

# 碳纤维增强复合材料在国家重大基础设施建设领域的应用与发展

王彬, 李荣

中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088

**摘要** 在建筑和土木工程领域, 高性能碳纤维增强复合材料较传统建筑材料(钢材、混凝土等)具有更高效的性能。随着该类材料及产品在材料技术与应用技术方面的日益进步与成熟, 必将引领土木工程尤其是在重大基础设施和国防建设领域的跨越式快速发展。围绕土木工程用碳纤维增强复合材料及其产品在材料设计与制备、工程应用设计与施工、检测评价、标准体系建设等重点方面的研究现状及应用发展等进行概要分析, 以促进碳纤维全产业链上下游综合全面了解, 期待未来中国碳纤维在该领域研究和应用的快速深入发展, 以及由此带来建筑结构水平的飞跃变革。

**关键词** 高性能碳纤维复合材料; 国家基础设施建设; 设计制备; 应用施工; 标准建设

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer/plastic, CFRP。以下简称碳纤维复材或CFRP)因其优异的物理性能和使用性能, 被列为21世纪国家战略性新兴产业关键材料之一, 在国防、武器装备、能源、交通运输、体育休闲和土木工程等国民经济建设中广泛应用, 并在一些重要领域发挥着支撑作用。在土木工程领域, 碳纤维复材较传统建筑材料具有更高效的性能, 随着相关材料技术及应用技术的迅速进步且日益成熟, 同时国产碳纤维制造成本大大降低, 碳纤维复材成为继钢材、混凝土等传统建筑材料之后一类重要的新型高性能结构材料, 其深入应用必将引领土木工程尤其是在重大基础设施和国防建设领域的跨越式快速发展。但是另一方面, 相比其他领域的应用, 土木工程基础设施建设领域投入大、服役周期长、性能要求高、应用量大面广, 其作用往往延续几代人, 社会影响力显著。CFRP作为新型土木工程结构材料, 其应用尚处于初步

探索阶段, 还需要更深入系统地解决相关材料与土木工程应用两大学科的科学与技术问题, 包括产品工程化制备与标准化、专用装备制造、产品性能表征评价、结构体系与性能、工程设计与施工、标准体系等多方面的关键技术, 才能真正实现土木工程的应用发展。以下就目前几个重点领域的研究及应用发展现状进行概述, 以期碳纤维土木工程应用全产业链上下游相互了解, 通力协作, 共同实现国产碳纤维在土木工程领域快速、健康、深入的应用与发展。

## 1 应用概况

碳纤维复材在土木建筑领域的具体应用主要包括对既有建构筑物的加固补强和新建结构两大类。早期主要是应用碳纤维片材(布、板等)加固修复既有混凝土结构。该项技术首先发展于美国、日本以及欧洲等

收稿日期: 2018-09-10; 修回日期: 2018-09-26

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFC0703000)

作者简介: 王彬, 高级工程师, 研究方向为高性能纤维增强复合材料在土木工程领域应用技术, 电子信箱: mccwangbin@126.com; 李荣(通信作者), 教授级高级工程师, 研究方向为高性能纤维增强复合材料在土木工程领域应用技术, 电子信箱: lirong88@139.com

引用格式: 王彬, 李荣. 碳纤维增强复合材料在国家重大基础设施建设领域的发展与应用[J]. 科技导报, 2018, 36(19): 64-72; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.19.009

发达国家和地区。碳纤维片材高强、轻质、耐蚀、易于施工,对既有结构加固补强效果明显,特别是抗震加固性能优异;同时碳纤维片材加固施工技术能耗低、污染小、适用面广、效率高。特别是日本阪神地震后,采用碳纤维布对大量受损高速公路桥墩柱以及其他震损建筑物结构构件进行快速加固补强,为抗震救灾和震后重建工作赢得了宝贵时间,获得了业界和社会的广泛认可,促进该项技术得到了更大范围的深入研究和推广应用。

中国自1996年由中冶建筑研究总院(原冶金工业部建筑研究总院)在国内率先开展碳纤维片材加固混凝土技术的研究和应用,最早选用进口碳纤维布,在中国许多重大工程,如人民大会堂、民族文化宫等加固改造中,运用自主改进革新的加固技术,获得了良好效果。后续相继开展了CFRP复材加固砌体结构、钢结构等的研究和应用<sup>[1-2]</sup>,应用领域扩展至建筑结构、桥梁、隧道、地下结构、水工结构、港口码头及管道等。与国外先进国家相比,中国虽起步略晚,但在行业同仁的不懈努力与国家高速发展的大背景下,该领域发展迅猛,用不到10年的时间,中国即成为国际上纤维复材土木工程研究成果最丰富、应用量最大、应用领域最广的国家,取得了广泛的国际影响力。

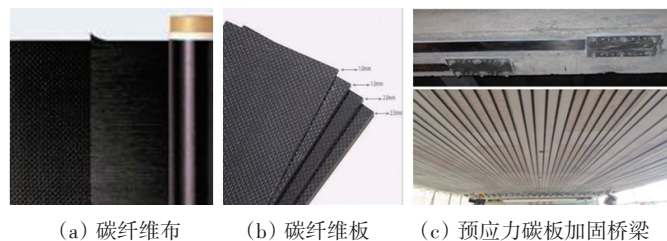
碳纤维复材在新建土木工程结构方面的应用与发展是近年来土木工程领域研发非常活跃的方向。与传统建筑材料相比,碳纤维复材优势主要包括:1)具有超高强度和低密度。碳纤维比强度为钢材的20~50倍,比模量为钢材的5~10倍。采用CFRP部分替代钢筋、钢索,能够极大减轻结构自重,结构极限跨度可比传统材料结构大2~3倍,应用于体育场、展览馆、超大跨桥梁等大跨、超大跨空间结构时具有明显优势。2)热膨胀系数低。应用于超长结构时温度应力不明显,有利于结构设计和长效应用。3)低磁感性。适合在雷达设施、防御基地、医疗核磁设备等特殊场所安全使用。4)良好的耐久性能。在酸、碱、盐等强腐蚀及潮湿环境、复杂海洋等环境可长期使用。5)成型工艺多样。设计成型方便,能够制备成多种结构形式,即可用于受力构件也可应用于非线性建筑等各类造型构件。6)连接方式多样。拆卸、运输、组装等较传统材料结构更为方便。综合来看,虽然CFRP制造成本较高,但用在工程建设中能够显著提高结构使用性能,缩短建造时间,降低维护成本,延长服役寿命,全寿命周期内可节省工程总造

价约5%~40%,具有很高的使用价值。在海洋建筑、桥梁隧道、机场、大坝、地下工程等国家重大基础设施,以及大跨、高耸等功能性新型建筑等领域应用,既能充分满足工程结构对安全性和使用寿命的要求,又能满足新型建筑对力学、美学、功能性等综合要素的设计和使用要求,对今后国民经济建设与发展具有重要的意义。

## 2 CFRP 典型产品及其结构构件

### 2.1 用于既有结构加固的碳纤维系列产品与技术

用于结构加固补强的CFRP产品主要有碳纤维布、复材板、网格、筋、索等,目前用量最大的是碳纤维布和复材板(图1)。



(a) 碳纤维布 (b) 碳纤维板 (c) 预应力碳板加固桥梁

图1 CFRP加固材料及其应用

Fig. 1 CFRP reinforcement material and its applications

中国早期的结构加固补强主要选用日本东丽公司的T300级12k碳纤维布(包括单向、双向或多向碳纤维织物),质量厚度(面密度)一般为200、300、450 g/m<sup>2</sup>,最厚可达600 g/m<sup>2</sup>;也有采用54k等大丝束碳纤维编织的结构加固用碳纤维布。通过粘贴环氧树脂将碳纤维布与被加固结构表面进行多层可靠粘贴,利用碳纤维布沿纤维方向的高抗拉强度与高模量,对被加固的梁板结构等构件进行抗弯和抗剪加固、对柱子进行环绕粘贴加固,可以有效约束混凝土,提高结构延性,进而提高其抗震性能;同时,粘贴碳纤维布还可显著控制混凝土裂缝扩展,增强结构耐久性能等<sup>[3-4]</sup>。随着近年来低成本碳纤维制备技术的迅速发展,目前碳纤维布已基本用T700级碳纤维布取代。中国结构加固碳纤维布用量在2002年即超过100万m<sup>2</sup>,2005年达到世界第一。产品与日本东丽等主要产品相比,中国大丝束碳纤维产品的质量稳定性有待进一步提升,生产成本仍待进一步降低。

碳纤维复材板是继碳纤维布之后又一类混凝土结

构加固补强常用的碳纤维复材产品,是由连续纤维经单向或多向排列,并通过树脂浸润固化形成的板状材料,具有一定的面外弯曲刚度。CFRP板厚度通常在1.0~2.0 mm,也有约4 mm的厚板,但此种用量相对较少。与碳纤维布相比,CFRP板不需要多层粘贴,但一般需要锚固,施工更加便捷,同时避免了碳纤维布层间剥离破坏的发生,加固效能更高。特别地,近年来涌现出预应力碳纤维板加固新技术,即先对碳纤维板施加一定的纤维轴向预应力,使其预先受力拉伸形变,待碳纤维复材板达到一定的抗拉强度后,再与被加固结构表面进行可靠粘贴。这种先对碳纤维板进行预拉伸的方式,能够更充分发挥CFRP板材的抗拉强度,同时改善碳纤维板与混凝土接触处的界面粘贴应力分布,从而有效提高对加固结构的约束作用。在桥梁加固、混凝土梁加固等方面具有较强优势,成为研究和应用的热点<sup>[5-7]</sup>。

传统的碳纤维片材(包括碳纤维布和碳纤维复材板)横向幅面宽度较窄,对于大面积结构加固,加固效果受到影响。近年来还涌现出一些新的CFRP加固材料及加固技术,包括CFRP网格及其加固技术、CFRP筋及表面嵌入式加固技术、CFRP索及体外预应力加固技术等<sup>[8-10]</sup>。此类研究在国内外均有很多成果,工程应用实例稳步扩展,CFRP网格及预应力加固技术应用前景广阔。

## 2.2 用于新建结构的CFRP系列制品及其构件

新建结构用碳纤维复材制品主要有碳纤维复材筋、索、网格、管、型材等。

### 2.2.1 CFRP筋、索及网格等

CFRP筋、索是目前在新建结构中应用较多的碳纤维复材产品,由单向连续碳纤维经拉挤成型技术制备而成,形貌类似钢筋、钢索(图2)。与钢材相比,具有轻质高强、耐腐蚀、低松弛、低磁感应、抗疲劳等优点。采用CFRP筋/索有效替代钢筋/索,能极大提高结构承载力,有效降低自重,显著降低钢材锈蚀带来的结构损伤,提高结构耐久性,降低维护成本。一些典型应用包括:在海洋工程中,采用CFRP筋混凝土结构;在复杂或腐蚀环境、无磁性特殊工程等领域,采用CFRP筋混凝土或预应力CFRP筋混凝土结构;在岩土工程等领域,采用CFRP单根筋/索或筋/索束作为锚固拉筋/索;在大跨、桥梁工程等领域,采用CFRP筋/索做梁、板加强筋,或者替代钢索作为大跨桥梁的悬索和斜拉索结构等形

式。研究表明,CFRP混凝土结构或CFRP结构具有良好的应用优势及前景<sup>[11-13]</sup>。

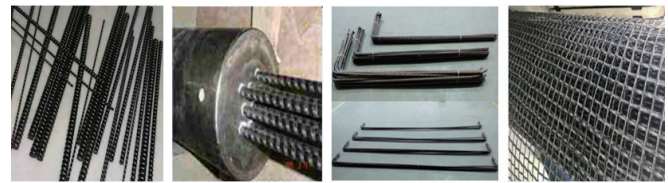


图2 CFRP系列筋

图2 CFRP系列筋

Fig. 2 A series of CFRP bars

CFRP筋/索抗拉强度是衡量产品性能的重要参数之一<sup>[14-15]</sup>。目前中国厂家生产的CFRP筋/索抗拉强度一般在1800 MPa以上,弹性模量120 GPa以上,断裂伸长率1.2%~1.8%,与国外一般产品力学性能差别不大。但较高等级的产品,如抗拉强度2600 MPa以上高强CFRP筋/索,国内还没有工程化生产能力;一些大直径CFRP筋,受工艺技术影响,树脂浸润固化均一性通常不足,材料力学性能和耐久性能离散性较大。

CFRP筋/索锚固性能是其力学性能能否充分发挥的关键,但在实际生产中,产品的锚固性能往往不够被重视,或因生产设备、工艺、后加工技术等影响,锚固性能较国外产品存在一定差距。一些增强CFRP筋/索与混凝土界面或锚具界面粘结作用力的工艺方法主要包括:对CFRP筋表面进行喷砂、压痕或滚花处理;增加CFRP筋肋等形式。其中以加肋CFRP筋的界面粘结力为最优。采用拉挤缠绕同步工艺,在CFRP筋制备过程同步进行加肋处理,可使加肋纤维束与拉挤棒材间形成较强结合力,不容易从棒材表面拉损脱落,且有效降低了工艺流程,极大提高了生产效率,制备的CFRP筋综合性能更优。中国目前拥有此类自主研发装备,但成品筋材的表观形貌均一性不足,重要参数,例如肋高、肋间距等尺寸可控性等较日本产品还存在差距,快速低成本一体化工艺技术仍待进一步提高。

一些异形筋,如CFRP箍筋(包括截面矩形、圆形、螺旋形等)(图2(c)),主要满足构件斜截面抗剪强度要求,可配合直筋一起使用,通过连接受力主筋,共同搭建CFRP筋网。关键技术难点在于异形筋弯折处承载力薄弱,在材料设计成型方面,主要技术有待进一步提升。

CFRP网格筋(图2(d)),由横向和纵向CFRP直筋通过有效粘结或搭接形成的格网状产品,具有双向强

度高、刚性大等特点,且产品横向幅面宽度大,易于大面积使用,施工便捷高效,应用前景非常广阔。关键技术难点主要集中在纵横向筋节点处连接强度、连接工艺均一性,以及大尺寸幅面宽度网格筋的制备技术等。

另外,中国CFRP复材产品普遍存在对材料耐久性设计考虑不足的问题。复材产品长期服役过程中受环境及承载力等多因素耦合作用影响,结构性能变化复杂,进一步影响其与传统材料组合结构的性能匹配、安全设计等,对工程质量的长期稳定性影响重大,需要进一步深入研究。

### 2.2.2 CFRP与传统材料的组合构件

将CFRP材料与传统建筑材料,如混凝土、金属或木材等进行合理组合,在传统构件功能基础上,充分增加CFRP功能性效果,使形成的新型组合结构构件综合性能显著提高,是目前此类产品设计应用的目标。比较典型的组合构件有CFRP管-混凝土组合构件:采用缠绕成型技术制备CFRP管,其中填充混凝土,形成CFRP管-混凝土组合构件。其优势在于:外包CFRP管可对混凝土形成全包覆良好约束,保护混凝土不宜开裂受损,同时有效提高结构抗震性能和耐久性能;另外,成型CFRP管可作为混凝土填充模板,从而显著提高施工速度。此组合构件可作为桩、柱甚至梁使用,具有良好的应用前景。其他一些探索研究包括CFRP-金属组合构件、CFRP-木结构组合构件等,在一些工程示范中已有所应用<sup>[16-18]</sup>。

### 2.2.3 CFRP型材及全纤维增强复合材料(FRP)结构

与传统建筑材料相比,CFRP多样的加工性和可设计性是其另一重要优势。在满足工程结构对材料承载力要求的基础上,CFRP材料可方便制备成各种尺寸及形态结构的型材,进而满足特殊功能需求。目前研究应用较典型的CFRP型材及全纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer/plasti, FRP)结构主要有以下几种。

1) CFRP拉挤型材桥面板及全FRP结构桥梁<sup>[19-21]</sup>。包括:(1) CFRP桥面板,由拉挤成型工艺制备而成,具有可预制化、自重轻、承载力强、耐环境腐蚀、搭建快捷等特点,在军事快速运送、架设应急FRP桥方面具有独到优势(图3)。(2) 全FRP结构桥梁,由CFRP桥面板、CFRP索及各类FRP构件等组合而成,典型的有FRP轻质桥梁、人行桥等,在地震、火灾、水灾、飓风等自然灾害抢险应急、人流疏散等方面具有较大优势。目前大量应用的应急桥梁还是金属结构,全FRP结构桥梁与

金属结构桥梁比较,原有的结构体系、设计指标、连接构造等均需重新设计验证。此类研究正在加紧开展,现已建成的国内外FRP轻质桥梁(包括不同形式结构)约有几十座。



图3 军事快速架设桥梁

Fig. 3 Rapid erection of bridges in military field

2) CFRP编织网/杆件及空间结构。包括:(1) CFRP编织网及空间结构。CFRP板条按一定规律进行编织,然后经过整体张拉,形成柔性空间结构体系。(2) CFRP杆件及其空间结构。CFRP片材以不同角度层叠粘贴,形成网架杆件,杆端由金属锥头与球节点连接,形成大尺寸空间结构。具有施工强度小、周期短、耐腐蚀性好、热膨胀效应低、维护费用低等特点。同时可实现良好的建筑效果。在超大跨空间结构(图4),如体育场、游泳馆、展览馆、大型厂房等应用优势突出<sup>[22-24]</sup>。



图4 FRP编织网屋盖

Fig. 4 FRP weave net roof

3) CFRP功能板、曲面板及功能建筑。CFRP材料具有很强的设计性,易于制成波纹板、曲面板、带肋板、空心或夹心板等,可单独与其他功能材料复合使用,通过快速拼接,组成多种形状及功能的拱、壳、折板以及穹顶等建筑结构,应用于雷达天线罩、娱乐设施、工业厂房等,具有成型快、轻质高强、耐腐蚀、施工方便、保温性好等优点。特别地,近年来涌现出一批功能性概念建筑,集非线性建筑美学及轻质、环保、多功能于一体,对结构材料提出了更高要求。采用FRP或CFRP材料能够较容易实现建造结构的复杂形态、尤其是非线性结构,结构受力性更加合理,且制造成本相对较低,是目前理想的选用材料。一些典型的功能建筑包括香奈儿展馆、以色列拉宾纪念中心等,其中选用的

FRP板,通过工厂模具化批量生产,可用吊车一体吊装完成。2017年 iPhone X 发布会场地乔布斯剧院(图5)对外展示,受到各界广泛热议。其屋顶采用有史以来最大的碳纤维独立屋顶,重达80 t,由44块面板组成,在迪拜完成组装后运抵加州,施工现场由吊车一体吊装完成,整个施工过程快捷方便。

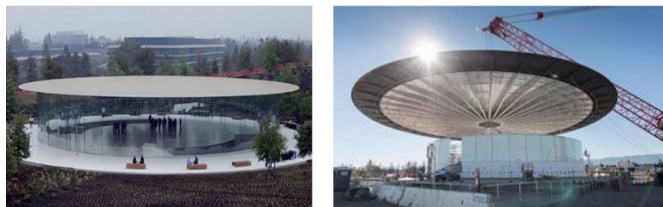


图5 乔布斯剧院全碳纤维屋盖

Fig. 5 Full carbon fiber roof of the Jobs Theatre

### 3 应用关键技术

CFRP材料与传统钢筋、混凝土相比,结构性能差异较大。采用这种材料加固结构或直接作为新型结构构件,其极限状态、设计方法和设计指标、可靠度等问题都需进行专门研究,形成相应的设计理论和方法。主要表现为:(1) CFRP产品受纤维排布方向影响的各向异性,造成受力上许多不同于传统材料的现象,如拉伸翘曲等,需要重新进行CFRP结构分析与设计。(2) CFRP材料弹性模量低,需合理设计并控制其结构变形,以补偿刚度不足。(3) CFRP材料断裂应变小,呈脆性破坏,安全预警度低。目前只能依靠和使用较大安全系数以保证结构的可靠性。(4) 与混凝土相比,一般CFRP产品防火性能较差,主要因为多数树脂在高温下迅速软化。因此CFRP材料及其构件达到玻璃化温度后的性能还需要深入研究和提升。(5) CFRP材料耐久性设计不足,材料老化以及CFRP构件受温、湿度影响,蠕变、应力松弛等基本性能相互影响,作用复杂。对于实际建筑工程,要求几十年安全服役期,CFRP材料及其结构构件的耐久性能还需要深入和广泛的研究。

CFRP构件的节点连接技术也是应用技术研究热点之一。由于CFRP材料剪切强度、层间拉伸强度和层间剪切强度仅为其抗拉强度的5%~20%,而金属的剪切强度约为其拉伸强度的50%,使得CFRP构件连接成为突出问题。采用传统铆接、栓接、粘接等方式,连接部位往往容易成为整个构件的薄弱环节。因此在CFRP结构设计应用中,应尽量减少连接,同时仍需合理设计和创造新的连接方法。

施工方面,目前典型的针对CFRP筋/索的预应力张拉技术、锚固技术,CFRP预制件的快速装配技术,特定应用工况(如海洋构筑物、桥梁隧道工程等)的专项施工技术及施工工法等,仍需深入研究和完善。

### 4 标准规范建设

建立较完善的碳纤维增强复合材料应用技术体系,包括产品标准、测试方法标准以及设计、施工、质量验收等系列应用技术标准,是切实推进CFRP材料由研究和示范迈向工程实际应用,并且保障工程设计、施工的安全性和可靠性的重要依据,受到各国高度重视。

20世纪80年代起,一些发达国家开始制定土木工程用FRP规范与相关标准。由于与传统工程结构材料相比,该类材料性能较为特殊,因此在土木工程规范中将其单独列出。日本自20世纪80年代起,加紧制定FRP加固/增强混凝土结构设计和施工标准。经过10余年的补充修订,形成了系列标准,内容涉及外贴FRP片材补强混凝土结构,FRP筋/索、预应力FRP筋/索增强混凝土结构设计与施工指南。这些标准覆盖FRP材料质量规格、试验方法、设计与施工说明。其中材料质量条款规定了工程实践所需FRP材料的类型、特征与性能,以及FRP筋/索增强混凝土时材料的配筋率、绑扎与配置方式等,内容覆盖较为细致完善。美国自20世纪80年代开始,对纤维增强混凝土结构进行长期研究。1991年美国混凝土协会创建了440委员会(ACI Committee 440,即纤维增强塑料补强、加固委员会),2001年批准纤维筋增强混凝土设计与施工指南、外贴纤维增强塑料补强混凝土结构设计与施工指南两部标准。目前正在制定FRP结构形式、增强混凝土结构的FRP耐久性、FRP预应力混凝土构件设计与施工等方面指南。欧洲自20世纪60年代开始关于FRP工程应用的研究,目前已形成FRP增强钢筋混凝土结构设计指南。

中国自CFRP加固技术开始应用即启动了相关标准规范的编制工作。2003年发布了由中冶建筑研究总院主编的中国工程建设标准化协会标准《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS146),是中国首部纤维复材在土木工程中的应用技术标准。结合新建结构方面的研究及应用成果,2010年中国颁布《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》,并于2017年对该标准进行了修订。该标准包含基本材料、复材片材加固混

凝土结构、预应力碳纤维复材板加固混凝土结构、复材片材加固砌体结构、复材片材加固钢结构、复材网格加固混凝土结构、复材筋及预应力复材筋混凝土结构构件、复材-混凝土组合梁和组合板、复材管组合构件、施工和验收等重要内容,内容覆盖较国外规范更加全面。其中,材料类参数指标(包括碳纤维布、板、筋/索、网格等)基于大量中国产品表征评价数据,并与国外同类标准产品相协调,且对近年来工程应用FRP新材料及典型构件的种类及质量要求、加固新领域及配套设计施工技术、典型新建结构构件的设计应用要求等进行了补充和完善,对CFRP复材及配套材料的标准化设计、生产,以及施工技术的标准化操作等起到有力的推进作用。

FRP材料及表征测试标准方面:20世纪90年代后,中国陆续发布了通用纤维增强塑料系列标准,包含FRP各类材料以及主要性能测试方法等标准规范50多部;2000年后陆续发布了土木工程专用复合材料产品系列标准,包含结构加固用CFRP片材、结构工程用纤维增强复合材料筋、纤维增强复合材料桥板、结构用纤维增强复合材料型材等。

目前,中国已初步建立了包括FRP通用试验方法标准、土木工程专用FRP产品标准,以及FRP工程应用技术规范等较完整的土木工程应用FRP标准规范体系。但仍有许多细致深入的问题需要通过长期工程实践的积累不断补充和完善,包括FRP材料及其结构构件的耐久性设计、检测与评价;FRP构件及其结构的安全监测及寿命评估;新型FRP建筑结构的设计、施工及验收等<sup>[25-28]</sup>。

## 5 应用前景

改革开放40年来,随着经济社会的快速发展,中国土木工程的建设规模、广度与难度都大大超过世界上其他国家,但随之也带来了资源与能源的巨大消耗、环境的严重污染等问题。同时,土木工程还面临着使用寿命短、安全可靠低、防灾减灾能力弱等突出问题;土木工程全寿命周期对结构也提出了更高的安全和绿色生态需求。应用高性能结构材料是应对上述重大需求的有效措施之一,是提升土木工程能效、品质和建设效率的必然趋势,也是土木工程学科与行业发展的必然趋势。以碳纤维为代表的纤维复材不仅可以提升结

构性能,延长结构寿命,同时还具有智能材料的特征。应用纤维复材及其结构应用是国际土木工程行业新一轮技术变革的重要内容,也与中国十九大提出的创新驱动、绿色生态、可持续发展等国家战略和科技强国、海洋强国等强国目标密切相关。在中国土木工程建设中,尤其在海洋工程、超大桥梁、国防工程、地下工程、特种工业工程、防灾减灾及新型建筑等重要领域将具有广阔的发展前景(图6)。

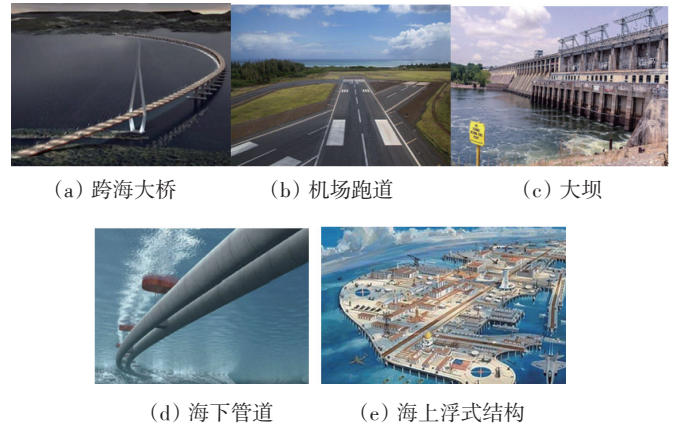


图6 CFRP的应用方向

Fig. 6 Application of CFRP

特别地,在海洋工程方面,党的十八大提出建设海洋强国、发展海洋经济的战略部署,十九大报告会上,习近平总书记再次提出“坚持陆海统筹,加快建设海洋强国”的号召。21世纪,陆地资源逐渐难以承载未来的可持续发展,争夺海洋资源日益激烈。发展海上基础设施等工程建设,对于巩固中国海洋主权,提升国土防卫能力,保障国家战略安全具有重要意义。同时发展海上工业产业及基础交通设施,对促进国民经济和社会发展具有重要现实意义。面对海洋高腐蚀性及复杂恶劣环境(高温、高湿、高盐雾、强紫外线、台风、强浪剥蚀、生物污损等),传统钢材、铝合金、混凝土、木材等腐蚀严重,服役寿命短,且运输、建造成本高昂。采用碳纤维增强复合材料,并与当地海水海砂预制形成增强混凝土结构构件,能够有效解决海洋工程建设对材料耐久性的要求,同时极大降低工程运输、建造成本,且装配施工快捷,可实现大规模持续性快速建设,具有广阔的应用前景。典型应用包括:海港码头、岛礁水工护岸、道路、桥梁、护栏、地下管道等混凝土建构物;可用于机场、码头等交通枢纽,或作为仓储、工厂、海上作业、远海风电平台等的海上浮式结构、浮式平台用系泊结构等<sup>[29-30]</sup>。

## 6 结论

目前,碳纤维复材在土木建筑领域的研究与实践已经进入到应用领域更广、材料与产品要求更高、解决使用问题更深更难的层次与水平,碳纤维复材在土木建筑领域应用也面临更大的技术与应用突破。国内外工程领域对CFRP材料的开发和应用十分重视,开展了大量的深入研究,组织了各类国际学术会议,使其成为一个非常活跃的研究领域,应用方面的实例逐年增多。相信随着中国碳纤维复合材料工程应用技术的不断发展,标准建设体系不断完善,并在有关部门对标准的大力贯彻推进,以及设计单位和建设单位对新材料新技术的鼓励推动下,中国碳纤维在基础设施建设领域的应用必将获得更加深入的发展。

### 参考文献(References)

- [1] 郑云, 叶列平, 岳清瑞. CFRP板加固含裂纹受拉钢板的疲劳性能研究[J]. 工程力学, 2007(6): 12-17.  
Zheng Yun, Ye Lieping, Yue Qingrui. Fatigue behavior of cracked steel plate strengthened with CFRP plate[J]. Engineering Mechanics, 2007(6): 12-17.
- [2] 黄群贤, 王全凤, 岳清瑞. FRP加固砌体平面外弯曲性能研究综述[J]. 工业建筑, 2005(9): 27-33.  
Huang Qunxian, Wang Quanfeng, Yue Qingrui. The out of plane bending behavior of masonry strengthened with FRP[J]. Industrial Construction, 2005(9): 27-33.
- [3] 岳清瑞. 我国碳纤维(CFRP)加固修复技术研究应用现状与展望[J]. 工业建筑, 2000, 30(10): 23-26.  
Yue Qingrui. Present situation and prospect of research and application of carbon fiber(CFRP) reinforcement technology in China[J]. Industrial Construction, 2000, 30(10): 23-26.
- [4] 杨勇新, 李庆伟, 岳清瑞. 预应力碳纤维布加固混凝土梁预应力损失试验研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(4): 5-8.  
Yang Yongxin, Li Qingwei, Yue Qingrui. Experimental study on prestress loss of prestressed concrete beams strengthened with prestressed CFRP sheets[J]. Industrial Construction, 2006, 36(4): 5-8.
- [5] Teng J H, Li R. Debonding failures of RC beams strengthened with near-surface mounted CFRP strips[J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10(2): 92-105.
- [6] Kim Y J, Chen S, Green M F. Ductility and cracking behavior of prestressed CFRP sheets[J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(3): 274-283.
- [7] 郭继祥. 预应力碳纤维板加固技术在旧桥加固中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2018(1): 171-173.  
Guo Jixiang. Application of prestressed CFRP strengthening technology in old bridge reinforcement[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2018(1): 171-173.
- [8] 李荣, 滕锦光, 岳清瑞. 嵌入式CFRP板条—混凝土界面粘结性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2005(8): 31-34.  
Li Rong, Teng Jinguang, Yue Qingrui. Experimental study on bond behavior between embedded CFRP slab and concrete interface[J]. Industrial Construction, 2005(8): 31-34.
- [9] Yue Q R, Liu Z Q, Li R, et al. Experimental investigation into the development length of carbon-fiber-reinforced polymer grids in concrete[J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(6): 953-962.
- [10] 张珂, 叶列平, 岳清瑞. 体外预应力碳纤维索加固混凝土梁试验研究[J]. 工业建筑, 2008(4): 21-26.  
Zhang Ke, Ye Lieping, Yue Qingrui. Experimental study on concrete beams strengthened with externally prestressed CFRP cables [J]. Industrial Construction, 2008(4): 21-26.
- [11] 谢旭, 朱越峰. CFRP拉索设计对大跨度斜拉桥力学特性的影响[J]. 工程力学, 2007, 24(11): 113-120.  
Xie Xu, Zhu Yuefeng. Study on behavior of long-span CFRP cable-stayed bridges[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11): 113-120.
- [12] 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.  
Lü Zhitao, Mei Kuihua. First application of CFRP cables for a cable-stayed bridge in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(1): 54-59.
- [13] 邓欣. 超大跨径碳纤维空间缆索悬索桥力学特性分析[D]. 南京: 东南大学, 2017.  
Deng Xin. Mechanical performance analysis of large span suspension bridge with spatial CFRP cables[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [14] 王彬, 杨勇新, 岳清瑞, 等. 复合理论预测国产碳纤维复合材料筋拉伸强度的离散性研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014, 12: 63-67.  
Wang Bin, Yang Yongxin, Yue Qingrui, et al. Prediction of tensile strength of domestic CFRP tendons by composite theory[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014, 12: 63-67.
- [15] 王彬, 杨勇新, 岳清瑞. CFRP筋拉伸强度预测模型评价及其应用[J]. 材料工程, 2017, 45(10): 117.  
Wang Bin, Yang Yongxin, Yue Qingrui. Evaluation and application of CFRP bar tensile strength prediction model[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(10): 117.
- [16] 李天虹. FRP-混凝土组合梁受力和设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.  
Li Tianhong. Study on mechanical performance and design method of FRP-concrete hybrid beams[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.

- [17] Teng J G, Yu T. Hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns: Stub column tests[C]. Proceedings of the Second International Conference on Steel & Composite Structure, Seoul, Korea, 2004: 1390-1400.
- [18] 陶毅, 张海镇, 石庆轩, 等. 内置FRP约束混凝土的方钢管混凝土轴压承载力[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(2): 43-49.  
Tao Yi, Zhang Haizhen, Shi Qingxuan, et al. Bearing capacity of steel tube-concrete-FRP-concrete composite columns[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2017, 39(2): 43-49.
- [19] 冯鹏. 新型FRP空心桥面板的设计开发与受理性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.  
Feng Peng. Development and study on an innovative FRP bridge deck[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [20] 朱坤宁, 万水, 刘玉擎. FRP桥面板静载试验研究及分析[J]. 工程力学, 2009, 26(增刊2): 618-622.  
Zhu Kunning, Wan Shui, Liu Yuqing. Analysis and Experimental study on statically load FRP bridge deck[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(Suppl 2): 618-622.
- [21] 汤洪雁, 王秀艳. FRP复合材料在桥梁工程中的应用与发展[J]. 城市道桥与防洪, 2016(3): 182-184.  
Tang Hongyan, Wang Xiuyan. Application and development of FRP composites in Bridge Engineering[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2016(3): 182-184.
- [22] Feng P, Ye L P, Teng J G. Large-span woven web structure made of fiber-reinforced polymer[J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(2): 110-119.
- [23] Roosenboom F G. Building the future with FRP composites [D]. Delft: Technische Universiteit Delft University of Technology, 2013.
- [24] 齐玉军. FRP编织网结构受力性能及设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.  
Qi Yujun. Mechanical performance and design method of FRP woven web structure[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [25] 王彬, 杨勇新, 岳清瑞. 碳纤维增强复合材料筋海洋环境耐久性能研究进展[J]. 化工新型材料, 2016, 44(2): 12-14.  
Wang Bin, Yang Yongxin, Yue Qingrui. Research Progress on durability of carbon fiber reinforced composite tendons in marine environment[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(2): 12-14.
- [26] 王彬, 杨勇新, 岳清瑞, 等. CFRP筋耐久性评价的快速试验方法分析[J]. 建筑技术, 2015, 46(增刊2): 214-216.  
Wang Bin, Yang Yongxin, Yue Qingrui. Analysis of rapid test method for durability evaluation of CFRP bars[J]. Architecture Technology, 2015, 46(Suppl 2): 214-216.
- [27] 卢亦焱, 杨婷, 李杉, 等. 海洋环境下FRP-混凝土界面粘结退化的可靠性分析[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(9): 79-84.  
Lu Yiyan, Yang Ting, Li Shan, et al. Reliability analysis of degradation of FRP-concrete bonded interface in sea environment[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(9): 79-84.
- [28] 王苏岩, 姚因杰, 洪雷. 恶劣环境于荷载共同作用下FRP-高强混凝土的粘结耐久性[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 127-133.  
Wang Suyan, Yao Yinjie, Hong Lei. Durability of FRP-high-strength concrete adhesive joints under aggressive exposure conditions and loads[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation, 2017, 37(1): 127-133.
- [29] 冯鹏, 王杰, 张泉, 等. FRP与海砂混凝土组合应用的发展与创新[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(12): 13-18.  
Feng Peng, Wang Jie, Zhang Xiao, et al. Development and innovation of combining FRP and sea sand concrete for structures[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(12): 13-18.
- [30] 李润培. 深海平台技术的研究现状与发展趋势[J]. 中国海洋平台, 2003, 18(3): 1-5.  
Li Runpei. Research status and development trend of deep-sea platform technology[J]. China Offshore Platform, 2003, 18(3): 1-5.

## Development and application of CFRP in the field of national major infrastructure construction

WANG Bin, LI Rong

Central Research Institute of building and Construction Co., Ltd., Beijing 100088, China

**Abstract** In the field of building and civil engineering, high performance fiber reinforced composites have more efficient performance than traditional building materials (steel, concrete, etc.). With the development and maturity of these materials and their products in material technology and application technology, the territorial civil engineering, especially in the fields of major infrastructure and national defense construction, will develop rapidly. This paper focuses on the research and development of the main products and structural components of carbon fiber composite materials used in civil engineering, such as the design and preparation, the application construction, the inspection and evaluation, the standard system construction and so on. It is expected to promote comprehensive and comprehensive understanding of the upper and lower chain of carbon fiber industry chain, and look forward to the rapid development of carbon fiber in this field in the future, as well as the leap of building structure level.

**Keywords** high performance carbon fiber composites; national infrastructure construction; design and preparation; application and construction; standard construction ●



(责任编辑 王志敏)