



“十三五”国家重点图书出版规划项目  
先进复合材料技术丛书

STRUCTURE-FUNCTION INTEGRATED  
COMPOSITE TECHNOLOGY

# 结构功能一体化 复合材料技术

邢丽英 编著

航空工业出版社



“十三五”国家重点图书出版规划项目  
先进复合材料技术丛书

国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

# 结构功能一体化复合材料技术

邢丽英 编著



航空工业出版社

北京

## 内 容 提 要

本书系统介绍了树脂基结构功能复合材料, 主要包括树脂基结构吸波、结构透波、结构导电、结构阻燃, 以及树脂基隔热复合材料和智能复合材料等的设计原理、表征方法、功能特性、应用及发展趋势等内容。

全书内容系统而全面, 力求具有技术先进性和工程实用性, 可供从事复合材料研究、工程制造、设计应用等军用、民用部门的读者学习、参考使用。

### 图书在版编目 ( C I P ) 数据

结构功能一体化复合材料技术 / 邢丽英编著. -- 北京: 航空工业出版社, 2017. 7  
(先进复合材料技术丛书)  
ISBN 978 - 7 - 5165 - 1224 - 1

I. ①结… II. ①邢… III. ①航空材料—树脂基复合材料—材料技术 IV. ①V258

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 144123 号

## 结构功能一体化复合材料技术 Jiegou Gongneng Yitihua Fuhe Cailiao Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2017 年 7 月第 1 版

2017 年 7 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 20

字数: 517 千字

印数: 1—2000

定价: 100.00 元

# 丛书前言

先进材料是科学技术发展和国民经济建设的重要支柱。先进复合材料作为一类轻质高效、节能环保的新型材料，在先进材料领域具有极其重要的地位。自 20 世纪 60 年代问世以来，先进复合材料始终是世界各国重点研究开发的关键材料之一，近年来更是备受青睐与重视，在世界各国的军民用领域，尤其是航空领域起到了至关重要的作用。先进复合材料的用量已经成为航空结构先进性的重要标志，大型飞机波音 787、空客 A350 的先进复合材料用量达到 50% 以上，展示了其令人鼓舞的发展前景。此外，先进复合材料在基础设施、沿海油气田、风力发电、汽车和体育用品等民用工业领域的广泛应用，向人们昭示了其蓬勃发展的未来。

国内先进复合材料的发展应用已有 30 多年的历史，在此过程中获取了大量的性能数据，也积累了大量的设计使用经验。目前先进复合材料继续向高性能化、多功能化和尖端化发展，并向民用领域快速渗透和规模扩张，产业进入应用扩张带动成本持续降低的新阶段。为了适应这一发展需求，我们组织国内先进复合材料领域有实际经验的专家，吸取了国外的先进经验，汇总了国内外最新的研发成果，旨在为国内提供一套全面、系统并具有工程应用

价值的“先进复合材料技术丛书”。考虑到目前先进复合材料的规模和成熟程度，“先进复合材料技术丛书”的内容主要针对先进树脂基复合材料，涵盖先进树脂基复合材料技术基础、制造技术、性能表征、使用维护以及适航审定等最新成果。

对于21世纪的企业，其成功不仅仅是利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势，而利用拥有的知识带动和促进产业的跨越更是一种挑战和责任。把拥有的知识用书面文字的形式呈现出来，构建一个公共资料库和交流平台，让更多的人从中受益，为产业的跨越提供支撑——这就是中航复合材料有限责任公司、中国复合材料学会和航空工业出版社出版这套“先进复合材料技术丛书”的初衷。

相信这套丛书的出版，会使更多的复合材料科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力我国复合材料产业的自主创新，对复合材料产业的科技进步产生积极影响。

中国工程院院士  
中国复合材料学会理事长 陈祥宝  
“先进复合材料技术丛书”主编

# 前 言

先进树脂基复合材料组成的多样化与可设计性，使之不但具有优异的力学性能，同时还具有许多其他性能，如声、光、电、磁、热等。通过选择适当的增强材料和树脂基体，引入导电、吸波等组分设计，在保持承载性能的前提下，可赋予先进复合材料特殊的功能特性，获得树脂基结构功能一体化复合材料。

树脂基结构功能复合材料在航空航天等领域得到了大量的应用。结构防热复合材料在热防护系统中发挥隔热、维形、承载乃至抗核等功能，其性能是相关动力系统和飞行器先进性与可靠性的决定因素之一。结构透波复合材料在预警机等电子探测和电子战飞机上作为电磁窗口材料应用，有效保障了天线的可靠性。结构吸波复合材料在隐身战斗机吸波结构中应用则有效降低了飞机的强雷达散射源和次强雷达散射源的雷达散射截面积（RCS），大幅度提升了战斗机的生存能力和突防能力。有统计表明，在第四代隐身战斗机中，结构功能一体化复合材料占其复合材料总体用量的30%左右，在先进电子探测和电子战飞机中，结构功能一体化复合材料用量更高，能够达到复合材料总用量的60%以上。树脂基结构功能复合材料已经成为最重要的一类复合材料。

树脂基结构功能复合材料分类和结构复合材料不同，很少按树脂基体、增强材料和制造工艺特点进行分类，而主要按复合材料具有的使用功能进行分类。随着树脂基结构功能复合材料的发展和复合材料使用功能的拓展，树脂基结构功能复合材料的类型将进一步增加。

本书系统介绍了树脂基结构功能复合材料，主要包括树脂基结构吸波、结构透波、结构导电、结构阻燃，以及树脂基防热复合材料和智能复合材料等的设计原理、表征方法、功能特性、应用及发展趋势等内容。本书内容系统、全面，力求具有技术先进性和工程实用性，可供复合材料研究、工程制造、设计应用等军用、民用部门参考使用。

全书共分为7章。第1章由邢丽英编写，第2章由邢丽英、礼嵩明编写，第3章由洪旭辉编写，第4章由黑艳伟编写，第5章由李亚锋和刘燕峰编写，第6章由孔磊编写，第7章由高军鹏、李斌太、刘刚编写。邢丽英提出全书的编写大纲并对全书进行了统稿、修改、校稿和终审。

尽管我们衷心希望奉献给读者一本关于结构功能一体化复合材料技术方面的高质量作品，但由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，恳请广大读者批评指正。

2017年4月

# 目 录

第1章 绪论 .....	( 1 )
1.1 前言 .....	( 1 )
1.2 树脂基结构功能复合材料的分类 .....	( 2 )
1.3 树脂基结构功能复合材料的特性 .....	( 3 )
1.3.1 吸波特性 .....	( 3 )
1.3.2 透波特性 .....	( 5 )
1.3.3 导电特性 .....	( 6 )
1.3.4 阻燃特性 .....	( 7 )
1.3.5 防隔热特性 .....	( 8 )
1.3.6 智能特性 .....	( 9 )
1.4 树脂基结构功能复合材料的应用和发展 .....	( 9 )
1.4.1 树脂基结构功能复合材料的应用 .....	( 9 )
1.4.2 树脂基结构功能复合材料的发展 .....	( 10 )
参考文献 .....	( 10 )
第2章 结构吸波复合材料技术 .....	( 14 )
2.1 概述 .....	( 14 )
2.2 结构吸波复合材料结构形式和类型 .....	( 14 )
2.2.1 结构吸波复合材料结构形式 .....	( 14 )
2.2.2 结构吸波复合材料类型 .....	( 17 )
2.3 结构吸波复合材料设计 .....	( 18 )
2.3.1 吸波材料设计基础 .....	( 19 )
2.3.2 混杂媒质等效电磁参数设计基础 .....	( 20 )
2.3.3 结构吸波复合材料设计 .....	( 21 )
2.4 结构吸波复合材料性能测试 .....	( 23 )
2.4.1 电磁参数测量方法 .....	( 24 )
2.4.2 结构吸波复合材料反射率测量 .....	( 28 )
2.4.3 目标 RCS 测量 .....	( 31 )
2.5 结构吸波复合材料特性 .....	( 32 )
2.5.1 树脂基体和增强材料电磁与力学特性 .....	( 32 )
2.5.2 吸收剂电磁特性 .....	( 39 )
2.5.3 结构吸波复合材料特性 .....	( 43 )
2.5.4 吸波/承载复合结构 .....	( 50 )
2.6 结构吸波复合材料技术的应用 .....	( 51 )



2.6.1	目标 RCS 减缩 .....	( 51 )
2.6.2	结构吸波复合材料的应用 .....	( 52 )
2.7	结构吸波复合材料技术发展 .....	( 52 )
2.7.1	结构吸波复合材料技术发展趋势 .....	( 52 )
2.7.2	新型结构吸波复合材料 .....	( 53 )
	参考文献 .....	( 55 )
<b>第 3 章</b>	<b>结构透波复合材料技术</b> .....	<b>( 59 )</b>
3.1	概述 .....	( 59 )
3.2	透波复合材料的设计原理 .....	( 59 )
3.2.1	复合材料透波性能的设计 .....	( 59 )
3.2.2	影响透波复合材料介电性能的因素 .....	( 61 )
3.2.3	透波复合材料性能表征 .....	( 63 )
3.3	结构透波复合材料树脂基体 .....	( 64 )
3.3.1	树脂基体的选择原则 .....	( 64 )
3.3.2	传统热固性透波树脂基体 .....	( 65 )
3.3.3	新型高性能透波树脂基体 .....	( 75 )
3.4	结构透波复合材料的增强材料 .....	( 89 )
3.4.1	无机纤维 .....	( 90 )
3.4.2	有机纤维 .....	( 94 )
3.4.3	纤维制品种类及特点 .....	( 99 )
3.5	结构透波复合材料性能 .....	( 100 )
3.5.1	环氧树脂 (EP) 基体结构透波复合材料 .....	( 100 )
3.5.2	氰酸酯树脂 (CE) 基体结构透波复合材料 .....	( 101 )
3.5.3	双马来酰亚胺树脂 (BMI) 基体结构透波复合材料 .....	( 102 )
3.5.4	聚酰亚胺树脂 (PI) 基体结构透波复合材料 .....	( 103 )
3.5.5	聚四氟乙烯树脂 (PTFE) 基体结构透波复合材料 .....	( 104 )
3.5.6	有机硅树脂基体结构透波复合材料 .....	( 104 )
3.6	结构透波复合材料在雷达天线罩的应用 .....	( 105 )
3.6.1	雷达天线罩壁结构 .....	( 105 )
3.6.2	天线罩夹层材料 .....	( 106 )
3.6.3	结构透波复合材料在雷达天线罩的应用 .....	( 108 )
3.7	结构透波复合材料技术的发展 .....	( 113 )
	参考文献 .....	( 114 )
<b>第 4 章</b>	<b>结构导电复合材料技术</b> .....	<b>( 123 )</b>
4.1	概述 .....	( 123 )
4.2	导电复合材料的传导机理和结构形式 .....	( 124 )
4.2.1	导电复合材料的逾渗理论 .....	( 124 )
4.2.2	导电复合材料的结构形式 .....	( 129 )



4.2.3 常用导电体的主要特性 .....	(130)
4.3 结构导电复合材料性能表征 .....	(135)
4.3.1 电阻率的表征与测量 .....	(135)
4.3.2 防静电及静电耗散性能的表征 .....	(137)
4.3.3 电磁屏蔽性能表征 .....	(137)
4.4 填充型结构导电复合材料技术 .....	(138)
4.4.1 微粒填充型结构导电复合材料 .....	(138)
4.4.2 增强/导电一体填充型结构导电复合材料 .....	(141)
4.5 表面防护型结构导电复合材料技术 .....	(142)
4.6 结构导电复合材料的应用和发展趋势 .....	(144)
4.6.1 结构导电复合材料的应用 .....	(144)
4.6.2 结构导电复合材料的发展趋势 .....	(147)
参考文献 .....	(147)
<b>第5章 结构阻燃复合材料技术 .....</b>	<b>(150)</b>
5.1 概述 .....	(150)
5.2 聚合物燃烧和阻燃机理 .....	(150)
5.2.1 聚合物的燃烧过程 .....	(150)
5.2.2 聚合物的燃烧机理 .....	(152)
5.2.3 聚合物的阻燃途径 .....	(153)
5.2.4 聚合物的阻燃机理 .....	(153)
5.2.5 常用阻燃剂及阻燃机理 .....	(154)
5.3 结构阻燃复合材料测试标准和评价方法 .....	(159)
5.3.1 复合材料阻燃测试标准 .....	(159)
5.3.2 复合材料阻燃评估方法 .....	(160)
5.4 环氧树脂基结构阻燃复合材料 .....	(164)
5.4.1 环氧树脂的热及氧化分解 .....	(164)
5.4.2 环氧树脂的阻燃改性 .....	(165)
5.4.3 环氧树脂基结构阻燃复合材料 .....	(172)
5.5 酚醛树脂基结构阻燃复合材料 .....	(177)
5.5.1 酚醛树脂的特点 .....	(177)
5.5.2 酚醛树脂改性及阻燃机理 .....	(179)
5.5.3 酚醛树脂基结构阻燃复合材料 .....	(186)
5.6 新型树脂基结构阻燃复合材料 .....	(195)
5.6.1 双马来酰亚胺结构阻燃树脂基复合材料 .....	(195)
5.6.2 氰酸酯树脂基结构阻燃复合材料 .....	(198)
5.6.3 聚邻苯二甲腈树脂基结构阻燃复合材料 .....	(201)
5.6.4 热塑性树脂基结构阻燃复合材料 .....	(202)
5.7 结构阻燃复合材料的应用和发展趋势 .....	(205)

5.7.1	结构阻燃复合材料的应用 .....	(205)
5.7.2	结构阻燃复合材料发展趋势 .....	(207)
	参考文献 .....	(208)
<b>第6章</b>	<b>树脂基防热复合材料技术 .....</b>	<b>(218)</b>
6.1	引言 .....	(218)
6.2	气动热环境与防热技术 .....	(218)
6.2.1	气动加热 .....	(218)
6.2.2	防热技术 .....	(219)
6.2.3	树脂基烧蚀防热技术 .....	(222)
6.3	树脂基烧蚀防热复合材料技术 .....	(224)
6.3.1	树脂基烧蚀防热复合材料增强材料 .....	(225)
6.3.2	树脂基烧蚀防热复合材料树脂基体 .....	(226)
6.3.3	树脂基烧蚀防热复合材料的制备技术 .....	(232)
6.4	低密度烧蚀复合材料 .....	(236)
6.4.1	AVCOAT 烧蚀防热复合材料 .....	(237)
6.4.2	轻质碳/酚醛防隔热复合材料 .....	(241)
	参考文献 .....	(250)
<b>第7章</b>	<b>智能复合材料技术 .....</b>	<b>(260)</b>
7.1	概述 .....	(260)
7.2	形状记忆树脂基复合材料 .....	(261)
7.2.1	形状记忆树脂基体 .....	(261)
7.2.2	热固性树脂基形状记忆复合材料 .....	(266)
7.2.3	形状记忆复合材料的驱动方式 .....	(272)
7.2.4	形状记忆树脂基复合材料应用及发展趋势 .....	(275)
7.3	自修复树脂基复合材料 .....	(278)
7.3.1	复合材料自修复机理 .....	(278)
7.3.2	微胶囊型自修复树脂基复合材料 .....	(281)
7.3.3	空心玻璃纤维型自修复复合材料 .....	(286)
7.3.4	自修复树脂基复合材料的发展 .....	(290)
7.4	树脂基复合材料结构健康监测 .....	(290)
7.4.1	基于FBG的树脂基复合材料结构健康监测 .....	(291)
7.4.2	基于碳纳米管的树脂基复合材料结构健康监测 .....	(294)
7.4.3	树脂基复合材料健康监测技术的发展 .....	(297)
	参考文献 .....	(298)
	后记 .....	(307)

# 第1章 绪 论

## 1.1 前言

先进树脂基复合材料组成的多样化与可设计性，使之不但具有优异的力学性能，同时还具有许多其他性能，如声、光、电、磁、热等。通过选择适当的增强材料和树脂基体，引入导电、吸波等组分，在保持承载性能的前提下，可赋予先进复合材料特殊的功能特性，获得树脂基结构功能一体化复合材料。

树脂基结构功能复合材料在航空航天等领域得到了大量的应用。结构耐热复合材料在热防护系统中发挥隔热、维形、承载乃至抗核等功能，其性能是相关动力系统和飞行器先进性与可靠性的决定因素之一。它不但要防护工程结构在气动热环境中免遭烧毁破坏，还必须保持结构外形，以便保证弹头落点精度和航天器的正确返回。结构透波复合材料在预警机等电子探测和电子战飞机上作为电磁窗口材料应用，有效保障了天线的可靠性。结构吸波复合材料在隐身战斗机吸波结构中应用则有效降低了飞机的强雷达散射源和次强雷达散射源的雷达散射截面积（Radar Cross Section, RCS），大幅度提升了战斗机的生存能力和突防能力。图 1-1 为采用结构透波复合材料制造的预警机天线罩，图 1-2 为应用结构耐热复合材料的美国“好奇”号火星车着陆器热防护系统。有统计表明，在第四代隐身战斗机中，结构功能一体化复合材料占其复合材料总体用量的 30% 左右；在先进电子探测和电子战飞机中，结构功能一体化复合材料用量更高，能够达到复合材料总用量的 60% 以上。树脂基结构功能复合材料已经成为最重要的一类复合材料。

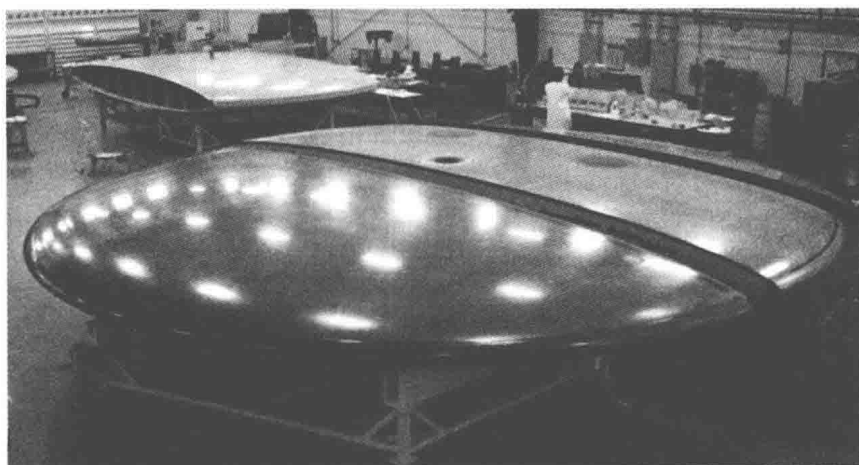


图 1-1 结构透波复合材料制造的预警机天线罩

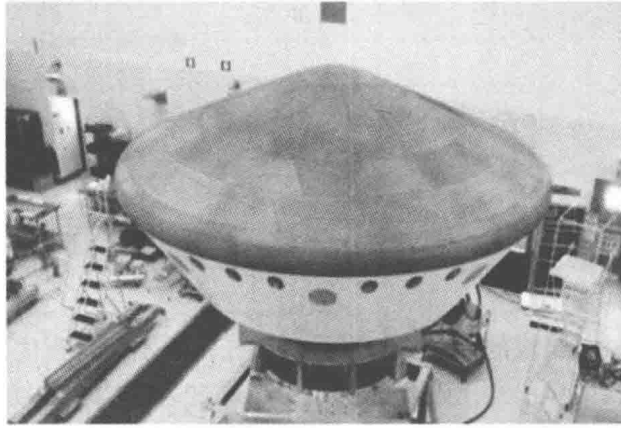


图 1-2 结构耐热复合材料在美国“好奇”号火星车着陆器热防护系统中的应用

## 1.2 树脂基结构功能复合材料的分类

树脂基结构功能复合材料分类和结构复合材料不同，很少按树脂基体、增强材料和制造工艺特点进行分类，而主要按复合材料具有的使用功能进行分类。树脂基结构功能复合材料主要包括树脂基结构吸波、结构透波、结构导电、结构阻燃以及智能复合材料和耐热复合材料等。随着树脂基结构功能复合材料的发展和复合材料使用功能的拓展，树脂基结构功能复合材料的类型将进一步增加。

树脂基结构吸波复合材料是一类兼具承载能力和高雷达波吸收能力的结构功能一体化复合材料，采用高性能透波纤维作为增强材料，高性能树脂体系与雷达波吸收剂复合作为吸波树脂基体。结构吸波复合材料不但可以明显降低 RCS，同时可以实现结构减重，是装备实现轻量化和隐身化的关键材料。

树脂基结构透波复合材料是指在宽频带具有良好的透波性能，同时具有较好的力学性能的一类复合材料，采用低介电、低损耗高性能树脂基体与透波增强纤维复合而成。结构透波复合材料常作为雷达天线罩材料使用，既要承受气动载荷保护雷达天线免受环境和气动热的直接影响，又要为雷达波提供发射和接收的电磁窗口。

树脂基结构阻燃复合材料是指既可承载，离火后又能够自熄或燃烧速率低及热释放量少的一类复合材料。结构阻燃复合材料主要用于各种运输工具内部装饰，如飞机的舱内装饰，既要求具有承载装饰功能，又有严格的阻燃性能要求。

树脂基结构导电复合材料是以高性能树脂为基体，加入各种导电物质，经过物理、化学方法复合后而得到的既具有一定导电性又具有良好力学性能的结构功能一体化复合材料。导电复合材料能够形成雷击电流通道以及一个封闭的电磁屏蔽体，防止雷击对飞机结构造成损伤和机载电子设备受到外部干扰，也有利于飞机表面静电的耗散或释放。

树脂基智能复合材料是指模仿生命系统、感知环境变化，并实时改变自身一种或多种性能参数，做出所希望的、能与变化后的环境相适应的复合材料。目前智能复合材料正处于发展的初级阶段，结构健康监测复合材料实现了感知环境变化，形状记忆复合材料实现了简单的自适应变化，自修复复合材料具备了部分性能的简单自修复的特点。

树脂基耐热复合材料是一种用于特殊气动热环境中以防热为目的的功能复合材料，在热防护系统中发挥隔热、维形、承载乃至抗核等功能。主要应用部位是弹道导弹弹头、返回式航天器、火箭发动机喷管等。

## 1.3 树脂基结构功能复合材料的特性

### 1.3.1 吸波特性

结构吸波复合材料是同时具有承载和高雷达波吸收能力的结构功能一体化复合材料。其吸波性能主要用反射率来表征，适用的主要测试方法有：美国海军研究实验室（NRL）弓形法、远场 RCS 法。

弓形法是 20 世纪 40 年代末由 NRL 提出，目前国际上应用最广泛的吸波材料反射率测量方法。弓形法测量系统常用测量频率范围为 2~18GHz。对于 -20dB 以上的反射率测量，弓形法测试精度可达到 1.2dB。雷达吸波材料（Radar Absorbing Material, RAM）反射率弓形法测量中，为减少边缘绕射的影响，一般要求试样边长大于  $5\lambda$ 。

利用远场 RCS 法进行 RAM 反射率的测量，可以有效减少边缘绕射等影响，因此能更真实地表征 RAM 的反射率性能。对于反射率为 -40dB 的测量，远场 RCS 法的测量精度达到 0.5dB。

结构吸波复合材料分为层合结构和夹层结构两大类。层合结构吸波复合材料主要应用于承载要求高和结构空间小的蒙皮类结构件，夹层结构吸波复合材料主要应用于翼面前后缘、进气道唇口和边缘结构等结构件。

层合结构吸波复合材料一般为多层阻抗渐变结构，表面功能层采用玻璃纤维、芳纶纤维等透波纤维增强，承载反射层采用碳纤维增强，树脂基体按耐热性要求，可以是环氧、双马和聚酰亚胺。表面功能层按阻抗匹配要求在树脂基体中引入了不同种类/含量的吸收剂。通过宽频复合吸收剂的使用和优化调控各功能层阻抗，可以获得具有优异的电性能和力学性能的结构吸波复合材料。某种厚度 8mm 层合结构吸波复合材料的吸波性能见图 1-3，层合结构吸波复合材料的基本力学性能见表 1-1。

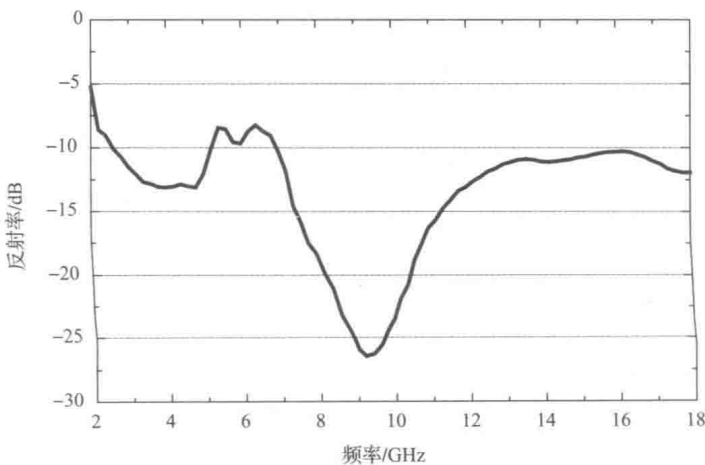


图 1-3 厚度 8mm 层合结构吸波复合材料的吸波性能

表 1-1 层合结构吸波复合材料基本力学性能

项目		氰酸酯树脂体系	双马树脂体系
0°拉伸	强度/MPa	581	532
	模量/GPa	28.2	28.0
0°压缩	强度/MPa	184	200
	模量/GPa	24.4	26.6
0°弯曲	强度/MPa	464	572
	模量/GPa	18.2	27.1
0°层间剪切强度/MPa		39.0	42.7

夹层结构吸波复合材料是一种由透波面板层、吸波芯层和反射面板层构成的结构吸波功能复合材料，其中透波面板由透波性能好、力学性能高的复合材料制备而成，芯层材料可以是具有损耗功能的吸波蜂窝芯或吸波泡沫芯。夹层结构吸波复合材料不仅具有密度低、比强度高、比模量高的优点，还可以实现宽频高吸收的效果。采用不同厚度的吸波蜂窝芯和面板厚度制备的蜂窝夹层结构吸波复合材料的吸波性能见图 1-4，基本力学性能见表 1-2。

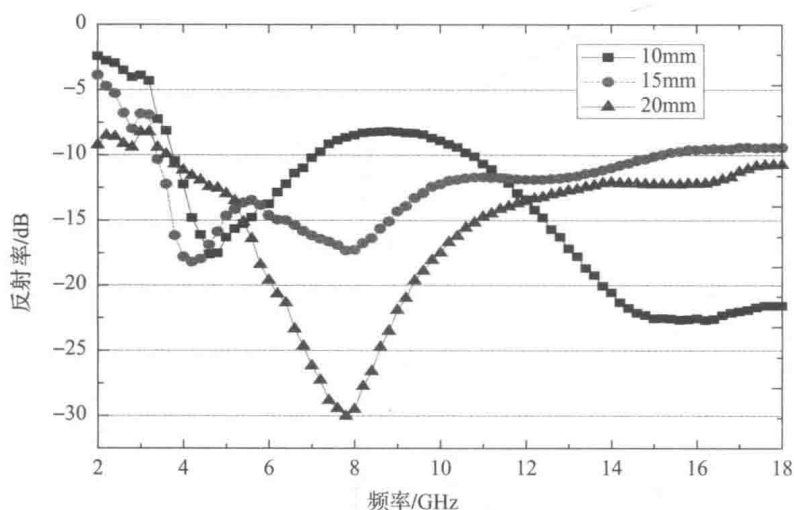


图 1-4 不同厚度夹层结构吸波性能

表 1-2 夹层结构吸波复合材料基本力学性能

项目	性能
压缩强度/MPa	8.5
压缩模量/MPa	350
平面拉伸强度/MPa	2.9
平面剪切强度/MPa (L 向)	4.6
平面剪切强度/MPa (W 向)	3.4

表 1-2 (续)

项目	性能
三点弯曲最大载荷/kN (L向)	3.5
三点弯曲最大载荷/kN (W向)	3.5
三点弯曲芯子剪切强度/MPa (L向)	2.2
三点弯曲芯子剪切强度/MPa (W向)	2.1
四点弯曲最大载荷/kN (L向)	2.4
四点弯曲最大载荷/kN (W向)	2.2
四点弯曲芯子剪切强度/MPa (L向)	2.1
四点弯曲芯子剪切强度/MPa (W向)	2.0

### 1.3.2 透波特性

结构透波复合材料由低介电、低损耗树脂基体与透波增强材料复合而成,同时具有宽频带透波和较好的力学性能。介电性能是评价透波材料电性能的主要性能指标。透波材料介电性能测试主要包括传输线法、谐振腔法和自由空间法。

谐振腔法是微波频段测试材料介电性能的重要方法,有高的测试精度 ( $\tan \delta \pm 0.00002$ ),对低损耗介质材料可测量至  $10^{-6}$ 。谐振腔法只能测试材料点频的介电性能,对于宽频带测试有一定的局限性,而且只适用于低损耗介质材料的测试,对于高损耗介质材料的测试往往存在较大的误差。

自由空间法是一种非接触和非破坏的测试方法,对介质材料样品不会产生损伤;可以对介质材料样品进行宽频带扫频测试,频率范围为  $2.0 \sim 110\text{GHz}$ ,适用于表面平整、表面积大于波束横截面积 3 倍的样品。自由空间法测试精度为  $\tan \delta \pm 0.005$ ,不适于测试低损耗介质材料。

结构透波复合材料的树脂基体经历了从传统的酚醛树脂、不饱和聚酯树脂和环氧树脂到具有耐高温、高力学性能的双马来酰亚胺、聚酰亚胺和氰酸酯树脂基体,增强材料从最初的无碱玻璃纤维发展到高强玻璃纤维、石英纤维和高性能有机纤维。高性能树脂基体和增强材料构成的结构透波复合材料具有高的力学性能和优异的透波性能。表 1-3 为典型结构透波复合材料的介电性能,石英纤维增强树脂基结构透波复合材料的基本力学性能见表 1-4。

表 1-3 典型结构透波复合材料的介电性能

复合材料牌号	QW220/3218	EW210/4501A	石英/5575-2	Kevlar 49/PI
增强材料	石英玻璃纤维织物	无碱玻璃纤维织物	石英纤维	芳纶纤维
树脂类型	环氧	双马来酰亚胺	氰酸酯树脂	聚酰亚胺
介电常数 $\epsilon$	3.52	4.02	3.25	3.3
介电损耗角正切 $\tan \delta$	0.011	0.014	0.005	0.006



表 1-4 石英纤维增强透波复合材料力学特性

性能	QW220/3218 环氧复合材料	QW280/5528 氰酸酯复合材料	QW280/5429 双马复合材料
拉伸强度/MPa	550	966	873
拉伸模量/GPa	19.2	28	31
压缩强度/MPa	350	501	629
压缩模量/GPa	19.0	27.5	30.5
弯曲强度/MPa	715	765	876
弯曲模量/GPa	19.6	25	30
层间剪切强度/MPa	73	75	82
介电常数 $\epsilon$	3.50	3.4	3.3
介电损耗角正切 $\tan \delta$	0.010	0.004	0.009

### 1.3.3 导电特性

材料的导电性能通常用与尺寸无关的电阻率或电导率表示，其中电导率为电阻率的倒数。体积电阻率是材料导电性的一种表示方式。体积电阻率是材料每单位体积对电流的阻抗，用来表征材料的导电性质。通常体积电阻率越高，材料用作电绝缘部件的效能就越高。

对导电复合材料来说，材料的电导率不是随导电体的体积分数成正比例增加，而是当导电体体积分数增大到某一临界值时，其电导率突然增加。此后随着导电体的继续增加电导率缓慢提高，这种现象称为导电逾渗现象。电导率突然增加对应的导电体临界体积分数称为逾渗阈值（见图 1-5）。

表 1-5 为 5229D/T700 碳纳米管改性碳纤维增强环氧树脂基复合材料，表面电阻率小于  $100\Omega/\square$ ，厚度方向电阻率相比未改性复合材料电阻率降低两个数量级且具有优良的力学性能。

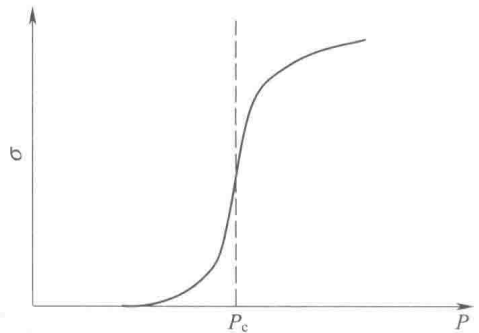


图 1-5 导电复合材料逾渗示意图

表 1-5 5229D/T700 碳纳米管导电复合材料性能

测试项目	测试条件	5229D/T700	5228/T700
0°拉伸强度/MPa	室温	2510 ± 137	2467
0°拉伸模量/GPa	室温	146 ± 21	130
0°压缩强度/MPa	室温	1021 ± 252	1296

表 1-5 (续)

测试项目	测试条件	5229D/T700	5228/T700
0°压缩模量/GPa	室温	116 ± 8.67	130
短梁剪切强度/MPa	室温	102 ± 2.36	103
$T_g$ ( $\tan \delta$ ) /°C	干燥	230	227
厚度方向电阻率/ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	室温	7.9	282.3
表面电阻率/ ( $\Omega/\square$ )	室温	85 ± 11	—

### 1.3.4 阻燃特性

结构阻燃复合材料的性能主要包括材料的阻燃性与材料的结构性（力学性能）两部分，主要用于考察材料在火中的行为和材料在火中和过火后的承载性能变化。主要的评价参数有：引燃时间，氧指数，热释放，自熄指数和热稳定指数，质量损失，燃烧性，烟密度，毒性气体和耐火性（含结构力学性能）。这些参数从不同方面反映材料在火中的行为。

酚醛树脂无需添加阻燃剂即具有优异的阻燃性能。这主要是由于酚醛树脂主链上含有大量的芳香官能团，具有较高的热稳定性，燃烧时可以生成芳构型碳，产生的可燃性气体较少，而形成的高碳泡沫结构碳层能覆盖在燃烧着的树脂表面，由于碳层具有很高的表面红外发射比，能通过辐射作用将大部分热量散失出去，因此碳层成为优良的热绝缘体，将内部未分解的酚醛树脂同外部高温环境隔离起来，从而制止酚醛树脂内部继续燃烧。

酚醛树脂的燃烧产物主要是焦炭、水蒸气、二氧化碳和少量一氧化碳，因此燃烧产物的毒性相对较低。而且气体产物的毒性大小主要与酚醛树脂的分子结构有关。提高酚醛树脂的交联密度，有利于减少燃烧时可燃性气体及毒性产物的释放。酚醛树脂的发烟特性与氧指数和成碳率有关，氧指数越高，烟密度越低。

高性能酚醛树脂基复合材料均使用改性酚醛树脂基体，采用增韧和阻燃相结合的手段使复合材料具有良好的力学性能和阻燃性。材料的具体性能如表 1-6 所示。

表 1-6 国内通用玻璃纤维织物/阻燃酚醛复合材料的性能

牌号	EW290/6201	SW220/3161	SW220/3162	EW160/3163	
增强材料	E 玻璃纤维织物	S 玻璃纤维织物	S 玻璃纤维织物	E 玻璃纤维织物	
固化温度/°C	120 ~ 135	150	150	150	
力学性能	拉伸强度/MPa	367	—	400	280
	拉伸模量/GPa	22.0	—	15	17.2
	压缩强度/MPa	386	—	—	230
	压缩模量/GPa	23.1	—	—	17.2
	弯曲强度/MPa	564	450	200	300