

**Low-frequency Microwave
Absorbers and Applications**

低频吸波材料及应用

孙 昌 曹晓非 孙康宁 著



化学工业出版社

低频吸波材料及应用

孙 昌 曹晓非 孙康宁 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共分为 8 章。第 1 章重点论述了吸波材料的研究意义、吸波材料的研究现状以及发展趋势；第 2 章详细介绍了锂锌铁氧体的制备工艺及工艺参数对低频吸波性能的影响；第 3、4 章分别叙述了镁、铜、镧和铈等元素掺杂对锂锌铁氧体结构与吸波性能的影响；第 5 章通过制备乙炔炭黑/锂锌铁氧体复合材料研究了吸波性能的预设计；第 6 章研究了有机/无机复合吸波材料的制备及在一定频段内电磁属性及微波吸收特性；第 7 章介绍了细颗粒吸波剂在聚合物中往复射流分散技术的研究；第 8 章从阻抗匹配及损耗机制两方面探讨了聚合物基纳米复合吸波材料的吸波机理。

本书力求为有关吸波材料的研究人员、大学相关专业高年级学生提供一些参考。同时也为研究生教学提供一本参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

低频吸波材料及应用/孙昌，曹晓非，孙康宁著. —北京：
化学工业出版社，2015. 12 (2016. 4 重印)

ISBN 978-7-122-25486-3

I. ①低… II. ①孙…②曹…③孙… III. ①电磁波-微
波吸收材料 IV. ①TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 253259 号

责任编辑：闫 敏 杨 菁
责任校对：边 涛

文字编辑：贾 彬
装帧设计：张 辉

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 装：北京科印技术咨询服务公司海淀数码印刷分部
710mm×1000mm 1/16 印张 11 字数 197 千字 2016 年 4 月北京第 1 版第 2 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：http://www.cip.com.cn
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：36.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着经济、科学技术和电子工业的发展,电磁辐射的危害日益严重。电磁辐射已成为继大气污染、水污染和噪声污染之后的第四污染源,给人们的身体健康带来严重威胁。针对日常电磁污染的防护要求,设计及制备吸波材料是解决电磁污染危害的有效途径。此外,作为肿瘤热疗用的热种子材料也需要在低频段具有良好的微波吸收性能和高产热特性。因此,对电磁波吸收材料的研究具有非常重要的意义,制备新型复合吸波材料成为当前的研究热点。

吸波剂本身的性能很大程度上决定着复合吸波材料的吸波性能的优劣,本书中利用溶胶-凝胶工艺制备了系列铁氧体、掺杂铁氧体以及其他无机材料作为吸波剂。同时,研究了这些吸波剂与有机组分复合后的吸波性能,以便优选所需材料。

本书作者将多年来有关低频吸波材料的研究成果整理成书,共分为8章。第1章重点论述了吸波材料的研究意义、吸波材料的研究现状以及发展趋势;第2章详细介绍了锂锌铁氧体的制备工艺及工艺参数对低频吸波性能的影响;第3、4章分别叙述了镁、铜、镧和铈等元素掺杂对锂锌铁氧体结构与吸波性能的影响;第5章通过制备乙炔炭黑/锂锌铁氧体复合材料研究了吸波性能的预设计;第6章研究了有机/无机复合吸波材料的制备及在一定频段内电磁属性及微波吸收特性;第7章介绍了细颗粒吸波剂在聚合物中往复射流分散技术的研究;第8章从阻抗匹配及损耗机制两方面探讨了聚合物基纳米复合吸波材料的吸波机理。本书力求为有关吸波材料的研究人员、大学相关专业高年级学生提供一些参考。同时也为研究生教学提供一本参考书。

本研究工作先后得到国家自然科学基金项目(30540061、50672051和81171463)、国家863计划(2003AA302232)、中国博士后基金(200804401138)、山东省及济南市科技攻关项目(054042)、山东建筑大学博士科研基金(XNBS1258)的支持。

由于时间仓促,作者水平有限,不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正。

作者

目 录

第 1 章 低频吸波材料概述	1
1.1 低频电磁辐射概况	1
1.1.1 低频电磁辐射的危害	1
1.1.2 电磁辐射的防护途径	2
1.2 吸波材料	3
1.2.1 吸波材料的电物理特性	3
1.2.2 吸波材料电磁参数的匹配与作用机理	7
1.3 吸波材料研究现状及发展趋势	8
1.3.1 吸波材料研究现状	8
1.3.2 低频吸波材料研究发展趋势	13
参考文献	14
第 2 章 锂锌铁氧体的制备及低频吸波性能	19
2.1 实验原料与设备	20
2.1.1 实验原料	20
2.1.2 实验仪器与设备	20
2.2 分析及测试技术	20
2.2.1 热分析	20
2.2.2 X 射线衍射	21
2.2.3 扫描电镜	22
2.2.4 透射电镜	22
2.2.5 电磁吸波性能测试	22
2.2.6 MATLAB	25
2.3 锂锌铁氧体的制备工艺及其化学组分配比的选择	26
2.4 锂锌铁氧体后续热处理工艺参数的确定	31
2.4.1 纯锂锌铁氧体干凝胶的 TG/DTA 分析	31
2.4.2 热处理工艺参数对纯锂锌铁氧体微观结构的影响	32
2.4.3 热处理工艺参数对锂锌铁氧体电磁吸波性能的影响	36
2.5 制备工艺参数对纯锂锌铁氧体吸波性能的影响机理分析	41
2.6 氧化铋及硝酸铋抑制剂对纯锂锌铁氧体的影响	45
本章小结	47

参考文献	48
第3章 掺杂镁和铜对锂锌铁氧体的结构及吸波性能的影响	49
3.1 掺杂镁和铜的锂锌铁氧体的制备	49
3.2 掺杂镁和铜对锂锌铁氧体的影响	50
3.2.1 掺杂镁和铜对锂锌铁氧体微观结构的影响	50
3.2.2 掺杂镁和铜对锂锌铁氧体吸波性能的影响	51
3.2.3 镁和铜的掺杂影响机理分析	53
3.3 镁的不等量掺杂对锂锌铁氧体的影响	54
3.4 铜的不等量掺杂对锂锌铁氧体的影响	57
本章小结	59
参考文献	60
第4章 掺杂镧和铈对锂锌铁氧体的结构及吸波性能的影响	61
4.1 掺杂镧和铈的锂锌铁氧体的制备	61
4.2 掺杂镧和铈对锂锌铁氧体的影响	62
4.2.1 掺杂镧和铈对锂锌铁氧体微观结构的影响	62
4.2.2 掺杂镧和铈对锂锌铁氧体电磁吸波特性的影响	63
4.2.3 镧和铈的掺杂影响机理分析	64
4.3 镧的不等量掺杂对锂锌铁氧体的影响	66
4.4 铈的不等量掺杂对锂锌铁氧体的影响	68
本章小结	73
参考文献	74
第5章 乙炔炭黑/纯锂锌铁氧体复合材料的预设计及制备	76
5.1 全貌分析法	76
5.2 利用 MATLAB 对复合材料的预设计及制备	77
5.3 实际制备的复合材料的微观结构及吸波性能	79
5.3.1 实际制备的复合材料的微观结构	79
5.3.2 实际制备的复合材料的吸波性能	82
5.4 复合材料的实际吸波性能与预定值产生差异的机理分析	84
本章小结	85
参考文献	86
第6章 有机/无机复合吸波材料的制备与性能	87
6.1 技术路线、实验原料与实验方法	87
6.1.1 技术路线	87
6.1.2 材料的选择与设计	88
6.1.3 实验原料与设备	90

6.1.4 分析测试技术	91
6.2 吸波剂的制备与表征	92
6.2.1 吸波剂的制备工艺	92
6.2.2 结果与讨论	96
6.3 Sol-gel 工艺制备铁氧体纳米粉体的动力学分析	111
6.3.1 溶胶-凝胶化阶段的反应及动力学分析	112
6.3.2 热处理阶段的反应及动力学分析	114
6.4 石蜡基复合吸波材料的制备与微波吸收性能	118
6.4.1 石蜡基复合吸波材料试样的制备	119
6.4.2 石蜡基复合吸波材料试样的微波吸收性能研究	120
6.4.3 吸波性能比较与优选	129
6.5 不饱和聚酯基复合吸波材料的制备与微波吸收性能	130
6.5.1 不饱和聚酯基复合吸波材料试样的制备	130
6.5.2 不饱和聚酯基复合吸波材料试样的微波吸收性能研究	131
6.5.3 吸波性能比较与优选	136
本章小结	137
参考文献	138
第 7 章 细颗粒吸波剂在聚合物中往复射流分散技术的研究	143
7.1 细颗粒吸波剂在聚合物中的分散技术现状	143
7.2 往复射流分散机理与分散装置的设计	144
7.2.1 变截面区域内往复射流的分散机理	144
7.2.2 往复射流分散装置的设计	146
7.3 不同分散工艺对锂锌铁氧体在聚合物中分散性的影响	147
7.3.1 不同分散工艺对前驱体混合物流动性的影响	147
7.3.2 不同分散工艺对锂锌铁氧体在固化基体中的分布的影响	149
7.3.3 混合物组分含量对锂锌铁氧体在固化基体中的分布的影响	150
7.4 不同分散工艺对碳纳米管在聚合物中分散性的影响	151
本章小结	154
参考文献	154
第 8 章 聚合物基纳米复合吸波材料的吸波机理及设计初探	156
8.1 匹配原理	156
8.2 聚合物基纳米复合吸波材料的吸波机理	157
8.2.1 量子尺寸效应	157
8.2.2 表面效应	159
8.2.3 共振吸收	159
8.2.4 磁性纳米吸波材料损耗机制	160

8.2.5 掺杂对电磁波吸收的影响 161

8.2.6 吸收剂颗粒的散射、吸收、消光截面和电磁波的能量衰减 161

8.3 聚合物基复合吸波材料的吸波机理模型及理论计算 163

本章小结 165

参考文献 165

第 1 章 低频吸波材料概述

1.1 低频电磁辐射概况

1.1.1 低频电磁辐射的危害

现代科学研究表明：电子电路中的任何交流电在其周围都会形成交变的电磁场，而交变的电场与磁场相互垂直，以源为中心向周围空间交替产生并以一定的速度传播，这称为电磁波。而在电磁波向外传播的过程中，会伴随有电磁能量的输送，这种现象称为电磁辐射。随着科学技术的进步，无线电技术已经被广泛应用于国防、工农业生产、交通运输、通讯、信息产业、医学、民用电器电子等各个领域，这一切在为人类创造巨大的物质文明的同时，也逐渐产生了一个充满人造电磁辐射的环境^[1,2]。电磁辐射污染成为继废水、废气、固体废弃物、噪声污染之后又一大影响城镇居民身体健康的重要污染源。低频电磁辐射所产生的负面影响主要表现为：电磁辐射会造成广播与电视信号无法正常接收，自动控制信号失误，电子仪器仪表失灵，医院的医疗器械或病人的心脏起搏器受干扰等，从而带来大量的经济损失；而计算机等电子设备工作时产生的电磁辐射，也称为电磁泄漏，因可以再现原始信息，所以可能导致重要信息的泄露^[3,4]；电磁波会干扰人体的生物电，尤其会对脑电和心电产生干扰，从而影响脑的正常功能和心血管循环系统的正常活动，而医学研究也表明，过量的电磁辐射能够诱发癌症并加速人体的癌细胞增殖，并对人的生殖系统产生影响。因此，随着欧盟在 1996 年元旦颁布 CE 标准和电子设备投放市场前必须通过电磁兼容指标检查的规定后，世界各国也陆续开始遵循该法。目前，国外现行的电磁辐射防护标准包括由美国国家标准协会和美国电子电气工程师协会共同制定的 IEEE C95.1 标准及在国际非电离辐射防护委员会制定的 ICNIRP 导则基础上加以改良的相关标准^[5]。而我国现行的电磁辐射防护标准主要由卫生部和国家环保局制订，包括有 GB 9175—88《环境电磁波卫生标准》、GB 8702—88《电磁辐射防护规定》、HJ/T10.3—1996《电磁辐射环境影响评价方法与标准》等^[6,7]。但大量电磁场生物效应等方面的研究表明，上面所提到的标准均存在着不足。随着对电磁辐射的非热效应、累积效应等作用机理研究的深入，这一系列标准势必向更系统、更有效的方向转变。因此，加强对低频电磁辐射的高效防护

技术及材料的进一步研究和制造,不仅是提升我国电子产品在整个世界市场中整体竞争力的必要条件,更是有效强化对已知有害电磁辐射的公益性防护,进而保障我国广大人民群众的健康利益、建设和谐小康社会的重要基础。

1.1.2 电磁辐射的防护途径

电磁辐射过程必须具备三要素:电磁辐射源、电磁敏感设备、传播途径,三者缺一不可。因此对于低频电磁辐射的防护可针对这三个要素进行,如减少辐射源的原始输出辐射、增强敏感设备的抗辐射能力、切断电磁辐射的传播途径等。预防或减少电磁辐射的伤害,其根本出发点是消除或减弱人体所在位置的磁场强度,主要防护措施包括屏蔽和吸收。

屏蔽就是采用一定的技术手段,将电磁辐射的作用和影响限定在一定的空间内,防止其传播与扩散。按照辐射场源与工作性质不同,可采用主动场屏蔽和被动场屏蔽两种形式,通常两种均采用板状、片状或网状的金属组成的外壳进行屏蔽。其中,主动场屏蔽是将场源置于屏蔽体内,这种方式适用于辐射源较集中,辐射功率大,工作人员作业位置不固定等场合;而被动屏蔽是将场源置于屏蔽体外,实现屏蔽体中的人由于屏蔽作用而免受伤害。这种方式适用于辐射体较分散、工作人员作业位置固定的场合。同时,为防止屏蔽体成为二次辐射源,屏蔽体应有良好的接地^[8]。

吸收是指利用特定的吸收材料将电磁辐射能量吸收掉以降低其强度。这种材料大致可分为谐振性吸收材料和匹配性吸收材料两大类。前者利用了某些材料的谐振特性,可吸收的微波频率范围较窄,但应用相对方便;后者则利用材料和自由空间的阻抗匹配达到吸收辐射能量的目的,吸收的微波频率范围较宽,但制备及实际操作较繁琐。吸收防护措施一般用于微波设备的调试上,其要求在场源附近就能把辐射能量大幅度衰减下来,以防止对较大范围的空间产生污染^[9]。相对于屏蔽只是对电磁辐射危害进行转移、且易产生二次污染的问题,吸收这种防护方式显得更为有效和彻底。

电磁辐射防护的实际应用主要包括电磁辐射防护织物、涂料等。电磁辐射防护标准出台后,电磁辐射屏蔽材料随之出现。最早的是金属丝和服饰纱混编织物,其后出现了金属纤维混纺织物、电镀织物、化学镀织物等,以上材料均以反射为主,存在环境二次污染。20世纪80年代以后,微波吸收材料的引入和金属化纤维制造技术的出现,使得电磁辐射防护织物的发展进入到一个全新的阶段^[10~13]。现有电磁辐射防护织物的价格相对昂贵,其防护效果不甚理想,当电磁波辐射到织物表面时,主要发生反射、吸收和散射,还有少量投射出去。而反射、散射作用会对环境产生二次污染。因此,在发生源附近利用防辐射涂料对电磁辐射进行吸收防护相对

更为合理有效。电磁辐射防护涂料按功能可分为屏蔽涂料、吸波涂料和屏蔽吸收型涂料。目前市场上广泛应用的屏蔽涂料多为掺杂型导电涂料,其导电性虽然相对良好,但导电微粒的相关因素对材料导电性的影响及其与基材的相互协调、基材本身的物理化学特性对材料整体性质的影响等问题仍有待解决。吸波涂料方面,国内由于特种需要,较偏重于毫米波段吸波涂料的研究,但涂层过厚,附着力、耐候性及兼容性不好等问题限制了其产业化。厘米波及分米波吸收方面,尚无实用涂料,而日本、美国等国家的相应产品则比较成熟^[14]。屏蔽涂料的导电性和吸波涂料的吸收特性需进一步提高,吸收带宽、兼容性、适用厚度、附着力、耐候性、成本等综合性能也要求尽可能优化。这是电磁辐射防护涂料目前有待解决的一系列问题。

1.2 吸波材料

电磁波吸收材料是一种能够通过自身的吸收作用衰减电磁波,反射、散射和透射作用都很小的功能材料。其基本原理是将电磁波转换为热能、电能或机械能等其他形式的能量而消耗掉。按照电磁波吸收材料的工作原理可分为以下基本类型:复磁导率与复介电常数基本相等的吸波材料、四分之一波长“谐振”吸波材料、阻抗渐变“宽频”吸波材料、衰减表面电流的薄层吸波材料^[15,16]。

1.2.1 吸波材料的电物理特性

1.2.1.1 复磁导率

复磁导率(μ)是吸波材料电磁特性的基本参数之一,其先进性与实用性是评价吸波材料优劣的重要依据。对复磁导率的物理意义的理解有助于深入探讨吸波材料的吸波机理。

磁介质在外磁场中会被磁化,其磁化强度用磁化度 M 表示。在静磁场中大多数各向同性的磁介质内部任一点的磁化强度 M 和该点的磁场强度 H 成正比,比例系数 x_m 为定值, x_m 被称为磁化率,即

$$M = x_m H \quad (1-1)$$

磁介质中的磁感应强度 B 可以表示为

$$B = \mu_0 (M + H) = \mu_0 (1 + x_m) H = \mu_0 \mu_r H \quad (1-2)$$

式中, μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$; μ_r 为相对磁导率。

当外加磁场为交变磁场时,由于存在磁滞效应、涡流效应、磁后效应、畴壁共振和自然共振等,介质磁化状态的改变在时间上落后于外场的变化,需要考虑到磁化的时间效应。当外加交变磁场的振幅为 H_m ,角频率为 ω 时,可表示为

$$H = H_m \cos \omega t \quad (1-3)$$

相应的磁感应强度 B 也呈周期性变化, 当在时间上落后于 H 一个相位差 δ , 设其振幅为 B_m , 那么磁感应强度 B 可以表示为

$$B = B_m \cos(\omega t - \delta) \quad (1-4)$$

在动态磁化强度过程中, 为表示交变场中的 B 和 M 的关系, 引入复数磁导率的概念, 用它来反映 B 和 M 之间的振幅和相位的关系

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (1-5)$$

将 B 和 H 都用复数表示

$$\widetilde{H} = H_m e^{j\omega t} \quad (1-6)$$

$$\widetilde{B} = B_m e^{j(\omega t - \delta)} \quad (1-7)$$

可以求得复数形式的相对磁导率

$$\mu_r = \frac{\widetilde{B}}{\mu_0 \widetilde{H}} = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} e^{-j\delta} = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} (\cos \delta - j \sin \delta) \quad (1-8)$$

所以

$$\mu' = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \cos \delta \quad (1-9)$$

$$\mu'' = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \sin \delta \quad (1-10)$$

均匀交变场中铁磁体在单位时间, 单位体积内的平均能量损耗为

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T H dB = \frac{1}{T} \int_0^T H_m \cos B_m \sin(\omega t - \delta) \omega dt = \frac{1}{2} \omega H_m B_m \sin \delta$$

考虑到式(1-10) 可以得到

$$p = \frac{1}{2} \omega \mu_0 \mu'' H_m^2 \quad (1-11)$$

由式(1-11) 得出, 由于磁感应强度落后于外场 H , 才引起介质对外场能量的消耗, 其磁损耗功率与复磁导率的虚部成正比, 而磁介质内部储存能量的密度为

$$\overline{\omega} = \frac{1}{2} HB = \frac{1}{2} H_m B_m \cos \delta \quad (1-12)$$

考虑到式(1-9), 可以得到

$$\overline{\omega} = \frac{1}{2} \mu_0 \mu' H_m^2 \quad (1-13)$$

可见, 交变磁场中磁介质内储存的能量密度与复磁导率的实部成正比。而能量的损耗由吸波材料的复磁导率的虚部决定。

1.2.1.2 复介电常数

复介电常数与复磁导率一样,是表征吸波材料电磁属性的基本参数之一,是评价吸波材料优劣的主要依据。对复介电常数物理意义的理解有助于深入探讨吸波材料的吸波机理。

电介质的特征是以正、负电荷重心不重合的电极化方式传递或记录(存储)电的作用和影响,在电场的作用下电解质电极化一般包括三个过程:①原子核外电子云的畸变极化;②分子中正、负离子的(相对)位移极化;③分子固有电矩的转向极化。介质的相对介电常数综合反映电极化过程的宏观物理量,极化的建立都会影响到频率。因此介电常数是频率的函数。

在静电场中,介质发生极化时,单位体积内分子电矩的矢量和成为电极化强度,用 P 表示,对各向同性的电介质, P 与外场场强 E 有如下关系

$$P = \chi_e \epsilon_0 E \quad (1-14)$$

式中, χ_e 为极化率,是一标量常数; ϵ_0 称为真空介电常数,等于 $8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。电位移 D 可以表示为

$$D = \epsilon_0 E + P = (1 + \chi_e) \epsilon_0 E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (1-15)$$

式中, ϵ_r 为相对介电常数,无量纲。

在交变电场中,随外场频率的增加,介质的极化逐渐落后于外场的变化,对于无损耗理想电容器,如图 1-1(a) 所示,两极板间为真空,电容量为 C_0 。当两极板间加上角频率为 ω 的正弦交变电压 V 时,电流与电压的关系为

$$I = j\omega C_0 V \quad (1-16)$$

电流与电压有 $\frac{\pi}{2}$ 的相位差,如图 1-1(b) 所示。

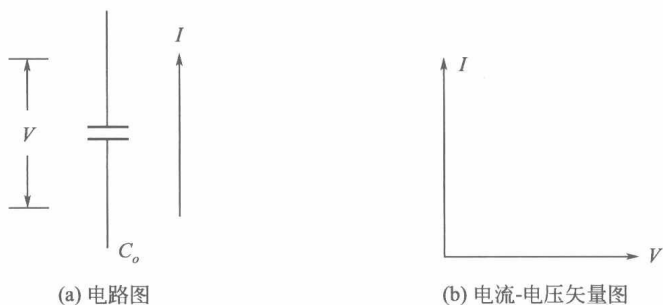


图 1-1 理想真空电容器示意图

如果在电容的两极板间充满介电常数为 ϵ 的电介质,如图 1-2(a) 所示,电容量变为

$$C = \epsilon C_0 \quad (1-17)$$

该情形下电流与电压的关系为

$$I = j\omega CV \quad (1-18)$$

这时电压与电流的相位差总是小于 $\frac{\pi}{2}$ ，如图 1-2(c) 中的矢量图所示，取电压的方向为实轴的方向，那么电流的实轴分量可以表示为 $\omega\epsilon''C_0V$ ，虚轴分量为 $\omega\epsilon'C_0V$ ，其中 ϵ' 和 ϵ'' 为两个实数，那么电流可以表示为

$$I = \omega\epsilon''C_0V + j\omega\epsilon'C_0V = j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')C_0V \quad (1-19)$$

比较式(1-19) 与式(1-16) 得

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1-20)$$

式(1-20) 即为复数表示的复介电常数。

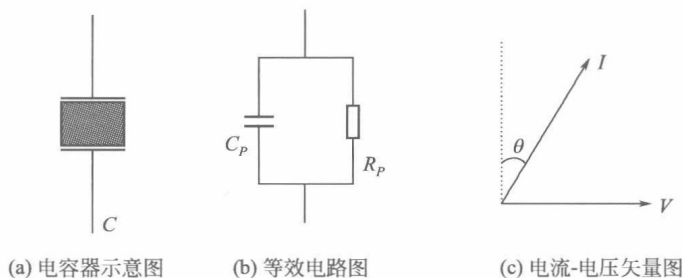


图 1-2 充满介质的电容器示意图

充满介质的电容器可以等效于电容与电阻的并联电路，如图 1-2(b) 所示，电容为 C_P ，电阻为 R_P ，电流与电压有下面的关系

$$I = j\omega C_P V + \frac{V}{R_P} \quad (1-21)$$

对照式(1-19)，有如下关系

$$C_P = \epsilon' C_0 \quad (1-22)$$

$$R_P = \frac{1}{\omega\epsilon'' C_0} \quad (1-23)$$

式(1-22) 和式(1-23) 清楚地说明了复介电常数的物理意义，即实部与相对介电常数意义相同，代表储存能量的能力；虚部相当于在电容上并联一个等效电阻，其标志着电介质损耗能量的能力^[15,17]，即吸波材料对电磁波的介电损耗可以通过复介电常数的虚部来表征。

1.2.1.3 磁损耗角正切

磁损耗角正切 $\tan\delta_\mu$ 是表征吸波材料电磁特性的一个重要参数，在实践中应用

较为广泛。由于磁介质磁导率的虚部与磁损耗相对应,因此,对于介质的磁损耗,工程上经常用磁介质磁导率的虚部与磁介质磁导率的实部比值来描述。

$$\tan\delta_{\mu} = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (1-24)$$

磁损耗角正切的值越大,吸波材料的损耗能力越强。

1.2.1.4 电损耗角正切

电损耗角正切 $\tan\delta_{\epsilon}$ 是表征吸波材料电磁特性的一个重要参数,被广泛应用于研究和工程生产中,根据式(1-20),电损耗角正切定义为:

$$\tan\delta_{\epsilon} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (1-25)$$

电损耗角正切是频率和温度的函数^[18,19],电损耗角正切与吸波材料的损耗能力成正比。

根据式(1-24)、式(1-25),似乎意味着吸波材料的复介电常数 ϵ'' 和复磁导率 μ'' 的虚部越大,其吸波能力越强。然而,吸波剂的选择和材料的结构设计往往是紧密联系在一起的。实际应用中,常常根据不同的结构设计来选用具有合适电磁参数的吸波剂。因此,一心追求大的 μ'' 或 ϵ'' 的做法是不对的。

1.2.1.5 吸波材料反射率

吸波材料反射率是表征吸波性能的重要指标,它表示吸波材料相对于金属平板反射的大小。吸波材料反射率定义为:在给定频率和极化的条件下,电磁波从同一角度,以同一功率密度入射到吸波材料和良导体表面,吸波材料平面与同尺寸良导体平面镜面方向反射功率之比。即

$$\Gamma = \frac{P_a}{P_m} \quad (1-26)$$

式中, Γ 、 P_a 和 P_m 分别代表吸波材料反射率、吸波材料样板的反射功率和良导体平面底板的反射功率。

通常以分贝表示

$$\Gamma_{dB} = 10\lg\Gamma_a - 10\lg\Gamma_m \quad (1-27)$$

显然,吸波材料反射率为负值,其绝对值越大则表示吸波材料对电磁波的损耗越大。

1.2.2 吸波材料电磁参数的匹配与作用机理

吸波材料吸收电磁波的基本物理原理是材料对入射电磁波实现有效吸收,将电磁波能量转换为热能或其他形式的能量而耗散掉。该材料应具备两个特性,即波阻抗匹配特性和衰减特性。阻抗匹配特性即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 $R=0$ ），从而尽可能地从表面进入介质内部。最简单的情况是电磁波从自由空间垂直射到介质表面，对于单层吸波材料模型，一束正弦波平面波垂直照射到接有负载的单层吸收板上，在界面处发生反射和入射现象，则反射系数取决于界面处波阻抗 Z_{in} 和空气的阻抗 Z_0 。反射率由反射系数决定

$$R = \frac{Z_0 - Z_{in}}{Z_0 + Z_{in}} \quad (1-28)$$

$$Z_{in} = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \quad (1-29)$$

$$Z_0 = \frac{\mu_0}{\epsilon_0} \quad (1-30)$$

式中， E 、 H 分别表示介质中有电磁波传播时的电场强度和磁场强度，当 $Z_{in} = Z_0$ 时，反射系数 $R=0$ ，则 $\mu_r = \epsilon_r$ ，即该材料与自由空间波阻抗达到了匹配。对某个特定波长而言，可设计厚度为 $\lambda/4n$ 、 $\lambda/2n$ 的吸波层（称窄带谐振吸收层），此时介质上下表面反射的波干涉相消使 R 最小。

衰减特性是指进入材料内部的电磁波因损耗而迅速被吸收。损耗大小可用电损耗因子和磁损耗因子来表征。由式(1-24) 和式(1-25) 可知，复介电常数虚部 ϵ_r'' 和复磁导率虚部 μ_r'' 越大，损耗越大，越利于电磁波的吸收。这一点可应用于电磁波的选择与设计中，根据实际应用，通过考察及调整新材料的复介电常数虚部 ϵ_r'' 和复磁导率虚部 μ_r'' 的值，从而获得电磁损耗强且阻抗尽可能匹配的吸波材料。而理想的电介质和磁介质的 $\epsilon_r''=0$ ， $\mu_r''=0$ ，介质将不吸收功率。因此吸波材料的电磁参数对材料的电磁波吸收性能至关重要。

1.3 吸波材料研究现状及发展趋势

1.3.1 吸波材料研究现状

现代微波电子技术的飞速发展和广泛应用，使电磁波在空间分布的强度和波长范围日渐增大。这促使电磁波吸收材料的应用领域进一步扩大，同时也对吸波材料的综合性能提出了“薄、宽、轻、强”（即厚度薄、吸收频带宽、质量轻、吸收能力强）及智能化的要求。国内外科研工作者在对改良以往的传统吸波材料的同时，也对新型吸波材料进行了一系列探索，其中研究应用的重点主要集中在以下几个方面：纳米吸波材料、导电高聚物吸波材料、手性吸波材料、多晶铁纤维吸波材料、铁氧体吸波材料、兼容可见光、红外及雷达多波段的吸波材料、智能吸波材料与结构等。

1.3.1.1 纳米吸波材料

纳米材料是指组分微粒的特征尺寸为纳米量级(1~100nm)的材料。当组分粒子尺寸进入纳米量级时,纳米材料自身表现出小尺寸效应、表面效应及量子尺寸效应。由于纳米颗粒尺寸小,比表面积大,表面原子比例高,悬挂键增多,从而使界面极化和多重散射成为纳米吸波材料的重要吸波机制。而量子尺寸效应使纳米粒子的电子能级发生分裂,分裂的能级间隔正处于与微波对应的能量范围($10^{-2} \sim 10^{-5}$ eV)内,从而为纳米吸波材料提供了新的吸收通道^[20~24]。金属、金属氧化物和某些非金属材料的纳米微粉由于其自身的比表面积大,表面原子比例高,高浓度晶界和晶界原子的特殊结构导致材料在电磁辐射下,原子、电子运动加剧,促使电磁能转化为热能,从而增加了对电磁波的吸收^[25]。纳米吸波材料具有吸波频带宽、兼容性好、质量轻、厚度薄等特点,是一种很有发展前途的吸波材料。目前国内纳米吸波材料主要集中在纳米金属与合金吸波材料、纳米复合膜吸波材料、纳米陶瓷吸波材料和纳米氧化物吸波材料等方面。

为适应现代立体化战争的需要,将纳米吸波材料引入隐身材料的研究已受到世界各国军事大国的高度重视。美国已研制出一种称作“超黑粉”的纳米吸波材料^[26],其对雷达波的吸收率高达99%,目前正在研究可覆盖厘米波、毫米波、红外、可见光等波段的纳米复合吸波材料^[27,28]。而法国研制成功一种宽频吸波涂层,它由黏结剂和纳米级微屑填充材料构成。纳米级微屑有超薄不定形磁性薄层及绝缘层堆叠而成。据报道,这种真空沉淀的多层薄膜叠合而成的夹层结构具有很好的微波磁导率,与黏结剂复合后可在50MHz~50GHz的频率范围内具有良好的吸波性能^[29]。Sung-Soo Kima等人用化学镀的工艺在空心陶瓷基体上沉积了Co、Co-Fe薄膜,在保证吸波剂吸波性能的同时,达到了降低其密度的目的。而厚度为1.5mm时该复合材料在4~8GHz内的反射衰减可达-18dB^[30]。Liu Jiurong等人通过在传统工艺中引入单层熔纺和氩气保护下的感应熔化的技术,制备了在0.05~20.05GHz频段内具有双峰散射效应的 ϵ -Fe₃N/Y₂O₃粉末材料,其所制得的3.3~19.3mm的涂层在0.6~4.4GHz内的最大反射衰减可达-55dB^[31,32]。彭伟才等通过研究不同Fe纳米线含量的随机分布及Fe纳米线/绝缘体复合吸波材料在不同厚度下的反射率,发现体积分数约为25%的复合吸波材料,其在9.7GHz时反射衰减可达-45dB^[33]。黄兰萍以FeSO₄、(NH₄)₂SO₄等混合溶液为电解液,采用脉冲和直流电沉积的方法,在多孔阳极氧化铝模板微孔内成功制得 α -Fe磁性纳米线阵列,且该模板吸波材料在2~18GHz内具有一定的微波吸收效果^[34]。邓联文等采用雾化工艺和高能球磨技术制得的纳米晶Fe₈₅Si₁Al₆Cr₈扁平状颗粒合金粉,在4GHz附近的低端微波段具有良好的吸波性能^[35]。