

普通高等教育“三海一核”系列规划教材

复合材料力学与 船舶工程应用

杨娜娜 姚熊亮 主编



科学出版社

普通高等教育“三海一核”系列规划教材

复合材料力学与船舶工程应用

杨娜娜 姚熊亮 主编



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书采用基本理论与实际应用相结合的形式,系统阐述了复合材料在船舶领域应用中的基本原理和计算方法,目的是使读者较为全面地认识和理解复合材料及其在船舶与海洋结构中的应用。全书内容包括:概述,复合材料细观力学,复合材料宏观力学,夹层结构理论,复合材料船舶结构设计,复合材料船舶结构连接节点与设计,复合材料船舶损伤来源及维修,复合材料船舶应用。本书理论及应用介绍全面、内容精炼明了,同时体现了复合材料在船舶领域应用的最新进展。

本书可作为高等院校力学及相关专业的本科生和研究生教材,也可供从事船舶复合材料分析、设计和制造的工程人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料力学与船舶工程应用 / 杨娜娜,姚熊亮主编. —北京:科学出版社, 2018.3

普通高等教育“三海一核”系列规划教材

ISBN 978-7-03-054774-3

I. ①复… II. ①杨… ②姚… III. ①船舶工程-复合材料力学-高等学校-教材 IV. ①U66 ②TB301

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第246727号

责任编辑:任俊 张丽花/ 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年3月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:371 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

先进复合材料的性能优异，可大幅减轻结构的重量，又兼具强度高、耐腐蚀等特点，因此在船舶领域具有广泛的应用前景。国外关于复合材料在船舶与海洋结构中应用的研究开始较早，相关的书籍也较多；而国内关于复合材料的书籍则大都只是从材料本身出发，阐述其制备、加工、力学等内容，关于复合材料在具体工程领域中应用的书籍相对较少，且大多针对的是航空航天领域。然而，对于船舶领域而言，其结构尺寸、加工方法和载荷环境等都与航空航天领域有很大的区别。随着复合材料在船舶领域的应用不断深入，出版一本针对船舶领域复合材料力学及应用的教材是很有必要的。

本书编者长期为船舶专业的学生讲授复合材料相关课程，综合多年来从事船舶复合材料教学、研究的体会，汲取国内外教材所长，结合哈尔滨工程大学“三海一核”特色以及船舶与海洋工程专业的教学要求，编写了这本针对船舶复合材料应用的教材。本书注重理论联系实际，具有技术先进、内容系统等特点。课程知识点由浅入深、重点明晰，便于掌握和理解。总而言之，本书将为船舶与海洋工程领域的学生和研究人员提供一些基础前沿知识，同时也为工程技术人员提供参考。

全书共8章，内容分为基础理论和实践应用两大部分，前4章为复合材料基础理论部分，后4章为船舶应用部分。本书内容全面系统，符合船海特色教材的要求。

由于编者水平有限，书中内容如有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2017年7月

目 录

第 1 章 概述	1	3.1.2 各向异性材料的本构关系	41
1.1 复合材料	1	3.1.3 工程弹性常数表示的本构关系	47
1.1.1 概念	1	3.1.4 弹性常数的限制	48
1.1.2 常用纤维材料	1	3.2 单层板理论	50
1.1.3 常用树脂基体材料	3	3.2.1 平面应力下的应力-应变关系	51
1.1.4 夹层结构芯材	5	3.2.2 任意方向的应力-应变关系	53
1.1.5 复合材料的分类及特性	8	3.2.3 正交各向异性单层板强度	57
1.2 船体材料发展历史	10	3.3 层合板理论	64
1.2.1 木材	10	3.3.1 经典层合板理论	66
1.2.2 水泥	11	3.3.2 一阶剪切变形理论	73
1.2.3 钢材	12	3.3.3 高阶剪切变形理论	76
1.2.4 铝合金	14	3.3.4 层合板强度分析	76
1.2.5 钛合金	14	3.3.5 层间应力	81
1.2.6 复合材料	16	第 4 章 夹层结构理论	82
1.3 复合材料力学简介	18	4.1 概述	82
第 2 章 复合材料细观力学	20	4.2 夹层梁理论	83
2.1 均匀化理论	20	4.2.1 概述	83
2.1.1 遍历理论	20	4.2.2 梁的弯曲	84
2.1.2 代表性体积单元	21	4.3 夹层板理论	91
2.1.3 微观结构的几何特征	21	4.3.1 各向同性夹层板理论	91
2.1.4 统计均匀性假设与均匀边界条件	23	4.3.2 正交各向异性夹层板理论	95
2.2 复合材料的有效弹性性能	24	4.4 蜂窝夹层结构的工程计算方法	99
2.2.1 定义	25	4.4.1 蜂窝夹层结构的密度计算	99
2.2.2 单向复合材料的弹性常数	26	4.4.2 蜂窝夹层结构的等效弹性模量计算	101
2.2.3 桥联模型	33	第 5 章 复合材料船舶结构设计	105
2.2.4 渐进均匀化方法	35	5.1 复合材料船舶结构设计流程	105
2.2.5 复合材料自治模型	37	5.2 材料选择	106
2.2.6 Mori-Tanaka 法	38	5.2.1 纤维选择	107
2.3 算例	39	5.2.2 基体选择	111
第 3 章 复合材料宏观力学	41	5.2.3 芯材选择	116
3.1 各向异性弹性力学基本方程	41	5.3 铺层设计及单层性能的确定	117
3.1.1 广义胡克定律	41		

5.3.1 铺层设计	118	6.3.5 加强筋交叉节点	182
5.3.2 船舶常用复合材料	119	第7章 复合材料船舶损伤来源及	
5.3.3 单层性能的确定	120	维修	184
5.4 加工工艺选择	121	7.1 概述	184
5.5 复合材料船体结构形式	125	7.2 海洋环境对船舶复合材料的	
5.5.1 船体结构形式	125	影响	184
5.5.2 复合材料船体骨架及结构布置	129	7.2.1 浸泡在海水中的复合材料受环境	
5.6 复合材料船舶结构计算方法	131	因素影响	184
5.6.1 梁理论	131	7.2.2 暴露在空气中的复合材料受环境	
5.6.2 加筋板的分析方法	133	因素影响	187
5.7 结构设计考虑的其他因素	136	7.2.3 海洋环境影响实例	191
5.7.1 蠕变	136	7.3 复合材料结构中的缺陷	191
5.7.2 防火性能	138	7.3.1 生产过程中产生的缺陷	192
5.7.3 疲劳特性	141	7.3.2 使用过程中产生的损伤	200
5.7.4 抗爆、抗冲击性能	148	7.4 复合材料无损检测技术	203
第6章 复合材料船舶结构连接节点与		7.4.1 目视检测法	203
设计	156	7.4.2 磁粉检测法	204
6.1 复合材料船舶结构连接形式	156	7.4.3 超声检测法	204
6.1.1 板的连接	157	7.4.4 涡流检测技术	205
6.1.2 板与骨架的连接	160	7.4.5 X射线照相技术	206
6.1.3 骨架的连接	161	7.5 船舶复合材料结构维修	207
6.2 复合材料船舶结构典型节点	161	7.5.1 复合材料结构修补流程	207
6.2.1 舱壁与板的连接节点	162	7.5.2 复合材料维修原则	207
6.2.2 骨架交叉连接节点	162	第8章 复合材料船舶应用	211
6.2.3 舷顶列板与上甲板连接节点	166	8.1 上层建筑	211
6.2.4 甲板与上层建筑的连接节点	167	8.1.1 结构性能	213
6.2.5 基座在船体上的连接形式	167	8.1.2 结构隐身	214
6.2.6 龙骨结构节点形式	168	8.2 桅杆	215
6.2.7 支柱固定的连接节点	168	8.2.1 结构性能	217
6.2.8 夹层船体结构的连接节点	170	8.2.2 隐身性能	218
6.3 船用复合材料连接结构设计		8.3 螺旋桨	218
分析方法	171	8.3.1 结构特性	221
6.3.1 连接形式选择	172	8.3.2 水动力性能	222
6.3.2 平面内搭接或对接	173	8.4 导流罩	222
6.3.3 非平面连接: 板梁结构连接节点		8.4.1 结构性能	223
.....	178	8.4.2 声学性能	224
6.3.4 非平面连接: 舱壁与板的连接	180	参考文献	225

第1章 概 述

1.1 复 合 材 料

1.1.1 概念

复合材料的定义有多个,最简单、最常见的定义是:复合材料是由两种或者两种以上不同材料复合而成的新材料。根据这个定义,复合材料所包括的范围非常广泛,从天然材料到人工材料、从生物材料到非生物材料,符合上述定义的材料比比皆是。在天然材料中,属于生物材料的有木材、竹子、骨骼、肌肉与动物的角等,属于非生物材料的有岩石、云母等;在人工材料中,混凝土与共晶态金属都可以归于复合材料的范畴。

为了缩小复合材料定义所包括的范畴,有人提出了如下定义:把两种或者更多种不同性能的材料人工复合在一起,形成具有特殊性能的新型材料,就是复合材料。这个定义排除了属于天然材料与生物材料范畴的一大批材料。但是,它仍然不够严格,含义比较广泛。很多符合上述定义的材料并非是要研究的复合材料。例如,用于热控开关的铜/钛双合金金属片,在宏观尺度上它是复合材料,但不属于现代复合材料。

很多学者认为,复合材料与其称为一种材料,不如称为一种结构。他们对于复合材料的定义如下:复合材料是由增强相、基体与填料构成的亚微观(细观)结构,这些组分材料除界面外,没有发生化学反应。这个定义强调了复合材料的结构特性。由于复合材料是一种结构,所以复合材料比单一材料的传统材料力学性能复杂很多。

以上给出了复合材料的3个不同定义。为了更全面、准确地定义复合材料,不妨归纳如下:复合材料是由增强相、基体与填料组成,通过人工复合工艺制造的具有多相细观结构、有特殊性能的新型材料系统,组分材料除界面外没有发生化学反应。这个定义阐明了复合材料应是人工复合的、多相的、具有细观结构的、性能全新的材料系统。

1.1.2 常用纤维材料

1. 玻璃纤维

玻璃纤维是一种人造无机纤维材料,其主要原料资源储量大。玻璃纤维本身的表面积相当大,具有优越的比强度,还具有相当好的耐热性和物理化学稳定性,以及一定程度的功能可设计性,所以它是优良的功能材料和生态环境材料。玻璃纤维是玻璃经高温熔融后被拉制或以离心力甩成的微米级纤维状材料,主要成分为二氧化硅、氧化钙、氧化铝、氧化镁、氧化硼、氧化钠等。

E-玻璃纤维也称无碱玻璃纤维,机械强度高,具有良好的耐热性、耐水性和电绝缘性,是船舶最常用的增强材料,但其耐酸性差,易被无机酸腐蚀。S-玻璃纤维比E-玻璃纤维的拉伸性能和抗疲劳性能更好,但成本大约是E-玻璃纤维的3~4倍。S-玻璃纤维广泛应用于航空、军

工、环境等领域。AR-玻璃纤维耐碱溶液侵蚀、强度高、抗冲击性能好,常用作增强水泥。E-CR 玻璃纤维是无碱玻璃的一种,但不含 B_2O_3 。其耐水性、耐酸性高于 E-玻璃纤维,耐热性、电绝缘性也明显提高,常应用于地下管道等。C-玻璃纤维的化学稳定性高,耐酸性、耐水性均优于无碱玻璃纤维,但机械强度低于 E-玻璃纤维。C-玻璃纤维电气性能差,用于耐酸过滤材料,也可用于耐化学腐蚀的玻璃纤维增强材料。A-玻璃纤维是一类钠硅酸盐玻璃纤维,其耐酸性好,但耐水性差,可制成薄毡、编织管道包扎布等。D-玻璃纤维,也称低介电玻璃纤维,主要由高硼高硅玻璃组成,其介电常数小、介质损耗低,常用作雷达罩增强基材、印刷电路板基材等。

2. 硼纤维

硼纤维是高性能复合材料的重要纤维增强体之一,是用化学气相沉积法使硼原子沉积在钨丝或碳纤维芯材上制得的直径为 $100\sim 200\mu\text{m}$ 的连续单丝。它具有高强度、高模量和低密度等特点,是制备高性能复合材料的重要增强纤维。硼纤维抗拉强度超过了高强度钢,密度只有 $2.5\text{g}/\text{cm}^3$,强度比普通金属(钢、铝等)高 $4\sim 8$ 倍。硼的硬度极高,在天然物质中仅次于金刚石,比碳化硅高 40%,比碳化钨高 1 倍。硼纤维于 20 世纪 60 年代初由美国研制并成功应用于飞行器。例如,美国的 F-15 和 F-14 战斗机的垂直尾翼、轰炸机 B-1 的机翼纵向通材、直升机 CH-54B 和战斗机 F-4 的方向舵、波音 707 的机襟翼、战斗机 F-5 的着陆装置门等使用硼纤维与环氧树脂复合材料。硼纤维复合材料在宇航服、防火服、汽车车轮、雷达、超导材料等领域也有重要应用。

3. 碳纤维

碳纤维是由有机母体纤维在 $1000\sim 3000^\circ\text{C}$ 高温的惰性气体下分解制得的一种无机材料。在无氧高温处理过程中,除碳以外的元素全部去除,故最终碳含量在 90% 以上。碳纤维外观为黑色,质地坚硬,具有强度高、质量轻等特点。碳纤维的密度只有钢材的 $1/4$,但强度能达到钢的 5 倍。碳纤维根据力学性能可分为高强度、高模量、极高模量等;根据原丝的类型可分为聚丙烯腈基碳纤维、纤维素基碳纤维、沥青基碳纤维、酚醛基碳纤维等。由于碳纤维制造工艺比较简单,价格比硼纤维便宜得多,所以成为最重要的先进纤维材料;其密度比玻璃纤维小,模量比玻璃纤维高好几倍,因此碳纤维增强复合材料已应用于宇航、航空等工业部门。除此之外,国防军事、汽车构件、风力发电叶片、建筑加固材料、增强塑料、体育休闲用品等碳纤维市场也蓬勃兴起。

4. 芳纶纤维

芳纶纤维(Kevlar)是芳香聚酰胺纤维的简称,主要有两类:一类是聚对苯二甲酰对苯二胺(PPDA)纤维,如美国杜邦公司的 Kevlar-49、荷兰恩卡公司的 Twaron HM、中国的芳纶 1414 等;另一类是聚对苯甲酰胺(PBA)纤维,如 Kevlar-29、芳纶 14 等。芳纶纤维具有高强度、高模量、耐高温、耐酸碱、质量轻等优良性能,其中比强度是钢的 $5\sim 6$ 倍,模量是钢丝和玻璃纤维的 $2\sim 3$ 倍,韧性是钢丝的 2 倍,而密度仅为钢丝的 $1/5$ 左右。芳纶纤维是综合性能优良、产量最大、应用最广的高性能纤维,在高性能纤维中占有重要地位,在国防、航空航天、汽车减重、节能减排、新能源开发等方面具有不可替代的作用。

5. 陶瓷纤维

陶瓷纤维是由天然或人造无机物采用不同工艺制成的纤维状物质，也可由有机纤维通过高温热处理转化而成。陶瓷纤维除了具有优异的力学性能，还具有抗氧化、高温稳定性好等优点。

碳化硅纤维是陶瓷纤维制品的一种，是用于金属基、陶瓷基复合材料的一种重要的高性能增强陶瓷纤维。与碳纤维、氧化物纤维等其他高性能纤维相比，碳化硅纤维在抗拉强度、抗蠕变性能、抗氧化性，以及与陶瓷基体相容性方面表现出一系列的优异性能。由于碳化硅纤维在航空航天和原子能等高性能领域具有良好的应用前景，所以它的制备研究受到世界各国的极大关注。

氧化铝纤维属于高性能陶瓷纤维，具有高强度、高模量、耐高温的特点；能够耐熔融金属和非氧化物材料的侵蚀，在氧化或还原气氛中保持良好的化学稳定性。同时具有高熔点、低热导率和低热膨胀系数等优点。与碳纤维相比，陶瓷纤维在高温下不须涂覆防氧化涂层，可作为高温结构材料、化学反应的催化剂载体和陶瓷基、金属基复合材料的增强体等。氧化铝纤维可与树脂、金属或陶瓷进行复合，制备高性能复合材料，在航空航天、军工及高科技领域应用广泛。

现将各主要纤维材料的基本性能数据列在表 1-1 中以供参考。

表 1-1 各种纤维基本性能参数

材料		直径/ μm	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	相对密度 γ	抗拉强度 σ_b/GPa	弹性模量 E/GPa	热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	伸长率 $\delta/\%$	比强度 $(\sigma_b/\gamma)/10\text{MPa}$	比模量 $(E/\gamma)/10^5\text{MPa}$
玻璃纤维	E	10	700	2.55	3.50	74	5.0	4.8	137	0.29
	S	10	840	2.49	4.60	84	2.9	5.7	197	0.34
硼纤维		100	2300	2.65	3.50	410	4.5	0.5~0.8	132	1.55
		140		2.49	3.64				146	1.65
碳纤维	普通	6	3650	1.75	2.50~3.00	—	—	—	143~171	—
	高强	6		1.75	3.50~7.00	225~228	—	—	200~400	1.29~1.30
	高模	6		1.75	2.40~3.50	350~580	0.6	1.5~2.4	137~200	2.00~2.34
	极高模	6		1.75	0.75~2.50	460~670	-1.4	0.5~0.7	43~143	2.63~3.83
芳纶纤维	K-49III	10	—	1.47	2.83	134	-3.6	2.5	193	0.91
	K-49IV	10	—		3.04	85		4.0	207	0.58
碳化硅纤维	复相	100	2690	3.28	2.54	430	3.8	—	77	1.31
	单相	8~12		2.80	2.50~4.50	180~300		—	89~161	0.64~1.10
氧化铝纤维		100	2080	3.70	1.38~1.72	379	—	—	37~46	1.02

1.1.3 常用树脂基体材料

树脂基体可分为热固性树脂和热塑性树脂两大类。常用的热固性树脂有环氧、酚醛、不

饱和聚酯树脂等，它们最早应用于复合材料。热塑性树脂有聚乙烯、聚苯乙烯、聚酰胺(尼龙)聚碳酸酯、聚丙烯树脂等，它们可在高温下软化，制成模压复合材料。

1. 环氧树脂

环氧树脂是指分子结构上包含反应功能性基团的一组宽泛的材料。环氧树脂具有较高的强度和优良的黏结性能，与增强纤维表面浸润性好，固化收缩小，有较高的耐热性，固化成型方便。环氧树脂的固化物质较脆，易产生裂纹。当环氧树脂作为玻璃纤维、碳纤维及芳纶纤维复合材料的基体使用时，要满足材料的耐疲劳性能和抗横向开裂性能等方面的要求。在船舶工业常用树脂中，环氧树脂具有最优性能；在航空航天领域中，除了以高温性能为结构的关键性能时，结构物的基体几乎只选用环氧材料。

2. 酚醛树脂

酚醛树脂耐高温性好、吸水性小、电绝缘性好、价格低廉。酚醛树脂有几个不同的种类，包括 Resole 型树脂、Novolak 型树脂以及一些相近的树脂体系。自从 1910 年 Bakelite 公司首次实现工业化生产以来，酚醛树脂以其优异的性能与低廉的价格，在航空航天领域得到广泛应用。另外，酚醛树脂经高性能改性后，还开辟了许多新的应用领域，如钢铁和有色金属冶炼的耐火材料、航天工业的耐烧蚀材料、高速交通工具的摩擦制动材料、电子工业的电子封装材料、建筑及交通工具的阻燃保温泡沫材料等。

3. 不饱和聚酯树脂

不饱和聚酯树脂是热固性树脂中用量最大的，也是玻璃钢制品生产中用得最多的基体树脂。不饱和聚酯树脂生产工艺简便、原料易得，同时耐化学腐蚀性能、力学性能、电性能优良，最重要的是可以常温常压固化且具有良好的工艺性能，因而广泛用于结构、防腐、绝缘等领域。近几年，不饱和聚酯树脂市场增长显著，这种增长预计未来几年将持续下去。

4. 热塑性树脂

热塑性树脂以高温软化的模塑复合物形式应用。聚乙烯、聚苯乙烯、聚酰胺(尼龙)聚碳酸酯、聚丙烯树脂等均属于热塑性树脂。目前热塑性树脂在船舶工业领域中的应用局限于小尺度船型以及休闲用船等。

现将各种常见树脂材料的基本性能数据列在表 1-2 中以供参考。

表 1-2 典型树脂基本性能参数

材料	相对密度 γ	抗拉强度 σ_t /MPa	弹性模量 $E/10^3$ MPa	伸长率 δ %	抗压强度/MPa	抗弯强度/MPa
环氧	1.1~1.3	60~95	3.0~4.0	5.0	90~110	100
酚醛	1.3	42~64	3.2	1.5~2.0	88~110	78~120
聚酯	1.1~1.4	42~71	2.1~4.5	5.0	92~190	60~120
聚酰胺(PA)	1.1	70	2.8	60.0	90	100
聚乙烯	—	23	8.4	60.0	20~25	25~29
聚丙烯(PP)	0.9	35~40	1.4	200.0	56	42~56

续表

材料	相对密度 γ	抗拉强度 σ_y/MPa	弹性模量 $E/10^3\text{MPa}$	伸长率 $\delta/\%$	抗压强度/MPa	抗弯强度/MPa
聚苯乙烯 (PS)	—	59	2.8	2.0	98	77
聚碳酸酯 (PC)	1.2	63	2.2	60.0~100.0	77	100

1.1.4 夹层结构芯材

复合材料夹层结构通常由强度较高的面板以及密度较低的芯材组成。面板是由玻璃或碳纤维等增强层合板构成，并承受主要的外载荷，同时很大程度上决定了结构的强度、刚度和稳定性。其芯材主要承受结构的面外载荷和横向剪切载荷，同时很大程度上决定了结构的抗弯刚度。常见的芯材主要有木质芯材、泡沫芯材和蜂窝芯材等。

1. 木质芯材

木材结构从微观上来看，是一种非常类似于人造蜂窝的“天然蜂窝”六边形结构。其中应用最广、成本最低的芯材是轻木，最受欢迎的是巴沙木(图 1-1)。大量使用的还有云杉、桃木、红杉、松木、冷杉等。巴沙木受欢迎的原因在于其良好的强度和较低的密度。当在夹层结构内部使其木材纹理方向垂直于面板时，在等密度条件下测量巴沙木的压缩强度几乎高于其他所有的芯材，包括一些表现良好的蜂窝芯材。由于其卓越的性能和合理的价格，巴沙木广泛应用于商业、工业和军事领域。

一般纵纹向外的轻木闭腔结构由细长棱柱形单元组成，其长度(纹理方向)是直径的 16 倍左右，密度为 $0.10\sim 0.25\text{g}/\text{cm}^3$ ，材料具有优良的刚度和黏结强度。轻木的静力强度通常高于 PVC 泡沫，同时，由于应力可在夹层蒙皮间有效传递，其局部耐冲击性能较好。然而，对所有木质芯材而言，尽管可以用各种化学方法进行防湿处理，但它们都对潮湿十分敏感。如果木质芯材不用层合板或树脂包裹好，就很容易腐烂。



图 1-1 巴沙木

2. 泡沫芯材

泡沫芯材是最为通用的芯材，其种类繁多、性能差异明显。泡沫芯材根据成型工艺通常可以分为热固性和热塑性两种。比较典型的热固性泡沫芯材有醋酸纤维素、聚苯乙烯和聚氨酯等，它们均具有较低的密度，同时具有防水、防菌与防变质等特性。但是这些材料力学性能较低，聚苯乙烯会被聚酯树脂腐蚀。另外，由于这些泡沫结构不能形成复杂的曲线，所以

在应用上受到了一定的限制。典型的热塑性泡沫材料有聚醚酰亚胺泡沫、聚醚酰亚胺/聚醚砜等，它们通常具有优秀的耐火性，可以在较高温度下使用。其主要缺点是价格比较昂贵。下面简单介绍一些常见的泡沫类型。

(1) 聚氯乙烯泡沫。闭孔聚氯乙烯(PVC)泡沫是高性能夹层结构中使用最为广泛的一种芯材，主要有两种类型：交联 PVC 泡沫与非交联 PVC 泡沫。非交联 PVC 泡沫常称为“线性的”泡沫，它们通常比较柔软，韧性较大，易于热成型为曲面。但是与交联 PVC 泡沫相比，其力学性能和密度比较低，耐高温以及耐苯乙烯性能也比较低。交联 PVC 泡沫是由聚乙烯基共聚物和稳定剂、增塑剂、交联复合物、发泡剂组成的，在一定压力下加热发生交联反应，之后沉在热水里，等达到预定的泡沫密度后制成。其细胞直径为 $0.25\sim 2.54\text{mm}$ 。该合成材料为热塑性的，因此得到了较为广泛的应用。交联 PVC 泡沫塑料具有密度小、隔热性能好、吸声性能好等特征，广泛用作漂浮材料、隔热保温材料、吸声材料、包装减振材料等。除此之外，它们还具有良好的耐化学药品性、不吸水性、离火自熄性、价格低廉等优点，广泛应用于船舶、风能、运动器材、铁路机车、航空航天等领域(图 1-2)。



图 1-2 PVC 泡沫

(2) 聚甲基丙烯酸酰亚胺泡沫。聚甲基丙烯酸酰亚胺(PMI)泡沫塑料是一种质轻、闭孔的硬质泡沫塑料，泡孔为 100% 的闭孔结构，是目前耐热性最好的刚性结构泡沫塑料。PMI 泡沫塑料具有优异的力学性能和高强度重量比，是制造轻质高强夹层结构的理想芯层材料，特别是生产层状材料、层压材料、复合材料或泡沫复合体，在重量设计及优化制造方面具有明显的优势，广泛应用于电子、运载火箭、航空、铁路机车、船舶、天线、雷达天线罩、医疗、体育器材等领域。该泡沫同时具有优异的宽频透波性能，介电损耗角正切为 $0.001\sim 0.018$ ，介电常数为 $1.05\sim 1.13$ ，广泛用于制备透波雷达天线罩。

(3) 聚苯乙烯泡沫。聚苯乙烯(PS)泡沫(图 1-3)由于密度较小、成本低且易打磨，多用于自制飞机的机翼、帆船以及冲浪板的制造。另外，聚苯乙烯泡沫的强度和加工性能良好。与聚氨酯不同，聚苯乙烯泡沫可以在热线电路下不产生有毒气体。但是聚苯乙烯泡沫也存在重大的缺陷：它可溶于苯乙烯单元(聚酯和乙烯基脂树脂的主要成分)；当它暴露在石油或者其他溶剂中时会严重软化。

(4) 聚氨酯泡沫。聚氨酯(PU)泡沫(图 1-4)包括坚硬的和柔韧的两种变体，具有较广的密度选择和许多不同的化学性质。但是它们通常极易燃烧且燃烧时会产生剧毒气体，基于这个

原因,聚氨酯泡沫要尽量避免热线电路成型,并且使用时要加警示标语。另外,这些材料绝不能与其他垃圾一起焚烧,即使是在空旷地区也是如此。

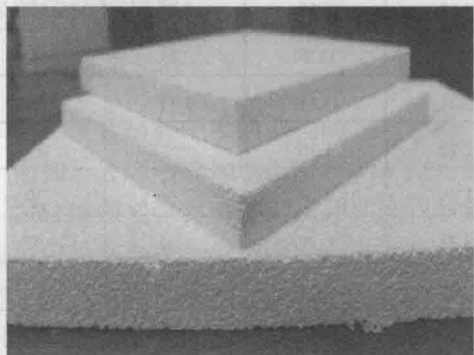


图 1-3 PS 泡沫

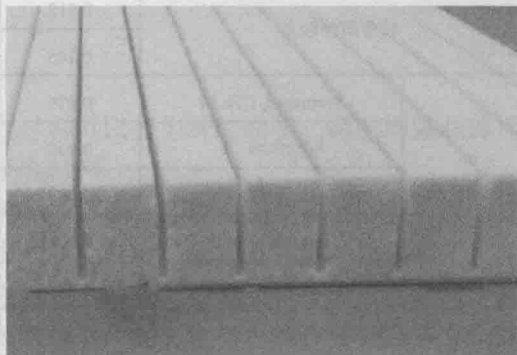


图 1-4 PU 泡沫

泡沫的种类众多,新的发泡技术也在不断开发,导致泡沫芯材的范围还在不断扩大,除上面列举的泡沫类型外,常用的泡沫还有聚甲基丙烯酸酰胺泡沫(acrylic 泡沫)、苯乙烯丙烯腈共聚泡沫(SAN 泡沫)、PET 泡沫等。

3. 蜂窝芯材

蜂窝芯材也称蜂窝芯或者开口芯,可以用各式薄板材料或片带状材料形成蜂窝状结构来制造各种芯子材料。通过改变薄板材料、薄板厚度、孔眼大小及孔眼形状,生产密度和性能变化范围很大的芯子。早期的蜂窝芯材大多数为金属芯材,随后出现了纸蜂窝以及纤维增强树脂蜂窝等蜂窝芯材。

目前主流的蜂窝芯材主要为铝蜂窝、Nomex 纸蜂窝、玻璃钢夹层结构、棉布蜂窝夹层结构等。对于热塑性蜂窝,通常用挤出方式生产,然后加工成需要的厚度,但是有的蜂窝(如纸蜂窝和铝蜂窝)需要多步工艺加工成型,即先将多张大而薄的片状材料交错、平行地印上很多薄胶条,然后将这些材料层叠在热压机中,将胶条固化。蜂窝夹材结构因具有比强度高、抗冲击性能好、减振、透微波、可设计性强等优点,目前已经被广泛应用,特别是在航空航天、船舶领域。图1-5为芳纶蜂窝,图1-6为铝蜂窝。

现将各种常见芯材材料的基本性能数据列在表 1-3 中以供参考。

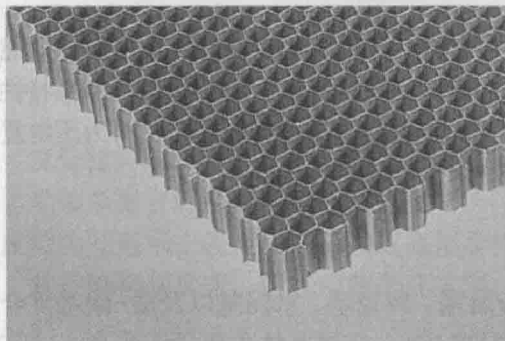


图 1-5 芳纶蜂窝

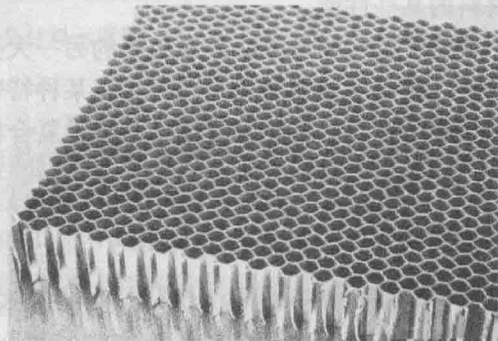


图 1-6 铝蜂窝

表 1-3 几种芯材的基本性能参数

芯材		相对密度	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	剪切强度/MPa	剪切模量/MPa
纹理向外轻木		0.112	9.12	8.19	2.17	120
		0.145	12.30	11.90	2.81	151
交联 PVC 泡沫	Termanto, C70.57	0.075	2.21	1.41	1.11	11
	Klegecell II	0.075	1.21	1.10	—	11
	Divinycell H-80	0.080	1.79	1.17	1.00	30
	Termanto, C70.90	0.091	2.21	1.78	1.16	13
	Divinycell H-100	0.096	2.48	1.79	1.50	45
线性 PVC 泡沫		0.080	1.39	0.79	0.98	20
PMI 泡沫	Rohacell 71	0.075	2.74	1.47	1.28	30
	Rohacell 100	0.111	3.40	2.94	2.35	49
酚醛树脂蜂窝		0.096	—	7.76	1.38	41
聚丙烯蜂窝		0.077	—	1.50	1.10	—
铝蜂窝	5052 型(芯格尺寸 1/8 英寸)	0.049	—	2.01	1.47	265
	5056 型(芯格尺寸 1/8 英寸)	0.049	—	2.39	1.74	265

1.1.5 复合材料的分类及特性

复合材料种类繁多，依据不同的分类方法，可将复合材料分为不同的类别。下面列举几种常见的分类方法。

1. 按材料作用分类

复合材料按材料的作用可分为结构复合材料和功能复合材料两大类。

结构复合材料是制造工程结构可承受外载荷的复合材料，它由基体材料和增强材料两部分组成。基体材料可选用各种树脂基体或金属、非金属材料。增强材料可采用各种纤维材料或者颗粒等材料。增强材料在复合材料中起主要作用，主要提供刚度和强度。基体材料起配合作用，它支持和固定纤维材料，传递纤维间的载荷，同时保护纤维，防止磨损或腐蚀，改善材料的某些性能。

功能复合材料是迅速发展起来的另一大类复合材料。实践表明，功能复合材料的效能往往优于一般单质功能材料，同时具有某种特殊的功能，如换能特性、阻尼特性、摩擦特性、导磁或导电特性，因此也常被称为特种复合材料。目前主要的几种功能复合材料为压电复合材料、导电复合材料、磁性功能复合材料、功能纳米复合材料等。

2. 按基体材料分类

复合材料按基体材料分类可分为树脂基、金属基、陶瓷基、水泥基以及碳-碳基复合材料等。树脂基复合材料又称为聚合物基复合材料(PMC)。金属基体主要用于耐高温或其他特殊需要的场合，具有耐 300℃以上高温、表面抗侵蚀、导电导热、不透气等优点。陶瓷

基体同样具有耐高温的特性,且化学稳定性较好,具有高模量和高抗拉压强度,但易脆,耐冲击性能差。水泥基复合材料主要用于民用建筑。碳-碳基复合材料主要用作导弹弹头超高温烧蚀结构材料。

3. 按增强材料分类

根据复合材料中增强结构的几何形状,复合材料可以分为纤维增强、颗粒增强和碎片增强。例如,玻璃布碎片增强塑料属于碎片增强复合材料。

颗粒增强复合材料是由悬浮在基体材料中的一种或多种颗粒材料组成的。颗粒可以是金属也可以是非金属。非金属颗粒在非金属基体中的复合材料,最常见的例子是混凝土,它是由砂、石、水泥与水黏合在一起经化学反应形成的结构材料。金属颗粒在非金属基体中的复合材料,例如,固体火箭推进剂是由铝粉和高氯酸盐氧化剂无机微粒放在聚氨酯的有机黏结剂中组成的,微粒占 75%,黏结剂占 25%。非金属颗粒在金属基体中的复合材料,如碳化钨在钴基体中的金属陶瓷可用于高硬度零件制造,如拉丝模具等。

4. 按复合材料结构分类

复合材料按结构可分为单层复合材料(包括纤维、颗粒与碎片增强复合材料)、层状复合材料(或称为层合板)与填充骨架型复合材料(填充泡沫与蜂窝均属此类)。这些复合材料的简明示意图如图 1-7 所示。混杂复合材料是指有两种以上纤维混杂的增强环氧复合材料或碳与有机纤维混杂的复合材料。混杂复合材料也可分为层间混杂与层内混杂。

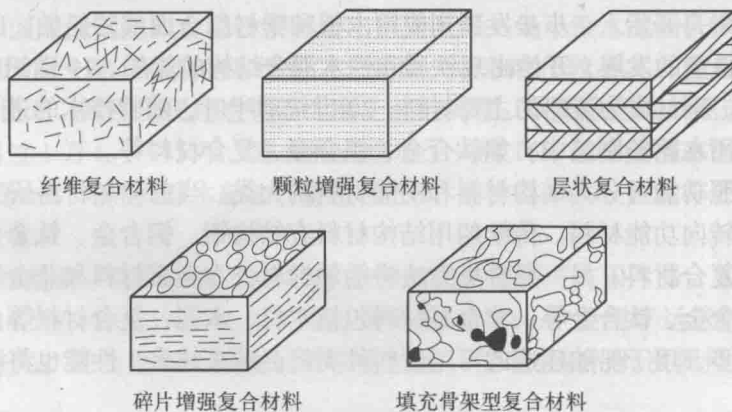


图 1-7 各类型复合材料示意图

5. 按纤维分类

复合材料按纤维分类有连续纤维、短纤维与晶须增强复合材料。

晶须是指自然形成或者在人工控制条件下以单晶形式生长的一种纤维,其直径非常小,长度约为几毫米,强度极高,接近完整晶体的理论值。因此,用它作为增强材料的复合材料,其性能特别优秀。但晶须制造成本高,目前多用于尖端工业或玻璃制品的局部辅助增强材料。

纤维增强复合材料是由纤维与基体复合而成的,这些组分材料的化学成分、性质与宏观

尺寸上的形状是互不相同的,纤维可以是人造的,也可以是天然的(如竹子或麻纤维);既可以是连续的,也可以是短切的。纤维与基体互不相溶,复合后各自保持原来的特性。图 1-8 为各类纤维增强复合材料的分类及相互关系。

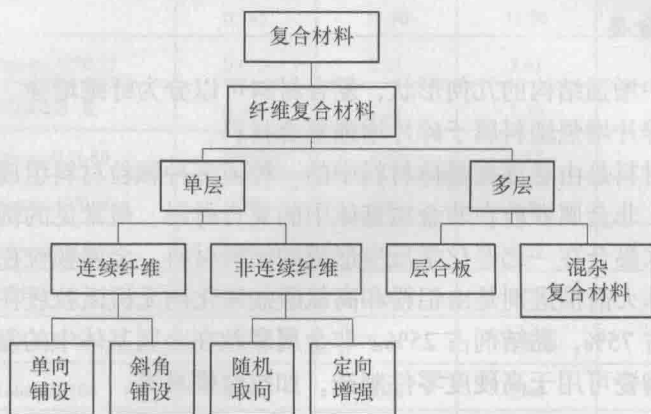


图 1-8 纤维增强复合材料的分类及关系

1.2 船体材料发展历史

自古以来,人类对海洋的探索从未中断。从石器时代开始,人类为了探索江河湖海,从最早的筏子和独木舟开始,一步步发展到使用木板和梁材组合而成的船舶。18 世纪,随着冶金工业、机械制造业的发展,开始出现铁质和铁木混合结构的船舶。19 世纪后半叶,开始使用低碳钢来造船,钢材成为造船的主要材料。20 世纪后半叶,随着技术的进一步发展,越来越多的新材料使用在船舶制造中,如钛合金、铝合金、复合材料等。

船舶材料按照功能可分为结构材料和功能材料两大类。当前船舶材料研究与应用的总趋势是由结构材料转向功能材料。传统船用结构材料有结构钢、铝合金、钛合金、不锈钢等;功能材料为各种复合材料。另一种分类方法将船舶材料分为金属材料和非金属材料。金属材料包括钢材、铝合金、钛合金等;非金属材料包括木材、水泥、复合材料等。可以预见,随着科技的不断进步,用于船舶建造的可用材料种类将会越来越多,性能也将不断提升,成本不断降低。

1.2.1 木材

木材是最古老的船体材料之一。祖先发现一些物体能够浮于水面的自然现象,并且人可以骑坐在圆木上顺水漂浮,于是发明了独木舟。再之后,人们又逐步学会了就地取材,制造了简单、平稳、装载面积较大的筏。筏的种类较多,有木筏、竹筏、皮筏等。木材作为船舶材料的特点是重量轻、力学性能好,但存在易腐蚀、易虫蛀、易着火等缺点。在冶金业不发达时期,木船是海上运输的主要工具,见证了各个海上强国的兴起与衰落(图 1-9)。

3000 多年前,中国开始出现木板船,并显示了强大的适用性,为船舶的进一步发展和进步奠定了基础。随后,人们在长期的航行实践中创造了利用风力航行的船——帆船(图

1-10)。自从人类创造了帆船,大航海时代到来了。直到 19 世纪,世界上一些大型的船还是帆船,最大帆船桅杆可达 30m,挂帆 30 多面。



图 1-9 木船

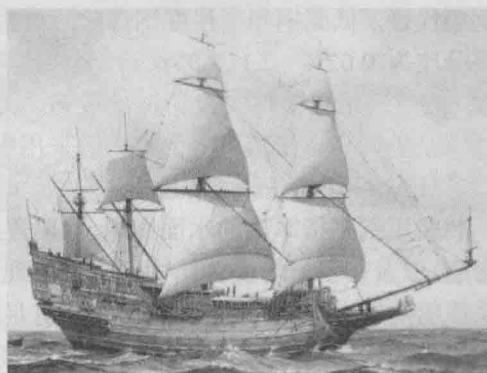


图 1-10 帆船

1.2.2 水泥

水泥也是建造船舶的一种材料,以水泥与钢丝(钢筋)为主要材料的船舶包括钢丝网水泥船和钢筋混凝土船。水泥船具有抗腐蚀性和耐久性等优点,寿命超过 20 年。同时,水泥船造价低廉,材料获取容易,建造设备和施工工艺简单,维修保养费用低。但其缺点也较为突出,主要缺点是自重大、抗冲击性能差。钢筋混凝土船可作为对自重要求不高、泊位固定或较少移动的工程船舶和趸船。

1848 年,法国人用钢丝和水泥砂浆制造出世界上第一条小型水泥船,后来发展出用钢筋取代钢丝的钢筋混凝土船。早期的水泥船工艺简陋,船舶吨位较小,自重大。在两次世界大战期间,因钢材匮乏,两度出现建造钢筋混凝土船的高潮。欧美各国大批建造钢筋混凝土船,有的船排水量超过 1 万 t。1945 年,意大利人建造了一艘 165t 的钢丝网水泥机帆船“爱伦”号。其船壳厚 3.6cm,与同类型木船比,重量轻 5%,造价低 40%,性能符合航海要求,引起各国造船界的注意。

中国 1970 年建造了世界上排水量最大的钢丝网水泥船“古田”号,重量达 3000t,船长 105.2m,宽 14.5m,深 8.1m,吃水 5.7m,排水量 5773t,主要用于运送包装货和散装货。但由于该船自重大、耗油量大,无法完成长途航运,仅下水航行几次便停泊在港口,自此搁浅(图 1-11)。



图 1-11 “古田”号水泥船