

FRP 加固 RC 梁研究新进展

王一新^{1,2}, 王希成¹, 阿拉塔^{3*}, 王兴国^{1,2}

(1. 河南理工大学土木工程学院, 焦作 454003; 2. 生态建筑与环境构建河南省工程实验室, 焦作 454003;

3. 云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 混凝土梁(RC 梁)作为结构体系中的主要受力构件之一,常因各种原因出现劣损影响到结构安全。FRP 材料因其具有轻质、高强、耐腐蚀等特性,已被广泛应用于 RC 梁的加固工程中。目前,FRP 加固 RC 梁的研究较为深入。本文综述了国内外学者关于 FRP 加固 RC 梁的静力性能以及抗火性、抗冲击性的研究现状,分析了现阶段研究存在的问题,提出了对未来研究方向的建议。

关键词: FRP; RC 梁; 静力性能; 抗火性; 抗冲击性

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-8000(2020)01-0108-06

改革开放后,我国经济建设快速发展,各大城市大量兴建建筑。经过几十年的发展,部分建筑由于使用年代久远、相关规范的逐步完善、自然灾害等原因无法满足现在使用的安全性。RC 梁是以弯曲为主要变形的构件,当前对于提高其承载力、变形能力的加固方法有多种。粘贴 FRP 加固法因具有轻质高强、施工方便、不增加原构件自重、不影响结构外观等优点而被广泛应用于 RC 梁加固工程中,具体加固形式有:外粘 FRP 片材、内嵌 FRP 板条或筋材、预应力 FRP 片材等。为了更加充分发挥 FRP 材料的特性,改善 FRP 加固 RC 梁存在的一些弊端以及完善相关设计规范和施工标准,FRP 加固 RC 梁的应用研究仍将是一个热点课题。

1 FRP 加固 RC 梁抗弯性能研究

1.1 FRP 加固损伤 RC 梁

Al-Zaid 等^[1]通过试验表明了外粘 CFRP 布加固受损梁可显著提高其抗弯能力和刚度,并抑制裂缝的发展。Gholkar 等^[2]通过试验分析得出损伤程度分别为 0、70%、80%的梁采用 BFRP 布加固能显著提高其承载力,然而损伤程度为 90%、100%的梁承载力提高不明显。刘相^[3]提出碳纤维 U 形箍在端部或弯矩较大部位两侧锚固对抗弯承载力提高程度最大。潘金龙^[4]利用 ANSYS 有限元软件对 FRP 片材加固八根不同纵筋锈蚀率的 RC 梁抗弯性能进行分析。项凯等^[5]考虑 RC 梁的受火位置,提出了 CFRP

片材加固火灾后 RC 梁抗弯承载力的计算方法。周淑春等^[6]研究了 CFRP 布加固混凝土劣化及钢筋锈蚀同时存在情况下梁的破坏形式和抗弯承载力变化情况。蔡斌^[7]通过可靠度分析提出了 CFRP 布加固梁后抗弯承载力提高 36%~41%。

苏有文等^[8]提出受损梁粘贴 CFRP 布加固可明显提升其抗弯承载力和刚度,并且 CFRP 布采用预应力形式较普通粘贴形式加固效果更优。郑志勇等^[9]对内嵌不同 FRP 筋加固 T 形梁的抗弯性能进行试验研究。结果表明嵌入带肋筋加固梁比嵌入光圆筋加固梁提高程度更大,效果更显著;并通过有效应力与粘结剪应力滑移的关系和能量平衡法对加固梁的极限抗弯承载力计算方法进行改进。

1.2 FRP 加固无损 RC 梁

作者课题组^[10-16]对内嵌 FRP 加固 RC 梁的抗弯性能做了大量理论分析和试验研究(内嵌 CFRP 加固构件做法示意如图 1 所示)。主要研究内容包括采用分层法对表层内嵌 FRP 加固 RC 梁从加载至破坏的破坏全过程进行分析;试验研究发现内嵌 CFRP 板条和嵌入预应力 CFRP 筋都能显著提高 RC 梁的极限承载能力和弯曲刚度,并可有效阻止梁体混凝土裂缝的产生和发展;试验对比了模型梁和原型梁分别采用内嵌 CFRP 片材加固后承载力、挠度比、跨中钢筋和 CFRP 片材的应变。针对目前试验研究中主要为嵌入单一 FRP 材料,课题组还对混合嵌入不同 FRP 筋加固 RC 梁的弯曲性能展开研究。结果表

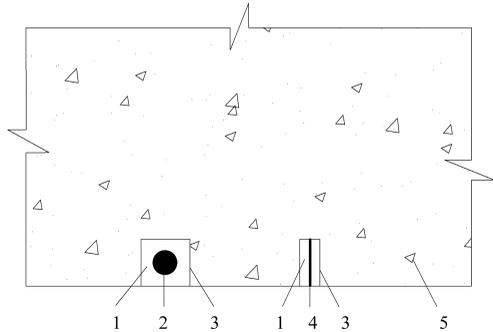
收稿日期: 2019-04-30

基金项目: 河南省重点科技攻关计划(182102310010); 河南理工大学博士基金(B2018-66)

作者简介: 王一新(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事新材料在结构中应用方面的研究。

通讯作者: 阿拉塔(1978-), 男, 美国肯塔基大学访问学者, 主要从事结构安全评估方面的研究, alata182@126.com。

明,相比仅采用单一 FRP 筋材嵌贴加固,混合嵌入不同 FRP 筋加固可显著提高筒支梁、连续梁的抗弯承载力且延性更佳;梁无初始荷载情况下嵌贴不同 FRP 筋比有初始荷载情况下加固效果更理想。



1-粘结材料;2-CFRP 筋;3-槽;4-CFRP 板条;5-拟加固结构

图1 内嵌 CFRP 加固法^[10]

Fig. 1 RC structure with near surface mounted CFRP

Long^[17]研究了 CFRP 片材层数和有无 U 形箍锚固等因素对 CFRP 片材加固无粘结后张 RC T 形梁的抗弯性的影响。试验表明,CFRP 层数越多加固效率越低,加固梁采用 U 形箍锚固后 CFRP 片材的应变和梁体的破坏形式均发生变化。高丹盈等^[18]提出为了提高 CFRP 布加固梁的抗弯能力,可通过减小梁的跨高比和增大纵筋配筋率或增加 CFRP 布层数的方法来实现。张峰^[19]通过有限元分析了表面粘贴 FRP (Externally Bonded FRP, 简称“EB-FRP”) 加固和 FRP 机械锚固 (Hybrid Bonded FRP, 简称“HB-FRP”) 加固后 RC 梁的抗弯性能差异。结果表明 EB-FRP 加固梁表面发生 FRP 端部剥离破坏,HB-FRP 加固梁发生剪切破坏;HB-FRP 加固梁承载力比 EB-FRP 加固梁提高 20%;HB-FRP 加固梁时 FRP 强度完全发挥;钢材扣件有效提高了 FRP 的抗剥离能力。王兴国等^[20]还对不同初始荷载情况下,采用预张 CFRP 板加固大比例 RC 梁的受弯性能进行分析。结果表明,对于大比例 RC 梁的抗弯加固应优先采用预应力 CFRP 板加固,此方法可有效抑制裂缝的发展并能充分发挥高性能材料的特点。

2 FRP 加固 RC 梁抗剪性能研究

Li 等^[21]对 6 根加固试验梁(剪跨比为 1.0~3.5)和 6 根未加固梁的抗剪性能进行研究。结果表明:当梁的剪跨比为 1.0~2.0 时,FRP 对梁的抗剪性能贡献与剪跨比呈正比关系;当剪跨比超过 2.0 时,

FRP 的抗剪贡献值降低,如图 2 所示。在临界剪切裂缝中,FRP 应变的分布、不同的剪跨比呈现不同的发展趋势。并将研究结果和从文献中收集的数据与五种设计规范 (ACI、FIB、JSCE、GB、CSA) 中不同的剪跨比进行比较。结果表明,过度估计低剪跨比和高剪跨比的 FRP 剪力贡献值存在潜在风险(特别是深梁),建议在设计时应明确剪跨比。

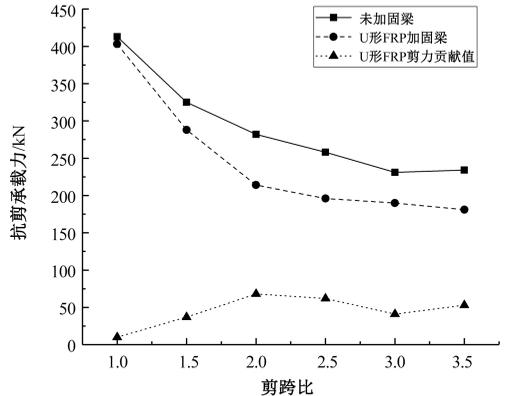


图2 不同剪跨比梁的抗剪承载力和 CFRP 抗剪贡献值^[23]

Fig. 2 Shear capacity and CFRP shear contribution with various ratios shear span to depth

徐玉野等^[22]对受火后 RC 梁抗剪加固的影响因素展开研究,主要包括剪跨比、CFRP 布加固层数和楼板翼缘。结果表明:受火后采用外包 CFRP 布加固矩形 RC 梁承载力可提高 5.3%~16.6%;CFRP 布加固层数越多,抗剪效果越好;还给出了相应状况下抗剪承载力的计算公式:

$$V_u = a_{cv} k_l f_t b h_0 + 0.9 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + \alpha \varphi \left(\frac{2n_{cf} w_{cf} t_{cf}}{s_{cf} + w_{cf}} \right) \varepsilon_{cfv} E_{cf} h_{cf} \quad (1)$$

式中各参数含义详见文献[22]。

黄泽峰等^[23]探究了小剪跨比作用下外粘 CFRP 布加固 RC 梁尺寸效应对 FRP 抗剪性能的影响。结果表明:试验梁尺寸影响 U 形加固梁抗剪承载力提高率,小尺寸梁理论贡献值小于实际贡献值,大尺寸梁则相反;剪力值随荷载水平的增大而增加,大尺寸梁增长速度高于小尺寸梁。

Tetta^[24]通过 14 根混凝土试验梁(1 根未加固梁,8 根 TRM 加固梁,5 根外贴 FRP 加固梁)研究对比了新型加固法织物增强砂浆 (Textile Reinforced Mortar, 简称“TRM”) 与 FRP 加固法的抗剪性。试验表明,在加固材料的布置和层数一定的情况下,FRP

加固法与 TRM 加固法相比,FRP 加固法的抗剪加固效果更好。Guo 等^[25]对 CFRP 网格和聚合物砂浆 (Polymer Cement Mortar, 简称“PCM”) 喷射混凝土加固 RC 梁的抗剪承载力进行研究。试验制作了 7 组试验梁(1 根未加固梁,1 根仅采用 PCM 喷射混凝土加固,4 根采用间距为 150 mm×50 mm 的 CFRP 网格加固,1 根采用间距为 50 mm×50 mm 的 CFRP 网格加固)。试验表明,较 PCM 喷射混凝土加固法,CFRP 网格加固法的抗剪加固效果更好,CFRP 网格的有效应变和梁的剪跨比影响抗剪承载力的计算结果。关于无腹筋 RC 梁的抗剪加固,管延华^[26]认为采用 CFRP-螺栓联合加固后其抗剪承载力提高 1.2 倍~1.68 倍,并建立该联合加固后 RC 梁抗剪承载力计算公式:

$$V_{\text{CFRP}} = f_{\text{CFRP},e} \cdot \rho_{\text{CFRP}} \cdot b \cdot h_{\text{CFRP},e} \cdot \cot\theta \quad (2)$$

式中各参数含义详见文献^[26]。

张海霞等^[27]建议实际工程项目中若需要提高加固构件的抗剪承载力,FRP 筋嵌入角度宜为 60°;若提高变形能力,FRP 筋嵌入角度宜为 45°。

3 FRP 加固 RC 梁抗火性、抗冲击性研究

3.1 FRP 加固 RC 梁的抗火性

关于如何判断 FRP 加固 RC 梁的耐火极限,Bisby^[28]提出了可根据火灾下构件的承载力、结构胶粘剂的温度以及 FRP 材料外层温度进行判断。高皖扬等^[29]提出也可根据火灾下加固构件的变形情况判断 FRP 加固混凝土构件的耐火极限。Gao 等^[30]研究了关于未保护的 FRP 加固 RC 梁的防火设计,利用 ABAQUS 有限元分析软件分析了各可变参数(负载比、混凝土保护层厚度、螺纹钢筋的张拉强化比以及张拉分配比、截面的大小、混凝土的组合形状)对裸露的 RC 梁防火性的影响,其中负载比的影响最大;并利用数值模拟的结果验证了公式的合理性,提出了裸露的 RC 梁在标准火灾下的防火设计公式以及各参数的适用范围。Firmo 等^[31]利用三维有限元模拟分析了 RC 梁采用 CFRP 外粘和内嵌抗弯加固的耐火性,数值模拟结果验证了内嵌加固法比外贴 CFRP 加固法具有更好的抗火性。Yu 等^[32,33]、Henry^[34]分别从加固方法、粘结剂、防火材料、防火位置及防火形式等方面对加固 RC 梁的抗火性影响展开研究。试件耐火试验结果(在适当的防火措施下,采用内嵌法加固 RC 梁在高荷载下抵抗标准火灾 180 min 以上,而外贴法加固 RC 梁平均仅有 79

min)表明:采用内嵌 CFRP 加固法的梁耐火性更佳;CFRP 粘贴方法对被加固梁的耐火性有较大影响,U 形粘贴比底面或局部粘贴耐火效果更好;厚型涂料、氯氧镁水泥防火更有助于提高加固梁的耐火性。有关试验的加固方法如图 3 所示,防火保护形式如图 4 所示。

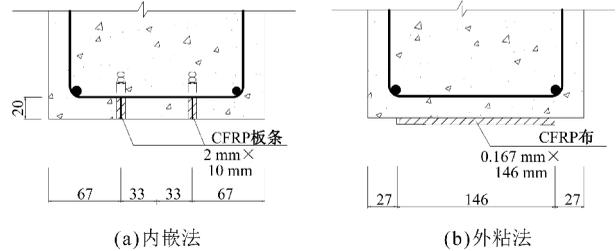


图 3 加固方法^[34]

Fig. 3 Strengthening methods

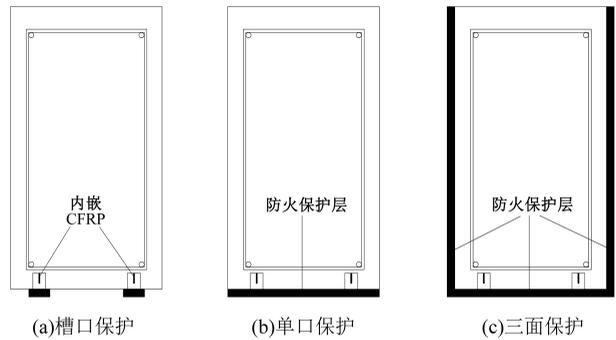


图 4 防火保护形式^[34]

Fig. 4 Fire protection forms

彭东平^[35]利用 ANSYS 有限元软件分析了影响 CFRP 加固 RC 梁耐火性能的主要因素。结果表明,CFRP 加固 RC 梁的抗火性与防火保护材料厚度和混凝土保护层厚度呈正比且影响较大,但与荷载比(实际弯矩与设计弯矩之比)及加固量呈反比,荷载比对加固梁耐火性的影响较大而加固量对其影响较小。徐杰等^[36]通过有限元模型对高温、高负载(指 CFRP 片材发生剥离破坏)条件下外贴 CFRP 片材加固 RC 梁的耐火性进行了分析。结果表明,在 CFRP 片材两端采用锚固压条约束后,加固梁耐火极限可提高 40%,对 CFRP 片材全长均匀锚固约束后加固梁耐火极限的提高程度比两端约束增加一倍。

3.2 FRP 加固 RC 梁的抗冲击性

Erki 等^[37]对 FRP 加固 RC 梁进行冲击试验。试验可见 FRP 加固后梁的破坏形式由剪切破坏变为 FRP 剥离破坏,表明了 FRP 加固可提高 RC 梁的抗冲击性能。近年来,有不少学者对冲击荷载作用下 FRP 加固 RC 构件的动力响应、破坏模式以及材料参数

和试验参数等影响因素做了大量理论分析和试验研究。

Fujikake 等^[38]采用落锤冲击试验从落锤高度、冲击次数、CFRP 加固形式等方面对 CFRP 加固 RC 梁的冲击响应进行分析。试验预制了 20 根 RC 梁(4 根未加固,16 根分别采用四组不同的 CFRP 加固方案加固)。试验研究表明:当 RC 梁遇冲击荷载时采用 CFRP 加固能有效抑制裂缝宽度,至少减少 10%;对 CFRP 布两端进行有效锚固可提升加固梁的抗冲击能力。Pham 等^[39]试验制作了 13 根(1500 mm×150 mm×250 mm)RC 梁,采用不同的 FRP 粘贴方式(两侧粘贴、三侧粘贴、U 形粘贴、U 形 45°角粘贴)、FRP 层数、落锤高度,分别进行静载和冲击加载试验。试验表明,FRP 加固可显著提高 RC 梁的承载能力和刚度且 FRP 粘贴角度为 45°角时加固 RC 梁的抗冲击效果最好。Pham 等^[40]还对底面不同形状的 CFRP 加固 RC 梁进行抗冲击性研究,提出了 RC 梁底面为曲面更能充分发挥 CFRP 的抗冲击性能的结论。

王兴国等^[41]通过试验分析重锤冲击加载方式下未加固 RC 梁和 AFRP 布加固 RC 梁的破坏形态及外粘 AFRP 布的应变曲线。试验表明,重锤冲击加载条件下,未加固梁因梁出现冲击损伤时钢筋屈服而破坏,加固梁因梁出现冲击损伤外粘 AFRP 剥离而破坏。王兴国等^[42]还对不同 AFRP 类型和重锤高度的影响展开研究,如表 1 所示。试验表明,AFRP 类型和冲击高度直接影响梁体损伤形态,如图 5 所示,AFRP 类型对加固梁的耐冲击性影响较大。董傲然^[43]通过落锤试验研究和有限元软件分析表明,在侧向冲击作用下未加固梁的破坏模式为以斜向裂缝为主导的剪切破坏,而加固梁的冲击破坏形态表现为以竖向裂缝开展和纵向钢筋断裂为主的弯曲破坏。

表 1 部分试验梁挠度、塑性变形变化情况^[42]

Table 1 Deflection and plastic deformation variation

试验梁	重锤高度($H=2.0$ m)		重锤高度($H=2.5$ m)	
	挠度/%	塑性变形/%	挠度/%	塑性变形/%
N- I	-	-	-	-
A415- I	-25	-47	-23	-50
A830- I	-40	-61	-35	-63

注:N- I 表示未加固梁;A415- I 表示 415 g/m² AFRP 加固梁;A830- I 表示 830 g/m² AFRP 加固梁。

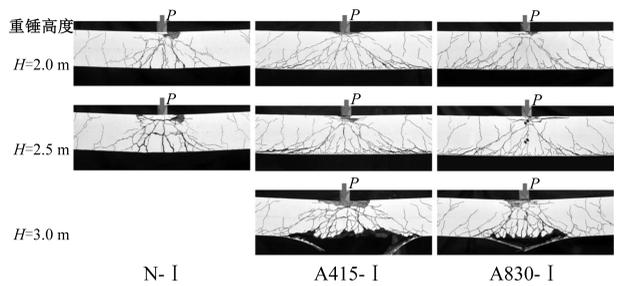


图 5 试验梁破坏形态对比图^[42]

Fig. 5 Failure pattern comparison of test beams

刘涛等^[44,45]主要考虑冲击速度和冲击能量的变化对动力特性的影响,讨论分析了无腹筋 RC 梁的裂纹类型、破坏模式、跨中挠度、CFRP 应变的变化过程,并通过试验研究了 CFRP 条带参数(层数、宽度、间距、加固率)和冲击参数(冲击质量、高度、能量)对加固无腹筋和腹筋不足混凝土梁动态响应的影响。试验表明:CFRP 加固能显著提高 RC 梁的抗冲击能力,降低挠度,减少损伤;冲击速度和冲击能量的变化对动力响应有不同的影响,可能导致破坏模式的变化;受冲击时 CFRP 条带可以限制梁裂缝的开展并控制其破坏程度;加宽 CFRP 条带和增加粘贴层数有利于提高 RC 梁的抗冲击性能。

4 存在的问题和建议

FRP 加固法相较其他传统加固法优势明显,在建筑结构加固中具有广泛的应用前景。目前,国内外关于 FRP 加固 RC 梁的研究已经逐渐成熟,但还远没有充分发挥 FRP 的材料特性。本文通过总结分析当前的研究现状,提出了关于 FRP 加固 RC 梁研究中存在的问题以及对未来相关研究的建议:

(1) 试件材料的选择和静力性能折减系数问题:试验研究中试件梁大多数采用普通混凝土制作新梁,而实际建筑结构中的混凝土都会受到荷载、使用环境、灾害等不同程度的影响。未来可加强对 FRP 加固特殊混凝土力学性能和损伤 RC 试验梁静力折减系数的研究;

(2) FRP 加固形式问题:当前 FRP 组合加固法尚不多,且主要为小尺寸模型试验研究,可进一步加大大比例尺寸构件组合加固及相关数值模拟研究;

(3) 抗火性能问题:对于外贴、内嵌 FRP 板条/筋加固 RC 梁抗火性能的研究主要集中在防火涂料和粘结剂等影响因素方面,缺乏相应系统的抗火设

计理论和方法,另外,新型加固法,如织物增强砂浆法等,较 FRP 加固法有较强的抗火性和耐久性,可对 RC 梁受火后加固性能进行深入研究;

(4)抗冲击性能问题:国内外学者主要对外粘 CFRP、AFRP 加固 RC 梁的抗冲击性能做了相关试验研究,可进一步基于数值分析,模拟研究 FRP 加固 RC 梁在动力、环境及其他影响因素耦合状态下的抗冲击性能。

参考文献

- [1] Al-Zaid R A, El-Sayed A K, Al-Negheimish A I, et al. Strengthening of structurally damaged wide shallow RC beams using externally bonded CFRP plates [J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2014, 11(6): 946-965.
- [2] Gholkar A P, Jadhav H S. Experimental study of the flexural behaviour of damaged RC beams strengthened in bending moment region with basalt fibre reinforced polymer sheets[J]. *IJERA*, ISSN, 2014, 4(7): 2248-9622.
- [3] 刘相. 碳纤维布加固损伤混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2016, 38(4): 115-120.
- [4] 潘金龙. FRP 加固锈蚀钢筋混凝土梁的受弯性能分析[J]. *东南大学学报*, 2014, 30(1): 77-83.
- [5] 项凯, 王国辉. 碳纤维片材加固火灾后钢筋混凝土梁抗弯承载力[J]. *建筑技术*, 2013, 44(11): 987-991.
- [6] 周淑春, 吕恒林, 吴元周, 等. CFRP 加固中(重)度劣化钢筋混凝土梁抗弯性能[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(1): 62-69.
- [7] 蔡斌. CFRP 加固锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力可靠性[J]. *混凝土*, 2016, 10: 148-151.
- [8] 苏有文, 詹妮, 李超飞, 等. 预应力碳纤维布加固损伤钢筋混凝土梁抗弯性能研究[J]. *施工技术*, 2014, 43(4): 1-4.
- [9] 郑志勇, 孙海平. 嵌入式 FRP 筋加固梁抗弯承载力分析[J]. *建筑结构*, 2016, 46(5): 80-85.
- [10] 丁亚红, 曾宪桃, 王兴国. 内嵌 CFRP 板条加固混凝土梁实验研究[J]. *工业建筑*, 2006, 36(7): 89-91.
- [11] 徐平, 张敏霞, 丁亚红, 等. 内嵌法加固混凝土梁抗弯试验研究[J]. *建筑结构*, 2010, 40: 409-411.
- [12] 徐平, 曾宪桃, 丁亚红, 等. 表层嵌入预应力碳纤维筋混凝土梁抗弯试验研究[J]. *工业建筑*, 2012, 42(3): 71-75.
- [13] 王兴国, 郑丹丹, 朱坤佳, 等. 实验梁尺寸对简支梁内嵌 CFRP 板条弯曲性能影响[J]. *铁道工程学报*, 2014, 31(3): 72-75.
- [14] 王兴国, 王文华, 姚小平. 嵌入 CFRP 片材加固 RC 梁非线性全过程分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2009(2): 11-13.
- [15] 王兴国, 代波, 张鹏飞. 混凝土梁嵌贴混合 FRP 筋弯曲性能试验研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(1): 45-49.
- [16] 王兴国, 张鹏飞, 代波, 等. 外黏 AFRP 布加固 RC 梁弯曲性能试验研究[J]. *混凝土*, 2017(1): 17-23.
- [17] Long N M. Flexural-strengthening efficiency of CFRP sheets for unbonded post-tensioned concrete T-beams[J]. *Engineering structure*, 2018, 166: 1-15.
- [18] 高丹盈, 王廷彦, 何亚军. 碳纤维布加固钢筋混凝土短梁受弯试验及承载力计算[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(11): 122-131.
- [19] 张峰. HB-FRP 加固 RC 梁的精细有限元分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(8): 125-128.
- [20] 王兴国, 周朝阳. 预张碳板加固已承受荷载的 RC 梁弯曲试验[J]. *铁道工程学报*, 2015, 32(1): 83-87.
- [21] Li W W, Leung C K Y. Effect of shear span-depth ratio on mechanical performance of RC beams strengthened in shear with U-wrapping FRP strips[J]. *Composite Structures*, 2017, 177: 141-157.
- [22] 徐玉野, 彭小丽, 董毓利, 等. 受火后 CFRP 布加固钢筋混凝土梁受剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(2): 123-132.
- [23] 黄泽峰, 李军. 小剪跨比作用下 CFRP 加固抗剪加固梁的尺寸效应[J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 36: 6-12.
- [24] Tetta Z. Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets[J]. *Materials and Structures*, 2016, 49: 17-28.
- [25] Guo R, Pan Y, Cai L H, et al. Study on design formula of shear capacity of RC beams reinforced by CFRP grid with PCM shotcrete method[J]. *Engineering Structures*, 2018, 166: 427-440.
- [26] 管延华. CFRP-螺栓联合加固无腹筋 RC 梁抗剪性能分析[J]. *沈阳建筑科技大学学报*, 2015, 31(5): 804-811.
- [27] 张海霞, 孙闯, 李程翔. 内嵌 FRP 筋加固混凝土梁的抗剪性能研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(3): 419-429.
- [28] Bisby L. Fire behavior of fiber-reinforced polymer (FRP) reinforced or confined concrete[D]. Kingston, Ontario, Canada: Department of Civil Engineering, Queen's University, 2003.
- [29] 高皖扬, 陆洲导, 张克纯. 基于温度判据的 FRP 加固混凝土梁耐火极限研究[J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2008, 25(3): 78-81.
- [30] Gao W Y, Dai J G, Teng J G. Fire resistance design of un-protected FRP-strengthened RC beams[J]. *Materials and Structures*, 2016, 49: 5357-5371.
- [31] Firmo J P, Arruda M R T, Correia J R, et al. Three-dimensional finite element modelling of the fire behaviour of insulated RC beams strengthened with EBR and NSM CFRP strips [J]. *Composite Structures*, 2018, 183: 124-136.
- [32] Yu J T, Wang Y C, Hu K X, et al. The performance of near-surface mounted CFRP strengthened RC beam in fire[J]. *Fire Safety Journal*, 2017, 90: 86-94.
- [33] 余江韬, 田力康, 徐延宁, 等. 内嵌 CFRP 板条加固钢筋混凝土梁的抗火性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(12): 97-104.
- [34] Henry H A. 内嵌 CFRP 加固钢筋混凝土梁的抗火性能试验研究[J]. *结构工程师*, 2016, 32(3): 114-118.
- [35] 彭东平. 防火保护的 CFRP 加固混凝土梁抗火性能分析[J]. *结构工程师*, 2015, 31(2): 118-123.
- [36] 徐杰, 尹仲昊, 韩庆华, 等. 高负载下外贴式 CFRP 片材加固

- 钢筋混凝土梁的耐火性能分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(11): 1161-1170.
- [37] Erki M A, Meier U. Impact loading of concrete beams externally strengthened with CFRP laminates[J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 3(3): 117-124.
- [38] Fujikake K, Soeum S, Matsui T. CFRP strengthened RC beams subjected to impact loading [J]. Procedia Engineering, 2017, 210: 173-181.
- [39] Pham T M, M A, Hao H. Impact behavior of FRP-strengthened RC beams without stirrups[J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2016, 20(4): 1-13.
- [40] Pham T M, Hao H. RC beams strengthened with longitudinal and U-wrap FRP [C]// 8th International Conference on Reinforced Polymer (FRP) Polymers in Civil Engineering. Hongkong: 2016.
- [41] 王兴国, 朱坤佳, 栗桥祐介. 外粘 AFRP 布加固 RC 梁冲击试验分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(4): 111-115.
- [42] 王兴国, 栗桥祐介, 朱坤佳. 外粘 AFRP 布加固 RC 梁耐冲击性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(8): 163-167.
- [43] 董傲然. 侧向冲击作用下 FRP 加固 RC 构件的动力响应及破坏机理研究[D]. 成都: 西南交通大学学位论文, 2018.
- [44] Liu T, Xiao Y. Impact behavior of CFRP-strip-wrapped RC beams without stirrups[J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2017, 21(5): 1-14.
- [45] 刘涛. 冲击荷载下 CFRP 加固钢筋混凝土梁和框架的动力性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.

NEW PROGRESS IN RESEARCH ON RC BEAMS STRENGTHENED WITH FRP STRIPS/SHEETS

WANG Yi-xin^{1,2}, WANG Xi-cheng¹, A Lata^{3*}, WANG Xing-guo^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Henan Province Engineering Laboratory for Eco-architecture and the Built Environment, Jiaozuo 454003, China;

3. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China)

Abstract: As one of the main force-receiving members in reinforced concrete structure system, reinforced concrete (RC) beams often break or affect structural safety because of various reasons. As a new type of structural material, FRP has been widely used in practical RC beams reinforcement engineering with its light-weight, high-strength and corrosion resistance. At present, the research on FRP reinforced RC beams is more in-depth. This paper has compiled the research status of the static performance, fire resistance and impact resistance of FRP-strengthened RC beams by domestic and foreign scholars, analyzes the problems existing in the current research, and puts forward suggestions for future research directions.

Key words: FRP; RC beam; static performance; fire resistance; impact resistance