

湖北省学术著作出版专项资金资助项目
混凝土材料科学与工程技术研究丛书(第1期)

持续荷载与环境作用下 混凝土梁中 GFRP 筋抗拉性能研究

Study on Tensile Properties of GFRP Bars Embedded
in Concrete Beams Under Sustained Load and Environmental Effects

何雄君 代力 著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

混凝土材料科学与工程技术研究丛书(第1期)

持续荷载与环境作用下混凝土梁中 GFRP 筋抗拉性能研究

何雄君 代 力 著

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 简 介

近年来,FRP(Fiber Reinforced Polymer)筋以其轻质、高强及抗疲劳等优良特性,应用越来越广泛,特别是在路面工程、海洋工程、岩土工程以及桥梁工程中具有广阔的应用前景。FRP 筋作为一种新型复合材料,用其替代钢筋配置于混凝土中,是解决钢筋混凝土结构由于钢筋锈蚀而引起的耐久性问题的有效途径。然而对于 FRP 筋这种新型材料来说,目前最为迫切需要研究的是其耐久性能,因为一种新型材料能否应用于工程,耐久性能是一个重要指标。

本书对性价比最高且最有可能在土木工程中广泛应用的 GFRP 筋在实际混凝土环境中不同侵蚀条件下的长期抗拉性能进行了较为系统和深入的研究。本书主要包括:GFRP 筋基本力学与耐久性能试验研究、弯曲荷载与环境耦合作用下混凝土中 GFRP 筋抗拉性能试验研究、GFRP 筋加速老化与自然老化相关性研究、混凝土环境中 GFRP 筋长期抗拉强度理论模型研究。本书可供土木工程相关专业的研究人员、工程技术人员、规范编制人员以及学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

持续荷载与环境作用下混凝土梁中 GFRP 筋抗拉性能研究/何雄君,代力著. —武汉:武汉理工大学出版社,2017.10

ISBN 978-7-5629-5091-2

I. ①持… II. ①何… ②代… III. ①钢筋混凝土梁-抗张性能-研究
IV. ①TU375.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 220116 号

项目负责人:陈军东

责任编辑:陈 硕

责任校对:余士龙

封面设计:付 群

出版发行:武汉理工大学出版社

地 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开 本:787×960 1/16

印 张:11

字 数:163 千字

版 次:2017 年 10 月第 1 版

印 次:2017 年 10 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元(平装)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

• 版权所有,盗版必究 •

前 言

近年来,FRP(Fiber Reinforced Polymer,简称 FRP)筋以其轻质、高强及抗疲劳等优良特性,在土木工程中应用越来越广泛,特别是在路面工程、海洋工程、岩土工程以及桥梁工程中具有广阔的应用前景。FRP 筋作为一种新型复合材料,用其替代钢筋配置于混凝土中,是解决钢筋混凝土结构由于钢筋锈蚀而引起的耐久性问题的有效途径。然而对于 FRP 筋这种新型材料来说,目前最为迫切需要研究的是其耐久性能,因为一种新型材料能否应用于工程,耐久性能是一个重要指标。FRP 筋耐久性能较钢筋优越得多,但并不代表其本身不受环境侵蚀,只是它与钢筋的腐蚀机理不同。

鉴于此,本书结合国家自然科学基金项目——“混凝土梁中 GFRP 筋抗拉强度演化机理研究”(编号:51178361),对性价比最高且最有可能在土木工程中广泛应用的 GFRP 筋在(实际环境中)不同侵蚀条件下的长期力学性能进行了较为系统和深入的研究。综合起来,本书主要做了以下几个部分的工作:

(1)在查阅大量国内外文献的基础上,对 GFRP 筋在侵蚀环境下的耐久性试验方法、耐久性预测模型、耐久性理论研究等方面的发展研究现状进行了系统的回顾和总结。

(2)GFRP 筋基本力学与耐久性能试验研究。

为了与后期耐久性试验数据进行对比分析,首先对厂商提供的初始 GFRP 筋进行基本力学性能测试,包括抗拉强度、弹性模量以及延伸率,并对试验结果和破坏机理进行了分析。同时将同批次生产的 GFRP 筋放置在碱溶液、盐溶液中进行加速老化试验,以模拟混凝土碱环境和海水环境的作用,主要分析腐蚀环境(盐溶液、碱溶液)、环境温度(20°C 、 40°C 、 60°C)、浸泡时间(4d、18d、37d、92d 和 183d)等因素对 GFRP 筋抗拉性能的影响。试验结果表明:GFRP 筋的拉伸破坏为断裂破坏,应力-应变关系基本呈线性变化。对腐蚀后的 GFRP 筋进

行拉伸测试,结果其破坏形态和破坏模式与材料性能试验试件的破坏模型类似,没有发生明显改变;在 20℃、40℃和 60℃的碱溶液、盐溶液中浸泡 183d 后,GFRP 筋的抗拉强度出现了不同程度的退化:盐溶液中 GFRP 筋抗拉强度分别下降了 19.3%、26.3%、36.6%;相比盐溶液,GFRP 筋在碱溶液中抗拉强度的退化程度更为明显,分别下降了 22.6%、31.7%、43.8%。溶液类型、环境温度以及侵蚀时间等因素对 GFRP 筋抗拉弹性模量的影响并不显著。通过扫描电子显微镜(SEM)对筋体微观结构进行观测后发现:在浸泡之前,GFRP 筋中纤维和树脂结合较为紧密;浸泡之后,GFRP 筋纤维与树脂之间的界面变得松散,纤维和周围树脂之间出现了脱黏现象,而且随着浸泡时间的增加和环境温度的升高,脱黏现象更加明显。GFRP 筋在碱溶液和盐溶液中的退化机理较为相似,但在相同环境温度、相同浸泡时间等条件下,碱溶液对 GFRP 筋的侵蚀程度要大于盐溶液。

(3)弯曲荷载与环境耦合作用下混凝土 GFRP 筋抗拉性能试验研究。

对处于实际服役混凝土环境下 GFRP 筋抗拉性能的退化规律进行了较为系统的研究,主要分析了浸泡溶液(碱溶液、自来水)、环境温度(20℃、40℃、60℃)、弯曲荷载水平(0、25%)、工作裂缝、侵蚀时间(40d、90d、180d、300d)等因素对 GFRP 筋耐久性能的影响。同时结合扫描电子显微镜(SEM)和差示扫描量热法(DSC)等手段从微观角度对老化试验前后的 GFRP 筋进行观察与分析,在此基础上对混凝土环境中 GFRP 筋抗拉强度的退化机理进行了研究。试验结果表明:混凝土早期硬化阶段对 GFRP 筋抗拉强度的退化有一定程度的影响,但并不会引起 GFRP 筋抗拉强度的大幅退化。在室外自然老化环境中放置 60d、120d、180d、360d 后,混凝土梁试件中 GFRP 筋的抗拉强度分别下降了 3.8%、6.6%、7.4%、8.3%;相比室外自然老化环境而言,室内环境的温度和湿度均处于相对稳定的状态,GFRP 筋抗拉强度的退化出现在试验初期,试验过程中强度保留率始终保持在 93%以上,退化迹象并不显著。在 60℃的自来水环境中浸泡 40d、90d、180d、300d 后,荷载水平为 0 的混凝土包裹环境中 GFRP 筋的抗拉强度分别下降了 13.4%、17.7%、25.6%和 29.3%;与自来水环境相比,碱溶液中

GFRP 筋抗拉强度退化率分别增加了 1.9%、3.9%、2.8% 和 3.2%。碱溶液和自来水对混凝土包裹环境中 GFRP 筋的抗拉弹性模量的影响并不明显,部分试件出现弹性模量增大的现象。环境温度的升高加速了混凝土环境中 GFRP 筋抗拉强度的退化速率,且温度越高,加速趋势越明显。持续荷载对混凝土环境中 GFRP 筋抗拉强度的退化程度有一定的影响,且随着温度的升高,持续荷载所造成退化的效果愈加显著;在无持续荷载混凝土环境下,工作裂缝对 GFRP 筋抗拉强度的影响较小,随着持续荷载水平的增加,GFRP 筋抗拉强度退化速率加快,且有工作裂缝混凝土环境比无工作裂缝混凝土环境的退化趋势更加明显。

(4) GFRP 筋加速老化与自然老化相关性研究。

以抗拉强度为表征手段,采用灰色关联分析方法对 GFRP 筋在自然老化环境和加速老化之间的相关性进行定量分析,探讨了 GFRP 筋抗拉强度下降的主要环境因素,并得到了加速老化环境和自然老化环境之间的加速因子。分析结果表明:GFRP 筋自然老化与加速老化之间存在一定的相关性。从平均关联度看,GFRP 筋混凝土梁浸泡在水溶液环境中加速老化与自然老化的关联度较大,均在 0.8 以上,其中以温度为 60℃ 条件时与自然老化试验的关联度最大,达到了 0.862,可用 GFRP 筋混凝土梁浸泡在水溶液环境中来模拟自然老化试验,说明利用灰色关联分析对加速老化和自然老化的相关性进行定量分析是可行的。

(5) 混凝土环境中 GFRP 筋长期抗拉强度理论模型研究。

为了准确预测混凝土环境下 GFRP 筋抗拉性能退化规律,在第 4 章试验数据的基础上,基于 Fick 定律预测模型,通过引入含时间函数的随机变量,充分考虑基本可变量的不确定性,建立了混凝土环境下 GFRP 筋长期抗拉强度半概率可靠性预测模型。通过将试验数据与模型预测值进行对比分析,验证了本书所推导的考虑不确定因素的半概率可靠性预测模型的准确性;为真实混凝土环境下 GFRP 筋的抗拉强度预测及服役寿命预估提供了数据支持和理论依据。

何雄君 代力
2016 年 6 月

目 录

1	绪论	(1)
1.1	研究背景	(1)
1.2	FRP 筋简介	(3)
1.3	FRP 筋在工程中应用实例	(13)
1.4	国内外研究动态与应用现状	(16)
1.5	问题的提出	(23)
1.6	本书主要研究内容	(25)
2	FRP 筋耐久性研究综述	(27)
2.1	引言	(27)
2.2	FRP 筋耐久性试验方法的研究进展	(27)
2.3	影响 FRP 筋耐久性的主要因素	(30)
2.4	小结	(47)
3	GFRP 筋基本力学与耐久性能试验研究	(49)
3.1	引言	(49)
3.2	GFRP 筋力学与耐久性能试验	(50)
3.3	试验结果与分析	(56)
3.4	小结	(78)
4	弯曲荷载与环境耦合作用下混凝土梁中 GFRP 筋抗拉性能试验研究	(79)
4.1	引言	(79)
4.2	试验设计	(80)
4.3	试验结果与分析	(96)
4.4	小结	(121)
5	GFRP 筋加速老化与自然老化相关性研究	(123)
5.1	引言	(123)

5.2	GFRP 筋加速老化与自然老化抗拉性能变化规律	(123)
5.3	自然老化试验与加速老化试验的相关性	(126)
5.4	相关性评价	(133)
5.5	小结	(134)
6	混凝土环境中 GFRP 筋长期抗拉强度理论模型研究	(135)
6.1	引言	(135)
6.2	已有预测模型介绍	(136)
6.3	混凝土环境下 GFRP 筋抗拉强度预测模型	(139)
6.4	预测模型验证	(142)
6.5	小结	(145)
7	结论与展望	(146)
7.1	结论	(146)
7.2	展望	(149)
	参考文献	(150)

1 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 钢筋混凝土结构的耐久性问题现状

目前,钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土结构耐久性不满足使用要求、未到年限便发生破坏的主要原因,且已成为土木工程界普遍关注的灾害^[1]。1991年,Mehta教授在第二届混凝土耐久性国际会议上做了题为“混凝土耐久性——五十年进展”的报告,他在报告中将混凝土结构破坏的主要原因按重要性进行了递减排序:居首位的是钢筋锈蚀、其次是冻融循环以及侵蚀环境的物理化学作用。可见,混凝土耐久性受很多因素的影响,且这些因素复杂多样,但其中最主要的因素就是钢筋锈蚀。大量调查结果表明,钢筋锈蚀造成破坏涉及海港结构、水利工程、桥梁工程、公共和民用建筑等自然环境中的钢筋混凝土结构物^{[2][3]},钢筋锈蚀严重地影响了结构功能的正常发挥,从而造成混凝土结构的使用寿命大幅度降低,导致钢筋混凝土结构的各种事故、病害、破坏频繁发生。

目前国内外基础设施普遍面临着耐久性的问题,美国20世纪90年代混凝土基础设施工程总价值约为6万亿美元,每年所需的维修费约为3000亿美元;英国英格兰岛的中环线快车道上有11座高架桥,全长21km,总造价2800万英镑,因撒除冰盐引起腐蚀破坏,1992年的修补费用为4500万英镑,为造价的1.6倍,2004年的修补费高达1.2亿英镑,接近造价的6倍;在日本大部分地区,因为混凝土中的细骨料多使用海盐作为原料,使得钢筋锈蚀成为一个严重问题,通过调查冲绳地区的

177 座桥梁和 672 栋房屋后发现,桥面板和混凝土梁的损坏率达到 90% 以上,民用建筑的损坏率也超过 40%;在我国,基础建设投资方面的速度逐年加快,因此所面临的问题将更加严峻。据相关调查报告统计^[4],我国每年因腐蚀造成的损失高达 5000 亿元,占 GDP 的 5%,而到 2010 年,我国因腐蚀造成的经济损失已超过 9000 亿元,其中与钢筋锈蚀有关的比例达到了 40%。我国在役的混凝土桥梁出现钢筋锈蚀、混凝土开裂的现象相对普遍,例如北京西直门桥仅使用 20 余年,就因为护栏钢筋锈蚀、立柱开裂等原因不得不于 1999 年拆除重建;天津滨海的三座混凝土桥使用 8~10 年后,墩柱钢筋就发生了严重锈蚀,柱体保护层大面积剥落;台湾澎湖跨海大桥因预应力套管内水泥浆体的氯离子浓度超标 2~5 倍,导致钢绞线锈蚀严重,大桥出现裂缝及混凝土表面爆开,实际使用了 6 年就需要拆除重建,远没有达到 50 年的设计年限;上海四川路桥建于 20 世纪 20 年代,因为钢筋锈蚀和不均匀沉降等问题引起的耐久性损伤,于 1995 年进行检测加固;重庆綦江彩虹桥在使用不到 10 年就因吊杆锈蚀发生桥梁倒塌等^[5]。国外学者曾用“5 倍定律”形象地描述钢筋混凝土结构耐久性设计的重要性,即在设计阶段对钢筋防护节省 1 美元,那么就意味着发现钢筋锈蚀时采取措施将追加维修费 5 美元,混凝土表面顺筋开裂时采取措施将追加维修费 25 美元,严重破坏时采取措施将追加 125 美元^[6]。

综上所述,由于钢筋锈蚀所致结构性能退化或提前失效的案例在世界范围内都非常普遍,这不仅造成了国家巨大的经济损失,还间接地威胁着广大人民群众的生命财产安全,形成了重大的安全隐患。

1.1.2 解决钢筋锈蚀问题常采取的措施

为了防止钢筋的锈蚀,各国根据具体情况采取了相应的措施,主要包括以下三个方面^[7]:(1)严格控制混凝土的施工质量或使用高性能混凝土,从各个方面加强混凝土的密实性,控制水灰比,合理采用外加剂,如减水剂、引气剂等,以加强对钢筋的保护;(2)提高钢筋自身的防锈蚀性能,如在混凝土中掺入阻锈剂,采用环氧涂层钢筋或镀锌钢筋,或采用阴极保护法、电化学脱盐法等,以推迟锈蚀始发时间;(3)研

制使用新型材料。对于前两种方法,虽然在一定程度上能减缓钢筋的锈蚀,但终究只是权宜之计,在氯化物含量较高的地区钢筋锈蚀依然很严重,不能从根本上解决钢筋锈蚀问题。为了从根源上解决这个问题,达到治标先治本的目的,目前国内外土木工程界广泛采用纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer,以下简称 FRP)筋作为钢筋替代品或部分替代品^[8]。

1.1.3 FRP 材料耐久性研究的必要性

FRP 筋作为一种新型土木工程材料,以其高强、轻质、生产运输及安装便利等优点,开始在土木与建筑工程中得到应用,并受到工程界的广泛关注^{[9][10]}。凭借较好的耐腐蚀性能,FRP 材料目前一般应用在恶劣环境(除冰盐、近海、酸雨环境等)或特殊重要结构(核磁共振成像、防雷达干扰设施、地磁观测站等)中^[11]。但是由于 FRP 材料自身的一些缺点,例如脆性破坏、弹性模量低、成本偏高等,限制了 FRP 材料在工程中的广泛应用。然而对于 FRP 材料来说,目前最为迫切需要研究的是其耐久性能,因为一种新型材料能否应用于工程,耐久性能是一个重要指标。FRP 材料耐久性较钢筋优越得多,但并不代表其本身不受环境侵蚀,只是它与钢筋的腐蚀机理不同。

随着研究的不断深入,研究人员发现很多环境作用(如潮湿、酸、碱、盐溶液,紫外线等)对 FRP 材料的不利影响是不可忽视的。因此,随着 FRP 材料在土木工程结构中的应用越来越广泛,有必要对 FRP 材料的耐久性进行研究^{[12][13]}。鉴于此,本书对性价比最高、最有可能在土木工程中广泛应用的 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer,以下简称 GFRP)筋在不同环境条件下的耐久性能进行了深入和系统的研究。

1.2 FRP 筋简介

FRP 材料最早是由美国军方开始研发,且主要用于航空航天领域^[14]。民用建筑中使用 FRP 材料较晚,直到 20 世纪 60 年代末才开

始,目前国外已有不少实际工程案例。国内关于 FRP 筋的研究始于 20 世纪 80 年代,由于应用时间较短,目前还缺乏 GFRP 筋混凝土实际应用性能的长期有效数据的研究。

1.2.1 FRP 筋组成及分类

FRP 筋是由纤维材料和基体材料按照一定比例混合并经过一定工艺复合而成的高性能新型材料,其中纤维作为增强材料起加劲作用,基体起黏结、传递力的作用。根据复合材料中增强材料的形状,可以分为颗粒复合材料、层复合材料和纤维增强复合材料。目前工程结构中常用的纤维种类主要有玻璃纤维(Glass fiber)、碳纤维(Carbon fiber)、芳纶纤维(Aramid fiber)和混杂纤维(Hybrid fiber),基体材料主要有聚酯、环氧树脂、乙烯基酯、聚酯树脂等^[15],其中碳纤维的力学、物理性能均优于其他纤维,因此被称为“新材料之王”。目前国际上优质的碳纤维生产厂家主要集中在日本和美国等发达国家,国际碳纤维市场长期被东丽、三菱和东邦等日本企业占据。近几年,我国碳纤维原丝生产发展迅猛,制作工艺和生产技术也逐渐成熟,但是高性能产品与国际先进水平相比还存在一定的差距,产量不到世界碳纤维总产量的 1%,大量碳纤维产品仍依赖进口,再加上近年来国际组织对华实施严格的禁运,导致国内价格居高不下,难以进行推广应用,价格问题成为碳纤维作为 FRP 增强材料在土木工程中广泛应用的主要障碍。芳纶纤维耐腐蚀性能不如碳纤维,对紫外线敏感,并且容易发生徐变断裂,应力松弛较大,也不适合做应用推广。玻璃纤维在力学性能上虽然比不上碳纤维,但是因其价格便宜,是目前国内应用最为广泛的纤维种类。这也是本书选择试验材料的参考因素。

根据连续纤维种类的不同,现在常用的 FRP 筋主要有玻璃纤维增强塑料筋(GFRP 筋)、碳纤维增强塑料筋(CFRP 筋)、芳纶纤维增强塑料筋(AFRP 筋)、玄武岩纤维增强塑料筋(BFRP 筋)和混杂纤维增强塑料筋(HFRP 筋)^[16],如图 1.1 所示。

根据加工方法的不同,FRP 筋还可以分为以下几种^[15]:①将若干股 FRP 筋用环氧树脂黏结制作成预应力 FRP 筋;②为增加 FRP 筋与

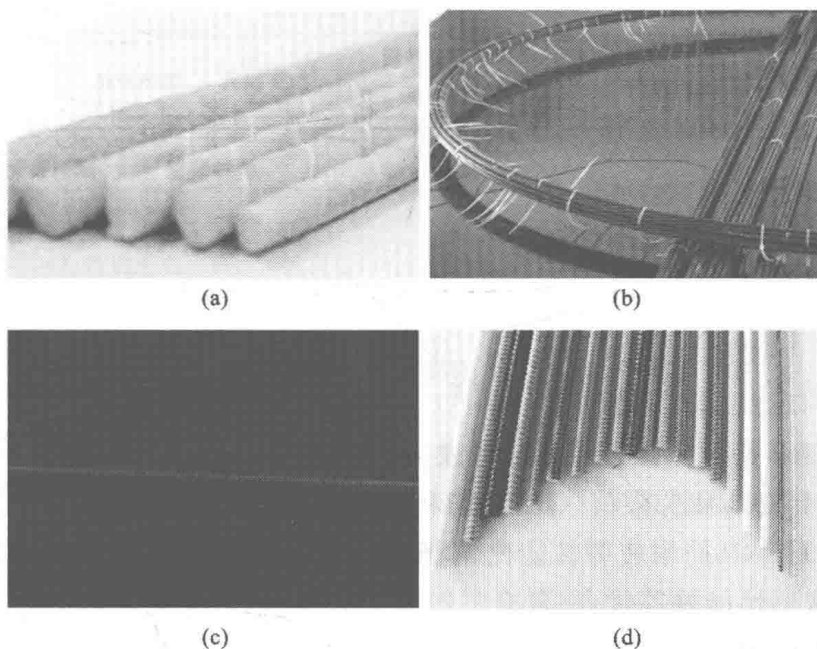


图 1.1 不同种类 FRP 筋

(a)玻璃纤维增强塑料筋(GFRP);(b)玄武岩纤维增强塑料筋(BFRP);

(c)碳纤维增强塑料筋(CFRP);(d)芳纶纤维增强塑料筋(AFRP)

混凝土的黏结性能,在其表面做出螺纹的螺纹 FRP 筋;③截面形式为矩形,对其表面进行滚花处理的矩形 FRP 筋;④为增强 FRP 筋与混凝土的黏结强度,对其表面进行黏砂处理的黏砂 FRP 筋。

1.2.2 FRP 筋制作工艺

FRP 筋的生产工艺类型主要包括编织型、绳索型、拉挤型等^[18]。编织型 FRP 筋是利用编织机将纤维束浸胶后编织成辫子状经固化而成;绳索型 FRP 筋是将纤维束浸胶,而后经制绳工艺制成绳索状固化而成;拉挤型 FRP 筋是将纤维束浸胶后经热成型膜在一定张力下挤压成型。目前大部分公司和企业都是通过拉挤成型工艺来生产 FRP 筋,拉挤成型工艺流程一般是从纤维束开始,然后经过浸润、压膜、固化、切割等步骤,最后得到成品^[19]。采用拉挤成型工艺的流程如图 1.2 所示。

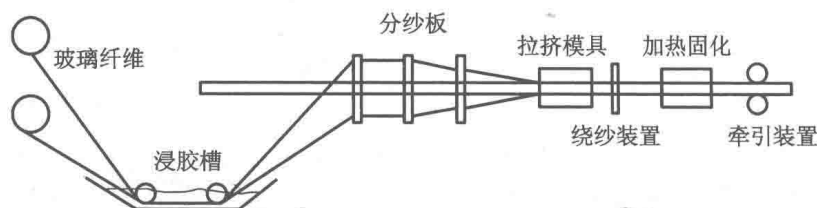


图 1.2 拉挤成型制作 GFRP 筋工艺流程图

1.2.3 FRP 筋基本力学特征

FRP 筋抗拉强度高、耐腐蚀、非磁性、重量轻(约为钢筋密度的 1/4),具有高疲劳限值(CFRP 筋和 AFRP 筋的耐疲劳性能是钢筋的 3 倍,而 GFRP 筋耐疲劳性能比钢筋差)、低导热性、低导电性(玻璃、芳纶)、减震性能好等优点(复合材料自振频率高,可避免引起共振,同时内部摩擦较大,一旦激起振动,衰减也快)^{[16][17]}。

1.2.3.1 物理特性

(1) 密度

FRP 筋的密度是由其组成成分的密度以及所占体积分数所共同决定的,如式(1-1)所示:

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (1-1)$$

式中: ρ_c —— FRP 筋的密度;

ρ_f —— 玻璃纤维的密度;

ρ_m —— 基体材料的密度;

V_f —— 玻璃纤维的体积分数;

V_m —— 基体材料的体积分数。

根据式(1-1)可以计算出 FRP 筋在玻璃纤维所占体积分数不同情况下的密度。几种典型 FRP 筋的密度如表 1.1 所示,其中纤维所占体积分数为 50%~70%。由表 1.1 可知,FRP 筋的密度为钢筋的 1/6~1/4,使得其运输成本降低,在施工现场的加工安装时间减少,施工便利。

表 1.1 几种典型 FRP 筋密度

FRP 筋		钢筋
基体材料	密度(g/cm^3)	密度(g/cm^3)
聚酯树脂	1.75~2.17	7.9
环氧树脂	1.76~2.18	
乙烯基脂	1.73~2.15	

(2) 热膨胀系数

FRP 筋混凝土是一种复合材料,那么 FRP 筋和混凝土之间就需要有良好的物理兼容性,可以用热膨胀系数这个指标来进行衡量。

FRP 筋的热膨胀系数取决于基体材料和纤维的种类以及所占体积分数。对 GFRP 筋来说,玻璃纤维的性质决定了纵向热膨胀系数,而树脂基体材料的特性则决定了横向热膨胀系数。表 1.2 给出了玻璃纤维所占体积分数为 50%~70%时 GFRP 筋横向、纵向热膨胀系数以及钢筋、混凝土的热膨胀系数。

表 1.2 GFRP 筋、钢筋和混凝土的热膨胀系数

方向	热膨胀系数($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	GFRP 筋	钢筋	混凝土
纵向	6.0~10.0	11.7	7~13
横向	21.0~23.0	11.7	7~13

从表 1.2 中可以看出,钢筋和混凝土的热膨胀系数在纵向、横向基本一致,而且非常接近。然而,与钢筋不同的是,GFRP 筋的热膨胀系数只是纵向与混凝土非常接近,横向热膨胀系数大约是混凝土的两倍。这说明在与混凝土黏结性能方面 GFRP 筋略逊于钢筋。

(3) 热稳定性

FRP 筋由纤维和聚合物基体组成,当温度超过玻璃转化温度 T_g (Glass transition temperature)时,由于聚合物分子结构发生变化,聚合物软化,导致纤维与树脂之间黏结性能降低。

李趁趁等^[20]通过拉伸试验研究了高温后 FRP 筋的纵向拉伸性

能,试验结果表明:随着温度的升高,FRP 筋的抗拉强度和极限拉应变逐渐下降。当温度为 350°C 时,BFRP 筋和 GFRP 筋的抗拉强度均急剧下降,分别为室温时抗拉强度的 11.5% 和 23.3%。周长东等^[21]、吕西林等^[22]考虑温度和受火时间的影响,对火灾高温中和火灾高温后玻璃纤维筋的抗拉强度和弹性模量进行了试验研究,试验结果证明:玻璃纤维筋的力学性质表现出明显的阶段性。受到火灾高温的影响,玻璃纤维筋的强度和弹性模量均会下降,当温度超过 190°C ,其力学性能将不再恢复。这主要是由于高温导致 FRP 筋表层的黏结树脂氧化分解,即使温度恢复至室温,树脂的黏结性能也无法恢复,造成纤维与树脂协同受力效果变差,最终导致筋体抗拉强度的降低。目前随着耐高温树脂材料的不断出现,FRP 筋耐高温的情况会大大改善。

(4) 电磁绝缘性

FRP 筋具有良好的电磁绝缘性。对于一些有特殊要求的建筑,例如雷达站和国防建筑混凝土结构中,钢筋混凝土结构的存在会对整个结构的电磁场产生不利影响,而 FRP 筋是非磁性材料,用 FRP 筋混凝土结构可满足此特殊需求。

1.2.3.2 基本力学性能

FRP 筋是一种各向异性材料,与纤维主要受力方向平行的方向(轴向)是 FRP 筋的主要方向。影响 FRP 筋力学性能的主要因素有纤维体积率、尺寸效应、制造过程等。FRP 筋的基本力学性能指标主要包括抗拉强度、抗压强度及黏结强度。

作为混凝土结构的加强筋,抗拉强度和刚度是两个主要的指标。在 GFRP 筋中,玻璃纤维具有很高的抗拉强度和刚度,所以作为主要的承受和传递荷载的部分。纤维所占体积分数直接影响到 GFRP 筋的抗拉强度。同样,制作工艺和制造质量也影响着 GFRP 筋的抗拉强度。表 1.3 给出了商业用 GFRP 筋与钢筋的抗拉强度特征。

可以看出,GFRP 筋比钢筋有更高的抗拉强度,但是抗拉弹性模量比钢筋要低。GFRP 筋和钢筋的应力-应变关系如图 1.3 所示。

表 1.3 GFRP 筋与钢筋抗拉强度特征

名称	GFRP 筋	钢筋
纤维体积分数(%)	50~70	—
纵向抗拉强度(MPa)	483~1600	483~690
纵向抗拉弹性模量(GPa)	35~51	200
劈裂应变(%)	1.2~3.7	6.0~12.0

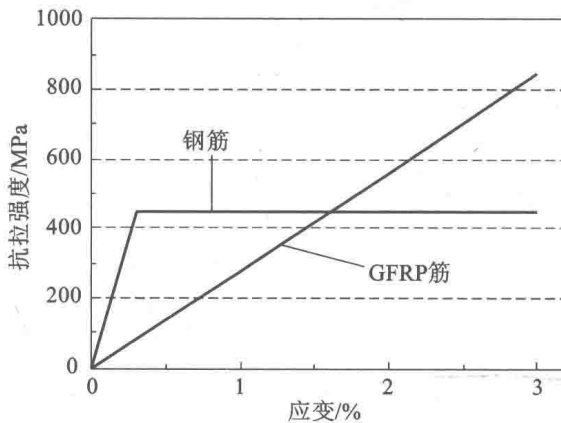


图 1.3 GFRP 筋与钢筋应力-应变关系

(1) 抗拉强度

在 FRP 筋中,纤维承受荷载并提供材料的刚度,树脂主要起到传递荷载和保护纤维的作用。图 1.4 给出了纤维、树脂以及 FRP 筋的应力-应变关系曲线。

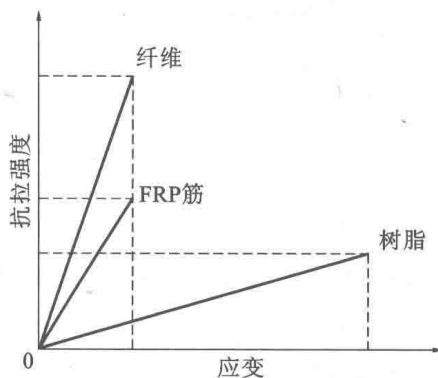


图 1.4 FRP 筋、纤维及树脂的应力-应变关系