒子因为范德瓦尔斯力造成的分散不均匀与团聚现象(控制粒度和聚集度),解决纳米纤维的排列问题[31]。

(4)采用特种成型技术,例如等离子溅射、爆炸喷涂的吸波功能涂层;旋压成形、爆炸焊接成形的薄壁吸波材料构件等有待进一步研究。吸波材料的新型成型工艺例如等离子沉积、激光熔覆、爆炸喷涂等需要进一步研究。吸波材料进行表面处理(例如电子束、离子束等高能束),控制表面粗糙度(表面微观形貌),从而降低电磁波在吸波材料表面的散射,也成为了需要研究的问题。

(5)在理论上进行原始创新,探索超材料与传统吸波材料新的结合方式,研究超材料阵列的设计和快速仿真算法、开发精度更高的仿真软件和提高超材料的加工精度,突破超材料固有的带宽窄、极化敏感、角度敏感、调控不灵活的一些列挑战,也是需要进一步研究的问题。

参考文献:

[1]刘顺华. 电磁波屏蔽及吸收材料[M]. 北京:化学工业出版社,2013. 10

[2]姬金祖. 隐身原理[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2018. 3

[3]李文竹. 散射截面测试与雷达成像研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2013.

[4]谢处方. 电磁场与电磁波[M]. 北京:高等教育出版社,2019. 10

[5]方源. 碳基吸波材料的制备与电磁性能研究[D]. 成都:电子科技大学,2022.

[6]许海龙. 多孔碳吸波剂的微结构设计及电磁性能研究[D]. 西安:西北工业大学,2019.

[7]张晓东,贺亦凡,刘思等. MOF 类衍生材料在电磁吸波领域的研究进展[J]. 材料开发与应用,2020,35(03):82-92.

[8]邹田春,赵乃勤,师春生等. 吸波材料吸波性能的计算及其优化设计[J]. 功能材料,2005,(07):20-23+27.

[9]刘沛江. 石墨烯/铁氧体/聚酰亚胺三元复合材料的制备及其电磁性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.

[10]梅中磊,张黎,崔铁军. 电磁超材料研究进展[J]. 科技导报(北京),2016,34(18):27-39.

[11]Wang C, Han X, Zhang X, et al. Controlled Synthesis and Morphology - Dependent Electromagnetic Propertiesof Hierarchical Cobalt Assemblies[J]. Journal of Physical Chemistry C. 2010, 114: 3196-3203.

[12]Ma Z, Zhang Y, Cao C T, et al. Attractive Microwave Absorption and the Impedance Match Effect in Zinc Oxide and Carbonyl Iron Composite [J]. Physica B Condensed Matter. 2011, 406: 4620-4624.

[13]梅中磊. MATLAB 电磁场与微波技术仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2020. 4

[14]宋潞潞. 掺杂态二氧化锰吸波材料的制备及其电磁波吸收性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2021.

[15]强荣. Fe_xCo_(1-x)/C 与 C@ C 吸波材料的制备及性能[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.

[16]都有为. 磁性材料进展概览[J]. 功能材料,2014,45

[17]何学敏, 钟伟, 都有为. 核壳结构磁性复合纳米材料的可控合成与性能. 物理学报, 2018, 67(22): 227501.

[18]Nicola A. Spaldin. 磁性材料基础与应用[M]. ;彭晓领,等译. 2 版. 北京:化学工业出版社,2021. 12

[19]K. N. Rozanov, "Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 48, no. 8, pp. 1230 - 1234, Aug. 2000,

[20]SNOEK J L. Dispersion and absorption in magnetic ferrites at frequencies above one MC/S[J]. Physica, 1948, 14(4):207-217.

[21]Zhao Y, Liu L, Jiang K, et al. Distinctly enhanced permeability and excellent microwave absorption of expanded graphite/Fe_3O_4nanoring composites[J]. RSC advances, 2017, 7(19): 11561-11567.

[22]张钊;王峰;张新全;等. 低频宽带薄层吸波材料研究进展[J]. 功能材料,2019,50(06):6038-6045.

[23]刘唯,马振叶. 复合吸波材料的研究进展[J]. 南京师大学报:自然科学版,2023,46(2):15-24

[24]赵佳,姚艳青,杨煊赫等. 铁氧体及其复合吸波材料的

研究进展[J]. 复合材料学报,2020,37(11)
[25]韩敏阳,韦国科,周明等. 低频雷达吸波材料的研究进展[J]. 复合材料学报,2022,39(04)
[26]郑航博;高应霞;徐嘉;等. 核壳结构纳米铁氧体吸波材料的研究进展[J]. 中国陶瓷工业,2016,23(03):18-23.
[27]牛芳芳,黄英,李玉青等. 纳米钡铁氧体吸波材料的研究进展[J]. 宇航材料工艺,2009,39(06):6-9.
[28]范艳洁,黄英,黄飞等. 钡铁氧体薄膜的研究及应用[J]. 磁性材料及器件,2006(06):7-12.
[29]王二永,罗驹华. 纳米钡铁氧体制备新进展[J]. 化工进展,2012,31(08):1767-1774.
[30]金宇龙,董胜奎. 新型碳纳米管吸波材料研究进展及展望[J]. 材料导报,2015,29(S2):19-22.
[31]杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报,2007,(01):1-12.
[32]安振国, 刘冉, 张敬杰. 碳-磁性材料复合电磁波吸收剂研究进展[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程,2022, 14(6): 499-518.
[33]哈恩华,黄大庆,丁鹤雁. 新型轻质雷达吸波材料的应用研究及进展[J]. 材料工程,2006,(03):55-59.
[34]孙昌. 低频微波吸收剂的优选、制备及性能研究[D]. 济南:山东大学,2007.
[35]毛倩瑾,周美玲,陆山,等. 导电高聚物吸波材料的研究进展[J]. 北京工业大学学报,2004,30(4):488-493
[36]于海涛. 导电高分子材料在智能隐身技术中的应用[J]. 上海涂料,2010,48(02):26-29.
[37]段玉平. 炭黑、聚苯胺及其填充材料的制备和电磁特性[D]. 大连:大连理工大学,2006.
[38]杜玙璠. 红外微波兼容材料的制备及性能研究[D]. 北京:. 北京交通大学,2011.
[39]郝璐, 于德梅. 聚吡咯纳米复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(9): 21110151-10.
[40]谢阿明, 吴凡, 蒋莱, 等. 分子基导电聚合物吸波材料: 进展与未来挑战. 科学通报, 2023, 68: 3353-3367
[41]Yan J, Huang Y, Liu X D, etal. Polypyrrole-Based Composite Materials for Electromagnetic Wave Absorption, [J]. Polymer Reviews,2021, 61:3, 646-687.
[42]吴晓栋;宋梓豪;王伟;等. 气凝胶材料的研究进展[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2020,42(04):405-451.
[43]吴国友;程璇;余煜玺;等. 常压干燥制备二氧化硅气凝胶[J]. 化学进展,2010,22(10):1892-1900.
[44]秦国彤;门薇薇;魏微;等. 气凝胶研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2005,(02):293-296.
[45]史亚春;李铁虎;吕婧,等. 气凝胶材料的研究进展[J]. 材料导报,2013,27(09):20-24.
[46]章婷,赵春林,乐弦等. 气凝胶研究进展[J]. 现代技术陶瓷,2018,39(01):1-39.
[47]张泽,王晓栋,吴宇等. 气凝胶材料及其应用[J]. 硅酸盐学报,2018,46(10):1426-1446. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.2018.10.14.
[48]吴志坚. 无机气凝胶研究进展[J]. 材料导报,2001,(11):38-40.
[49]孔勇,沈晓冬,崔升. 气凝胶纳米材料[J]. 中国材料进展,2016,35(08):569-576+568.
[50]刘永蕾,王逢源,韩喜江等. 碳基气凝胶复合材料电磁波吸收材料研究进展[J]. 信息对抗技术,2022,1(02):1-15.
[51]Naguib M, Kurtoglu M, Presser V, et al. Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti_3AlC_2[J]. Advanced Materials, 2011, 23(37): 4248-4253.
[52]韦华伟. Ti_3C_2T_x 复合材料的制备及其电磁波吸收屏蔽性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
[53]王杰, 郝玮, 胥生元,等. 二维材料 MXene 的制备与电学性能研究进展. 功能材料. 2022,53(3):3048-3057
[54]张建峰,曹惠杨,王红兵. 新型二维材料 MXene 的研究进展[J]. 无机材料学报,2017,32(06):561-570.
[55]Naguib M, Mochalin V N, Barsoum M W, et al. 25th Anniversary Article: MXenes: A New Family of Two-Dimensional Materials[J]. Advanced Materials, 2014, 26(7): 992-1005.
[56]刘后宝, 傅仁利, 苏新清, 等. MXene 材料的结构、性能及在电磁屏蔽领域的应用[J]. 材料导报, 2021, 35(13): 13067-13074.
[57]朱莉莉, 康帅, 胡祖明, 等. MXene 及其复合吸波材料组成与结构的研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(6):3167-3186.
[58]吴梦, 饶磊, 张建峰, 等. MXene 及其复合吸波材料的制备与性能研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(3):942-955.
[59]QING Y C, ZHOU W C, LUO F, etal. Titanium carbide (MXene) nanoshets as promising microwave absorbers[J]. Ceramics International, 2016, 42(14): 16412-16416.
[60]范冰冰,邱洪辰,李梦茹等. 高熵陶瓷吸波材料研究进展[J]. 硅酸盐学报,2023,51(12):3204-3214.
[61]张伟明,向会敏,戴付志,等. 高熵陶瓷:吸波材料设计新策略[J]. 宇航材料工艺,2022,52(2):13-25
[62]吕通,张辰威,刘甲等. 吸波超材料研究进展[J]. 复合材料学报,2021,38(01):25-35.
[63]王彦朝,许河秀,王朝辉,等. 电磁超材料吸波体的研究

进展[J]. 物理学报,2020,69(13):39-51.
[64]张文毓. 超材料的研究进展与应用[J]. 装备机械,2018(2):67-71
[65]陈天航, 何磊明, 袁宏皓,等. 电磁超材料及智能超材料隐身技术发展现状及趋势[J]. 空军工程大学学报,2023,24(3):26-33
[66]孔静,高鸿,李岩,等. 电磁屏蔽机理及轻质宽频吸波材料的研究进展[J]. 材料导报,2020,34(9):55-63
[67]顾超, 屈绍波, 裴志斌,等. 基于电阻膜的宽频带超材料吸波体的设计. 物理学报, 2011, 60(8): 087802.
[68]莫漫漫, 马武伟, 庞永强, 等. 基于拓扑优化设计的宽频吸波复合材料. 物理学报, 2018, 67(21): 217801.
[69]刘硕. 基于数字表征的编码超表面及其应用[D]. 东南大学,2017.
[70]张宇豪. 频率选择表面电磁波调控与 RCS 缩减研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
[71]王国栋. 电磁超材料的设计及其吸波性能的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
[72]张琤. 基于超材料的隐身技术研究[D]. 南京:东南大学,2019.
[73]陈曦. 超材料的电磁特性与应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2013.
[74]许占显,贾宝富,林为干. 铁氧体衬底——手征性材料隐身波特性研究[J]. 材料导报,2007,(01):129-132.
[75]刘宁. 高性能频率选择表面天线罩快速设计方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2019.
[76]张明习. 高性能频率选择表面隐身雷达罩性能机理与综合设计方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.