



“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

INTRODUCTION OF
ADVANCED COMPOSITE TECHNOLOGY

先进复合材料 技术导论

陈祥宝◎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

先进复合材料技术导论

陈祥宝 编著

航空工业出版社
北京

内 容 提 要

先进复合材料具有多学科交叉的特点,是目前十分活跃的研究领域,国内每年召开越来越多的先进复合材料会议表明,目前人们对先进复合材料发展非常关注和具有浓厚的兴趣。本书共分9章,从先进树脂基复合材料的增强纤维、树脂基体、制造技术、力学性能、热环境特性和功能特性、界面及应用几方面,介绍了先进复合材料相关理论和背景知识。

本书可供从事复合材料设计、制造、研究领域的人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进复合材料技术导论 / 陈祥宝编著. --北京:
航空工业出版社, 2017. 9

(先进复合材料技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5165 - 1236 - 4

I. ①先… II. ①陈 III. ①复合材料 IV.

①TB33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第149958号

先进复合材料技术导论 Xianjin Fuhe Cailiao Jishu Daolun

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9月第1版

2017年9月第1次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 20.5

字数: 509千字

印数: 1—2500

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

先进复合材料具有优异的使用性能，其具有比强度高、比刚度高、耐腐蚀、抗疲劳性能好、可设计性强、便于大面积整体成形等独特优点，在航空航天、基础设施、沿海油气田、风力发电、汽车和体育用品等军民工业领域具有广泛的应用。先进复合材料具有多学科交叉的特点，是目前十分活跃的研究领域，国内每年召开越来越多的先进复合材料学术和技术交流会议表明，目前人们对先进复合材料发展非常关注和具有浓郁的兴趣。

为了适应先进复合材料发展的需求，我们组织国内长期从事先进复合材料研究的部分专家编写了《先进复合材料技术导论》，旨在向国内相关研究人员提供全面和系统的相关理论和背景知识。

本书内容系统全面，数据表达规范，结构编排合理，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。本书第1章、第4章由陈祥宝编写，第2章由陈祥宝、彭涛、马全胜编写，第3章由钟翔屿编写，第5章由陈新文编写，第6章由李斌太编写，第7章由邢丽英编写，第8章由张宝艳编写，第9章由刘刚编写。全书由陈祥宝统稿，纪艳玲对本书的文字进行了审阅和修改。

由于时间匆促，水平有限，错漏之处在所难免，敬请读者批评指出。

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 先进复合材料特性	(2)
1.3 先进复合材料性能	(4)
1.3.1 树脂基体性能	(4)
1.3.2 预浸料性能	(6)
1.3.3 复合材料性能	(7)
1.4 先进复合材料的发展	(10)
参考文献	(11)
第2章 增强纤维	(12)
2.1 概述	(12)
2.2 玻璃纤维	(12)
2.2.1 玻璃纤维组成	(12)
2.2.2 玻璃纤维制造技术	(12)
2.2.3 玻璃纤维性能	(13)
2.3 碳纤维	(14)
2.3.1 碳纤维结构	(14)
2.3.2 PAN 基碳纤维制造技术	(15)
2.3.3 PAN 基碳纤维性能	(20)
2.3.4 沥青基和黏胶基碳纤维	(22)
2.4 芳纶纤维	(25)
2.4.1 芳纶纤维结构	(25)
2.4.2 芳纶纤维制造技术	(27)
2.4.3 芳纶纤维的性能	(30)
2.5 其他高性能纤维	(31)
2.5.1 硼纤维	(31)
2.5.2 超高分子量聚乙烯纤维	(32)
2.5.3 PBO 纤维	(34)
2.5.4 聚酰亚胺纤维	(36)
参考文献	(39)
第3章 树脂基体	(42)
3.1 概述	(42)
3.2 环氧树脂基体	(43)
3.2.1 环氧树脂合成	(43)

3.2.2	环氧树脂固化特性	(45)
3.2.3	环氧树脂的类型	(46)
3.2.4	环氧固化剂	(49)
3.2.5	环氧树脂基体改性	(53)
3.2.6	环氧树脂基复合材料	(54)
3.3	双马树脂基体	(61)
3.3.1	双马单体的合成	(61)
3.3.2	双马树脂基体改性	(65)
3.3.3	高双马树脂基复合材料	(67)
3.3.4	氰酸酯树脂基体	(71)
3.3.5	氰酸酯树脂改性	(74)
3.3.6	氰酸酯树脂基透波复合材料	(75)
3.4	聚酰亚胺树脂基体	(78)
3.4.1	降冰片烯封端 PMR 型聚酰亚胺树脂基体	(78)
3.4.2	苯乙炔封端 PMR 型聚酰亚胺树脂基体	(80)
3.4.3	液态成形用聚酰亚胺树脂基体	(82)
3.4.4	聚酰亚胺树脂基复合材料	(83)
3.5	热塑性树脂基体	(85)
	参考文献	(87)
第 4 章	复合材料制造技术	(93)
4.1	概述	(93)
4.2	预浸料制造技术	(94)
4.2.1	预浸料制造工艺	(94)
4.2.2	预浸料的性能	(96)
4.3	热压罐成形技术	(96)
4.3.1	热压罐成形工艺	(96)
4.3.2	热压罐成形技术的发展	(100)
4.4	RTM 成形技术	(101)
4.4.1	RTM 成形工艺	(101)
4.4.2	RTM 成形技术的发展	(104)
4.5	纤维缠绕技术	(105)
4.5.1	纤维缠绕工艺	(105)
4.5.2	纤维缠绕技术的发展	(109)
4.6	自动铺放技术	(110)
4.6.1	自动铺带技术	(110)
4.6.2	自动铺丝技术	(113)
4.6.3	自动铺放技术的应用	(116)
4.7	预浸料拉挤成形技术	(119)
4.7.1	预浸料拉挤成形技术	(119)

4.7.2 预浸料拉挤技术的发展	(123)
参考文献	(125)
第5章 复合材料力学行为	(127)
5.1 概述	(127)
5.2 弹性变形	(128)
5.2.1 广义胡克定律	(128)
5.2.2 材料的应力—应变关系	(129)
5.2.3 复合材料有效弹性模量的预测	(131)
5.2.4 材料变形的测量方法	(132)
5.3 复合材料强度	(136)
5.3.1 单向复合材料的细观强度分析	(136)
5.3.2 复合材料的宏观强度理论	(140)
5.4 复合材料韧性	(142)
5.4.1 I型层间断裂韧性	(143)
5.4.2 开孔拉伸/压缩强度	(143)
5.4.3 冲击后压缩强度	(143)
5.5 失效行为	(144)
5.5.1 复合材料层合板的破坏模式	(144)
5.5.2 复合材料层合板宏观破坏形貌	(145)
5.6 复合材料力学试验方法	(149)
5.6.1 拉伸试验方法	(151)
5.6.2 压缩试验方法	(153)
5.6.3 剪切试验方法	(156)
5.6.4 弯曲试验方法	(159)
5.6.5 短梁强度方法	(163)
5.6.6 I型层间断裂韧性试验方法	(164)
5.6.7 开孔拉伸试验方法	(165)
5.6.8 开孔压缩试验方法	(166)
5.6.9 冲击后压缩 (CAI) 试验方法	(168)
5.7 复合材料力学性能 B 基值计算方法	(169)
5.7.1 MIL-HDBK-17 计算方法	(170)
5.7.2 FAA 回归分析模型	(171)
5.7.3 MIL方法与 FAA方法比较分析	(172)
5.7.4 小样本分析模型	(172)
参考文献	(173)
第6章 复合材料热与环境特性	(176)
6.1 概述	(176)
6.2 热化学行为	(177)
6.2.1 热氧老化	(177)

6.2.2	热化学老化	(187)
6.3	热物理行为	(187)
6.3.1	热传导性能	(187)
6.3.2	热膨胀特性	(194)
6.3.3	蠕变性能	(198)
6.3.4	物理老化	(202)
6.4	湿热性能	(203)
6.4.1	复合材料吸湿行为与表征	(203)
6.4.2	复合材料吸湿影响因素	(205)
6.4.3	复合材料湿热老化特性	(207)
6.4.4	吸湿对复合材料性能的影响	(209)
6.5	环境特性	(212)
6.5.1	低温环境特性	(212)
6.5.2	辐照环境特性	(213)
6.5.3	盐雾环境特性	(215)
6.5.4	耐腐蚀性	(217)
	参考文献	(218)
第7章	复合材料功能特性	(222)
7.1	概述	(222)
7.2	吸波特性	(222)
7.2.1	复合材料吸波原理	(222)
7.2.2	复合材料吸波性能表征	(224)
7.2.3	复合材料吸波特性	(228)
7.3	透波特性	(230)
7.3.1	复合材料透波原理	(230)
7.3.2	复合材料透波性能表征	(231)
7.3.3	复合材料透波特性	(232)
7.4	导电特性	(235)
7.4.1	复合材料导电原理	(235)
7.4.2	复合材料导电性能表征	(238)
7.4.3	结构导电复合材料	(240)
7.5	阻燃特性	(242)
7.5.1	复合材料阻燃原理	(242)
7.5.2	复合材料阻燃性能表征	(243)
7.5.3	结构阻燃复合材料	(249)
7.6	防隔热特性	(254)
7.6.1	热防护机理	(254)
7.6.2	烧蚀防热性能表征	(256)
7.6.3	防热复合材料	(257)

参考文献	(260)
第8章 复合材料界面	(264)
8.1 概述	(264)
8.2 界面黏结	(265)
8.2.1 界面黏结作用理论	(265)
8.2.2 物理作用对界面黏结的影响	(267)
8.2.3 纤维上浆剂对界面黏结的影响	(273)
8.3 界面黏结强度表征	(278)
8.3.1 纤维断裂法(单丝断裂法)	(278)
8.3.2 微球脱黏试验	(280)
8.3.3 纤维拔出试验	(282)
8.3.4 纤维压入/顶出试验	(282)
8.4 界面结构与性能	(283)
8.4.1 界面微观结构表征技术	(283)
8.4.2 界面微观结构和性能	(286)
8.4.3 界面特性与复合材料性能的相关性	(291)
参考文献	(292)
第9章 先进复合材料应用	(296)
9.1 概述	(296)
9.2 先进复合材料在航空领域的应用	(296)
9.2.1 大型客机应用	(296)
9.2.2 战斗机应用	(299)
9.2.3 直升机应用	(300)
9.2.4 航空发动机应用	(301)
9.3 先进复合材料在宇航领域的应用	(303)
9.3.1 卫星结构应用	(303)
9.3.2 液氢贮罐应用	(305)
9.3.3 发动机壳体应用	(305)
9.4 先进复合材料的其他应用	(307)
9.4.1 复合材料高压气瓶	(307)
9.4.2 轨道交通应用	(308)
9.4.3 汽车应用	(309)
9.4.4 游艇的应用	(310)
9.4.5 风电叶片应用	(311)
参考文献	(311)
后记	(314)

第1章 绪 论

1.1 概述

先进复合材料主要是指连续纤维作为增强材料的一类复合材料。按增强纤维类型分类,可分为玻璃纤维增强复合材料、碳纤维增强复合材料、芳纶纤维增强复合材料、碳化硅纤维增强复合材料等;按基体类型分类,可分为树脂基复合材料、碳基复合材料和陶瓷基复合材料、金属基复合材料等。复合材料常用的分类方式见表1-1。树脂基复合材料是目前发展最迅速、应用最广泛的一类复合材料,本书涉及的先进复合材料主要指的是先进树脂基复合材料。

表1-1 复合材料的分类

分类方式	分类名称	说 明
应用性能	结构复合材料	应用于承载结构的复合材料
	功能复合材料	应用于功能性结构的复合材料,如阻尼、吸波等,通常这一类复合材料具有结构功能一体化的特征
基体材料类型	树脂基复合材料	基体为热固性或热塑性树脂,如环氧树脂材料
	金属基复合材料	基体为金属材料,如铝基、钛基复合材料
	碳基复合材料	基体相为碳,如碳/碳复合材料
	陶瓷基复合材料	基体为无机非金属材料,如陶瓷基复合材料
增强材料形态	连续纤维增强复合材料	增强材料为长连续纤维
	短纤维或晶须增强复合材料	增强材料为短切纤维或晶须
	颗粒增强复合材料	增强材料为颗粒形态
增强纤维类型	碳纤维增强复合材料	增强材料为碳纤维
	玻璃纤维增强复合材料	增强材料为玻璃纤维
	芳纶纤维增强复合材料	增强材料为芳纶纤维
	硼纤维增强复合材料	增强材料为硼纤维
	陶瓷纤维增强复合材料	增强材料为陶瓷纤维

与传统的钢、铝合金等结构材料相比(见表1-2),先进树脂基复合材料的密度约为钢的1/5,铝合金的1/2,其比强度、比刚度(又称比模量)明显高于钢和铝合金。使用先进树脂基复合材料代替铝合金等金属材料,可以明显减轻结构重量^①,先进树脂基复合材料已经成为继铝合金、钛合金和钢之后的最重要航空结构材料之一。先进树脂基复合材

^① 本书“重量”为“质量”(mass)概念,单位为法定单位千克(kg)等。

料在飞机上的应用，可以实现 15% ~ 30% 减重效益，这是使用其他材料所不能实现的。因此，先进树脂基复合材料的用量已经成为航空结构先进性的重要标志。

表 1-2 几种典型的单向树脂基复合材料与金属材料性能比较

材 料	性 能				
	拉伸强度/ MPa	拉伸模量/ GPa	比强度/ (MPa/ (g/cm ³))	比刚度/ (GPa/ (g/cm ³))	密度/ (g/cm ³)
铝合金	420	70	150	26	2.78
结构钢	1200	205	150	26	7.85
钛合金	1000	118	220	26	4.52
玻璃纤维/聚酯复合材料	1250	50	625	24	2.00
高强度碳纤维/环氧树脂材料	1450	135	1000	95	1.45
高模量碳纤维/环氧树脂材料	1050	235	655	147	1.60
芳纶纤维/环氧树脂材料	1375	78	980	56	1.40

先进树脂基复合材料能方便地制造复杂气动外形的构件，可一次成形双曲率复杂气动外形和整体结构的复合材料构件，减少零件数量。先进树脂基复合材料还可采用多种工艺成形，具有广泛的工艺适用性，可以降低制造成本。此外，先进树脂基复合材料具有优异的抗疲劳、耐腐蚀、耐化学侵蚀和耐环境性能。

本书将系统介绍先进树脂基复合材料的增强纤维，树脂基体，制造技术，力学、化学和物理性能，功能特性以及在不同领域的典型应用状况等，读者可通过本书比较全面地了解和掌握有关先进树脂基复合材料基础知识和应用技术等。

1.2 先进复合材料特性

复合材料明显不同于金属材料。复合材料通常由不同组分或形态的材料复合而成，在复合材料中各组分保持各自的特性，互相不溶解或熔融在一起。不同组分的相互作用使复合材料获得所需的强度和刚度等力学性能以及其他功能特性。

在 GB/T 3961—2009《纤维增强塑料术语》中，复合材料被定义为“由黏结材料（基体）和纤维状、粒状或其他形状材料，通过物理或化学的方法复合而成的一种多相固体材料”。近年，国内复合材料研究人员又进一步把复合材料定义为“用经过选择的，含一定数量比的两种或两种以上的组分，通过人工复合，组成多相、三维结构且各相之间有明显界面的、具有特殊性能的材料”。

复合材料在性能、设计、制造方面有区别于传统材料的基本特点，主要体现在复合效应、性能的可设计性和多功能兼容性，以及材料与构件制造的同步性等方面。

复合效应：复合材料中增强体和基体各保持其基本特性，通过界面相互作用实现叠加和互补，使复合材料产生优于各组分材料的新的、独特的性能。在碳纤维增强环氧树脂材料中，环氧树脂基体模量低，力学性能低，同时还是脆性材料；碳纤维强度和模量高，但却只能承受拉伸应力，在和树脂复合之前，碳纤维不能承受压缩载荷。当树脂和碳纤维复

合后，固化后的树脂和纤维成为强度高、刚性大的复合材料，并具有优异的韧性。

性能可设计性：复合材料性能可设计性主要表现为可通过改变材料组分、结构、工艺等调控复合材料性能，赋予复合材料性能设计以极大的自由度。可以按照工程结构的使用要求，选择适当的组分材料和调整增强纤维的取向，使设计的结构重量轻，安全可靠和经济合理（见图1-1）。

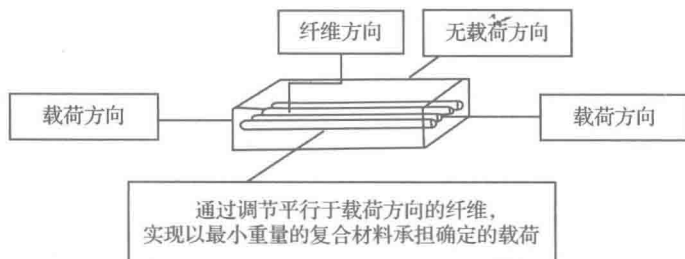


图1-1 根据承载要求设计复合材料性能

多功能兼容性：当对复合材料构件有多种功能要求时，可增减某种组分，从而在满足主要功能要求的同时又能兼顾其他功能要求。图1-2是通过在复合材料中引入吸收剂和进行电性能/力学性能优化设计后，采用芳纶纤维和碳纤维增强的层合结构吸波复合材料的电磁反射率测试结果，表1-3列出了层合结构吸波复合材料的力学性能。层合结构吸波复合材料不仅可以承受大的结构载荷，而且具有优异的电磁波吸收性能。

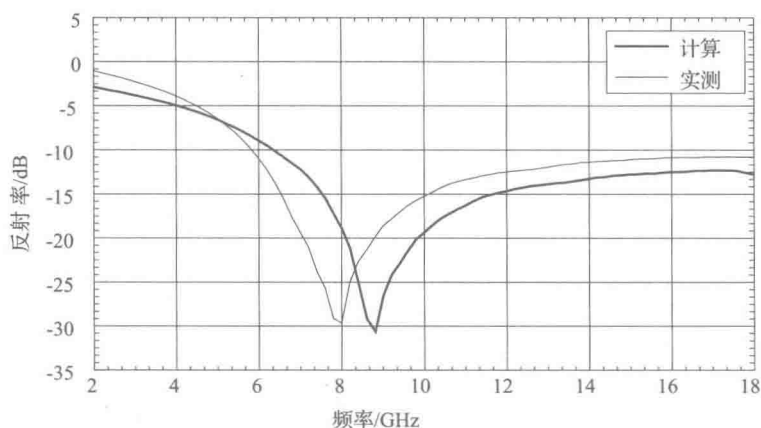


图1-2 不同频率下层合结构吸波复合材料的电磁反射率

表1-3 层合结构吸波复合材料的力学性能

项 目	材料性能
0°拉伸强度/MPa	482
0°拉伸模量/GPa	36
0°压缩强度/MPa	200
0°压缩模量/GPa	25.9
0°层剪强度/MPa	44.4

材料与构件制造的同步性：与一般传统材料不同，复合材料构件一般不是经机械加工制造，而是构件成形与材料制造同时完成。因此在复合材料设计的同时，不仅要依据构件性能要求，还必须考虑构件的尺寸和形状以选择适宜的成形工艺。图 1-3 为采用树脂传递模塑（RTM）成形技术制备的复合材料构件。通过将增强体编织成预成形体置于闭合模具中，然后将树脂注入固化后直接获得最终的复合材料构件。

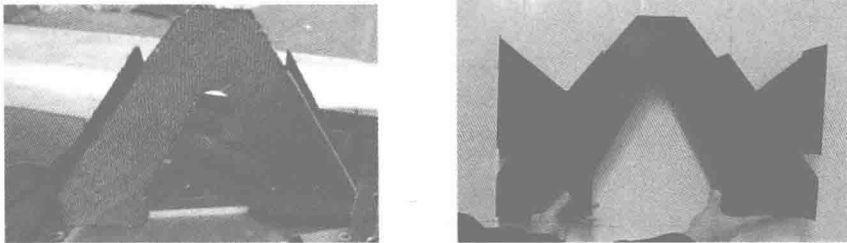


图 1-3 RTM 成形技术制备的复合材料构件

1.3 先进复合材料性能

1.3.1 树脂基体性能

先进树脂基复合材料性能包括树脂基体性能、预浸料性能及其复合材料性能。树脂基体性能在一定程度上决定了复合材料的性能，这是因为复合材料的使用温度和耐环境性能主要由树脂耐热性和耐化学性能决定，树脂基体的黏度特性影响复合材料的成形工艺性，树脂基体的反应特性决定了预浸料的适用期和贮存期，树脂基体的力学性能和韧性对复合材料的力学性能和韧性具有非常明显的影响。

(1) 玻璃化转变温度 (T_g)：玻璃化转变是聚合物从玻璃态向高弹态的次级转变。在玻璃化转变温度下，聚合物的比热容（旧称比热）和比容发生突变，分子链段开始运动，热膨胀系数迅速增大。聚合物链段中强极性基团的存在增加分子间作用力，进而增加链密度，因此极性聚合物有相对高的 T_g 。在聚合物主链和侧基的庞大刚性的基团阻碍链段的自由转动，有利于 T_g 的提高；而柔性的侧基能使链段间的距离增大，使其更易运动从而降低 T_g ；热固性树脂的交联密度增加会明显限制链段的运动，因此高交联密度的树脂具有高的 T_g 。为了获得高的 T_g 和耐热性，先进复合材料树脂基体一般设计成具有高交联密度和含有大量庞大刚性链段。

(2) 热氧化稳定性：为满足航空航天领域的需要，已经发展了能在 400℃ 以上长期使用的耐高温树脂基体。动态热失重分析 (TGA) 可用以确定耐高温树脂基体的短期耐热性和热氧化稳定性；高温长期老化试验可用以确定树脂基体的长期热氧化稳定性。热氧化稳定性主要由组成分子链的原子间键能决定，因此具有高键能的芳杂环结构，如苯和氮杂萘，具有高的热氧化稳定性。

最稳定的聚合物是由杂环和芳香共轭结构组成的梯形聚合物。最稳定的柔性链基团为所有氢被氟和苯基取代的脂肪族化合物。—O—，—S—，—CONH—和—CO—也具有较好的热稳定性；—SO₂—，—NH—，亚烃基和含氯基团的热稳定性较差。对于含有苯撑基

团的聚合物，其热稳定性顺序为 $p > m > o$ 。交联一般可以改善聚合物的热稳定性。

(3) 热膨胀系数 (CTE)：两种不同热膨胀系数的材料结合在一起，当温度变化时，会在界面上产生应力。如果这种热膨胀系数差别较大，则有可能导致界面结合的破坏。复合材料是由树脂和增强纤维组成，随着温度的变化，树脂和纤维界面会产生应力，严重时会出现界面分层。因此，高性能树脂基体必须考虑和增强材料的热膨胀系数匹配问题。

热膨胀系数可以采用 TMA 测定。表 1-4 为部分常用复合材料树脂和增强材料的热膨胀系数。一般来说，无机材料的热膨胀系数较有机高分子材料低。

表 1-4 部分树脂和增强材料的热膨胀系数

材料	CTE/($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	材料	CTE/($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
聚酯	70 ~ 101	酚醛	16 ~ 25
聚矾	59 ~ 86	碳纤维	3.2 ~ 12.1
环氧	59	玻璃纤维	8.46
聚酰亚胺	45 ~ 50	石英纤维	0.31

(4) 力学性能：高性能树脂基体的力学性能主要包括拉伸强度和模量、断裂伸长率、弯曲强度和模量、冲击强度和表面硬度等。这些性能会随温度、加工和固化条件的变化而改变。与其他结构材料相比，高性能树脂基体的一个重要特征是黏弹性，即其性能强烈依赖于作用温度和时间。由于存在黏弹性，高分子材料，尤其是热塑性树脂基体，在使用过程中会发生蠕变和应力松弛。

高性能树脂基体或具有刚性骨架，大分子主链上含有大量的芳杂环，有的共轭双键还以梯形结构有序排列，分子的规整性好；或具有高的交联密度。因此高性能树脂基体一般具有高的模量，但断裂伸长率和韧性偏低。表 1-5 为部分高性能树脂基体的力学性能。

表 1-5 部分高性能树脂基体的力学性能

树脂基体	拉伸强度/MPa	弯曲强度/MPa	弯曲模量/GPa
聚醚醚酮 (PEEK)	99	145	3.8
聚醚酰亚胺 (PEI)	107	148	3.37
热塑性聚酰亚胺 (PI (TP))	87	134	3.16
双马来酰亚胺 (BMI)	84	45	3.3
热固性聚酰亚胺 (PI (TS))	75	40	3.5
环氧 (EP)	85	50	3.3

(5) 电性能：高性能树脂在电子工业的应用增长很快，包括绝缘材料、透波材料等。因此了解高性能树脂的电性能也是极其重要的。

材料的电性能主要包括介电性能和电击穿强度。材料的介电常数指的是单位电场强度

下材料单位体积内平均能量储存。介电常数的大小和材料的介电极化（电子极化、原子极化和取向极化）程度有关。

高分子材料作为绝缘材料使用时，除考虑在使用条件下耐热性、力学性能满足要求外，还需考虑材料的绝缘性能。当在某一电场作用下其介电损耗所产生的热量超过材料散发的热量时，会引起材料局部过热，随之会产生材料的击穿。高分子材料在应力作用下发生变形也会影响其击穿行为，使击穿强度下降。在应力和电场共同作用下发生的击穿行为称为电机械击穿。表 1-6 为部分高分子材料的电性能。

表 1-6 部分高分子材料的电性能

材料	电击穿强度/(V/mil)	介电常数 (60Hz)	介电损耗 (60Hz)
环氧	400	4.02 ~ 4.79	0.005 ~ 0.038
尼龙 6	385	4.0 ~ 5.3	0.014 ~ 0.06
聚酯	300 ~ 400	2.8 ~ 4.4	0.003 ~ 0.04
氰酸酯	390	2.7 ~ 3.2	0.001 ~ 0.005
BMI	400	4.0 ~ 4.8	0.004 ~ 0.035
聚乙烯	480	2.3	<0.0005

除各项物理、力学和电性能之外，复合材料高性能树脂基体的研制还需考虑树脂制备工艺是否简单，能否稳定批量生产，价格是否低廉等因素。

1.3.2 预浸料性能

(1) 树脂质量含量：树脂质量含量是预浸料中树脂、固化剂和各种改进剂的总和，以它们所占质量的百分数表示。树脂质量含量测定方法主要有 3 种：

①萃取法 将试样放在索氏萃取器中，用适当的溶剂进行萃取，使预浸料中的树脂全溶解。根据试验前后试样质量的变化，计算预浸料的树脂质量含量。

②溶解法 将试样放入溶剂中，经过一段时间煮沸，使预浸料中的树脂完全溶解。根据试验前后试样质量的变化，计算预浸料的树脂质量含量。

③灼烧法 将试样放入坩埚，在马弗炉中灼烧，烧尽预浸料中的树脂。根据试验前后试样质量的变化，计算预浸料的树脂质量含量。

(2) 挥发分含量：预浸料中的挥发分主要来源于树脂中的低分子物和湿法预浸时未除去的溶剂，预浸料中的挥发分在成形时可使树脂具有一定的流动性进而使树脂在复合材料中分布更加均匀，但是如果挥发分量控制不好会使成形后的复合材料孔隙率增加，性能下降。挥发分含量的测定方法是：将试样在一定条件下加热，根据加热前后试样的质量损失计算挥发分含量，并以其所占百分数表示。采用热熔法制备的预浸料，由于制造过程不使用溶剂，因此其挥发分要明显低于溶液法（湿法）预浸料。

(3) 单位面积纤维质量：预浸料单位面积纤维质量是预浸料所含纤维量的表示。将树脂含量测试时所得试样纤维质量除以试样尺寸（面积）即得单位面积纤维质量。在树脂含量和纤维种类确定后，单位面积纤维质量越大，预浸料的厚度就越大。