

国家科普知识重点图书

高新技术科普丛书

隐 身 材 料

邢丽英 等 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

隐身材料/邢丽英等编著. —北京:化学工业出版社,
2004.3
(高新技术科普丛书)
ISBN 7-5025-5317-7

I. 隐… II. 邢… III. 功能材料, 吸波-普及读
物 IV. TB34-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 020536 号

高新技术科普丛书

隐 身 材 料

邢丽英 等 编著

总 策 划: 陈逢阳 周伟斌

责任编辑: 周伟斌 邢 涛

责任校对: 李 林

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720 毫米×1000 毫米 1/16 印张 14½ 字数 180 千字

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5317-7/TQ · 1951

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前言

现代战争中，信息的获取和反获取已成为战争的焦点，先敌发现、先敌攻击是克敌制胜的重要保障，武器装备隐身化能够打破现有的攻防格局，提高战略武器系统的突防能力，提高战术武器的生存能力和作战效能。在海湾战争中，隐身飞机出动的架次仅占飞机出动总架次的 2%，但它摧毁的目标数量占被摧毁目标总数的 40%。由此可见，武器装备隐身化可以显著提高军事效益，因此武器装备隐身化是当前世界军事高技术发展的重要方向之一。

隐身性能的获取，是通过外形或结构的隐身设计、采用吸波材料、无源（或有源）阻抗加载等多种措施，以降低其雷达、红外或目视信号特征，从而实现其隐身性能。由于雷达在现行探测手段中仍占据最主要和最重要的地位，因此，控制雷达散射截面积（RCS）是隐身技术最重要的研究内容。对于一架总体隐身效果达 20dB 的飞机来说，外形隐身效果为 5~6dB；吸波材料隐身效果为 7~8dB；其他为阻抗加载技术的贡献。因此吸波材料技术发展和应用将是隐身技术发展的关键技术之一。

理想的吸波材料应当具有吸收频带宽、质量轻、厚度薄、物理机械性能好、使用简便等特点，其化学成分及结构应能使电磁波在其内的波长不因入射波的频率变化而改变。为了获得性能优异的吸波材料，世界各国都在致力于开发新型吸波机制、高性能吸收剂、高性能吸波树脂和纤维及发展多功能吸波材料等。

新型吸波机制主要包括电路模拟吸收机制、手征媒质吸收机制、等离子体吸收机制、纳米材料吸收机制及智能材料吸收机制等。

近年来，晶须材料、纳米材料、陶瓷材料、手征材料、导电高分子材料等新材料逐步应用到吸波材料中，使吸波材料更加薄型化、轻量化，适应性更强。

高性能纤维的发展主要是可调电阻率 SiC 纤维、表面改性碳纤维及高性能有机纤维等。

吸波材料的多功能化主要表现在吸波/承载一体化、耐高温、抗烧蚀、智能化、多频谱兼容等。

本书从微波吸收材料的设计原理、吸波材料种类与特点、国内外发展现状及应用进行了阐述，以期使读者对雷达吸波材料技术有一个全面与基础性的了解。

本书的第 1 章、第 5 章、第 8 章由邢丽英同志编写；第 2 章、第 4 章由蒋诗才同志编写；第 3 章由李斌太同志编写；第 6 章由颜悦同志编写；第 7 章由何山同志编写。全书由邢丽英同志统编。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，衷心期待读者的批评指正。

邢丽英

2004 年 1 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 概述	3
1.2 吸波材料的特性与分类	3
1.2.1 Salisbury 屏幕和 Dallenbach 层	4
1.2.2 多层电介质吸收体	5
1.2.3 磁性吸收材料	6
1.2.4 电路模拟吸波材料	6
1.2.5 混合结构吸波材料和雷达吸波结构	8
1.2.6 非镜面吸波材料	8
1.3 吸波材料的应用	9
1.4 吸波材料的发展	9
主要参考文献	10
第 2 章 吸波材料的设计基础	11
2.1 电磁波基础	13
2.1.1 平面电磁波	13
2.1.2 导行电磁波	19
2.2 吸波材料设计	20
2.2.1 等效混杂媒质的等效电磁参数研究	22
2.2.2 吸波结构设计	25
参考文献	36
第 3 章 吸收剂	39
3.1 吸收剂吸收机理与性能表征	41

3.1.1	微波与微波吸收材料相互作用原理	41
3.1.2	复介电常数的物理意义	43
3.1.3	复数磁导率的物理意义	45
3.1.4	吸收剂的性能表征	47
3.2	电损耗型吸收剂	48
3.2.1	石墨和乙炔炭黑	48
3.2.2	碳纤维吸收剂	49
3.2.3	碳化硅纤维吸收剂	49
3.3	铁氧体吸收剂	52
3.3.1	六角晶系铁氧体吸收剂微波磁损耗机理	53
3.3.2	铁氧体晶格结构	56
3.3.3	铁氧体微波磁性的影响因素	58
3.3.4	铁氧体吸收剂研究进展	60
3.4	磁性金属粒子吸收剂	66
3.4.1	金属微粉吸收剂微波磁导率的影响因素	67
3.4.2	磁性金属微粉吸收剂制备工艺	69
3.4.3	羰基铁粉制备工艺	70
3.4.4	磁性金属晶须(纤维)吸收剂	74
3.5	新型吸收剂	77
3.5.1	纳米吸收剂	77
3.5.2	手性材料	80
3.5.3	视黄基席夫碱	81
3.5.4	导电高聚物	82
3.6	吸收剂研究展望	83
	参考文献	84

第4章	涂覆型吸波材料	89
4.1	概述	91
4.2	涂料型吸波材料	92

4. 2. 1	吸波涂料的组成、分类与作用	92
4. 2. 2	吸波涂料性能与介质参数的关系	93
4. 2. 3	吸收剂的选择	94
4. 2. 4	胶黏剂的选择	95
4. 2. 5	电磁损耗型吸波涂层	97
4. 2. 6	多层介质匹配吸波涂层	102
4. 2. 7	干涉型 (谐振型)	104
4. 3	等离子体吸收型吸波涂料	104
4. 4	手征型吸波涂料	106
4. 5	导电高分子	107
4. 6	视黄基席夫碱盐 (Retinyl Schiff Base Salt)	108
4. 7	电路模拟型吸波涂料	109
4. 8	泡沫型吸波材料	112
4. 9	贴片型吸波材料	115
4. 10	吸波腻子	116
4. 11	表面波吸波涂料	117
	参考文献	119

第 5 章 结构型吸波材料 123

5. 1	概述	125
5. 2	结构吸波材料用树脂基体和增强纤维的电磁特性	126
5. 3	层板型吸波材料	129
5. 4	夹层型吸波材料	133
5. 5	吸波/承载复合结构	135
5. 6	新型结构吸波材料	139
5. 6. 1	电路模拟结构吸波复合材料的发展	139
5. 6. 2	其他新型吸波复合材料的发展	140
	参考文献	143

第 6 章 光学透明吸波材料	147
6.1 概述	149
6.2 光学透明雷达波隐身的设计依据	150
6.3 光学透明吸波材料设计原理	152
6.4 光学透明吸波材料类型	155
6.4.1 反射型光学透明吸波材料	155
6.4.2 吸收型光学透明吸波材料	158
6.5 光学透明吸波材料制备工艺及设备	161
6.6 光学透明吸波材料的应用与发展	164
参考文献	166
第 7 章 雷达吸波材料性能测试	167
7.1 概述	169
7.2 吸收剂电磁参数测量方法	170
7.2.1 简介	170
7.2.2 驻波法	171
7.2.3 网络法测量吸波的材料电磁参数	172
7.3 雷达吸波材料反射率测量	176
7.3.1 概述	176
7.3.2 RAM 反射率弓形测量法	177
7.3.3 RCS 法测量 RAM 反射率	179
7.4 目标 RCS 测量	180
7.4.1 雷达散射截面的概念	181
7.4.2 目标 RCS 测量	182
参考文献	182
第 8 章 吸波材料应用	185
8.1 概述	187

8. 2	微波暗室	187
8. 3	目标 RCS 减缩	190
8. 3. 1	影响 RCS 的主要贡献因子	192
8. 3. 2	RCS 的处理	193
8. 3. 3	隐身技术的应用	195
8. 4	雷达天线性能改善	201
8. 4. 1	天线系统的 RCS 系数	201
8. 4. 2	雷达天线系统的电磁散射	202
8. 4. 3	雷达天线系统的隐身途径	203
8. 5	电磁波干扰消除	207
8. 5. 1	电磁波辐射的危害	207
8. 5. 2	电磁屏蔽原理	209
8. 5. 3	电磁屏蔽材料的应用	211
主要参考文献		215

第1章

概论

概述

吸波材料的特性与分类

吸波材料的应用

吸波材料的发展

1.1 概述

微波吸收材料是一种能够吸收电磁波而反射、散射和透射都很小的功能材料，按其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收体； $1/4$ 波长“谐振”吸收体；阻抗渐变“宽频”吸收体；衰减表面电流的薄层吸收体。

吸波材料的设计实质上是自由空间和导电表面有损耗匹配网络的设计。在减少反射的同时提供损耗是吸波材料应用中的关键思想。宽带吸波材料设计面临两个问题：一是怎样才能使入射波进入材料中而不是简单地从前界面反射掉；二是一旦入射波进入吸波材料内部，怎样才能提供所需的能量吸收程度。这两个要求经常是相互矛盾的，因而必须对带宽、性能水平和吸波材料的厚度进行折中。

理想的吸波材料应当具有吸收频带宽、质量轻、厚度薄、物理机械性能好、使用简便等特点，然而现有的材料很难同时满足这些要求。

1.2 吸波材料的特性与分类

吸波材料的主要类型有：涂料型吸波材料；贴片型吸波材料；

泡沫型吸波材料；吸波腻子；吸波复合材料（层板型和夹层

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.cnitbook.com

型) 等。

吸波材料主要组分包括：吸收剂和基体材料，吸收剂提供吸波性能，基体材料提供粘接或承载等性能。对于吸波/承载一体化吸波复合材料，通过电特性与承载特性一体化设计可赋予材料在具有承载能力的同时，具有较好的吸波效果。

几种典型的吸波材料结构形式如下。

1.2.1 Salisbury 屏幕和 Dallenbach 层

Salisbury 屏幕和 Dallenbach 层代表了两种最古老和最简单的吸收体。

Salisbury 屏幕是一种谐振式吸收体，它的结构是在金属板前方的低介电常数隔离层上放置一块电阻片。其结构示意图见图 1-1。电阻片的位置应放置在 $1/4$ 波长的介质层上，这样才可获得较好的吸波效果。

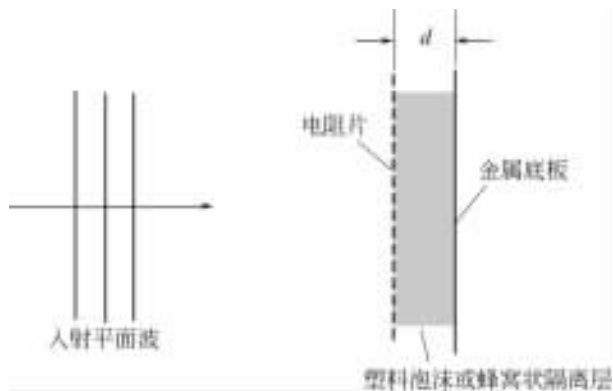


图 1-1 Salisbury 屏幕

Dallenbach 层是另一种简单的谐振式吸收体，它由金属底板上的均匀损耗层构成。材料表面的反射是由于波在两种介质分界面遇到了阻抗变化。因此，如果某种材料的阻抗与自由空间的阻抗之比等于 1 (即 $\mu_r = \epsilon_r$)，那么在其表面将没有反射。在这种情况下，衰减依赖于材料的损耗特性 (ϵ_r'' , μ_r'') 和电厚度。但是具有合适的电磁特性并能在相当大的频率范围内起匹配作用的吸波材料很难找

到，实际设计中就变成了用现有的材料在一定频率上对损耗进行优化。

1.2.2 多层电介质吸收体

要使微波雷达吸收体获得所希望的带宽（典型的为 $2 \sim 18\text{GHz}$ ），采用较薄的单层吸收体是很难实现的。因此，人们就通过使用多层介质来拓宽吸收体的频带宽度。这种方法的目的是通过沿吸收体的厚度方向缓慢地改变有效阻抗以获得最小反射。这类吸收体称为多层吸收体，典型的有 Jaumann 吸收体和渐变介质吸收体。

Jaumann 吸收体是由 Salisbury 屏幕吸收体通过增加电阻片和隔离层数目来改善带宽。为了获得最佳的吸收效果，电阻片的电阻应当从前至后逐渐变小。吸收体的带宽与所采用的电阻片个数有关。不同电阻片个数的反射性能见图 1-2。

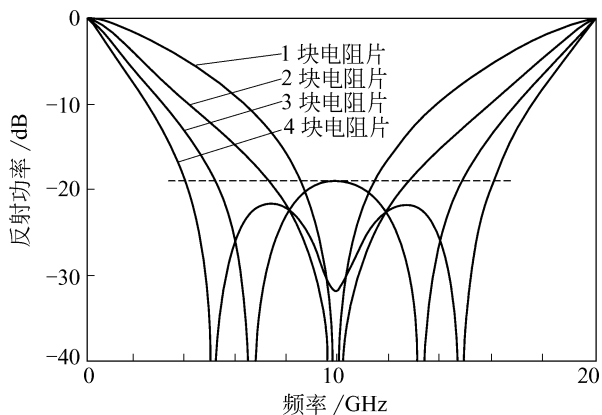


图 1-2 多层电阻片的反射性能

同 Jaumann 吸收体通过电阻片电阻的缩减来减少反射一样，渐变介质可用来实现真空和理想导体间的阻抗匹配。这种吸收体的最佳设计方法是，在一定的入射角和厚度限制内，通过分析确定在给定的频率范围内为减小 $|R|$ 所需的 μ 和 ϵ 沿介质厚度方向的分布关系。但是这个问题至今还未解决。实际的渐变介质吸收体是由特性逐层变化的离散介质层构成。

1.2.3 磁性吸收材料

由于介电类吸收材料厚度大，吸收频带窄，为了拓宽频带，减薄厚度，发展了磁性吸收材料。磁性吸收材料由含有电损耗及磁损耗的铁氧化物、羰基铁、合金粉等吸收剂与基体材料通过电设计而获得，通过调整材料的性质，使其本征阻抗在尽可能宽的频率范围内尽量接近自由空间阻抗。

铁氧化物材料在高频下具有较高的磁导率和高电阻 ($10^8 \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$)，电磁波易于进入并得到有效的衰减，其主要问题是相对密度大、温度稳定性差。目前，美、日、英、俄等国均在研制新型铁氧化物。另外，铁氧化物在低频下 ($f < 1\text{GHz}$)，铁氧化物具有较高的 μ_r 值而 ϵ_r 较小，所以作为匹配材料具有明显的优势，具有良好的应用前景。

磁性金属、合金粉末对电磁波具有吸收、透过和极化等多种功能，用它来吸收电磁波能量的基本要求是：金属粉末的粒度应小于工作频带高端频率时的屈服深度，材料的厚度应大于工作频带低端频率时的屈服深度，这样既保证了能量的吸收，又使电磁波不会穿透材料。磁性金属（合金）粉具有温度稳定性好，介电常数较大等特点，在吸波材料中得到广泛应用。

金属晶须具有良好的吸波性能，这种晶须可由 Fe、Ni、Co 及它们的合金组成。金属晶须可通过磁损耗或涡流损耗等多种吸波机制来损耗微波能量，因而可以在很宽的频率范围内实现高吸收，而且和铁氧化物材料相比，还可实现减轻质量 40%~60%。

磁性纳米材料 ($1 \sim 100\text{nm}$)，由于结构的独特性使其具有量子尺寸效应、宏观量子隧道效应、小尺寸和界面效应，从而呈现出独特的电磁、光热以及化学特性。这类材料具有高的磁导率，在很宽频率范围内具有很高的雷达波吸收率。

1.2.4 电路模拟吸波材料

Salisbury、Jaumann 吸收体只利用了材料的导纳实部，如果在

材料中再引入导纳虚部，则有更多的参数来调整其特性，因而可以获得有限空间内的宽带吸波材料。电路模拟吸波结构通常由栅格单元与间隔层构成，结构示意图如图 1-3。其作用与频率选择表面相似，能反射一个或多个频率，而对其他频率是透明的。栅格单元的有效电阻由材料类型、栅格尺寸、间距、几何形状等决定。E. Michielssen 等人对不同频率选择表面进行了研究，提出多层结构吸波材料，结构示意图见图 1-4，其中 S_1 、 S_2 、 S_3 表示周期表面。通过优化设计用不同厚度的隔离层可以获得宽频吸波效果，图 1-5 为此种结构与反射特性的关系。

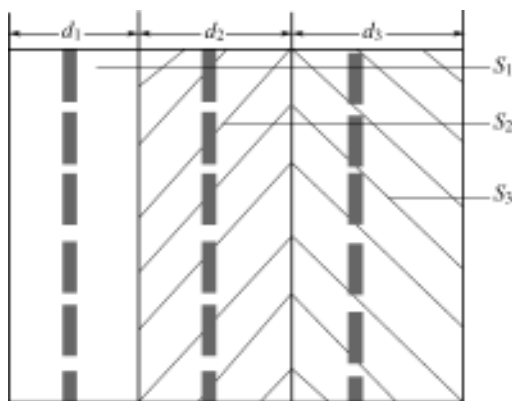


图 1-3 电路模拟吸波材料构造方式示意图

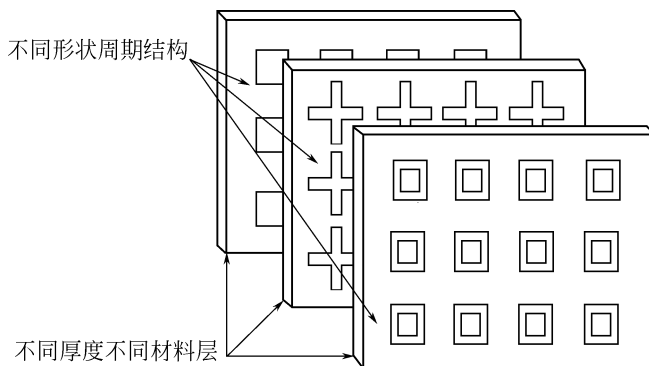


图 1-4 周期表面形式

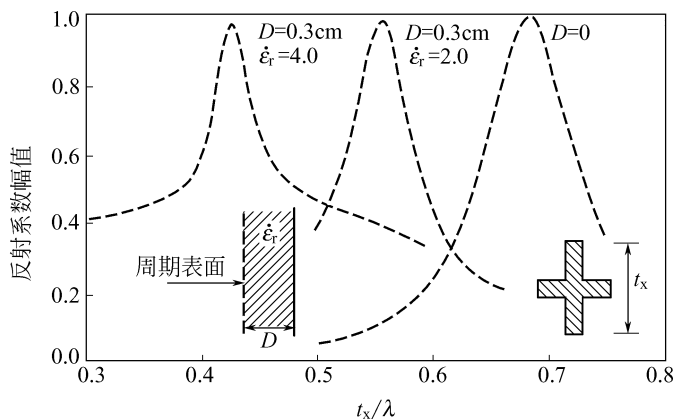


图 1-5 周期结构载体与反射性能关系

1.2.5 混合结构吸波材料和雷达吸波结构

为了拓宽吸收频带，减薄材料厚度，需采用混合结构吸波材料设计，如磁性和电路模拟，渐变介质和电路模拟，渐变介质和磁性等。

吸波-承载复合结构 (RAS)，这是具有实用价值的一种隐身复合材料结构形式。这种结构充分利用了复合材料的可设计性，将特定部位的承载要求和雷达信号特征的减缩有机结合起来，进行力学性能和电性能综合一体化设计，从而兼顾承载和隐身双重功能，迄今已有不少应用实例。

1.2.6 非镜面吸波材料

非镜面雷达回波是由边缘、表面的不连续性以及表面曲率的突变而引起的。非镜面回波源包括边缘绕射、行波和接合处。对于具有强镜面回波的物体来说，非镜面回波只起次要作用，但是当采用外形技术和雷达吸波材料减弱了镜面回波以后，非镜面回波就可能占主导地位。

吸波材料对表面波的衰减决定它抑制非镜面散射的能力，表面波单位长度的衰减可作为表面波吸收材料性能的评估参量。

1.3 吸波材料的应用

随着现代雷达与微波电子技术的飞速发展，微波吸收材料的应用领域也越来越广，主要应用范围包括：

① 雷达在工作时由于附近某些多重反射、杂乱回波及彼此干扰而影响了系统的正常工作性能和可靠性，应用吸波材料可以抑制这些干扰、改善天线方向图，提高雷达侧向测距准确度；

② 微波设备使用中需要消除环境干扰或内部吸收屏蔽以防止微波泄漏，多种微波元件，如吸收匹配负载、衰减器件、等效天线等亦常应用吸波材料；

③ 微波暗室内铺设吸波材料以获得满足部件和系统测试所需的等效“自由空间”；

④ 现代战争中，先敌发现、先敌攻击是克敌制胜的重要保障。武器装备隐身化能够打破现有的攻防格局，提高战略武器系统的突防能力，提高战术武器的生存力和作战效能。随着人们对军用目标雷达特征研究的深入，各种高性能的雷达吸波材料（RAM）应运而生以满足其特殊应用；

⑤ 微波吸收材料在其他民用领域中，如微波炉、电视、移动电话等也有其广泛应用。

1.4 吸波材料的发展

理想的吸波材料应当具有吸收频带宽、质量轻、厚度薄、物理机械性能好、使用简便等特点，其化学成分及结构应能使电磁波在