

GFRP 型材及桥面板受力性能研究进展*

熊治华¹, 刘玉擎^{1†}, 辛灏辉²

(1. 同济大学桥梁工程系, 上海 200092;

2. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 2600 GA Delft, the Netherlands)

摘要: 玻璃纤维增强复合(GFRP)型材强度高、重量轻, 由其制作的 GFRP 桥面板具有良好的受力性能。综述了 GFRP 层合板力学性能、GFRP 桥面板构造及受力特点、桥面板结合部、桥面板温度效应、GFRP 型材连接五个方面研究进展。通过国内外研究现状的梳理, 明晰 GFRP 桥面板应用与发展中的问题, 指出 GFRP 结构桥梁研究国内进一步发展趋势。

关键词: GFRP; 桥梁; 桥面板; 受力性能, 综述

GFRP Profiles and Bridge Deck's Mechanical Property: State of the art

XIONG Zhi-hua¹ LIU Yu-qing^{1†} XIN Hao-hui²

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 2600 GA Delft, the Netherlands)

Abstract: GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) is of high stiffness to weight ratio, as a result, GFRP bridge deck has an excellent mechanical performance. Five aspects of GFRP bridge literatures were reviewed respectively: GFRP laminates' mechanical properties, GFRP bridge deck configuration and its mechanical property, bridge deck's conjunction, thermal effects of bridge deck, connection of GFRP profile. Through the review and categorization, the problems during the application and development of GFRP bridge deck were highlighted. Further research interests were pointed out for GFRP bridge's development in China.

Key words: GFRP; bridge; bridge deck; mechanical performance; review.

0. 引言

玻璃纤维增强复合材料 (Glass Fiber Reinforced Polymer, 简称 GFRP) 具有轻质、高强、耐腐蚀、抗疲劳等特点, 采用 GFRP 型材制作的桥面板及主梁结构已在欧美国家公路及人行桥广泛使用^[1]。截止 2008 年, 美国新建和加固改造桥梁采用 GFRP 结构已达到 2.3 万 m²^[2]; 图 1 列出了欧美各国的 GFRP 桥梁应用状况, 葡萄牙 2013 年在 Viseu 建造了 St.Mateus 人行桥, 该桥跨度为 13.3m、宽 2.5m, 结构采用钢-GFRP 组合梁 (图 1.b)^[3]; 德国 2008 年在 B3 高速公

路上建造了 Friedberg 跨线桥, 该桥跨度 27m、宽 5m, 结构采用钢-GFRP 组合梁 (图 1.c)^[4]; 西班牙 2001 年建造了 Lleida 人行桥, 该桥上部全部采用拉挤 GFRP 型材建造, 结构为跨度 38m 的系杆拱桥, 总重仅为 19 吨 (图 1.d)^[5]。近年来我国公路桥梁领域开始进行 GFRP 的研究和应用^[6-9]。对于在交通量压力大的城市新建跨线桥梁及老旧桥升级改造、自然条件恶劣如青藏高原、阿拉斯加等寒区建造桥梁, 采用 GFRP 桥面板在运输、施工便利、绿色环保、耐久性等方面有独特优势^[10-11]。以下, 本文将从 GFRP 层合板力学性能、GFRP 桥面板构造与受力、桥面板结

*国家自然科学基金项目(51578406)

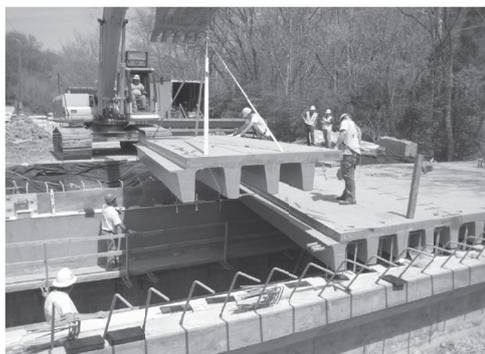
作者简介: 熊治华, 男, 1984 出生, 博士, 助理研究员。

† 通讯作者: 刘玉擎, 男, 1962 出生, 教授, 博士生导师, yql@tongji.edu.cn。

收稿日期: 2018-03-12

合部、桥面板温度效应、型材的连接五个方面回顾国内外 GFRP 型材及桥面板当前应用与技术

发展现状。



(a) 美国 Eight Mile 桥



(b) 葡萄牙 St.Mateus 人行桥



(c) 德国 Friedberg 跨线桥



(d) 西班牙 Lleida 人行桥

图 1 GFRP 桥梁国外应用工程案例

Fig.1 GFRP bridge applications overseas

1. GFRP 层合板力学性能研究

1.1 断裂韧性

断裂韧性是反映材料力学性能关键指标,工程材料常用冲击韧性表征断裂韧性。美国 ASTM D6110 和 D5045 分别规定了纤维增强材料预制缺口和预制裂纹的冲击韧性试验测试方法^[12-13],国内 GB/T 4994-2005 规范采用的是梁式冲击韧性方法^[14]。

Mahmoudi 等^[15]对 GFRP 板在低温下开展了 Charpy 冲击试验,试验对缺口方向、温度对断裂韧性的影响进行了分析,结果表明低温环境下

(-30⁰C) GFRP 板断裂呈现脆性断裂,当预制缺口方向沿纤维铺层方向时、破坏形式呈现层间撕裂。Sanada 等^[16]对纤维体积率为 47%的环氧树脂 GFRP 层合板开展了三点弯曲断裂韧性试验,试验在液氮(-196⁰C)、液氮(-269⁰C)、室温(22⁰C)三种温度环境中进行,同时进行了数值模拟计算,试验结果和理论分析均指出低温时基体损伤沿铺层板厚方向在中面处较表面更为严重。Liu W.等^[17]采用线性软化的界面单元法对含单边预制缺口的 GFRP 层合板三点弯曲 I 型断裂试验开展了数值模拟,模型采用了双 K 断裂准则,计算和试验结果表明:对于 I 型断裂沿纤维

方向,各项异性效应并不明显可忽略不计;界面断裂能量包含两部分,一部分为微孔开裂能量,另一部分为纤维桥联断裂能量,这两部分比例为1.5:1。

1.2 耐久性

桥梁结构长期暴露在自然环境中,经受复杂气象、路面污染物等考验,从目前开展的 GFRP 型材耐久性试验来看,其耐腐蚀性能优越,可用于恶劣环境下以满足结构功能需求^[18-19]。

刘建华等^[20]对酚醛树脂 GFRP 材料开展了中性盐雾条件老化试验,通过模拟海洋大气环境,评价其在海洋环境中的耐久性。试验结果表明:随着老化时间的增加,复合材料的吸湿量增加、力学强度下降、压缩和层间剪切曲线表现出塑性特性。于爱民等^[21]对 GFRP 和 CFRP 片材在冻融作用下的拉伸强度做了对比试验,结果表明:冻融循环作用下 GFRP 片材拉伸强度下降比 CFRP 片材大;同时提出了冻融循环作用下 GFRP 片材拉伸强度折减系数计算方法。刘兆松^[22]对用于石油输送的 GFRP 管材开展了酸性腐蚀耐久型试验,试验溶液分别为 1~3 倍浓度 Ph 值为 5 的石油,分别在 25⁰C, 45⁰C, 65⁰C 条件下经过 120 天腐蚀,GFRP 管刚度分别下降 1.6%,3.1%,4.2%。Won J. P.等^[23]对 GFRP 筋展开了碱溶液腐蚀老化试验,碱溶液浓度为 pH 12.6,碱溶液温度分为 20⁰C、40⁰C、60⁰C 几种类型,经过 300 天浸泡老化后发现:碱溶液腐蚀会造成基体出现微孔,随着腐蚀时间推移微孔逐渐变大使得基体和纤维界面无法有效传递荷载,最终导致分层破坏。

Turner M.K.等^[29]对美国南加利福尼亚州一

2 GFRP 桥面板构造与受力特点

GFRP 桥面板从截面构造上可分为箱形、桁架形、肋板形三类。从材料上来说,又可分为全 GFRP 桥面板、混凝土-GFRP 组成的组合桥面板、泡沫填充型 GFRP 桥面板。肋板形 GFRP 桥面板采用倒 T 形 GFRP 型材作为底板或底模与混凝土结合构成桥面板^[24-25]。相对于箱形、桁架形全 GFRP 桥面板(图 2),肋板 GFRP-混凝土组合桥面板造价较低,但截面高度大、自重大。对于箱形和桁架形全 GFRP 桥面板,单从横向受力性能来看,桁架截面比箱形更优^[26],但桁架截面腹板和顶、底板之间尖锐角隅结合部对于拉挤工艺来说容易产生纤维弯折、胶层富积,是典型的薄弱位置。箱形 GFRP 截面通过单、多室单元拼接组成,其截面抗弯及抗扭刚度大,试验研究表明,箱形 GFRP 桥面板在填充泡沫后横向刚度及疲劳性能均有较大提高^[27-28]。

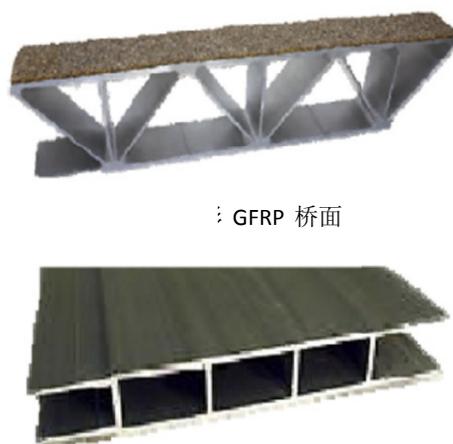


图 2 GFRP 桥面板结构形式

Fig 2 GFRP bridge deck configuration

座 18.3m 跨度采用 GFRP 桥面-钢主梁桥做了现

场试验, 结果表明: GFRP 桥面板有效宽度与混凝土桥有显著差异, 通过分析, 相同跨径的 GFRP 桥面板有效宽度约为混凝土桥的 66%。Moses J.P.等^[30]对美国已投入使用的 GFRP 桥面板实桥做了现场荷载试验和监测, 结果表明: GFRP 桥面板用于老旧桥改造具有较强的成本优势; 当更换为 GFRP 桥面板后, 由于恒载大幅减小, 故在钢主梁上的总应力减小, 但同时由于 GFRP 桥面板的有效宽度较小且上部横向分配系数增大, 活载产生的效应比原混凝土桥面板大, 因此疲劳效应需特别关注。

国内开展的 GFRP 桥面板受力性能研究主

3 桥面板结合部

拉挤 GFRP 型材腹板与翼缘结合部需通过弯折轴向织物实现腹板与翼缘的连接, 结合部处铺层构造复杂, 对如 T 型、工字型 GFRP 构件, 腹板-翼缘结合部受力常处于拉(压)-弯-剪组合状态, 应力状态复杂加之胶层富集、纤维弯折等因素, 使得腹板-翼缘结合部成为拉挤 GFRP 型材的薄弱点。截止目前, 公开发表的关于拉挤型 GFRP 结合部破坏机理的试验和理论研究较少。

Zi 等^[28]对 GFRP 箱型桥面板开展了横桥向疲劳荷载试验, 试验设计了在箱室内填充聚氨酯泡沫和不填充的对比试件, 结果表明: 填充聚氨酯泡沫对于 GFRP 箱型桥面板疲劳性能提高有明显作用, 未填充泡沫的空心截面疲劳破坏主要发生在腹板和底板的结合部。Ascione F.等^[35]开展了 28 个拉挤型 GFRP 型材的腹板-翼缘结合部拔出试验, 试验考虑了端点和中点加载两种模式、不同腹板高度、翼缘宽度等因素, 发现了此类结

要集中在箱型和肋板型^[31-32]。辛灏辉^[33]对全 GFRP 箱型桥面板开展了纵、横向四点弯曲试验研究, 试验结果表明: 在纵向弯曲时, 随着荷载增加桥面板中性轴高度呈现出轻微降低趋势, GFRP 桥面板损伤主要发生在截面受压区。黄辉^[34]等对混凝土-GFRP 组合简支板开展了极限承载能力试验, 分别采用了环氧树脂黏结和栓钉两种连接方式, 试验结果表明: 采用黏结和栓钉方式结合的板破坏模式分别为跨中混凝土受压破坏后 GFRP 型材下翼缘受拉开裂和 GFRP 型材侧壁失稳破坏。

合部的拔出破坏模式; 另外, 提出了结合部加载点拔出有效影响范围。Fascetti A.等^[36]采用细观一维压杆模型对 Ascione F.的结合部试验开展了数值模拟分析, 通过与传统的连续有限元方法对比, 细观一维压杆模型在结合部开裂路径和损伤预测方面更有优势。

4 桥面板温度效应研究

由于 GFRP 的基体材料在接近玻璃化温度时会产生软化, 基体对纤维的约束作用减弱同时使得层间约束也变小, 如图 3 所示, 当结构处在高温环境下时 (高于 200⁰C) GFRP 材料性能将大幅降低。若采用 GFRP 型材修建的桥梁发生火灾时, 从着火到扑灭、救援需要一定的时间, 在这段时间内结构应保持稳定, 建筑结构在这方面做了相关的抗火试验研究并提出了相应的构造解决措施^[37]。同时, 在正常的天气作用下, 桥面板受到自然界天气、日光辐射等影响, 呈现温度梯度, 其作用效应是 GFRP 桥梁设计重要的荷

载工况之一。

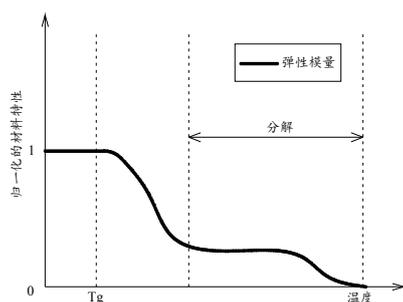


图3 GFRP材料特性-温度变化曲线

Fig.3 GFRP material property-temperature curve

Thomas Keller等^[38]对8个足尺的全GFRP箱型截面桥面板开展了火灾试验,在其试验中,考虑了水降温措施、外部荷载等对比条件,结果表明:采取了降温措施的GFRP桥面板在火灾中能够保持超过90分钟的结构完整性,结构安全能够满足相关规范要求;没有采取降温措施的桥面板在火灾中维持了57分钟,结构破坏机理为受压区基体软化后失去了对纤维的约束能力,导致受压区局部失稳。钟志鹏^[31]将GFRP箱型桥面板等效为正交异性桥面板,对其进行了温度梯度作用下的强度和变形进行了分析,结果表明正温度梯度对桥面板的挠度影响最大,整体降温对桥面板黏结界面影响最大;并指出腹板-底板结合部为最易失效的界面。Kong B、Cai.C.S等^[39]对美国Kansas州某GFRP蜂窝型桥开展了近2年的温度现场监测,将采集到的正、负温度梯度在蜂窝GFRP桥面顶、底板的数据,利用子模型简化计算模型,开展了温度梯度作用数值计算并和混凝土桥面板对比参数化分析,结果表明:由于温度作用产生的荷载效应比桥梁自身恒载和活载HS20产生的效应大;对于简支梁桥体系,与传统的混凝土桥梁不同,GFRP桥面板的温度梯度效应会使结构在跨中产生竖向位移。

5 GFRP 型材的连接

GFRP 型材之间的连接最常见的方式为螺栓、胶结。对于螺栓连接设计与理论在钢结构中非常成熟,但对于GFRP结构,由于材料的各项异性加之GFRP材料没有明显的塑性屈服平台使应力集中在塑性状态下重分布,这些显著差异使得GFRP螺栓从最小允许孔距、边距等几何尺寸参数到承载能力均与钢结构差异较大。胶结常用的粘接剂有环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸酯类等,聚氨酯类粘接剂稳定力学工作温度为 $-75^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ ^[40];丙烯酸酯类粘接剂强度高,但脆性大且对于温度、水分极为敏感;目前应用最广泛的是环氧类粘接剂。

在螺栓连接方面,试验与理论研究涉及了^[41-43]:螺栓连接形式(搭接或对接、单剪或双剪等)、几何尺寸(排距/孔径、列距/孔径、端距/孔径、厚度距/孔径等)、孔排列方式、层合板设计(纤维的类型、纤维的取向及形式、纤维体积含量、树脂类型、铺层顺序等)、螺栓孔隙、预紧力的大小等因素,并针对FRP板件螺栓连接的不同破坏形式提出了相关静力承载性能设计方法。部分学者对GFRP板件螺栓连接疲劳性能开展了研究,Ramkumar等^[44]探究了疲劳载荷作用下和静载作用下几何尺寸对连接破坏模式的影响规律;Crew等^[45]探究了拧紧力矩和疲劳寿命的关系;Starikov和Schön^[46-47]对不同铺层顺序的复合材料机械连接接头开展了疲劳性能试验。

6 研究发展趋势

1) 随着“一带一路”交通战略的逐步推进,大量的公路工程将在如青藏高原等严寒特殊环境条件下修建,GFRP桥梁耐久性好、结构轻盈易于施工,适于在寒区桥梁中应用;但应对GFRP型材经受低温等恶劣环境提出如强度、容许缺陷、抗断裂能力等性能指标要求;

2) 由于GFRP型材中基体对高温的敏感性,若一旦采用GFRP桥面板建造的桥梁着火,特别是火灾发生在桥面板上受压区,那么对结构安全极为不利,因此其耐火性能至关重要;

3) 桥梁用GFRP层合板与航空和汽车领域不同,其板厚通常较厚,结合部铺层层数多且复杂。从断裂力学的角度来说,板件厚度对断裂韧度起决定性作用,随着板厚增加,断裂韧度在一定范围内逐渐减小,结合部富胶区层间裂纹更易

扩展,因此结合部力学性能特别对于拉挤型GFRP更应引起关注。

7. 结语

GFRP型材在航空航天、汽车等领域有着广泛应用,但在我国桥梁工程中应用相对滞后。目前国内外针对GFRP型材及桥面板结构开展了一系列研究工作,在基本力学性能、耐久性、构造等多方面积累了丰富的经验和基础数据。在现有的研究基础上,GFRP桥面板在国内大规模工程应用还需在以下方面有所突破:1) GFRP型材标准化设计与制造,适用于工程建筑行业的GFRP材料性能测试标准;2) GFRP桥面板设计规范;3) 适用于老旧桥升级改造的GFRP结构的构造与受力研究;4) GFRP桥梁在极端温度环境下结构安全性评价。

参考文献

- [1] J Bai. Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications [M]. Oxford: Woodhead Publishing, 2013.
- [2] O'Connor J S. GRP bridge decks and superstructures in the USA [J]. Reinforced plastics, 2008, 52(6): 26-31.
- [3] Sá M F, Silvestre N, Correia J R, et al. Dynamic behaviour of a GFRP-steel hybrid pedestrian bridge in serviceability conditions. Part 2: Numerical and analytical study [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 118: 113-123.
- [4] Knippers J, Pelke E, Gabler M, et al. Bridges with Glass Fibre-Reinforced Polymer Decks: The Road Bridge in Friedberg, Germany [J]. Structural Engineering International, 2010, 20(4): 400-404.
- [5] Stankiewicz B. Composite GFRP deck for bridge structures [J]. Procedia Engineering, 2012, 40: 423-427.
- [6] 岳清瑞,杨勇新.纤维增强复合材料加固结构耐久性研究综述 [J].建筑结构学报,2009,30(06):8-15.
- [7] 刘玉擎,陈艾荣. FRP材料组合结构桥梁的新技术 [J].世界桥梁,2005(2):72-74.
- [8] 冯鹏,叶列平. GFRP空心板静载试验研究及分析 [J].工业建筑,2004,34(4):15-18.
- [9] 王景全,李嵩林,吕志涛. FRP型材-混凝土组合梁桥界面抗剪计算模型与试验 [J].桥梁建设,2014,44(1):44-49.
- [10] 熊治华,陈建兵,王似舜等.适用于高寒高海拔的钢-混凝土组合桥梁结构形式研究 [J].钢结构,2018(4),33(232):41-47
- [11] Hulsey L, Qiao P, Fan W, et al. Smart FRP Composite Sandwich Bridge Decks in Cold Regions [R]. Alaska University Transportation Center, 2011.
- [12] ASTM. D6110-10: 2010, Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics [S].
- [13] ASTM. ASTM D-5045-14: 2014, Standard test

- methods for plane-strain fracture toughness and strain energy release rate of plastic materials [S].
- [14] GB/T1451: 2005,纤维增强塑料筒支梁式冲击韧性试验方法[S].
- [15] Mahmoudi N, Hebbar A, Zenasni R, et al. Effect of Impact Directions, Fiber Orientation, and Temperature on Composite Material Strength [J]. Journal of composite materials, 2009, 43(16): 1713-1727.
- [16] Sanada K, Shindo Y. Characterization and modeling of fracture and damage behavior of notched woven fabric GFRP laminates under three-point bending at cryogenic temperatures [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007, 26(14): 1429-1440.
- [17] Liu W, Feng P, Huang J. Bilinear softening model and double K fracture criterion for quasi-brittle fracture of pultruded FRP composites [J]. Composite Structures, 2017, 160: 1119-1125.
- [18] Cho K, Park S Y, Kim S T, et al. Freeze-Thaw Effect on Coarse Sand Coated Interface between FRP and Concrete [J]. Engineering, 2013, 5(10): 807.
- [19] Shi J W, Zhu H, Wu G, et al. Tensile behavior of FRP and hybrid FRP sheets in freeze-thaw cycling environments [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 60: 239-247.
- [20] 刘建华, 赵亮, 李松梅,等. 盐雾环境对玻璃纤维增强树脂基复合材料力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2007, 24(3):18-22.
- [21] 于爱民, 李趁趁, 高丹盈,等. 恶劣环境下纤维增强聚合物片材拉伸性能 [J]. 复合材料学报, 2017, 34(7):1496-1504.
- [22] 刘兆松. GFRP 管材在酸性介质中的腐蚀行为及性能研究 [D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2015
- [23] Won J P, Lee S J, Kim Y J, et al. The effect of exposure to alkaline solution and water on the strength-porosity relationship of GFRP rebar [J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39(5): 764-772.
- [24] 范海丰, 刘玉擎, 代亮. GFRP-混凝土组合桥面板设计及试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(s1):356-360.
- [25] Nelson M, Fam A. Structural GFRP permanent forms with T-shape ribs for bridge decks supported by precast concrete girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 18(9): 813-826.
- [26] Yanes-Armas S, De Castro J, Keller T. System transverse in-plane shear stiffness of pultruded GFRP bridge decks [J]. Engineering Structures, 2016, 107: 34-46.
- [27] Zi G, Kim B M, Hwang Y K, et al. An experimental study on static behavior of a GFRP bridge deck filled with a polyurethane foam [J]. Composite structures, 2008, 82(2): 257-268.
- [28] Zi G, Lee D H, Kim B M, et al. Fatigue behavior of the foam-filled GFRP bridge deck [J]. Composites Part B: Engineering, 2009, 40(2): 141-148.
- [29] Turner M K, Harries K A, Petrou M F, et al. In situ structural evaluation of a GFRP bridge deck system [J]. Composite structures, 2004, 65(2): 157-165.
- [30] Moses J P, Harries K A, Earls C J, et al. Evaluation of effective width and distribution factors for GFRP bridge decks supported on steel girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(4): 401-409.
- [31] 钟志鹏. GFRP 桥面板黏结界面力学分析与试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [32] 郭涛. GFRP-混凝土组合桥面板受力性能研究 [D].北京: 清华大学, 2011
- [33] 辛灏辉.GFRP 桥面板材料-结构一体化设计研究 [D]. 上海: 同济大学, 2017
- [34] 黄辉, 王文炜, 戴建国. 两跨连续 GFRP-混凝土空心组合板受力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10):59-65.
- [35] Feo L, Mosallam A S, Penna R. Mechanical behavior of web-flange junctions of thin-walled pultruded I-profiles: an experimental and numerical evaluation [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 48: 18-39.
- [36] Fascetti A, Feo L, Nisticò N, et al. Web-flange behavior of pultruded GFRP I-beams: a lattice model for the interpretation of experimental results [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 100: 257-269.
- [37] Correia J R, Bai Y, Keller T. A review of the fire behaviour of pultruded GFRP structural profiles for civil engineering applications [J]. Composite Structures, 2015, 127: 267-287.
- [38] Keller T, Tracy C, Hugi E. Fire endurance of loaded and liquid-cooled GFRP slabs for construction [J]. Composites Part A: Applied Science and

- Manufacturing, 2006, 37(7): 1055-1067.
- [39] Kong B, Cai C S, Kong X. Thermal behaviors of concrete and steel bridges after slab replacements with GFRP honeycomb sandwich panels [J]. Engineering Structures, 2013, 56: 2041-2051.
- [40] Mohammad Sadegh Khani. Connections in Structural FRP Members [D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2015
- [41] Rosner C N, Rizkalla S H. Bolted Connections for Fiber-Reinforced Composite Structural Members: Experimental Program [J]. American Society of Civil Engineers, 2014, 7(4):232-238
- [42] 刘玉擎, 都骛, 辛灏辉, 等. 拉挤 GFRP 型材层合板螺栓连接试验 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 223-229.
- [43] Du A, Liu Y, Xin H, et al. Progressive damage analysis of PFRP double-lap bolted joints using explicit finite element method [J]. Composite Structures, 2016, 152: 860-869.
- [44] Ramkumar R L, Tossavainen E W. Strength and lifetime of bolted laminates [C]// Fatigue in Mechanically Fastened Composite and Metallic Joints. ASTM STP 927, Philadelphia, 1986:251-273.
- [45] Crew Jr J H. Bolt-bearing fatigue of a graphite/epoxy laminate [J]. Journal of Composite Materials, 1981(749):14.
- [46] Starikov R. Quasi-static and fatigue behaviour of composite bolted joints [R]. Department of Aeronautics report, 2001
- [47] Starikov R, Schön J. Fatigue resistance of composite joints with countersunk composite and metal fasteners [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24:39-47.