



土木工程施工与管理前沿丛书

# FRP加固混凝土结构耐久性研究

FRP JIAGU HUNNINGTU JIEGOU NAJIUXING YANJIU

李趁趁 高丹盈 赵 军 著

中国建筑工业出版社

● 土木工程施工与管理前沿丛书

# FRP 加固混凝土结构耐久性研究

李趁趁 高丹盈 赵 军 著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

FRP 加固混凝土结构耐久性研究/李趁趁, 高丹盈,  
赵军著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 8

土木工程施工与管理前沿丛书

ISBN 978-7-112-14509-6

I. ①F… II. ①李…②高…③赵… III. ①纤维增  
强混凝土-混凝土结构-耐用性-研究 IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 161779 号

近年来, 纤维增强聚合物片材 (FRP) 加固混凝土结构技术在土木工程、交通桥梁工程、水利工程等领域应用广泛, 但 FRP 片材加固混凝土结构耐久性问题制约着该技术在潮湿、高温、冻融、碳化、近海地区等侵蚀环境下的应用。本书对 FRP 片材加固混凝土柱在冻融、碳化、模拟海水潮汐作用的盐溶液干湿循环下的受力性能展开研究, 主要内容包括: 概述、FRP 片材耐久性研究、侵蚀环境下 FRP 与混凝土正拉粘结性能研究、侵蚀环境下 FRP 与混凝土剪切粘结性能研究、侵蚀环境作用下 FRP 加固混凝土圆柱轴心受压试验研究, 考虑侵蚀作用 FRP 条带加固钢筋混凝土圆柱正截面受压承载计算, 建立相关的理论和计算方法, 对 FRP 加固混凝土柱加固方案的选择提出合理建议, 可以为相关规程提供技术支持。

本书可供研究人员、工程技术人员、规范编制人员以及土木工程、交通桥梁工程、水利工程等专业的学生参考使用。

\* \* \*

责任编辑: 赵晓菲 毕凤鸣

责任设计: 董建平

责任校对: 张颖 王雪竹

## 土木工程施工与管理前沿丛书 FRP 加固混凝土结构耐久性研究

李趁趁 高丹盈 赵军 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 7 $\frac{3}{4}$  字数: 190 千字

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月第一次印刷

定价: 22.00 元

ISBN 978-7-112-14509-6

(22577)

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)

# 前 言

纤维增强聚合物片材 (FRP) 由于轻质高强、施工便捷、节省空间、适用面广等优点, 在土木工程、交通桥梁工程、水利工程等领域得到了广泛应用。随着工程应用的深入, FRP 加固混凝土结构的耐久性问题引起了人们极大的关注。因为 FRP 加固修复技术的应用大多数是在室外, 特别是侵蚀性环境 (如高温潮湿、化学剂侵蚀、碳化、冻融、沿海海水潮汐) 作用下, 钢筋混凝土结构在这类环境中往往由于耐久性降低而无法正常使用, 那么, 用 FRP 加固的钢筋混凝土结构在这些环境下的耐久性能如何, 怎样对侵蚀环境下的 FRP 加固钢筋混凝土结构进行耐久性设计, 这些问题制约了 FRP 加固修复技术在常见侵蚀环境下的应用。为了深入了解 FRP 加固混凝土结构体系在常见侵蚀环境下的使用性能, 为 FRP 加固修复技术的工程应用提供参考, 本书作者和其他合作者在国家重大基础研究前期研究专项基金 (2004CCA04100) 的资助下, 对复杂环境作用下 FRP 加固混凝土结构的耐久性进行了系统、深入地研究, 取得了一系列成果。本书内容是其中的一部分, 主要是对碳化、冻融循环、模拟海水潮汐作用的盐溶液干湿循环下 FRP 的耐久性、FRP 与混凝土之间界面粘结的耐久性、FRP 加固混凝土圆柱的耐久性展开研究。

本书内容包括: 绪论, FRP 片材耐久性研究, 侵蚀环境下 FRP 与混凝土正拉粘结性能研究, 侵蚀环境下 FRP 与混凝土剪切粘结性能研究, 侵蚀环境下 FRP 加固混凝土圆柱轴心受压试验研究, 考虑侵蚀作用 FRP 条带加固钢筋混凝土圆柱正截面受压承载力计算, 共 6 章。其中第 1、2 章由高丹盈和赵军共同撰写, 第 3~6 章由李趁趁撰写, 全书最后由李趁趁统稿。本书可供研究人员、工程技术人员、规范编制人员以及土木工程、交通桥梁工程、水利工程等专业的学生参考使用。

本书研究工作得到了国家重大基础研究前期研究专项基金 (2004CCA04100) 的支持, 在此表示衷心感谢。感谢教育部纤维复合建筑材料与结构工程研究中心的赵广田教授级高工、朱海堂教授、张启明高工、杨满香高工在研究工作期间的大力支持和积极参与。本书引用了大量参考文献, 在此对这些文献的作者表示谢意。

由于作者水平有限, 书中难免有疏漏及不足之处, 敬请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 FRP 片材及其增强机理 .....	3
1.2.1 FRP 片材的组成 .....	3
1.2.2 FRP 片材的增强机理 .....	5
1.2.3 FRP 片材的优点 .....	5
1.3 FRP 加固混凝土结构耐久性研究现状 .....	6
1.3.1 国外研究现状 .....	6
1.3.2 国内研究现状 .....	11
1.3.3 存在的问题 .....	14
1.4 相关混凝土耐久性研究现状 .....	15
1.4.1 碳化对混凝土的作用 .....	15
1.4.2 冻融循环对混凝土的作用 .....	16
1.4.3 盐溶液干湿循环对混凝土的作用 .....	18
1.5 主要研究内容 .....	18
<b>2 FRP 片材耐久性研究</b> .....	20
2.1 前言 .....	20
2.2 试验概况 .....	20
2.2.1 FRP 试件设计与制作 .....	20
2.2.2 试验环境条件与试验方法 .....	21
2.3 室温下 FRP 片材的纵向受拉性能 .....	22
2.4 碳化对 FRP 片材纵向受拉性能的影响 .....	24
2.4.1 碳化环境下 CFRP 和 GFRP 片材的试验结果 .....	24
2.4.2 试验结果分析 .....	25
2.5 冻融循环对 FRP 片材纵向受拉性能的影响 .....	26
2.5.1 冻融循环作用下 CFRP 和 GFRP 片材的试验结果 .....	26
2.5.2 试验结果分析 .....	28
2.6 盐溶液干湿循环对 FRP 片材纵向受拉性能的影响 .....	29
2.6.1 盐溶液干湿循环作用下 CFRP 和 GFRP 片材的试验结果 .....	29

2.6.2	试验结果分析 .....	31
2.7	小结 .....	32
<b>3</b>	<b>侵蚀环境下 FRP 与混凝土正拉粘结性能研究 .....</b>	<b>33</b>
3.1	前言 .....	33
3.2	试验概况 .....	33
3.3	试验结果与分析 .....	35
3.3.1	混凝土强度 .....	35
3.3.2	FRP 与混凝土的正拉粘结强度 .....	36
3.4	小结 .....	39
<b>4</b>	<b>侵蚀环境下 FRP 与混凝土剪切粘结性能研究 .....</b>	<b>41</b>
4.1	前言 .....	41
4.2	试验概况 .....	41
4.2.1	试件准备 .....	42
4.2.2	测试内容与加载装置 .....	43
4.3	试验结果和分析 .....	44
4.3.1	试件破坏过程与破坏形态 .....	45
4.3.2	应变与剪应力沿粘结长度分布 .....	46
4.3.3	有效粘结长度 .....	48
4.3.4	剪切粘结强度 .....	49
4.3.5	FRP 和混凝土之间界面承载力计算模型讨论 .....	50
4.4	小结 .....	52
<b>5</b>	<b>侵蚀环境作用下 FRP 加固混凝土圆柱轴心受压试验研究 .....</b>	<b>54</b>
5.1	前言 .....	54
5.2	试验概况 .....	55
5.2.1	试验设计与试件制作 .....	55
5.2.2	试验方法 .....	56
5.3	FRP 条带加固素混凝土圆柱试验结果与分析 .....	57
5.3.1	试验结果 .....	57
5.3.2	室温下试验结果分析 .....	60
5.3.3	碳化作用试验结果分析 .....	62
5.3.4	冻融循环作用试验结果分析 .....	64
5.3.5	盐溶液干湿循环作用试验结果分析 .....	69
5.3.6	小结 .....	74
5.4	FRP 全裹加固素混凝土圆柱试验结果与分析 .....	75

5.4.1	FRP 全裹加固素混凝土圆柱的破坏形态	75
5.4.2	轴向应力-轴向混凝土应变、横向 FRP 应变关系	75
5.4.3	FRP 全裹加固素混凝土圆柱极限荷载及其对应轴向应变结果与分析	78
5.4.4	小结	80
5.5	FRP 条带加固钢筋混凝土圆柱试验结果与分析	81
5.5.1	FRP 条带加固钢筋混凝土圆柱的破坏过程	81
5.5.2	各环境下 FRP 条带加固钢筋混凝土圆柱的荷载-轴向位移曲线特征	81
5.5.3	钢筋应变	84
5.5.4	FRP 条带加固钢筋混凝土圆柱极限荷载及其对应轴向应变结果与分析	84
5.5.5	小结	85
5.6	总结	86
6	考虑侵蚀作用 FRP 条带加固钢筋混凝土圆柱正截面受压承载力计算	88
6.1	前言	88
6.2	FRP 条带加固钢筋混凝土圆柱正截面受压承载力计算模型	88
6.2.1	FRP 全裹约束混凝土抗压强度计算模型	88
6.2.2	FRP 条带间隔约束混凝土抗压强度计算模型及 FRP 条带加固钢筋混凝土圆柱正截面受压承载力计算模型	89
6.2.3	考虑侵蚀环境作用的 FRP 条带加固钢筋混凝土圆柱正截面受压承载力计算模型	92
6.3	小结	94
附录 A	附图	95
参考文献		111

# 1 绪 论

## 1.1 概 述

在役混凝土结构往往由于多种原因需要进行修复与加固,如设计失误、施工错误、材料质量不符合要求、使用功能改变、遭受自然灾害、受腐蚀性环境的影响等,因此,土木工程界一直在致力于研究开发加固修复材料与技术。目前,在世界范围内,纤维增强聚合物(Fiber Reinforced Polymer,简称FRP)片材加固修复混凝土结构技术应用相当广泛。FRP加固技术是一种用胶粘剂把FRP粘贴在构件外部进行加固,以提高构件承载力的加固技术。FRP是一种高强、轻质、易裁剪、抗疲劳性能好、相对耐腐蚀及耐久性好、无磁性的新型复合材料。因此,FRP加固技术与传统的加固技术相比具有明显的优势:(1) 高强高效;(2) 施工便捷,适用面广;(3) 自重轻,不增加结构尺寸;(4) 加固工作可以在建筑物使用时进行;(5) 材料本身及加固构件具有较好的耐久性。

国内外对FRP加固梁、柱、板等构件的受力性能进行了大量的研究,研究内容涉及构件的抗弯性能、抗剪性能、抗压性能、抗震性能、粘结方式及锚固技术等许多方面<sup>[1-17]</sup>。研究表明<sup>[1-9]</sup>:FRP加固后的混凝土受弯构件性能有明显改善,钢筋混凝土梁加固后极限承载力可以提高24%~233%,受剪承载力提高11%~145%,提高程度与FRP层数、剪跨比等多种因素有关;钢筋屈服后FRP强度充分发挥,梁的刚度得到很大提高;在极限强度40%的最大荷载作用下,结构加载200万次,疲劳强度仍可达到极限荷载强度的50%~60%。对FRP加固混凝土柱以及柱状物性能的研究涉及加固后混凝土柱的抗弯性能、抗剪性能、承载能力、应力—应变关系、荷载—变形关系、徐变特性、柱截面形状对加固效果的影响等方面,研究表明<sup>[10-17]</sup>:由于FRP的约束作用,柱的抗压、抗剪、抗弯、抗震能力有所提高。在循环荷载作用下,FRP包裹柱的延性明显提高,延性系数从3~4提高到7~11,而且认为最有效的加固区是柱基处1~2D(D为柱截面高度)的范围。桥梁工程震后FRP修复加固情况及混凝土柱、砖砌体经FRP抗震加固的试验研究表明<sup>[8,18]</sup>,对于地震区,FRP片材是一种非常有效的加固材料,通过FRP的横向约束可以提高桥柱、混凝土柱的强度及延性,提高墙体的承载能力、变形能力、抗裂能力,最终提高其抗震能力,同时FRP也适用于桥梁等承受动力荷载的大中型结构的抗震加固<sup>[19]</sup>。



笔者所在的课题组对碳纤维布加固钢筋混凝土梁的正截面、斜截面受力性能及圆柱、方柱的受压性能进行了试验研究<sup>[20]</sup>。结果表明：(1) 碳纤维布对钢筋混凝土梁正截面加固时，层数为 1、2、3 时梁的极限承载力提高幅度分别为 93.9%、80.5%、109.5%；碳纤维布提高了钢筋混凝土梁的截面刚度，对裂缝的发展起到了约束作用，碳纤维布加固梁的裂缝较普通钢筋混凝土梁的裂缝数量多、间距小、宽度小。(2) 对钢筋混凝土梁斜截面加固时，贴 1、2、3 层碳纤维布的钢筋混凝土梁受剪承载力较对比梁分别提高 23.0%、10.1%、33.5%；斜裂缝的出现受碳纤维布的影响不明显，但斜裂缝出现后碳纤维布加固梁的斜裂缝发展较对比梁缓慢。相同荷载下，碳纤维布加固梁的最大斜裂缝宽度都小于未加固梁的裂缝宽度，加固梁的裂缝比未加固梁的裂缝要密集；碳纤维布加固梁斜截面破坏前都有碳纤维布起鼓、脱粘或撕裂现象，且伴有响声，有一定的预兆，改善了钢筋混凝土梁受剪破坏的突然性。(3) 碳纤维布为 2、3 层时，碳纤维布加固钢筋混凝土圆柱的正截面承载力提高幅度分别为 48.2%、81.0%，钢筋混凝土方柱承载力提高幅度分别为 6.0%、13.6%，碳纤维布加固圆柱比加固方柱效果明显。随着碳纤维布层数的增加，柱的延性在增加，荷载—轴向位移曲线越来越饱满。

大量的研究表明，FRP 加固法是一种行之有效的加固方法，目前已广泛应用于土木工程、交通桥梁工程、水利工程等领域，如加固框架梁、柱、节点，桥梁、桥面板，墙体，管道，烟囱，隧道以及水工结构、近海结构等，产生了巨大的社会效益和经济效益<sup>[17,21-24]</sup>。为了推广 FRP 加固技术的应用，日本、美国、欧洲等国家给出了相应的规范和设计指南，我国出台的相关规范有《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS 146—2003)、《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2006)、《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB 50608—2010)。这些规范的推出，使 FRP 加固技术的应用进一步规范化、程序化和法律化，从而促进了该项技术的健康发展。但是，随着 FRP 加固修复技术的广泛应用，FRP 加固混凝土结构的耐久性问题引起了人们极大的关注，因为 FRP 加固修复技术的应用大多数是在室外，特别是侵蚀性环境（如高温潮湿、化学剂侵蚀、碳化、冻融、沿海海水潮汐）作用下，钢筋混凝土结构在这类环境中往往由于耐久性降低而无法正常使用，那么，用 FRP 加固的钢筋混凝土结构在这些环境下的耐久性能如何，怎样对侵蚀环境下的 FRP 加固钢筋混凝土结构进行耐久性设计，在 FRP 加固技术应用的同时，这些问题必须引起足够的重视，得到合理的解决。因此，需要了解 FRP 加固混凝土结构体系在这些恶劣环境下的使用性能以及包括纤维与粘接树脂等 FRP 体系在这类环境下的耐久性。在这种背景下，笔者所在的课题组就“恶劣环境下纤维增强塑料混凝土构件耐久性研究”申请并得到了国家科技部重大基础研究前期研究专项（2004CCA04100）的资助，本书的研究内容是其中的一部分。

## 1.2 FRP 片材及其增强机理

### 1.2.1 FRP 片材的组成

复合材料是由两种或两种以上物理和化学性质不同的材料组合而成的一种多相固体材料<sup>[28]</sup>。复合材料的组分材料虽保持其相对独立性，但复合材料的性能却不是组分材料性能的简单相加，而有着重要的改进。复合材料的组成和结构中，有一项是连续的，称为基体相；另一项是分散的、被基体包容的，称为增强相。增强相与基体相之间的交界面称为复合材料界面，复合材料的各个相在界面上可以物理地分开。微观结构层次的研究表明，复合材料界面附近的增强相和基体相由于复合时复杂的物理和化学作用的原因，变得具有既不同于基体相又不同于增强相组分本体的复杂结构，同时发现这一个结构和形态会对复合材料的宏观性能产生影响。所以界面附近这个结构与性能发生变化的微区也可作为复合材料的一相，称为界面相。因此，确切地说，复合材料是由基体相、增强相和界面相组成的<sup>[29]</sup>。

FRP 片材是以纤维（如玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等）为增强材料，以合成树脂（如不饱和聚酯、环氧树脂、乙烯酯）为基体材料，并掺入适量辅助剂（如引发剂、促进剂等）经成型技术形成的一种新型复合材料<sup>[30]</sup>。目前，用来生产 FRP 片材的增强纤维主要有碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维、玄武岩纤维。这几种纤维的主要性能如下<sup>[31,32]</sup>：

(1) 碳纤维。在基础建设中使用的碳纤维片材以聚丙烯腈基（PAN）碳纤维片材为主。这种纤维除具备高性能纤维片材所共有的优点外，还具有突出的耐高温（1000～3000℃）和抗燃特性，不受酸雨的侵蚀，价格性能比好，补强效果优良。聚丙烯腈基（PAN）碳纤维有通用型、标准型、高强型、高模型等品种，都具有优良的力学性能和耐高温、耐化学腐蚀、耐疲劳、导电性和绝热性等。沥青基碳纤维也可用于混凝土结构补强，但一般只用高性能长丝，特别是高模量碳纤维或石墨化纤维。

(2) 玻璃纤维。玻璃纤维按其性能的不同可以分为 E-玻璃（无碱玻璃）纤维、C-玻璃纤维（中碱玻璃）和高强玻璃纤维，即 M、S-玻璃纤维。E-玻璃是一种硼硅酸玻璃，E-玻璃纤维是目前应用最广泛的一种玻璃纤维，具有良好的电气绝缘性能及机械性能，它的缺点是易被无机酸侵蚀，故不适用于在酸性环境。C-玻璃纤维特点是耐化学性特别是耐酸性优于 E-玻璃纤维，但电气性能差，机械强度低于 E-玻璃纤维 10%～20%。在我国，C-玻璃纤维占玻璃纤维产量的一大半（60%），广泛用于 GFRP 的增强以及过滤织物、包扎织物等的生产，因为其价格低于无碱玻璃纤维而有较强的竞争力。高强玻璃纤维的特点是高强度、高模量，但价格较贵。

(3) 芳纶纤维。即芳香族聚酰胺纤维，主要包括对位的聚对苯二甲酰对苯二胺和

聚对苯甲酰胺纤维等。在基础建设中使用的纤维以聚对苯二甲酰对苯二胺为主，分高强度型、高模量和高伸长型等。它具有高比强度和比模量，抗冲击强度和冲击吸收能高，耐酸、碱、有机溶剂和海水的腐蚀性良好，耐磨性好等优点。

(4) 玄武岩纤维。玄武岩纤维是新型的矿石纤维，它以天然的火山喷出岩为原料，将其破碎后加入熔窑中，在 1450~1500℃ 熔融后，通过铂铑合金拉丝漏板制成的连续纤维。它与碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维以及其他高科技纤维相比，具有很多独特的优点，如力学性能佳，耐高温性能好，可在 -269~700℃ 范围内连续工作，耐酸耐碱，抗紫外线性能强，吸湿性低，有更好的耐环境性能，此外，还有绝缘性能好，高温过滤性佳、抗辐射、良好的透波性能等优点。

碳纤维布、玻璃纤维布、芳纶纤维布和玄武岩纤维布如图 1-1 所示，常用的碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维和玄武岩纤维的主要性能比较见表 1-1<sup>[32]</sup>。

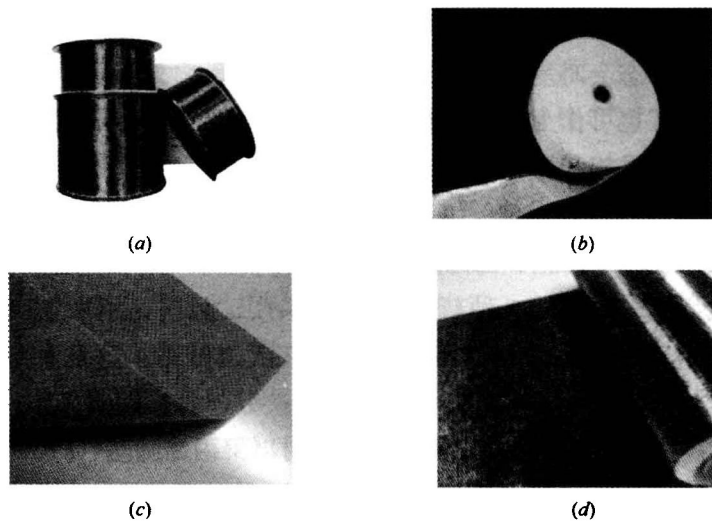


图 1-1 各类纤维布

(a) 碳纤维布；(b) 玻璃纤维布；(c) 芳纶纤维布；(d) 玄武岩纤维布

碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维与玄武岩纤维主要性能比较

表 1-1

纤维类型	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	断后伸长率 (%)	最高工作温度 (℃)
碳纤维	1.78	3500~6000	230~600	1.5~2.0	500
E-玻璃纤维	2.54	3100~3800	72.5~75.5	4.7	380
S-玻璃纤维	2.54~2.57	4020~4650	83~86	5.3	300
芳纶纤维	1.45	2900~3400	70~140	2.8~3.6	250
玄武岩纤维	2.80	3000~4840	79.3~93.1	3.1	650

FRP 中常用的树脂基体有环氧树脂、不饱和聚酯树脂和乙烯酯树脂。不饱和聚酯是最简单和最便宜的树脂，异构聚酯具有良好性能，并增大了抗水渗透性能。乙烯酯树脂表现出不饱和聚酯和环氧树脂之间的性能，和异构聚酯性能相近，通常具有良好

的耐环境性能，适于对腐蚀有严格要求的环境中使用。然而，由于缺乏同其相容性好的碳纤维上浆剂，可引起剪切和压缩强度降低，因此这两种树脂不能很好地与碳纤维粘结。环氧树脂性能优于不饱和聚酯和乙烯酯树脂，价格相对较贵，固化时收缩率低，表现出好的抗湿气渗透性能和力学性能，并与不同纤维都有很好的粘结强度，是目前使用最多的树脂基体<sup>[8]</sup>。

根据增强材料种类，FRP片材可分为碳纤维增强聚合物片材（CFRP）、玻璃纤维增强聚合物片材（GFRP）和芳纶纤维增强聚合物片材（AFRP）、玄武岩纤维增强聚合物片材（BFRP）。其中，土木工程领域用量较多的是CFRP和GFRP，CFRP性能优于GFRP、BFRP，但价格比GFRP、BFRP贵。

### 1.2.2 FRP片材的增强机理

在FRP片材中，纤维起增强作用，承受大部分荷载，使片材显示出较高的抗拉强度和刚度。基体与增强纤维通过界面连接在一起，基体将荷载经界面传递给纤维，不仅能够充分发挥纤维抗拉性能优异的特点，还能起到使荷载均匀分布和保护纤维免遭外界损伤的作用。通常增强材料是具有强结合键的物质，对于硬质材料如玻璃、陶瓷等，其内部常含有裂纹，容易断裂，具有脆性，不能发挥结合键强的特点。但如果将硬质材料制成具有一定长度的细长纤维，则由于纤维的尺寸小，在其中出现裂纹的几率以及裂纹长度减小，脆性得到改进，强度显著提高。位于基体中的增强纤维，表面受到基体保护，不容易遭受损伤，在受载过程中也难以产生裂纹，所以片材的承载能力提高。当片材受到较大应力时，某些易产生裂纹的纤维可能断裂，而塑性和韧性好的基体能够阻止裂纹扩展。纤维受力断裂时，它们的断口往往并不出现在同一平面上。这样，要使片材断裂，则必须将许多纤维从基体中拔出，需要克服基体对纤维的粘结力，因而片材的断裂强度得以显著提高<sup>[28]</sup>。

当采用FRP加固混凝土时，将FRP粘贴在混凝土结构或构件受拉侧的表面，用以抵抗其承受的拉力。此时，对混凝土构件的不同部位，往往形成混凝土受压和FRP受拉的受力状态，因此可以充分发挥混凝土受压强度高而纤维材料受拉强度高的特点，各自的材料特性得以充分发挥，从而达到增强混凝土的目的。

### 1.2.3 FRP片材的优点

FRP片材不仅具有各组分材料的优点，而且可以通过材料设计使各组分性能互相补充产生复合效应，获得新的优越性能。因此，FRP片材具有许多优点<sup>[28,29]</sup>。

#### (1) 比强度和比模量高

比强度和比模量是指材料强度和模量与材料密度的比值。比强度和比模量高，说明材料“轻质高强”，在工程应用中可降低施工、运输、存储等成本。

#### (2) 阻尼减振性好

受力结构的自振频率除与形状有关外，还同结构材料的比模量平方根成正比，所以复合材料有较高的自振频率，在通常加载速度或频率之下不容易出现因共振而脆断的现象。同时，复合材料的基体纤维界面有较大的吸收振动能量的能力，致使结构的振动阻尼较高。

### (3) 抗疲劳性好

一般金属材料的疲劳破坏是没有明显预兆的突发性破坏，而 FRP 片材具有良好的抗疲劳性。首先，增强纤维的缺陷少，抗疲劳性好。其次，基体的塑性好，能消除和减少应力集中区域的尺寸及数量，使源于基体、纤维缺陷处或界面上的疲劳源难以萌生，抑制微裂缝的出现。即使形成微裂缝，基体的塑性形变也能使裂纹尖端钝化，减缓其扩展。基体中分布着大量纤维，裂纹的扩展常常经历非常复杂和曲折的路径。FRP 片材的疲劳破坏是从纤维的薄弱环节开始，逐渐扩展到界面上，破坏前有明显的征兆。因此，FRP 片材的疲劳强度比较高。

### (4) 破损安全性好

FRP 片材的横截面上有成千上万根独立纤维，它的破坏不像传统材料那样突然发生，而是要经历基体损伤、开裂、界面脱粘、纤维断裂等一系列过程。当少数增强纤维发生断裂时，载荷又会通过基体的传递迅速分散到其他完好的纤维上去，从而延缓了灾难性破坏突然发生的情况。FRP 片材的这种能安全地承受一定损伤的能力，使 FRP 片材具有较好的破损安全性。

### (5) 可设计性强

通过改变纤维、基体的种类及相对含量、纤维集合形式及排列方式、铺层结构等可以满足对片材结构与性能的各种设计要求。

除以上所述，某些特定的 FRP 片材还具有其他特点，如电绝缘性好和耐摩擦、耐腐蚀、抗冲击、耐高温或低温以及特殊的光、电、磁性能等。由于上述种种优越性，FRP 片材的应用会越来越广泛，用量会越来越多。

## 1.3 FRP 加固混凝土结构耐久性研究现状

### 1.3.1 国外研究现状

FRP 加固混凝土结构体系的耐久性与其组成部分的耐久性是分不开的，包括 FRP 的耐久性、混凝土的耐久性、FRP 与混凝土粘结的耐久性。国外对外贴 FRP 加固混凝土结构耐久性的研究开始于 20 世纪 90 年代前后，目前已有许多相关国际会议在世界各地召开，比如，从 1993 迄今连续召开了十届 FRP 加固钢筋混凝土结构（简称 FRPRCS）国际会议，在加拿大 Sherbrooke 大学连续召开了四届 FRP 及其混凝土结构耐久性国际会议<sup>[33-35]</sup>。FRP 及其混凝土结构耐久性的研究已经成为人们关注的重点，

已有许多研究成果, 研究内容涉及 FRP 耐久性、FRP 与混凝土粘结耐久性 (包括树脂耐久性)、FRP 筋、布、板、管加固混凝土构件耐久性的研究等<sup>[32-51]</sup>。下面简要综述国外在 FRP 片材及其混凝土构件耐久性研究方面的主要成果。

### (1) FRP 耐久性研究

文献 [36] 介绍了 Garden 在 1997 年进行的碳纤维片材和玻璃纤维片材试验, 经过温度循环和湿度暴露后, CFRP 的弹性模量、抗拉强度、极限应变不但没有降低, 反而有相应的增加, 这可能是由于树脂的后固化造成的。GFRP 在经过温度循环后, 弹性模量和抗拉强度没有下降, 但延性降低, 有脆化的趋势。在潮湿的环境下, GFRP 的抗拉强度有明显的降低。环氧树脂在相同条件下的试验结果表明, 环氧树脂在试验的温度条件下, 强度和模量都有相应的提高, 但对于湿度比较敏感, 经过一定时间的暴露, 抗拉强度和模量都有显著降低, 其中模量最多降低 37%, 强度下降 50%。

K. B. Armstrong<sup>[37]</sup>研究了 CFRP 片材吸收水分对粘结树脂的影响 (1996 年), 结果表明, 对于某种特定的粘结树脂, 少量的湿度实际上起到了促进固化、提高断裂韧性的作用。Lixin Wu 等<sup>[38]</sup>的研究结果表明, 在环氧树脂和固化剂中加入少量的水能促进粘结树脂的固化速率, 提高固化程度、弯曲弹模和粘结强度 (2004 年)。

R. Selzer 和 K. Friedrich<sup>[39]</sup>研究了湿气对 CFRP 片材力学性能和破坏行为的影响 (1997 年)。试验采用了三种 CFRP 片材: 两种片材的基体是热固性的 (未经过改性的和经过韧性改性的环氧树脂, EP 和 EP<sub>mod</sub>), 一种片材的基体是热塑性的 (聚醚醚酮, PEEK)。试件暴露在不同温度 (23°C、70°C、100°C) 的水池中。结果表明, 只有那些纤维方向与荷载方向垂直的环氧基片材的性能受到了影响, 检查碳纤维/环氧片材的断面发现是因为湿气促进了界面破坏, 湿气使得环氧基体变软, 纤维和基体之间的粘结变弱。CF/PEEK 的性能没有受到湿气的影 响, 因为 PEEK 基体的湿气吸收量很低。不同水温对片材的力学性能没有影响, 因为所使用基体的玻璃转换温度都高于最大水温 100°C。

J. Hulatt 等<sup>[40]</sup>研究了 CFRP、GFRP 在不同环境下的耐久性 (2002 年), 研究环境包括三种不同温度 (22°C、45°C、60°C) 作用、22°C 下水溶液或饱和盐溶液干湿作用、2000h 的紫外线加速老化作用。所用材料是 90/10 的碳纤维, 0/90°和 +/−45°方向编织的 E-玻璃纤维, 所用环氧树脂基体的固化温度是 65°C, 玻璃体转换温度是 75°C。试验结果表明: ① 在 60°C 下, 这三种材料的力学性能都降低了。在 45°C 下, CFRP 和 0/90°GFRP 的性能稍有提高或没有变化, 但 +/−45°GFRP 的弹性模量和强度都在逐渐减小。② 水和盐溶液中的干湿循环对片材的弹性模量没有明显的副作用。CFRP 和 0/90°GFRP 在自来水干湿循环作用下强度降低, 但在盐溶液干湿循环作用下是提高了。两种溶液下的干湿循环对 +/−45°GFRP 没有产生负面影响。③ 2000h 的紫外线辐射对试件的力学性能没有副作用。GFRP 的弹性模量稍有降低, 但 CFRP 的

弹性模量却是稍有提高。基体材料有明显的褪色，特别是 GFRP。

## (2) FRP 与混凝土粘结的耐久性研究

研究 FRP 与混凝土之间界面性能的试验方法有多种，如正拉粘结强度试验（受力方向垂直于界面）、剪切粘结强度试验（受力方向平行于界面）、梁试验、修正梁试验<sup>[41-43]</sup>。试验方法不同对所得到的粘结强度有不可忽略的影响。正拉和剪切粘结强度试验方法比较简单，被广泛采用。

P. Mukhopadhyaya 等<sup>[41]</sup>对 GFRP 板和混凝土的粘结进行了耐久性试验（1998 年）。采用双面剪切试件，试件在实验室受三种加速老化方式作用达 9 个月。加速老化方式分别为浸入 5%氯化钠溶液的干湿循环、温度在 20℃到 -17.8℃范围内变化的空气中冻融循环以及干湿和冻融循环结合的方式。试验结果表明，在荷载较低时，荷载从板到混凝土的传递是以均匀的速度近似线性传递的，与侵蚀作用和混凝土强度无关。在荷载较高时，随着加载端的脱粘，力沿粘结界面的分布变得不均匀呈非线性，侵蚀作用提高了力从板传递到混凝土的长度。所有受侵蚀环境作用的试件的尺寸变化及板与混凝土之间的滑移都比不受侵蚀作用的试件大，但并没有发现侵蚀作用对粘结强度有明显影响，可能是侵蚀时间不够长的缘故。

Hota V. S. GangaRao 和 John Barger<sup>[42]</sup>研究了 GFRP 和混凝土之间粘结界面的耐久性（2003 年）。老化方式为：①室温下 pH 值为 3 的溶液中 0、1 个月和 3 个月；②室温下 pH 值为 13 的溶液中 0、1 个月和 3 个月；③pH 值为 3 的溶液中，温度从 -11℃到 48℃的冻融循环 0、1 个月和 3 个月；④pH 值为 13 的溶液中，温度从 -11℃到 48℃的冻融循环 0、1 个月和 3 个月；⑤温度从 -11℃到 48℃的冻融循环及受持续荷载（极限粘结强度的 25%）作用；⑥重复的加-卸载作用；⑦自然老化 8 个月。①②情况下的粘结强度对比表明，酸对 FRP 与混凝土之间粘结界面的影响要比碱严重一些；③④情况下粘结强度比室温下减少 16%左右；⑤情况下粘结强度比同样受冻融循环但不受持续荷载作用的试件降低 25%多；⑥情况下的试验表明，在试件应力为 0.55MPa 和 1.1MPa 时卸载为零，试件应变可以回复到零。然而当试件应力为 1.6MPa 时，卸载为零试件就不能回复到零应变了。自然老化 8 个月的试件的平均粘结强度为 2.5MPa，粘结强度变化幅度在对比试件粘结强度的 6%以内，可以认为没有严重退化。

PizhongQiao 和 Yingwu Xu<sup>[43]</sup>用修正的三点弯曲梁 I 型断裂试验研究 CFRP 与混凝土粘结界面的耐久性，研究了冻融和干湿循环对 FRP 与混凝土粘结界面 I 型断裂的影响（2004 年）。冻融循环时，试件浸泡在 100ml 含 4g 无水氯化钙的溶液中，在 -18℃下冻 16h，然后在 22℃下融 8h 为一个循环，冻融循环包括 50 次和 100 次。干湿循环时，试件在相同浓度氯化钙溶液中浸泡 16h，然后取出在室温下（22℃）干燥 8h，此为一个循环，干湿循环也包括 50 次和 100 次。结果表明，在冻融和干湿循环作用下，试件的断裂荷载和断裂能都随着循环次数的增加而降低。在经过冻融和干湿循

环后, 试件的破坏模式发生了改变, 从不受环境作用时混凝土的内聚破坏转变为多次循环作用后的粘结界面破坏, 并且冻融循环作用下 FRP 与混凝土界面的劣化相对严重些。

Roberto Lopez-Anido 等<sup>[44]</sup>对一种用来加固木墩的水下固化环氧胶粘剂进行了抗冻融试验。试件是用该胶粘剂粘结的 FRP 板粘结接头, 冻融条件是在  $-18^{\circ}\text{C}$  的冷冻箱里 8h, 然后在  $38^{\circ}\text{C}$  的温水中 16h 为一个循环, 共 20 个循环, 按照标准试验方法 ASTM D5868 进行单面剪切粘结试验。试验结果表明, 经过冻融之后粘结强度从原来的 16.2MPa 降低到 9.2MPa, 下降了 43%, 但 9.2MPa 仍然满足加固木桩的要求。经过冻融循环作用之后, 试件的破坏方式发生了变化, 从原来的胶粘剂与 FRP 板之间的粘结破坏转变为此粘结破坏与胶粘剂内聚破坏 (发生在胶粘剂内) 并存的方式。分析原因可能是粘结层存在着孔隙促进了水分的进入, 在冻结的过程中水膨胀产生裂缝使得粘结界面退化。

### (3) FRP 外部加固混凝土构件的耐久性研究

Michael J. Chajes 等<sup>[45]</sup>研究了芳纶纤维、E-玻璃纤维、石墨纤维织物外贴加固钢筋混凝土梁在氯化钙溶液中经历冻融、干湿循环的耐久性问题 (1994 年)。冻融时, 试件受压面朝上放在密封的容器中, 浸于氯化钙溶液 (每 100ml 水含 4g 无水氯化钙) 下, 溶液高出梁顶面 5mm。每个冻融循环包括在  $-17^{\circ}\text{C}$  的冷冻箱里放 16h, 然后置于室温下融解 8h; 干湿循环时, 溶液与试件摆放同冻融循环, 每个干湿循环包括在氯化钙溶液中浸泡 16h, 然后在室温下干燥 8h, 此时使用风扇确保试件完全干燥。研究结果表明, 外贴芳纶、E-玻璃、石墨纤维梁在侵蚀性环境下有不同程度的退化。尽管环境作用后加固梁的强度仍然高于未加固梁, 但它们的极限强度受环境的影响降低了。芳纶纤维梁和 E-玻璃纤维梁在环境作用下强度优势几乎损失一半, 而石墨纤维梁强度损失不大, 室温下石墨纤维梁强度高于未加固梁 139%, 经历过 100 个冻融循环后强度仍然高于未加固梁 127%, 100 个干湿循环后强度仍然是未加固梁的 120%。侵蚀环境的作用不仅降低了梁的极限承载力, 同时也可改变梁的破坏模式。控制环境下试验梁都没有发生脱粘破坏, 侵蚀环境作用下的芳纶纤维梁的破坏却都是由织物的脱粘引起的。此外, E-玻璃纤维梁和石墨纤维梁破坏后的检查表明, 混凝土与织物间的粘结发生退化, 表现为织物上没有附着混凝土。总体来看, 这两种环境条件中, 干湿环境影响稍严重。三种织物加固中, 石墨织物加固受环境条件的影响最小, 较适合用于干湿循环或冻融循环作用下有除冰剂的环境中。

美国 Huntsville 省 Alabama 大学土木与环境工程系的 Houssam A. Toutanji 与其他研究人员对 FRP 加固混凝土构件的耐久性能开展了多项内容的试验研究, 研究参数包括构件类型 (梁、柱)、FRP 材料类型 (AFRP、CFRP、GFRP)、粘贴方式 (纤维方向在环向、轴向的粘贴)、环境类型 (室温、干湿、冻融)、树脂类型 (环氧 I、II、III)。以下具体介绍其部分研究内容。



Houssam A. Toutanji 与 William Gomez<sup>[46]</sup>研究了盐水中干湿循环对 FRP 布加固混凝土梁性能及纤维布与混凝土间粘结的影响 (1997 年)。试验变量包括纤维类型 (两种碳纤维与两种玻璃纤维)、树脂类型 (环氧 I、II、III) 和环境条件。试件处于两种环境中: 室温 (+20℃)、300 次干湿循环。湿循环中使用 1 升水加 35g 盐的盐水来模拟海水, 循环时间 4h; 干循环在 35℃ 热空气及 90% 湿度下进行, 循环时间 2h, 共历时 75 天。研究表明, 将 FRP 贴于混凝土梁的受拉面, 两种环境作用下试件承载力均有提高, 但受干湿作用试件的提高程度较室温下试件小, 强度提高程度的减小可能是由于环氧树脂退化而导致混凝土与 FRP 布之间粘结力的降低造成的。与用环氧 I 或 III 的梁相比, 用环氧 II 的梁在两种环境作用下承载力都是最高的, 破坏时挠度在室温下最大, 在干湿循环作用下却最小。由此可以看出, 胶粘剂的耐久性对 FRP 加固混凝土的耐久性的影响非常大。Houssam A. Toutanji 与 P. Balaguru<sup>[47]</sup>在 1998 年又对盐水中干湿、冻融循环条件下的 CFRP 与 GFRP 布约束混凝土圆柱的耐久性能进行了试验研究。试验变量包括纤维类型 (两种碳纤维 C1、C5 与一种玻璃纤维 GE) 与环境条件。环境条件是室温 (+20℃)、300 次干湿循环, 循环条件同上所述; 冻融循环条件使用盐水溶液, 溶液浓度为每升水 35g 盐, 包括将试件温度从 4.4℃ 降到 -17.8℃, 然后从 -17.8℃ 升到 4.4℃, 在 4h 内进行。试验结果表明, 在恶劣环境下 CFRP 比 GFRP 性能好; 干湿作用下 CFRP 约束试件的强度与延性没有降低, 刚度得到提高, 而 GFRP 约束试件的强度与延性都降低了, 刚度未受影响; 冻融循环作用下 CFRP 和 GFRP 约束试件的强度与延性显著降低, 刚度似乎未受影响; 与室温及干湿循环作用下试件相比, 受冻融作用试件的破坏方式更具灾害性。1999 年, Houssam A. Toutanji 与 P. Balaguru<sup>[48]</sup>对 CFRP 与 GFRP 布约束混凝土圆柱进行的冻融循环作用的试验研究中, 受冻融循环作用的试件经历了两次试验。因为第一次试验时, 试件破坏发生在柱顶和柱脚。作者感觉受冻融循环作用试件的破坏可能是由混凝土的劣化引起的, 并不是由约束体系的破坏引起的。因此, 锯掉其柱顶和柱脚, 然后对短试件重新进行了试验。试验结果表明, 暴露在冻融环境中的 CFRP 试件与 GFRP 试件的强度都有所降低, 主要是由于 FRP 材料的退化与混凝土材料的退化引起的; 当减小冻融作用对混凝土的影响后, CFRP 与 GFRP 加固试件强度的退化显著降低; 与玻璃纤维相比, 碳纤维受冻融循环作用的影响不明显。Houssam A. Toutanji<sup>[49]</sup>研究了四种 FRP 布、两种环氧树脂基体约束混凝土圆柱的耐久性能 (1999 年)。FRP 布为: 两种 CFRP (C1 和 C5) 与两种 GFRP (GE1 和 GE2), 环氧树脂基体采用 A 型、B 型, 受室温与干湿循环两种环境作用。研究表明, 室温下使用两种类型树脂试件的强度、延性、应力-应变曲线、破坏模式结果相似, 两种环氧树脂直到最终的破坏都是有效的; 用 A 型环氧树脂的 GFRP 布约束试件在干湿循环下强度有一定损失, GE1 与 GE2 试件的强度损失分别达 10% 与 18%。然而, 用 B 型环氧树脂引起的强度损失很小, GE1 试件强度减少 3%, GE2 试件强度减少 4%。CFRP 布试件不论使用的是 A 型还