

GFRP

Principles and Experimental Investigations of GFRP

复杂环境GFRP配筋

Reinforced Concrete Structures under Complex Environmental Conditions

混凝土结构原理与实验

孙 丽 张春巍 刘 莉 著

中国建筑工业出版社

复杂环境 GFRP 配筋混凝土 结构原理与实验

孙 丽 张春巍 刘 莉 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂环境 GFRP 配筋混凝土结构原理与实验/孙丽, 张春巍, 刘莉著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-112-21227-9

I. ①复… II. ①孙… ②张… ③刘… III. ①加筋混凝土结构-配筋工程-研究 IV. ①TU755.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 223084 号

本书从 GFRP 筋的基本力学性能出发, 对 GFRP 配筋混凝土结构设计、结构在服役过程中的受力性能开展了系统的分析与探讨, 具体内容包括: GFRP 筋的力学性能研究; 碱环境下 GFRP 筋受压性能研究; 盐环境下 GFRP 筋受压性能研究; GFRP 筋混凝土短柱轴心受压性能试验研究; GFRP 筋混凝土中长柱轴心受压性能试验研究; GFRP 筋混凝土柱偏心受压性能试验研究; 海水环境下 GFRP 筋混凝土柱轴心受压性能试验研究。

本书基于理论与试验研究相结合, 对 GFRP 筋混凝土结构进行了较为系统的探索与分析, 可作为高等院校土木工程专业教师、研究生和高年级本科生的参考书, 也可供从事 FRP 结构研究、设计的科研人员和工程技术人员参考。

责任编辑: 杨 杰

责任设计: 李志立

责任校对: 李欣慰 王 烨

复杂环境 GFRP 配筋混凝土结构原理与实验

孙 丽 张春巍 刘 莉 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

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 10 $\frac{3}{4}$ 字数: 230 千字

2017 年 11 月第一版 2017 年 11 月第一次印刷

定价: 68.00 元

ISBN 978-7-112-21227-9

(30864)

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

混凝土自问世以来,已有 150 年的悠久历史,由于钢筋与混凝土这两种材料的温度系数接近,取材容易、耐久性较好、整体性好等特点,钢筋混凝土结构发展迅速,在土木工程中得到广泛的应用,但钢筋混凝土结构抗裂性较差,构件在正常使用时往往带裂缝工作,钢筋往往会被侵蚀离子腐蚀生锈,导致结构承载力降低,甚至失效破坏,严重时会造成重大工程灾害,带来人员伤亡以及重大经济损失。钢筋混凝土结构的腐蚀破坏已成为一个亟待解决的问题。通过大量的科学研究与试验,人们认识到从根本上解决钢筋混凝土结构腐蚀破坏问题,取决于结构材料自身抵抗侵蚀离子的能力,因此世界各国学者不断寻求不仅强度高而且自身耐腐蚀性好的材料以替代钢筋,以期彻底解决混凝土结构腐蚀破坏问题。

纤维塑料增强筋(Fiber Reinforced Polymer,以下简称 FRP 筋)是一种新型材料,由于 FRP 筋密度低、强度高、耐腐蚀、抗疲劳等特点,不仅可以在酸、碱、盐等单一环境条件下很好地使用,而且可以在几种腐蚀性条件同时存在的复杂环境中长期使用,其良好的性能可以从根本上解决混凝土结构中钢筋的锈蚀问题,提高混凝土结构耐久性。其中,GFRP 材料价格低廉,成为最具发展前景的替代钢筋用于混凝土结构的理想加筋材料。

在 GFRP 筋混凝土结构的设计和使用过程中,设计者对 GFRP 筋混凝土结构的力学性能和设计原理缺乏足够的了解,因而不能准确的设计出合理的 GFRP 筋混凝土结构,使得 GFRP 筋混凝土结构的应用受到限制、得不到推广。

本书从 GFRP 筋的基本力学性能出发,理论与试验相结合,对 GFRP 筋及 GFRP 筋结构在设计、使用过程中的工作机理进行了分析与探讨。

全书共分 8 章。第 1 章绪论,介绍了 GFRP 筋和 GFRP 筋结构的研究现状及 GFRP 筋在恶劣环境下的劣化机理与耐久性研究现状;第 2 章介绍了 GFRP 筋的力学性能;第 3 章介绍了碱环境下 GFRP 筋受压性能;第 4 章介绍了盐环境下 GFRP 筋受压性能;第 5 章介绍了 GFRP 筋混凝土短柱轴心受压性能;第 6 章介绍了 GFRP 筋混凝土中长柱轴心受压性能;第 7 章介绍了 GFRP 筋混凝土柱偏心受压性能试验;第 8 章介绍了海水环境下 GFRP 筋混凝土柱轴心受压性能试验。

感谢在本书成书过程中给予巨大帮助的同事以及出版社的编辑。感谢研究生刘威震、杨泽宇、回祥硕、张美娇、朱洁、梁倩倩、谷翠鹏、刘博强、李京龙等

对书稿文字的校对工作。

本书是作者和合作者多年的研究工作总结。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(51578347)、山东省泰山学者优势特色学科人才团队支持计划项目(鲁政办字[2015]162号)、辽宁省高等学校创新团队支持计划项目(LT2015023)、辽宁省自然科学基金项目(2015020578)、辽宁“百千万人才工程”培养项目(2014901245)和沈阳建筑大学专著基金项目的资助,在此一并表示感谢。

希望本书的出版能够对从事 FRP 结构领域的科研人员、工程技术人员和高校相关专业的师生有所帮助。由于作者水平有限,时间仓促,书中疏漏之处在所难免,恳请读者不吝赐教、指正。

孙丽、张春巍、刘莉
2017 年于沈阳建筑大学

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 FRP 筋简介	3
1.2.1 基本情况	3
1.2.2 FRP 筋优缺点与应用	5
1.3 FRP 筋研究现状	7
1.3.1 国外研究现状	7
1.3.2 国内研究现状	11
1.4 混凝土材料劣化机理与耐久性研究现状	16
1.4.1 恶劣环境下混凝土材料的劣化机理	16
1.4.2 混凝土材料耐久性研究现状	18
1.5 FRP 材料劣化机理与耐久性研究现状	21
1.5.1 恶劣环境下 FRP 筋劣化机理	21
1.5.2 FRP 筋耐久性研究现状	22
1.6 FRP 配筋混凝土结构简介	23
1.7 FRP 配筋混凝土结构寿命预测	24
参考文献	25
第2章 GFRP 筋力学性能	31
2.1 前言	31
2.2 光圆 GFRP 筋受压性能	31
2.2.1 试验材料与试验方法	31
2.2.2 试验结果与分析	32
2.2.3 GFRP 筋抗压强度理论	34
2.2.4 小结	35
2.3 带肋 GFRP 筋受压性能	36
2.3.1 试验材料与试验方法	36
2.3.2 试验结果与分析	36

2.3.3 GFRP 筋徐变失效	39
2.3.4 小结	39
参考文献	40
第3章 碱环境下 GFRP 筋受压性能	41
3.1 前言	41
3.2 试验概况	41
3.3 试验结果与分析	42
3.3.1 试验现象	42
3.3.2 受压破坏形态	43
3.3.3 试验数据处理与分析	44
第4章 盐环境下 GFRP 筋受压性能	49
4.1 前言	49
4.2 氯盐环境下持续浸泡试验	49
4.2.1 试验概况	49
4.2.2 试验数据处理与分析	50
4.3 氯盐环境下干湿交替循环试验	52
4.3.1 试验简介	52
4.3.2 试验数据处理与分析	53
4.4 试验误差讨论	56
4.5 小结	57
第5章 GFRP 筋混凝土短柱轴心受压试验	58
5.1 前言	58
5.2 试验概况	58
5.2.1 GFRP 筋材料试验	58
5.2.2 GFRP 筋混凝土短柱设计	59
5.2.3 试验加载方案	61
5.3 GFRP 筋混凝土短柱轴心受压试验结果与分析	62
5.3.1 破坏形态	62
5.3.2 试验结果与分析	64
5.3.3 荷载-变形关系	65
5.3.4 应变分布	66
5.3.5 承载力影响因素	69

5.4 小结	69
第6章 GFRP 筋混凝土中长柱轴心受压试验	71
6.1 前言	71
6.2 试验概况	71
6.2.1 GFRP 筋材料试验	71
6.2.2 GFRP 筋混凝土中长柱设计	72
6.2.3 试验加载方案	77
6.3 GFRP 筋混凝土中长柱轴心受压试验结果与分析	78
6.3.1 破坏形态	78
6.3.2 极限承载力	82
6.3.3 荷载-侧向挠度曲线	85
6.3.4 GFRP 筋的荷载-应变关系	87
6.3.5 混凝土的荷载-应变关系	92
6.3.6 GFRP 筋与混凝土的荷载-应变关系	96
6.3.7 箍筋的荷载-应变关系	99
6.4 小结	100
第7章 GFRP 筋混凝土柱偏心受压试验	102
7.1 前言	102
7.2 试验概况	102
7.2.1 GFRP 筋材料试验	102
7.2.2 GFRP 筋混凝土偏心受压柱设计	103
7.2.3 试验加载方案	108
7.3 GFRP 筋混凝土柱偏心受压试验结果与分析	110
7.3.1 破坏形态	110
7.3.2 试件的荷载-侧向挠度关系	121
7.3.3 GFRP 筋的荷载-应变关系	122
7.3.4 混凝土的荷载-应变关系	127
7.3.5 GFRP 筋体与对应位置混凝土的荷载-应变关系	134
7.4 小结	136
第8章 海水环境下 GFRP 筋混凝土柱轴心受压试验	138
8.1 前言	138
8.2 试验概况	138

8.2.1	GFRP 筋材料试验	138
8.2.2	海水环境下 GFRP 筋混凝土柱设计	138
8.2.3	试验加载方案	148
8.3	试验结果分析	149
8.3.1	破坏形态	149
8.3.2	试验结果	152
8.3.3	混凝土柱荷载-变形关系	153
8.3.4	不同浸泡时间下混凝土荷载-应变关系	155
8.3.5	不同浸泡时间下 GFRP 筋荷载-应变关系	157
8.3.6	GFRP 筋混凝土荷载-应变关系	160
8.4	小结	162

第 1 章 绪 论

1.1 概述

混凝土自问世以来,已有 150 年的悠久历史,发展速度迅速、应用广泛,最典型的例子就是钢筋混凝土结构在土木工程中的应用,由于钢筋与混凝土这两种材料的温度系数接近(钢 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$; 混凝土 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$),当温度变化时,钢筋与混凝土之间不会产生较大变形而破坏粘结作用,同时钢筋混凝土结构还有取材容易、耐久性较好、整体性好等特点,但是钢筋混凝土结构也存在很多缺点,主要是钢筋混凝土结构抗裂性较差,构件在正常使用时往往带裂缝工作,钢筋往往会被侵蚀离子腐蚀生锈破坏,导致结构承载力降低,严重时造成重大灾害,带来人员伤亡以及重大经济损失。具体的破坏如图 1.1 所示。钢筋混凝土结构的腐蚀破坏对全世界造成的损失巨大,成为了一个亟待解决的问题^[1]。

美国国家材料顾问委员会在 1987 年混凝土耐久性的报告中指出,全美境内超过 20 万座混凝土桥梁都受到了钢筋锈蚀的影响,在这 20 多万座桥梁中有不少工作几年就发生了钢筋混凝土锈蚀胀裂现象,并且仍然以每年 3 万座桥梁的速度递增。有数据统计结果显示,美国 20 世纪 90 年代时期的 60 万座桥中,多数出现钢筋腐蚀现象,经调查是由去冰盐引起的钢筋腐蚀^[2],并且因钢筋腐蚀导致钢筋混凝土结构每年的修复费用达到上百亿美元以上,造成很大的经济损失^[3]。与此同时,加拿大有关停车场的混凝土耐久性问题也证实本国的停车场混凝土结构出现腐蚀破坏情况往往非常早,绝大部分都没有达到使用期限。澳大利亚、英国等处于海洋环境与温暖气候条件下的地区,也有类似的统计结果^[4],与它们情况相同的还有很多国家,它们的桥梁、隧道、码头等结构都受到了各种酸碱盐等腐蚀性介质的侵蚀。混凝土耐久性会议也曾经指出过,在全世界范围内钢筋混凝土破坏的因素有酸碱盐等各种强腐蚀性介质对钢筋的化学作用、大气湿度的影响和气候温度的影响等。

由于钢筋腐蚀造成重大经济损失,甚至人员伤亡,世界各国和地区为防止钢筋锈蚀造成重大损害都相应采取了一些具体措施,尽管整体上取得了一定的成效,但钢筋混凝土结构自身耐腐蚀问题仍然未能彻底解决。通过大量地科学试验研究,人们开始认识到从根本上解决钢筋混凝土结构锈蚀问题,取决于结构材料自身抵抗侵蚀离子的能力,因此世界各国与地区寻求一种不仅强度高而且自身耐

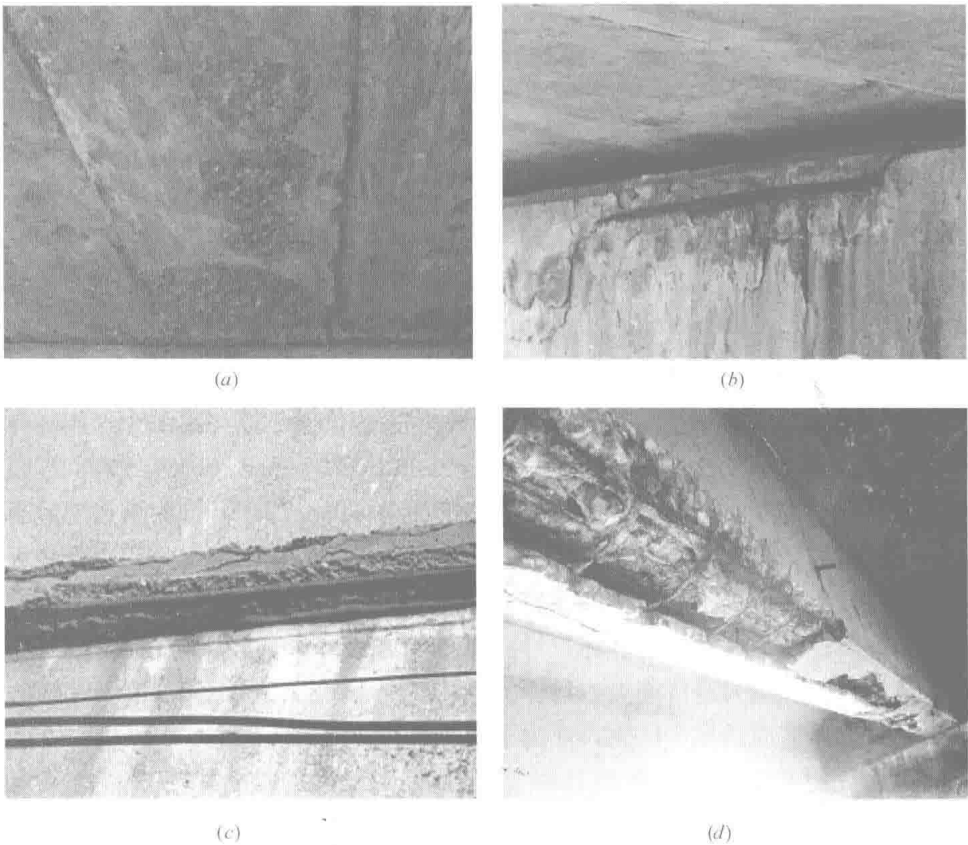


图 1.1 钢筋锈蚀导致结构的破坏

Fig. 1.1 Structure failures caused by corrosion of reinforcement

(a) 板下钢筋锈蚀; (b) 墙面钢筋锈蚀; (c) 河堤钢筋锈蚀; (d) 梁下钢筋锈蚀

腐蚀性强的材料，从而彻底地解决钢筋混凝土结构腐蚀问题。

纤维塑料增强筋 (Fiber Reinforced Polymer, 以下简称 FRP 筋) 是一种新型材料, 由于 FRP 筋密度低、强度高、耐腐蚀、抗疲劳等特点, 不仅可以在酸、碱、盐等单一环境条件下很好地使用, 而且可以在几种条件同时存在的复杂环境条件中长期使用, 发挥了良好性能, 这是钢筋难以比拟的, 是一种替代钢筋用于混凝土结构中的理想材料, 可以从根本上解决混凝土结构中钢筋的锈蚀问题, 提高混凝土结构耐久性。20 世纪 60 年代后期, 一些学者开始将树脂应用在混凝土中, 主要是对树脂聚合物浸渍混凝土的研究, 但由于钢筋与树脂聚合物混凝土之间的导热性能有区别, 因此不能够广泛运用, 存在一定局限性, 从而促使人们对 FRP 筋进行深入研究。FRP 筋被土木领域认可开始于 20 世纪 70 年代, 到 20 世纪 80 年代, FRP 筋开始应用在土木工程领域中, 近年来世界各国土木领域的学者将 FRP 广泛应用在结构加固方面, 虽然我国在土木结构中应用 FRP 复合材料起步晚, 但发展很快, 并取得了丰硕的研究成果。

综上所述, FRP 筋的研究已取得一定的研究成果, 在混凝土结构中的应用越来越广泛, 在土木工程领域发挥的作用也越来越大, 所以需要对 FRP 筋进一步深入研究, 将 FRP 筋更合理的应用于混凝土构件中, 更好地发挥作用, 也能带来良好的经济效益。

1.2 FRP 筋简介

1.2.1 基本情况

FRP 筋是由多股连续长纤维(玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等)与树脂基体通过一定的化学成型工艺按不同混合比, 同时加入促进剂等各种添加剂这一系列步骤拉挤而成^[5]。FRP 筋中的多股连续长纤维主要的作用就是增加韧性以及 FRP 筋本身的强度, 可以有效地抵御外荷载的作用。FRP 筋中的树脂基体主要的作用就是把多股连续长纤维粘在一起, 可以使纤维聚合起来传递荷载同时保护纤维免受伤害。树脂具体种类分为热塑性和热固性, 主要有聚酯树脂、环氧树脂及聚酰胺树脂等。目前在工程应用方面, 可以根据不同的工程需要, 选择不同组分以及最为适宜的微观结构来获得高比强、高比模等优于传统材料的性能, 其中应用较为广泛的 FRP 筋主要有碳纤维增强塑料筋(CFRP 筋)、玻璃纤维增强塑料筋(GFRP 筋)及芳纶纤维增强塑料筋(AFRP 筋)^[6], 同时还有钢绞线-GFRP 复合筋、CG-FRP 混杂筋^[7]、玄武岩纤维增强塑料筋(BFRP 筋)^[8], 以及 FRP-OFBG 智能筋^[9]等(表 1.1)。

常用纤维的主要力学性能
Mechanical properties of fiber

表 1.1
Table 1.1

名称	相对密度	抗拉强度 /GPa	模量 /GPa	热膨胀系数 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	延伸率 /%	比强度 /GPa	比模量 /GPa
玻 高强	2.49	4.6	84	2.9	5.7	1.97	34
璃 低导	2.55	3.5	74	5	4.8	1.37	29
纤 高模	2.89	3.5	110	5.7	3.2	1.21	38
维 抗碱	2.68	3.5	75	7.5	4.8	1.31	28
碳 普通	1.75	3.0	230	0.8	1.3	1.71	131
纤 高强	1.75	4.5	240	0.8	1.9	2.57	137
维 高模	1.75	2.4	350	0.6	1.0	1.37	200
极高模	2.15	2.2	690	1.4	0.5	1.02	321
芳 Kelvar49	1.45	3.6	125	2.5~4.0	2.8	2.48	86
纶 Kelvar29	1.44	2.9	69	—	4.4	2.01	48
纤维 HM-50	1.39	3.1	77	—	4.2	2.23	55
钢 HRB400	7.8	0.42	200	12	1.8	0.05	26
筋 钢绞线	7.8	1.86	200	12	3.5	0.24	26

日本曾经研制了碳纤维绞线以及棒形碳纤维这两种碳纤维增强塑料筋。通过对纤维进行拉挤，可以生成棒形碳纤维，其表面一般有三种处理形式，光滑、缠丝、勒痕。通常棒形碳纤维的抗拉强度为 2000MPa，弹性模量大约为 150GPa，极限延伸率为 2%，大部分筋的直径为 12mm，10mm，8mm。对于碳纤维绞线，主要是由多股单向纤维拉挤而成，而一股纤维组成的纤维筋一般直径较小。

常用树脂基体的性能
Properties of resin matrix
表 1.2
Table 1.2

名称	相对密度	抗拉强度 /GPa	模量 /GPa	延伸率 /%	抗压强度 /MPa	抗弯 强度	特性
环氧	<1.15	<85	3.2	5	<110	<130	粘结力强、浸润性好
酚醛	1.3	42~64	3.2	2	<110	<120	耐高温、绝缘、廉价
聚酯	<1.4	<71	2.1~4.5	5	<190	<120	工艺性能好、廉价
聚酰胺	1.1	70	2.8	60	90	100	热塑性好树脂
聚丙烯	0.9	35~40	1.4	200	56	<56	热塑性好树脂

AFRP 筋主要有拉挤型芳纶纤维筋、预应力芳纶纤维筋和编织型芳纶纤维筋三种。

预应力芳纶纤维筋与拉挤型芳纶纤维筋都是由日本研制发展的。拉挤型芳纶纤维筋相比前者应用更加的广泛，种类也更加多样化。光圆的极限强度为 1800MPa，弹性模量为 50GPa。对于绞线，其强度最大值为 2000MPa，弹性模量达到 40GPa，而且绞线的延伸率远高于其他种类的 FRP 筋。

对于不同 FRP 筋，其性能各不相同，然而 FRP 材料还是有一定的内在联系也具有一定相似的地方。不同种类的 FRP 筋、钢筋、钢绞线具体力学性能指标，FRP 材料耐久性指标见表 1.4。

FRP 筋、钢筋、钢绞线力学性能指标
Mechanical properties of FRP bars、steel bars and steel strand
表 1.3
Table 1.3

材料种类	普通钢筋 /MPa	钢绞线 /MPa	GFRP 筋 /MPa	AFRP 筋 /MPa	CFRP 筋 /MPa
极限抗拉强度	490~700	1400~1890	480~1600	1200~2550	600~3700
屈服强度	280~420	1050~1400			
受拉弹性模量	210	180~200	35~65	40~125	120~580
极限延伸率	>10.0	>4.0	1.2~3.1	1.9~4.4	0.5~1.7
轴向温度膨胀系数	11.7	11.7	8.0~10.0	-6.0~2.0	0.6~1.0
横向温度膨胀系数	11.7	11.7	23.0	30.0	25.0
应力松弛率		3.0	1.8	7.0~20.0	1.0~3.0

FRP 材料的耐久性能指标
The durability indicators of FRP material

表 1.4
Table 1.4

	CFRP	AFRP	GFRP
耐酸性能	100%	70%	100%
耐碱性能	95%	92%	15%
冻融循环	100%	100%	100%
紫外线辐射	100%	45%	81%
高温性能	80%	75%	80%
动态疲劳	85%	70%	23%

从表 1.4 中可以看出, FRP 材料的韧性要低于钢筋及钢绞线, 但是极限抗拉强度却相对较高, 温度膨胀系数也高出钢筋许多; FRP 材料不易发生疲劳破坏。CFRP 材料的耐久性能要高于 AFRP 与 GFRP 材料, 更加不易受外界环境的影响。AFRP 材料对于紫外线辐射的影响比较敏感, 而 GFRP 材料的耐碱性和耐疲劳性较差。图 1.2 为不同种类的 FRP 筋图片。

1.2.2 FRP 筋优缺点与应用

FRP 筋与人们广泛使用的钢筋具有很多不同的特点。为了能够更好地在建筑工程领域发挥其作用, 充分体现其优越性和掌握 FRP 筋的优缺点是非常有必要的。

(1) FRP 筋的优点

① 轻质高强。纤维材料的比强度(拉伸强度/比重)较高, 一般为钢材的 20~50 倍, 轻质高强性能十分显著。FRP 筋中以 CFRP 筋抗拉强度最高, 一般能够达到 1500~2400MPa, 远远高于普通钢筋, 而密度仅仅为钢筋的 1/6~1/4。

② 耐腐蚀性能好。由于树脂基体对纤维提供了很好的保护作用, FRP 筋具有良好的耐腐蚀能力, 能够抵抗大气、水和一定浓度的酸、碱、盐溶液的侵蚀。这一点在化工建筑、沿海建筑和地下建筑等工程结构中已得到实践证明。

③ 电磁绝缘性好。FRP 材料在高频下能够保持良好的介电性, 微波透过性好, 在一些特殊建筑(如雷达站、地磁观测站、医疗核磁共振设备结构等)中, 用以替代钢筋显得尤为合适。

④ 抗疲劳性能良好。通过抗疲劳性能试验证明, CFRP 筋和 AFRP 筋的抗疲劳性能都远远优于钢筋, 而 GFRP 筋略低于钢筋, 但也能够满足结构构件对抗疲劳性能的要求, 具有较长的使用寿命。

⑤ 成型工艺简单、灵活, 可设计性好。FRP 筋可以根据不同的使用环境及特殊的性能要求, 灵活选择成型工艺, 设计出不同形式的结构产品, 基本上可满足

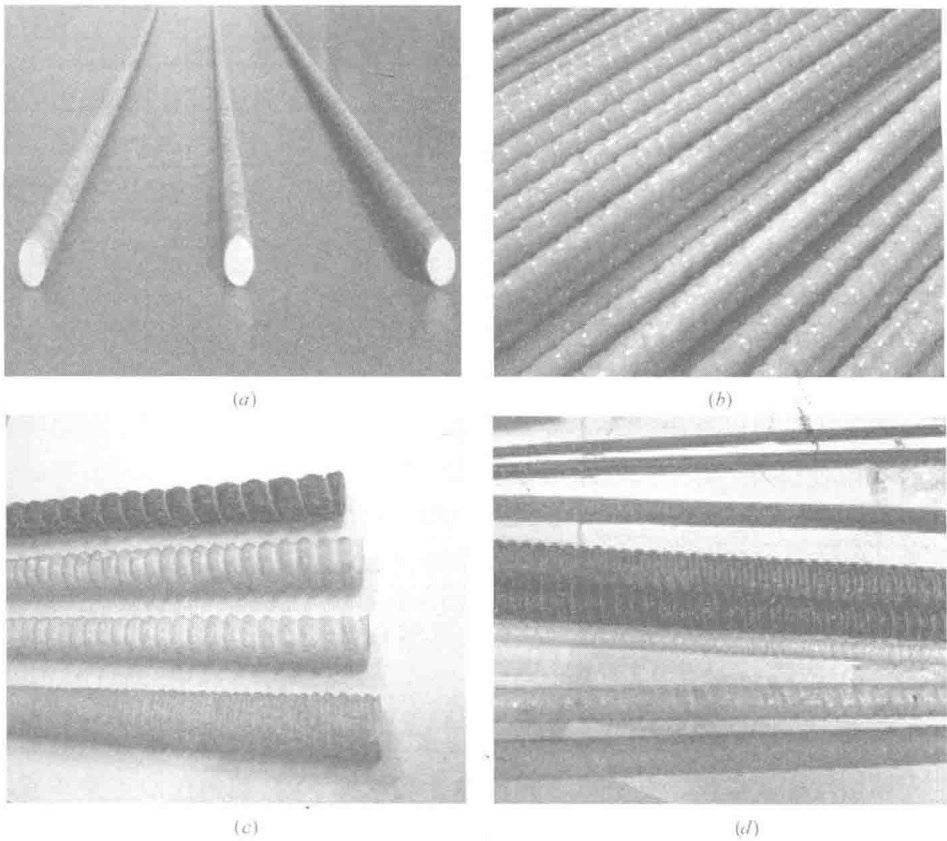


图 1.2 不同种类的 FRP 筋

Fig. 1.2 Different types of FRP bars

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

足各种不同工况下的产品使用性能要求。同时 FRP 产品制作一次成型，有别于金属材料使用前所需进行的二次加工，大大降低了产品加工处理过程中的物质消耗，从而减少人力物力的浪费，更凸显其工艺优越性。

(2) FRP 筋的缺点

① 脆性破坏。FRP 筋为线弹性材料，在进行拉伸、压缩性能试验过程中不存在屈服阶段，呈现脆性破坏特征，破坏突然，没有预兆，导致在工程应用中结构安全性降低。

② 弹性模量相对较低。FRP 筋的弹性模量一般约为钢筋的 25%~75%，与钢筋相比，FRP 筋在受力过程中出现较大的变形，不能按照传统的强度设计理论进行 FRP 筋混凝土结构设计，致使 FRP 筋强度高的性能得不到充分发挥。

③ 抗剪强度较低。FRP 筋沿纤维方向和垂直纤维方向上剪切强度有很大差

异,层间拉伸强度和层间剪切强度仅为抗拉强度的 5%~20%,使得应用中 FRP 构件间的连接成为突出问题,在配有 FRP 筋的混凝土结构中,必须考虑由 FRP 筋抗剪能力不足而对混凝土结构破坏造成的影响。

④ 热稳定性能较差。作为基体的树脂大多在高温下会发生软化,当工作温度超出一定范围后,FRP 筋的抗拉强度将会显著下降。通用聚酯 FRP 筋在 50℃ 以上强度明显下降,通用型环氧 FRP 一般不宜超过 60℃,采用耐高温树脂后,长期工作温度可以达到 200~300℃,但就防火性能来说,还需要进一步进行改进研究。

⑤ 老化现象明显。作为塑料产品的共同缺陷,在紫外线、化学介质、风沙雨雪、机械应力等作用下,将会出现不同程度的老化现象,容易造成力学性能降低。

⑥ 横向热膨胀系数较大。由于纤维与树脂两种组分的特性,FRP 筋纵向热膨胀系数较低,但横向热膨胀系数较大,进而导致 FRP 筋与混凝土间的粘结性能受温度影响较明显。

(3) FRP 筋的应用

作为一种性能优越的新型复合材料,FRP 筋应用范围十分广泛^{[10]~[14]}:

① 利用其轻质高强耐腐蚀的特性,可用作大跨度混凝土桥梁大梁和板中的配筋或外部加固筋,还可用作超大跨度桥梁的拉索,有效降低结构自重的同时,避免普通钢筋所带来的锈蚀问题。

② 用作预应力筋,在预应力构件中可以有效减小由混凝土徐变和收缩引起的预应力损失。

③ 用作水泥路面的加强筋,能够有效降低由除冰盐所造成的普通钢筋锈蚀引起的混凝土路面剥落问题,提高路面的使用性和耐久性。

④ 由于 FRP 筋阻燃、抗静电、易切割且不产生火花,可以用作煤矿等坑道的临时支护以及地铁项目中盾构端头井围护结构。

⑤ 利用 FRP 筋封装 FBG 所具备的智能特性,将其应用于大型结构受力筋时,能够实时监测结构工作状态,及时进行修复、加固,提高结构安全性。

⑥ 用作地锚,应用于山体锚固工程。

1.3 FRP 筋研究现状

1.3.1 国外研究现状

(1) FRP 筋的力学性能研究

Uomoto 等人^[15]在 40℃ 的碱溶液下,将 GFRP 筋浸泡 120d 后,对筋体进行

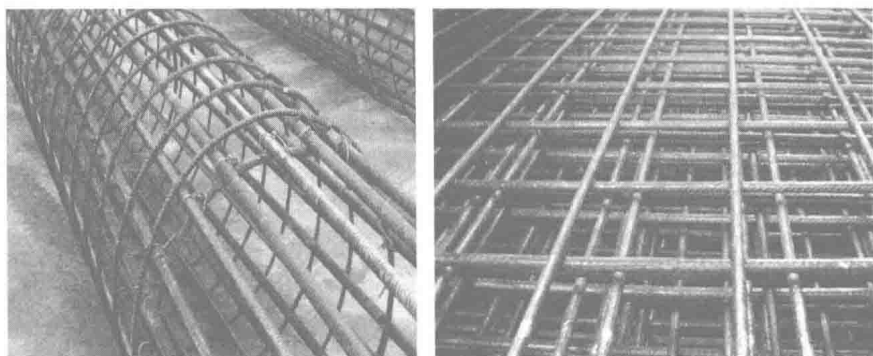


图 1.3 工程应用中的纤维筋

Fig. 1.3 The application of FRP bars in civil engineering

拉伸试验, 试验结果表明, 浸泡后的 GFRP 筋拉伸强度损失严重, 浸泡后的拉伸强度仅为原 GFRP 筋拉伸强度的 30%, 主要原因是在碱溶液中长时间浸泡, 造成了筋体产生裂缝, 钠离子进入了筋体的内部。国外一些学者^[16]利用 FRP 筋与光纤光栅相结合制作出新型多功能材料, 利用 FRP 筋材料本身的特性与光纤光栅的灵敏性制作出监测材料, 这种材料比传统的应变片更有优势, 可以用来长期的结构健康监测。Nanni 等^[17]人对各种 FRP 筋进行了静态拉伸性能试验, 由试验结果绘制出玻璃纤维筋、芳纶纤维筋、聚乙烯纤维筋各自应力与应变关系曲线, 根据各自应力-应变曲线得出各自材料的弹性模量、材料泊松比、各材料相对应的极限拉伸长度以及极限强度。D. H. Deitz 等^[18]人对 GFRP 筋进行受压试验研究, 由试验结果推导出了 GFRP 筋极限抗拉承载力与压缩长度之间的计算公式。Rfalabella^[19]对各种环境下应用的玻璃纤维进行抗拉强度试验, 结果表明在臭氧、盐水、碱性、高温、紫外线等条件下, 玻璃纤维的抗拉强度没有明显下降。Nardone. Fabio 等^[20]将 GFRP 布放置于水中, 测量不同水温下 GFRP 布的拉伸强度, 试验结果表明, 随着水温增加, GFRP 布层数对拉伸强度的影响减弱; Baena. M 等^[21]人对 GFRP 筋加固混凝土试件进行拉伸强度试验, 证明 GFRP 筋配筋率对试件的裂缝以及试件变形情况均有影响。Rahman 等^[22]研究了 CFRP 材料处于 50% 极限荷载下浸泡在氯化钠溶液中的耐久性能, 结果表明在荷载作用下, 材料在腐蚀性介质中将会提前发生破坏。Mallick 等^[23]对 FRP 筋进行抗压强度、抗拉强度试验, 试验结果表明, 不同种类的 FRP 筋抗压强度、抗拉强度不同, 其中 CFRP 筋抗压强度是抗拉强度的 2/3, GFRP 筋的抗压强度是抗拉强度的 1/2 左右, 而 AFRP 筋的抗压强度不足抗拉强度的 1/5。

(2) FRP 筋的粘结滑移试验研究

Katz^[24]对不同表面形式的 FRP 筋混凝土试件进行粘结滑移性能试验, 并将钢筋混凝土试件作为参照对比, 结果表明, 表面形式为横肋的 FRP 筋, 与混凝土