

XIANWEI ZENGQIANG FUHE CAILIAO (FRP)
DE YANJIU YU YINGYONG

纤维增强复合材料(FRP) 的研究与应用

张华 晋霞 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

纤维增强复合材料(FRP) 的研究与应用

张华 晋霞 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

纤维增强复合材料是一种轻质、高强、耐久、耐高温并具有良好的弹性的新型材料，原应用于航天、航空和国防工程。这种优良的新型材料用于土木建筑工程是近几年的事，现在已在民用建筑、工业建筑、水利水电工程和道路桥梁工程加固中开始得到应用，由于它独特的优良性能，一开始就得到了建筑行业界认可，尤其在建筑工程补强加固中，纤维增强复合材料使加固进入了一个崭新的阶段。本书对纤维增强复合材料加固混凝土输水洞技术进行了系统的理论分析和试验研究，并将该技术应用于工程实践。

本书共分8章，主要包括：目前国内外的现状和研究开发方向；纤维增强复合材料；纤维增强复合材料加固混凝土输水管黏结材料性能模型试验研究；纤维增强复合材料加固混凝土输水管技术模型试验报告；纤维增强复合材料在混凝土输水洞试验模型的应力及有限元分析；纤维增强复合材料加固混凝土输水管施工工艺研究；加固实例和工程实例等。

本书可供从事混凝土输水洞加固设计的技术人员、研究人员、工程施工人员、建设管理人员及其他关心输水洞结构加固问题的读者阅读和参考。

图书在版编目（C I P）数据

纤维增强复合材料（FRP）的研究与应用 / 张华，晋霞编著. -- 北京：中国水利水电出版社，2017.3
ISBN 978-7-5170-5228-9

I. ①纤… II. ①张… ②晋… III. ①纤维增强复合材料—研究 IV. ①TB334

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第048480号

书 名	纤维增强复合材料（FRP）的研究与应用 XIANWEI ZENGQIANG FUHE CAILIAO (FRP) DE YANJIU YU YINGYONG
作 者	张 华 晋 霞 编 著
出 版 发 行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.75印张 242千字
版 次	2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷
定 价	38.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

病险水利工程除险加固技术的研究与应用，始终围绕水工建筑物混凝土材料及结构进行。

混凝土是一种延性较差、抗拉强度较低的脆性材料。而纤维增强复合材料是一种轻质、高强、耐久、耐高温并具有良好的弹性的新型材料，因其具有很高的抗拉强度和延性，以及既经济又耐久的特点，使其在水工建筑物的除险加固中得到应用。

纤维增强复合材料加固修复混凝土结构技术是近年来兴起的一项新型加固技术，该项技术是将碳素纤维这种高性能纤维应用于土木工程，利用树脂类材料把碳纤维粘贴于结构或构件表面，形成复合材料体，通过其与结构或构件的协同工作，达到对结构构件补强加固及改善受力性能的目的。该技术适用于各种结构类型、各种结构部位的加固修补，与传统的加固方法相比具有高强、高效、施工便捷、适用性广等优越性。

建国初期，我国建造的土石坝，为了放空水库和向下游引水灌溉，通常在坝下根据不同的作用布置放空输水洞、灌溉输水洞及发电引水洞。由于混凝土输水隧洞长期在水下运行，经常出现混凝土碳化、裂缝、渗水、漏水、钢筋锈蚀等问题，严重者影响水库的正常运行，甚至还可能造成较大的工程事故。

最初加固输水隧洞多采用内衬钢板的方法，该方法虽然有效，但存在着如下问题：①施工难度大，因为已建成的输水隧洞大多为圆形、方形、马蹄形或由圆变方、由方变圆的断面，内衬钢板给施工带来了很大难度；②损失过流断面，内衬钢板时，钢板与混凝土之间需预留灌注砂浆的空隙，由于输水洞运行多年及存在不均匀沉陷等问题，造成隧洞断面不规则，内衬钢板后减小隧洞过水断面，减少过流能力；③钢板长期在水下浸泡，会产生严重的锈蚀，缩短其使用寿命；④施工周期长，造价高。

纤维复合材料加固输水隧洞具有以下明显优势：①施工简单，易成型，由于纤维布的刚度远小于钢板，属于柔性材料，裁剪、加工制作方便，能缩短工期；②提高过流能力。由于纤维复合材料的糙率低，一般为 0.007，是光滑混凝土护面的 1/2，减少了隧洞的沿程水头损失，加大了过流能力；③造价低、投资小、经济效益明显。

本书对纤维增强复合材料加固混凝土输水洞技术进行了系统地理论分析和试验研究，并将该技术应用于工程实践。

本书简要概括论述了目前国内外纤维增强复合材料的现状和研究开发方向，主要介绍了纤维增强复合材料加固混凝土输水洞黏结材料的性能模型试验研究，输水洞加固技术的模型试验，输水洞加固试验模型的应力及有限元分析，施工工艺研究，两个工程实例和工程加固后的安全监测情况等。通过模型试验和分析计算，表明了粘贴的纤维增强复合材料与原混凝土结构变形协调，共同受力。同时改善了混凝土输水洞的特性，增强了输水洞混凝土结构的延性，使粘贴后的混凝土输水洞具有良好的防渗、防漏性能，取得了预期的效果，延长混凝土输水洞的使用寿命，保证了工程的正常运行。

因作者水平有限，书中难免有片面和不妥之处，恳请读者批评指正。

作 者

2017年1月于大同

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概论	1
1.2 国外碳纤维增强复合材料现状及研究开发方向	1
1.3 我国碳纤维加固技术现状及研究开发方向	2
第 2 章 纤维增强复合材料	4
2.1 玻璃纤维的基本知识	4
2.2 芳纶纤维的基本知识	5
2.3 碳纤维的基本知识	6
2.4 纤维材料的力学性能	7
2.5 碳纤维增强复合材料	8
第 3 章 纤维增强复合材料加固混凝土输水管黏结材料性能模型试验研究	12
3.1 试验一：潮湿环境下粘贴碳纤维或玻璃纤维片材的黏结强度试验	12
3.2 试验二：纤维增强复合材料和防护材料冲磨试验	14
3.3 试验三：纤维增强复合材料和黏结材料疲劳试验	16
3.4 试验四：混凝土修补材料试验	23
3.5 结语	25
第 4 章 纤维增强复合材料加固混凝土输水管技术模型试验报告	27
4.1 试验目的和试验内容	27
4.2 模型设计及模型制作	28
4.3 荷载模拟和加载方法	31
4.4 模型破坏判断标准	33
4.5 钢筋混凝土圆管模型（试件）在均匀内压力作用下的试验	33
4.6 钢筋混凝土圆管模型受垂直均布荷载试验	44
4.7 结语	53
第 5 章 纤维增强复合材料在混凝土输水洞试验模型中的应力及有限元分析	54
5.1 试验模型三维有限元计算	54
5.2 钢筋混凝土管模型计算结果	57
5.3 钢筋混凝土管内粘粘贴层模型计算结果	58

5.4	钢筋混凝土管外粘贴层模型计算结果	66
5.5	钢筋混凝土管内外双粘贴层模型计算结果	75
5.6	结语	85
第 6 章	纤维增强复合材料加固混凝土输水洞（管）施工工艺研究	87
6.1	施工程序	87
6.2	准备工作	87
6.3	裂缝修补	89
6.4	输水洞（管）内壁渗漏处理	92
6.5	输水洞（管）内壁混凝土表面处理	97
6.6	粘贴碳纤维布或玻璃纤维布	99
6.7	纤维布粘贴质量检查	100
6.8	施工质量管理 and 安全管理	101
第 7 章	黄坡水库低输水管粘贴纤维增强复合材料加固实例	104
7.1	工程概况	104
7.2	工程运用情况及存在问题	104
7.3	低输水管管壁结构计算	106
7.4	低输水管加固设计	116
7.5	黄坡水库低输水洞三维非线性有限元计算	120
7.6	工程施工	134
7.7	低输水管加固施工质量	136
7.8	低输水管加固效果	137
7.9	低输水管原型结构应变检测	138
第 8 章	湖南省桃花江水库发电、灌溉输水管修复加固工程实例	143
8.1	工程概况	143
8.2	灌溉、发电输水管存在的主要问题	143
8.3	管道结构强度复核与裂缝原因分析	145
8.4	补强加固设计	147
8.5	桃花江水库灌溉管和发电管修复加固施工要点	151
8.6	输水管加固效果	153
8.7	结语	154
附录		155
附录 A	碳纤维片材配套胶粘剂与混凝土正拉黏结强度试验室测定方法及评定标准	155
附录 B	碳纤维片材加固混凝土结构施工质量现场检验方法及评定标准	159
附录 C	常用碳纤维布型号及性能指标	162
参考文献		164

第 1 章 绪 论

1.1 概论

我国的水利工程大多始建于 20 世纪 50—70 年代, 水工建筑物的设计基准使用年限为 50~100 年, 有的水利工程已经超过了 50 年。有诸多因素的存在包括物理劣化、化学腐蚀、设计标准的提高等, 加之由于历史原因, 许多水库在兴建时就留下诸多隐患, 加之社会经济与生态环境的需求变化, 致使病险水库大量存在。除极少数极为严重的水利工程报废外, 绝大多数只能采取适当的技术措施, 对其进行补强与加固处理, 使水工结构仍能满足人们对建筑物安全性、适用性与耐久性的要求, 持续为社会服务。

钢筋混凝土结构诞生于 19 世纪末 20 世纪初, 发展应用的历史约 100 年。混凝土结构加固的历史更短, 仅 30~40 年。我国已有的混凝土结构, 目前大多数正处于维修、加固、改造的高峰时期。随着新思想、新材料的出现, 工程加固新技术也层出不穷。在传统的加大截面法、干式包钢加固法、预应力加固法、改变结构传力途径加固法的基础上, 出现了黏钢加固法、植筋加固法以及当前正在兴起的纤维增强复合材料 (Fiber Reinforced Polymer, FRP) 加固法。

碳纤维加固技术兴起于 20 世纪 80 年代, 在日本、韩国、美国和欧洲等国家及地区得到迅速发展和应用, 自 20 世纪 90 年代中期进入我国之后迅速发展起来, 国内外很多科研单位和高校就碳纤维增强复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) 加固混凝土构件这项新技术进行了大量的研究。随着试验研究的不断深入, 该加固技术的适用范围不断扩大, 应用技术不断改进。

CFRP 加固修复混凝土结构技术是近年来兴起的一项新型加固技术, 该项技术是将碳纤维这种高性能纤维应用于土木工程, 利用树脂类材料把碳纤维粘贴于结构或构件表面, 形成 CFRP, 通过其与结构或构件的协同工作, 达到对结构或构件补强加固及改善受力性能的目的。该技术适用于各种结构类型、各种结构部位的加固修补, 与传统的加固方法相比, 其具有高强、高效、施工便捷、适用性广等优势。

1.2 国外碳纤维增强复合材料现状及研究开发方向

1996 年世界碳纤维生产能力 15000t, 实际产量约 10000t, 其中日本约占 60%。日本的东丽公司、东邦人造丝公司和三菱人造丝公司从事碳纤维的生产、研究和开发工作, 这三家大公司是世界著名的碳纤维生产企业, 它们都在积极扩展碳纤维生产, 以进一步巩固其在世界市场上的主导地位, 并纷纷实现从原丝到下游复合材料一体化的配套

生产体制,碳纤维及其下游产品已成为这些公司的支柱产业和新的经济增长点。

随着航空航天飞行器各项性能的不断提高,其对结构件用材料的性能要求也越来越高。今后日本先进复合材料的发展方向是:在增强材料方面,进一步提高碳纤维的强度和模量,降低成本;在树脂基体方面,主要提高树脂的冲击后压缩强度和耐湿热性;在复合材料成型技术方面,进一步实现整体成型技术、固化监控、自动化技术及三维复合材料技术,从而提高复合材料性能同时降低制造成本。

美国是碳纤维生产大国,更是消费大国,世界碳纤维 40% 以上的市场在美国。美国 1996 年碳纤维生产能力约为 4500t,其中卓尔泰克(ZOLTEK)公司于 1997 年在美国得克萨斯州的亚平伦城和匈牙利的布达佩斯附近建起 5 条碳纤维生产线,该年的总生产能力达 3000t 左右,一跃成为世界上生产碳纤维的最大集团之一。

它的产品有许多特色,主要是低成本、低价格、大丝束、采用纺织用的丙烯酸原丝和开发工业级碳纤维等。该公司生产的碳纤维价格已降至 17.64 美元/kg,而日本东丽公司生产同类产品大约需 30 美元/kg。在应用方面,美国摩里逊(Morison)公司为达纳(Dana)公司生产汽车传动轴,供通用汽车公司使用;采用 CFRP 可使原来的两件简化成单件而合并成一个传动轴,与钢材料相比,可减重 60%。美国斯道顿(Stoughton)复合材料公司开发的碳纤维集装箱重量轻、耐磨,在碳纤维价格降至 17.6 美元/kg 时,此集装箱的价格可与金属集装箱竞争。

目前,美国正在开发碳纤维的五大新兴市场,即清洁能源车辆、土木建筑工程、近海油田勘探和生产、风电机组大型叶片、高尔夫球杆和球拍。这是推动美国和世界 CFRP 发展的动力。随着碳纤维生产规模的扩大和生产成本的下降,它在增强木材、机械和电器零部件、新型电极材料乃至生活用品中的应用必将迅速扩大。

除日本、美国外,德国、英国和韩国也具有一定的 CFRP 生产能力。据预测,今后 10 年世界 CFRP 需求量将稳定高速增长。国外 CFRP 材料业已步入良性循环。

1.3 我国碳纤维加固技术现状及研究开发方向

1.3.1 我国碳纤维加固技术的现状

我国将 FRP 材料应用于加固混凝土技术的研究和开发始于 1982 年,在北京密云采用玻璃纤维增强塑料(Glass Fiber Reinforce Plastic, GFRP)加固了蜂窝箱形公路桥。CFRP 的研究和应用开始于 1996 年,最早开展研究的有冶金建筑科学研究所和清华大学。1997 年该研究的成果在一些工程中被试验和推广,加固工程效果得到了社会的热烈反响,该研究项目被列入国家重点攻关课题,我国首例采用 CFRP 材料修复加固的混凝土结构工程项目是 1998 年上半年完成的。1998 年完成了 6 项 FRP 材料加固工程项目,1999 年完成 45 项工程项目,2000 年完成百余项工程项目。到目前为止,采用 FRP 材料加固完成的工程已有几千项,可见其发展之迅速。2000 年 6 月,中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会成立了“纤维增强塑料及其工程应用专业委员会”。我国

对 FRP 的研究和工程应用主要集中在片（布）材和板材方面，中国工程建设标准化协会于 2003 年颁布了《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》（CECS 146—2003），2011 年颁布了《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》（GB 50728—2011），2013 年颁布了《混凝土结构加固设计规范》（GB 50367—2013），住建部正在组织修订《高性能纤维复合材料应用技术规范》及《碳纤维布加固修补结构施工及验收规范》等国家标准。

我国目前尚不具备国际竞争能力。我国当前及今后一个时期内最大的市场在体育用品方面。我国 CFRP 业存在的问题是原丝质量差、生产规模小、质量低、价格高、应用基础研究薄弱等。

1.3.2 碳纤维加固混凝土结构技术的研究开发方向

CFRP 加固混凝土结构这一新型结构加固方法，与传统的加固方法相比，具有明显的技术优势。因此，在实际工程中得到迅速广泛的应用。然而，有大量的理论研究和工程实践证明，用 CFRP 加固受弯构件时还存在两大问题：

（1）CFRP 的高强度性能不能得到充分合理的利用。

（2）对构件正常使用阶段时开裂荷载、刚度和限制最大裂缝宽度等的提高程度不大。

因此预应力 CFRP 布（板）加固混凝土受弯构件技术的研究中，如何提高碳纤维抗拉强度的利用率，已成为近几年来国内外土木工程界学者研究的焦点。

目前对 CFRP 作为预应力材料的研究，主要集中在开发相关预应力锚具上。在预应力 CFRP 板材和 CFRP 筋材锚具方面，现在已有能应用于实际工程中的张拉设备，也有用碳纤维板体外预应力加固铁路桥梁等工程实践的实例。而对 CFRP 布设加预应力的材料必须克服 CFRP 布薄而宽导致的其张拉不均匀性，克服预应力松弛，保证施加预应力的稳定性；对黏胶自锚型预应力构件，要保证 CFRP 在高应力状态下刮胶粘贴时张拉机械平移升降运动的灵活性和稳定性，还要求设备轻便、能广泛应用于各种狭窄的施工环境，要满足这些要求困难很大且矛盾很多。清华大学、湖南大学和中国煤炭设计研究院等单位，都在进行 CFRP 夹、锚具的研究，目前尚未成熟的研究成果已被逐步推广应用于实际工程中。

目前工程上也有采用在受弯构件上施加临时性体外预应力，在对梁的受拉区产生预压应力时粘贴碳纤维布的。待黏胶固化后，拆除体外预应力机构。利用受压区混凝土的变形回弹，对碳纤维布施加预拉应力。用这种方法来延迟裂缝的出现，进而减少粘贴碳纤维的应变滞后和降低受弯构件的裂缝宽度。

第2章 纤维增强复合材料

FRP 是一种轻质、高强、耐久、耐高温并具有良好的弹性的新型材料，原用于航天、航空和国防工程。这种优良的新型材料，用于土木建筑工程是近几年的事，现在已在民用建筑、工业建筑、水利水电工程和道路桥梁工程加固中逐步得到应用。它由于独特的优良性能，一开始就得到了建筑行业界的认可，尤其是在建筑工程补强加固中，FRP 对加固的工程质量和效果产生了突破性的进展，发生了质的飞跃，使工程补强加固进入了一个崭新的阶段。看似极普通的非金属碳元素有数倍于普通低合金钢的抗拉强度及比钢材略高的高弹性模量，但又如棉絮一样柔软，它耐湿热且抗老化。到目前为止，国际上已经开发出了多种高性能非金属增强材料——纤维增强复合材料。具有代表性的、常用的有三大类，即玻璃纤维（Glass Fiber）、芳纶纤维（Aramid Fiber）和碳纤维（Carbon Fiber）。

2.1 玻璃纤维的基本知识

玻璃纤维是一种性能优异的无机非金属材料。英文原名为 Glass Fiber 或 Fiberglass。成分为二氧化硅、氧化铝、氧化钙、氧化硼、氧化镁、氧化钠等。它是以玻璃球或废旧玻璃为原料经高温熔制、拉丝、络纱、织布等工艺而形成的各类产品，玻璃纤维单丝的直径从几个微米到二十几个微米，相当于一根头发丝的 $1/20 \sim 1/5$ ，每束纤维原丝都由数百根甚至上千根单丝组成，通常作为复合材料中的增强材料、电绝缘材料和绝热保温材料及电路基板等，广泛应用于国民经济各个领域。

在一般人的观念中认为玻璃是质硬且易碎物体，并不适于作为结构用材，但若将其抽成丝后，则其强度便大为增加且具有柔软性，故将其配合树脂并赋予形状以后就可以成为优良的结构用材。玻璃纤维随着直径变小其强度增大。作为补强材料，玻璃纤维具有许多优异的特性，这些特性使玻璃纤维的使用远较其他种类纤维广泛，且发展速度亦遥遥领先，其特性列举如下。

- (1) 拉伸强度高，伸长小（3%）。
- (2) 弹性系数高，刚性佳。
- (3) 弹性限度内伸长量大且拉伸强度高，故吸收冲击能量大。
- (4) 为无机纤维，具不燃性，耐化学性佳。
- (5) 吸水性小。
- (6) 尺度安定性、耐热性均佳。
- (7) 加工性佳，可制成股、束、毡、织布等不同形态的产品。

- (8) 透明，可透过光线。
- (9) 与树脂接着性良好的表面处理剂开发技术已较成熟。
- (10) 价格便宜。

2.2 芳纶纤维的基本知识

芳纶纤维全称为聚对苯二甲酰对苯二胺，英文名为 Aramid fiber（杜邦公司的商品名为 Kevlar），是一种新型高科技合成纤维，具有超高强度、高模量和耐高温、耐酸碱、重量轻等优良性能，其强度是钢丝的 5~6 倍，模量为钢丝或玻璃纤维的 2~3 倍，韧性是钢丝的 2 倍，而重量仅为钢丝的 1/5 左右，在 560℃ 的温度下不分解、不熔化。它具有良好的绝缘性和抗老化性能，具有很长的生命周期。芳纶的发现被认为是材料界一个非常重要的历史进程。

凡聚合物大分子的主链由芳香环和酰胺键构成，且其中至少 85% 的酰胺基直接键合在芳香环上，每个重复单元的酰胺基中的氮原子和羰基均直接与芳香环中的碳原子相连接，并置换其中一个氢原子的聚合物，均称为芳香族聚酰胺纤维，我国定名为芳纶纤维。

2.2.1 芳纶纤维分类

按照化学组成，芳纶纤维有两大类，即全芳族聚酰胺纤维和杂环芳族聚酰胺纤维。全芳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、间位的聚间苯二甲酰间苯二胺和聚间苯甲酰胺纤维、共聚芳酰胺纤维以及如引入折叠基、巨型侧基的其他芳族聚酰胺纤维。杂环芳族聚酰胺纤维是指含有氮、氧、硫等杂质原子的二胺和二酰氯缩聚而成的芳纶纤维，如有序结构的杂环聚酰胺纤维等。

1. 聚对苯二甲酰对苯二胺（Poly - P - Phenylene Terephamide, PPTA）纤维

PPTA 纤维是芳纶在复合材料中应用最普遍的一个品种。我国于 20 世纪 80 年代中期试生产此纤维，定名为芳纶 1414（芳纶 II）。芳纶纤维具有优异的力学、化学、热学、电学等性能。PPTA 纤维具有高拉伸强度、高拉伸模量、低密度、优良吸能性、减震、耐磨、耐冲击、抗疲劳、尺寸稳定等优异的力学和动态性能；良好的耐化学腐蚀性；高耐热、低膨胀、低导热、不燃、不熔等突出的热性能以及优良的介电性能。

2. 聚对苯甲酰胺（Poly - P - Benzamide, PBA）纤维

我国于 20 世纪 80 年代初期曾试生产此纤维，定名为芳纶 14（芳纶 I）。芳纶 I 的拉伸强度比芳纶 II 低约 20%，但拉伸模量却高出 50% 以上。芳纶 I 热老化性能好，这些性能在用作某些复合材料的增强剂时很有利。

采用新的二胺或第三单体合成新的芳纶是提高芳纶纤维性能的重要途径。从力学性能方面来看，芳纶共聚纤维主要有：

1. 对位芳酰胺共聚纤维

对位芳酰胺共聚纤维是由对苯二甲酰氯与对苯二胺及第三单体 3,4'-二氨基二苯醚

在 N,N'-二甲基乙酰胺等溶剂中低温缩聚和直接湿纺、拉伸制得。

2. 聚对芳酰胺苯并咪唑纤维

一般认为它是在原 PPTA 的基础上引入对亚苯基苯并咪唑类杂环二胺，经低温缩聚而成的三元构聚芳酰胺体系，纺丝后再经高温热拉伸而成。

2.2.2 芳纶纤维应用

(1) 可用作先进复合材料，主要领域为：①航空航天领域；②舰船领域；③汽车工业。

(2) 可用作防弹制品：①硬质防弹装甲板；②软质防弹背心。

(3) 缆绳方面的应用。

(4) 基础设施和建材方面的应用：①芳纶增强混凝土；②芳纶增强木材。

(5) 应用于传送带。

(6) 应用于特种防护服装。

(7) 体育运动器材方面的应用。

(8) 电子设备方面的应用。

2.3 碳纤维的基本知识

2.3.1 碳纤维概述

碳纤维是由经环氧涂层处理和石墨压织的碳纤维制成。其优点是重量轻、抗张强度高，在所有密度低的人造合成手柄材料中，碳纤维可能是最坚固的。其由碳引起的反光很引人注目，外观很具有未来派色彩。碳纤维也是一种高度加工的材料，因此一般被用在高端产品上。

碳纤维是由碳元素组成的一种特种纤维，其含碳量随种类不同而异，一般在 90% 以上。碳纤维具有一般碳素材料的特性，如耐高温、耐摩擦、导电、导热及耐腐蚀等，但与一般碳素材料不同的是，其外形有显著的各向异性、柔软，可加工成各种织物，沿纤维轴方向表现出很高的强度。碳纤维相对密度小，因此有很高的比强度。

2.3.2 碳纤维的种类

经高温处理后，含碳量超过 90% 的纤维材料，称为碳纤维。碳纤维的分类有许多方法，可依照原料、特性、处理温度与形状来划分。

若依照原料可分为纤维素纤维系的螺紫 (Rayon) 系、木质 (Lignin) 系、聚丙烯腈 (Polyacrylonitrile) 系、沥青 (Pitch) 系、酚树脂 (Phenol Resins) 系与气相成长碳纤维 (Vapor Grown Carbon Fiber) 系等 6 种。

依特性则分为普通碳纤维、高强度高模数碳纤维与活性碳纤维等 3 种。强度在 120kg/mm^2 以下，杨氏模数 (Young Modulus) 在 10000kg/mm^2 以下的为普通碳纤维；

强度在 150kg/mm² 以上，模数在 17000kg/mm² 以上为高强度高模数碳纤维。

若依照加工处理温度分类，则可分为耐炎质、碳素质与石墨质等 3 种。耐炎质碳纤维的处理加热温度为 200~350℃，可作电气绝缘体；碳素质碳纤维的处理加热温度为 500~1500℃，可用作电气传导性材料；石墨质碳纤维的处理加热温度在 2000℃ 以上，除耐热性与电气传导性提高外，也具有自润滑性。

若依照碳纤维制品的形状分类，可分为棉状短纤维、长丝状连续纤维、纤维束 (Tow)、织物、毡毯与编制长形物等。

下面介绍几种具代表性的碳纤维。

(1) 螺系碳纤维。螺系碳纤维加热处理时不会熔融，若在无氧状态下的不活性气体 (Inert gas) 中加热处理，则极易取得碳纤维。

(2) 聚丙烯腈系碳纤维。聚丙烯腈 (PAN) 系碳纤维的制造工程大致可分为聚丙烯腈纤维的制备、安定化 (耐炎化)、碳化；表面处理与上浆以及石墨化等 5 道程序。

(3) 沥青系碳纤维。原油经 900℃ 以上高温提炼后的残渣中，约含有 95wt% 的碳质，以电解法去除其中的硫酸，再经水洗后可得纯度极佳的沥青 (Pitch)。

(4) 气相成长碳纤维。气相成长碳纤维有基材上成长法与流体化催化剂成长法两种。将铁、钴、镍等金属微粒加热至 1100℃，令乙炔 (C₂H₂) 热分解脱氢形成碳素沉积成长于金属微粒下方，形成碳纤维。由基材上成长过程的原理可知，其间须加入氢 (H₂) 气与苯 (C₆H₆) 等气体。

(5) 活性炭纤维。目前商业化的活性炭的形态有粉末状、颗粒状与纤维状等 3 种，其中粉末状活性炭 (Powdered Activated Carbon, PAC) 大多由木屑制成，平均尺寸为 15~25μm；颗粒状活性炭 (Granular Activated Carbon, GAC) 大致由煤、沥青粉末制成，平均长度为 4~6mm；纤维状活性炭 (Activated Carbon Fiber, ACF) 则大多由 PAN、Rayon、Pitch 与酚醛树脂 (Phenolic Resin) 等纤维制成，平均直径为 7~15μm。

2.4 纤维材料的力学性能

碳纤维、玻璃纤维和芳纶纤维的力学性能虽有差异，但大同小异，美国《纤维增强材料加固混凝土结构设计及施工指南》给出的参考技术指标具有一定的代表性。各种纤维织物的典型抗拉性质见表 2-1。

表 2-1 各种纤维织物的典型抗拉性质

纤维类型		弹性模量/GPa	极限强度/MPa	延伸率/%
碳纤维	普通强度	220~235	<3790	>1.2
	高强度	220~235	3790~4825	>1.4
	超高强度	220~235	4825~6200	>1.5
	高模量	345~515	>3100	>0.5
	超高模量	515~690	>2410	>0.2

续表

纤维类型		弹性模量/GPa	极限强度/MPa	延伸率/%
玻璃纤维	E 玻璃	69~72	1860~2685	>4.5
	S 玻璃	86~90	3445~4825	>5.4
芳纶纤维	普通性能	69~83	3445~4135	>2.5
	高模量	110~124	3445~4135	>1.6

2.5 碳纤维增强复合材料

2.5.1 碳纤维增强复合材料概述

碳纤维可加工制成各种类型的 CFRP，如用碳纤维纺织成的碳纤维布、片材或压制的碳纤维板材、棒材。

CFRP 有很多种，如碳纤维增强树脂复合材料、碳纤维增强陶瓷复合材料、碳纤维增强水泥复合材料等。建筑工程加固中一般采用碳纤维增强树脂复合材料。

在碳纤维增强树脂复合材料中，碳纤维是承担拉力的增强材料，用于承担荷载；树脂是基料，用于固定碳纤维的位置、方向及传递荷载和变形。它们的复合与钢筋混凝土的复合相似，碳纤维类似混凝土中的钢筋，树脂相当于混凝土。

碳纤维布是由碳纤维线（丝束）粘结成的片状复合材料，是将纤维分成扁平状平行的碳纤维丝束，进入黏度很低的树脂槽浸胶，然后碾压、挤压，除去多余的脂胶，展在隔离纸上，当它挥发掉溶剂后就得到一张碳纤维单向预浸薄片，称为碳纤维预浸片。

采用碳纤维单向预浸片料做的碳纤维增强树脂复合材料，其力学性能、热胀系数、电阻率都是各向异性。例如，Courtaulds，Grafil 公司的一组数据如下。

- (1) 0°方向的拉伸强度为 2924MPa。
- (2) 90°方向的拉伸强度为 71MPa。
- (3) 0°方向的拉伸模量为 175GPa。
- (4) 90°方向的拉伸模量为 10GPa。

采用碳纤维单向预浸料做碳纤维增强树脂复合材料，能充分发挥碳纤维的优良力学性能。在工程加固中通常使碳纤维铺设层的纤维方向与主拉应力方向一致，使其最大限度地发挥材料高强度拉伸性能，从而节约材料。尽管如此，现在还是有 0°/90°、+45°/-45°的组合双向预浸材料出现。

建筑构件由于尺寸大、数量少、形状各异，一般多用手糊成型制造碳纤维树脂复合材料进行加固处理。

2.5.2 碳纤维复合片材的种类

目前，用于混凝土结构加固的碳纤维种类较多。从其形式上看，包括片材（含布和板）、棒材、型材和短纤维。

(1) 片材（含布和板）。混凝土结构加固、修补用的纤维片材，根据纤维排列方向，可分为单向纤维片材和双向纤维片材两类。单向纤维片材是将碳纤维束单向均匀排列，用质量大约是增强纤维质量 1/10 的纱网，涂以纱网质量 50% 以下的胶粘剂，将单向碳纤维束粘接固定其上。由于单向纤维束被连成一体，有利于施工操作，且纵向纤维不弯曲，制成的复合材料不会产生拉应力集中，可保持纤维的高强度，近年来使用量增长很快。双向纤维片材实际上就是用纤维束正交织成的织物。片材一般通过环氧树脂类黏剂粘贴于混凝土受拉区表面，是用于结构加固修复最多的一种材料形式。

(2) 棒材。它通常作为代替传统钢筋（主筋或箍筋）的材料，既可用于已建结构的补强加固，也可用于新建结构中。对棒材进行张拉后，可对混凝土结构进行体内或体外预应力增强加固。

(3) 型材。其包括多种形状，但有应用实例的仅有格状材一种且用量较少，主要是通过 1~2cm 厚的聚合物灰浆将其粘接在已有结构上，或只通过适当的锚固方法将其固定在结构上进行加固。

(4) 短纤维。相当于上述 3 种长纤维形式，通过与混凝土共同搅拌形成碳纤维混凝土，用于新建结构。

2.5.3 常用碳纤维片材的力学性能

《混凝土结构加固技术规范》（CECS 25—1990）规定，CFRP 安全性能指标及常用碳纤维布的单位面积质量，截面面积和计算厚度应符合表 2-2 和表 2-3 的要求。

表 2-2 CFRP 安全性能指标表

项 目	类 别			
	单向织物（布）		条形板	
	高强度Ⅰ级	高强度Ⅱ级	高强度Ⅰ级	高强度Ⅱ级
抗拉强度标准值 $f_{t,k}$ /MPa	≥3400	≥3000	≥2400	≥2000
受拉弹性模量 E_t /MPa	≥ 2.4×10^5	≥ 2.1×10^5	≥ 1.6×10^5	≥ 1.4×10^5
伸长率/%	≥1.7	≥1.5	≥1.7	≥1.5
弯曲强度 f_{fb} /MPa	≥700	≥600	—	—
层间剪切强度/MPa	≥45	≥35	≥50	≥40
仰粘条件下 FRP 与混凝土正拉黏结强度/MPa	≥2.5，且为混凝土内聚破坏			
纤维体积含量/%	—	—	≥65	≥55
单位面积质量/（ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ）	≤300	≤300	—	—

- 注 1. L 形板的安全性及适配性检验合格指标按高强度Ⅱ级条形预成型板（条形板）采用。
2. 对碳纤维板，碳纤维体积含量在 60%~70% 时性能最好，厂家应在产品说明书中说明纤维的体积含量。
3. 碳纤维的抗拉强度，按纤维的净面积计算，净截面面积取碳纤维布的计算厚度乘以宽度。碳纤维布的计算厚度为理论值，而不是实测厚度，是取碳纤维布的单位面积质量除以碳纤维密度而得出。
4. 碳纤维板的性能指标按板的截面（含树脂）面积取实测厚度乘以宽度。常用碳纤维布的单位面积质量，截面面积和计算厚度见表 2-30。
5. 承重结构的加固，不得使用预浸法生产的碳纤维编织物。

表 2-3 常用碳纤维布的单位面积质量、截面面积和计算厚度

纤维单位面积质量 /(g·m ⁻²)	密度 /(g·m ⁻³)	单位宽度的截面面积 /(mm ² ·m ⁻¹)	计算厚度 /mm
200	1.8	111	0.111
300		167	0.167
450		250	0.250
600		333	0.333

2.5.4 常用玻璃纤维复合材料的力学性能指标

玻璃纤维单向植物复合材料主要性能及纤维量指标见表 2-4。

表 2-4 玻璃纤维单向植物复合材料主要性能及纤维量指标

类 别	项 目						
	抗拉强度 标准值 /MPa	受拉弹性 模量 /MPa	伸长率 /%	弯曲强度 /MPa	仰粘条件下纤维复 合材料与混凝土黏 结正拉强度/MPa	单位面 积质量 /(g·m ⁻²)	层间剪 切强度 /MPa
S 玻璃	≥2200	≥1.0×10 ⁵	≥2.5	≥600	≥2.5，且为混凝 土内聚破坏	≤450	≥40
E 玻璃	≥1500	≥7.2×10 ⁵	≥2.0	≥500		≤450	≥35

注 当 FRP 料的单位面积纤维质量超出表 2-3 和表 2-4 时，严禁用于重要构件的任何部位，以及一般构件的仰面粘贴部位及立面粘贴（侧面粘贴）部位加固。

2.5.5 配套树脂类黏结材料及性能指标

《混凝土结构加固设计规范》（GB 50367—2013）规定，采用碳纤维片材对混凝土结构加固时，应采用与碳纤维片材配套的底层树脂、找平材料、浸渍树脂或黏结树脂。

配套树脂类黏结材料的主要性能应满足表 2-5～表 2-7 的要求。

表 2-5 CFRP 浸渍、黏结用胶粘剂基本性能指标

性能项目		性能要求		试验方法标准
		A 级胶	B 级胶	
胶体性能	抗拉强度/MPa	≥40	≥30	《树脂浇铸体弯曲性能试验方法》（GB/T 2570—1995）
	受拉弹性模量/MPa	≥2500	≥1500	
	伸长率/%	≥1.5		
	弯曲强度/MPa	≥50	≥40	
		且不得呈脆性（碎裂状）破坏		
	抗压强度/MPa	≥70		