



竹纤维增强 树脂复合材料 及其微观形貌

洗杏娟 洗定国 叶颖薇 著

科学出版社

427385

竹纤维增强树脂
复合材料及其微观形貌

洗杏娟 洗定国 叶颖薇 著



科学出版社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍作者在新型竹增强树脂复合材料方面所取得的研究成果。全书共八章，主要内容包括：竹长纤维增强树脂复合材料及其优异特性；竹短纤维增强树脂复合材料及其组分和纤维长度对力学性能的影响；竹短切片增强复合材料的宏观力学性能与微观结构的关系；竹纤维与其它纤维混杂复合材料的混杂效应与微观形貌；竹/塑复合材料的增强机理；竹/塑复合材料的应用和展望。书中除第一章和第八章外，每章均对应文字列出相当数量的微观形貌图加以分析、说明。

本书可供从事材料科学、冶金、电子、航空、航天、机械、建筑、林业、生物等研究的科技人员及高等院校有关专业的师生参考。

竹纤维增强树脂复合材料及其微观形貌

冼杏娟 冼定国 叶颖薇 著

责任编辑 童安齐

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

新华公司 激光照排

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995 年 6 月第 一 版 开本：850×1168 1/32

1995 年 6 月第一次印刷 印张：7 插页：2

印数：1—710 字数：180 000

ISBN 7-03-004477-0/TQ·19

定价：21.80 元

前 言

随着生产的发展和人们生活水平的提高，结构材料的需用量日益增加，材料已从金属、无机非金属、高分子三大类发展到第四类——复合材料。生产这些材料要消耗大量的天然资源。一些可用天然材料的消耗量也很大，例如木材，全球每年消耗量达到十多亿吨，其资源日渐短缺。因此，研究并制造代木材料就成为材料科学和材料工业的重要课题。在人工制造的材料中，复合材料代木是可行的，但人造纤维复合材料的造价较高。进一步充分利用天然材料资源是解决这一问题的好途径。竹材是天然材料中强度、刚度和弹性都比木材好的一种，其密度更小，资源丰富，生长茂密，且成熟期较木材短。然而，由于其结构为空心竿状，易干裂、受虫蛀，因此其利用受到限制。

作者多年来从研究竹子的力学性能及微观结构出发，进而采用现代复合工艺研制了多种性能良好的竹纤维增强树脂复合材料，它们是代木的理想材料；同时研究、分析了这类材料的力学性能和微观机理，取得了一定的研究成果，其中部分成果在国内发表后，引起了有关人士的重视，要求进行学术交流。

本书全面、系统地介绍了作者在新型竹增强复合材料方面所取得的研究成果，重点论述竹子的长纤维、短纤维、短切片增强各种塑料复合材料的力学性能、微观结构及增强机理。本书所论述的竹/塑复合材料，主要特点是展开纤维，增大界面粘接，从而提高了材料的性能。竹/塑复合材料是充分利用天然资源，采用现代复合工艺而制成的一种性能良好、重量轻、耐腐蚀而又价廉的结构材料新品种，在生产及生活各方面有广泛的应用前景，具有一定的社会和经济效益。书中同时着重介绍新型竹/塑复合材料力学性能与微构结构的关系，纤维相的几何形状，基体相的成分、比

例和工艺条件及其对竹/塑复合材料力学性能的影响,微观增强机理和系统的微观组织结构形貌与分析等。本书阐述的内容是材料科学、复合材料力学和生物科学等交叉学科的前缘课题,具有明确的学术性。

本研究工作得到中国自然科学基金委员会(项目 1860360)、香港理工大学研究委员会和裘槎基金的资助,以及中国科学院力学研究所的热情支持;杨秉宪教授审阅了全稿。作者在此一并致以谢意。

由于作者未见类似内容的专著出版,可参考和借鉴的资料、文献较少,因而本书存在的不足之处,请同行和读者指正。

主要符号

AE	声发射
AE _i	初始声发射信号
AE _{lc}	纵向开裂声发射信号
AE _{max}	最大声发射信号
AE _s	突发声发射信号
AE _t	声发射总累积值
B ₅	5层 [0/90] 铺层的蒿竹长纤维/环氧层板
BB	蒿竹
BBSF	蒿竹短纤维
BC	竹短切片
BCRP	短切竹片增强塑料
BFRP	竹纤维增强塑料
BLF	竹长纤维
BLF/EP	竹长纤维增强环氧树脂
BLF/UF	竹长纤维增强脲醛树脂
BLF/UP	竹长纤维增强不饱和聚酯
BLFRP	竹长纤维增强塑料
BSF	竹短纤维
BSFRP	竹短纤维增强塑料
BSF/CMT	竹短纤维增强水泥
CBF	甘蔗纤维
CF	碳纤维
CHF	椰壳纤维
E _b	弯曲模量
E _c	压缩模量

E_i	冲击能量
E_t	拉伸模量
EP	环氧树脂
G_{13}	剪切模量
G_i	冲击强度
GF	玻璃纤维
JF	黄麻纤维
K_{IC}	断裂韧性
K_{IC}^f	侧面切口试件的断裂韧性
K_{IC}^e	外层切口试件的断裂韧性
K_{IC}^i	内层切口试件的断裂韧性
KF	芳纶纤维
l_c	短纤维临界强度 ($l_c = \frac{\sigma_{f11} r}{2\tau_i}$)
NF	尼龙纤维
PB	毛竹
PBSF	毛竹短纤维
PF	酚醛树脂
PS	聚苯乙烯
PVC	聚氯乙烯
r	纤维半径
RF	苯酚树脂
$S (=l/d)$	短纤维的长度 l 与直径 d 的比例
SEM	扫描电子显微镜
T	用乙醇处理竹纤维表面
T_1	用低浓度 NaOH 处理竹纤维表面 (方法 1)
T_2	用 H_2O_2 处理竹纤维表面 (方法 2)
T_3	用蒸煮方法处理竹纤维 (方法 3)
U_3	3 层 [0] 铺层的蒿竹长纤维/环氧层板
U_5	5 层 [0] 铺层的蒿竹长纤维/环氧层板

U_7	7层 [0] 铺层的蒿竹长纤维/环氧层板
UF	脲醛树脂
UP	不饱和聚酯
V_f	纤维体积含量
W_d	干试件重量
W_f	纤维重量含量
W_i	试件不同浸水时间的重量
W_m	基体树脂重量含量
W_p	试件吸水量
$\varepsilon\%$	断裂百分应变
ε_c	复合材料的应变
ε_f	纤维的应变
ε_m	基体的应变
ν	泊松比
ρ	密度
σ_b	弯曲强度
σ_c	压缩强度
σ_{bo}	竹材外层弯曲强度
σ_{bi}	竹材内层弯曲强度
$\sigma_{f_{11}}$	纤维纵向拉应力
σ_t	拉伸强度
σ_{ti}	竹内层拉伸强度
σ_{to}	竹外层拉伸强度
σ_{tdm}	竹下部中层的拉伸强度
σ_{tdt}	下部整片竹的拉伸强度
σ_{tum}	竹上部中层的拉伸强度
σ_{ult}	极限强度
τ_i	界面剪切应力
τ_{ILSS}	层间剪切强度

目 录

前言

主要符号

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 从天然复合材料到人工复合材料的发展过程	(1)
§ 1.2 天然纤维增强体	(2)
§ 1.3 研制天然纤维复合材料的意义	(3)
§ 1.4 宏观性能与微观机理相结合是研究复合材料的重要方法	(6)
第二章 一种天然纤维复合材料——竹材	(8)
§ 2.1 竹材的微观组织结构	(8)
§ 2.2 不同种类不同部位竹材的力学性能	(12)
§ 2.3 竹材微观结构与力学性能的关系	(18)
§ 2.4 竹材断裂特性	(23)
§ 2.5 竹纤维的提取及其微观结构分析	(26)
§ 2.6 结语	(26)
一种天然纤维复合材料——竹子的微观形貌	(28)
第三章 竹长纤维增强树脂复合材料的研制、力学性能及微观机理	(52)
§ 3.1 竹长纤维增强树脂复合材料的复合工艺及测试技术	(52)
§ 3.2 竹长纤维增强树脂复合材料层板的宏观力学性能	(54)
§ 3.3 声发射技术监测竹长纤维增强树脂层板的损伤破坏	(63)
§ 3.4 竹长纤维增强环氧复合材料的动态破坏及微观机理	(65)
§ 3.5 结语	(66)
竹长纤维增强树脂复合材料的微观形貌	(68)
第四章 纤维长度和组分对竹短纤维增强复合材料性能的影响	(75)
§ 4.1 竹短纤维增强树脂复合材料的研制	(76)
§ 4.2 竹短纤维增强树脂复合材料的力学性能及其与组分的关系	

.....	(77)
§ 4.3 竹短纤维增强树脂复合材料的防水和耐火性能	(84)
§ 4.4 竹短纤维增强水泥复合材料	(85)
§ 4.5 竹短纤维长径比对其复合材料性能的影响	(85)
§ 4.6 结语	(90)
竹短纤维增强树脂复合材料的微观形貌	(93)
第五章 竹短切片增强树脂复合材料的宏观性能与微观结构	
的关系	(107)
§ 5.1 竹短切片增强复合材料的研制与特点	(107)
§ 5.2 竹短切片增强树脂复合材料的性能	(108)
§ 5.3 不同树脂基体对竹短切片增强复合材料力学性能的影响	(113)
§ 5.4 树脂含量与竹短切片增强复合材料力学性能的关系	(115)
§ 5.5 增强体状态对竹短切片增强复合材料力学性能的影响	(117)
§ 5.6 复合工艺条件对竹短切片增强复合材料性能的影响	(120)
§ 5.7 结语	(121)
竹短切片增强树脂复合材料宏观性能与微观结构关系的形貌	(122)
第六章 竹短纤维与其它纤维混杂复合材料	(141)
§ 6.1 混杂复合材料的特点	(141)
§ 6.2 竹短切纤维混杂复合材料的研制	(142)
§ 6.3 竹短切纤维混杂复合材料的性能与组分的关系	(143)
§ 6.4 竹短切纤维混杂复合材料的混杂效应	(154)
§ 6.5 结语	(162)
竹短纤维与其它纤维混杂复合材料微观形貌	(163)
第七章 竹/塑复合材料的增强机理	(182)
§ 7.1 两种竹增强环氧材料的复合方法	(182)
§ 7.2 竹材处理前后及与环氧复合前后性能的比较	(185)
§ 7.3 竹/环氧复合材料的增强机理	(188)
竹/塑复合材料增强机理的微观形貌	(190)
第八章 竹/塑复合材料的应用与展望	(205)
§ 8.1 竹/塑复合材料的应用前景	(206)
§ 8.2 研制优质的竹/塑复合材料的关键技术问题	(207)

§ 8.3 竹增强复合材料的展望·····	(210)
§ 8.4 结语·····	(211)
参考文献	(213)

第一章 绪 论

§ 1.1 从天然复合材料到人工复合材料的发展过程

复合材料由增强体、基体以及它们之间的界面所组成。增强体主要起承载作用，基体主要起连接增强体的作用，界面的主要作用是传递载荷。复合材料本身就是一种结构，以两种或多种材料合理地组合而成，在功能上比单一材料更为有效。

植物中的木、竹、椰壳和茅草等以及动物中的骨骼、肌肉等是天然的复合材料。在自然演化中，天然复合材料的纤维、基体组分的构成和分布得到合理的优化，例如竹子纤维密度的分布是沿竹壁径向由里向外逐渐增加，这是适应竹材承受风力弯曲载荷的最佳结构^[1]。

最早的人工复合材料是以草作增强体、泥土作基体的砖坯及以布增强漆料的器具等，而轮胎、钢筋混凝土则是早期工业用复合材料。本世纪 60 年代开发的高性能纤维是以先进工艺制成的先进复合材料，也就是材料发展进程中最有前途的第四代材料。从第一代的天然材料，第二代的冶炼材料，第三代的合成材料，到第四代的先进复合材料，都蕴含了从天然复合材料到人工复合材料的演变进程。由于先进复合工艺的发展，天然资源的充分利用及市场价格的日趋合理，10 多年来，天然纤维人工复合的材料有了新的发展。作者近年来研究了竹材的性能^[2,3]，研究了以天然植物纤维作增强体，采用现代复合工艺，以树脂为基体制成的性能良好、价格便宜的许多种天然植物纤维复合材料^[4-6]，下面作简要论述。

§ 1.2 天然纤维增强体

天然纤维是细长形的细胞附聚体，在自然界尤其是在植物中资源十分丰富。天然纤维包括矿物、动物和植物纤维三类。矿物纤维如石棉，动物纤维如蚕丝和毛皮。植物纤维包括杆茎类纤维（竹、木、甘蔗渣、高粱秆、稻草等）、果实类纤维（椰子壳、花生壳等）、韧皮类纤维（亚麻、黄麻、大麻、苧麻、棕、葵等）、叶类纤维（剑麻、芦苇、茅草等）。

各类天然纤维具有各自的特性，它的用途取决于纤维本身的长度、强度、弹性、柔韧性、耐磨性、吸着性能和表面特性等，用于复合材料增强体的一般是天然植物纤维，而只有具有一定的强度和纤维素含量的植物才能满足要求。

植物一般由纤维素、木质素和半纤维素组成，如木和竹本身就是由结晶状的纤维素嵌在不定形的半纤维素和木质素中的天然复合材料，呈各向异性。植物纤维的主要成分是纤维素，是碳水化合物，由链节分子（ $C_6H_{10}O_5$ ）组成，含有羟基，形成氢键结合力与共价结合力，具有较高的强度和模量。表 1.1 列出几种主要天然植物的纤维素含量及其力学性能。

表 1.1 几种主要天然植物纤维素含量及拉伸性能^①

天然植物类别	纤维素含量 (%)	纤维拉伸性能		
		强度 (MPa)	模量 (GPa)	ϵ (%)
木	40—50	135—300	10—35	2.1
竹	50—60	391—713	18.2—55.2	3.22
麻	60—80	278—863	11—33	4.3
棉	90—99	294—784	27—30	6.0
椰壳	44—50	140—382	3.1—7.6	29.2
甘蔗渣	35—45	161—195	6.6—12	5.11
稻草	40—50	58—133	4.7—7.7	

^①部分数据引自参考文献 [7]。

植物纤维的强度随着纤维素含量、纤维细胞壁厚与壁腔之比、纤维长细比和聚合度结晶度等的增加而提高。选择具有较好的强度和模量而又未被充分利用的植物纤维作为复合材料的增强体是开发材料资源的重要途径之一。其中竹纤维由于纤维素的含量较高，而且是微纤维偏角很小的多层壁结构，因此具有最佳的拉伸强度和模量。同时，中国盛产竹子，有着丰富的资源和良好的应用基础。

§ 1.3 研制天然纤维复合材料的意义

全球结构用材料的消耗量日益增大，人类传统惯用的天然原材料资源逐渐短缺。例如，木材全球每年消耗十多亿吨，以亚洲为例，由于大量砍伐及树木成长期长达 10—20 年，预测 40 年后热带雨林中树木将会全部耗尽。其中近年输出木材最多的印度尼西亚，在 20 年内将消耗掉所有木材。现在一方面是木材资源枯竭，另一方面又是生态环境遭到破坏，对人类生存造成严重影响。人造纤维，如碳纤维、芳纶纤维等合成纤维制成的复合材料是优良的结构材料，然而它们的原材料——石油资源却日渐短缺，而且纤维在制造中要消耗大量能源，造价较高，同时也污染环境。因此，目前急需寻找尚未开发的天然材料用作结构材料的新资源。

天然植物纤维材料在自然界中资源十分丰富。纤维素是一种特殊的、重要的天然高聚物，天然纤维在植物王国中由光合作用可产生大量的有机再生材料资源。每年全球生产 10^{12} t 天然合成的纤维素^[7]，除很小部分用于造纸、纺织和化学纤维，绝大部分是作为燃料或自然消耗掉，非常可惜，亟需加以利用。10 多年来，研究采用天然纤维增强水泥等作为建筑材料的工作有所开展，以解决部分发展中国家的建房材料问题。但由于其界面粘结弱等问题没解决，影响材料的力学性能，限制了应用。作者自 1979 年以来，利用天然纤维资源，采用现代复合工艺，研制了竹、椰壳、麻、芦苇、甘蔗渣、稻草等纤维增强树脂复合材料，它们是一批资源丰

表 1.2 植物纤维增强树脂复合材料的力学性能及其与常用材料的比较

材 料	密度 ρ (g/cm ³)	拉伸性能		比拉伸强度 σ_t/ρ ($\times 10^4$ cm)	比弹性模量 E_t/ρ (GPa)	弯曲性能		压缩强度 σ_c (MPa)	短梁剪 切强度 τ_{LSS} (MPa)
		强度 σ_t (MPa)	模量 E_t P(GPa)			强度 σ_b (MPa)	模量 E_b (GPa)		
竹材	0.8	80—142	9—18	100—178	11.3—22.5	100—300	7.15—21.3	55—79	11—29
BLF/EP [0]3—7 层	1.18	178—243	45—63	151—206	38.1—53.4	208—255	16.4—24.9	59—129	10.5—16.8
BSF/EP/ = 2— 6cm	1.17	28—40	3.4—7.9	23.9—34.2	2.9—6.8	72—100	6.8—8.6	37—46	9.4—12.3
BC/树脂 (EP, RFUF)	1.15	15—32	2.3—9.1	13—27.8	2.0—7.9	15—73	3.6—9.2	39—56	4.1—6.8
CHF/UF ($W_m =$ 17—48%)	1.10	14—47	2.9—4.0	12.7—42.7	2.6—3.6	61—71	1.9—3.8	40—50	3.8—5.9
麻长纤维/EP[0] (4—6层)	1.32	141—170	16.7—29.7	107—129	12.7—22.5	114—161	8.2—11.8	49—102	8.6—18.8
麻短纤维/EP	1.21	50	7.5	41.3	6.2			72	8.5—12.8

甘蔗渣/树脂 (EP,UP,PF)	1.22	35-52	5.5-8.0	28.7-42.6	4.5-6.6	54-76	2.1-3.4	77-81	4.5-7.8
稻草/树脂 (PF, UF)	1.28	9-15	1.1-2.0	7.0-11.7	0.86-1.56	14-32	1.1-1.5		2-3.3
芦苇/树脂 (PF, UF)	1.26	19-30	2.2-3.2	15-24	1.75-2.54	15-47	1.3-2.2	11-13	1.6-2.2
木碎板	1.57	11-15	0.6-2.4	4.5-9.6	0.34-0.69	15-24	2.0-3.7	11	
木胶合板	0.8	12-54	1.2-4.6	15-67.5	1.5-5.8	20-50			
松木	0.65	49	4-9	75	6.1-13.8	70-120	7-9.3	25-34	6-9
中碳钢	7.8	373-461	196-206	47.8-59.1	25.1-26.4	441			
GF/EP[0]	2	294-451	21	147-226	10.5	223		137	

富、性能良好、重量轻、耐腐蚀而又价廉的结构材料新品种，可用作木材、塑料和玻璃钢等的部分替代材料。

表 1.2 列出作者研制的主要几种植物纤维增强复合材料的力学性能及其与常用材料的比较。

由表 1.2 所列的植物纤维复合材料的力学性能值可知，竹纤维复合材料的综合性能较好，竹/塑复合材料是本书论述的主要对象。竹材密度小，因此比强度、比刚度高。例如竹长纤维增强环氧树脂单向层板的比拉伸强度是优质木材的两倍（与普通玻璃钢相似），是中碳钢的 3 倍。竹/塑复合材料是代木的理想材料，可用于建筑、汽车、船舶、集装箱、家俱等方面，有广阔的应用前景。竹材的成材期为 2—4 年（木材要 20 年），生长茂密，盛产于东亚和东南亚。中国竹材年产量约 $500 \times 10^4 \text{t}$ ，居世界第一位；拥有 $360 \times 10^4 \text{ha}$ ($34 \times 10^8 \text{m}^2$) 的竹林面积，居世界第二位^[8]，而且价格较一般木材便宜。

研制竹子等植物纤维复合材料既能利用丰富的天然资源，开辟结构材料的新品种，补救木材资源的不足，又有利于环境保护、生态平衡及节约能源，具有深远的社会意义和经济效益。

我们在研制植物纤维复合材料中，注重研究天然增强体合理优化的生物组织构成和它们的微观形貌；研究竹/塑复合材料力学性能与微观结构的关系；给出系统的微观形貌与分析。

§ 1.4 宏观性能与微观机理相结合 是研究复合材料的重要方法

复合材料是多相非均匀材料，由纤维、基体和界面三大组分构成，它的性能与材料各相的组分、纤维排列方向、铺层顺序以及工艺条件有关，因此需要采用微观力学分析和微观实验方法，研究各组分的力学行为，预测和实测复合材料的力学性能，研究破坏机理，采用微观实验方法测定界面的表征^[9]。研究复合材料破坏过程中的微观不均匀性及微观破坏机理，需从微观力学实验得到