

复合纤维筋混凝土结构 —— 设计与施工 ——

FUHE XIANWEIJIN HUNNINGTU JIEGOU
SHEJI YU SHIGONG

江世永 飞 渭 李炳宏 著

中国建筑工程出版社

复合纤维筋混凝土结构 设计与施工

江世永 飞 渭 李炳宏 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

复合纤维筋混凝土结构设计与施工/江世永, 飞渭, 李炳宏著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 6
ISBN 978-7-112-20405-2

I. ①复… II. ①江… ②飞… ③李… III. ①复合纤维-纤维增强混凝土-混凝土结构-结构设计②复合纤维-纤维增强混凝土-混凝土施工 IV. ①TU377.9 ②TU755

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 027457 号

纤维增强复合材料是由多股连续纤维与基体进行胶合后, 通过特殊模具热合加工而成的高性能新型复合材料。本书先简要介绍了纤维增强复合材料及其在土木工程中的应用; 主体部分详细介绍了作者对复合纤维筋混凝土结构的研究, 包括 FRP 筋材料性能及预应力锚具性能试验研究、复合纤维筋粘结性能研究、BFRP 筋混凝土简支梁受弯性能的研究、预应力 BFRP 筋混凝土梁受弯性能研究、BFRP 连续螺旋箍筋混凝土梁受剪性能试验研究、全 CFRP 筋预应力混凝土 T 形截面梁抗弯性能研究; 最后介绍了纤维筋混凝土结构在工程中的应用案例。

本书适合从事纤维增强复合材料研究及应用的人员学习参考。

责任编辑: 李天虹

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐 党 蕾

复合纤维筋混凝土结构设计与施工

江世永 飞 渭 李炳宏 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京君升印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18 $\frac{3}{4}$ 字数: 466 千字

2017 年 6 月第一版 2017 年 6 月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-20405-2

(29956)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

《复合纤维筋混凝土结构设计与施工》编委会

主 编：江世永

副主编：飞 渭 李炳宏

编 委：江世永 飞 渭 李炳宏 石钱华 何 康

陈 进 张 力 李迎涛 周俊龙 张 鹏

叶 泳 楚 玺 姚未来 李雪阳 吴世娟

陶 帅 蔡 涛 刘毅烽 刘 军

序言

纤维增强复合材料 (Fiber Reinforced Polymers/Plastics, 简称 FRP), 是由多股连续纤维与基体 (聚酰胺树脂、聚乙烯树脂、环氧树脂等) 进行胶合后, 通过特殊模具热合加工而成的高性能新型复合材料。这种材料具有轻质、高强、耐蚀、耐久、无磁、非导电等诸多优良性能, 自 20 世纪 40 年代问世以来, 在航空、航天、船舶、汽车、医学和机械等领域得到了广泛应用。FRP 优良的材料性能也受到工程界的广泛关注, 对于传统建筑材料受到限制的领域, FRP 有着很大的优势, 如地磁观测站、变电站基础、机场跑道、医院核磁共振室等要求无电磁干扰的环境, 以及海工建筑、化工厂等对耐久性和耐腐蚀具有较高要求的环境。近年来, 纤维增强复合材料价格不断降低, 也在一定程度上促进了其应用推广。

20 世纪 80 年代以来, FRP 在土木工程中的研究与应用进入快速发展期。西方发达国家大力开展 FRP 的力学特性、加工工艺和结构性能研究, 在试验、理论及实践领域均取得丰硕的成果, 并且纷纷制定了相应的设计建议或指南, 抢占了该领域的制高点。如美国混凝土协会 440 委员会 (American Concrete Institute Committee 440, ACI Committee 440)、日本土木工程师学会 (Japanese Society of Civil Engineers, JSCE)、加拿大标准协会 (Canadian Standards Association, CSA)、欧洲国际混凝土委员会 (Euro-international Committee for Concrete, CEB) 等都开展了大量的研究工作, 制定了若干有关 FRP 的报告、建议、指南、细则等规范性文件, 并且根据最新研究成果每年都进行修订和更新。仅美国混凝土协会 440 委员会所颁布的与 FRP 有关的规范性文件就多达十几项, 内容覆盖 FRP 材料性能测试、FRP 加固或增强混凝土结构的设计与施工建造等方面。得益于扎实的基础研究, 目前, 西方发达国家已形成比较成熟的 FRP 产业链条, FRP 在实际工程中的应用领域日趋广泛, 除了传统的道路、桥梁、隧道和一些特殊工程领域, 也在向智能建筑、可持续性建筑等创新领域拓展。

国内从 20 世纪 90 年代中后期开始对 FRP 材料及其在土木工程中的应用开展研究, 与国外相比起步较晚, 差距较大。近年来, FRP 的相关研究如雨后春笋般大量开展, 随着国内有关院校、科研院所以及生产厂家的持续研究和探索, 纤维片材在加固和修复既有钢筋混凝土结构中的应用已经比较成熟, 并作为一种新型结构加固技术进行推广, 制定了相应的技术规程——《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》CECS 146: 2003 (2007 版)。而纤维筋增强混凝土结构的研究仍处于试验研究阶段, 虽然已有实际工程应用, 但数量较少, 有关技术规范也尚未制定。总体说来, 虽然各方面的研究尚未形成合力, 但是积累了丰富的研究经验, 取得了大量的基础资料和研究成果, 为今后的发展打下了良好的基础。

作者于国内较早地开展了 FRP 的相关应用研究, 自 1998 年从零开始不断拓展研究的深度与广度, 主要成果有: CFRP 布加固钢筋混凝土梁受弯性能研究 (1998~2001 年),

预应力 CFRP 布加固钢筋混凝土梁受弯性能研究 (2002~2005 年), AFRP 筋混凝土粘结性能研究 (2006~2007 年), AFRP 筋高强混凝土梁受弯性能研究及 ANSYS 有限元模拟分析 (2006~2007 年), BFRP 筋混凝土粘结性能研究 (2007~2008 年), BFRP 筋混凝土梁受弯性能研究 (2007~2008 年), 有粘结预应力 BFRP 筋混凝土梁受弯性能研究 (2008~2009 年), 无粘结预应力 BFRP 筋混凝土梁受弯性能研究 (2008~2009 年), BFRP 连续螺旋箍筋混凝土梁受剪性能研究 (2009~2011 年), 全无磁、耐腐蚀预应力 CFRP 筋混凝土矩形和 T 形梁受弯性能研究 (2011~2013 年), CFRP 筋混凝土转换梁缩尺模型研究 (2011~2013 年), 配置 CFRP 纵筋和 CFRP 箍筋的混凝土柱在低周反复荷载作用下的受力性能研究 (2013~2015 年)。

通过十多年的努力,建立了一套复合纤维筋混凝土结构设计与施工方法,提出了试验研究—理论分析—设计—施工的科学工作流程与方法;完成了材料—构件—结构的体系化研究,积累了丰富的第一手资料;编制了 3 部指南,即 FRP 筋测试方法指南,FRP 筋混凝土梁抗弯抗剪设计指南,FRP 筋混凝土结构施工指南;在国内较早地实现了 FRP 的实际工程应用,通过 FRP 筋增强混凝土结构地磁观测站的建设,为后续研究提供了有力支撑。

应该指出,FRP 的出现,并不是为了取代现有的材料、技术和结构,而是作为现有建筑体系的一个有效补充和重要组成部分,解决长期困扰土木工程界的一些棘手问题,如钢筋锈蚀、电磁干扰、腐蚀性介质侵蚀等。展望未来,为促进国内 FRP 研究应用的繁荣兴旺,我们认为需要从以下几方面进行努力:

一是尽快制定 FRP 的生产标准和技术规范。由于没有统一的行业规范或标准,国内生产的 FRP 技术规格众多,材料加工工艺质量参差不齐,材料性能指标离散性大,不利于应用。

二是加强统筹协调。需要打破各自为政的局面,使各方面的研究形成合力,避免重复研究,提高研究效率。

三是在国家层面上制定 FRP 研究与应用的科学规划,使 FRP 的相关研究上升为国家战略。为此,需要大力开展 FRP 的体系化研究,打破西方发达国家的技术封锁,掌握完全自主知识产权。该领域研究的经验教训表明,依靠从国外直接输入 FRP 研究的先进技术无异于天方夜谭,只能靠自力更生,扎实开展基础研究。

四是大力倡导合作研究。FRP 的开创性研究离不开高校(科研院所)和企业的密切配合,而这必然涉及需要公开一些研究资料与数据。因此,需要建立企业—科研院所—政府部门三者之间的合作关系,从而便于研究的开展,避免竞争因素的阻碍。其中,高校(科研院所)与企业之间的深入合作又是重中之重,应该给予足够的优先考虑,并且也最富有成效。

五是在高等教育中赋予 FRP 一席之地。目前,高校所开设的土木工程课程中很少涉及有关 FRP 的教学内容,应通过开展相关学术活动,使 FRP 的有关知识进入大学课堂,并将高校的技术力量吸收到 FRP 的课题研究中来。

六是加强 FRP 技术的推广与宣传。尽管 FRP 在土木工程中的应用越来越广泛,但是非专业工程师对这种新兴技术仍然缺乏足够理解。例如,在 2004 年巴黎戴高乐机场航站楼的顶棚垮塌事故中,一些非专业工程师首先就对结构中所采用的 FRP 系统提出质疑,

而事实证明该垮塌事故与 FRP 系统毫无关联。因此，应加强这种新技术的推广与宣传，消除人们对新事物的疑虑，进一步扩充 FRP 在土木工程中应用的知识基础。

本书由江世永教授牵头负责、统筹规划，课题组成员分工合作，经过若干次讨论、修改，历时 2 年左右完成。本书的面世，得到了东南大学、玄武岩纤维生产及应用技术国家地方联合工程研究中心、江苏绿材谷新材料科技发展有限公司、四川帕沃可矿物纤维制品有限公司、四川拜赛特高新科技有限公司等单位的大力支持，得到重庆市高校优秀成果转化资助项目“纤维复合筋在土木工程中的应用”（KJZH14220）的资助，在此表示衷心感谢。

期望本书的面世，能够在同行之中起到良好的交流作用，由于时间仓促，书中错漏之处难免，恳请各位专家、教授、同行批评指正。

目录

1 绪论	1
1.1 纤维增强复合材料	1
1.1.1 纤维与树脂	1
1.1.2 纤维增强复合材料的常见类型	1
1.1.3 纤维复合增强筋的特性	5
1.2 FRP 筋在土木工程中的应用	7
1.2.1 纤维增强塑料筋在土木工程中的应用背景	7
1.2.2 FRP 筋混凝土结构研究现状	10
2 FRP 筋材料性能及预应力锚具性能试验研究	14
2.1 引言	14
2.2 FRP 筋锚具选用	14
2.3 复合纤维筋力学性能试验方案	15
2.4 试验结果分析	16
2.4.1 FRP 筋拉伸试验破坏模式	16
2.4.2 FRP 筋的材料性能指标	17
3 复合纤维筋粘结性能研究	20
3.1 引言	20
3.2 玄武岩纤维增强塑料 (BFRP) 筋粘结锚固性能试验研究	20
3.2.1 玄武岩纤维增强塑料筋粘结锚固性能的拉拔试验	20
3.2.2 玄武岩纤维增强塑料筋粘结锚固性能的梁式试验	22
3.2.3 试验现象分析	25
3.3 玄武岩纤维增强塑料 (BFRP) 筋粘结机理分析	32
3.3.1 粘结机理分析	32
3.3.2 玄武岩纤维增强塑料筋的粘结性能及其影响因素	34
3.4 玄武岩纤维增强塑料 (BFRP) 筋与混凝土粘结锚固的 τ - s 本构关系及数值 分析结果	38
3.4.1 玄武岩纤维增强塑料 (BFRP) 筋 τ - s 本构关系	38
3.4.2 粘结锚固的基本方程	39
3.4.3 玄武岩纤维增强塑料 (BFRP) 筋端锚固问题的数值分析	41
3.5 玄武岩纤维增强塑料 (BFRP) 筋锚固长度的计算	43

3.5.1	纤维聚合物筋与混凝土粘结计算的基本公式	43
3.5.2	基本锚固长度的计算	46
4	BFRP 筋混凝土简支梁受弯性能的研究	48
4.1	引言	48
4.2	BFRP 筋混凝土简支梁受弯性能的试验研究	48
4.2.1	简支梁试验方案	48
4.2.2	试验梁制作及所用材料性能	51
4.2.3	简支梁试验结果分析	51
4.3	理论分析	58
4.3.1	基本假定及材料本构关系	58
4.3.2	BFRP 筋混凝土梁的破坏模式	59
4.3.3	BFRP 筋混凝土梁的正截面极限抗弯承载力分析	60
4.3.4	BFRP 筋混凝土梁的开裂弯矩	63
4.3.5	BFRP 筋混凝土梁的挠度分析	64
4.3.6	BFRP 筋混凝土梁的最大裂缝宽度	66
4.3.7	基于正常使用功能的 BFRP 筋混凝土梁的配筋率限制	67
4.4	非线性有限元分析	69
4.4.1	基本假定及材料本构关系	70
4.4.2	截面分层	70
4.4.3	弯矩-曲率求解	71
4.4.4	荷载-挠度求解	74
4.5	对比分析	75
4.5.1	理论计算结果与试验结果的比较	75
4.5.2	BFRP 筋混凝土梁和钢筋混凝土梁的对比分析	78
5	预应力 BFRP 筋混凝土梁受弯性能研究	82
5.1	引言	82
5.2	试验梁的设计、测试方案及预应力梁的制作	82
5.2.1	试验研究的原则	82
5.2.2	试验梁所用材料性能	82
5.2.3	试验梁的设计	84
5.2.4	试验梁的加载及测试方案	86
5.2.5	预应力玄武岩纤维筋的张拉与试验梁的制作	88
5.3	试验结果分析	90
5.3.1	试验梁概况	90
5.3.2	平截面假定	96
5.3.3	梁顶混凝土压应变变化	98
5.3.4	特征荷载值	100

5.3.5	反拱及张拉伸长量	101
5.3.6	荷载-挠度曲线	103
5.3.7	裂缝性能试验研究	106
5.4	理论分析	109
5.4.1	材料本构关系	109
5.4.2	基本假定	110
5.4.3	BFRP 筋有粘结预应力混凝土梁正截面受弯承载力	110
5.4.4	BFRP 筋无粘结预应力混凝土梁正截面受弯承载力	115
5.4.5	挠度计算与控制	122
5.4.6	裂缝性能	129
5.4.7	预应力损失	135
6	BFRP 连续螺旋箍筋混凝土梁受剪性能试验研究	141
6.1	BFRP 连续螺旋箍筋材料性能试验研究	141
6.1.1	L 形和 U 形试件的设计	141
6.1.2	试验方案	143
6.1.3	试验结果分析	144
6.2	BFRP 连续螺旋箍筋混凝土梁受剪性能试验研究	145
6.2.1	实验方案	145
6.2.2	试验结果分析	151
6.2.3	受剪性能试验小结	161
6.3	抗剪分析模型	162
6.3.1	受剪破坏模式	162
6.3.2	抗剪分析模型简介	162
6.3.3	混凝土抗压强度的软化	164
6.3.4	软化桁架模型简介	166
6.3.5	有效横向压应力	168
6.3.6	软化桁架模型的修正	169
6.3.7	修正转动角软化桁架模型	170
6.3.8	修正固定角软化桁架模型	175
6.3.9	拉-压杆模型	179
6.3.10	抗剪分析模型小结	191
6.4	抗剪承载力公式	192
6.4.1	现有公式简介	192
6.4.2	基于桁架-拱模型的公式	194
6.5	受剪性能参数分析	199
6.5.1	有效横向压应力对抗剪承载力的影响	199
6.5.2	剪跨比对受剪承载力的影响	200
6.5.3	配箍率对抗剪承载力的影响	200

6.5.4	混凝土强度对受剪承载力的影响	201
6.5.5	纵筋率对受剪承载力的影响	201
6.6	抗剪模型和公式计算结果的比较	202
6.6.1	抗剪分析模型	202
6.6.2	受剪承载力公式	203
6.6.3	各种模型和公式计算结果的比较	206
7	全 CFRP 筋预应力混凝土 T 形截面梁抗弯性能研究	208
7.1	引言	208
7.2	全 CFRP 筋预应力混凝土 T 形截面梁抗弯性能试验	208
7.2.1	试验方案	208
7.2.2	试验梁所用材料性能	209
7.2.3	试验梁的设计	209
7.2.4	试验梁的加载及测试方案	211
7.2.5	试验梁的制作	214
7.3	受弯构件试验结果及分析	216
7.3.1	试验情况	216
7.3.2	截面变形	218
7.3.3	梁顶混凝土压应变	220
7.3.4	特征荷载值	220
7.3.5	荷载-挠度关系	221
7.3.6	裂缝开展	223
7.3.7	受拉区纵筋应变	225
7.4	理论分析与数值模拟	226
7.4.1	基本假定与本构关系	226
7.4.2	抗弯承载力计算	228
7.4.3	挠度计算	233
7.4.4	裂缝性能	235
7.4.5	数值模拟	237
8	纤维钢筋混凝土结构在工程中的应用案例	242
8.1	地磁观测站特点	242
8.2	地磁观测站设计及施工	243
8.2.1	工程概况	243
8.2.2	结构形式及材料选择	243
8.2.3	地磁观测站设计要点	244
8.2.4	地磁观测站施工要点	244
8.3	小结	246

附录 1 FRP 筋测试方法指南	247
附录 2 FRP 筋混凝土梁抗弯抗剪设计指南	258
附录 3 FRP 筋混凝土结构施工指南	272
参考文献	277

1 绪 论

1.1 纤维增强复合材料

纤维增强复合材料 (Fiber Reinforced Polymer/Plastic, 简称 FRP), 是由多股连续纤维与基底进行胶合后, 通过特殊模具热合加工而成的高性能新型复合材料。材料可塑性强, 类型多种多样, 常见的有片材、筋材、格栅、拉挤型材和压模型材等。这种材料自 20 世纪 40 年代问世以来, 在航空、航天、船舶、汽车、医学和机械等领域得到了广泛应用。纤维增强复合材料以其轻质、高强、耐久的优良性能, 受到工程界的广泛关注, 开始在土木工程中得到应用。近年来, 纤维增强复合材料价格不断降低, 也在一定程度上促进了 FRP 材料的应用推广。

1.1.1 纤维与树脂

纤维增强复合材料, 即 FRP 材料是由纤维与基底树脂复合而成。FRP 材料性能与纤维及树脂的强度密切相关, 且与钢材和混凝土等传统结构材料有很大的不同, 其制品形式也多种多样。纤维是 FRP 材料中的主要受力材料, 可分为长纤维和短纤维, 其中纤维起增强作用, 类型主要有玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维、玄武岩纤维等, 工程结构中使用的 FRP 以长纤维为主, 如图 1.1.1 所示。表 1.1.1 列出了常用纤维与钢、铝的主要力学性能的比较。

常用纤维的轴向力学性能指标

表 1.1.1

类	型	抗拉强度(MPa)	弹性模量(GPa)	极限伸长率(%)
碳纤维	高强型	3500~4800	214~235	1.4~2.0
	超高强型	3500~6000	214~235	1.5~2.3
	高模型	2500~3100	350~500	0.5~0.9
	超高模型	2100~2400	500~700	0.2~0.4
玻璃纤维	E 型	1900~3000	70	3.0~4.5
	S 型	3500~4800	85~90	4.5~5.5
芳纶纤维	低模型	3500~4100	70~80	4.3~5.0
	高模型	3500~4000	115~130	2.3~3.5
玄武岩纤维		3450~4900	88~91	1.5~3.2
钢	普通钢筋	420	206	18
	高强钢绞线	1860	200	3.5
铝		630	74	3.0

树脂基体的作用主要是将纤维粘接在一起, 使纤维受力均匀, 并形成所需要的制品或构件形状。表 1.1.2 中列出了一些常用树脂基体的性能指标。

1.1.2 纤维增强复合材料的常见类型

在结构工程中, 应用的纤维增强复合材料常见的形式类型主要有: 片材 (纤维布和纤

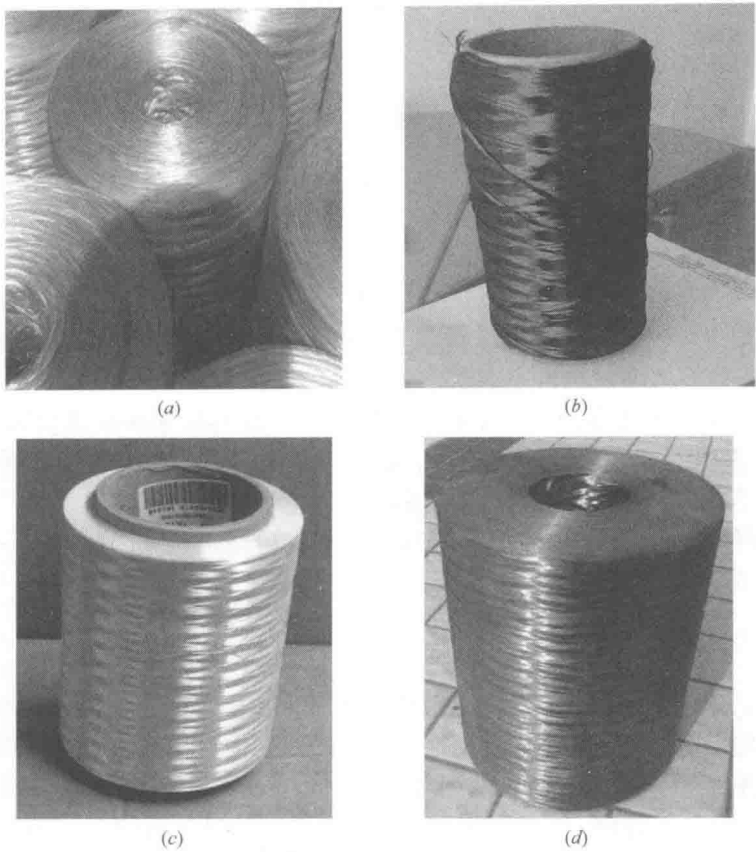


图 1.1.1 常用纤维
(a) 玻璃纤维；(b) 碳纤维；(c) 芳纶纤维；(d) 玄武岩纤维

常用树脂基体的力学性能指标 表 1.1.2

类型	热变形温度(℃)	拉伸强度(MPa)	延伸率(%)	压缩强度(MPa)	弯曲强度(MPa)	弯曲模量(GPa)
环氧树脂	50~121	98~210	4	210~260	140~210	2.1
不饱和聚酯树脂	80~180	42~91	5	91~250	59~162	2.1~4.2
乙烯基树脂	137~155	59~85	2.1~4	—	112~139	3.8~4.1
酚醛树脂	120~151	45~70	0.4~0.8	154~252	59~84	5.6~12

维板)、筋材和索材、网格材和格栅、拉挤型材、缠绕型材、模压型材等。FRP 材料的力学性能对制备工艺的依赖性很强，因此在 FRP 结构的设计中必须考虑制备工艺。不同制备工艺得到的产品形式也有较大的差别。

纤维布是目前应用最为广泛的形式，如图 1.1.2 所示。它由连续的长纤维编织而成，通常是单向纤维布，使用前不浸润树脂。纤维布主要应用于结构工程加固，用树脂浸润后粘贴于结构表面。FRP 板是将纤维在工厂中经过层铺、浸润树脂、固化预制成型，施工中将其粘贴或机械锚固于结构表面。纤维布一般只能承受单向拉伸，FRP 板可以承受纤维方向上的拉和压，它们在垂直纤维方向上强度和弹性模量均很低。

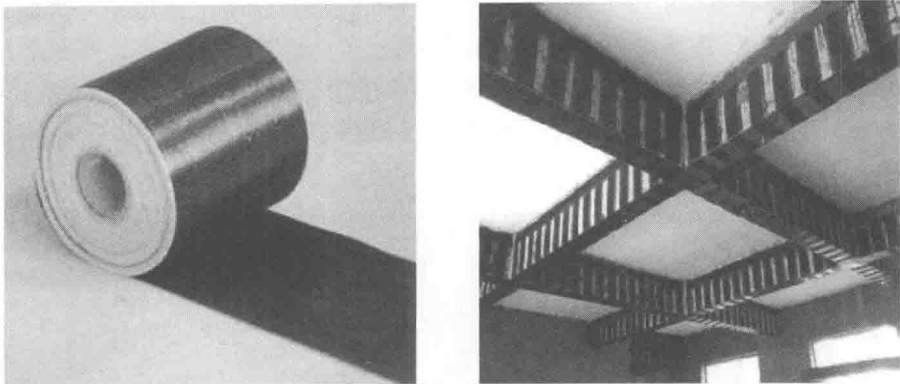


图 1.1.2 纤维布

FRP 筋是采用单向成型工艺（如拉挤），将单向长纤维与树脂混合成型为棒材，可对其表面进行处理，以增强其与混凝土的粘结，如图 1.1.3 所示。FRP 索是将连续的长纤维单向编织，再用少量树脂浸润固化或不用树脂固化而制成的绳索状 FRP 制品。FRP 筋材和索材可在钢筋混凝土结构中代替钢筋和预应力筋，还可用于大跨索支撑结构、张拉结构和悬索结构。

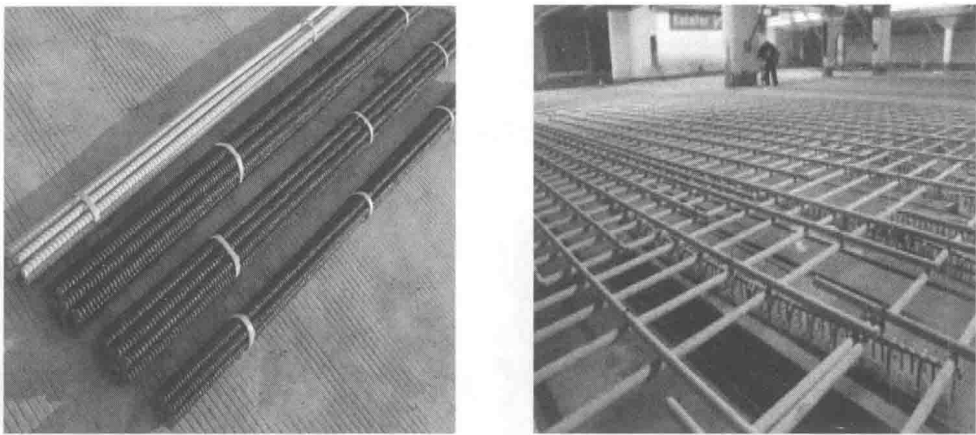


图 1.1.3 FRP 筋

将长纤维束按照一定的间距相互垂直交叉编织，再用树脂浸润固化可形成 FRP 网格或 FRP 格栅，如图 1.1.4 所示。FRP 网格材料可替代钢筋网片，三维的 FRP 网笼可替代钢筋笼。FRP 格栅则可直接用于结构中作为楼面或制成夹心板等构件。

拉挤型材是将纤维束或纤维织物通过纱架连续喂入，经过树脂胶槽将纤维浸渍，再穿过热成型模具后进入拉引机

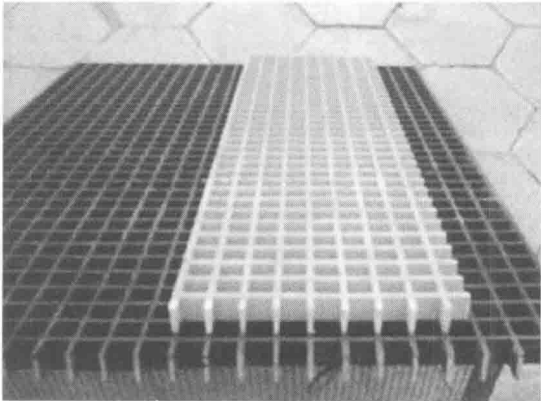


图 1.1.4 FRP 格栅

构，按此流程可制成连续的 FRP 制品，如图 1.1.5 所示。拉挤工艺可生产出截面形状复杂的连续型材。由于拉挤型材中纤维主要沿轴向分布，且纤维含量高，有很好的受力性能，可直接作为受力构件，也可以与其他材料组合受力。但拉挤型材的横向强度和剪切强度较低，一般在拉挤成型工艺中均需同时复合一定数量的毡，并且在应用中也需给予重视。

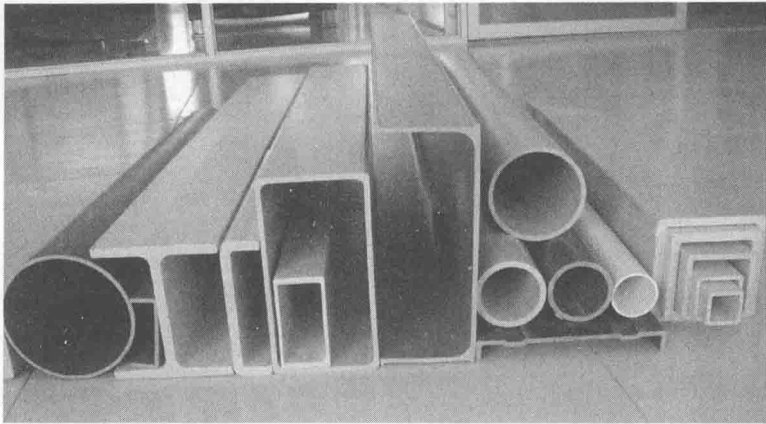
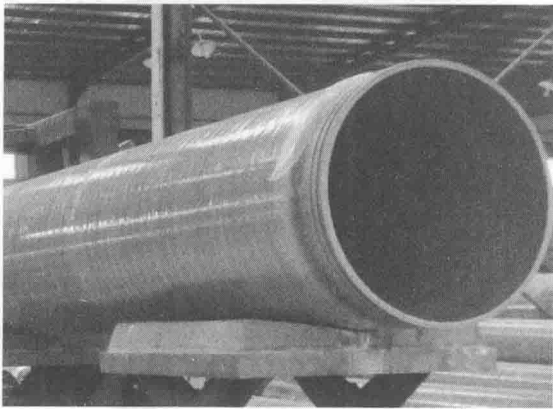


图 1.1.5 FRP 拉挤型材

FRP 缠绕型材是将连续纤维束或纤维织物浸渍树脂后，按照一定的规律缠绕到芯模（或衬胆）表面，再经过固化形成以环向纤维为主的型材，常见形式有管、罐、球等，如图 1.1.6 所示。缠绕型材也可获得较高的纤维含量，力学性能较好，可承受很大的内压，已广泛用于压力容器、管道。



(a)



(b)

图 1.1.6 FRP 缠绕型材

(a) FRP 管；(b) FRP 罐

模压型材是将预浸树脂的纤维或织物放入模具中进行加温加压固化成型制成的 FRP 型材，如图 1.1.7 所示。可采用长纤维，也可以是短纤维或纤维织物。这种工艺生产出的型材尺寸准确、表面光洁、质量稳定，但通常纤维含量较低，力学性能较差。

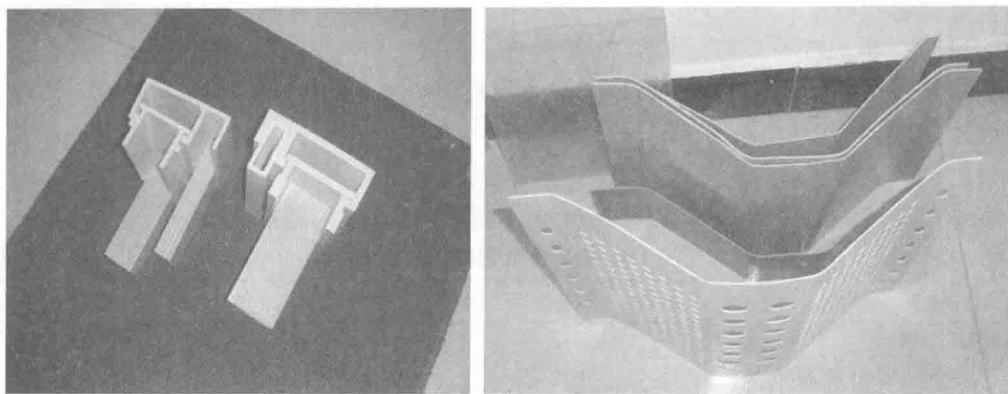


图 1.1.7 FRP 模压型材

1.1.3 纤维复合增强筋的特性

纤维增强复合筋（即 FRP 筋）是纤维增强复合材料中比较常见的一种形式，由于其连续纤维的化学成分的不同，常见的纤维增强复合筋有以下几种类型：CFRP 筋（Carbon Fiber Reinforced Plastic bar，即碳纤维增强塑料筋），AFRP 筋（Aramid Fiber Reinforced Plastic bar，即芳纶纤维增强塑料筋），GFRP 筋（Glass Fiber Reinforced Plastic bar，即

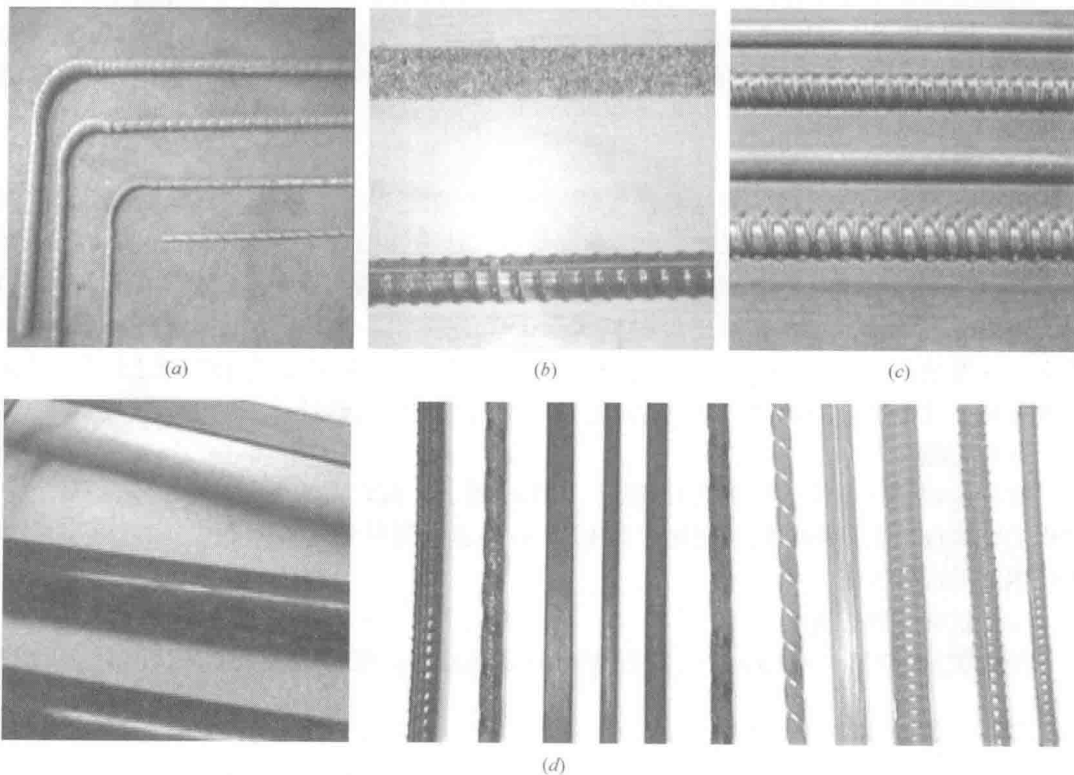


图 1.1.8 常见的 FRP 筋类型

(a) GFRP 筋；(b) CFRP 筋；(c) AFRP 筋；(d) BFRP 筋