

前 言

目前，一些特殊制备的纳米材料凭借其特殊的表面性质和尺度效应，作为吸波材料已经广泛应用于先进隐身技术中。采用铁氧体纳米颗粒与聚合物制成的复合材料，能吸收和衰减电磁波及声波，减少反射和散射，被认为是一种极好的隐身材料。据报道，纳米复合材料多层涂层在 7 ~ 17 GHz 频率的吸收峰高达 14 dB。在 10 dB 的吸收水平，其频宽为 2 GHz，几十纳米厚的涂层相当于几十微米厚通常吸波材料的吸波效果。铁氧体纳米颗粒与聚合物复合材料在外国国防领域已进入应用研究阶段。如果将大量具有吸波性质的纳米颗粒弥散在隐身目标周围，形成一种类似于雾霾的气溶胶，不仅能够降低目标与背景的视觉反差或对比度，还可以增加对特定频段雷达波的吸收，因此纳米吸波粉体材料可以弥补等离子体隐身技术发光和持续时间短的不足。

基于上述思想，作者研究团队提出将铁磁性吸波剂（合金类）与碳材料复合，在降低密度的同时大幅度拓宽吸波频段，获得宽频、轻质、电磁匹配及耐瞬时高温的复合材料，可采用涂布制作涂层，或采用燃烧、爆炸或气动等方式进行分散，应用于不同场景，用以对抗红外制导、毫米波制导导弹，保护重要军事目标，这对我国地面武器装备的对空多波段防御具有十分重要的应用意义。

自 2010 年以来，作者徐耀研究员领导科研团队对轻质吸波材料的应用科学问题进行了深入研究，系统比较了多种形貌的磁性氧化物、磁性铁氧体、单质金属、合金与多孔活性炭球的复合行为和吸波性能，最终梳理出若干可行的方案，现结集出版，以资同行参考。

本书是集体智慧的结晶，是作者二十年研究中和多名博士、硕士一起取得的成果。作者徐耀研究员供职于中国科学院西安光学精密机械研究所，贾红宝副教授现供职于辽宁科技大学。为本书内容做出贡献的还有力国民、李万喜、王秋红、王连成、吕宝亮、周凤羽、胡文杰等，宁波帕提克新材料有限公司为本书提供了出版资金，在此一并表示感谢。

作 者

2026 年 1 月

于西安

目 录

前言

第 1 章 电磁波吸收材料分类	1
1.1 电磁波吸收材料概况	1
1.1.1 电磁吸波材料的理论基础	1
1.1.2 电磁吸波材料的研究概况	7
1.2 磁性金属吸波材料	8
1.3 磁性氧化物吸波材料	11
1.4 陶瓷吸波材料	19
1.5 导电聚合物吸波材料	20
1.6 碳基吸波材料	23
参考文献	26
第 2 章 磁性颗粒/碳轻质复合吸波材料	31
2.1 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ 核壳纳米管	31
2.1.1 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ 核壳纳米管的制备	31
2.1.2 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ 核壳纳米管的微观结构及磁性能	32
2.1.3 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ 核壳纳米管的电磁波吸收性能	35
2.2 $\text{Co}_3\text{Fe}_7/\text{C}$ 核壳微球	39
2.2.1 中空 CoFe_2O_4 微球和中空 $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-Co}_3\text{Fe}_7$ 微球的制备 及吸波性能	40
2.2.2 $\text{Co}_3\text{Fe}_7/\text{C}$ 核壳微球的制备及吸波性能	48
2.3 碳微球负载磁性纳米颗粒	57
2.3.1 八面体 Fe_3O_4 纳米颗粒	58
2.3.2 碳微球负载 $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ 纳米粒子轻质复合材料	61
2.3.3 碳微球负载 Co_3Fe_7 纳米粒子轻质复合材料	68
2.4 介孔 CoFe_2O_4	70
2.5 介孔 Fe/C 以及核壳结构 $\text{Fe-Fe}_3\text{C@C}$	82
参考文献	94
第 3 章 多孔活性炭球负载金属/铁氧体/合金吸波材料	100
3.1 负载 Fe 、 Co 、 Ni 多孔活性炭球	100
3.2 负载 CoFe_2O_4 、 $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-Co}_3\text{Fe}_7$ 或者 Co_3Fe_7 多孔活性炭球	120

3.3	负载 NiFe_2O_4 、 Fe_3O_4 - Fe_xNi_y 或者 Fe_xNi_y 多孔活性炭球	131
3.4	负载 Fe、Cu 多孔活性炭球及毫米波吸收	143
3.4.1	金属/多孔活性炭球复合材料制备工艺	143
3.4.2	测试方法	144
3.4.3	金属/炭球气雾的毫米波吸波性能	145
3.4.4	金属/炭球涂层透波性能	145
3.4.5	红外吸收	149
3.4.6	电阻率	151
	参考文献	152
第4章	氧化铁包覆铝粉吸波材料	156
4.1	粉尘云连续吹喷燃烧实验系统组成及实验方法	156
4.1.1	进粉系统	157
4.1.2	进气系统	160
4.1.3	气-粉混合系统	161
4.1.4	燃烧器	161
4.1.5	高压点火系统	164
4.1.6	红外热像系统	164
4.1.7	辐射热流计	166
4.1.8	时间同步控制系统	166
4.1.9	高速摄像系统	167
4.1.10	热电偶	167
4.1.11	数据采集仪	167
4.1.12	吸波测试方法	167
4.1.13	实验方法及步骤	168
4.1.14	实验系统设计优点	170
4.2	包覆铝粉材料	170
4.2.1	包覆铝粉的准备	170
4.2.2	包覆铝粉形貌分析	171
4.3	包覆铝粉云瞬态火焰特性研究	172
4.3.1	FeOOH 包覆铝粉云瞬态火焰传播过程	172
4.3.2	Fe_2O_3 包覆铝粉云瞬态火焰传播过程	175
4.3.3	Fe_3O_4 包覆铝粉云瞬态火焰传播过程	176
4.3.4	包覆材料对火焰传播速度的影响	177
4.3.5	包覆材料对火焰温度的影响	180
4.4	包覆铝粉云连续喷射火焰特性研究	181

4.4.1	FeOOH 包覆铝粉云连续喷射火焰的高速自发光图像	181
4.4.2	FeOOH 包覆铝粉云喷射火焰发射率的确定和温度特征	181
4.5	包覆铝粉燃烧机理	184
4.5.1	包覆铝粉燃烧产物物相分析	184
4.5.2	包覆铝粉燃烧产物形貌分析	185
4.5.3	包覆铝粉燃烧机理推理	187
4.6	氧化铁包覆铝粉云火焰吸波特性	188
4.6.1	波段 12.4 ~ 18 GHz 的测试结果	189
4.6.2	波段 8 ~ 12GHz 的测试结果	191
4.6.3	结论	193
	参考文献	194
	后记	196

第 1 章 电磁波吸收材料分类

1.1 电磁波吸收材料概况

电磁波吸收材料，简称吸波材料，能有效地吸收入射的电磁波，从而使其目标回波强度显著衰减，其实质是吸入或衰减入射的电磁波，并通过材料的介质损耗使电磁波能量转换成热能或其他形式的能量而耗散掉。吸波材料主要由基体材料（或黏结剂）、辅料与吸收剂复合而成，其中吸收剂的性能、数量和匹配选择是吸波材料设计的重要环节，决定着材料对电磁波能量的吸收与衰减。

随着现代科学技术尤其是电子工业技术的高速发展，各种电子、电气设备为人们的日常生活以及社会活动提供了便利。与此同时，电子、电气设备工作过程中所产生的不同频率电磁波广泛存在于人类的日常活动中，导致人类生存空间的电磁环境日益恶化。电磁波在科学技术上的广泛应用也带来了社会问题，成为一种继水源、大气和噪声之后的新的具有较大危害性的且不易防护的污染源，它不仅影响通信，甚至直接影响人类健康，因此研究和开发能够解决电磁辐射污染的吸波材料已经成为人们关注的焦点^[1,2]。同样重要的是，为适应现代高技术、立体化战争的需要，隐身材料的研究已受到世界各军事大国的高度重视。伴随隐身技术对吸波材料性能要求的提高，研制和开发新型吸收材料已成为吸波材料研究的重点^[3]。

1.1.1 电磁吸波材料的理论基础

1. 电磁特性参数

当电磁波从空气中入射到材料表面时，一部分从材料和空气界面上反射掉，一部分在材料内部传播，与材料发生相互作用而使能量损耗，还有一部分可以穿透材料。电磁波与介质或材料相互作用，都会不同程度地表现出三种响应，对于导体，主要表现在电荷的定向移动；对于电介质，主要体现在极化；对于磁介质，主要体现在磁化。无论传导、极化还是磁化都会消耗入射电磁波的能量。因此，吸波材料与电磁场相互作用时最重要的参数是材料相对介电常数 ε_r 和相对磁导率 μ_r ，这两个参数均具有复数特性，分别可以表示为：

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1.1)$$

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' \quad (1.2)$$

式中, 介电常数的实部 ε' 和虚部 ε'' 分别代表电介质储存和损耗能量的能力, 复磁导率实部 μ' 和虚部 μ'' 分别表示磁介质储存能量和消耗能量的能力。

电磁波从自由空间垂直入射到吸波材料上的吸波示意图如图 1.1 所示。为方便分析并讨论材料对于均匀平面电磁波的吸收性能, 下面简单介绍吸波材料的电磁特性参数^[1,4]。

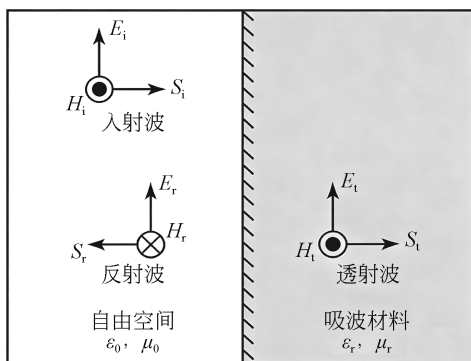


图 1.1 吸波示意图

(1) 特征波阻抗

在外加电磁场下, 材料内部横向电场强度和横向磁场强度的比值定义为材料的特征波阻抗 η , 可表述为:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} = \eta_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \quad (1.3)$$

式中, μ_0 和 ε_0 分别是真空磁导率和真空介电常数, 易知自由空间的波阻抗 $\eta_0 =$

$$\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 377 \Omega.$$

(2) 反射系数和透射系数

反射系数 Γ 为反射波电场 E_{rm} 振幅与入射波电场 E_{im} 振幅之比, 而透射系数 τ 为透射波电场 E_{tm} 振幅与入射波电场振幅之比。当电磁波从自由空间垂直入射到单层半无界均质吸波材料的表面时, 反射系数和透射系数可分别表示为:

$$\Gamma = \left| \frac{E_{rm}}{E_{im}} \right| = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \quad (1.4)$$

$$\tau = \left| \frac{E_{tm}}{E_{im}} \right| = \frac{2\eta}{\eta + \eta_0} \quad (1.5)$$

(3) 传输系数和传播常数

传输系数 T 和传播常数 γ 用于描述电磁波在传输过程中能量的传输效率。传

输系数可由传播常数和介质中的传输距离 L 表示为 $T=e^{-\gamma L}$ ，而电磁波在材料中的传播常数由材料介电常数和结构尺寸决定，关系式为：

$$\gamma=j\frac{2\pi f}{c}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2} \quad (1.6)$$

式中， c 为真空中的光速， f 为输入电磁波的频率， λ_0 为输入电磁波在自由空间中的波长， λ_c 为材料中的截止波长。

值得指出的是，透射系数 τ 和传输系数 T 的定义是统一的，透射系数相当于界面处电磁波的传输系数^[1]。特别地，当使用同轴传输线法测试时，材料中的截止波长 $\lambda_c \rightarrow \infty$ ^[1,5]，此时电磁波在材料中的传播常数可表示为：

$$\gamma=j\frac{2\pi f}{c}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r} \quad (1.7)$$

(4) 等效波阻抗和等效输入阻抗

如图 1.2 所示，设定材料包含 n 层均质层时，为便于讨论和计算，引入等效波阻抗的概念，其值为第 $i-1$ 层与 i 层的层间界面处的电场与磁场强度之比，具有阻抗的量纲，等效波阻抗表达式为：

$$Z_i=\eta_i\frac{Z_{i+1}+\eta_i\tanh(\gamma L_i)}{\eta_i+Z_{i+1}\tanh(\gamma L_i)}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (1.8)$$

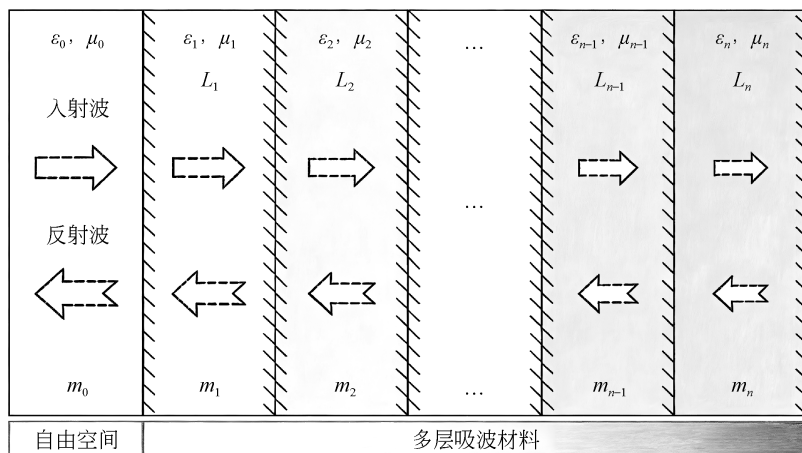


图 1.2 电磁波垂直入射到 n 层吸波材料模型示意图

对于具有 n 层均质层的模型而言，其初始条件为 $Z_n=\eta_n$ 。此时，第 i 层均质层入射界面处的反射系数为：

$$\Gamma_i=\frac{Z_i-\eta_{i-1}}{Z_i+\eta_{i-1}} \quad (1.9)$$

利用式 (1.8) 和式 (1.9), 经过反复迭代求解可得各界面处反射系数, 继而获得各层界面处电磁场强度分布。

对于附着在金属衬底上的吸波材料而言, 将吸波材料视为整体, 则相当于具有 2 层均质层的吸波材料模型。将金属衬底视为理想电导体, 其特征阻抗为 0, 由式 (1.8) 和式 (1.9) 分别可得该吸波材料的等效波阻抗 Z_m 和吸波材料与自由空间界面处的反射系数 Γ :

$$Z_m = \eta_m \tanh(\gamma_m L_m) = \eta_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}\right) \quad (1.10)$$

$$\Gamma = \frac{Z_m - \eta_0}{Z_m + \eta_0} \quad (1.11)$$

式中, d 表示单层吸波材料情况下的涂层厚度。为了公式简洁, 更普遍的做法是引入等效输入阻抗 Z_{in} , 表达式为:

$$Z_{in} = Z_m / \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}\right) \quad (1.12)$$

此时, 吸波材料与自由空间界面处的反射系数简化为:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \quad (1.13)$$

(5) 反射损耗

将电磁波的反射功率 (P_r) 和在介质中传输时输入功率 (P_i) 之比定义为反射损耗 (return loss, RL), 又称为回波损耗, 可表示为:

$$RL = \frac{P_r}{P_i} = \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} = \Gamma^2 \quad (1.14)$$

为了便于比较, RL 的数值通常以分贝 (dB) 标准化单位进行量化表征:

$$RL = 10 \lg\left(\frac{P_r}{P_i}\right) = 10 \lg(\Gamma^2) = 20 \lg |\Gamma| = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad (1.15)$$

为了实现目标频段的高效吸收, 吸波材料需努力提升其阻抗匹配度, 即使反射的电磁波减少到最小, 就需要使反射系数 Γ 趋于零, 吸波材料阻抗和自由空间阻抗需要在尽可能宽的频率范围内保持近似相等, 即力求使吸波材料表层的介电常数和磁导率在整个频率范围内尽量接近于空气的性质。回波损耗值被研究者广泛采用以评价材料对于电磁波的吸收性能, 更大的回波损耗数值意味着更高效的电磁波吸收。经换算可知, -10 dB 相当于吸收入射电磁波 90% 的能量, 而 -20 dB 相当于吸收电磁波总能量的 99%。通常情况下, RL 值低于 -10 dB 才能达到实际应用的要求, 因此以低于 -10 dB 的频带宽度作为微波吸波材料吸波性能的衡量标准, 定义 RL 小于 -10 dB 的频带宽度为材料的有效吸收带宽。

2. 损耗机制

良好的阻抗匹配性能将使得更多的电磁波进入材料内部，而材料对电磁波的损耗效率同样重要。根据电磁波在介质材料内部的传播特性，电磁波的传播常数 γ 可表示为：

$$\gamma = \alpha - j\beta \quad (1.16)$$

式中， α 为衰减常数，也称损耗常数，其值越大，电磁波衰减越多； β 为相位常数，表示电磁波在介质传播过程中的相位变化情况。衰减常数和相位常数表达式如下^[6]：

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}\pi f}{c} \sqrt{(\mu''\varepsilon'' - \mu'\varepsilon') + \sqrt{(\mu''\varepsilon'' - \mu'\varepsilon')^2 + (\mu''\varepsilon'' + \mu'\varepsilon')^2}} \quad (1.17)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{2}\pi f}{c} \sqrt{(\mu'\varepsilon' - \mu''\varepsilon'') + \sqrt{(\mu''\varepsilon'' - \mu'\varepsilon')^2 + (\mu''\varepsilon'' + \mu'\varepsilon')^2}} \quad (1.18)$$

损耗常数 α 描述了电磁波能量在介质中的衰减速度，被广泛应用于量化吸波材料对电磁波的损耗能力。然而，值得指出的是，当损耗常数的值过大或过小时，都可能引起材料的阻抗失配。因此，在设计吸波材料时应注意电磁参数的取值范围以获得合适的损耗常数。

(1) 介电损耗

介电损耗是电场和吸波材料之间特征电子相互作用从而消耗电磁波能量，主要由导电损耗和极化损耗引起。通常用介电损耗因子（又称电损耗角正切值）表征介电衰减能力，根据物理学的定义表示为：

$$\tan\delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1.19)$$

材料的介电损耗正切值（ $\tan\delta_e$ ）给出了材料在交变电场下，能量损耗部分（ ε'' ）与能量储存部分（ ε' ）的比值，通过评价其大小可定性地描述材料介电损耗的能力。

导电损耗（ ε''_c ）是指在外加电场的作用下，导电载流子做定向移动产生宏观电流，从而将电能转变为热能耗散掉的损耗形式；极化损耗（ ε''_p ）是指在电场作用下带电粒子会产生一个电偶极矩，当电磁场的方向改变时，电偶极矩随之改变，为了保持与电场同步，带电粒子需要进行振动或转动产生极化作用，从而导致能量损耗，可以理解为带电粒子克服电场力驱动的热运动结果^[7]。主要的极化形式有离子极化、电子极化、偶极子极化和界面极化等。其中离子极化和电子极化只发生在高频区域，而微波区域（2 ~ 18 GHz）主要发生偶极子极化和界面极化。

实际上，在介电损耗的形成过程中，材料的导电损耗与极化损耗往往并非孤

立存在,而是通过复杂的相互作用实现能量耗散的协同效应,共同构成了材料宏观介电损耗的整体特性。根据德拜理论, ε_c'' 和 ε_p'' 的表达式如下^[8]:

$$\varepsilon_c'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (1.20)$$

$$\varepsilon_p'' = \frac{\omega \tau_0 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + (\omega \tau_0)^2} = \varepsilon'' - \varepsilon_c'' \quad (1.21)$$

式中, σ 为电导率, ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$, τ_0 代表弛豫时间, ε_s 和 ε_∞ 分别代表材料的静态介电系数和低频极限下的介电常数。同样地, 材料的介电常数实部可进一步表示为^[9]:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega \tau_0)^2} \quad (1.22)$$

一般地, 电磁损耗机制在低频段主要由导电损耗主导, 而在高频段则由极化损耗主导。电荷的不均匀分布会形成电偶极矩, 电偶极矩在外加交变电场的作用下发生转动, 从而损耗部分电磁波能量, 形成界面极化。异质界面的面积大小是决定界面极化强弱的关键。可以通过对吸波材料的组分和微观结构调节增加异质界面的含量, 从而提升界面极化损耗。偶极子极化通常发生在吸波材料的偶极子位点, 排列无序的偶极子在外加交变电场的作用下会沿着电场方向进行有序排列, 当外加交变电场频率升高, 偶极子的转动发生滞后, 从而引发弛豫现象。因此, 偶极子浓度将会直接影响偶极极化损耗。偶极极化发生时通常会出现频散效应, 即介电常数大小随频率升高而逐渐降低的现象。偶极子一般来源于材料内部的缺陷位点和官能团, 因此调控材料中的缺陷含量是有效改善偶极取向极化的手段^[10]。

由以上介绍可知, 有效界面引起的界面极化和多重极化弛豫将有效增加电磁波的吸收。一般而言, 弛豫过程通常可以用 Cole-Cole 半圆进行描述, 根据式 (1.21) 和式 (1.22), 进一步推导得到 ε' 和 ε'' 的关系如下:

$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2} \right)^2 + (\varepsilon'')^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} \right)^2 \quad (1.23)$$

由式 (1.23) 可看到, 将介电常数实部和虚部作图, 理论上曲线应该是一个半圆, 即通常定义的 Cole-Cole 圆弧, 每个圆弧对应一个德拜介电弛豫过程。曲线中若出现一至多个半圆, 代表吸波材料损耗电磁波时不同极化机制形成的介电弛豫过程, 但不能量化其极化弛豫大小。需要说明的是, 德拜弛豫理论认为介电常数的虚部由极化弛豫主导, 式 (1.23) 并未包含导电损耗 (ε_c'')。而实际材料的实验测量 Cole-Cole 曲线中, 可能会出现不规整 (如“尾巴”等) 的半圆, 则来自于导电损耗 (ε_c'') 的贡献, 更多的半圆意味着更复杂的介电弛豫损耗机制。

(2) 磁损耗

磁损耗是指磁性材料位于电磁场中, 发生磁化和反磁化过程时一部分能量不

可逆地转化为热能而耗散的损耗机制。通常用磁损耗因子（又称磁损耗角正切值）表征磁衰减能力，表达式如下：

$$\tan\delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (1.24)$$

式中，实部 μ' 代表材料和外加磁场作用时储能的能力，而虚部 μ'' 表征材料对电磁波的耗能能力。磁损耗类型主要有磁滞损耗、畴壁共振、自然共振、交换共振和涡流损耗。弱磁场中磁滞损耗可忽略不计，而畴壁共振只发生在 MHz 频率范围内。在微波区域主要发生的磁损耗为自然共振、交换共振和涡流损耗^[7]。

自然共振是铁磁共振的一种特殊形式，在没有外加恒定磁场的情况下，由于存在磁晶各向异性等效场，会出现相对复磁导率极大值的情况，这种现象称为自然共振。在铁磁性材料中，由于热湍流或其他因素的影响，某些对磁性有贡献的电子自旋偏离了原来的有序排列方向，在交换作用及磁偶极矩等相互作用下，这些局部偏离的自旋发生进动并向有序体的其他部分传播，这种磁有序体中自旋的集体运动模式被称为自旋波。一旦交换相互作用的影响远大于偶极相互作用，将产生交换共振，并产生多个共振峰。一般来说，自然共振通常发生在 0.10 ~ 10.0 GHz 频率范围内，而交换共振发生在更高的频率范围。

另外，涡流损耗项与粒子的粒径（ d ）和电导率（ σ ）有关，其关系式可以表示为^[11]：

$$\mu'' \approx 2\pi\mu_0(\mu')^2\sigma d^2 f/3 \quad (1.25)$$

该式通过将磁损耗与频率的关系量化，能够用于判断涡流效应是否为唯一机制。根据式（1.25），如果材料的磁损耗主要由涡流损耗引起，则值 $\mu''(\mu')^{-2}f^{-1} = 2\pi\mu_0\sigma d^2/3$ 将不随频率变化，是一常数^[12]。为了评价涡流损耗的贡献，定义该常数为材料的磁损耗常数 C_0 ，表达为：

$$C_0 = \mu''(\mu')^{-2}f^{-1} \quad (1.26)$$

如果磁损耗主要源自涡流损耗，则 C_0 是一个常数，该值不随入射电磁波频率的改变而改变，而当变化幅度较大时，材料中除涡流效应外还存在共振损耗机制。

1.1.2 电磁吸波材料的研究概况

对电磁吸波材料的研究始于第二次世界大战，德国人最先在其潜艇的外壳包裹了含有碳粉纸的泡沫塑料以防止潜艇被其他国家的机载雷达探测到。20 世纪 50 年代，美国陆续对多种型号的侦察机采用各种隐身技术以降低其对雷达波的反射，典型的吸波材料配方是在环氧树脂中加入炭黑和银粉，可吸收 90% 的入射电磁波，标志着雷达隐身技术进入初始阶段。当今世界随着高科技的迅猛发展，战争已成为高科技展示的重要舞台，其中包括高性能间谍卫星、侦测卫星和高性能空中预警飞机的大量投入使用，以及兼具高性能雷达与红外灯探测技术的

推广,特别是隐身技术与反隐身技术在战争中运用得淋漓尽致。

传统吸波材料如铁氧体、碳化硅、磁性金属微粉已得到广泛应用。然而,它们通常具有高密度、易氧化、有效吸收频宽窄等问题,严重限制了其实际应用^[7]。目前,研究趋势从传统的铁氧体等材料向金属单质、非金属材料以及有机/无机复合材料发展;吸波波段从单一频段向多波段兼容方向发展;逐步研发吸收频带宽、反射衰减率高、使用寿命长且兼具感知、判断和执行等多功能的智能型吸波复合材料^[13,14]。作为解决电磁干扰及实现隐身需求的关键技术,该类材料已经广泛应用于诸如航空航天、5G通信、军事隐身以及电子设备保护等多个领域。受到这些不同领域的共同推动,新一代的吸波材料正在突破以往“厚、重、频带窄”的限制,朝着轻薄、高效吸收、宽频段覆盖以及智能化控制这一目标迈进。

1.2 磁性金属吸波材料

磁性金属吸波材料主要是铁、钴、镍等磁性金属及其不同组成的合金,具有独特的形状各向异性和损耗机理(磁损耗和介电损耗),是一种轻质的雷达波吸收材料。它们与铁氧体材料最主要的区别在于导电性,铁氧体、金属/合金的电阻率分别在 $10^2 \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 和 $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。另外,铁磁性金属粒子的磁性一般较铁氧体的强,其饱和磁化强度比铁氧体的高四倍以上,从而获得较高的磁导率和磁损耗,且磁性能具有高的热稳定性。相比于铁氧体材料,磁性金属、合金粉体还具有自由电子吸收的特性,导致其磁导率的实部和虚部较大,因此对雷达波的吸收性能优于铁氧体。

磁性金属吸波涂层的居里温度相对较高,而耐腐蚀性和化学稳定性较差限制了其实际应用。通常情况下,吸波涂层中磁性金属微粉的粒径不能过大(一般不超过 $30 \mu\text{m}$),否则会增强对电磁波的反射作用;反之,磁性金属粉体的粒径太小时又极易发生团聚,现行的普遍方法是将磁性纳米粒子分散在非磁性基体中,即制备金属粒子与基体的复合材料,从而有效克服金属微粉易氧化、腐蚀的缺点,该方法也是磁性金属粒子吸收剂的发展方向之一。众所周知,金属磁性粒子的粒径对材料的电磁参数影响很大,当粒子尺寸小到一定数量级时,其表面效应与体积效应二者相互抵消,金属粒子就会显示出独特的物理化学性能。因此,金属磁性粒子的制备工艺对其微观结构及性能影响受到众多研究者的注意。目前,制备磁性金属粒子的方法主要有物理气相沉积法(又称蒸汽冷却法),根据加热源的不同又分为惰性气体冷凝法、热电离子体法和溅射法;高能球磨法,该方法是制备超细金属微粉的主要物理方法之一;化学还原法,可分为固相还原法、液相和气相还原法,其中液相还原法应用较多;微乳液法,是被采用较多的制备金属微

粉吸收剂的湿化学法^[15]。

北京师范大学 Ma 等^[16]采用简易的一步液相合成法在石墨烯材料上均匀负载了六方密堆积结构和面心立方结构的 Co 纳米粒子,如图 1.3 所示,复合物的最低反射损耗高达-47.5 dB。粒径均一的 Ni 纳米球同样可以很好地包覆、分散于石墨烯基体上形成复合结构^[17],如图 1.4 所示。实验证明复合吸波材料的吸波能力明显强于相应 Ni 微球的。目前,磁性金属吸收剂的其他发展趋势引人关注,首先是开发纳米量级的超细粉,利用纳米粒子的特殊效应来提高吸波性能。法国巴黎大学研究报道了微米级 Ni、Co 粉末的吸波性能,发现在 1~8 GHz 有最大吸收值,而且在实验室研究中已经达到纳米级的水平。其次是开发出长径比大的金属纤维(包括 Fe、Ni、Co 及其合金),利用粒子的各向异性来提高吸波能力,该材料主要通过磁损耗、涡流损耗来吸收电磁波,其涂层面密度小于 2 kg/m^2 ,吸收频

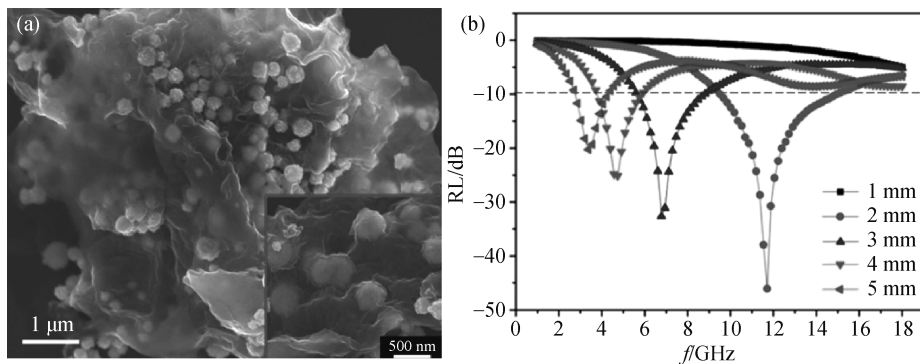


图 1.3 Co/GN 纳米复合物的扫描电镜图片 (a) 和吸波曲线 (b)^[16]

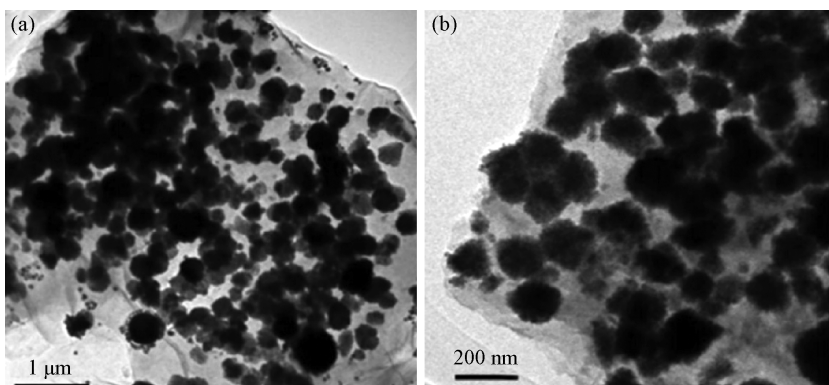


图 1.4 Ni 纳米球/GN 的透射电镜照片^[17]

带宽, 是一种轻质磁性吸收剂。国防科技大学和西北核技术研究所多晶铁纤维的制备以及改性方面进行了广泛深入的基础研究, 目前多晶铁纤维的制备已经进入中试水平。此外, 研制磁性金属微粉核壳纳米复合粒子也是一个重要发展方向, 刘飏等^[18]在微米级的碳基铁粉表面包覆了 Co 粒子形成具有核-壳结构的复合磁性微球, 可以改善传统碳基铁的频散特性, 其反射损失小于 -8 dB 的带宽高达 7 GHz。

太原理工大学李小莉等^[19]通过磁引导气相分解法制备了碳基多晶铁纤维, 测量并分析了 2 ~ 18 GHz 频段铁纤维电磁参数的变化趋势。通过对多晶铁纤维不同的填充比、不同厚度材料吸波性能的研究, 发现较低填充比、较薄厚度的多晶铁纤维就可获得较好的吸波效果。金属微粉是指粒度在 1 μm 以下的粉末。它磁导率较高, 而且可以通过对微粉粒度的可控制备来调节电磁参数, 这个特点有利于展宽吸波剂的频带。金属微粉吸收材料的弱点主要表现在抗氧化和耐酸碱能力上不如铁氧体, 介电常数较大且密度偏大。武汉理工大学 Guan 等^[20]采用简单的低温溶液还原方法合成了具有可控尺寸和表面结构的单晶铁亚微米立方体, 如图 1.5 所示。由于亚微米尺寸和各向异性形貌, 所合成的铁立方体在 2 ~ 14 GHz 的频率范围内表现出强而宽的共振行为。当铁立方体在石蜡中体积分数为 26% 时, 复合材料显示良好的电磁波吸收特性, 在 2 mm 时, 最低反射损耗达到 -56 dB。

