

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.118

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 纤维增强复合材料桥梁结构 2019 年度研究进展

叶华文, 唐诗晴, 段智超, 杨哲, 冉川

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

**摘要:**纤维增强复合材料(FRP)因其卓越性能适应现代桥梁结构大跨、轻质、耐久的发展需求,近年来被广泛应用于桥梁工程。为促进复合材料桥梁领域的结构形式和设计的发展,从FRP材料性能、构件和桥梁结构3个层次对近年来FRP在桥梁工程中的研究和应用进行回顾,阐述FRP材料-结构一体化设计理念,并对FRP材料在桥梁加固、组合构件、全桥结构等方面的相关研究进行总结与评述。结果表明:现阶段桥梁用FRP仍局限于旧桥加固,新建大跨桥梁结构应用潜力巨大,需提高材料的力学性能、降低成本、制定产品质量检测标准,建立材料-结构一体化的设计、施工、监测规范体系和工程应用模式。

**关键词:**纤维增强复合材料;复合材料桥梁;桥梁加固;组合构件;材料-结构一体化

**中图分类号:**U444 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2020)05-0192-09

## State-of-the-art review of the application of fiber reinforced polymer in bridge structures in 2019

Ye Huawen, Tang Shiqing, Duan Zhichao, Yang Zhe, Ran Chuan

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** Fiber-reinforced polymer (FRP) has been widely used in modern bridge engineering in recent years due to the excellent material properties that can adapt to the development needs of modern bridge structures towards large spans, light weight, and durability. In order to promote the development of structural forms and designs in the field of bridges using composite materials, this article reviews the research and application of FRP in bridge engineering in recent years from three levels of FRP material properties, structural components and bridge structures. The design concept of FRP material-structure integration is elaborated in detail, and the relevant research of FRP materials in bridge reinforcements, composite components and bridge structures are summarized and commented. The results show that, the current application of FRP in bridge engineering is still limited in the rehabilitation and has great potentials in implementing long-span bridges. It is necessary to improve FRP performance and reduce costs as well as formulate product quality inspection standards. Moreover, systematic codes and engineering applications should be established for design, construction and monitor based on the material-structure integration.

**Keywords:** fiber-reinforced polymer; composite bridges; bridge strengthening; composite component; material-structure integration

**收稿日期:**2020-04-14

**基金项目:**国家自然科学基金(51208430)

**作者简介:**叶华文(1982-)男,博士,副教授,主要从事钢桥疲劳行为研究,E-mail:hbha2000@163.com。

**Received:**2020-04-14

**Foundation item:**National Natural Science Foundation of China (No. 51208430)

**Author brief:**Ye Huawen (1982-), PhD, associate professor, main research interest: fatigue behavior of steel bridge, E-mail: hbha2000@163.com.

复合材料是以树脂、橡胶、陶瓷、水泥和金属等基体为连续相,以刚性颗粒和纤维等增强体为分散相,通过适当的制备方法将增强体均匀性地分散于基体材料中,形成一个综合性能优于任一单一成分的复合体系。应用复合材料的历史源远流长,人类最先采用的天然有机复合材料—木材和竹材,即由纤维素纤维(提供抗拉强度)和基质(提供抗压强度)组成。在黏土中加入稻草或秸秆晒制或烧制砖块是人类有意识设计和使用复合材料的开始,在此基础上发展到今天随处可见的钢筋混凝土结构。20 世纪 40 年代,随着玻璃纤维增强塑料(俗称玻璃钢)的出现,正式有了复合材料(Composite Material)这一名称,复合材料随之得到飞速发展,如图 1 所示。后来陆续出现了高强度、高模量纤维与合成树脂、碳、石墨、陶瓷、橡胶等非金属基体或铝、镁、钛等金属基体复合,构成各具特色的复合材料,在航空航天、舰船、建筑等领域得到了广泛应用。航空航天领域已经形成了较完整的复合材料工业体系,波音 787 机体重量的 50%为碳纤维制造<sup>[1]</sup>,如图 2 所示。空客飞机的复合材料使用量也在逐年快速增加。由于采用了材料—结构一体化设计理念,如图 3 所示,应用复合材料的飞机在材料、制造和运营过程中具有超过传统飞机的商业竞争力和广阔的应用前景。

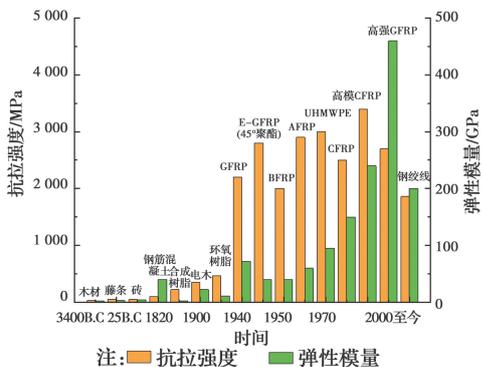


图 1 复合材料发展历程

Fig. 1 Development course of composite materials

纤维增强复合材料的推广与普及为桥梁工程提供了新的发展方向 and 更大的创新空间,现阶段桥梁工程常用的复合材料主要是树脂基的纤维增强聚合物(Fiber Reinforced Polymer, FRP),包括玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维及玄武岩纤维等增强聚合物,FRP 材料适应了现代桥梁结构大跨、轻质、耐久的需求,成为砌体、混凝土和钢材等传统建筑材料之外的重要工程材料。根据其组成特点,FRP 的强度、

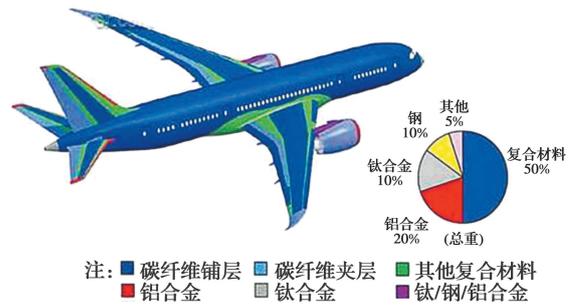


图 2 波音 787 的复合材料应用情况<sup>[1]</sup>

Fig. 2 Application of composite materials in Boeing 787<sup>[1]</sup>

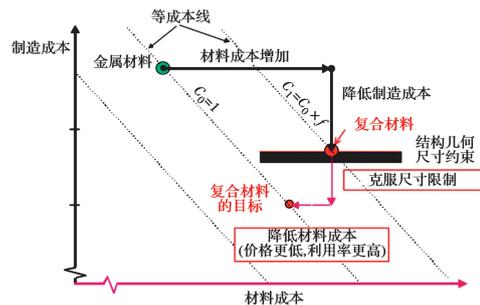


图 3 航空工业复合材料结构的材料—结构一体化设计理念<sup>[1]</sup>

Fig. 3 Material-structure integrated design concept of composite material in aviation industry<sup>[1]</sup>

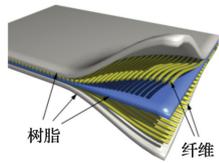
弹性模量、耐久性和特殊功能等关键材料性能方面可根据需要进行设计,这是传统的混凝土和钢材难以比拟的。因此,复合材料桥梁给桥梁结构的新形式和新设计理念提供了机会,也给现有工程管理体制提出了巨大挑战。笔者从 FRP 材料性能、构件和桥梁结构 3 个层次对近年来 FRP 在桥梁工程中的研究和应用进行回顾,总结近年来复合材料桥梁应用的研究与实例。

## 1 桥梁用 FRP 材料性能

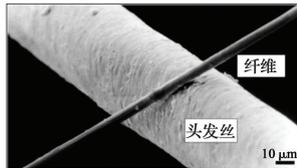
### 1.1 FRP 静力性能

FRP 是将纤维和树脂基体通过一定制备工艺固化后形成的具有特定形状和性能的结构材料,如图 4 所示。其中,纤维一般包括碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维等,树脂包括环氧树脂、乙烯基树脂、不饱和聚酯树脂等。FRP 是力学性质不同的纤维和树脂按照设定的比例和条件复合而成的新材料,纤维与树脂之间有明显的界面存在,其力学性能一般基于组分线性迭加复合原则,如图 5 所示。纤维材料的抗拉强度和拉伸模量很大程度上决定了 FRP 的力学性能,一般根据这两项基本指标进行区分,弹性模量越高,成本越高,各类纤维性能价格

(2018 年统计)见表 1。高性能纤维材料的生产基本上被日本和欧洲的少数几家公司控制,图 6 所示为日本东丽公司的 CFRP 系列产品。



(a) FRP构造



(b) 纤维

图 4 典型纤维增强复合材料构造

Fig. 4 Typical fiber reinforced composite material structure

与传统建筑材料力学性能相比,FRP 力学性能主要表现为以下三方面特点:

1)线弹性。由于纤维可近似看作线弹性材料,所以 FRP 的应力-应变关系基本上也呈线弹性特征,不存在屈服平台,如图 7 所示。

表 1 各类纤维性能与价格对比<sup>[2]</sup>

Table 1 Comparison of various fiber properties and prices<sup>[2]</sup>

纤维种类	典型代表	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%	价格/(元·kg <sup>-1</sup> )
Glass	E 玻璃纤维	3 100~3 800	93~120	≤2.0	5~15
	S 玻璃纤维	3 600~4 600	70~90	≤2.0	5~20
Carbon	日本东丽 T300(标准弹模)	>2 500	200~280	1.5~2.0	200
	日本东丽 T800 HB(中弹模)	>4 500	280~350	1.73~1.81	3 500~4 000
	日本东丽 M40 JB(高弹模)	>4 500	350~600	0.5~1.3	3 200
	日本东邦 UM 63(超高弹模)	>4 500	>600	0.5~0.6	3 800
Aramid	美国杜邦 Kelvar 纤维(Kelvar 49)	2 900~3 400	70~140	2.8~4.4	300~400
	荷兰 Twaron(Kelvar 149)	2 800~3 100	65~120	2.0~3.4	200~350
	俄罗斯 CBM,APMOC(HM-50)	4 000~5 000	130~145	3.5~4.0	150~280
Basalt		3 000~4 500	79~93	1.5~3.2	30~40

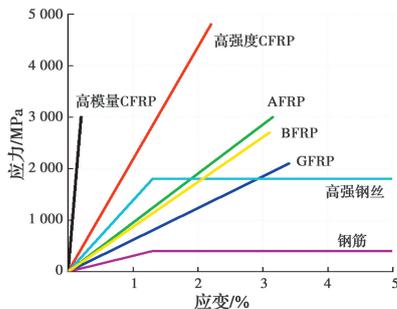
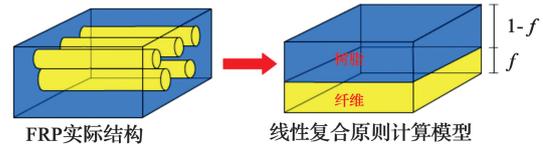


图 7 FRP 材料与钢材的应力应变曲线

Fig. 7 The stress-strain curves of FRP materials and steel



注:  $f$  为纤维含量

图 5 FRP 材料性能计算的线性复合原则

Fig. 5 Linear composite principle of FRP material properties calculation

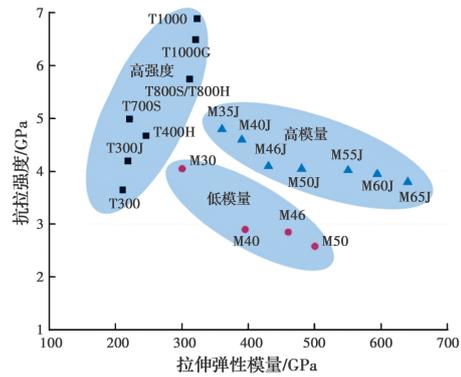


图 6 东丽公司 Carbon 产品的力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of Toray's Carbon products

2)各向异性。FRP 力学性能呈现明显的各向异性,抗拉强度和弹性模量与纤维方向和含量有很大关系,如图 8、图 9 所示。由于很多 FRP 是单向纤维,所以,垂直于纤维方向的性能相对较差,如抗剪强度,成为制约其发展的一个因素。

3)可设计性。FRP 制品性能由组成材料、配合比、制备工艺和应用需要等确定。力学性能可根据纤维的不同来选择,结构形式可根据工程需要进行设计。在基体和增强体结合形成材料的同时,也获得构件或结构,是可进行材料-结构一体化设计的材料。

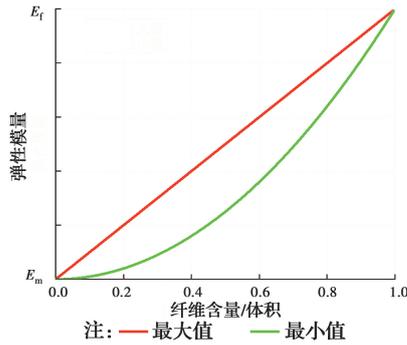


图 8 FRP 性能与纤维含量的关系

Fig. 8 Relationship between FRP properties and fiber content

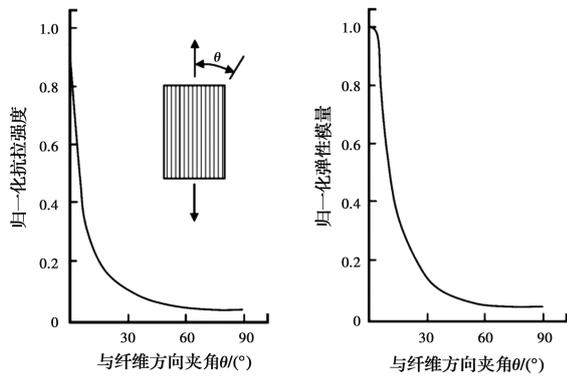


图 9 FRP 性能与纤维方向的关系

Fig. 9 Relationship between FRP properties and fiber direction

### 1.2 FRP 疲劳性能

由于 FRP 的材料特性,其疲劳破坏过程与钢材有很大区别。如图 10 所示,疲劳破坏的临界状态首先表征为开裂,实际上仍能承载,纤维有显著的止裂效应。因此,FRP 抗疲劳性能优异,按最大疲劳应力,钢疲劳强度一般是 30%~50%的抗拉强度,而 CFRP 疲劳强度可达到 70%~80%的抗拉强度,如图 11 所示<sup>[3]</sup>。

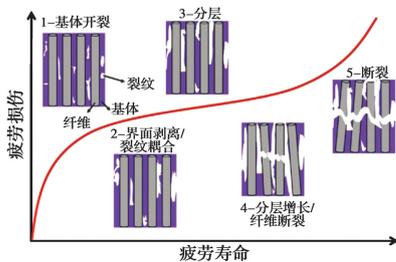


图 10 FRP 疲劳破坏过程

Fig. 10 The process of FRP fatigue failure

### 1.3 FRP 耐久性能

作为一种新型工程材料,FRP 在服役条件下,如腐蚀、温度、辐射等作用下的力学性能演化是关注

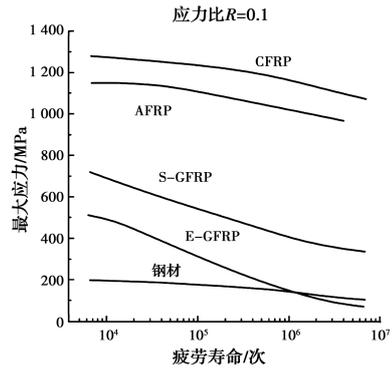
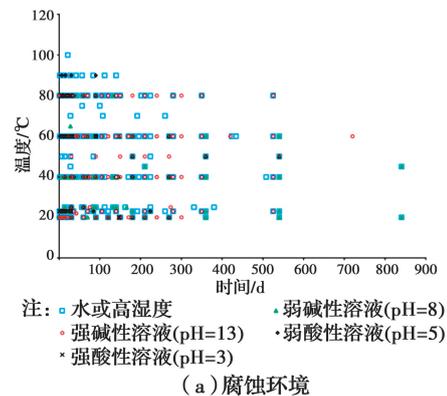


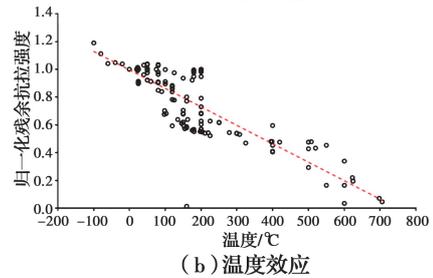
图 11 FRP 材料和钢材的 S-N 曲线图

Fig. 11 S-N curves of FRP materials and steel

的重点,Liu 等<sup>[4]</sup>对 1 900 多组 FRP 在各种环境下加速老化实验的结果进行分析发现,FRP 对常温下(100 °C 以下)的腐蚀环境不敏感,耐久性能很好,但温度超过 100 °C 后力学性能快速下降<sup>[5]</sup>,如图 12 所示。



注: □ 水或高湿度    ● 弱碱性溶液(pH=8)  
○ 强碱性溶液(pH=13)    ● 弱酸性溶液(pH=5)  
× 强酸性溶液(pH=3)



(b) 温度效应

图 12 FRP 的耐久性能<sup>[4]</sup>

Fig. 12 Durability of FRP<sup>[4]</sup>

## 2 桥梁用 FRP 构件的研究与应用

根据不同的使用要求,典型的 FRP 制品形式可分为片材(布、薄板等)、筋材(光面、肋纹、缠绕等)、索材(平行索、绞索)、型材(具有一定截面形状的制品,如管材、工字型材等)、网格材(包括硬质的网格和柔性的格栅)等<sup>[6]</sup>,如图 13 所示。轻质高强的 FRP 材料具有良好的耐久性和抗疲劳性能,已经在桥梁构件中得到广泛应用,主要形式表现在两个方

面:1)用于提高刚度和承载能力的加固构件;2)与钢或混凝土结合,形成性能更优的组合构件。

## 2.1 FRP 加固构件

FRP 最早被广泛应用于混凝土结构加固领域,可封闭裂缝,有效提升极限承载能力。桥梁加固用 FRP 主要是片材和筋材。周朝阳等<sup>[7]</sup>对 CFRP 布、邢丽丽等<sup>[8]</sup>对 AFRP 加固混凝土梁进行试验研究。薛伟辰等<sup>[9]</sup>对 AFRP 筋与不同加固基体的粘结强度进行了系统的拉拔试验研究。吴智深等<sup>[10]</sup>开发了 BFRP 网格/筋加固技术,已在南京长江大桥的加固修复中得到成功应用。然而,大量桥梁病害研究表明:既有旧桥普遍存在的问题是刚度不足,导致开裂或变形过大,直接粘贴 FRP 加固时由于应力滞后效应,FRP 材料的应力水平一般不超过其抗拉强度的 20%,加固效率很低。因此,对 FRP 材料施加预应力是提高加固效率和改善加固效果的有效途径之一,如彭晖等<sup>[11]</sup>提出了嵌入式锚固的预应力 CFRP 板加固系统。由于 CFRP 抗拉强度和弹性模量都高,所以预应力 CFRP 加固技术得到快速发展,近年来中国已有工程应用实例,如图 13 所示。



图 13 预应力 CFRP 板加固技术

Fig. 13 A strengthening technique using prestressed CFRP plates

在 FRP 加固钢结构方面,叶华文等<sup>[12-13]</sup>基于自主研发的预应力 CFRP 板锚固及张拉系统,采用多预应力水平 CFRP 板加固受损钢梁,通过疲劳试验和理论分析,评估无粘结 CFRP 板加固受损钢梁疲劳性能,提出简便实用的疲劳寿命计算理论和分析方法。Chen 等<sup>[14]</sup>对 CFRP 加固受损钢管和钢板的裂纹扩展及疲劳寿命进行试验研究与分析。这些研究成果<sup>[13-15]</sup>都表明预应力 FRP 能显著提高损伤钢结构的剩余寿命。近年来,在预应力 FRP 技术的基础上,一些学者引入传感器,如光纤,形成智能复合材料。周智等<sup>[16]</sup>采用自主研发的满足拉挤成型工艺的 OFBG-CFRP 智能碳纤维复合板对混凝土梁进

行预应力加固,并实时监测 CFRP 板应变。邓朗妮等<sup>[17]</sup>研制智能碳纤维(CFRP-OFBG)板,对钢筋混凝土梁进行嵌入式加固,试验结果表明 CFRP-OFBG 板在智能监测方面有良好的适用性,为今后结构加固与监测一体化提供了重要参考。

## 2.2 FRP 组合构件

FRP 组合构件在新建桥梁中得到越来越广泛的应用,主要表现为 3 种形式:

1)FRP 与混凝土或钢结合,形成多材料复合受力单元。最常见的是 FRP 混凝土组合梁构件,上部混凝土承受压力、下部 FRP 拉挤型材承受拉力<sup>[18]</sup>。史庆轩等<sup>[19]</sup>开展了 FRP-钢-混凝土组合柱的研究。祝明桥等<sup>[20]</sup>提出一种钢-FRP 组合平面桁架。这些 FRP 组合梁柱在试验中性能优异,但受制于材料成本、施工工艺和设计规范,在实桥中的应用很少。

2)FRP 作为桥梁结构的主要受力构件之一,如 FRP 拉索。与传统钢丝索相比,FRP 索耐腐蚀,疲劳强度也高于钢索,因此,应用于大跨度的斜拉桥或悬索桥中可降低索自重,有利于结构受力。1996 年 Urs Meier 在瑞士温特图尔(Winterthur)独塔斜拉桥 Storchenbrucke 桥(63 m+61 m,公路桥)采用了 2 根 35 m CFRP 拉索,近 30 年来对 CFRP 索的应力监测表明了其状态良好,如图 14 所示。江苏大学也修建了 CFRP 索斜拉桥<sup>[21]</sup>。强士中等<sup>[22]</sup>基于国家 863 计划项目进行主跨 3 500 m 级 CFRP 主缆悬索桥原型设计研究,发现 CFRP 主缆的动力特性是控制因素。由于 FRP 抗剪强度远低于抗拉强度,阻碍 FRP 拉索大规模应用的关键问题是锚固系统,诸葛萍等<sup>[23]</sup>、汪昕等<sup>[24]</sup>提出了性能较好的锚具设计,实桥应用仍需继续研究。



图 14 Winterthur 公路桥 CFRP 索

Fig. 14 CFRP cable of Winterthur Highway Bridge

3)FRP 型材作为桥面结构或桥墩船撞防护。熊治华等<sup>[25]</sup>对 GFRP 桥面板的制作与受力性能进行研究,提出了大规模工程应用的建议。刘伟庆等<sup>[2]</sup>提出了复合材料桥梁防船撞系统,并应用于多

项实际工程中。

由于 FRP 制造工艺和材料性能的特点,难免存在缺陷或损伤,这些缺陷或损伤对 FRP 结构的静强度、疲劳性能和稳定性产生重要影响。因此,FRP 构件损伤无损检测方法、检测标准以及测试设备是 FRP 构件正常服役的保证,航空航天行业已经出台了一些规范,在桥梁结构上仍缺乏关注。

目前,针对 FRP 组合构件开展了一系列研究工作,在制作工艺、基本力学性能、耐久性、工程应用等多方面积累了丰富的经验和基础数据,推动了其发展。在现有成果基础上,FRP 构件的推广应用还需解决两方面问题:1)FRP 构件与传统建筑材料构件连接构造的可靠性与耐久性;2)FRP 构件标准化设计与制造、性能测试标准和技术。

### 3 全 FRP 桥梁结构

近 30 年来,FRP 材料用于桥梁主要受力构件的工程实例越来越多。1986 年重庆交通学院(现重庆交通大学)在校门口修建了一座主跨 27 m 的全部用 GFRP 制作的独塔单索面斜拉人行桥,造型优美,是中国第一座全 FRP 桥梁,可惜后来因故拆除。图 15 为位于威尔士的士里尔海港大桥(Rhyl Harbour Bridge)<sup>[26]</sup>,其主体结构采用玻璃纤维和碳纤维混合增强材料,从而减轻重量、节省施工周期并节能环保。图 16 是纽约市 2019 年完工的第一座 FRP 人行天桥,全长约 70 m,桁架和桥面均采用 FRP 材料。缅因大学先进结构与复合材料中心 2019 年研发的拱桥主拱采用 FRP 管,跨度可达 24 m,如图 17 所示,研发的 AIT CT 梁系统由 FRP 筒组成,比钢材轻 50%,比混凝土梁轻 75%,可明显降低施工成本。图 18 为几十座全 FRP 桥梁结构的统计情况,由图 18 可见,目前 FRP 桥梁主要是荷载较小的人行桥,材料主要是 GFRP,在公路桥上的应用很少。由于相同跨度下 FRP 桥比钢桥或混凝土桥自重轻,其动力行为很可能是设计控制状态。Wei 等<sup>[27]</sup>对大量的 FRP、钢及混凝土人行桥的动力特性(自振频率和阻尼比)进行分析和测试发现,相同情况下 FRP 桥梁的阻尼比传统材料桥梁高 2.5 倍,自重轻 8.6 倍,对动载激励更敏感。

对于传统桥梁结构,已经具有分工明确的材料、



图 15 里尔海港大桥 FRP 桥面板<sup>[26]</sup>

Fig. 15 FRP bridge deck of Rhyl Harbour Bridge<sup>[26]</sup>



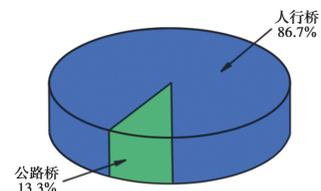
图 16 纽约 FRP 人行天桥<sup>[28]</sup>

Fig. 16 New York FRP pedestrian bridge<sup>[28]</sup>

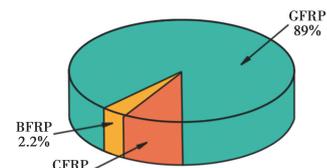


图 17 FRP 主拱的拱桥<sup>[29]</sup>

Fig. 17 FRP main arch of arch bridge<sup>[29]</sup>



(a) 桥型占比(人行桥和公路桥)



(b) 材料占比(CFRP,GFRP等占比)

图 18 FRP 桥梁统计

Fig. 18 FRP bridges statistics

设计、制造和检测系统,这样的设计制度基于有限的、确定的材料种类,如有限的不同强度等级的混凝土和钢材。对于性能可设计的 FRP 材料,只有将材料与结构进行一体化设计,统一考虑材料、设计、制造和检测,才能发挥 FRP 的优异性能,体现桥梁结构全寿命周期内的自组织、自修复、自检和材料循环利用的多功能优势,如图 19 所示。基于材料-结构

一体化设计理念的 FRP 桥梁会对现有桥梁领域的规范体系、管理系统、施工方法等产生深远的革命性影响。

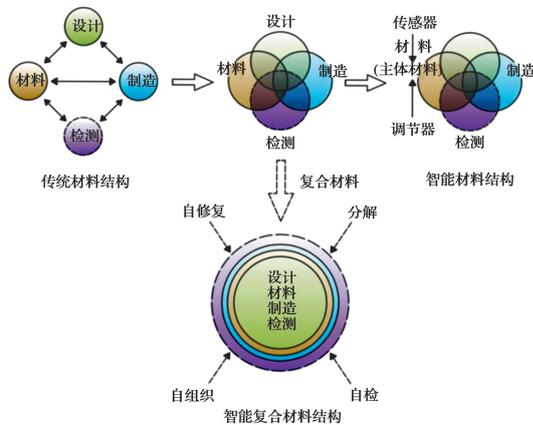


图 19 FRP 桥梁全寿命周期设计目标<sup>[30]</sup>

Fig. 19 The design goals of FRP bridge life cycle<sup>[30]</sup>

## 4 结论与展望

FRP 因轻质高强、可设计性和高耐久性等特性已经在航空航天领域得到广泛应用。在桥梁工程中,高性能 FRP 结构的研发与应用是提升旧桥服役性能、实现超大跨桥梁的方案,日益得到关注。目前,FRP 桥梁的发展仍局限于作为钢和混凝土构件的补充或替代品,与大规模应用有较大差距,产业发展面临一些亟待解决的问题,主要表现在 FRP 产品单一,产学研用相互脱节,产品推广应用困难,研发投入少且分散,缺乏完善的行业规范标准。因此,还应进行以下研究工作:

1) FRP 产品性能的提升和成本降低。与航天级 FRP 产品相比,桥梁用 FRP 存在主要力学指标(如抗拉强度、抗剪强度和弹性模量)偏低,而造价较高,阻碍了其在在大跨桥梁中的推广应用。FRP 构件与传统建筑材料构件的连接构造也是 FRP 产品需要考虑的问题,尤其是其可靠性与耐久性。

2) FRP 产品质量检测方法标准。桥梁工程往往涉及到巨大的经济投入,因此,确保 FRP 构件和结构的质量满足规定要求极为重要,目前专门针对 FRP 的专业产品检测标准和检测方法仍属空白。

3) 基于材料-结构一体化设计的 FRP 桥梁设计、施工和监测规范体系。目前中国已发布的复合材料相关的国家标准基本上针对 FRP 材料性能,缺少基于材料-结构一体化设计的相关规范。按传统

桥梁规范进行设计和施工,FRP 桥梁的优势将消失殆尽,因此,发展趋势是逐步改变传统设计理念,基于全寿命周期建立适应材料-结构一体化设计的工程应用模式。

## 参考文献:

- [1] CAMPBELL F C. Structural composite materials [M]. OH, U. S.: ASM International, 2010
- [2] 刘伟庆, 方海, 方园. 纤维增强复合材料及其结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 1-16.  
LIU W Q, FANG H, FANG Y. Research progress of fiber-reinforced composites and structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40 (4): 1-16. (in Chinese)
- [3] ALAM P, MAMALIS D, ROBERT C, et al. The fatigue of carbon fibre reinforced plastics - A review [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 166: 555-579.
- [4] LIU T Q, LIU X, FENG P. A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 191: 107958.
- [5] 方志, 黄道斌, 方亚威, 等. 经历不同温升作用后 CFRP 筋受力性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 52-63.  
FANG Z, HUANG D B, FANG Y W, et al. Experimental study on mechanical properties of CFRP bar after elevated temperature exposure [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(1): 52-63. (in Chinese)
- [6] 董志强, 吴刚. FRP 筋增强混凝土结构耐久性研究进展[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 1-19, 29.  
DONG Z Q, WU G. Research progress on durability of FRP bars reinforced concrete structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(10): 1-19, 29. (in Chinese)
- [7] 周朝阳, 于亚男, 熊造, 等. CFRP 布端绕双杆自锁加固混凝土窄梁抗弯试验[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2216-2221.  
ZHOU C Y, YU Y N, XIONG Z, et al. Flexure tests on narrow concrete beams strengthened with CFRP sheets end-locked by winding around twin-rods [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2216-

2221. (in Chinese)
- [8] 邢丽丽, 孔祥清, 韩飞, 等. AFRP 加固钢筋混凝土受  
损梁抗剪性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019  
(10): 76-82.  
XING L L, KONG X Q, HAN F. Experimental study  
on shear behaviour of reinforced concrete damaged  
beams reinforced by AFRP [J]. Fiber Reinforced  
Plastics/Composites, 2019(10): 76-82. (in Chinese)
- [9] 薛伟辰, 方志庆, 王圆, 等. 芳纶纤维塑料筋与混凝土  
之间的黏结强度[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(4):  
537-545.  
XUE W C, FANG Z Q, WANG Y, et al. Bond  
strength of AFRP rebars in concrete [J]. Journal of  
Building Materials, 2015, 18 (4): 537-545. (in  
Chinese)
- [10] 吴智深, 刘加平, 邹德辉, 等. 海洋桥梁工程轻质、高  
强、耐久性结构材料现状及发展趋势研究[J]. 中国工  
程科学, 2019, 21(3): 31-40.  
WU Z S, LIU J P, ZOU D H, et al. Status quo and  
development trend of light-weight, high-strength, and  
durable structural materials applied in marine bridge  
engineering [J]. Engineering Science, 2019, 21(3):  
31-40. (in Chinese)
- [11] PENG H, ZHANG J R, SHANG S P, et al.  
Experimental study of flexural fatigue performance of  
reinforced concrete beams strengthened with  
prestressed CFRP plates [J]. Engineering Structures,  
2016, 127: 62-72.
- [12] YE H W, LIU C M, HOU S W, et al. Design and  
experimental analysis of a novel wedge anchor for  
prestressed CFRP plates using pre-tensioned bolts [J].  
Composite Structures, 2018, 206: 313-325.
- [13] 叶华文, 李新舜, 帅淳, 等. 无粘结预应力 CFRP 板加  
固受损钢梁疲劳试验研究[J]. 西南交通大学学报,  
2019, 54(1): 129-136.  
YE H W, LI X S, SHUAI C, et al. Experimental  
analysis of damaged steel beams strengthened with  
prestressed unbonded CFRP plates [J]. Journal of  
Southwest Jiaotong University, 2019, 54(1): 129-136.  
(in Chinese)
- [14] CHEN T, WANG X, QI M. Fatigue improvements of  
cracked rectangular hollow section steel beams  
strengthened with CFRP plates [J]. Thin-Walled  
Structures, 2018, 122: 371-377.
- [15] GHAFOORI E, MOTAVALLI M, NUSSBAUMER  
A, et al. Design criterion for fatigue strengthening of  
riveted beams in a 120-year-old railway metallic bridge  
using pre-stressed CFRP plates [J]. Composites Part  
B: Engineering, 2015, 68: 1-13.
- [16] 周智, 王珍珍, 任鹏, 等. 预应力 OFBG-CFRP 智能板  
加固 RC 梁试验研究及荷载效应分析[J]. 建筑结构学  
报, 2016, 37(Sup1): 268-276.  
ZHOU Z, WANG Z Z, REN P, et al. Experimental  
investigation and loading effect on reinforced concrete  
beam strengthened with prestressed OFBG-CFRP smart  
plates [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37  
(Sup1): 268-276. (in Chinese)
- [17] 邓朗妮, 罗日生, 钱香国, 等. 智能碳纤维板嵌入式加  
固矩形截面钢筋混凝土梁试验研究[J]. 建筑结构,  
2019, 49(3): 92-97.  
DENG L N, LUO R S, QIAN X G, et al.  
Experimental study on intelligent carbon fiber slab  
embedded reinforced concrete beam with rectangular  
section [J]. Building Structure, 2019, 49(3): 92-97.  
(in Chinese)
- [18] ZOU X X, FENG P, WANG J Q. Perforated FRP ribs  
for shear connecting of FRP-concrete hybrid beams/  
decks [J]. Composite Structures, 2016, 152: 267-276.
- [19] 史庆轩, 戎翀, 陈云泉. FRP 钢混凝土组合柱的研究  
现状[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3): 431-439.  
SHI Q X, RONG C, CHEN Y X. Research status of  
FRP-steel-concrete composite columns [J]. Journal of  
Building Materials, 2019, 22 (3): 431-439. (in  
Chinese)
- [20] 祝明桥, 唐明杰, 罗哲. 纤维增强复材组合平面桁架破  
坏性试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(9): 95-101.  
ZHU M Q, TANG M J, LUO Z. Destructive test  
study of FRP combined plane truss [J]. Industrial  
Construction, 2019, 49(9): 95-101.
- [21] 吕志涛, 梅葵花. 国内首座 CFRP 索斜拉桥的研究[J].  
土木工程学报, 2007, 40(1): 54-59.  
LU Z T, MEI K H. First application of CFRP cables  
for a cable-stayed bridge in China [J]. China Civil  
Engineering Journal, 2007, 40(1): 54-59. (in Chinese)
- [22] 强士中, 叶华文, 李翠娟, 等. 主跨 3500m 级碳纤维增  
强塑料 (CFRP) 主缆悬索桥原型设计研究报告  
[R]. 2012.  
QIANG S Z, YE H W, LI C J, et al. Study and

- prototype design of suspension bridge with 3500m-long span and CFRP main cables [R]. 2012. (in Chinese)
- [23] 诸葛萍, 叶华文, 强士中, 等. 碳纤维丝股锚固体系试验研究及受力分析[J]. 工程力学, 2011, 28(7): 165-170, 179.  
ZHUGE P, YE H W, QIANG S Z, et al. Experiment investigation and mechanical behavior analysis of multiple CFRP tendons anchorage system [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(7): 165-170, 179. (in Chinese)
- [24] 汪昕, 周竞洋, 宋进辉, 等. 大吨位 FRP 复合材料拉索整体式锚固理论分析[J]. 复合材料学报, 2019, 36(5): 1169-1178.  
WANG X, ZHOU J Y, SONG J H, et al. Theoretical analysis on integral anchor for large-tonnage FRP composites cable [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(5): 1169-1178. (in Chinese)
- [25] 熊治华, 刘玉擎, 辛灏辉. GFRP 型材及桥面板受力性能研究进展[J]. 工业建筑, 2018, 48(Sup1): 341-345.  
XIONG Z H, LIU Y Q, XIN H H. GFRP profiles and bridge deck's mechanical property [J]. Industrial Construction, 2018, 48(Sup1): 341-345. (in Chinese)
- [26] MCEWEN L. Rhyl Harbour Bridge [EB/OL]. <https://www.gurit.com>, 2013.
- [27] WEI X J, RUSSELL J, ŽIVANOVICS, et al. Measured dynamic properties for FRP footbridges and their critical comparison against structures made of conventional construction materials [J]. Composite Structures, 2019, 223: 110956.
- [28] HANNAH M. FRP chosen for New York pedestrian bridge as part of 9/11 rebuild project [EB/OL]. <https://www.compositesworld.com>, 2020
- [29] SCOTT F. Building bridges with composites [EB/OL]. <https://www.compositesworld.com>, 2020
- [30] 金原勋, 贾丽霞. 智能化复合材料的多功能性及其设计[J]. 纤维复合材料, 1998(2):56-62.  
JIN Y X, JIA L X. Multifunction and design of intelligent composite materials [J]. Fiber Composites, 1998(2): 56-62. (in Chinese)

(编辑 章润红)