

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201709047

# 不同保护措施下 CFRP 加固混凝土梁耐火性能试验

胡克旭<sup>1</sup>, 侯梦君<sup>1</sup>, 高皖扬<sup>2</sup>, 董坤<sup>3</sup>, 夏静<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;  
3. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 由于碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)在火灾中易燃烧, 未采取防火保护措施的 CFRP 加固混凝土构件的耐火性能不能满足防火规范要求. 为深入研究 CFRP 加固钢筋混凝土梁在不同防火保护措施下的耐火性能, 在本课题组以往研究基础上, 设计了 9 根相同截面和配筋的混凝土梁, 采取不同加固方式和防火保护措施, 通过 ISO834 标准火灾试验, 详细分析了不同 CFRP 锚固方法(无锚固/机械锚固/U 形箍锚固)、不同防火材料(超薄型防火涂料/厚型防火涂料/普通水泥砂浆)以及分区防火保护方法对 CFRP 加固钢筋混凝土梁温度场分布和高温变形的影响. 结果表明: 在本文试验条件下, 相比于机械锚固, 端部碳纤维 U 形箍锚固在试件挠度控制方面具有更好的效果; 超薄型防火涂料与普通水泥砂浆配合使用的防火保护措施可行; 采用 20 mm 普通水泥砂浆和 2 mm 超薄型防火涂料组合的防火效果好于 20 mm 厚型防火涂料保护的防火效果.

**关键词:** 钢筋混凝土梁; CFRP 加固; 防火保护; 火灾试验; 耐火性能

**中图分类号:** TU377.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)06-0138-07

## Experimental study on fire performance of CFRP-strengthened reinforced concrete beams with different protection schemes

HU Kexu<sup>1</sup>, HOU Mengjun<sup>1</sup>, GAO Wanyang<sup>2</sup>, DONG Kun<sup>3</sup>, XIA Jing<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. School of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

**Abstract:** The reinforced concrete (RC) components strengthened with carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) without fire protection measures are difficult to meet the standard requirements of fire resistance rating due to the flammability of CFRP. To study the fire performance of CFRP-strengthened RC beams based on the previous studies, nine RC beams with the same geometry and steel reinforcement were prepared with different strengthening methods and fire insulation schemes and tested under the ISO 834 standard fire. The test variables included various anchorage systems for externally bonded (EB) CFRP sheets (no anchorage, mechanical anchorage and U-wrap CFRP sheets), different fire insulation materials (intumescent fire-retardant coatings, cement-based fire protection mortar and cement mortar) and different thicknesses of fire insulation layers for different zones along the span direction. The temperature distributions and the deflection responses of these specimens under fire exposure were recorded and compared. It has demonstrated under this test condition that: U-wrap CFRP sheets used as the anchorage system are more efficient in limiting the deflection responses compared to the mechanical anchorage system; the combined use of the intumescent fire-retardant coatings and the cement mortar is practicable to protect the specimen from fire damage; the fire insulation provided by the 20 mm cement mortar and 2 mm intumescent fire-retardant coatings is better than that of 20 mm thick fire protection mortar.

**Keywords:** reinforced concrete beams; CFRP-strengthening technique; fire insulation; fire test; fire resistance

由于碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, 简称 CFRP)具有轻质高强、耐腐蚀和施工便捷等优势, 粘贴 CFRP 加固技术已经成为中国近 20 年来钢筋混凝土结构加固领域最为普

遍的方法<sup>[1]</sup>.

鉴于 CFRP 材料及其配套胶黏剂材料较差的耐高温性能, 对 CFRP 加固的结构构件的防火保护措施研究受到重视. Deuring<sup>[2]</sup> 最早进行 CFRP 加固混凝土梁的耐火试验研究, 表明防火保护能明显提高 CFRP 加固混凝土梁的耐火极限. 之后, Blontrock 等<sup>[3]</sup> 考察了防火板厚度、防火保护位置、防火板的粘贴方式等多个因素对 CFRP 加固梁的耐火性能的

收稿日期: 2017-09-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51408521)

作者简介: 胡克旭(1964—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 董坤, dongkun2012@163.com

影响. Williams 等<sup>[4]</sup>和 Chowdhury<sup>[5]</sup>的试验研究了防火涂料的厚度对 CFRP 加固梁的耐火性能的影响,并指出在设计过程中采用基于玻璃化温度的耐火极限判定标准是过于保守的. Stratford 等<sup>[6]</sup>考察了 CFRP 加固梁在“真实”火灾试验下的性能表现,试验表明无论采用何种加固方式,CFRP-混凝土界面的温度都会在较短时间内达到其玻璃化温度. Ahmed 等<sup>[7]</sup>试验考虑了不同的火场条件、不同保护类型、轴向约束条件和 CFRP 锚固区温度的影响. 吴波等<sup>[8]</sup>考察了梁端轴向和转动约束、防火涂料厚度、荷载比等参数对约束梁高温变形及内力的影响. Wu 等<sup>[9]</sup>针对常温下钢筋混凝土梁的加固法存在的问题,对目前的 3 种加固方法(外贴法、嵌贴法、机械连接法)加以综合和改进,提出了复合粘结技术(HB-FRP). 笔者所在课题组先后进行了多次防火保护的 CFRP 加固钢筋混凝土梁的耐火试验<sup>[10-11]</sup>,试验结果表明,火灾中 CFRP 加固作用的失效过程与防火保护措施密切相关.除了上述试验研究之外, Gao 等<sup>[12-13]</sup>建立了基于塑性损伤力学与裂缝带模型的钢筋混凝土梁及 FRP 加固钢筋混凝土梁的有限元模拟方法,同时将基于性能设计的思想应用在 FRP 加固钢筋混凝土结构的耐火设计中,针对 FRP 加固梁提出了基于性能的三等级耐火设计方法<sup>[14]</sup>及一系列的温度场及耐火极限简化计算方法<sup>[15-17]</sup>,该方法被现行国家标准《纤维增强复合材料工程应用技术规范》修订版<sup>[18]</sup>所采用.

本文基于国内外对 CFRP 加固钢筋混凝土梁耐火性能的研究现状,以及课题组前期的研究成果,结合常温下 CFRP 粘贴和机械锚固同时运用的复合粘结技术,设计并进行了不同防火保护措施下的 CFRP 加固钢筋混凝土梁耐火试验,对防火保护措施和端部锚固方式对加固梁耐火性能的影响进行综合研究.

## 1 试验设计

### 1.1 试件设计与制作

本次试验共设计 9 根相同截面和配筋的混凝土梁,包括 3 根常温试验梁和 6 根火灾试验梁. 3 根常

温试验梁中 1 根为未加固对比梁,另 2 根采用 CFRP 加固(其中 1 根端部采用附加机械锚固,1 根端部无附加锚固),用以获得其极限承载力,并确定火灾试验梁的加载值. 6 根火灾试验梁工况如表 1 所示, CFRP 端部分别采用无附加锚固、附加碳纤维 U 形箍锚固和附加机械锚具锚固;梁底和侧面采用厚型防火涂料、普通水泥砂浆+超薄型防火涂料保护,梁端还另外采用加厚厚型涂料(B2-2)、厚型涂料+超薄涂料(B2-3、B2-4)进行重点防火保护.

钢筋混凝土梁配筋见图 1,梁长 6.0 m,跨度 5.2 m(受火跨度 4.5 m);截面 250 mm×450 mm,混凝土保护层厚度为 20 mm.梁底受拉筋 3 $\Phi$ 20,上部架立筋 2 $\Phi$ 14,箍筋 $\Phi$ 8@200.采用商品混凝土的设计强度为 C30,实测 28 d 立方体抗压强度为 37.0 MPa,弹性模量 32.8 GPa.底部受拉筋实测屈服强度 353 MPa,极限强度 555 MPa,上部架立筋实测屈服强度 456 MPa,极限强度 600 MPa,箍筋实测屈服强度 438 MPa,极限强度 611 MPa.

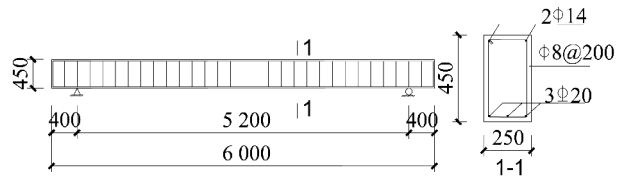


图 1 试件尺寸及配筋图(mm)

Fig.1 Geometry and reinforcement details of test specimens (mm)

混凝土梁自然养护 28 d 后,在梁底部粘贴 2 层 200 mm 宽的碳纤维布进行加固,碳纤维布采用英国福瑞斯公司 Forrisio - CF30 型号产品,面密度 300 g/m<sup>2</sup>,名义厚度为 0.167 mm/层,抗拉强度 3 773 MPa,弹性模量 240 GPa.胶黏剂采用该公司配套的 Forrisio-CFA 浸渍胶,经示差扫描量热法测试得其玻璃化温度为 53 ℃.

附加碳纤维 U 形箍锚固所用材料与梁底碳纤维相同,梁端部 U 形箍各 3 道,净距 100 mm,宽 150 mm(最外一道宽 200 mm),如图 2(a)所示.附加机械锚固采用 8.8 级 M6 自攻型锚栓固定 4 mm×40 mm×210 mm 规格的 Q235 钢压板,梁端部钢压板各 5 道,中心间距 100 mm,见图 2(b).

表 1 火灾试验梁防火保护方法及端部锚固措施一览表

Tab.1 Fire insulation schemes and anchorage systems of CFRP sheets for all test specimens

试件编号	防火保护方法		CFRP 端部附加锚固措施
	端部	跨中	
B2-1	20 mm 厚型涂料	20 mm 厚型涂料	无
B2-2	70 mm 厚型涂料	20 mm 厚型涂料	无
B2-3	20 mm 厚型涂料+2 mm 超薄型涂料	20 mm 厚型涂料	无
B2-4	20 mm 厚型涂料+2 mm 超薄型涂料	20 mm 厚型涂料	附加机械锚具
B2-5	20 mm 水泥砂浆+2 mm 超薄型涂料	20 mm 水泥砂浆+2 mm 超薄型涂料	附加 CFRP U 形箍
B2-6	20 mm 厚型涂料	20 mm 厚型涂料	附加 CFRP U 形箍

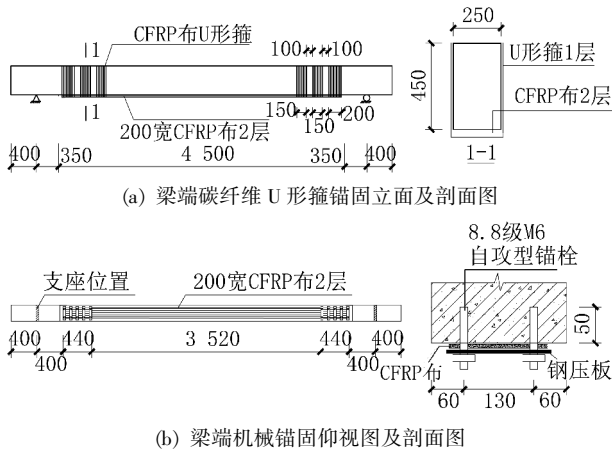


图 2 CFRP 布端部锚固方式

Fig.2 Anchorage systems of CFRP sheets

CFRP 加固完成后,进行防火保护施工.水泥砂浆采用现场搅拌,水泥为太仓海螺牌复合硅酸盐水泥(PC32.5R),水泥:砂:水=1:3:0.6.厚型防火涂料为上海汇丽涂料有限公司 SJ-2 室内厚型钢结构防火涂料,常温下热工性能为:密度  $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,比热  $1000 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ,导热系数  $0.12 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ .超薄型防火涂料为阿克苏诺贝尔防护涂料(苏州)有限公司的 Interchar1120 型水性膨胀型防火涂料,常温下密度  $1557 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,当量比热  $800 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ,当量导热系数  $0.0152 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ .各试验梁的防火保护方法见表 1,防火保护范围为受火跨度 4.5 m 长的区域,其中跨中 3.5 m 区域为跨中保护区域,两端各 0.5 m 范围为端部保护区域,见图 3.

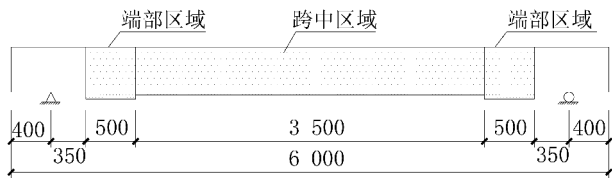


图 3 防火保护区域示意

Fig.3 Fire insulation schemes for different zones

为防止防火保护层在受火过程中脱落,在防火保护层内设置 1 道(20 mm 厚保护层)或 3 道(70 mm 厚保护层)20 mm×20 mm 的钢丝网片.施工前先对梁表面进行粗糙处理,以增加防火保护层与原混凝土梁面的黏结性能,施工时防火保护层分层涂抹,分层厚度约 10 mm.防火保护施工完成后,自然养护 5 个月后进行火灾试验.

1.2 试验加载与测试

3 根常温试验梁试件为 B0、B1-1 和 B1-2,其中 B0 为未加固的对比梁,B1-1 和 B1-2 采用 CFRP 加固,B1-1 端部无附加锚固,B1-2 端部附加机械锚具锚固.3 根梁均采用两点对称加载,跨度 5.2 m,加载点间距 1.5 m.试验时观测梁的裂缝和挠度变形以及破坏形态,测试梁的承载能力,以考察 CFRP 加固

效果,并根据加固梁的承载能力确定后续火灾试验梁进行火灾试验时的加载值.

6 根火灾试验梁 B2-1~B2-6 进行三面受火试验,试验在同济大学结构抗火试验室的“水平构件试验炉”中进行.试件加载和受火情况如图 4 所示,根据火灾试验标准<sup>[19]</sup>,采用四分点加载(加载点位置按试验室分配梁尺寸略作调整),先恒载 30 min 后再按 ISO834 标准升温曲线升温,且在整个火灾试验过程中保持恒载.试验分 3 批进行,试验批次及施加荷载见表 2,由于试验设备原因,第 3 批试件的实际荷载比前两批大了 20%.

试验过程中测试梁的内部温度反应和跨中挠度变化,并观察防火保护层的脱落现象.梁的内部温度测点位于跨中和端部截面,测点布置如图 5 所示.试验预计受火时间为 2.5 h,为进一步考察试件的耐火性能,第 3 批试件受火试验延长到 3.0 h.

表 2 试件加载情况

Tab.2 Loading of test specimens

试验批次	试件编号	施加荷载 P/kN	荷载比	
			与 B0 对比	与 B1 对比
第 1 批	B2-3/B2-4	96	0.73	0.576
第 2 批	B2-5/B2-6	96	0.73	0.576
第 3 批	B2-1/B2-2	114	0.86	0.676

注:荷载比为试件跨中截面实际所受弯矩与常温试验所得的极限承载力之比;B1 指加固试件,极限承载力取 B1-1 和 B1-2 实测值的平均值.

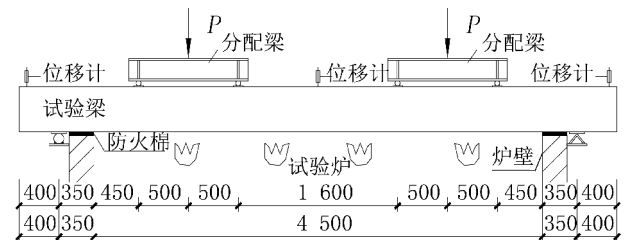


图 4 火灾试验加载示意

Fig.4 Schematic of test set-up

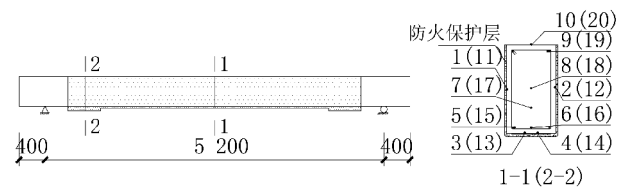


图 5 试件热电偶测点布置及编号

Fig.5 Arrangement and numeration of thermocouples

2 结果及分析

2.1 常温加载试验结果

B0 为未加固对比梁,B1-1 和 B1-2 均为 CFRP 加固梁,其中 B1-1 端部无附加锚固,B1-2 端部附加机械锚固.B1-1 和 B1-2 在受力过程中前期的表现几

乎一致,但在最后破坏时表现不同:B1-1 由于 CFRP 的剥离导致半侧 CFRP 黏结突然失效,而B1-2则因端部机械锚固的存在未发生 CFRP 脱落现象.

表 3 为常温试验梁的承载力和挠度实测结果,可以看出,CFRP 加固梁的开裂荷载与未加固对比梁相比有约 10% 的提高,屈服荷载有约 13% 的提高,而极限荷载有近 30% 的提高.对于 CFRP 加固梁,端部附加机械锚固的梁 B1-2 比无附加锚固的梁 B1-1 的屈服荷载和极限荷载均有提高,但提高幅度不大.可见,在本文试验条件下,端部附加机械锚固能有效防止 CFRP 的剥离,但对试件的承载力提高幅度不大.

表 3 各试件承载力与挠度比较

Tab.3 Comparisons of load-carrying capacities and deflections of test specimens

编号	开裂荷载/ kN	屈服荷载/ kN	极限荷载/ kN	最大挠度/ mm	加固增强效果/%		
					开裂	屈服	极限
B0	40	166	188.5	84.65			
B1-1	44	184	239.8	64.17	10	10.8	27.2
B1-2	44	190	243.8	64.92	10	14.5	29.3

注:开裂荷载为试验中发现第一条裂缝时对应的荷载;屈服荷载为底部受拉钢筋屈服时对应的荷载;极限荷载为试件破坏前承受的最大荷载.

## 2.2 火灾试验现象与结果分析

### 2.2.1 试验现象

6 根受火梁分三批进行火灾试验,点火后不久,从试件与炉盖板之间的缝隙处有少量白色烟雾产生,且带有明显的刺鼻性气味,烟雾持续一段时间后基本散去,推测其主要为防火涂料遇火反应产生的气体.试验中超薄型防火涂料在高温下发泡膨胀,完全膨胀的超薄型涂料呈白色积雪状,密度和粘度都很小,试验结束时发现梁底部分涂料受卸载扰动而脱落,梁侧保存完好处厚度约 5 cm,见图 6(a).

试件受火冷却后发现:B2-1~B2-4 和 B2-6 梁侧跨中厚型涂料表面存在多道竖向通长裂缝,如图 6(b)所示;B2-5 表面覆盖发泡后的超薄涂料,呈不规则裂缝,但内部砂浆层保持完好,见图 6(c).B2-1 底部防火涂料及 CFRP 全部脱落,B2-2 跨中防火涂料全部脱落,CFRP 松弛,试件 B2-3、B2-4、B2-6 梁底涂料层与梁身脱开,但由于钢丝网的存在,梁侧防火涂料层均未脱落,见图 6(d)、(e).根据试验结束时炉内情况确认,梁底防火涂料层的脱落是由于试件卸载时挠度回弹引起扰动所致.

而后,打开梁端保护层进一步观察 CFRP 锚固情况发现,端部加强防火保护的 B2-2、B2-3 和

B2-4 梁的端部均未见明显的胶黏剂氧化,B2-3 端部区域的胶黏剂甚至仍显原有的蓝色,见图 6(f)、(g);厚型涂料保护的 B2-6 端部的 CFRP 也基本完好,见图 6(h).



图 6 试件受火后状况

Fig.6 Observations of test specimens after fire exposure

### 2.2.2 挠度分析

图 7 为实测火灾试验梁挠度-时间曲线对比情况,从图 7 可看出:

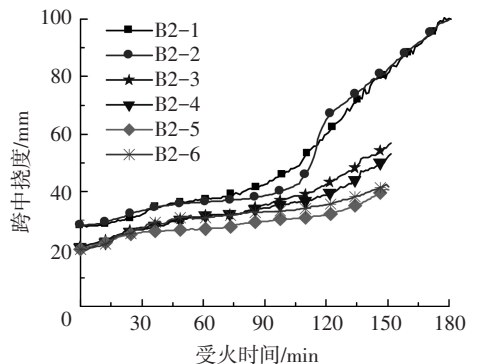


图 7 火灾试验梁挠度曲线对比

Fig.7 Deflection curves of specimens

1) 所有试验梁的挠度-时间曲线在受火 90 min 之前发展趋势基本相同,而后因防火保护措施和 CFRP 锚固措施不同而不同,但最终挠度均小于耐火极限要求的挠度限值  $150 \text{ mm} (D=L^2/400d)^{[19]}$ .

2) 第 3 批试验梁 B2-1 和 B2-2 的实际荷载大于其他试验梁,使其点火时其挠度较其他梁大 8 mm 左右.对比 B2-1 和 B2-2 可得,由于 B2-2 端部有 70 mm 厚的厚型防火涂料,CFRP 两端的黏结锚固区得到有效保护,因此在受火 60~105 min 期间较 B2-1 表现出相对低的挠度.继续受火后,B2-2 梁 CFRP 两端锚固失效,试件挠度急剧增大,最终与 B2-1 趋于一致.

3) 对比 B2-3 和 B2-4 可知,在受火 80 min 后两者的挠度变化开始产生明显不同,说明在胶黏剂失效后端部附加机械锚固(试件 B2-4)能提供一定的锚固作用,有助于控制试件后期挠度增长.

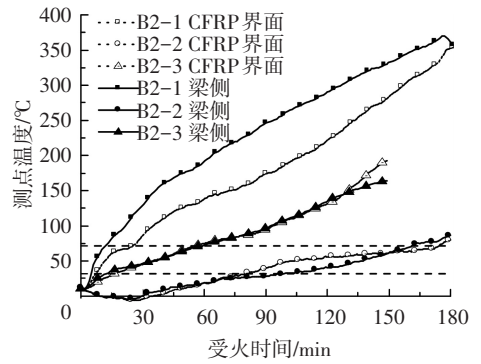
4) 对比 B2-5 和 B2-6 可知,受火 20 min 之后,试件 B2-5 的挠度始终小于 B2-6,且在之后约 60 min 里,其跨中挠度只有不到 5 mm 的增长.说明 20 mm 砂浆+2 mm 超薄涂料的保护方式是有效的,且其保护效果要好于 20 mm 厚的厚型涂料.

## 2.3 防火保护效果分析

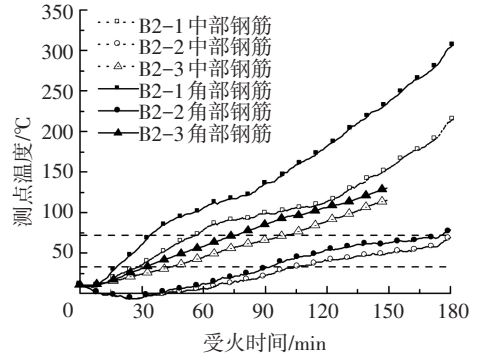
### 2.3.1 分区防火保护效果

图 8 为 B2-1(端部 20 mm 厚型涂料)、B2-2(端部 70 mm 厚型涂料)和 B2-3(端部 20 mm 厚型涂料+2 mm 超薄型涂料)的端部截面梁侧混凝土表面、梁底 CFRP 界面处以及受拉钢筋处的温度变化过程(均取有效测点的平均值).根据文献[20]的研究:高温下碳纤维-混凝土的界面黏结性能与胶黏剂的玻璃化温度  $T_g$  密切相关,一般从  $(T_g - 20)^\circ\text{C}$  开始性能退化,至  $(T_g + 20)^\circ\text{C}$  后基本完全失效.图 8~10 中两条水平参照线区间即为本次试验的界面黏结失效温度范围 33~73  $^\circ\text{C}$ .

从图 8 可看出,试件 B2-1 端部截面的 CFRP-混凝土界面在升温 20 min 左右后达到  $(T_g + 20)^\circ\text{C}$  的失效温度 73  $^\circ\text{C}$ ,试件 B2-3 端部界面黏结失效在 60 min 左右,试件 B2-2 端部界面黏结在 3 h 火灾试验中几乎未失效.另外,由图 8(b)可知,对于端部采取加强保护措施的试件 B2-2 和 B2-3,其底部受拉钢筋的温度也均小于未加强保护的试件 B2-1.特别是试件 B2-2 的 70 mm 厚型涂料保护效果更明显,在升温 180 min 后,B2-2 端部截面内钢筋最高温度仍低于 100  $^\circ\text{C}$ .综上所述,采用端部重点防火保护措施能明显降低端部截面的温度,延缓界面黏结的失效;且 70 mm 厚厚型防火涂料的防火保护效果好于 20 mm 厚厚型防火涂料和 2 mm 厚超薄型防火涂料组合保护的防火效果.



(a) 梁侧混凝土表面和梁底 CFRP 界面温度对比



(b) 受拉钢筋温度对比

图 8 B2-1、B2-2 及 B2-3 端部截面测点温度对比

Fig. 8 Temperature responses of the end anchorage zones of B2-1, B2-2 and B2-3

### 2.3.2 不同材料防火保护效果

试件 B2-5(全长 20 mm 厚水泥砂浆+2 mm 厚超薄涂料)和 B2-6(全长 20 mm 厚厚型涂料)的跨中截面和端部截面的梁侧混凝土表面及受拉钢筋处温度的实测结果见图 9.

由图 9 可看出,平均升温 15 min 后,试件 B2-6 端部和跨中截面 CFRP-混凝土界面即达到失效温度(73  $^\circ\text{C}$ ),而试件 B2-5 则平均耗时 27 min.升温 15 min 左右,B2-5 与 B2-6 截面温度场分布开始出现明显差异.此后,相同时刻同一测点的温度,试件 B2-5 均低于 B2-6,且越靠近混凝土表面的温度,温度差异越大.这可能是由于一方面,水泥砂浆层受外层超薄涂料覆盖影响,养护过程中阻碍了其内部自由水的蒸发,使其比厚型涂料含水量高,受火试验时水分蒸发带走一部分热量导致构件升温较慢;另一方面,主要还是超薄涂料的作用,受火后超薄涂料发泡,隔热保护作用延缓了构件升温.因此,采用 20 mm 水泥砂浆和 2 mm 超薄型防火涂料组合保护的防火效果明显好于 20 mm 厚厚型防火涂料保护的防火效果.火灾试验结束时,试件 B2-5 的跨中竖向位移约 41 mm,仍远低于耐火极限要求的限值(本试验为 150 mm),且此时已受火 2.5 h,满足一级耐火等级不小于 2 h 的要求<sup>[21]</sup>,说明超薄膨胀型防火涂料与普通水泥砂浆配合使用的防火保护措施是可行的.

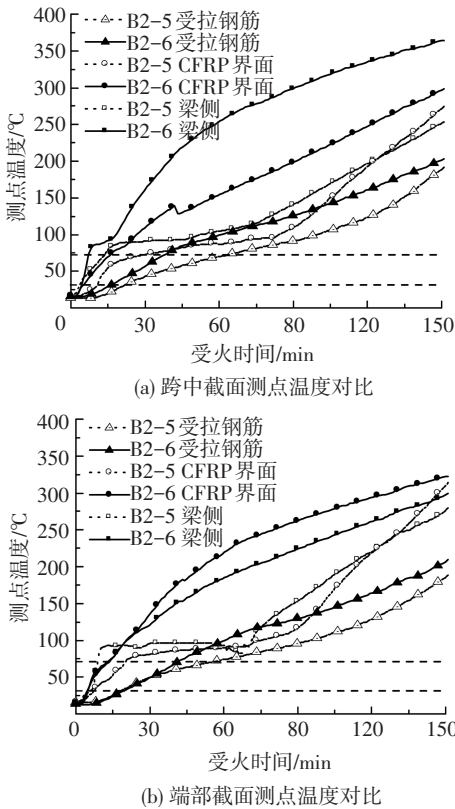


图 9 B2-5 与 B2-6 截面测点温度对比

Fig.9 Temperature responses over the sections of B2-5 and B2-6

和端部 CFRP 界面温度达到失效温度 ( $T_g + 20$ ) °C 的时间相差不大,但从图 7 的荷载位移曲线可知, B2-4 挠度的增长速度缓于 B2-3,最终挠度也低于 B2-3 (约低 6.35%)。这是因为试件 B2-4 在端部采取了机械锚固的措施,对 CFRP 产生一定的约束作用,因此 CFRP 在界面黏结失效后,仍能承担部分拉力,维持构件刚度。另外,结合图 7 和图 10 可知,由于 B2-6 端部无加强保护,端部黏结界面温度达到 ( $T_g + 20$ ) °C 的时间远早于 B2-4,尽管如此,端部采用 U 形箍锚固的试件 B2-6 的后期挠度的增长速度也明显缓于端部采用机械锚固的试件 B2-4,且最终挠度比 B2-4 小 19.96%。由此可以判断,对 CFRP 端部施加锚固能够减缓构件后期挠度的增长,且相比于本试验中端部附加机械锚固情况,碳纤维 U 形箍锚固效果要更好一些。这是因为 U 形箍与混凝土梁接触面积大,且 U 形箍本身的锚固端位于梁的上方,而该区域温度相对较低,因此其对梁底 CFRP 的锚固效果较好;而机械锚具靠锚栓提供的钢板压力锚固梁底 CFRP,在压力不大或锚具数量不多的情况下,其锚固效果就相对较差了。

### 3 结 论

1) 相比于无附加锚固的 CFRP 加固梁,端部附加机械锚固能有效防止常温下 CFRP 的剥离,高温下也能有效控制加固构件的挠度增长。同样,碳纤维 U 形箍在高温下也能提供一定的对 CFRP 的锚固作用,有效控制加固构件的挠度增长。

2) 超薄膨胀型防火涂料与普通水泥砂浆配合使用的防火保护措施是可行的,且在本文试验条件下,采用 20 mm 水泥砂浆和 2 mm 超薄型防火涂料组合的防火效果好于 20 mm 厚型防火涂料保护的防火效果。

3) 在本文试验条件下,相比于端部附加 5 道机械锚固的情况,端部附加 3 道碳纤维 U 形箍对梁底 CFRP 的锚固效果更好。

### 参考文献

[1] 陆锦标, 顾祥林.既有建筑结构检测鉴定规范的现状和发展趋势[J]. 住宅科技, 2008(6): 37-43. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0454.2008.06.012.  
 LU Jinbiao, GU Xianglin. Status quo and development trend of existing architectural structure test and identification regulations [J]. Housing Science, 2008(6): 37-43. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0454.2008.06.012.

[2] DEURING M.Brandversuche an nachtraglich verstärkten tragern aus Beton[R]. Dubendorf, Switzerland; Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, 1994.

[3] BLONTROCK H, TAERWE L, VANDEVELDE P. Fire tests on

#### 2.3.3 CFRP 端部不同锚固措施效果

表 4 和图 10 分别为试件 B2-3、B2-4 和 B2-6 的部分试验结果和 CFRP 界面处温度变化曲线,表 4 中的界面黏结失效时间即为界面温度达到失效温度 ( $T_g + 20$ ) °C 的时间。

表 4 B2-3、B2-4 及 B2-6 部分试验结果对比

Tab.4 Comparisons of test results of B2-3, B2-4 and B2-6

试件	CFRP 端部锚固措施	防火保护方法		界面黏结失效时间/min		2.5 h 挠度/mm
		端部	跨中	跨中	端部	
B2-3	无	20 厚型+2 超薄	20 厚型	21	58	56.7
B2-4	机械锚具	20 厚型+2 超薄	20 厚型	23	61	53.1
B2-6	U 形箍	20 厚型	20 厚型	16	14	42.5

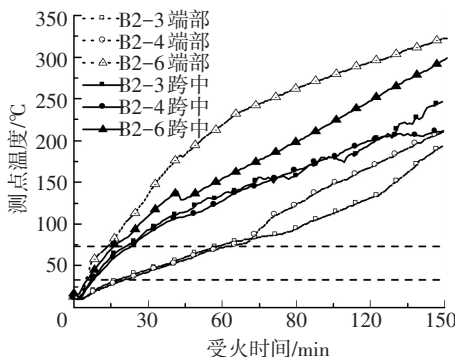


图 10 B2-3、B2-4 及 B2-6 截面 CFRP 界面温度对比

Fig.10 CFRP interface temperature of B2-3, B2-4 and B2-6

从图 10 和表 4 可看出,试件 B2-3 和 B2-4 跨中和端部的防火保护措施均相同,因此两试件跨中

- concrete beams strengthened with fibre composite laminates [C]// Proceedings of the Third Ph.D. Symposium in Civil Engineering. Vienna, Austria: Konrad Bergmeister, 2000: 151-161.
- [4] WILLIAMS B, KODUR V, GREEN M F, et al. Fire endurance of fiber-reinforced polymer strengthened concrete T-beams [J]. ACI structural Journal, 2008, 105(1): 60-67. DOI:10.14359/19069.
- [5] CHOWDHURY E U. Performance in fire of reinforced concrete t-beams strengthened with externally bonded fibre-reinforced polymer sheets [D]. Ontario, Canada: Queen's University, Kingston, 2005.
- [6] STRATFORD T J, BISBY L A. Effect of warm temperatures on externally bonded FRP strengthening [J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 16(3): 235-244. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000260.
- [7] AHMED A, KODUR V. The experimental behavior of FRP-strengthened RC beams subjected to design fire exposure [J]. Engineering Structures, 2011, 33(7): 2201-2211. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.03.010.
- [8] 吴波, 乔长江. 混凝土约束梁升降温全过程的耐火性能试验 [J]. 工程力学, 2011, 28(6): 88-95.  
WU Bo, QIAO Changjiang. Experimental study on fire behaviors of RC restrained beams during heating and cooling phases [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(6): 88-95.
- [9] WU Yufei, HUANG Yue. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures [J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(3): 266-273. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:3(266).
- [10] 高皖扬, 胡克旭, 陆洲导. CFRP 加固钢筋混凝土梁耐火性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 15-23.  
GAO Wanyang, HU Kexu, LU Zhoudao. Fire resistance experiments of insulated CFRP strengthened reinforced concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 15-23.
- [11] DONG Kun, HU Kexu, GAO Wanyang. Fire Behavior of Full-Scale CFRP-Strengthened RC Beams Protected with Different Insulation Systems [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2016, 15(3): 581-588. DOI: 10.3130/jaabe.15.581.
- [12] GAO Wanyang, DAI Jianguo, TENG Jinguang, et al. Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire [J]. Engineering Structures, 2013, 52: 488-501. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.03.017.
- [13] DAI Jianguo, GAO Wanyang, TENG Jinguang. Finite element modeling of insulated FRP-strengthened RC beams exposed to fire [J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(2): 428-432. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000509.
- [14] GAO Wanyang, DAI Jianguo, TENG Jinguang. Performance-based approach for fire resistance design of FRP-strengthened RC beams [C]// Proceedings of the Eighth International Conference on Structures in Fire (SIF-14). Shanghai: Tongji University, 2014: 499-508.
- [15] GAO Wanyang, DAI Jianguo, TENG Jinguang. Simple method for predicting temperatures in reinforced concrete beams exposed to a standard fire [J]. Advances in Structural Engineering, 2014, 17(4): 573-590. DOI: 10.1260/1369-4332.17.4.573.
- [16] GAO Wanyang, DAI Jianguo, TENG Jinguang. Simple method for predicting temperatures in insulated, FRP-strengthened RC members exposed to a standard fire [J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(6): 04015013. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000566.
- [17] GAO Wanyang, DAI Jianguo, TENG Jinguang. Fire resistance design of un-protected FRP-strengthened RC beams [J]. Materials and Structures, 2016, 49(12): 5357-5371. DOI: 10.1617/s11527-016-0865-x.
- [18] 纤维增强复合材料工程应用技术规范: GB 50608—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.  
Technical code for FRP composites in construction: GB 50608—2016 [S]. Beijing: Planning Press of China, 2016.
- [19] 建筑构件耐火试验方法: GB 9978—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
Fire-resistance tests-Elements of building construction: GB 9978—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [20] 胡克旭, 董坤, 杨耀武. 温度作用对碳纤维—混凝土界面黏结性能的影响 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 845-852. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.06.005  
HU Kexu, DONG Kun, YANG Yaowu. Temperature effect on bond behavior of carbon fiber reinforced polymer to concrete interface [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(6): 845-852. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.06.005.
- [21] 建筑设计防火规范: GB 50016—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.  
Code for fire protection design of buildings: GB 50016—2014 [S]. Beijing: Planning Press of China, 2014.

(编辑 赵丽莹)