

21

世纪复合材料应用技术丛书

丛书主编 刘雄亚

复合材料 建筑结构 及其应用

晏石林 杨学忠 刘雄亚 庄英 编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

21世纪复合材料应用技术丛书

丛书主编 刘雄亚

复合材料 建筑结构 及其应用

晏石林 杨学忠 刘雄亚 庄英 编著



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

·北京·

复合材料具有轻质、高强、防腐、耐水、隔热及绝缘等优异性能,在建筑工业中的应用越来越广,是一种节能、优质的工程材料。本书介绍了复合材料建筑结构的性能、设计、制造与应用。全书共分9章,分别介绍了复合材料屋面结构、复合材料墙体结构、复合材料承重结构、复合材料楼板及地板、复合材料充气结构、复合材料(玻璃钢)门窗、特种复合材料建筑和增强聚合物混凝土结构。

本书为《21世纪复合材料应用技术丛书》分册之一。对国内外各种复合材料建筑结构和应用进行了具体介绍,非常实用,可以指导设计、生产和施工,有较高的参考价值。

本书可供从事复合材料结构研究、生产与应用部门,特别是建材、建筑行业的工程技术人员以及高等学校复合材料专业、工业与民用建筑专业、化学工程专业和工程力学专业的有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料建筑结构及其应用/晏石林等编著. —北京:
化学工业出版社, 2006. 6
(21世纪复合材料应用技术丛书)
ISBN 7-5025-8913-9

I. 复… II. 晏… III. 建筑材料: 复合材料-建筑
结构 IV. ①TU599②TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 064755 号

21世纪复合材料应用技术丛书

丛书主编 刘雄亚

复合材料建筑结构及其应用

晏石林 杨学忠 刘雄亚 庄英 编著

责任编辑: 张玉崑

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 战河红

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

http: // www. cip. com. cn

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 字数 349千字

2006年8月第1版 2006年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8913-9

定 价: 38.00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

丛书前言

材料是人类赖以生产、生活所必需的物质基础，也是社会文明进步的标志。在人类历史发展过程中，每一种新材料的出现和制造技术的进步，都不同程度地促进了社会生产力的发展。

复合材料是指由两种以上的异质、异形、异性的材料，经过复合而形成的新材料，它除保留原组分材料的主要特点外，还能通过复合效应获得原有组分材料所不具备的新的优异性能。按其基体材料的不同，复合材料可分为聚合物（树脂）基复合材料、金属基复合材料和无机非金属材料基复合材料三大类。

在 2200 年前，我们的祖先就已开始利用复合材料。如在西安半坡村原始人遗址中发现，用草（天然纤维）拌泥作墙和地面，防止黏土干裂和剥落，提高墙体与地面的强度和耐风雨侵蚀能力，这可以看作是纤维增强无机复合材料的始祖。1972~1974 年在我国湖南马王堆古墓中出土的漆器是西汉时代的文物，它是用丝和麻作增强材料，用大漆作胶黏剂制成的鼎、酒壶、盆具、茶几等物品，在地下埋藏了两千多年，仍然熠熠生辉。湖北隋县出土的曾侯乙墓中，有许多用于战车的戈戟和笄，它们的柄是用 3~4m 长的木杆芯，外面包以纵向竹丝，再用大漆和蚕丝进行环向缠绕，然后再浸渍大漆经干燥后形成复合材料，产品坚硬光滑，耐水耐热，耐化学腐蚀。这和现今的树脂基纤维缠绕增强复合材料的成型是相似的。魏晋南北朝时期，在改革底胎和面漆的基础上，先塑造出泥胎，再在泥胎上粘贴麻布，涂漆和彩绘，当油漆干固后挖出并用水冲去泥胎，形成中空漆麻复合材料佛像。这种佛像轻巧美观、坚固耐久，几米高的佛像，一个人就可以举着行走（称为“行像”）。这种技术流传到日本后，至今还保留着当年唐代高僧鉴真和尚东渡日本，在该国圆寂时塑制的漆麻复合材料座像，作为日本的国宝文物，每年只对外开放几天，供人瞻仰。这种制造佛像技术与当今的手糊玻璃钢成型工艺几乎没有多大区别。

现代复合材料的历史只有 60 多年，它始于 20 世纪 40 年代，是由美国人发明的，用玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂复合材料，并在第二次世界大战中用于制造军用飞机雷达罩和远航副油箱。1943 年用手糊工艺制成第一艘复合材料（玻璃钢）渔船。到了 20 世纪 60~70 年代，树脂基复合材料制品已广泛应用于航空、机械、建筑、化工及体育用品等领域。现代复合材料的发展一直是围绕着解决传统材料不能适应的工程技术难题和尖端科学技术提出的新材料需求而发展的。由于复合材料的最大特点是性能的可设计性，因而使它能广泛地应用于国民经济各个领域，顺利

解决了尖端科学技术中宇航材料、隐形技术、复合装甲、信息技术材料、新能源材料、生物医用材料及智能材料等一系列高精尖技术难题。在一般民用经济建设中，复合材料又能起到改善性能、降低成本的作用。复合材料在国民经济各个领域的开发和应用，可以说是无所不能、无所不在。因此，学术界和工程界的专家都一致认为 21 世纪将是复合材料时代。

我国现代复合材料的发展始于 20 世纪 50 年代，是由当时的建材部赖际发部长首先倡导的，他根据 1956 年访问苏联时对“Стеклопластика”的认识，认为这种新材料内含有玻璃，强度又比钢高，遂起名玻璃钢，这种叫法虽然不尽科学，但国内已然约定俗成，在国际交往中也被认可。自此以后，我国复合材料得以持续不断发展、壮大，研究、生产、教育以及行业建设、媒体传播、标准化工作等相继提到日程并付诸实施。

几年前，笔者曾参与化学工业出版社出版的《复合材料大全》主编工作，该书受到各界读者的好评和鼓励，出版社和笔者都收到了大量读者来信、来电咨询，反响较为强烈。由于该书篇幅所限，很多内容不能深入阐述，为了满足广大读者的要求，化学工业出版社经过广泛调查研究并征求专家意见后，特邀请本人组织编写这套《21 世纪复合材料应用技术丛书》，本丛书共分八册：

《无机非金属材料及其应用》(刘雄亚 郝元恺 刘宁 编著)

《透光复合材料、碳纤维复合材料及其应用》(刘雄亚 欧阳国恩 张华新 刘宁 编著)

《夹层结构复合材料设计原理及其应用》(王兴业 杨孚标 曾竟成 肖加余 编著)

《复合材料建筑结构及其应用》(晏石林 杨学忠 刘雄亚 庄英 编著)

《热固性树脂复合材料及其应用》(黄志雄 彭永利 秦岩 梅启林 编著)

《防腐蚀复合材料及其应用》(张大厚 编著)

《功能复合材料及其应用》(曾黎明 编著)

《纤维增强热塑性复合材料及其应用》(张晓明 刘雄亚 编著)

参加编著的作者都是复合材料界的专家，具有丰富的科研、生产和教学实践经验，在编写过程中，作者们除收集最新资料外，还写入了自己多年的研究成果和实践经验，相信会对读者有所裨益。希望这套丛书能为我国复合材料工业的发展起到积极的推动作用。书中倘有不足，敬请赐教。

《21 世纪复合材料应用技术丛书》主编

刘雄亚 于武汉理工大学

2006 年 5 月

前 言

与传统材料相比，复合材料具有轻质、高强、防腐、耐水、隔热及电绝缘等优异性能，已发展成为 21 世纪的主要工程材料，普遍受到世界各个国家的青睐和重视。复合材料目前已广泛应用于建筑业、汽车工业、航空工业、化学工业、能源工业、交通工业、电子工业及文体休闲等国民经济的各个领域，产品种类已多达数千种。复合材料在建筑业中的用量，很多国家都名列复合材料总产量的前三位。如日本和欧洲各国复合材料在建筑业中的应用已占总产量的首位，美国则占第二位。

在建筑业和化学工业中，传统的结构材料主要是钢材和钢筋混凝土材料。众所周知，钢材易于腐蚀，我国每年腐蚀掉的钢材就有 1000 多万吨，相当于上海宝山钢铁公司一年的产量。笔者曾对一些工厂进行过调查，如应山化工厂盐化车间的钢筋混凝土结构、武汉钢铁公司酸洗车间的钢结构等，使用尚不足 10 年，腐蚀损坏已达到需要重新建造的程度。钢筋和混凝土易于腐蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性的最根本缺陷，特别在一些特种工程中，如受海水或化学品侵蚀的海港码头建筑、海滨设施、化工厂生产车间、公路桥梁面板等，腐蚀造成的破坏尤其明显。根据文献报道，美国境内 16 万座桥梁在设计基准期内因钢筋锈蚀所需要的维修费用达 200 亿美元，欧洲因钢筋锈蚀而引起的损失估计每年达 15 亿美元。而我国 1981 年对华南地区 18 座码头的调查表明，尽管其使用期只有 7~15 年，但是已经有 16 座码头水上部分的构件已发生了严重损坏。1984 年，河海大学对浙江镇海的 22 座中小型沿海水工建筑物的调查表明，967 根构件中由于钢筋锈蚀而导致出现顺筋裂缝破坏的有 538 根。我国铁道部在 1997 年的调查表明，全国由于受不良介质严重腐蚀受损的桥达 5450 余孔，其中 4600 余孔承载力不足，有相当一部分桥因钢筋腐蚀而不能正常使用，不得不更换新的钢筋混凝土梁，造成了巨大的经济损失，且影响铁路的正常运行。可见，钢筋混凝土的腐蚀对于各个国家的基础建设工程和工业应用都是不可忽视的重大问题。

解决钢筋混凝土结构的腐蚀问题主要有三个途径。

① 提高水泥的耐腐蚀性，严格保证混凝土的施工质量，从各个方面加强混凝土的密实性，以加强对钢筋的保护。

② 加强钢筋的耐腐蚀能力。如采用阴极保护法增加钢筋的电势来防止钢筋腐蚀，由于这种方法需要提供附加阳极，因此造价较高；在钢筋表面附加涂层，如在钢筋表面涂锌或喷涂环氧树脂，这种方法目前也是在国外研究的一个热点，但是这

种方法工艺难度较大；另外就是采用不锈钢作为加强筋，这种方法价格太高，难以在工程中广泛应用。

③ 研制和使用新型材料。

前两种方法虽然可以减轻钢筋混凝土结构的腐蚀问题，但是所花费用较高，而且很难从根本上防止结构的腐蚀问题。近年来国际上对采用新的耐腐蚀结构材料特别重视，即在防腐蚀要求较高的工程与建筑结构中采用耐腐蚀的复合材料，如纤维增强塑料（FRP）、聚合物混凝土复合材料等，从而有效地解决结构的腐蚀问题。不仅如此，在建筑结构中使用复合材料还可使结构的重量降低，提高结构的抗震性。

当前，复合材料在建筑工业中的用量虽然已居复合材料总产量的首位，但是主要还是用于卫生洁具、管道、容器等方面，聚合物混凝土复合材料也大都只用其防腐蚀功能。而将纤维增强塑料和聚合物混凝土复合材料用作建筑承重结构的实例并不多见，需要业内人士大力研究开发。本书主要介绍复合材料屋面结构，复合材料墙体结构，复合材料承重结构（梁、柱、桁架等），复合材料楼板与地板，复合材料门窗结构，钢筋或 FRP 筋增强聚合物混凝土结构，复合材料充气结构及特种复合材料结构等。编写本书的初衷意在能对发展复合材料建筑结构起到推动作用。

本书为《21 世纪复合材料应用技术丛书》的分册之一。参加撰写工作的有晏石林（第 1 章、第 2 章、第 9 章），杨学忠（第 3 章、第 4 章、第 8 章），刘雄亚（第 5 章、第 6 章），庄英和郭春森（第 7 章）。全书由晏石林教授统稿。由于作者水平有限，书中缺点和不当在所难免，敬请读者批评指正。

晏石林

2006 年 4 月于武汉

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 复合材料建筑结构的应用现状与发展前景	1
1.2 建筑结构用复合材料的特点	3
参考文献	5
第 2 章 复合材料屋面结构	6
2.1 屋面材料的基本性能与要求	8
2.2 复合材料波纹屋面板的特性与设计	10
2.2.1 复合材料波纹板常用规格及构型	10
2.2.2 复合材料波纹板的性能与要求	13
2.2.3 复合材料波纹屋面结构形式和连接	18
2.2.4 复合材料波纹板的设计	21
2.3 复合材料夹层结构板的特性与设计	28
2.3.1 复合材料夹层板的种类和性能	29
2.3.2 复合材料夹层屋面结构的形式和连接	32
2.3.3 复合材料夹层屋面结构的设计	38
2.4 复合材料屋面板的制造技术	42
2.4.1 波纹板和平板的连续化生产	42
2.4.2 夹层板的生产	45
第 3 章 复合材料墙体结构	46
3.1 概述	46
3.1.1 墙体材料的发展方向	46
3.1.2 墙体材料的标准化	47
3.2 墙体、墙体材料的分类及性能	48
3.2.1 建筑物墙体的分类与功能	48
3.2.2 墙体材料的分类与基本性能	48
3.3 复合材料墙板的结构形式	55
3.3.1 复合材料单层平板	55
3.3.2 复合材料夹层板	56
3.3.3 复合墙板	60
3.3.4 透光中空墙板	61
3.4 复合材料墙板的性能及结构设计	61
3.4.1 复合材料墙板的力学性能	61
3.4.2 热性能	67

3.4.3	隔音性能	68
3.4.4	防火性及耐水性	69
3.4.5	变形(翘曲)性能	69
3.4.6	复合材料夹层结构中芯材的选择	70
3.5	复合材料墙板的制造技术	71
3.5.1	蜂窝夹层结构墙板的生产工艺	72
3.5.2	泡沫塑料夹层结构墙板的生产工艺	76
3.5.3	透光中空墙板的生产	78
3.6	复合材料墙板的连接	79
3.6.1	复合材料墙板的处理	79
3.6.2	复合材料墙板的连接方式	80
3.6.3	复合材料墙板的安装和固定	83
3.6.4	复合材料墙板的接缝处理	85
第4章	复合材料承重结构	86
4.1	建筑结构与复合材料	86
4.1.1	建筑结构的分类	86
4.1.2	用于建筑结构的复合材料	87
4.2	复合材料结构设计的基本原理	88
4.2.1	复合材料结构设计的一般原则	89
4.2.2	复合材料结构设计应考虑的工艺性要求	89
4.2.3	许用值与安全系数的确定	90
4.2.4	典型结构件的设计	91
4.3	复合材料防腐蚀接头	97
4.3.1	胶接与机械连接的特点	97
4.3.2	复合材料防腐蚀接头的具体应用	98
4.4	复合材料桁架与桁构拱结构	100
4.4.1	复合材料-木材桁架结构	101
4.4.2	复合材料桁构拱结构	104
4.4.3	复合材料桁架与桁构拱结构中圆管构件的连接	106
4.5	复合材料筒拱承重结构	108
4.5.1	夹层结构式筒拱结构	108
4.5.2	菱形筒拱结构	110
4.5.3	肋板式筒拱结构	111
4.6	复合材料圆顶承重结构	113
第5章	复合材料楼板及地板	122
5.1	复合材料楼板	122
5.1.1	楼板的功能及要求	122

5.1.2	复合材料夹层结构楼板设计	123
5.1.3	复合材料现浇式整体楼板	125
5.2	复合材料地板	125
5.2.1	概述	125
5.2.2	住宅及办公室装饰地板	127
5.2.3	复合材料无缝地板	129
5.2.4	化工防腐蚀地面	131
第6章	充气式建筑结构	142
6.1	概述	142
6.1.1	充气式建筑结构的形势与特点	142
6.1.2	制造充气式建筑结构的材料及其性能	143
6.2	空气支撑式结构	146
6.2.1	空气支撑式结构建筑构造	146
6.2.2	主室壳体的内压计算	147
6.2.3	主室壳体强度验算	149
6.2.4	壳体与地基连接强度计算	149
6.2.5	空气支撑式建筑物的施工	150
6.3	充气构架式结构	151
6.3.1	充气构架式结构的特点	151
6.3.2	充气构架式结构的设计	152
第7章	复合材料采光结构——玻璃钢门窗	157
7.1	复合材料(玻璃钢)门窗的发展概况	157
7.1.1	玻璃钢门窗的国内外发展概况	157
7.1.2	玻璃钢门窗的定义及种类	158
7.1.3	玻璃钢门窗的特点和应用	160
7.2	玻璃钢门窗	163
7.2.1	建筑门窗的基本要求	163
7.2.2	玻璃钢门窗的构造设计	166
7.3	玻璃钢门窗的强度设计	173
7.3.1	载荷计算	173
7.3.2	强度计算	174
7.3.3	型材断面形状的设计	176
7.4	玻璃钢门窗五金配件的选用	179
7.4.1	国内玻璃钢门窗用五金配件现状	179
7.4.2	玻璃钢窗五金件	179
7.5	玻璃钢门窗的制造技术	182
7.5.1	玻璃钢门窗型材制造技术	182

7.5.2	玻璃钢门窗的组装工艺及设备	186
7.5.3	玻璃钢门窗下料的计算	190
7.5.4	玻璃钢门窗的组装质量要求及检验内容	194
7.5.5	玻璃钢门窗的涂装工艺及所需设备	196
7.5.6	玻璃钢门窗涂装用材料	197
7.5.7	玻璃钢门窗涂装过程中的注意事项	197
7.5.8	玻璃钢门窗的外观质量要求标准及检验内容	201
7.5.9	玻璃钢门窗密封性能的检验方法	201
7.6	玻璃钢门窗经济效益的分析	203
第8章	特种复合材料建筑	206
8.1	全复合材料建筑	206
8.1.1	整体式全复合材料建筑	206
8.1.2	装拆式全复合材料建筑	207
8.2	复合材料农用温室建筑	209
8.2.1	用于农业温室的复合材料	209
8.2.2	透光复合材料农业温室的设计与应用	214
8.3	复合材料穹顶建筑	220
8.3.1	复合材料穹顶建筑的结构形式	220
8.3.2	复合材料穹顶建筑设计实例	222
8.4	其他复合材料建筑	226
8.4.1	大跨度复合材料建筑	226
8.4.2	屋顶装饰性建筑	229
	参考文献	229
第9章	增强聚合物混凝土结构	230
9.1	概述	230
9.2	聚合物混凝土的配合比与制造技术	232
9.2.1	原材料	232
9.2.2	配合比	234
9.2.3	制造技术	234
9.3	聚合物混凝土的性能	236
9.3.1	力学性能	237
9.3.2	化学和物理性能	239
9.4	聚合物混凝土及其结构的应用	243
9.4.1	聚合物混凝土预制结构件及其应用	244
9.4.2	聚合物混凝土用作修补材料	250
9.4.3	聚合物混凝土薄层罩面	252
9.4.4	人造石材	257

9.4.5 聚合物混凝土的标准	257
9.5 钢筋增强聚合物混凝土结构	259
9.5.1 钢筋聚合物混凝土轴心受拉构件	259
9.5.2 钢筋聚合物混凝土受弯构件	261
9.5.3 钢筋聚合物混凝土偏心受压构件	273
9.6 纤维增强塑料筋增强聚合物混凝土结构	279
参考文献	285

第 1 章 绪 论

建筑工业中，传统的建筑材料是砖、石、木材、钢材、混凝土、灰土等，传统的建筑结构通常为砖石结构、钢结构、钢筋混凝土结构、木结构等。从环境保护的角度来看，砖石结构、木结构的使用将会越来越少，钢结构和钢筋混凝土结构虽然在现代建筑中发挥着主导作用，但是由于其质量大、建筑面积利用率较低等缺点仍难以满足各个方面的要求。

新型建筑材料的发展对建筑技术和建筑结构的发展起着十分重要的作用，而先进建筑技术的使用和对新型建筑结构本身的要求，又对建筑施工和建筑材料提出了新的要求。如要求建筑设计标准化，建筑施工装配化、机械化，建筑制品要求预制、轻质、高强、多功能等。

为了满足现代建筑对建筑材料及建筑结构提出的各种要求，既不能依靠传统的建筑材料，也很难寻找一种新的单一材料，人们自然会想到复合材料，这就使复合材料建筑结构的使用成为可能。

复合材料是由两种或两种以上不同材料通过某种复合方式组成的新材料，它不仅具有单一组分材料的基本特性，而且能产生比任一组分材料更加优越的性能。玻璃纤维增强塑料（GRP，玻璃钢）和碳纤维增强塑料（CFRP）是目前应用最为广泛的纤维增强树脂基复合材料（FRP）。半个世纪以来，它们已经在国防、化工、交通、机电、建筑、农业、体育等各个部门得到了大量应用。

纤维增强树脂基复合材料具有一系列优异的性能，作为一种新型的建筑材料，与传统建筑材料相比，它成型性能好，可以制成各种结构形式的预制件，也可以现场施工；质量轻而强度高，可以在满足设计要求的情况下大大减轻建筑物的自重；具有优良的耐化学腐蚀性能，适应化工生产及建筑的特殊要求；可以制成各种标准制件，在建筑施工过程中直接装配组合，大大提高施工速度；具有独特的透光性能，可以同时作为采光材料和结构材料使用；着色方便，可以制成各种装饰性材料。

1.1 复合材料建筑结构的应用现状与发展前景

随着建筑工业的迅速发展以及人们对复合材料优良性能的逐步认识，复合材料越来越多地被用于建筑工程领域。根据 1996 年的统计，用于建筑工业的复合材料

已占世界复合材料总产量的第二位，成为仅次于陆上交通运输工业的用量大户。工业发达国家用于建筑方面的复合材料已达其总产量的20%。其中，日本在1996年用于建筑业的复合材料达到了总产量的57%。我国复合材料工业虽然起步较晚，但是发展迅速，复合材料一半以上的产量用在建筑领域，是我国复合材料应用的最大领域。

复合材料在建筑工业中的用途十分广泛，从基础到屋面、从内外墙板到卫生洁具、从门窗到建筑装饰、从承重结构到全复合材料房屋，均可用复合材料来制造。根据国内外复合材料建筑结构的应用情况，用于建筑方面的复合材料制品可以归纳为如下几类。

(1) 复合材料承重结构 用于承重结构的复合材料建筑制品有：桁架、柱、梁、基础、承重折板、屋面板、楼板、梯子、加强筋等。这些复合材料构件主要用于化工厂房、码头等需要防腐的建筑，高层结构及全复合材料房屋等要求质量轻的建筑。

(2) 复合材料围护结构 用于围护结构的复合材料建筑制品有：各种波纹板、夹层结构，各种不同材料复合板、整体式和装配式折板结构以及壳体结构、防腐栏杆等。用作壳体结构的板材既是围护结构又是承重结构。这些构件可以用作工业与民用建筑的外墙板、隔墙板、物顶结构、遮阳板、天花板、薄壳结构和折板结构的组装构件。

(3) 采光制品 用于采光建筑制品的复合材料结构有：透明波形板、半透明夹层结构板、整体式和组装式采光罩等。主要用于工业建筑、民用建筑、农业温室及大型公用建筑的天窗、屋顶及围护墙面采光等。

(4) 门窗装饰材料 用于门窗装饰材料的复合材料结构有：各种断面形状的复合材料拉挤型材、平板、浮雕板、复合板等。主要用于工业及民用建筑的门窗框架、门板、贴面、墙裙装饰板、吊顶、大型建筑浮雕和城市雕塑等。

(5) 给排水工程材料 在市政建设中给水、排水、污水处理等工程中已大量使用复合材料结构制品，如各种直径的地上与地下复合材料管道、复合材料高位水箱、化粪池、防腐排污槽、屋面排水、落水管等。

(6) 卫生洁具材料 复合材料卫生洁具具有浴盆、洗面盆、坐便盆、各种整体式、组装式卫生间等，广泛用于宾馆、住宅的卫生间以及各类建筑的卫生工程中。

(7) 采暖通风材料 用于采暖通风的复合材料及其结构制品有：复合材料冷却塔、通风管、栅板、防腐风机叶片以及整体成型的采暖通风制品。主要用于工业与民用建筑物中央空调系统的送风管、排风管、防腐风机罩等。

(8) 高层楼房屋顶建筑 用于屋顶建筑的复合材料结构有：旋转餐厅屋盖、异形尖顶屋盖、楼房加高、球形屋顶、屋顶花园、屋顶游泳池、广告牌、广告字、雕

塑等。

(9) 特殊建筑 用于特殊建筑的复合材料结构有：大跨度的飞机库、冷库、活动房屋、岗亭、电话亭、售货亭、仿古建筑、移动剧院、透微波塔楼、屏蔽房、防腐车间、水工建筑、防浪堤、太阳能房、充气建筑等。

(10) 其他 复合材料在建筑中的还有其他许多用途，如用作钢筋混凝土结构的补强加固材料、替代钢筋作为混凝土结构的加强筋、建筑物的防腐贴面、高速公路护栏、防眩板、街道马路上的窨井盖、公共场所中的固定座椅、海滨浴场活动更衣室、公园凉亭、城市垃圾箱、垃圾桶等。

1.2 建筑结构用复合材料的特点

复合材料之所以能在建筑中得到应用并展现出广阔的发展前景，是因为它具有许多优越特点，可以满足对于建筑结构的性能要求。复合材料的建筑特性表现在以下几方面。

(1) 材料性能的可设计性 复合材料的性能可以根据使用要求进行设计。复合材料的力学性能除了由增强纤维、树脂基体以及组分材料的体积分数决定外，还与纤维的铺设方向、铺层顺序等因素有关。因此，可以根据结构的受力特点、荷载分布的不同，选择材料和设计铺层，使结构既能满足使用要求又经济合理。如果结构要求满足耐水、防腐等要求，可以选择耐腐蚀性好的树脂作为基体材料；若要求防火、价廉，则可以采用无机复合材料结构。

(2) 材料与结构的统一性 复合材料与结构是同时成型的，即复合材料建筑构件可以整体一次成型，大大减少大型复杂建筑结构的连接接头，减少或避免了结构在连接部位的应力集中，同时又减轻结构的质量，节省材料，降低成本。

(3) 轻质高强，力学性能好 复合材料具有很高的比强度和较高的比刚度，单向玻璃纤维增强复合材料（GRP）的拉伸强度可达 1000MPa 以上，是普通建筑用钢材的 3~4 倍；拉伸弹性模量在 50GPa 以上，约为钢材的 1/4。而 GRP 的密度只有 1800kg/m³ 左右，是钢材的 1/5~1/4，因此 GRP 的比强度为普通钢材的 15 倍左右，而比刚度与钢材相当。如果是单向碳纤维复合材料（CFRP），则其拉伸强度、拉伸弹性模量更高，而密度还要更低。所以 CFRP 可以获得比钢材高得多的比强度和比刚度。

(4) 装饰性好 复合材料制品表面光洁，可以配制成各种鲜艳的色彩，也可以在构件成型的同时在表面制造出不同的花纹和图案，因此适宜于制作各种装饰板、大型浮雕以及工艺美术雕塑等。

(5) 透光性 GRP（玻璃钢）可以做成透明材料，透明玻璃钢的透光率达

85%以上，接近于玻璃，因此可以用作建筑采光材料。与玻璃相比，透明玻璃钢最大的特点是不易破碎，还能承受荷载。用于建筑工程时可以同时发挥结构材料、围护材料和采光材料三者的作用，能够达到简化采光设计、降低工程造价的目的。

(6) 隔热性 建筑物要求能够有效地防止由于热传导、热对流引起室内温度产生较大的变化，以给人们舒适的工作与生活环境。一般建筑材料的隔热性较差，普通混凝土的热导率为 $1.5 \sim 2.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，红砖的热导率为 $0.81 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，而复合材料夹层结构的热导率为 $0.05 \sim 0.08 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，是混凝土的 $1/25$ ，红砖的 $1/10$ 。即用复合材料夹层结构做建筑物墙体材料时，可以起到节能作用。

(7) 隔音性 隔音效果是评价建筑物质量高低的标准之一，在传统的材料中，一般隔音效果好的建筑材料往往密度较大，隔热性较差，运输安装费用较大。复合材料具有消失振动音波和传播音波的功效，经过专门设计的夹层结构可以取得既隔热又隔音的双重效果。

(8) 电性能 GRP 具有良好的绝缘性能，它不受电磁波作用，不反射无线电波，可以在很宽的频段内具有良好的透微波性能，对电波通信系统的建筑物有特殊的用途，可以用于制造雷达天线罩和各种机房。

(9) 耐化学腐蚀 GRP 具有很好的抗微生物作用和耐酸、碱、有机溶剂及海水腐蚀的能力。特别适用于化工建筑、地下建筑以及水工建筑等工程。

(10) 防水性 FRP 的吸水率很低，不透水，可以用于建筑工程中的防水、给水及排水工程，而且表面光洁，可以降低输水阻力。

(11) 防火性 建筑物对防火都有一定的要求，有机复合材料可以做到具有阻燃性，能够满足一般的要求，如果要达到完全防火要求，必须采用无机复合材料。高性能的无机复合材料的耐热性达到 300°C ，属于不燃材料。

复合材料也存在一些缺点，用于建筑结构时应加以注意，必须在设计中利用其长处，克服其弱点，以充分发挥复合材料的可设计性和最大功能。复合材料在建筑结构中应用时要注意的几个问题如下。

(1) 刚度问题 普通的玻璃布增强复合材料的弹性模量较低，只有钢材的 $1/10$ 。因此用作承重建筑结构时，应通过从结构形式上的合理设计来弥补材料刚性不足的问题，如采用夹层结构、折板结构、拱形结构或加肋结构等，通过合理的设计来提高结构的刚度和稳定性。

(2) 成本问题 树脂基复合材料比传统的建筑材料要贵，一般的玻璃纤维增强树脂基复合材料 (GRP) 的材料成本为 15000 元/吨左右，如果采用碳纤维等高性能的增强材料或环氧树脂、乙烯基酯树脂等高性能的基体材料，则成本还要高很多。因此为了减少复合材料建筑结构的造价，一方面要根据建筑构件的不同用途选用的原材料，不同的受力特点采用不同的复合结构形式，使结构的每部分、材料的

各组分都充分发挥最大的作用；另一方面可以采用价格较低的不同种类的复合材料，如高性能的无机复合材料等。总之要通过合理的材料设计和结构设计，使结构即满足使用要求，又尽量降低成本，达到最佳的性能/价格比。

(3) 防火问题 一般用于制造复合材料的热固性树脂遇火后易燃烧，因此用于复合材料建筑结构时需要提高材料的氧指数，使之具有阻燃性或自熄性。在防火性能要求较高的场合，宜采用完全不燃烧的无机复合材料。

(4) 耐久性问题 复合材料的老化及耐久性问题是常被人们关注的。在有腐蚀性介质的环境下，如化工建筑、港口建筑等，复合材料建筑结构的耐久性要比钢结构、钢筋混凝土结构好。对一般建筑物来说，通常要求耐久50年以上，如果预先对复合材料进行防老化处理，平时也加强维护，复合材料建筑结构能够满足耐久性的要求。从复合材料的实际使用情况来看，国内一些复合材料结构已经有了40余年的老化经历，现仍完好；在国外，地下埋设的复合材料管道已经使用了50年。

参 考 文 献

- 1 沃丁柱等. 复合材料大全. 北京: 化学工业出版社, 2000
- 2 刘雄亚等. 玻璃钢应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990
- 3 刘雄亚, 晏石林. 复合材料制品设计及应用. 北京: 化学工业出版社, 2003
- 4 毕鸿章, 武田邦男. 土木建筑领域中的纤维增强复合材料. 高科技纤维与应用, 1999, 3
- 5 陈博. 世纪之交中国玻璃钢工业——中国玻璃钢工业现状与发展方向. 广东省复合材料学会第十一届年会科技交流文集. 2001