

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

Chemical Industry Press



化学工业出版社

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

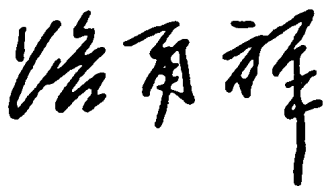
# 序

数万年来，人类一直在了解、开发、利用我国周围的自然界，同时不断地认识着自身，科学技术也从一开始就随着人类的生存需求而产生和发展着。人类发展史充分验证了邓小平“科学技术是第一生产力”的论断。科学技术的发展，促进了人类文明和社会的发展。

21世纪是信息时代，21世纪是生命科技的世纪，21世纪是新材料和先进制造技术迅速发展和广泛应用的世纪，21世纪是高效、洁净和安全利用新能源的时代，21世纪是人类向空间、海洋、地球内部不断拓展的世纪，21世纪是自然科学发生重大变革、取得突破性进展的时代。科学技术的发展、新技术的不断涌现，必将引起新的产业革命，对我国这样的发展中国家来说，既是挑战，也是机遇，而能否抓住发展机遇，关键在于提高全民族的科学文化水平，造就一支具有科学精神、懂得科学方法、具有知识创新和技术创新能力的高素质劳动者队伍。所以，发展教育和普及科学知识、弘扬科学精神、提倡科学方法是我们应对世纪挑战的首要策略。为此，1999年8月，江总书记在视察中国科学院大连化学物理研究所时进一步强调了科普工作的重要性：“在加强科技进步和创新的同时，我们应该大力加强全社会的科学普及工作，努力提高全民族的科学文化素质。这项工作做好了，就可以为科技进步和创新提供广泛的群众基础。”

为了普及和推广高新技术，化学工业出版社组织几位两院院士和专家编写了《高新技术科普丛书》。本套丛书的特点是：介绍当今科学产业中的一些高新技术原理、特点、重要地位、应用及产业化的现状与发展前景；突出“新”，介绍的新技术、新理论和新方法不仅经实践证明是成熟、可靠的，而且是有应用前景的实用技术；力求深入浅出，图文并茂，知识性、科学性与通俗性、可读性及趣味性的统一，并充分体现科学思想和科学精神对开拓创新的重要作用。

《高新技术科普丛书》涉及与我国经济和社会可持续发展密切相关的高新技术，第一批9个分册包括绿色化学与化工、基因工程技术、纳米技术、高效环境友好的发电方式——燃料电池、最新分离技术（如超临界流体萃取、吸附分离技术、膜技术）、化学激光、生物农药等。本套丛书以后还将陆续组织出版多种高新技术分册。相信该套科普丛书对宣传普及科技知识、科学方法和科学精神，正确地理解、掌握科学，提高全民族的素质将会起到积极的作用。

The image shows a handwritten signature in black ink, which reads '洛勇群' (Luo Yongqun). The characters are written in a cursive, calligraphic style.

2000年9月

# 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

# 内 容 提 要

现代战争中，隐身技术大大提高了战斗机、舰艇等兵器的生存能力。隐身材料作为其核心技术已成为各国的研究重点之一。本书介绍电磁波基础、各种吸波材料以及隐身材料在新一代战斗机和舰艇中的应用。

本书作为科普图书，内容为研究前沿，富有生命力。叙述上深入浅出，图文并茂，使读者对隐身材料有全面的了解。



# 目 录

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

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

<b>第 6 章 光学透明吸波材料</b>	<b>147</b>
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

<b>第 7 章 雷达吸波材料性能测试</b>	<b>167</b>
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

<b>第 8 章 吸波材料应用</b>	<b>185</b>
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



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。

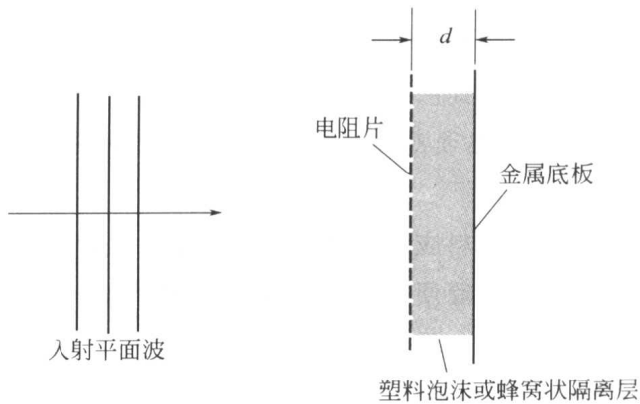


图 1-1 Salisbury 屏幕

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 ( $\epsilon''$ ,  $\mu''$ ) 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