

桥梁 CFRP 缆索外包陶瓷纤维的防火性能研究

徐玉林¹, 诸葛萍^{1,2*}, 孙莉莉¹, 桑琴杨¹, 储焙宇¹

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 桥梁工程结构动力学国家重点实验室, 重庆 400060)

摘要: 碳纤维增强复合材料(CFRP)轻质高强, 性能优异, 但其耐高温性能差. 对桥梁 CFRP 缆索外包 30 mm 厚陶瓷纤维(CF)防火层的防火性能进行了模型试验研究, 使用有限元软件建立了相应的数值分析模型. 利用数值模拟对热释放率分别为 100 和 300 MW 两种桥面火灾作用下外包不同 CF 厚度的 CFRP 缆索内部的升温过程进行计算, 获得了各工况对应的缆索临界安全耐火时长, 并建立了 CFRP 缆索 CF 防火层厚度—临界安全耐火时长关系模型. 研究结果表明, 桥面火灾作用下, 对 CFRP 缆索外包 CF 防火层可大幅提高缆索的临界安全耐火时长. CF 厚度与缆索临界安全耐火时长基本上呈线性关系. 在热释放率为 100 和 300 MW 的车辆火灾持续作用下, 当 CF 防火层为 70 mm 时, 防火层-CFRP 缆索界面温度达到 250 °C 所需的临界安全耐火时长分别为 49 和 43 min.

关键词: 桥梁工程; 碳纤维增强复合材料; 缆索; 火灾; 陶瓷纤维

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 02-0091-06

碳纤维增强复合材料(CFRP)具有强度高、耐腐蚀、耐疲劳、热膨胀系数小的特点, CFRP 缆索作为主要承拉构件应用于大跨桥梁的前景良好^[1]. CFRP 由碳纤维原丝和基体材料^[2]组成, 实际工程中基体材料多为环氧树脂胶, 耐火性能差. 研究表明, 虽然碳纤维原丝在绝氧条件下具有极好的耐热性, 升华温度高达 3 650 °C, 但在有氧的环境中, 当温度超过 400 °C 时就会发生明显的氧化, 600 °C 时绝大部分被氧化^[3]. Wang 等^[4-6]研究了不同温度下直径为 9.5 mm 的 CFRP 筋的抗拉强度, 结果表明 350 °C 是 CFRP 材料的关键温度. 温度在 350 °C 以下时, CFRP 筋的弹性模量随温度的升高下降幅度不大, 而抗拉强度随着温度的升高呈线性减小; 当温度达到 350 °C 时, 其弹性模量较常温时下降了 10%, 而材料的抗拉强度仅为常温时的 45%; 当温度高于 350 °C 后材料强度急剧下降, 且性能变得不稳定; 500 °C 时材料强度完全丧失. Bisby 等^[7]研究了将 CFRP 板分别升温到 100, 200, 300, 400 °C 3 h

然后降至室温的材料残余强度大小, 研究表明, 环氧树脂胶的分解温度大小对 CFRP 板的力学性能影响较大, 而环氧树脂胶的玻化温度对材料影响较小, CFRP 板在达到 100, 200 以及 300 °C 冷却后的残余强度分别为室温时的 96%, 90% 和 92%, 材料温度超过 400 °C 时, CFRP 材料开始燃烧, 强度下降很大. 桥梁上通行的汽车特别是油罐车一旦在桥上或者桥下发生火灾, 将对整个桥梁结构造成极大的破坏. 贾玉莲^[8]的研究表明, 油罐车火灾燃烧速度快, 火焰温度高, 辐射力强, 火焰中心温度可达 1 400 °C, 危害巨大. 因此, 当火灾发生时, 桥梁结构中无防火保护的 CFRP 缆索系统的安全将会受到严重威胁, 有必要对其开展防火研究.

Williams 等^[9]以及 Bisby 等^[10]对 CFRP 板在不同厚度的惰性层和膨胀层双体系防火系统下 ASTM E119 火灾规模时的防火性能进行了研究, 均取得较好的耐火效果. 徐志胜等^[11]研究了 CFRP 加固的混凝土梁的受火性能, 并用 1.5 mm 厚的防

收稿日期: 2018-05-15.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY15E080012); 宁波市自然科学基金 (2017A610314); 桥梁工程结构动力学国家重点实验室开放基金 (201506); 浙江省大学生科技创新活动计划 (2018R405040).

第一作者: 徐玉林 (1993—), 男, 山西晋城人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 结构工程. E-mail: 1224431255@qq.com

*通信作者: 诸葛萍 (1982—), 男, 浙江瑞安人, 博士/副教授, 主要研究方向: 桥梁工程. E-mail: zhugeping@nbu.edu.cn

火涂料进行保护, 结果表明, 在 300°C 的温度作用下, 加固梁可得到有效保护. 吴波等^[12]对不同防火构造形式下 CFRP 板的加固性能进行了研究, 结果表明, 在防火效果方面, 外包 15 mm 厚水泥砂浆较涂相同厚度防火涂料差, 且防火涂料厚度越大, 防火效果越好. 胡克旭等^[13]研究了厚型防火材料保护下的 CFRP 加固混凝土结构的防火性能, 结果表明采用 50 mm 厚防火涂层全截面保护的加固梁其耐火极限可以达到 2.5 h. Turkowski 等^[14]研究了在两种不同防火材料保护下的 CFRP 板加固梁在火灾下的受火性能, 研究表明, 防火层的厚度越大, 防火效果越好, 相同厚度的石膏比硅酸钙的防火性能要好, 150 mm 厚的石膏可以保护 CFRP 加固梁 5 h, 相同厚度的硅酸钙只能保护 3 h. Carlos 等^[15]研究了 3 种不同防火材料保护下的 CFRP 板加固梁在火灾下的受火性能, 研究表明, 50 mm 厚的蛭石珍珠岩防火层比黏土层以及硅酸盐水泥都要好, 它们的保护时间分别为 120.3, 51.7 以及 30.2 min. 目前, 还缺乏有关 CFRP 缆索(筋材)的防火资料, 急需开展这方面的研究.

本文对外包 30 mm 厚陶瓷纤维(CF)的 CFRP 缆索的耐火性能进行了火灾试验研究, 并对该防火系统对应试件的防火性能进行了数值模拟计算. 通过数值模拟对 CFRP 缆索在不同厚度 CF 防火层防护以及不同规模车辆火灾作用下的防火性能进行了研究, 获得了防火层厚度对防火性能的影响规律, 建立了 CF 防火层厚度和临界安全耐时长的关系模型. 本文研究可为实际 CFRP 缆索工程的防火系统和火灾灭火方案设计提供参考.

1 30 mm 厚陶瓷纤维防火实验

为给更深入的 CFRP 缆索火灾研究提供相应数值模拟分析所需的电加热高温试验系统的内部升温曲线, 本文开展了 CFRP 缆索外包 CF 层的防火试验研究, 并得到了相应的临界安全耐时时长.

1.1 实验方案

CF 是一种纤维状轻质耐火材料, 具有质地柔软、耐高温、热稳定性好、导热率低、比热容小的特点, 可用在 $1200\sim 1600^{\circ}\text{C}$ 的高温工业窑炉、加热管道以及高温管道, 是一种有效的节能材料^[16].

以高纯合成粉料为原料的高纯型、高铝型、含

锆型 CF 针刺毡的导热系数随着温度的升高而升高, 比热容随着温度的升高几乎不变, 如图 1、2 所示^[16]. 密度不随着温度的升高而改变.

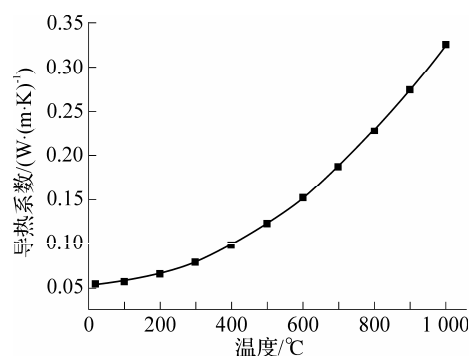


图1 CF 导热系数随温度变化

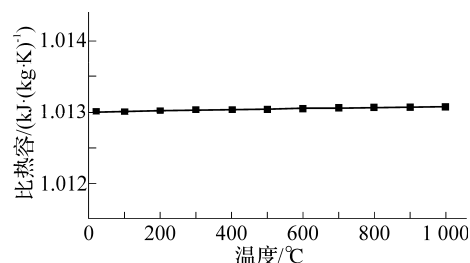


图2 CF 比热容随温度变化

CFRP 缆索 CF 防火层的试验设计总厚度为 30 mm, 由 5 层 CF 针刺毡卷裹而成, 试件长度为 500 mm. 为使防火层层间贴合紧密, 试件外表用不锈钢卡箍箍紧. 为消除端部热辐射对试件内部升温的影响, 试件端部用 5 层 6 mm 厚的 CF 针刺毡进行隔热处理(图 3). 试件中部埋设有 WRKK-19 型热电偶, 用于监测试件在受火状态下的内部温度, 从而获得火灾作用下 CFRP 缆索-防火层界面的升温过程. 试验安装见图 4. 本试验共设有 3 个试件.

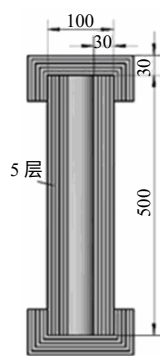


图3 试件构造(mm)

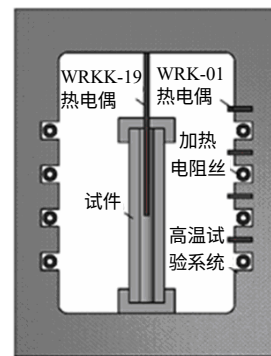


图4 试件安装示意图

将试件放入 GWM-1100 电加热高温试验系统中开展火灾试验(图 4). 电炉自带的分布于炉壁不

同区域的 WRK-01 型热电偶可测定炉内火灾环境温度, 并对炉火灾温度的变化过程进行监测. 试件内部的温度由 ASI-L1500B 温度记录仪读取.

1.2 实验结果

炉内环境及试件内部升温过程测量结果如图 5 所示. 根据图 5, 炉内环境的升温曲线可拟合为

$$T = 884.19 - 917.55e^{-t/22.25}, 0 < t \leq 38, \quad (1)$$

式中: T 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为作用时间, min .

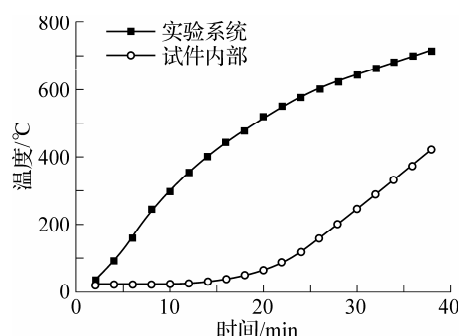


图 5 试验温度记录结果

由图 5 可知, 试件在受火过程中, 其内部温度在初始阶段上升缓慢, 随着环境温度持续升高, 试件温度升高速度逐渐加快. 受热时间在 0~25 min 内, 炉内环境温度上升速度较快, 而试件内部温度上升缓慢; 受热 25 min 时, 试件内温度为 100°C , 对应的高温试验系统内部温度为 550°C ; 受热时间超过 25 min 后, 炉内温度上升速度减缓, 而试件内部升温速度明显加快; 受火 30 min 时, 试件内部温度为 246°C , 对应的高温试验系统内部温度为 642°C ; 当火灾作用 38 min 时, 试件内部温度快速增加至 421°C , 对应的高温试验系统内部温度为 721°C . 说明当火灾温度达到 550°C 时, 隔热层外部的部分材料因氧化而导致隔热性能快速下降, 热传递的速度也随之加快. 这种现象的出现与 CF 材料导热系数随着温度的升高而非线性增加有关(图 1). 而试件内部温度与炉内环境温度相差较大, 且试件内部温度一直远小于系统内部温度, 说明 30 mm 厚 CF 防火层具有较好的隔热效果.

根据 Wang 等^[4-6]研究结果, 桥梁缆索的安全系数一般为 2.5, 而当 CFRP 缆索温度达到 350°C 时, 其抗拉强度下降了 45%, 此时缆索的安全系数为 1.375. 考虑到实际工程应用中的 CFRP 缆索在受火的同时还承受着拉力, 这使得缆索在受火时温度对其的影响更加不利. 综合以上, 选取 250°C 作

为 CFRP 的耐火临界温度, 这时 CFRP 缆索的抗拉强度下降了 32%, 缆索的安全系数为 1.7. 受火过程中试件达到该温度所对应的时间称为临界安全耐火时间, 这时 CFRP 缆索的力学性能损失较小, 恢复至室温后 CFRP 缆索的强度可恢复, 对桥梁整体结构的影响也较小. 本文试件在受火作用 30 min 后, 其内部温度达到了 246°C , 可将该时长称为该试件的临界安全受火时长. 若火灾继续作用, 环境温度持续上升, CFRP 缆索的力学性能会逐渐下降直至丧失承载能力, 甚至冷却至室温后性能也无法恢复, 对桥梁整体结构造成不可挽回的损失.

2 陶瓷纤维厚度对耐火性能的影响

2.1 数值模拟模型

为有效评估不同类型和不同层厚 CFRP 缆索防火系统的防火效果, 采用 ANSYS 软件开展了 CFRP 缆索防火系统的防火性能数值模拟研究. 数值模型的防火层首先采用与本文试验相对应的防火层设计, 即采用 30 mm 厚 CF 层以及 40 mm 厚空气层. 试验中已对试件端部进行了隔热处理, 因此, 数值模拟不考虑端部的热量汇入.

空气的热物理性质参考文献[17], 假定 CF 材料和空气各个方向的导热系数相同, 试件内部没有热生成, 试件外表面施加 GWM-1100 电加热高温试验系统内部温度(公式 1). 由于试件四面受火, 端部绝热, 且各层 CF 材料物理性质相同, 可以近似认为温度随着轴向与环向变化不大, 取单位长度作为模拟对象. 受火面考虑对流, 施加随温度变化的对流系数. 本文使用 Solid70 单元, 每个单元 8 个节点, 每个节点只有 1 个温度自由度. 数值模拟划分网格如图 6 所示, 模型总共有 4185 个节点, 3584 个单元. 模拟结果与实验结果对比如图 7 所示. 38 min 时试件截面温度分布如图 8 所示.

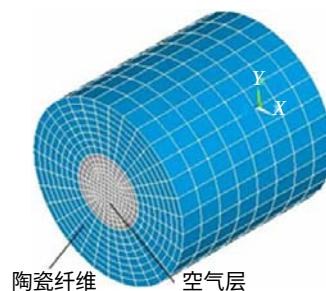


图 6 数值模拟模型图

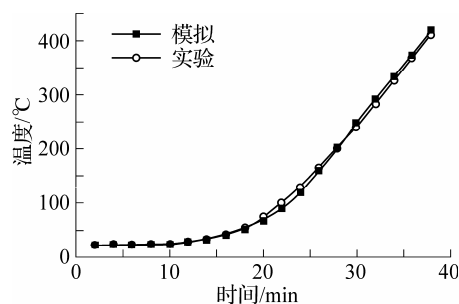


图7 拟合值与实验值对比曲线图

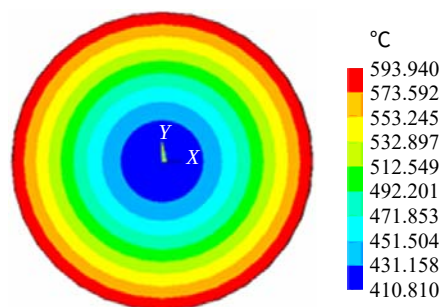


图8 38 min 时试件截面温度分布图

由图7可知,数值模拟结果与实验结果对比良好.因此,本文利用数值模拟方法对CFRP 缆索CF 防火系统的防火性能继续深入研究.重点对不同的火灾规模、CF 防火层厚度对CFRP 缆索防火效果影响规律进行研究.

2.2 数值模拟计算

试验中的电加热系统内部的升温过程并不能代表真实火灾发生时试件外部环境的升温情况.在对桥梁用CFRP 缆索防火系统的数值模拟计算中,需采用与实际工程相符的各种火灾级别对应的敞开空间环境温度升温曲线.国内外有关火灾研究机构对车辆引发公路火灾的规模提出了建议值,见表1^[18].

表1 热释放率峰值(火灾规模)建议值 MW

车辆类型 和数量	热释放率 峰值	车辆类型和数量	热释放率 峰值
1~2 辆小汽车	3~5	1 辆空载货车	30
2~3 辆小汽车	10	1 辆载有可燃物的货车	50~100
1 辆公交车	15~30	1 辆载有危险品的货车	150
1 辆小卡车	10	1 辆油罐车或多辆货车	200~300

根据李利军^[18]的研究可得到100 以及300 MW 公路火灾规模下的车辆火灾升温曲线分别为

$$T = \begin{cases} 2.46t^2 + 20, & 0 \leq t < 13.5, \\ 908.46 - 4255.83e^{-0.168t}, & 13.5 \leq t \leq 60, \end{cases} \quad (2)$$

和

$$T = \begin{cases} 3.28t^2 + 20, & 0 \leq t < 15, \\ 1046.01 - 8754.48e^{-0.228t}, & 15 \leq t \leq 60. \end{cases} \quad (3)$$

以工程常用500 t 级CFRP 缆索对应的防火系统为例开展数值模拟研究.对于含直径5 mm 的CFRP 筋的索股,该级别对应的实际工程设计极限拉力为5 330 kN,其直径为55 mm.数值模型由CF 防火层和CFRP 缆索两部分组成,CFRP 材料的热物理性质参见文献[19],模型如图9 所示.对分别设有40、50、60 及70 mm 厚度防火层的缆索分别在热释放率为100 和300 MW 规模火灾下的防火性能进行模拟计算,从而获取1 h 内CF 与CFRP 缆索界面的升温过程,计算结果如图10 和图11 所示.

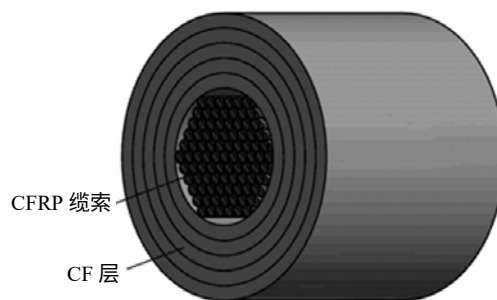


图9 CFRP 缆索防火系统模型

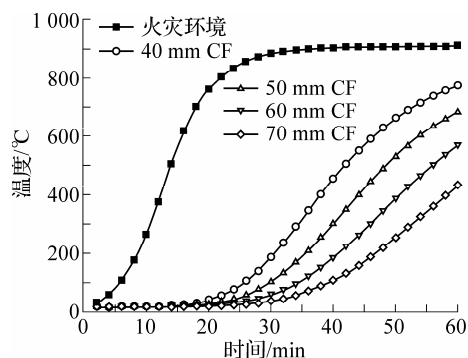


图10 100 MW 规模火灾下数值模拟结果

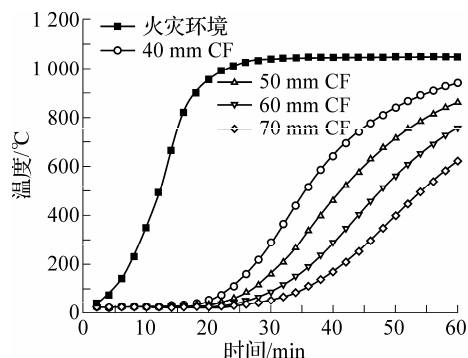


图11 300 MW 规模火灾下数值模拟结果

计算结果表明, 100 和 300 MW 规模火灾前期升温快, 火灾作用 13 min 时, 100 MW 规模火灾对应的环境温度达到 430 °C, 而 300 MW 规模火灾作用相同时间对应的环境温度达到 758 °C, 后期, 火灾温度继续升高但趋于平缓, 100 MW 火灾环境温度保持在 900 °C 左右, 而 300 MW 规模火灾环境温度保持在 1 050 °C 左右. 两种规模火灾的升温速度以及最高温度都高于试验时的炉内火灾情况.

火灾初期, CF-CFRP 缆索界面温度上升缓慢, 但随着环境温度的持续升高, 界面升温逐渐加快. 随着 CF 厚度的增加, CFRP 缆索出现温度明显加快现象的时间也相应延长, 在 100 MW 规模火灾下, CFRP 缆索升温速度达到 $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 所需要的时间从 18 min 延长至 30 min; 在 300 MW 规模火灾下, 所需时间从 16 min 延长至 28 min. 同时, CFRP 缆索 60 min 后的温度也随之降低.

100 和 300 MW 规模火灾情况下不同厚度 CF 保护下的 CFRP 缆索的安全临界时长如图 12 所示.

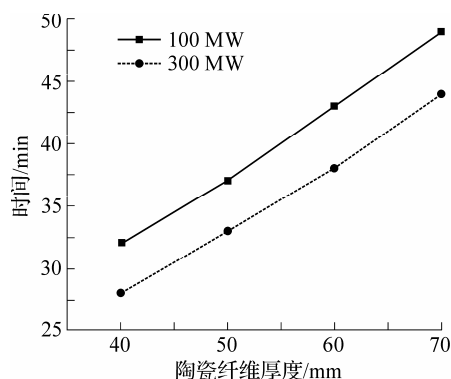


图 12 CFRP 缆索的临界安全时间

根据图 12 的模拟结果, 可以获得 100 和 300 MW 规模火灾情况下 CFRP 缆索临界安全耐火时长与 CF 厚度的关系模型拟合结果.

火灾热释放率为 100 MW 情况:

$$t = 3h / 5 + 7, 30 \leq h \leq 80, \quad (4)$$

式中, h 为 CF 的厚度, mm.

火灾热释放率为 300 MW 情况:

$$t = h / 2 + 8, 30 \leq h \leq 80. \quad (5)$$

对于更大吨级 CFRP 缆索在相同防火条件保护下, 缆索的临界安全耐火时间会延长. CFRP 材料的导热系数随着温度的升高而降低, 温度较低时, CFRP 的导热系数很大. 当外层的 CFRP 筋温度升高时, 很快将热量传递至内部的 CFRP 筋, 使得

外层的 CFRP 筋温度降低, 这对延长 CFRP 缆索的临界安全耐火时长有利.

上述模型可为 CFRP 缆索的防火设计提供参考. 在实际工程中, 利用本文研究方法对 CFRP 缆索的防火系统进行数值模拟研究, 并在数值模型中施加空间升温曲线以及 CFRP 材料的相关热力学参数, 可获得实际工程中缆索的临界安全受火时长. 若在临界安全受火时长内进行灭火作业, 可有效地降低 CFRP 缆索桥梁的火灾损失. 否则, 火灾会导致 CFRP 缆索承载力的显著降低甚至危及整个桥梁结构的健康. 实际工程可根据相应的临界安全受火时长提前制定有关防火措施和灭火预案, 从而在火灾发生时, 可对灭火救灾工作进行有效科学的指导.

3 结论

本文对 CFRP 缆索的防火开展了试验和数值模拟研究, 得出如下结论:

(1) 外包 CF 防火层的 CFRP 缆索在火灾炉中受火作用后, 随着受火时间的延长, 防火层-缆索界面温度逐渐升高, 且升温速度逐渐加快. 对于厚度为 30 mm 的 CF 防火层, 当火灾作用 30 min, 环境温度达到 642 °C 时, 防火层内部温度仅为 246 °C.

(2) 在桥面敞开空间火灾作用下, CF 防火层可有效提升 CFRP 缆索的临界安全耐火时长. 防火层厚度越厚, 临界安全耐火时长越长, 两者基本上呈线性关系. 在热释放率为 100 和 300 MW 的车辆火灾规模下, 当 CF 为 70 mm 时, 防火层-CFRP 缆索界面温度达到 250 °C 所需的临界安全耐火时长分别为 49 和 43 min, 在该时间段内扑灭火灾可避免 CFRP 缆索产生不可逆的损伤.

参考文献:

- [1] 李翠娟, 童育强, 刘明虎, 等. 超大跨径 CFRP 主缆悬索桥合理结构体系研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(1): 62-67.
- [2] 诸葛萍, 章子华, 丁勇, 等. 土木工程用 CFRP 筋弯折抗拉性能[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1300-1305.
- [3] 唐龙贵, 赵书经. 碳纤维的抗氧化处理[C]. 中国科学技术协会青年学术年会, 1995: 1301-1305.
- [4] Wang Y C, Wong P M H, Kodur V. An experimental study of the mechanical properties of fiber reinforced polymer

- (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures [J]. *Composite Structures*, 2008, 80(1):131-140.
- [5] Wang Y C, Kodur V. Variation of strength and stiffness of fibre reinforced polymer reinforcing bars with temperature [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2005, 27(9):864-874.
- [6] Wang Y C, Wong P M H, Kodur V. Mechanical properties of fibre reinforced polymer reinforcing bars at elevated temperatures[C]. *SFPE/ASCE Specialty Conference: Designing Structures for Fire*, 2003:183-192.
- [7] Bisby L A, Foster S K. High temperature residual properties of externally-bonded FRP systems[C]. *7th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, 2005:1235-1252.
- [8] 贾玉莲. 油罐车火灾的数值模拟[D]. 太原: 中北大学, 2010.
- [9] Williams B K, Kodur V K R, Bisby L A, et al. The performance of FRP-strengthened concrete slabs in fire[C]. *4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, 2004:1-8.
- [10] Bisby L A, Kodur V K R, Green M F. Performance in fire of FRP confined reinforced concrete columns[C]. *4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, 2004:16-20.
- [11] 徐志胜, 冯凯, 张威振, 等. CFRP 加固钢筋混凝土梁火灾后的试验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(1):98-100.
- [12] 吴波, 王军丽. 碳纤维布加固钢筋混凝土板的耐火性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(6):26-31.
- [13] 胡克旭, 何桂生. 碳纤维加固钢筋混凝土梁防火方法试验研究[J]. *同济大学学报*, 2006, 34(11):1451-1456.
- [14] Turkowski P, Łukowski M, Sulik P, et al. Fire resistance of CFRP-strengthened reinforced concrete beams under various load levels[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 172: 1176-1183.
- [15] Carlos T B, Rodrigues J P C, de Lima R C A, et al. Experimental analysis on flexural behaviour of RC beams strengthened with CFRP laminates and under fire conditions[J]. *Composite Structures*, 2018, 189:516-528.
- [16] 崔之开. 陶瓷纤维[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [17] Holman J P. *Heat Transfer*[M]. Osborne: McGraw-Hill, 1985.
- [18] 李利军. 公路火灾温度场数值模拟及大跨径缆索承重桥梁火灾分析[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [19] Griffis C A, Masumura R A, Chang C I. Thermal response of graphite epoxy composite subjected to rapid heating[J]. *Journal of Composite Materials*, 1981, 15(5): 427-442.

Fire safety of CFRP cable system under the bridge fire

XU Yu-lin¹, ZHUGE Ping^{1,2*}, SUN Li-li¹, SANG Qin-yang¹, CHU Bei-yu¹

(1.Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.State Key Laboratory of Bridge Engineering Structural Dynamics, Chongqing 400000, China)

Abstract: To address the problem of poor performance of the carbon fiber reinforced polymer (CFRP) cable, experiment and simulation were conducted under the 30 mm thick ceramic fiber (CF) blanket condition. By using the finite analysis software, the performance of the CF with the thickness varying from 40 to 70 mm under the 100 and 300 MW scales vehicle fire was investigated, from which the relationship between the thickness of CF layer and fire resistance was acquired. And then the relation model between the thickness of fire protection layer and critical safety time was established. The research shows that wrapping CF blanket can effectively prolong the critical safety time of the CFRP cable under the bridge fire. There is a linear relationship between the thickness of CF blanket and critical safety time. With the thickness of CF blanket being 70 mm, the safety times will be 49 and 43 min respectively when the temperature is 250 °C on the interface of fire blocking layer and the CFRP cable is under the 100 and 300 MW scale fire for one hour.

Key words: bridge engineering; CFRP; cable; fire; ceramic fiber

(责任编辑 韩 超)