

复合材料在建筑加固、 修复中的应用

岳清瑞 杨勇新 编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料在建筑加固、修复中的应用/岳清瑞, 杨勇新
编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 11

ISBN 7-5025-7967-2

I. 复… II. ①岳…②杨… III. 复合材料: 建筑材料-应用-建筑物-加固 IV. TU746.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 145973 号

复合材料在建筑加固、修复中的应用

岳清瑞 杨勇新 编著

责任编辑: 王苏平

文字编辑: 林 丹

责任校对: 李 林

封面设计: 潘 虹

*

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
化学工业出版社印刷厂印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 9 $\frac{1}{4}$ 字数 216 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7967-2

定 价: 28.00 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

前 言

纤维增强复合材料 (fiber reinforced polymer/plastic, 简称 FRP) 应用于建筑工程是近年来国际上土木工程与高性能材料工程相结合而发展起来的一种新技术。纤维增强复合材料与传统建材 (如钢材、混凝土、砌体等) 相比, 在特殊环境下具有很大的特点和优势, 因此, 这种工程应用在很短的时间里推进建筑工程领域和复合材料领域结合形成了一个新的产业方向, 得到了国家的大力支持, 受到建筑界、材料界以及高校、科研院所的广泛重视, 取得了大批的研究与应用成果。

作者在承担国家“九五”重点科技攻关课题“碳纤维材料加固混凝土结构材料开发研究与应用”、“十五”863 计划项目“高性能低成本复合材料在现代土木工程中应用的关键技术与材料研究开发”、“十五”国家自然科学基金重点项目“高性能纤维增强复合材料在土木工程中应用的基础研究”的研究过程中, 对 FRP 应用于建筑工程的材料与技术形成了较全面的认识, 通过主持编制国家规范《高性能纤维复合材料应用技术规范》、中国工程建设标准化协会标准《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS 146: 2003)、行业标准《结构加固修复用碳纤维片材产品标准》

及《结构加固修复用粘贴树脂产品标准》等标准规范工作，掌握了 FRP 性能及其应用技术的特点。本书的目的是将目前已经成熟的或可以推广使用的 FRP 技术介绍给同行，为共同推进 FRP 及其技术在建筑领域的发展做出努力。

本书主要介绍 FRP 加固结构技术所涉及到的高性能纤维增强复合材料的种类及其特殊的性能；FRP 加固修复混凝土结构、钢结构、砌体结构的技术方法，其中专门介绍了预应力碳纤维布加固混凝土结构技术和嵌入式加固技术这两种在国内还很少应用的技术方法；FRP 加固修复结构的技术经济评价等。

实际上，FRP 在建筑工程中除了用于结构加固修复以外，在新建结构及特殊结构中也可以作为主要建筑材料使用，这方面的研究与技术方法也应该在本书中加以论述，但由于技术的发展变化十分迅速，在没有达到形成共识的情况下，我们只能十分遗憾地放弃了，希望在今后有机会把这方面的内容介绍给各位同行。

本书可以供从事 FRP 及其加固修复建筑结构方面应用技术的工程技术人员、学生等参考。

限于编著者的经验和水平，不当之处在所难免，请各位读者批评指正。

编著者

2005 年 7 月

目 录

第一章 概述	1
第一节 发展历史	1
第二节 建筑工程用纤维增强复合材料	4
一、材料性质	4
二、产品形式及分类	6
第三节 应用领域与应用方式	10
一、应用领域	12
二、应用方式	13
第四节 发展方向与前景	15
一、发展方向	16
二、发展前景	18
第二章 建筑工程用纤维增强复合材料	21
第一节 建筑工程用纤维和基体树脂	21
一、增强材料的种类	21
二、基体材料（树脂）的种类	31
第二节 建筑工程用 FRP	49
一、纤维织物	49
二、纤维增强复合材料板	65
三、纤维增强复合材料筋	67

四、纤维增强复合材料网格	78
五、纤维增强复合材料型材 (FRP 型材)	79
六、FRP 纤维混凝土	81
第三节 结构加固补强修复工程用粘接材料	81
第四节 建筑结构用 FRP 的性能要求	84
一、国内外规范、规程对 FRP 性能规定以及 FRP 与传统建材的区别	84
二、建筑工程对 FRP 的性能要求和产品质量保证 措施	86
第三章 纤维增强复合材料在工程结构加固修复中的 应用	93
第一节 加固混凝土结构技术	93
一、常用加固方法	94
二、加固混凝土结构设计方法	106
三、施工方法	135
四、工程实例	142
第二节 加固钢结构技术	149
一、研究状况	151
二、设计方法	162
三、FRP 加固钢结构技术的特点	167
四、施工方法	175
五、工程实例	177
第三节 加固其他结构技术	185
一、纤维增强复合材料加固砌体结构	185
二、纤维增强复合材料加固木结构	192
第四章 纤维增强复合材料片材加固修复结构的 技术经济评价	195

第一节 技术性能评价分析	195
一、材料性能	196
二、材料成本	200
三、施工成本	201
四、维护成本	202
五、性价比分析	203
第二节 加固技术的比较性评价	204
一、碳纤维布加固法与粘钢加固法、加大断面加固法的 定性比较	204
二、预应力碳纤维布加固技术同普通碳纤维布加固技术 比较	208
三、三种加固方法的定量比较	209
参考文献	213
附录 结构工程用纤维增强复合材料性能检测方法	233

第一章

概 述

第一节 发展历史

纤维增强复合材料 (fiber reinforced plastic/polymer, 简称 FRP) 是航空、航天、国防等高科技领域的关键材料, 广泛地应用于航天飞机、军舰、潜艇等军事装备上。20 世纪下半叶, 随着复合材料制造成本的降低, 高性能复合材料逐渐被其他工业领域所采用, 其中, 在各类工业与民用建筑工程、桥梁工程、海港工程、地下工程以及储液罐、管道、烟囱等特种结构之中应用的数量不断增长, 形成了新的产业, 在许多国家的基础设施建设中得到了很大的发展。据不完全统计, 目前 FRP 在基础设施工程中的应用占复合材料的 30% 左右, 已经成为复合材料产业的一个重要市场。

在建筑工程中 FRP 的研究与应用是 20 世纪 70 年代末期开始的。1981 年, 瑞典联邦实验室的 Meier 最早采用粘贴碳纤维复合材料 (CFRP) 加固了 Ebach 桥, 被认为是 FRP 在建筑工程中应用的开始, 随后, 世界各国尤其是美国、日本以

及欧洲许多国家的高等学校、科研机构 and 材料生产厂家在 FRP 及其在基本建设应用技术方面投入了许多研究力量，对此开展了广泛深入的研究。研究表明，FRP（特别是 CFRP）加固技术效果明显、施工效率很高。FRP 与制品可以应用于有特殊要求的结构物，尤其是对耐腐蚀有较高要求的结构物。

在对美国旧金山地震、洛杉矶地震和日本阪神地震中被损坏建筑结构的修复加固中，FRP 加固技术的优越性得到很好的验证。尤其在日本 1995 年阪神地震后，采用 CFRP 布对受损高速公路桥墩柱的快速加固，使交通运输很快得到恢复，为抗震救灾和震后恢复重建工作赢得了时间，同时也奠定了 FRP 在土木工程领域应用的基础，受到工程界的广泛重视。

日本是世界上编制 FRP 规程最早的国家之一，1999 年 3 月日本土木学会成立了 FRP 加固委员会，并完成了使用 FRP 片材的混凝土维修、加固的草案，编制了世界上第一个 FRP 加筋混凝土和预应力混凝土结构设计指南，1996 年完成了 FRP 的设计与施工指南，并建立了比较完善的规程体系。在欧洲，近年来 FRP 加固技术已被瑞士、法国和德国等许多国家推广。到目前为止，世界上已经有了许多 FRP 应用于结构工程加固和建设的有关标准规范。加拿大于 1998 年制定了《加拿大公路桥梁设计规范（CHBDC）》。美国 ACI440 委员会于 1999 年推出了有关设计规程（草案），提出了诸如材料的选择、计算方法、施工方法等方面的规定，针对 FRP 加固混凝土与普通钢筋混凝土的区别提出了值得注意的问题，并做出了相应的规定和建议。欧洲也正在制定统一的 FRP 配筋设计指南。1991 年美国混凝土协会成立了 ACI440 委员会，负责开展纤维增强复合材料加固结构的研究；ACI423 委员会负责开展

纤维增强复合材料的研究。1993 年 ACI 在加拿大主办了第一届国际 FRP 专题会议，此后每两年举办一次，成为国际上一个具有极强吸引力的新的专题会议。加拿大也于 20 世纪 90 年代制订了相应的碳纤维加固规程。2003 年，该领域一个新的国际学术团体——国际土木工程 FRP 学会（international institute for FRP in construction）成立并开展了相关的学术活动。国际上有关 FRP 及其工程应用的研究与实践活动日趋活跃，形成了研究、开发、应用的产业链，在古老的土木建筑工程界开发出一个新的、充满活力的新领域。

我国对于 FRP 及其在建筑领域应用技术的研究起步较晚，但在 FRP 加固修复建筑结构技术方面的研究和应用与其他国家的发展基本同步。我国从 1997 年开始系统研究碳纤维片材加固混凝土结构技术，并开始进行相关试验研究，1998 年开始结构加固工程应用，国家对此技术开发给予了高度的重视，先后通过“九五”国家重点科技攻关课题，“十五”国家 863 计划课题、国家自然科学基金重点课题等予以资助，同时，各级政府也以攻关、基金、横向联合开发项目等形式给予大力支持，在很短的时间内形成了研究和工程应用的热点。目前国内已有数十所高校和科研院所先后开展了 FRP 技术的研究与应用工作，在 FRP 开发、FRP 加固结构技术和设计计算理论等方面，取得一批接近国际先进水平的研究成果，同时已完成 FRP 加固工程数百项。

为了扩大技术交流、提高技术水平，中国土木工程学会于 2000 年 6 月在其混凝土及预应力混凝土分会下成立了“纤维增强塑料（FRP）及工程应用专业委员会”，同时在北京召开了第一届“中国纤维增强塑料（FRP）混凝土结构学术交流会”，并在此后每两年举办一次，成为我国在该技术领域的主导专题会议。

概

述

随着碳纤维片材加固混凝土结构技术在我国研究和应用的迅速开展,由“国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心”主持编制的中国工程建设标准化协会标准《碳纤维布加固修复混凝土结构技术规程》已于2003年5月出版执行,这是我国FRP在建筑工程应用的第一部国家标准。随后,国家建设部标准《结构加固修复用碳纤维片材》JG/T 167—2004、《结构加固修复用粘贴树脂产品标准》已于2005年批准执行,国家标准《高性能纤维复合材料应用技术规范》、建设部行业标准《结构加固用玻璃纤维布》和《纤维增强复合材料筋》等正在编制过程中,将在2005年末完成。这些标准规范将形成FRP在土木工程中应用技术标准体系,对指导我国在建设工程中应用FRP技术的实施起到了规范市场、完善技术、发展产业的作用。

该技术在我国正处于高速发展的阶段,材料生产、标准规范编制、施工技术开发、施工质量检验等工作都在不断取得进展,可以预测,随着我国国民经济发展的步伐,FRP及其在建筑工程领域应用技术会不断取得新的更大的成果,造福于民。

第二节 建筑工程用纤维增强复合材料

一、材料性质

目前建筑工程所采用的FRP主要有碳纤维增强复合材料(CFRP)、玻璃纤维增强复合材料(GFRP)和芳纶纤维增强复合材料(AFRP)等三种。

FRP与混凝土、钢材等传统的建筑材料相比较,还属于非常年轻的建筑结构材料,因此深入地这类材料的性能是

在工程结构中正确应用的前提。

首先, FRP 最突出的优点在于它具有很高的比强度, 即通常所说的轻质高强。

其次, FRP 具有良好的耐腐蚀性, 可以抵抗不同环境下的化学腐蚀, 这是传统建筑结构材料难以比拟的。目前在化工建筑、地下工程和水下特殊工程中, FRP 耐腐蚀的优点已经得到实际工程的证明。在瑞士、英国、加拿大等国家的寒冷地区以及一些国家的近海地区已经开始在桥梁、建筑中采用 FRP 结构代替传统结构以抵抗除冰盐和空气中盐分的腐蚀, 将使结构的维护费用大大降低。

同时, FRP 具有可设计性, 即通过使用不同纤维种类、控制纤维的含量和不同铺层方向等方法可以设计出不同强度、不同弹性模量或不同性能的 FRP 产品, 而且 FRP 产品成型方便, 形状可灵活设计。

FRP 产品非常适合于在工厂生产、运送到工地、现场安装的工业化施工过程, 有利于保证工程质量、提高劳动效率、建筑工业化。

FRP 产品还有一些其他优势, 如透电磁波、绝缘、隔热、热膨胀系数小等, 这使得 FRP 和 FRP 结构在一些特殊场合能够发挥难以取代的作用。

另外, 与传统结构材料不同, FRP 一般表现为各向异性, 纤维方向的强度和弹性模量较高, 而垂直纤维方向的强度和弹性模量很低。有资料表明, 纤维纵横两个方向的拉伸强度相差可达 25 倍, 压缩强度相差可达 5 倍, 模量相差可达 13 倍。此外, 纤维方向的拉伸强度比压缩强度高约 30%。由于 FRP 这种各向异性使得它不同于传统结构材料, 这是在研究与应用 FRP 过程中应该加以注意并解决的问题。

与混凝土相比, 一般 FRP 的防火性能较差, 但通过改变

树脂的组分,可以改善 FRP 的防火性能。如果在其表面进行防火处理,其效果可以与混凝土结构的抗火灾性能相当。

FRP 本身的抗疲劳性能优于传统结构材料,但是必须注意的是,初始缺陷和工作环境对 FRP 抗疲劳性能的影响非常显著。

FRP 的耐久性是大家关心的问题。由于 FRP 诞生不过 60 多年,应用于土木工程中最多也不到 30 年,对其耐久性研究还不十分充分。应该指出的是,耐久性不仅仅是材料老化,还包括温度变化影响、湿度变化影响、FRP 的蠕变和应力松弛等问题,而且在实际环境下这些因素是共同作用,相互影响的。

二、产品形式及分类

可用于建筑工程的 FRP 形式有很多种。

1. FRP 片材

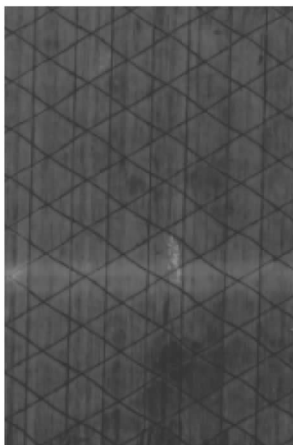
用于结构加固修复最多的材料形式是片材,主要包括 FRP 布和 FRP 板两类。

FRP 布是目前结构加固工程中应用最广泛的 FRP,图 1-1 是目前市场上常用的两种 FRP 布。它由连续的长纤维编织而成,通常是单向纤维布,一般只承受单向拉伸,且使用前不浸润树脂,施工时用树脂浸润粘贴,主要应用于结构的加固,也可以作为生产其他 FRP 制品的原料。

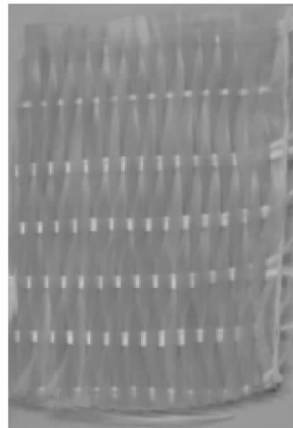
FRP 板是将纤维在工厂中按照一定的工艺生产成型板状 FRP 制品,施工中再用树脂粘贴,图 1-2 中是几种 FRP 板。FRP 板主要用以承受纤维方向上的拉压,但在垂直纤维方向上强度和弹性模量很低。

2. FRP 棒材

FRP 棒材包括 FRP 索和 FRP 筋。FRP 索和 FRP 筋是将纤



碳纤维布



玻璃纤维布

图 1-1 FRP 布



图 1-2 FRP 板材

维在工厂中按照一定工艺生产的棒状 FRP 制品，如图 1-3 所示，主要用于混凝土结构和预应力混凝土结构中替代钢筋或钢索，也可以做成 FRP 结构直接用于建筑工程当中。

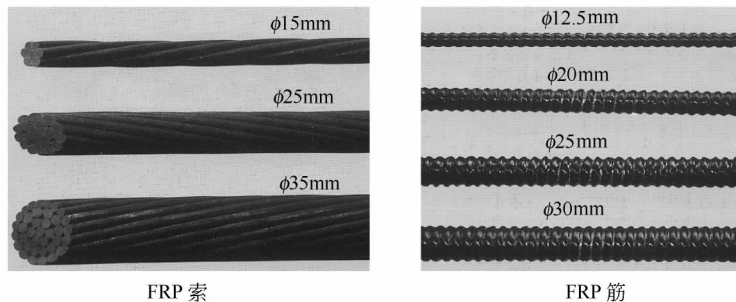


图 1-3 FRP 索与 FRP 筋

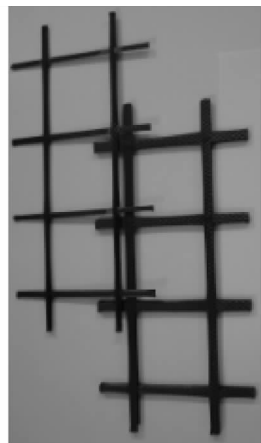
常用的 FRP 筋的形式有多种：表面进行砂化处理的 GFRP 筋；与钢绞线相似，且在几股纤维间用环氧黏结的 CFRP 预应力筋；为提高黏结性能，表面进行刻痕处理的 FRP 筋；为加强黏结，表面进行滚花处理，再添加树脂硬化剂，同时利用 FRP 的柔韧性，先把纤维布置成各种形状，然后把截面制成矩形的 FRP 筋等。

3. FRP 网格材

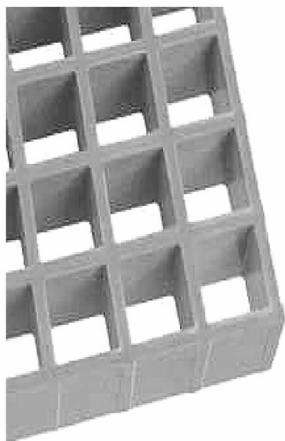
FRP 网格材也是将纤维在工厂中按照一定工艺生产的网格状 FRP 制品，图 1-4 所示为两种 FRP 网格材。FRP 网格可以直接代替钢筋网片或钢筋笼。

4. FRP 型材

FRP 型材有缠绕型、模压型及多种类型。FRP 型材的截面形状可以很复杂，常见的有管、罐、球等，参见图 1-5。纤维含量可以达到 60%~70%，有很好的受力性能，可以直接作为结构构件，也可以与其他材料组合，广泛用于压力容器、管道等。



CFRP 网格材



GFRP 网格材

图 1-4 FRP 格栅制品



图 1-5 FRP 型材

5. FRP 组合板

FRP 组合板一般由上、下表面的 FRP 板和夹心材料组成, 图 1-6 给出的是一种中心仍用 FRP 构成的组合板材。FRP 组合板可以充分利用 FRP 强度, 有极高的比强度和比刚度, 构件截面形式合理。在飞机、船舶等结构中已经有广泛的应用, 在土木工程结构中也可以直接用于桥面、屋面、操作平台等结构中, 也可以与其他传统结构材料组合形成不同的组合结构。



图 1-6 FRP 组合板

6. 其他 FRP 制品

由于 FRP 的可设计性, 在实际工程中可以根据具体要求确定生产工艺并生产不同形式、不同规格、不同性能的 FRP 制品, 直接或再加工后应用于建筑工程当中。

第三节 应用领域与应用方式

FRP 在结构工程中的应用领域十分广泛。随着 FRP 及其制品的形式和性能不断发展完善, FRP 在工程领域的应用日益扩展, 已从初期的结构加固应用发展到新型建筑应用, 材料