

## 不同形态回收碳纤维混凝土弯曲性能及微观结构

江佳正 曹忠露 赵轩 杨鼎宜 苏忠纯

### Flexural properties and microstructure of recycled carbon fiber concrete with different morphologies

JIANG Jiazheng, CAO Zhonglu, ZHAO Xuan, YANG Dingyi, SU Zhongchun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240624.002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 聚乙烯醇纤维增强钢渣粉-水泥复合材料基本力学性能及微观结构

Mechanical and microstructural characteristics of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites containing steel slag powder

复合材料学报. 2019, 36(8): 1918–1925 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181108.008>

#### 结构型纤维对混凝土弯曲韧性和裂缝表面形态的影响

Effect of macro fibers on flexural toughness and crack surface topography of concrete

复合材料学报. 2020, 37(9): 2303–2313 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191213.002>

#### 高温对钢纤维-聚乙烯醇纤维-CaCO<sub>3</sub>晶须多尺度纤维/水泥复合材料弯曲性能和微观结构的影响

Influence of high temperature on flexural properties and micro structure of steel fiber-polyvinyl alcohol fiber-CaCO<sub>3</sub> whisker multi-scale fibers/cement composite

复合材料学报. 2021, 38(7): 2326–2335 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200907.001>

#### 低温作用下改性骨料-钢纤维再生混凝土弯曲性能试验

Experimental study on bending properties of modified aggregate-steel fibre recycled concrete under low temperature

复合材料学报. 2024, 41(2): 884–897 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230531.002>

#### 不同厚度碳纤维布/环氧树脂复合材料孔隙率超声衰减模型

Ultrasonic attenuation model of porosity of carbon fiber cloth/epoxy resin composites with different thicknesses

复合材料学报. 2020, 37(4): 877–885 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190620.001>

#### 回收碳纤维混凝土导电性

Conductivity of recycling carbon fiber concrete

复合材料学报. 2022, 39(6): 2855–2863 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210902.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

# 不同形态回收碳纤维混凝土弯曲性能及微观结构



分享本文

江佳正<sup>1,2</sup>, 曹忠露<sup>\*1,2,3</sup>, 赵轩<sup>1</sup>, 杨鼎宜<sup>4</sup>, 苏忠纯<sup>1,2</sup>

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 3. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222; 4. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 扬州 225127)

**摘要:** 将回收碳纤维 (RCF) 掺入混凝土制备绿色环保材料是实现碳纤维增强复合材料固废回收利用的有效方式。为探究 RCF 对混凝土材料弯曲性能的影响, 将 3 种 RCF 按不同掺量与长度掺入混凝土中, 通过四点弯曲试验, 分析了回收碳纤维混凝土 (RCFC) 破坏形态、荷载-挠度曲线和弯曲强度的变化规律; 提出了新的初裂点确定方法并进行了弯曲韧性评价, 结合 SEM 从微观层面解释内在原因; 基于压汞法 (MIP) 测得的孔隙率提出了新的弯曲强度预测公式。结果表明: RCF 可改善试件破坏形式, 提升 RCFC 弯曲强度和韧性, 弯曲强度最高提升 38.67%, 弯曲韧性指标  $I_{20}$  最高提升 70.14%; 不同形态的 RCFC 试件弯曲强度、弯曲韧性指数、等效弯曲强度及弯曲韧性比的影响规律并不相同, 这主要和 RCF 表观形貌有关, 从弯曲韧性角度来看掺入 1.5wt% 长度 12 mm 的 RCF-A 时性能最佳。本文研究结论和提出的计算方法可为 RCFC 的性能提升及推广应用提供参考。

**关键词:** 回收碳纤维; 弯曲韧性; 微观结构; 孔隙率; 弯曲强度预测

中图分类号: TU528.58; TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2025)04-2138-14

## Flexural properties and microstructure of recycled carbon fiber concrete with different morphologies

JIANG Jiazheng<sup>1,2</sup>, CAO Zhonglu<sup>\*1,2,3</sup>, ZHAO Xuan<sup>1</sup>, YANG Dingyi<sup>4</sup>, SU Zhongchun<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 3. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of Communications, Tianjin 300222, China; 4. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** Green materials can be prepared by incorporating recycled carbon fibers (RCF) into concrete, which is an effective way to realize the recycling of carbon fiber reinforced composite solid waste. In order to investigate the effect of RCF on the flexural properties of concrete, RCF from three different manufacturers were incorporated into concrete at different contents and lengths. Four-point bending tests were carried out to analyze the failure modes, load-deflection curves and flexural strength of recycled carbon fiber reinforced concrete (RCFC). A new method for determining the initial cracking point was proposed, and the flexural toughness was evaluated. The intrinsic causes were explained at the microscopic level in combination with SEM. A new bending strength prediction formula was proposed based on the porosity measured by mercury intrusion porosimetry (MIP). The results show that RCF can

收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2024-05-28; 录用日期: 2024-06-19; 网络首发时间: 2024-06-25 11:09:39

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240624.002>

基金项目: 中交一航局揭榜挂帅项目 (2022-YHJBGS-02); 中交一航局科技研发项目 (2022-7-19); 交通运输行业重点科技项目清单 (2022-MS1-065); 中交集团青年创新项目 (2023-ZJKJ-QNCX04)

Unveiling and Leading Projects of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd. (2022-YHJBGS-02); Technology Research and Development Projects of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd. (2022-7-19); Key Technology Projects in the Transportation Industry (2022-MS1-065); Youth Innovation Project of CCCC (2023-ZJKJ-QNCX04)

通信作者: 曹忠露, 博士, 正高级工程师, 硕士生导师, 研究方向为高性能混凝土材料与结构耐久性 E-mail: [caozhonglu@126.com](mailto:caozhonglu@126.com)

引用格式: 江佳正, 曹忠露, 赵轩, 等. 不同形态回收碳纤维混凝土弯曲性能及微观结构 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(4): 2138-2151.

JIANG Jiazheng, CAO Zhonglu, ZHAO Xuan, et al. Flexural properties and microstructure of recycled carbon fiber concrete with different morphologies[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(4): 2138-2151(in Chinese).

improve the failure mode and improve the flexural strength and toughness, with a maximum increase of 38.67% in flexural strength and 70.14% in flexural toughness index  $I_{20}$ . The effects of different forms of RCFC specimens on the flexural strength, flexural toughness index, equivalent flexural strength and flexural toughness ratio are not the same, which is mainly related to the apparent morphology of RCF. From the perspective of flexural toughness, the best performance is achieved when 1.5wt% RCF-A with a length of 12 mm is incorporated. The research conclusions and calculation methods can provide reference for the performance enhancement and application of RCFC.

**Keywords:** recycled carbon fibers; flexural toughness; microstructure; porosity; flexural strength prediction

碳纤维增强复合材料 (CFRP) 因其相较于传统材料优异的物理力学性能、耐久性能和功能性能备受青睐<sup>[1]</sup>, 并广泛应用于航空航天、汽车制造、风力发电、建筑交通领域<sup>[2-5]</sup>。CFRP 在全周期服役过程中产生的废弃物数量巨大, 一方面, 市场需求和生产规模不断增加, 生产过程废弃物产量巨增; 另一方面, CFRP 一般使用寿命为 20~25 年, 目前第一代 CFRP 已达退役年限<sup>[6]</sup>。据预测, 到 2025 年, 全球 CFRP 废弃物预计将达到每年 2 万吨<sup>[7]</sup>; 到 2050 年, 全球风力发电机叶片废弃总量将达到 4 340 万吨, 其中 90% 为纤维复合材料<sup>[8]</sup>, 商用飞机行业从生产到报废的整个过程中产生的 CFRP 废弃物总量将达到 50 万吨<sup>[9]</sup>。目前主要通过机械处理、热处理和化学处理 3 种方式处理 CFRP 获得回收碳纤维 (RCF), 在当今双碳战略背景下, 研究 RCF 绿色低碳再利用方式已成为研究热点。

混凝土材料作为当代最为广泛使用的建筑材料, 目前正面临着如何实现绿色低碳和高性能长寿命的双重挑战。通过制备纤维增强混凝土提高混凝土材料韧性和减少结构裂缝被认为是提高力学性能、延长服役寿命和减少维修成本的有效方式<sup>[10]</sup>。国内外学者围绕金属纤维<sup>[11]</sup>、无机合成纤维<sup>[12]</sup>、有机合成纤维<sup>[13]</sup>和天然纤维<sup>[14]</sup>单掺或混掺制备水泥基复合材料开展了广泛研究, 纤维增韧机制与规律是应用研究的重点之一。也有学者在此基础上开展了养护制度<sup>[15]</sup>、恶劣或极端环境<sup>[16-18]</sup>下纤维混凝土的弯曲性能研究, 建立起裂缝表面形态<sup>[19]</sup>、界面过渡区与孔结构<sup>[20]</sup>和弯曲韧性指标之间的关系。

利用 RCF 制备满足性能要求的混凝土是实现 CFRP 废弃物再利用的绿色低碳方案<sup>[21]</sup>, 已有学者针对 RCF 混凝土 (RCFC) 开展了相关研究。Zhou 等<sup>[22]</sup>使用碳预浸布废料经高速破碎切割后获得的 RCF 制备混凝土, 该纤维长度 5~40 mm、直径 0.1~1 mm, 研究发现掺入 1vol% 体积掺量的 RCF 时, 混凝土抗压性能、劈裂抗拉性能提升最大,

分别提升了 20.9%、14.3%。de Souza Abreu 等<sup>[23]</sup>使用碳纤维毡切割而成的 40~50 mm 的 RCF, 发现碳纤维在界面过渡区形成了致密的微裂纹分支, 这些分支联接成微裂纹网络, 起到耗散能量并防止在过渡区形成大裂缝。Akbar 等<sup>[24]</sup>研究表明 RCF 与水化产物无化学作用, RCF 表面存在的通道和沟壑有助于释放高压蒸汽并减少裂纹扩展, 且在 600℃ 高温下仍能发挥作用。Wang 等<sup>[25-26]</sup>则通过使用化学溶液改性 RCF, 发现碱性溶液改性后使得 RCF 表面粗糙, 为水化产物提供合适成核点, 有利于形成致密的纤维-基体黏结界面, 进而提高力学性能。尽管上述研究表明 RCF 在制备混凝土中可发挥积极作用, 但大多围绕单一类型的 RCF 进行试验研究, 鲜有研究不同处理工艺的 RCF 掺入混凝土后带来的弯曲性能差异, 同时亦缺少相关参数与弯曲强度的定量关系。

基于此, 本文选取 3 种短切 RCF, 研究不同形态 RCF 的掺量和长度对 RCFC 弯曲性能的影响, 并采用多种评价指标评价弯曲韧性, 结合微观手段探讨 RCF 与基体黏结机制, 并结合压汞法 (MIP) 测试结果提出考虑孔隙率影响的 RCFC 弯曲强度预测公式, 以期 RCF 在混凝土领域的应用提供参考依据。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

试验选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 比表面积 366 m<sup>2</sup>/kg, 初凝时间 182 min, 终凝时间 249 min, 3 d 抗压强度 25.2 MPa, 28 d 抗压强度 48.4 MPa; 细骨料为含泥量低且级配良好河砂, 细度模数 2.6; 粗骨料为连续级配碎石 (粒径 5~25 mm); 水采用自来水; 减水剂采用聚羧酸高效减水剂。3 种 RCF 来源于碳纤维企业生产线或碳纤维复合材料的回收短切碳纤维样品, 其中 RCF-A、RCF-C 为生产线废丝直接切割, RCF-B 经热处理后切割, RCF-A、RCF-C 含浸润剂。每种样品包括 6 mm、12 mm 和 18 mm 等 3 种长度规格,



RCF 外观见图 1。湿法纺丝工艺制成的碳纤维原丝表面粗糙存在沟槽，经浸润后作为流动相的树脂填充纤维表面的沟槽中，充分填充并固化后可形成相对光滑的表面。而 RCF 经热处理回收后可去除表面树脂和浸润剂，3 种 RCF 微观形貌见图 2，可以看出 RCF-A、RCF-B 表面粗糙且存在纵向束状沟壑，RCF-C 表面光滑，具体性能参数见表 1。

1.2 配合比和试验制备

为探究 RCF 相关参数对弯曲性能的影响，将不同长度的 3 种 RCF 以不同掺量加入混凝土，质量掺量为 0.5wt%、1.0wt%、1.5wt%。混凝土配合比依据 GB/T 21120—2018<sup>[27]</sup> 进行设计，强度等级为 C40，坍落度控制在 (180±20) mm，水胶比为 0.44，水泥、砂、石分别为 380 kg/m<sup>3</sup>、806.3 kg/m<sup>3</sup>、946.5 kg/m<sup>3</sup>，具体配合比如表 2 所示。由于加入 RCF 会降低拌合物流动度，改变纤维分布、取向甚至引发团聚，从而影响 RCFC 力学性能<sup>[28]</sup>，为避免流动度差异影响试验结果，本试验通过调整减水剂掺量(水泥质量掺量的 0.1%~0.15%)使得坍落度保持在 (180±20) mm 之间。

原材料按配合比分别称重。先将砂、石和水泥依次倒入搅拌机并干拌 60 s；加入一半的水和减水剂后继续搅拌至拌合物呈流动态，一边搅拌一边均匀撒入 RCF，RCF 加入完成后迅速加入剩余水和减水剂，搅拌 60 s；出料后在湿润铁板上人工翻拌 60 s。将拌合物倒入试模，使用振动台



图 1 回收碳纤维 (RCF) 外观

Fig. 1 Appearance of recycled carbon fibers (RCF)

振动 5 s 并抹平。试件成型 24 h 后脱模并放入养护室，以标准养护条件至 28 d 龄期。

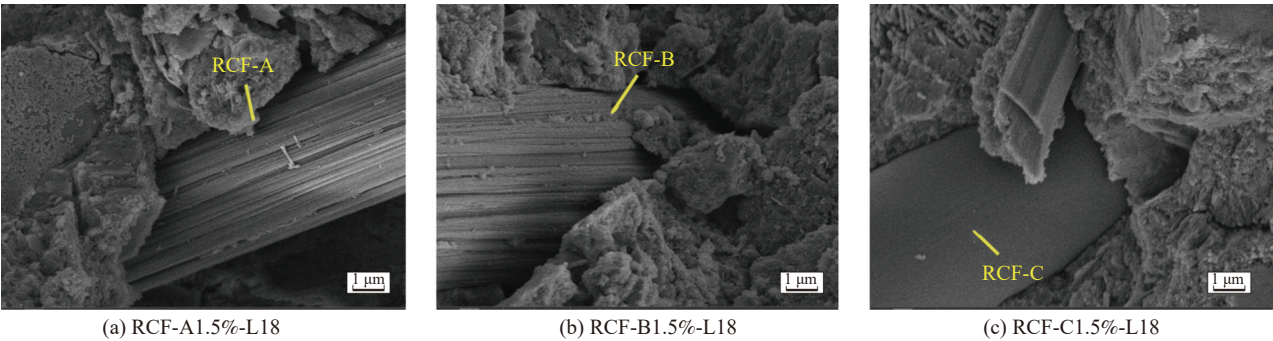


图 2 3 种 RCFs 的形貌外观

Fig. 2 Morphological appearances of three RCFs

表 1 回收碳纤维性能参数  
Table 1 Properties of RCFs

Fiber	Length <i>L</i> /mm	Recycling method	Adhesive Yes or No	Diameter/ $\mu\text{m}$	Density/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Carbon content/wt%
RCF-A	6, 12, 18	Direct cutting	Yes	5.83	1.78	3 536	230	95.0
RCF-B	6, 12, 18	Heat treatment	No	7.28	1.80	3 474	230	91.3
RCF-C	6, 12, 18	Direct cutting	Yes	7.28	1.79	2 866	230	92.8

表 2 试件编号及配合比  
Table 2 Number and mix proportion of specimens

Sample No.	RCF parameter			Sample No.	RCF parameter		
	Type	Content/wt%	Length/mm		Type	Content/wt%	Length/mm
Normal concrete (NC)	—	—	—	RCF-B0.5%-L12	B	0.5	12
RCF-A0.5%-L6	A	0.5	6	RCF-B1.0%-L12	B	1.0	12
RCF-A0.5%-L12	A	0.5	12	RCF-B1.5%-L12	B	1.5	12
RCF-A0.5%-L18	A	0.5	18	RCF-B1.5%-L6	B	1.5	6
RCF-A1.0%-L6	A	1.0	6	RCF-B1.5%-L18	B	1.5	18
RCF-A1.0%-L12	A	1.0	12	RCF-C0.5%-L12	C	0.5	12
RCF-A1.0%-L18	A	1.0	18	RCF-C1.0%-L12	C	1.0	12
RCF-A1.5%-L6	A	1.5	6	RCF-C1.5%-L12	C	1.5	12
RCF-A1.5%-L12	A	1.5	12	RCF-C1.5%-L6	C	1.5	6
RCF-A1.5%-L18	A	1.5	18	RCF-C1.5%-L18	C	1.5	18

1.3 试验方法

1.3.1 弯曲性能测试

依据 CECS13: 2009<sup>[29]</sup> 采用四点弯曲试验测试弯曲性能，每组试件 3 个，尺寸 100 mm×100 mm×400 mm，跨距 300 mm。采用上海华龙测试仪器有限公司 WDW-100 微机控制电子万能试验机，选择位移控制方式，加载速率为峰前 0.5 mm/min，峰后 0.1 mm/min，跨中挠度通过位移采集器采集，试件及装置示意图如图 3 所示。

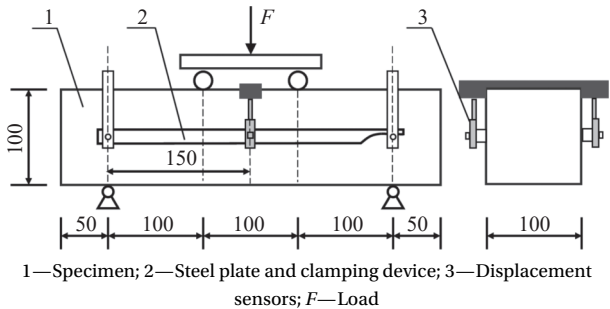


图 3 四点弯曲试件及装置示意图 (单位: mm)  
Fig. 3 Four-point bending specimen and device diagram (Unit: mm)

弯曲强度按下式计算：

$$f_{\max} = \frac{F_{\max} l}{bh^2}$$
 (1)

式中： $f_{\max}$ 为弯曲强度 (MPa)； $F_{\max}$ 为峰值荷载 (N)； $l$ 为支座跨距； $b$ 和  $h$  分别为横截面宽度与高度 (mm)。

对比国内外规范 CECS13: 2009<sup>[29]</sup>、JGJ/T 221—2010<sup>[30]</sup>、ASTM C1018<sup>[31]</sup>、JSCE-SF4<sup>[32]</sup> 中关于弯曲韧性的计算方法，CECS13: 2009 计算公式全面，通过弯曲韧性指数、等效弯曲强度和弯曲韧性比进行评价，可有效评估试件弯曲韧性。

弯曲韧性指数是不同挠度下荷载-挠度曲线包络面积与初裂挠度对应包络面积的比值，通过该

值对比和理想弹塑性材料的偏离程度进行评价。此方法优势在于无量纲且不受试件尺寸限制，但初裂点的选取对计算结果影响较大，弯曲韧性指数计算示意图如图 4 所示。

计算公式如下：

$$I_5 = \frac{\Omega_{3\delta}}{\Omega_{\delta}}; I_{10} = \frac{\Omega_{5.5\delta}}{\Omega_{\delta}}; I_{20} = \frac{\Omega_{10.5\delta}}{\Omega_{\delta}}$$
 (2)

式中： $\delta$ 为初裂挠度，本文参考纤维混凝土受弯破坏的截止挠度，选取 3、5.5、10.5 倍的初裂挠度进行计算； $\Omega$ 表示对应挠度下荷载-挠度曲线包络面积 (N·mm)； $I$ 为韧性指数。

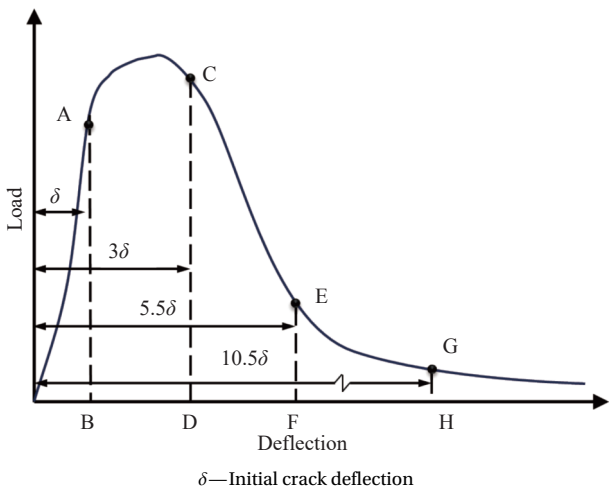


图 4 弯曲韧性指数计算示意图  
Fig. 4 Calculation diagram of toughness index

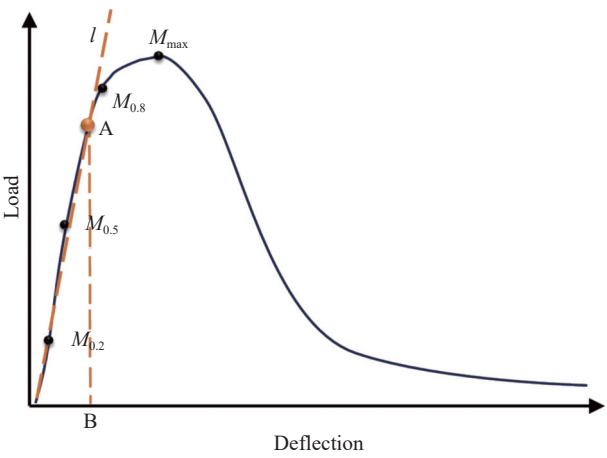
等效弯曲强度通过计算给定挠度下荷载-挠度曲线包络面积进而计算出该面积对应的弯曲强度。优势在于简洁且无需确定初裂点，但给定挠度可能偏大或偏小，且忽略了峰前和峰后的变形情况。故而采取等效弯曲强度时常常计算其他弯曲韧性指标，以全面评价弯曲韧性。计算公式如下：

$$f_e = \frac{\Omega_k l}{bh^2 \delta_k} \tag{3}$$

式中： $f_e$ 为等效弯曲强度 (MPa)； $\Omega_k$ 为对应挠度下的荷载-挠度曲线包围面积； $\delta_k$ 为给定挠度，参考国内外规范的推荐挠度，结合本文试验结果确定挠度为  $l/150$ 。

弯曲韧性比  $R_e$  定义为等效弯曲强度和初裂强度的比值。可适用于不同试件尺寸的弯曲韧性的比较，但和弯曲韧性指数一样受初裂点影响。

文献 [33-34] 通过 20% 和 50% 的峰值荷载确定趋势线的方法确定初裂点，文献 [35] 通过 0.02% 位移偏移法确定初裂点。本文提出通过作趋势线 (经特征点确定) 和荷载-挠度曲线交点的方式确定初裂点。首先确定曲线峰值点  $M_{max}$ ，根据  $M_{max}$  峰值强度的 0.2、0.5、0.8 倍选取  $M_{0.2}$ 、 $M_{0.5}$ 、 $M_{0.8}$  3 个特征点，对 3 个点作线性拟合确定直线  $l$ ，过  $l$  作荷载-挠度曲线的交点，一般会获得两个交点，分别在  $M_{0.5}$  的上下方，结合曲线物理意义， $M_{0.5}$  上方的交点即为初裂点 A，如图 5 所示。



$M_{max}$ —Point of peak load;  $M_{0.2}$ ,  $M_{0.5}$ ,  $M_{0.8}$ —Point with 20%, 50%, 80% of peak load; A—Point of initial cracking load; B—Initial crack displacement;  $l$ —Fitting straight line

图 5 RCF 荷载-挠度曲线初裂点计算示意图

Fig. 5 Determination diagram of initial crack point of RCF load-deflection curve

本文使用 Origin 计算各组 3 个试件荷载-挠度曲线的平均曲线，而弯曲强度和弯曲韧性指标则通过计算该组各个试件的值得取平均值获得。

1.3.2 SEM 和 MIP 测试

为观察 RCF-基体界面和获得材料的孔隙率，进行 SEM 和 MIP 测试。采用捷克 TESCAN MIRA LMS 型扫描电子显微镜对试样进行形貌观察，使用美国麦克仪器公司生产的 AutoPore 9500 型压汞

仪对试样进行 MIP 测试。试样取自力学测试后的试件中心，SEM 试样为长宽厚小于 5 mm 的块体，MIP 试样为长宽厚不小于 10 mm 的块体，质量不超过 2 g，并经无水乙醇浸泡终止水化。进行 SEM 测试前对试样喷金处理，MIP 测试前试样经 60℃ 烘干。

2 结果与讨论

2.1 各试件破坏过程及形态

基准组试件呈典型的脆性破坏，随荷载增加未见明显裂缝，当荷载增至极限时，试件受弯区当即产生裂纹并迅速竖向贯穿整个试件。掺有 RCF 的试件受荷破坏则具有一定的延性，当荷载增至极限荷载的 80% 左右时试件受弯区可见微小裂纹，且裂纹向上曲折式发展；当荷载增至极限时，大部分 RCFC 试件可短暂维持荷载，然后试件裂缝以较快速度竖直向上发展至接近试件顶端的位置，此时荷载几乎降为零。就破坏形态而言，基准组呈一字型贯穿破坏，试件断面较为平整。RCFC 出现较为曲折的可见裂缝，观察试件侧面，大部分 RCFC 具有一条主裂纹多条微裂纹。图 6 给出了基准组和 RCF 掺量 1.0wt% 长度 12 mm 试件的破坏形态。通过肉眼观察试件裂缝时，较难见到桥接在裂缝两端的 RCF。这和钢纤维混凝土明显不同，钢纤维混凝土断面则可见明显的钢纤维，且加载过程中可明显观察到纤维拉出过程 [36]。

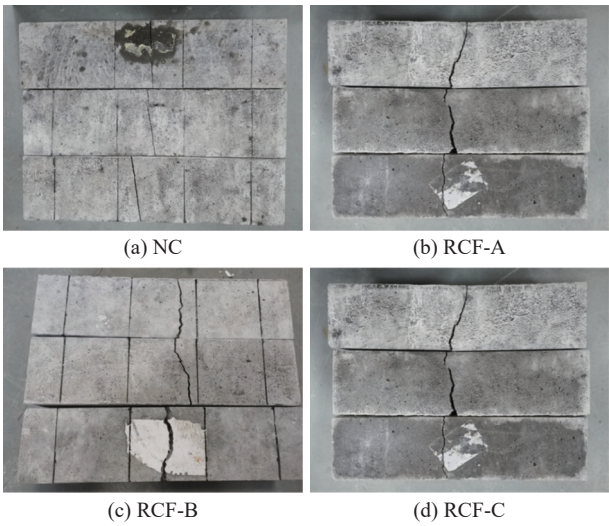


图 6 NC 和 RCF 混凝土 (RCFC) 典型弯曲破坏形态

Fig. 6 Typical flexural failure form of NC and RCF concrete (RCFC)

综上所述，掺入 RCF 后，可一定程度改善混凝土受弯破坏模式及形态，这是由于掺入 RCF 后



对裂缝产生的抑制作用和对微裂纹萌生的阻滞作用，可延缓裂缝发展时间，影响裂缝发展方向。但产生可见裂缝后，RCF的抑制效果较弱，无法产生类似于钢纤维混凝土加载过程中纤维逐渐拔出的效果。

2.2 RCFC的荷载-挠度曲线

不同类型、掺量和长度的RCFC的荷载-挠度平均曲线如图7所示。结合受力过程，可将RCFC荷载-挠度曲线可分为3个阶段：线性上升段、非线性上升段和非线性下降段，线性上升段对应受力过程中的线弹性工作阶段，此时试件受力表现与素混凝土相近，为弹性变形，这是由于RCF与基体黏结良好表现为整体受力。非线性上升段对应受力过程的裂缝发展阶段，此时出现可见微裂纹，RCF起到阻碍裂纹向上发展的作用，由于RCF与基体黏结力足以承担外部荷载，故而荷载缓慢上升并趋于平缓。非线性下降段对应破坏阶段，此时荷载随位移增大迅速下降，这是由于裂缝处RCF不断被拔出或拉断，裂缝向上发展，尽管上部无裂缝处的纤维仍在工作，但实际受弯区截面面积减小，承载能力下降。

2.3 RCFC的弯曲强度

各组试件的弯曲强度见图8。可以看出掺入适量的RCF后，RCFC弯曲强度得到不同程度的增强，这是由于RCF通过与基体的黏结应力承担外部荷载，从而有效提升试件的弯曲强度。与基准组弯曲强度相比，RCF-A、RCF-B、RCF-C的最大增幅分别为31.4%、38.67%、16.75%，通过和文献[37-38]中碳纤维混凝土的弯曲强度及增长率对比可知，合理的掺入RCF能达到非回收碳纤维的弯曲性能。

不同RCF对混凝土弯曲性能增幅明显不同，就增强效果而言，RCF-B最强，RCF-A次之，RCF-C其中一组甚至带来负面效果。这和RCF的表面形态有关，结合图2可以看出RCF-A、RCF-B表面存在竖向凹槽，且附着有矿物结构，RCF-C表面光滑，几乎未见附着物。由于纤维-基体界面的界面过渡区对RCF弯曲性能起到重要作用，纤维-基体之间黏结力不仅和纤维表面粗糙度正相关，也和其附着水化产物能力有关[39]，故而RCF-A和RCF-B试件表现出更高的弯曲强度。

RCF掺量对弯曲强度的影响规律受到RCF表面形态的影响。对于RCF-A、RCF-B，相同RCF

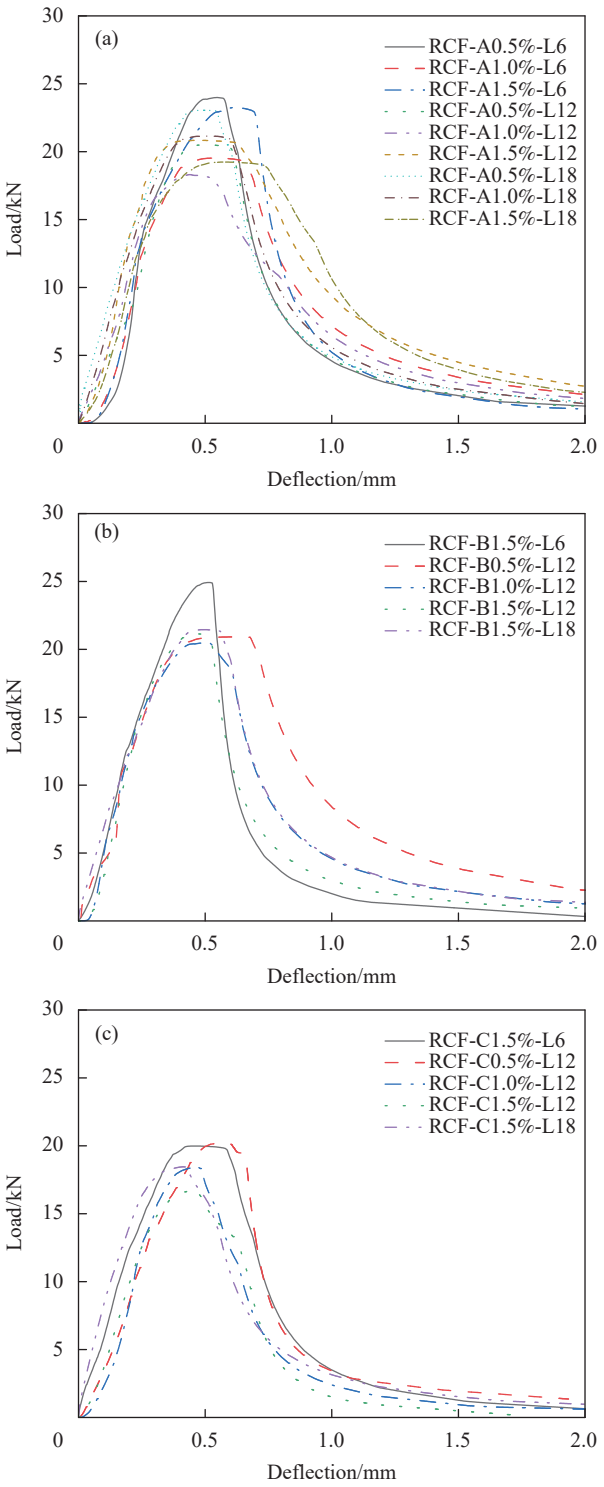


图7 不同RCFC平均荷载-挠度曲线  
Fig. 7 Average load-deflection curves of different RCFC

长度的RCFC试件的弯曲强度增长率随RCF掺量的增加呈先降低后增加的规律，如RCF-A直径为6 mm时，RCF掺量0.5wt%、1.0wt%、1.5wt%对应的增长率分别为31.40%、8.61%、16.68%。掺量为1.0wt%和1.5wt%的RCFC弯曲强度较掺量

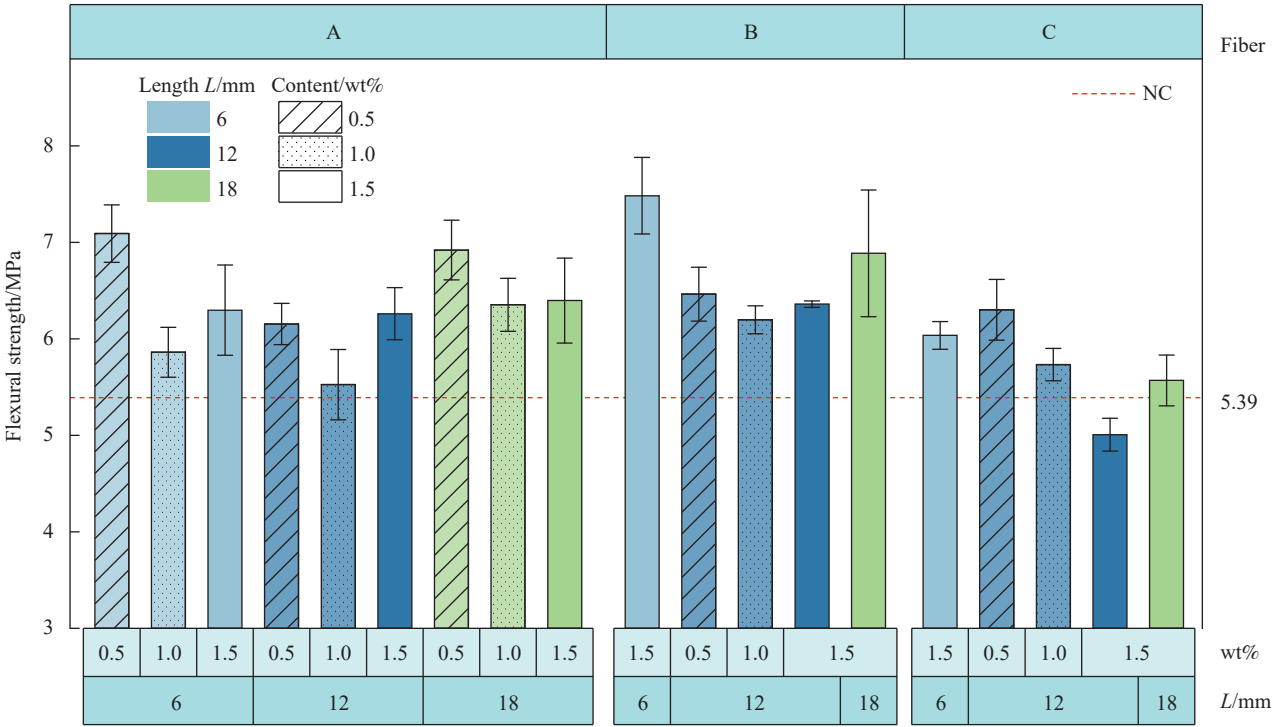


图8 RCFC 弯曲强度

Fig. 8 Flexural strength of RCFC

0.5wt% 试件的弯曲强度有所降低,这是由于随着 RCF 掺量的增加分散难度加大,易发生团聚造成局部性能下降,同时高掺量的 RCF 易引入更多气泡,形成孔隙降低密实程度<sup>[26]</sup>。但当 RCF 掺量继续增加时,单位承载面积的 RCF 增加,其抑制裂缝发展和“桥接”作用得到增强,此时 RCF 掺量带来的正面效应强于负面效应,使得掺量 1.5wt% 的试件弯曲强度增长率较掺量 1.0wt% 试件有所提升。对于 RCF-C,弯曲强度则随 RCF 掺量增加而下降,掺量 0.5wt%、1.0wt%、1.5wt% 的 RCF-C 试件对应的增长率分别为 16.75%、6.25%、-7.22%。结合图 2 可知,由于 RCF-C 表面光滑,无法提供和 RCF-A 或 RCF-B 一样的摩擦力,此时 RCF 掺量增加带来的负面效应占主导,表现出弯曲强度的逐渐下降甚至低于基准组。

RCFC 弯曲强度随 RCF 长度的增大均呈先降低后增大的趋势。这是因为,当 RCF 较短时,RCF 分散较好且更容易避免非匀质区域出现,当 RCF 较长时,相同 RCF-基体黏结应力下的试件承载力更高,所以较短和较长的 RCF 表现出更高的弯曲强度。不同于 RCF 掺量对弯曲强度的影响规律,RCF 长度的影响规律并未受到 RCF 形貌的影响,这可能是由于 RCF 掺量和长度对 RCF-基体黏

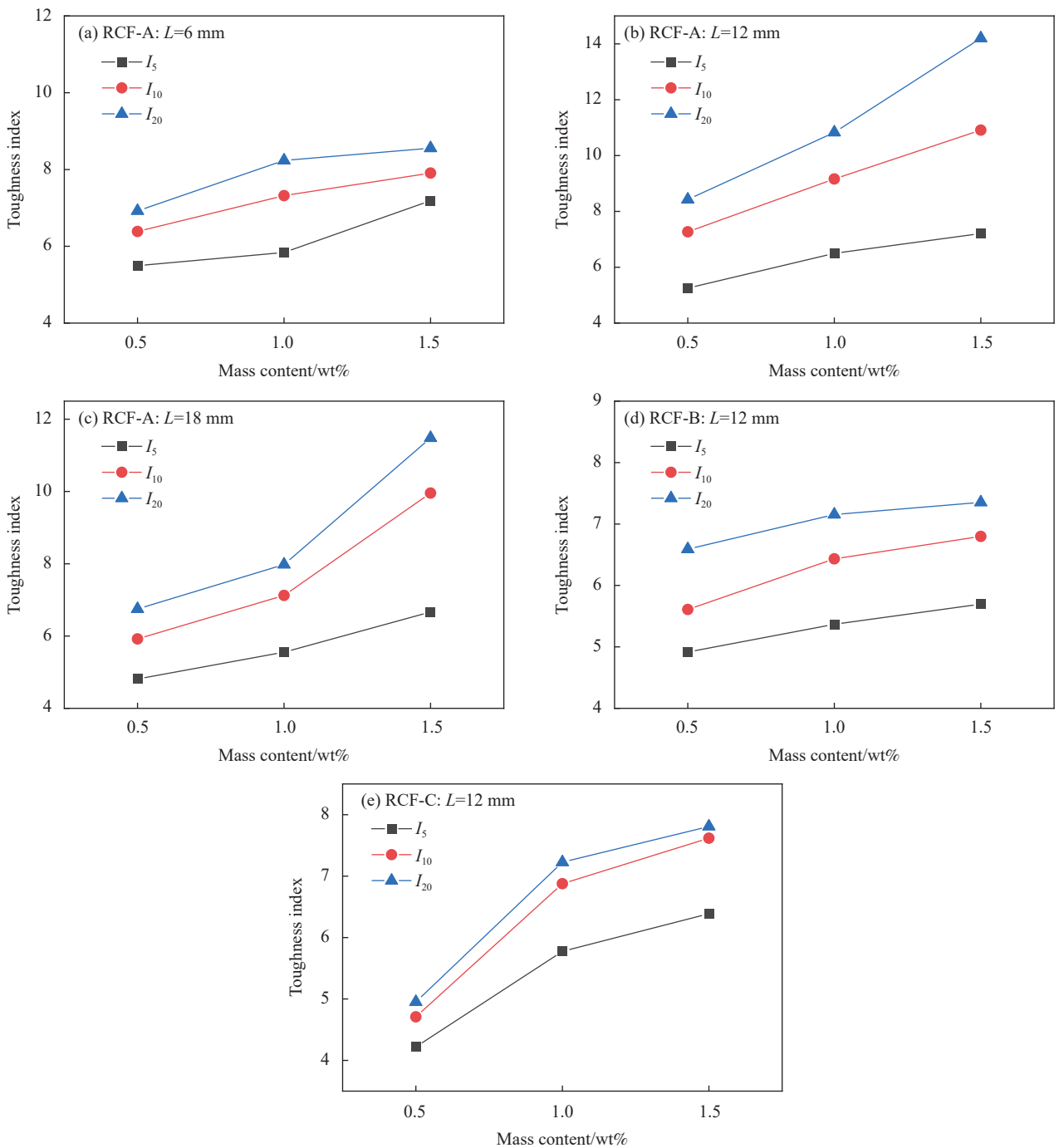
结能力的影响机制不同,增大掺量并不改变单根 RCF 的黏结机制,其黏结应力仍受到 RCF 表面形貌的制约;而长 RCF 则是通过提供更长的埋入长度来提高更大的拔出荷载,增加 RCF 长度时 RCF 桥联应力和桥联余能均增大<sup>[40]</sup>,改变 RCF 长度对不同表观形貌 RCF 表现出相同的影响规律。

2.4 RCFC 的弯曲韧性评价

2.4.1 弯曲韧性指数

RCF 掺量对弯曲韧性指数的影响见图 9。随着 RCF 掺量的增加,  $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{20}$  呈逐渐上升趋势,1.5wt%RCF 掺量的试件明显表现出更高的弯曲韧性,这说明增加 RCF 后有助于提高混凝土韧性,这跟前文关于试件增韧改变破坏形态的分析吻合。

由图 9(a)-9(c) 可知,RCF-A1.5%-L12 组的弯曲韧性指数最高,  $I_{20}$  为 14.19,而长度为 18 mm 时弯曲韧性指数提升率最高,RCF 掺量为 1.5wt% 时的  $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{20}$  较 0.5wt% 掺量组上升了 38.55%、68.13%、70.14%。由图 9(b)、图 9(d)、图 9(e) 可知,不同形貌 RCF 下,RCF 掺量对弯曲韧性的提升效果不同,当掺量 0.5wt% 时,RCF-A、RCF-B、RCF-C 的  $I_{20}$  分别为 8.42、6.59、4.95,当 RCF 掺量为 1.5wt% 时 3 种 RCF 试件  $I_{20}$  分别为 14.19、7.35、7.81,分别增长了 68.56%、11.56%、57.71%,可



$I_5, I_{10}, I_{20}$ —Flexural toughness index at  $3\delta, 5.5\delta$  and  $10.5\delta$

图9 RCF 掺量和弯曲韧性指数的关系

Fig. 9 Relationship between RCF mass content and toughness index

见 RCF-A 和 RCF-C 试件的弯曲韧性指数受 RCF 体积掺量影响较大。

RCF 长度对弯曲韧性指数的影响见图 10。可知，随着 RCF 长度的增加， $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{20}$  大致呈先上升后下降的趋势，总的来看，直径为 12 mm 时三类 RCF 的弯曲韧性指数取得最大值。

尽管各组的  $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{20}$  变化趋势大致相同，但下降程度存在差异：当 RCF 掺量在 0.5wt% 和 1.0wt% 时，RCF 长度 18 mm 试件的韧性指数下降至 RCF 长度 6 mm 的试件以下，而 RCF 掺量 1.5wt% 时，尽管 RCF 长度 18 mm 试件韧性指数下降，但仍高于 RCF 长度 6 mm 的试件。这表明当使用较



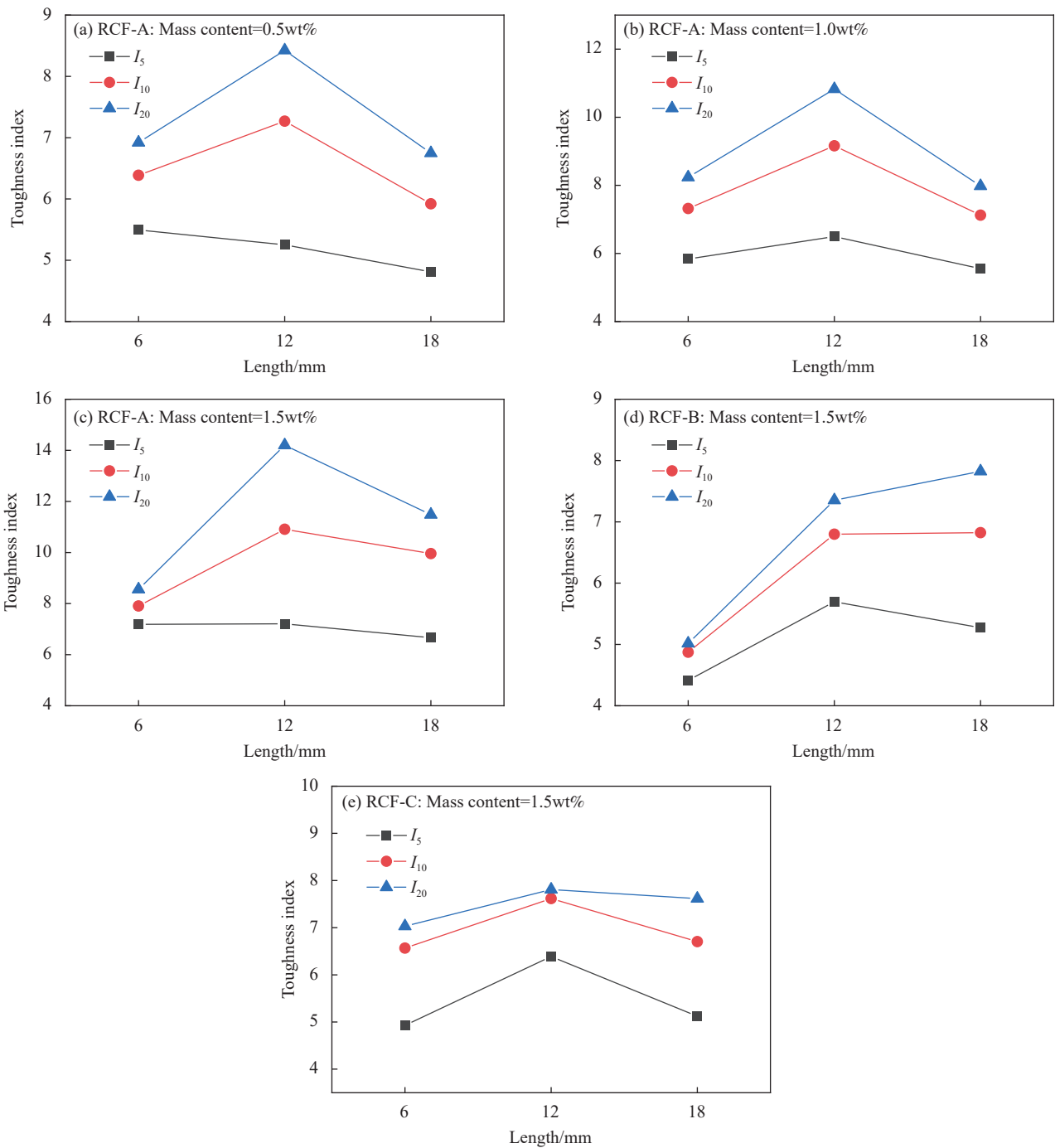


图 10 RCF 长度和弯曲韧性指数的关系

Fig. 10 Relationship between RCF length and toughness index

长 RCF 时宜采用较大掺量，避免弯曲韧性指数过低。

综合图 9 和图 10 可知，RCF-A 试件弯曲韧性指数最高，RCF-B 和 RCF-C 试件的韧性指数相近，但 RCF-B 试件的  $I_5$  高于 RCF-C， $I_{10}$ 、 $I_{20}$  则更低。这主要是由于  $I_5$  的挠度范围均在峰值挠度前，计算范围主要是线弹性段，结合前文弯曲强度和表面

形貌的分析，RCF-A 和 RCF-B 峰前强度高于 RCF-C 试件，故而 RCF-A 和 RCF-B 的  $I_5$  更高。而对于峰后弯曲韧性指数  $I_{10}$ 、 $I_{20}$  来说，弯曲强度最大的 RCF-B 韧性指数反而降低，这可能是由于 RCF-B 与基体黏结较好，随着荷载增大，RCF 承担应力更大，RCF 更可能被拔断，导致峰后应力损失更大和韧性降低。

2.4.2 等效弯曲强度和弯曲韧性比

图 11 为不同组别 RCF 试件的等效弯曲强度和弯曲韧性比。对比 3 种 RCFC 的等效弯曲强度，明显 RCF-A 性能最佳，RCF-C 的等效弯曲强度最小，可见 RCF 表面形貌对等效弯曲强度数值影响明显，建议使用表面粗糙的 RCF-A。由图 11(a) 可知 RCF 掺量对等效弯曲强度的影响，RCF-A 和 RCF-B 掺量的增加有助于提高 RCFC 等效弯曲强度，尤其是掺量超过 1.0wt% 后等效弯曲强度增长显著。而 RCF-C 则表现出随着 RCF 掺量增加等效

弯曲强度下降的规律，可见 RCF 表面形貌对等效弯曲强度变化规律影响显著，导致这种区别的原因同前文弯曲强度的论述。由图 11(b) 可知 RCF 长度和等效弯曲强度的关系：当 RCF 掺量为 0.5wt% 和 1.0wt% 时，等效弯曲强度随 RCF-A 长度增加而增大，当 RCF 掺量为 1.5wt% 时，RCF-A 和 RCF-B 呈现先增大后略微降低的规律，这可能和大掺量和长度的 RCF 导致的基体非匀质性有关。因此，对于表面带竖向凹槽的 RCF-A 和 RCF-B，推荐 RCF 长度为 12 mm、掺量为 1.5wt%。

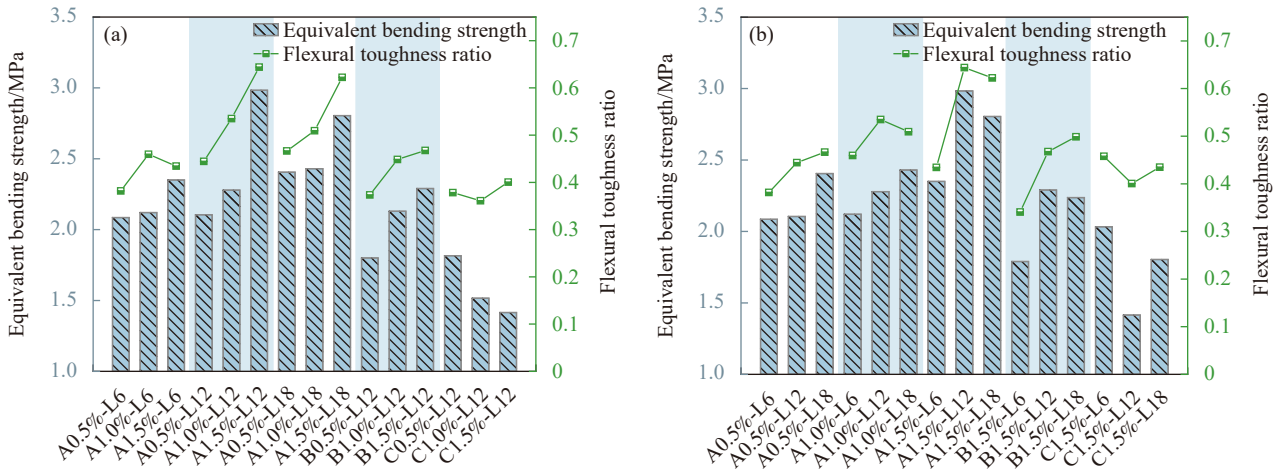


图 11 RCFC 等效弯曲强度和弯曲韧性比  
Fig. 11 Equivalent flexural strength and flexural toughness ratio of RCFC

而对于弯曲韧性比而言，其影响规律同样受 RCF 表面形貌的影响，对于 RCF-A 和 RCF-B，弯曲韧性比随 RCF 掺量的增加而增大，随 RCF 长度的增加表现为先增加后略微下降，其中，RCF-A1.5%-L12 的弯曲韧性比最高，为 0.64。对于 RCF-C，弯曲韧性比随 RCF 掺量和长度的增加均表现为先降低后增加。同时，由图 11 可知 RCFC 弯曲韧性比和等效弯曲强度的变化趋势大体吻合，由于弯曲韧性比除了受等效弯曲强度影响外，还取决于初裂强度值的准确性，这也反映出本文提出的初裂点确定方法是可行的。

2.5 RCFC 微观机制

RCFC 试件的微观结构如图 12 所示。可以看出 RCF 经拌合分散以单束纤维形式发挥作用，3 种 RCF 均存在拔出、拔断的破坏形式，部分 RCF 还存在先拔出后拔断的情况。从抗裂角度，可明显看出 RCF 阻裂作用，如图 12(a) 所示的裂纹“绕”过 RCF 继续发展，而图 12(b)、图 12(c) 则观察到仅 RCF 一侧有微裂纹，起到了“阻”的作

用。从黏结情况来看，3 种 RCF 和基体过渡区均较为致密，部分位置观察到的 RCF 与基体间“空隙”主要是由于 RCF 受拉拔出产生。从水化产物附着情况看，存在纵向凹槽的 RCF-A 和 RCF-B 表面紧密附着水化产物，可见粗糙表面更易提供成核点位，且该工艺下的 RCF 表面可能存在促进水化形成的物质，利于水化硅酸钙 (C-S-H) 和氢氧化钙形成。相较之下，RCF-C 表面较难观察到附着的水化产物，这是影响弯曲性能和峰后弯曲韧性的主要因素。

2.6 考虑孔隙率的弯曲强度公式

通过 MIP 测得 5 组 RCF-A 试件的孔隙率，如图 13 所示。相较于基准组孔隙率，RCF 的掺入使得孔隙率降低，这和文献 [41-43] 的研究结论一致，一般认为这是由于纤维填充和纤维桥联作用，进一步细化了混凝土内部孔隙和微裂缝。

由图 13 可知，RCFC 孔隙率随 RCF 掺量增加而逐渐增加，随 RCF 长度的增加呈先降低后增加的趋势，但均低于基准组，可见低掺量和合适长

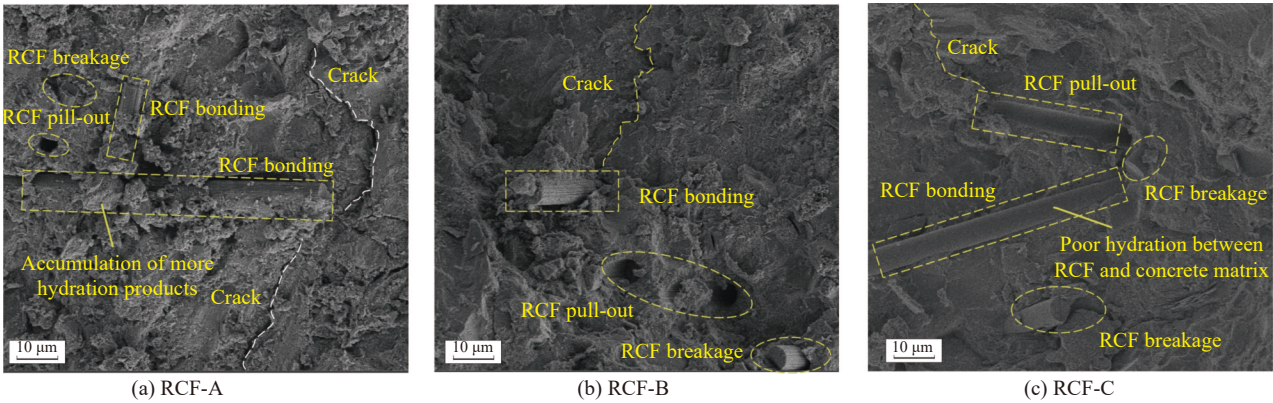


图 12 RCFC 微观形态

Fig. 12 Microstructures of RCFC

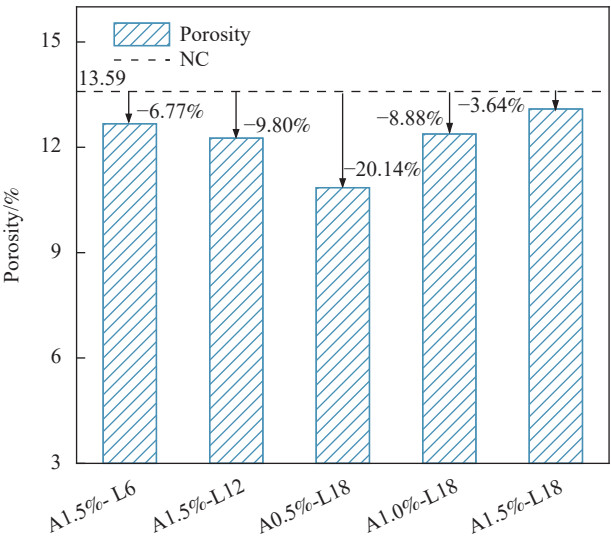


图 13 RCF-A 试件孔隙率

Fig. 13 Porosity of part samples of RCF-A

度的 RCF 对于提高 RCFC 的致密性更佳。进一步结合弯曲强度的结果分析可知，低孔隙率 RCFC 并不一定具有更高的弯曲强度。这是由于 RCFC 弯曲强度由基体强度和纤维黏结强度两部分构成，尽管低孔隙率有助于基体强度的提升，但纤维黏结强度还受纤维微观形貌、掺量和长度影响。

根据纤维混凝土复合材料理论<sup>[10, 44-45]</sup>，纤维混凝土弯曲强度可通过基体强度和黏结强度进行计算，具体如下式所示：

$$f_t = f_b (1 - V_f) + \alpha \tau V_f \frac{l_f}{d_f} \quad (4)$$

式中： $f_t$ 为弯曲强度预测值； $f_b$ 为基准组弯曲强度 (MPa)，通过实测获得； $V_f$ 为体积掺量； $\alpha$ 为纤维分散系数， $\tau$ 为纤维-基体平均黏结应力，可将二者整体作为 RCF 黏结系数，由于尚无准确的试验标定，此系数通过拟合获得； $l_f$ 为 RCF 长度

(mm)； $d_f$ 为 RCF 直径 (mm)。

结合本文研究结果发现，上述公式未考虑到掺入 RCF 孔隙率的变化对弯曲性能的影响。因此本文提出使用多参数耦合的指数函数形式来表示孔隙率对弯曲强度的提升，除此之外还考虑到 RCF 质量分数的换算及损失和引入常数项，具体函数形式如下：

$$f_t = f_b (1 - k V_m) + \alpha \tau k V_m \frac{l_f}{d_f} + \beta e^{-2\left(\frac{\omega - \omega_m}{\beta}\right)^2} + \gamma \quad (5)$$

式中： $V_m$ 为质量掺量； $k$ 为掺量转换系数； $\omega$ 为 MIP 测试得到的孔隙率， $\omega_m$ 为最小孔隙率，本文取 10.85； $\beta$ 为孔隙率影响因子； $\gamma$ 为增强因子。

经拟合确定相关的参数取值并获得了预测值，结果如表 3 所示，拟合优度为 0.983，拟合结果较好。但需要指出的是由于样本较少，预测公式仍需进一步验证优化。

### 3 结论

通过 20 组回收碳纤维混凝土 (RCFC) 四点弯曲试验和部分组别的 SEM、压汞法 (MIP) 测试，分析了 RCFC 的破坏形态、荷载-挠度曲线、弯曲强度，开展了弯曲韧性评价并基于孔隙率提出了弯曲强度预测公式，得出以下结论，可为回收碳纤维 (RCF) 的绿色回收利用和经济环保 RCFC 制备提供参考，为 RCFC 推广和相关规范编制提供数据支撑。

(1) 生产线废丝直接切割和热处理后切割等回收方式获得的 RCF 具有不同的表现形貌，表面粗糙且存在沟槽的 RCF 对弯曲性能提升更好。掺入 RCF 可改善试件破坏形态，延缓破坏过程，且荷载-挠度曲线应变硬化段更明显，下降段更加平缓。随 RCF 的掺入，RCFC 弯曲强度均得到提升，RCF

表 3 参数拟合结果及 RCFC 弯曲强度预测情况

Table 3 Parameter fitting results and flexural strength prediction of RCFC

Parameter fitting results			
Conversion coefficient of dosage $k$	Adhesion coefficient of RCF $\alpha\tau$	Influence factor of porosity $\beta$	Enhancement factor $\gamma$
1.3078	84.7983	0.5816	0.9273
Measured and predicted values of bending strength			
No.	Porosity/%	Measured value/MPa	Predicted value/MPa
RCF-A1.5%- L 6	12.67	6.30	6.27
RCF-A1.5%-L12	12.26	6.26	6.32
RCF-A0.5%-L18	10.85	6.92	6.92
RCF-A1.0%-L18	12.38	6.35	6.35
RCF-A1.5%-L18	13.09	6.40	6.37

形态对弯曲强度的影响明显，RCF-A、RCF-B、RCF-C 试件最大增幅分别为 31.4%、38.67%、16.75%。受 RCF 形态影响，随 RCF 掺量增加，RCF-A、RCF-B 试件弯曲强度先降低后增加，RCF-C 试件弯曲强度则逐渐下降。3 种 RCFC 弯曲强度均随 RCF 长度的增大先降低后增大；

(2) RCF-A 弯曲韧性指数最高，当掺量 1.5wt% 长度 12 mm 时弯曲韧性指数最高， $I_{20}$  为 14.19，RCF-B 和 RCF-C 试件的韧性指数相近。随着 RCF 掺量的增加， $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{20}$  逐渐增加；随着 RCF 长度的增加， $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{20}$  有先上升后下降的趋势；

(3) RCF 表面形貌对于等效弯曲强度和弯曲韧性比的影响较大，RCF-C 试件等效弯曲强度和弯曲韧性比较低，对于 RCF-A 和 RCF-B 时，推荐 RCF 长度为 12 mm 掺量为 1.5wt%。RCF-A1.5%-L12 的等效弯曲强度和弯曲韧性比均最高，为 2.98 MPa 和 0.64；

(4) 掺入 RCF 后可起到阻碍微裂缝发展的作用，具有竖向凹槽的 RCF 表面有利于水化产物生成，进而提高 RCF-基体黏结力；RCF 试件孔隙率均低于基准组，其中最小孔隙率为 10.85%，较基准组下降了 20.14%；RCFC 孔隙率随 RCF 掺量增加而增加，随 RCF 长度的增加而先降低后增加；

(5) 提出的初裂点确定方法明确简单，可避免人为因素影响，可适用于相近试验；提出的 RCFC 弯曲强度预测公式考虑了 RCF 掺量、长度和孔隙率的影响，拟合优度达 0.983，基于该公式可评估 RCFC 弯曲强度，为相关研究提供参考。

参考文献：

[ 1 ] SUN Z, LUO Y, CHEN C, et al. Mechanical enhancement of carbon fiber-reinforced polymers: From interfacial regulating strategies to advanced processing technologies[J]. *Pro-*

*gress in Materials Science*, 2024, 142: 101221.

[ 2 ] 杨强, 刘洪新, 何端鹏, 等. 高导热沥青基碳纤维复合材料在航天器中的应用现状及展望 [J]. *材料导报*, 2024, 38(1): 216-223.

YANG Qiang, LIU Hongxin, HE Duanpeng, et al. Application status and prospect of high thermal conductivity pitch-based carbon fiber composites in spacecraft[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(1): 216-223(in Chinese).

[ 3 ] 李成良, 杨超, 倪爱清, 等. 复合材料在大型风电叶片上的应用与发展 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3): 1274-1284.

LI Chengliang, YANG Chao, NI Aiqing, et al. Application and development of composite materials in large-scale wind turbine blade[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(3): 1274-1284(in Chinese).

[ 4 ] 肖守讷, 江兰馨, 蒋维, 等. 复合材料在轨道交通车辆中的应用与展望 [J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(1): 154-176.

XIAO Shouna, JIANG Lanxin, JIANG Wei, et al. Application and prospect of composite materials in rail transit vehicles[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(1): 154-176(in Chinese).

[ 5 ] 吴杭姿, 许国文, 杨燕, 等. 碳纤维增强复合材料土木工程应用新进展 [J]. *建筑结构*, 2023, 53(S1): 1548-1555.

WU Hangzi, XU Guowen, YANG Yan, et al. Review on CFRP applications in civil engineering[J]. *Building Structure*, 2023, 53(S1): 1548-1555(in Chinese).

[ 6 ] MERLI R, PREZIOSI M, ACAMPORA A, et al. Recycled fibers in reinforced concrete: A systematic literature review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 248: 119207.

[ 7 ] RADEMACKER T. Challenges in CFRP recycling[R]. Berlin: Breaking & Sifting-Expert Exchange on the End-of-life of Wind Turbines, 2018: 24-25.

[ 8 ] 张少辉, 王艳, 牛荻涛. 废旧纤维在水泥基材料中的应用研究进展 [J]. *材料导报*, 2020, 34(23): 23042-23050.

ZHANG Shaohui, WANG Yan, NIU Ditao. Research progress of the application of waste fiber in cement-based materials[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(23): 23042-23050(in Chinese).

[ 9 ] LEFEUVRE A, GARNIER S, JACQUEMIN L, et al. Anticipat-



- ing in-use stocks of carbon fiber reinforced polymers and related waste flows generated by the commercial aeronautical sector until 2050[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 125: 264-272.
- [10] ZHAO C, WANG Z, ZHU Z, et al. Research on different types of fiber reinforced concrete in recent years: An overview[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 365: 130075.
- [11] GUO H, JIANG L, TAO J, et al. Influence of a hybrid combination of steel and polypropylene fibers on concrete toughness[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 275: 122132.
- [12] MUTHUKUMARANA T V, ARACHCHI M A V H M, SOMARATHNA H M C C, et al. A review on the variation of mechanical properties of carbon fibre-reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 366: 130173.
- [13] 王春生, 张洋, 段兰. 共聚甲醛纤维超高性能水泥基复合材料抗弯性能试验 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(1): 373-382.
- WANG Chunsheng, ZHANG Yang, DUAN Lan. Flexural performance of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composite material doped with copolymer formaldehyde fiber[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(1): 373-382(in Chinese).
- [14] CHEN L, CHEN Z, XIE Z, et al. Recent developments on natural fiber concrete: A review of properties, sustainability, applications, barriers, and opportunities[J]. *Developments in the Built Environment*, 2023, 16: 100255.
- [15] 陈聪聪, 吴泽媚, 胡翔, 等. 钢纤维形状和养护制度对超高性能混凝土强度及韧性的影响 [J]. 材料导报, 2024, 38(15): 23030088.
- CHEN Congcong, WU Zemei, HU Xiang, et al. Influence of steel fiber shape and curing system on strength and toughness of UHPC[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(15): 23030088(in Chinese).
- [16] 苏骏, 钱维民. 超低温作用对超高韧性水泥基复合材料抗弯性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2844-2854.
- SU Jun, QIAN Weimin. Effect of ultra-low temperature on flexural behavior of ultra-high toughness cementitious composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(6): 2844-2854(in Chinese).
- [17] 孟博旭, 许金余, 彭光. 纳米碳纤维增强混凝土抗冻性能试验 [J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2458-2468.
- MENG Boxu, XU Jinyu, PENG Guang. Anti-freeze performance test of nano carbon fiber reinforced concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(10): 2458-2468(in Chinese).
- [18] 苏骏, 黄福, 王淞波, 等. 低温作用下改性骨料-钢纤维再生混凝土弯曲性能试验 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 884-897.
- SU Jun, HUANG Fu, WANG Songbo, et al. Experimental study on bending properties of modified aggregate-steel fibre recycled concrete under low temperature[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(2): 884-897(in Chinese).
- [19] 曾伟, 丁一宁. 结构型纤维对混凝土弯曲韧性和裂缝表面形态的影响 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(9): 2303-2313.
- ZENG Wei, DING Yining. Effect of macro fibers on flexural toughness and crack surface topography of concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(9): 2303-2313(in Chinese).
- [20] SAFIUDDIN M, YAKHLAF M, SOUDKI K A. Key mechanical properties and microstructure of carbon fibre reinforced self-consolidating concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 164: 477-488.
- [21] FANEC A G, SEGURA I, TORRENTS J M, et al. Development of conductive cementitious materials using recycled carbon fibres[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 92: 135-144.
- [22] ZHOU Z, ZHAO B, LONE U A, et al. Experimental study on mechanical properties of shredded prepreg carbon cloth waste fiber reinforced concrete[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 436: 140456.
- [23] DE SOUZA ABREU F, RIBEIRO C C, DA SILVA PINTO J D, et al. Influence of adding discontinuous and dispersed carbon fiber waste on concrete performance[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273: 122920.
- [24] AKBAR A, LIEW K M. Influence of elevated temperature on the microstructure and mechanical performance of cement composites reinforced with recycled carbon fibers[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 198: 108245.
- [25] WANG Y, ZHANG S, LUO D, et al. Effect of chemically modified recycled carbon fiber composite on the mechanical properties of cementitious mortar[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 173: 106853.
- [26] 王艳, 全志平, 张少辉. 回收碳纤维对高强水泥基材料力学性能与导电性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(5): 1332-1343.
- WANG Yan, QUAN Zhiping, ZHANG Shaohui. Effects of recycled carbon fibers on mechanical property and conductivity of high-strength cement-based material[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(5): 1332-1343(in Chinese).
- [27] 国家市场监督管理总局. 水泥混凝土和砂浆用合成纤维: GB/T 21120—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- State Administration for Market Regulation. Synthetic fibres for cement concrete and mortar: GB/T 21120—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018(in Chinese).

[28] BHANDARI M, NAM I W. A critical review on the application of recycled carbon fiber to concrete and cement composites[J]. *Recycling*, 2024, 9(1): 17.

[29] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法: CECS 13—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.  
China Engineering Construction Standardization Association. Standard test methods for fiber reinforced concrete: CECS 13—2009[S]. Beijing: China Planning Press, 2009(in Chinese).

[30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维混凝土应用技术规程: JGJ/T 221—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for application of fiber reinforced concrete: JGJ/T 221—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010(in Chinese).

[31] ASTM Internation. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading): ASTM C1018[S]. West Conshohocken: ASTM Internation, 1997.

[32] JSCE. Method of test for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete: JSCE-SF4[S]. Tokyo: Japan Concrete Institute, 1984.

[33] 陈维灯, 韩冬冬, 钟世云. 丁苯乳液和超高分子质量聚乙烯纤维对砂浆抗弯性能的影响[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(2): 94-98.  
CHEN Weideng, HAN Dongdong, ZHONG Shiyun. Influences of SBR latex and UHMW-PE fiber on bending properties of mortar[J]. *New Building Materials*, 2017, 44(2): 94-98(in Chinese).

[34] 鲍聪, 赵晓钦, 樊伟, 等. 再生 PET 塑料骨料砂浆的弯曲韧性及阻尼特性[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(4): 2343-2354.  
BAO Cong, ZHAO Xiaoqin, FAN Wei, et al. Flexural toughness and damping property of recycled PET plastic aggregate mortar[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(4): 2343-2354(in Chinese).

[35] 史占崇, 苏庆田, 邵长宇, 等. 粗骨料 UHPC 的基本力学性能及弯曲韧性评价方法[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(12): 86-97.  
SHI Zhanchong, SU Qingtian, SHAO Changyu, et al. Basic mechanical behavior and flexural toughness evaluation method of coarse aggregate UHPC[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(12): 86-97(in Chinese).

[36] 邓宗才, 薛会青. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(8): 1288-1294.  
DENG Zongcai, XUE Huiqing. Flexural toughness of hybrid fiber-reinforced ultra-high performance concrete[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(8): 1288-1294(in Chinese).

[37] 王艳, 高腾翔, 张少辉, 等. 不同形态回收碳纤维水泥基材料力学与导电性能[J]. *材料导报*, 2024, 38(9): 23010043.  
WANG Yan, GAO Tengxiang, ZHANG Shaohui, et al. Mechanical and electrical properties of recycling carbon fiber cement-based materials with different forms[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(9): 23010043(in Chinese).

[38] WAQAR A, KHAN M B, AFZAL M T, et al. Investigating the synergistic effects of carbon fiber and silica fume on concrete strength and eco-efficiency[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02967.

[39] LI H, ZHAO D, LIEBSCHER M, et al. An experimental and numerical study on the age depended bond-slip behavior between nano-silica modified carbon fibers and cementitious matrices[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 128: 104416.

[40] 丁聪, 任金明, 王永明, 等. 高延性水泥基复合材料用短切 PVA 纤维的长度优选研究[J]. *材料导报*, 2023, 37(13): 253-260.  
DING Cong, REN Jinming, WANG Yongming, et al. Study on PVA fiber length optimization for high ductility cementitious composites[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(13): 253-260(in Chinese).

[41] MIAH M J, PEI J, KIM H, et al. Role of fiber dosages and lengths on the mechanical strength, shrinkage, and pore structure of CO<sub>2</sub>-cured amorphous metallic-fiber-reinforced belite-rich cement composites[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 79: 107752.

[42] WANG T, XU J, BAI E, et al. Research on a sustainable concrete synergistic reinforced with carbon fiber and carbon nanofiber: Mechanical properties, durability and environmental evaluation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(90): 35366-35386.

[43] 刘美业, 龚思雨, 曹志远, 等. 钢-聚乙烯醇纤维混凝土力学性能与孔结构研究[J]. *工业建筑*, 2023, 53(S1): 623-628.  
LIU Meiye, GONG Siyu, CAO Zhiyuan, et al. Study on mechanical properties and pore structure of steel-polyvinyl alcohol fiber reinforced concrete[J]. *Industrial Construction*, 2023, 53(S1): 623-628(in Chinese).

[44] 李福海, 刘耕园, 刘梦辉, 等. 纤维协同效应下超高性能混凝土的弯曲性能[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(12): 1835-1844.  
LI Fuhai, LIU Gengyuan, LIU Menghui, et al. Flexural properties of ultra-high performance concrete under fiber synergistic effect[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2023, 51(12): 1835-1844(in Chinese).

[45] NAAMAN A E, REINHARDT H W. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response[J]. *Materials and Structures*, 2006, 39(5): 547-555.