

李贵炳 张爱晖 著

# FRP 加固

# 混凝土结构受弯构件

煤炭工业出版社

# FRP 加固混凝土结构 受弯构件

李贵炳 张爱晖 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

FRP 加固混凝土结构受弯构件/李贵炳, 张爱晖  
著. —北京: 煤炭工业出版社, 2008. 8

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3358 - 3

I. F… II. ①李…②张… III. 纤维增强复合材  
料-应用-钢筋混凝土结构-受弯构件 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 109411 号

煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: [www.cciph.com.cn](http://www.cciph.com.cn)

北京房山宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

\*

开本  $850\text{mm} \times 1168\text{mm}^{1/32}$  印张  $6\frac{7}{8}$

字数 171 千字 印数 1—500

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

社内编号 6163 定价 20.00 元

**版权所有 违者必究**

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

# 前 言

过去二十几年的试验研究、理论分析及工程实践表明：纤维增强材料（FPR）替代钢板加固钢筋混凝土结构的受弯构件是一种十分有效的方法，并且在试验研究和工程应用方面都取得了很多成果。但作为一门新兴的结构加固技术，无论在基础研究还是工程应用等方面还有许多亟待解决的问题。例如，剥离破坏是纤维片材加固钢筋混凝土梁的主要破坏模式，包括端部剥离破坏和中间裂缝引起的剥离破坏。在这两种破坏形式中，中间裂缝引起的剥离破坏比端部剥离破坏更为常见。为了避免加固构件发生剥离破坏，大多数规范采用了限制纤维片材应变的方法以防止剥离破坏，但采用的纤维片材应变限值缺少理论和试验支撑。尽管近年来一些研究人员又提出了不同的防止剥离破坏的纤维应变限值的计算模型，但这些模型的精确度也有待进一步检验和改进。此外，不同工作状态下加固的构件与完好状态下加固构件的抗弯性能是否存在差异；加固后构件的变形是否可以按现行计算方法进行计算等。这些问题的解决将直接影响到加固构件的安全与正常使用。

本书内容是作者近年对 FRP 片材加固钢筋混凝土梁抗弯性能与剥离破坏课题研究的总结。作者通过对不同工作状态下加固构件的抗弯性能、纤维片材产生剥离破坏的机理及剥离承载力的计算以及梁柱节点处梁的抗弯加固进行了比较系统和深入的研究，主要研究成果为：（1）系统地探讨了构件在工作状态下与完好状态下加固后抗弯性能的差别，分析了构件加固时预载的大小对抗弯加固性能影响的机理，研究了预载水平及纤维加固量对加固构件刚度的影响，提出了既有的截面惯性矩计算的修正公

式，为验算加固构件正常使用极限状态时的变形提供了参考依据。(2) 分析了中间裂缝引起的 FRP 片材剥离破坏机理，建立了剥离承载力计算模型，该模型克服了采用限制纤维片材应变的计算模型无法全面考虑实际受弯构件的塑性变形对剥离破坏影响的缺陷，也避免了线弹性理论、数值分析等方法的复杂计算；其计算结果与试验结果有良好的一致性，可供工程应用参考。(3) 较系统地研究了梁柱节点处梁的抗弯加固性能，为梁柱节点处梁的抗弯加固提供了较有价值的参考。该研究成果有一定的创新性，对纤维片材加固钢筋混凝土结构具有较高的参考价值。

作为对一门新兴技术的基础研究，无论是对问题的认识深度还是研究深度都还需进一步完善，并且随着研究的深入将还会有新的问题出现。由于本书编写时间仓促，加之水平有限，不足之处在所难免，恳请广大读者及研究人员予以批评、指正。

**作 者**

2008 年 7 月于求是园

## 内 容 提 要

采用纤维增强材料（FRP）加固工程结构已经被证明是一种非常有效的方法。它以高强高效、施工便捷、耐腐蚀性能好、适用面广、基本不增加原结构自重和结构尺寸等优点，为现役或受损结构物的改造、利用提供了一种有效方法。

本书对不同工作状态下加固构件的抗弯性能、纤维片材产生剥离破坏的机理及剥离承载力的计算以及梁柱节点处梁的抗弯加固进行了比较系统和深入的论述，提出了既有的界面惯性矩计算的修正公式，建立了剥离承载力计算模型。

本书可供土木工程、材料专业技术人员、研究人员参考使用。

# 目 次

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| <b>1 绪论</b>                       | <b>1</b>  |
| 1.1 纤维增强材料加固结构的优点                 | 1         |
| 1.2 FRP 加固结构受弯构件研究的背景和意义          | 2         |
| 1.3 纤维增强材料在土木工程中的发展及应用            | 3         |
| 1.4 纤维片(板)材加固预裂与预载钢筋混凝土梁的<br>试验研究 | 7         |
| 1.5 纤维片(板)材加固钢筋混凝土梁剥离破坏的<br>研究现状  | 12        |
| 1.6 本书主要研究内容                      | 27        |
| <b>2 预载下钢筋混凝土梁抗弯加固试验</b>          | <b>30</b> |
| 2.1 概述                            | 30        |
| 2.2 试验方案                          | 31        |
| 2.3 试验结果                          | 33        |
| 2.4 预载对特征荷载的影响                    | 50        |
| 2.5 预载对刚度的影响                      | 51        |
| 2.6 预载对抗弯性能影响的机理                  | 54        |
| 2.7 预裂梁与完好梁加固的试验研究                | 58        |
| 2.8 小结                            | 61        |
| <b>3 梁柱节点处梁的抗弯加固试验</b>            | <b>62</b> |
| 3.1 概述                            | 62        |
| 3.2 试验方案                          | 62        |

|          |                                 |            |
|----------|---------------------------------|------------|
| 3.3      | 试验结果                            | 69         |
| 3.4      | 特征荷载分析                          | 81         |
| 3.5      | 刚度变化分析                          | 86         |
| 3.6      | 锚固方式分析                          | 90         |
| 3.7      | 预载对抗弯性能的影响                      | 92         |
| 3.8      | 预载对抗弯性能影响的机理                    | 93         |
| 3.9      | 小结                              | 96         |
| <b>4</b> | <b>梁柱节点处梁侧粘贴 CFRP 抗弯加固试验</b>    | <b>98</b>  |
| 4.1      | 概述                              | 98         |
| 4.2      | 试验计划                            | 98         |
| 4.3      | 试验结果                            | 103        |
| 4.4      | 特征荷载分析                          | 108        |
| 4.5      | 刚度分析                            | 114        |
| 4.6      | 锚固方式分析                          | 116        |
| 4.7      | 小结                              | 116        |
| <b>5</b> | <b>FRP 加固钢筋混凝土梁既有承载力计算方法及评价</b> | <b>118</b> |
| 5.1      | 概述                              | 118        |
| 5.2      | 非线性条带法                          | 118        |
| 5.3      | 规范建议的承载力计算模型                    | 121        |
| 5.4      | 中间剥离破坏承载力计算模型                   | 127        |
| 5.5      | 验证分析                            | 129        |
| 5.6      | 小结                              | 137        |
| <b>6</b> | <b>中间裂缝引起的 FRP 片材剥离承载力研究</b>    | <b>138</b> |
| 6.1      | 概述                              | 138        |
| 6.2      | 剥离过程及剥离机理                       | 139        |



|     |                            |     |
|-----|----------------------------|-----|
| 6.3 | 极限状态的定义 .....              | 157 |
| 6.4 | 剥离承载力计算模型 .....            | 158 |
| 6.5 | 塑性铰长度的确定 .....             | 161 |
| 6.6 | 塑性铰端部截面的抵抗弯矩 .....         | 162 |
| 6.7 | 模型验证分析 .....               | 170 |
| 6.8 | FRP 粘结延伸长度 .....           | 174 |
| 6.9 | 小结 .....                   | 176 |
| 7   | 纤维片材加固 RC 梁截面刚度及变形分析 ..... | 178 |
| 7.1 | 概述 .....                   | 178 |
| 7.2 | 截面刚度分析 .....               | 181 |
| 7.3 | 验证分析 .....                 | 187 |
| 7.4 | 小结 .....                   | 190 |
| 8   | 结论与展望 .....                | 193 |
| 8.1 | 本书的主要结论 .....              | 193 |
| 8.2 | 工作展望 .....                 | 195 |
|     | 参考文献 .....                 | 197 |

# 1 绪 论

## 1.1 纤维增强材料加固结构的优点

采用纤维增强材料 (Fiber Reinforced Polymer, 简称 FRP) 加固工程结构已经被证明是一种非常有效的方法。它可以克服传统结构加固方法的弊端, 为现役或受损结构物的改造、利用提供了一条有效的途径<sup>[1-9]</sup>。

与传统的加固方法如粘贴钢板和喷射混凝土等加固技术相比, 粘贴纤维片 (板) 材加固修复钢筋混凝土结构具有明显的优点, 具体表现在以下方面:

(1) 高强高效。由于 FRP 具有优异的物理力学性能, 因而在加固修复钢筋混凝土结构中可以充分发挥其高强度、高弹性模量等特点来提高钢筋混凝土结构的抗弯、抗剪等性能。

(2) 施工便捷, 工效高, 没有湿作业, 不需要大型施工机具, 施工占用场地少。FRP 片 (板) 材可以根据加固构件的具体尺寸定制, 也可以自行任意裁剪, 无须裁剪钢板一样的专用切割工具。根据有关统计资料, 粘贴 FRP 加固工效是粘贴钢板加固工效的 4~8 倍。

(3) 耐腐蚀性能好。试验表明, 由于碳纤维增强材料 (CFRP) 本身具有良好的耐腐蚀性能, 因此加固后构件可以有效地抵抗酸、碱、盐引起的腐蚀; 同时也免去了粘钢加固所需的定期防锈维护, 节省了人力、物力。

(4) 适用面广。粘贴 FRP 加固修复钢筋混凝土结构可以广泛应用于各种结构类型 (如建筑物、构筑物、桥梁、隧道、涵洞和烟囱等)、各种结构形状 (如矩形、圆形、曲面结构等) 及

各种部位（如梁、板、柱、节点、拱、壳、墩等）的加固修复，而且不改变结构形状也不影响结构外观。这是目前其他结构加固方法所无法比拟的，尤其对一些大型的工程结构加固，采用以往的加固方法往往无法实现，而采用 FRP 加固可以顺利地解决。

(5) 基本不增加原结构自重和结构尺寸。目前常用的 CFRP 片材的密度为  $1750\text{kg/m}^3$ ；常用 CFRP 材料的比强度（抗拉强度/密度）大于 1.5，而 HRB400 钢筋的比强度为 0.05，仅为 CFRP 片材的  $1/30 \sim 1/40$ 。

由于 FRP 加固混凝土结构具有以上优点，从而得到了广泛的研究；工程应用实例每年都在不断增加，也进一步证明了 FRP 材料结构加固技术具有非常好的技术经济指标与应用前景。

## 1.2 FRP 加固结构受弯构件研究的背景和意义

纤维片（板）材替代钢板用来加固结构的受弯构件以提高其承载力已经被证明是一种十分有效的方法。在过去的二十几年中，研究的焦点集中在构件的抗弯及抗剪承载力等方面，并取得了很多研究成果。但是，纤维片（板）材作为一种新型的材料应用到结构抗弯加固，还有很多问题亟待解决，如：

(1) 不同预载下（即不卸载）加固构件的抗弯性能与完好状态下（或卸载）加固的效果是否存在差异。

(2) 采用 FRP 片（板）对现役钢筋混凝土梁加固后，其变形是否仍然可以按钢筋混凝土结构理论所规定的方法进行计算。

(3) FRP 片（板）材加固钢筋混凝土梁的主要破坏模式为剥离破坏，现行规程的有关规定及计算模型是否能够可靠地计算加固梁的极限承载力，限制加固构件发生剥离破坏的措施是否可靠。

(4) 目前对中间裂缝引起的纤维片材的剥离破坏机理还不完全清楚，并且还没有可靠的剥离承载力计算模型。

(5) 以往的研究大多集中在梁跨中区段的抗弯加固研究，

而对梁柱节点处梁的抗弯加固或构件的负弯矩区加固研究尚少。

因此,解决上述问题对完善加固理论及工程应用有着重要的意义,主要表现在以下几个方面:

(1) 通过对剥离破坏机理的研究,建立适合剥离破坏的承载力计算模型是保证结构加固可靠性及结构安全的关键。

(2) 通过对不同预载下(即不同工作状态)加固试件的研究,进一步明确预载对结构加固后抗弯性能的影响,为实际工程的加固设计和施工提出指导。

(3) 通过对梁柱节点处梁的抗弯加固研究,明确节点处梁抗弯加固后的性能,确定合理的节点加固方案,为节点处梁的负弯矩区加固提供指导。

### 1.3 纤维增强材料在土木工程中的发展及应用

#### 1.3.1 纤维增强材料在土木工程中的发展

纤维增强材料(FRP)从20世纪40年代问世以来,在航空、航天、船舶、汽车、化工、医学和机械等领域得到了广泛的应用。从70年代开始,FRP材料开始在土木结构工程中得到应用,如英国、美国和以色列等国最早将玻璃纤维增强材料(GFRP)作为建筑物或桥梁中的结构材料。70年代后期,我国也开始对GFRP进行研究。从80年代开始,为了克服粘钢加固中的一些缺点,基于粘钢加固土木工程结构的思想,出现了以FRP替代钢板作为土木工程结构补强加固的新思路。特别是自日本阪神大地震以后,为了修复地震作用下遭受破坏的建筑物和构筑物、加固现役老化结构设施以提高其性能或延长其寿命,FRP加固作为一种有效的解决方法受到了世界各国尤其是发达国家的广泛重视。

1993年,在加拿大温哥华召开了第一届纤维增强混凝土国际会议(International Symposium on Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-1);之后相继在比利

时 (1995, FRPRCS-2)、日本 (1997, FRPRCS-3)、美国 (1999, FRPRCS-4)、英国 (2001, FRPRCS-5)、新加坡 (2003, FRPRCS-6)、美国 (2005, FRPRCS-7) 召开了 6 次国际会议。我国在 2000 年、2002 年、2004 年和 2006 年分别召开了 4 届全国土木工程用纤维增强复合材料应用技术学术交流会; 2001 年召开了纤维增强材料及工程应用专业委员会会议。这些频繁召开的国内外学术会议进一步证明了 FRP 在工程结构加固中的重要地位。

### 1.3.2 纤维增强材料在土木工程中的应用

纤维增强材料加固钢筋混凝土结构的技术最早产生于瑞士联邦实验室。Meier<sup>[10]</sup>应用 FRP 板代替钢板, 采用树脂粘结 FRP 加固了 Ebach 桥, 这被看做是加固工艺上的一项很有意义的改进。20 世纪 80 年代, FRP 加固修复技术在日本、美国等国得到了迅速发展, 特别是在美国旧金山、洛杉矶、日本阪神和我国台湾相继发生大地震之后, 在受损建筑结构的修复加固中 FRP 加固技术的优越性得到了很好的验证。在欧洲, 近年来 FRP 加固技术已被瑞士、奥地利、意大利、比利时、希腊、瑞典、法国和德国等许多国家采用, 如瑞士的 Sika 公司应用 CFRP 薄板加固的工程已超过 1000 项。我国大陆地区对 FRP 的应用起步较晚, 到 1998 年才完成第一项工程; 但近几年来, 纤维增强材料在土木工程中的应用以前所未有的规模全面展开, 在房屋、桥梁、隧道、公路、铁道、市政、港口和水利工程等各领域都取得了令人瞩目的成就, 如人民大会堂、军事博物馆、北京电报大楼、王府停车楼、北京国际金融中心和京沈高速公路立交桥等国家重点工程都应用了纤维增强材料加固技术, 取得了良好的效果。

此外, 随着 FRP 的种类和产品形式的增多、生产技术的提高及成本的下降, FRP 在土木工程中的应用具有更加广阔的前景。

### 1.3.3 国内外相关重大研究项目与规范概述

### 1.3.3.1 国内相关重大研究项目与规范

我国开展纤维材料加固钢筋混凝土构件的研究始于 1997 年,国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心最早进行了这项工作,之后有许多高等院校和科研机构也参与到这一领域的研究中来。

国内重点研究课题<sup>[11]</sup>包括国家 863 项目“高性能低成本复合材料在现代土木工程中应用的关键技术与材料研究开发”。这是由国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心主持,清华大学土木系、北京玻璃钢研究设计院、东南大学土木工程学院以及其他一些研究单位参与的综合性研究课题。该课题主要内容包括两大部分。一是高性能低成本复合材料在现代土木工程中应用的关键材料技术,具体包括对土木工程用复合材料改性技术、土木工程用复合材料制品生产关键技术、复合材料关键配套材料与设备等方面的开发研究,目的是克服单一纤维复合材料的弱点,满足现代土木工程对新型建筑材料的高性能、低成本及良好的环境亲和性的要求,突破现代土木工程用高性能低成本复合材料制品(片材、筋索、管材等)制备关键技术,制定相应标准和规范,建立具有我国自主知识产权的土木工程用复合材料应用技术体系。二是高性能低成本复合材料在现代土木工程中应用的关键技术,具体包括对结构加固补强关键技术、新结构中应用关键技术、材料检测评价技术等方面的开发研究,目的是开辟复合材料与土木工程交叉发展的新方向,形成新的复合材料指标与土木工程应用高技术产业链。

国家自然科学基金中将“高性能纤维增强塑料在土木工程中的基础研究”列为重点项目,要求对 FRP 材料性能、FRP 新型结构体系、FRP 筋混凝土及预应力混凝土结构、FRP 混凝土组合结构、FRP 结构加固的基础理论进行系统深入的研究,提出设计理论和方法,为我国土木工程应用 FRP 提供理论基础。

在混凝土结构设计规范第六批科研课题中,将 FRP 混凝土

结构研究作为一个方面列入其中。具体包括 FRP 材料基本性能、FRP 筋混凝土、预应力 FRP 混凝土以及 FRP-混凝土组合结构的设计理论及方法等内容。

在规范编制方面,中国工程建设标准化协会已完成了《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》(CECS 146:2003)<sup>[12]</sup>;《结构加固修复用碳纤维片材》、《片材加固修复结构用粘结树脂》和《高性能纤维复合材料应用技术规范》等正在编制之中。

#### 1.3.3.2 国外相关重大研究项目与规范

1983 年,美国交通部(USDOT)资助了第一个相关项目——“复合技术应用于桥梁设计与施工”。1991 年,美国混凝土协会(ACI)成立了 440 专业分委员会,该分委员会于 1996 年发布了“纤维增强塑料增强混凝土结构最新进展报告”<sup>[1]</sup>;2001 年发布了“纤维筋混凝土设计与施工指南”<sup>[13]</sup>;2002 年颁布了“外贴纤维材料加固钢筋混凝土结构设计与施工指南”<sup>[14]</sup>。目前该委员会正致力于以下报告的编制:“FRP 工程结构形式”、“混凝土结构中 FRP 的耐久性”和“纤维预应力混凝土结构设计与施工指南”<sup>[2]</sup>。同时,美国联邦公路署(FHWA)也资助了相关的研究计划,目的是制定 FRP 预应力大梁及桥面的设计指南与标准,并于 2001 年完成了草案。在政府和协会集中力量支持 FRP 筋研究的同时,美国的一些大学研究机构也在积极开展相关的研究工作,其中有 Missouri-Rolla 大学、North Carolina 州立大学、California 大学、Arizona 大学和 MIT 等。

1988 年日本建筑学会(AIJ)成立了连续纤维组合材料研究委员会;次年,日本土木工程师协会(JSCE)也成立了类似的研究委员会。这些研究组织对 FRP 加筋混凝土的性能、设计方法以及应用进行了深入系统的研究,并于 1992 年完成了“连续纤维材料在混凝土结构中的应用”<sup>[15]</sup>,1993 年完成了“预应力纤维混凝土结构设计方法”<sup>[16]</sup>,1997 年公布了“FRP 加筋混凝土建筑结构设计指南”。此后,日本土木工程协会(JSCE)的

“混凝土结构使用连续纤维材料设计与施工指南”<sup>[17]</sup>、日本建筑学会 (AIJ) 的“建筑结构采用 FRP 抗震加固设计与施工指南”及日本建筑防灾协会的“采用连续纤维补强材料对既存钢筋混凝土和钢筋混凝土建筑结构抗震加固设计与施工指南 (2001)”等相继发布。

1989 年, 加拿大土木工程师协会 (CSCE) 成立了“新型复合材料在桥梁和结构中的应用”技术委员会, 先后出版了两本综述报告。1991 年, 包含 FRP 筋设计条款的公路桥梁设计规范发布。1995 年, 加拿大联邦政府成立了“新型结构智能传感网络中心 (ISIS)”, 该中心致力于研究纤维材料在新建结构中的应用和现有结构的修复, 已经完成了关于外贴纤维加固和使用 FRP 筋的设计指南, 结合工程实践, 建造了一大批应用智能监测技术的示范工程。加拿大标准协会于 2000 年补充了“加拿大公路桥梁设计规范”中纤维增强混凝土一节 (第 16 节)<sup>[18]</sup>, 2002 年完成了“使用 FRP 结构构件设计与施工”<sup>[19]</sup>。除了 CSCE 之外, 加拿大的一些大学, 如 Sherbrooke 大学和 Manitoba 大学也独立承担了一些相关的研究项目。

1986 年, 德国建成了世界上第一座采用 FRP 后张索的公路桥。1991—1996 年, 欧洲启动了 BRITE/EURAM 项目, 德国和荷兰承担了其中的“作为非金属筋的纤维复合原理及技术”项目。1993—1997 年, 英国、荷兰等国家进行了 EUROCRETE 泛欧合作研究计划; 1996 年, 欧洲国际混凝土协会成立了 Task Group 9.3 (简称 TG9.3), 次年得到了 ConFibreCrete Network 项目的资助, 组织专家携手制定 FRP 加筋混凝土及预应力混凝土结构的设计指南<sup>[20]</sup>。

## 1.4 纤维片 (板) 材加固预裂与预载钢筋混凝土梁的试验研究

### 1.4.1 纤维片 (板) 材加固预裂钢筋混凝土梁的试验研究



纤维片（板）材加固预裂钢筋混凝土梁是指将加固的梁预先施加一定荷载，然后再完全卸载粘贴纤维片材进行加固的试验方式。

武汉理工大学刘沐宇等<sup>[21]</sup>通过 8 根碳纤维布加固补强钢筋混凝土梁的试验，研究了在不同损伤状况下，碳纤维布加固量对钢筋混凝土梁抗弯性能的影响。结果表明：碳纤维布加固可以显著提高梁的抗弯承载力，同时对增强梁的抗弯刚度也有良好作用，只是加固前梁的损伤越大，梁的承载力提高幅度就越小，而且对于损伤较大的梁，在二次受力加载初期，碳纤维布加固后并不能有效地抑制初始裂缝的扩展。增加碳纤维布的用量，可以进一步提高梁的抗弯承载力，同时也改变了梁的破坏形式，由碳纤维布的拉断破坏变成剥离破坏。

清华大学叶列平等<sup>[22]</sup>采用自行研发的碳纤维布预应力张拉设备，模拟实际工程情况，通过 7 根预应力碳纤维布受弯加固梁的受力性能试验，比较分析了不同加固量、预应力度、配筋率、二次受力等因素对试验梁受力性能的影响。试验梁为跨度 7m 的大尺寸 T 形普通混凝土梁和预应力混凝土梁。试验研究表明，采用预应力碳纤维布加固可以有效地提高混凝土梁的承载力，减小梁的挠度和裂缝宽度，所研发的预应力碳纤维布加固技术可用于实际工程。

大连理工大学任海东等<sup>[23]</sup>通过 18 根简支梁试验，对玻璃纤维布加固钢筋混凝土梁极限承载力进行了分析，对不同预加载程度对梁的承载力折减及在线加载效果进行了研究，并提出了二次受力梁的抗剪承载力公式，可供实际工程设计参考。

Norris 和 Saadatmanesh 等<sup>[24]</sup>进行了 9 根梁的静载试验。9 根梁预先加载到开裂，然后粘贴 CFRP 片材。采用了 CFRP 片材粘贴方向与梁的纵轴方向不同的试验方案。试验结果表明，梁的破坏模式与 CFRP 的粘贴方向有关，当 CFRP 的粘贴方向与梁的裂缝方向垂直时，在 CFRP 端部发生剥离破坏，当 CFRP 的粘贴方