

周成龙, 于腾, 张益盟, 等. 风机叶片绿色再生纤维钎增强水工混凝土力学性能研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 243-252. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.018

ZHOU Chenglong, YU Teng, ZHANG Yimeng, et al. Mechanical properties of green recycled fibre brazing reinforced hydraulic concrete for wind turbine blades [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 243-252. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.018

风机叶片绿色再生纤维钎增强水工混凝土力学性能研究

周成龙¹, 于腾^{1,2,3}, 张益盟¹, 曹鹏⁴

(1. 青海大学土木水利学院, 青海 西宁 810016; 2. 黄河上游生态保护与高质量发展实验室, 青海 西宁 810016; 3. 水利部江河源区水生态治理与保护重点实验室, 青海 西宁 810016; 4. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘要:【目的】为解决风机广泛使用及其容量不断迭代过程中叶片(玻璃纤维增强聚合物, GFRP)绿色回收和再生利用难题, 通过机械加工方法将退役风机叶片制备成纤维钎并验证其应用于水工混凝土中的可行性。【方法】采用宏观、微观和声发射等方法研究不同纤维钎长度、掺量对混凝土和易性、抗压强度、抗折强度和断裂损伤的影响。【结果】结果表明: 60 mm 长度 0.5% 体积掺量纤维钎使得混凝土抗压强度最大提升 21.35%, 而 80 mm 长度 1.5% 体积掺量使得抗压性能降低了 10.42%; 混凝土抗折强度获得了 21.93%~105.6% 不等的提升; 声发射(AE)信号显示随着纤维长度和掺量增加声发射事件数目显著增多, 且集中分布于跨中和裂纹附近, 同时断裂面不平整、裂缝表现的更为曲折。【结论】风机叶片再生纤维钎与水泥基体机械结合作用较好, 能够发挥有效的桥接作用, 应用于水工混凝土中的可行性较强, 可预见其规模化回收与利用具有较为广阔的发展前景。

关键词: 纤维增强混凝土; 绿色再生; 力学性能; 断裂损伤; 影响因素; 风机叶片; 混凝土; 声发射

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.018

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV431+.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)08-0243-10



Mechanical properties of green recycled fibre brazing reinforced hydraulic concrete for wind turbine blades

ZHOU Chenglong¹, YU Teng^{1,2,3}, ZHANG Yimeng¹, CAO Peng⁴

(1. College of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China; 2. Laboratory of Ecological Protection and High-Quality Development of the Upper Yellow River, Xining 810016, Qinghai, China; 3. Key Laboratory of Water Ecology Governance and Protection of the River Source Area, Ministry of Water Resources, Xining 810016, Qinghai, China; 4. School of Architecture and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

收稿日期: 2024-09-12; 修回日期: 2024-11-01; 录用日期: 2024-11-03; 网络出版日期: 2024-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52379127); 青海大学青年基金项目(42162024)

作者简介: 周成龙(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事纤维增强混凝土研究。E-mail: 1006089372@qq.com

通信作者: 于腾(1989—), 男, 实验师, 博士研究生, 主要从事水工混凝土新材料力学性能研究。E-mail: yu2017@qhu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: To address the challenges associated with the green recycling and reuse of blades (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) in the widespread use of wind turbines and their continuous capacity iteration processes, decommissioned wind turbine blades were processed into fiber rods through mechanical method, and their feasibility of application in hydraulic concrete was verified. Macroscopic, microscopic, and acoustic emission (AE) method were employed to investigate the effects of different fiber rod lengths and dosages on the workability, compressive strength, flexural strength, and fracture damage of concrete. The result indicate that a 60 mm-long fiber rod with a 0.5% volume dosage maximally enhanced the compressive strength of concrete by 21.35%, while an 80 mm-long fiber rod with a 1.5% volume dosage reduced the compressive performance by 10.42%. The flexural strength of concrete was enhanced by varying degrees ranging from 21.93% to 105.6%. AE signals revealed that the number of acoustic emission events significantly increased with the increase in fiber length and dosage, and these events were concentrated near the mid-span and cracks. Additionally, the fracture surfaces were uneven, and the cracks appeared more tortuous. Therefore, the mechanical bonding between the recycled fiber rods of wind turbine blades and the cement matrix is effective, exhibiting a strong bridging function. The feasibility of their application in hydraulic concrete is strong, and it is foreseeable that their large-scale recycling and utilization hold broad development prospects.

Keywords: fibre-reinforced concrete; green recycling; mechanical properties; fracture damage; influencing factors; fan blades; concrete; acoustic emission

0 引言

为应对气候变化,全球在积极发展可再生能源上做出了不懈努力。风电产业也不例外,全球风能理事会(GWEC)在第24次全球风能报告中提到,2023年累计风电装机容量已经超过1TW,而装机容量的翻倍可能就在十年左右^[1]。风力发电机所带来的绿色能源取代了部分广泛使用的化石燃料。“风光”背后若对风电设备进行全过程生命周期分析,情况则不够乐观。风电设备的使用寿命为20~25 a^[2]。对设备构成进行分析,多达80%的部件都可以回收,但是这并不包含风力涡轮机的三个叶片^[3],大部分风电厂商为了满足叶片的强度和生产成本的控制,绝大部分使用的是玻璃纤维增强聚合物(GFRP),这种材料价格低廉,重量轻,耐腐蚀性强,强度高^[4],这种优异的机械性能毫无疑问适合于风机叶片,它能使得风力发电效率更高^[5]。但这种材料具有不可生物降解性,绝大部分处理方式均为填埋和焚烧^[6],这种对环境有较大污染的处理方式与风电行业发展的绿色可持续发展理念背道而驰。如今一些欧洲国家已经开始完全禁止类似复合材料的填埋和焚烧,所以如何解决这些复合材料废物成为了亟待解决的重要问题^[7]。因此,需要一种合理的回收方式来对风机叶片复合材料进行处理。

水工混凝土多数为大体积混凝土,对强度要求往往不是很高。但是大体积混凝土很容易产生温度和收缩开裂^[8],混凝土在外部变形和内部相对变形的约束作用下会产生不均匀的干缩变形应力,并使得已有表面裂缝进一步扩展或导致混凝土表面收缩开裂^[9]。

大部分水工建筑物均浸没在水中,水中的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等有害离子会从裂缝侵蚀内部,从而加速内部混凝土腐蚀和钢筋的锈蚀从而破坏混凝土耐久性和安全性^[10]。而纤维增强混凝土能够有效改善混凝土的脆性,提高混凝土的抗拉强度,减少了收缩和裂缝的扩展^[11]。而将回收的纤维用于大体积混凝土中作为建筑材料是一种有前景的解决方案^[12],因为它可以实现大规模消耗,特别是一些难以回收易对环境造成危害的纤维^[13]。

纤维增强混凝土(FRC)的研究表明,金属和非金属纤维有助于提高混凝土的力学性能,特别是抗拉强度、抗拉延性和抗裂缝扩展性^[14]。近年来,为了最大限度地减少混凝土行业对环境的影响,人们将从工业废料中回收的各种纤维添加到混凝土中^[15]。例如从轮胎中回收的橡胶纤维、从合成聚合物中回收的塑料纤维、从农业和森林废弃物中回收的植物纤维^[16-17]。从减少碳排放的角度来看,将工业废料作为混凝土的添加剂进行再利用,扩大了资源的价值,同时证明了再生纤维在增强混凝土中使用的可行性。

然而,研究表明,将机械回收得到的GFRP废料粉末添加到混凝土中作为细骨料的部分替代,会导致混凝土的力学性能显著降低^[18]。CORREIA等^[19]进行了一项类似的研究,发现在体积上替换5%~20%的细骨料可使混凝土圆柱体的抗压强度降低高达47%。YAZDAN-BAKHSH等^[20-21]将GFRP纤维切割成短圆柱体(长径比约为1),然后用其部分或完全替代混凝土中的粗骨料。与将玻璃钢废料磨成粉末相比,将玻璃钢废料切割成这样的短圆筒所需的能量要少得多。并且当天然粗骨料完全被GFRP短圆柱体取

代时, 压缩强度和拉伸强度分别降低了 21% 和 35%。上述回收形态均对混凝土带来了不利影响, 因此需要一种合理的机械回收方式, 在耗能少的条件下将大块的 GFRP 制作成纤维钎的形式, 有望对混凝土的力学性能有积极影响。

1 风机叶片材料及回收方式

由玻璃纤维构成的风机叶片一般采用树脂灌注制造而成。据统计, 产生 1.5 MW 电能的小型风力发电机叶片主要构成为: 60.4% 玻璃纤维、32% 树脂粘合剂、2.3% 轻质木头和 5% 其他材料^[22]。这种材料是一种难以回收的热固性材料, 常用的回收方式包括三种: 机械回收、热分解和化学回收^[23]。

1.1 机械回收

机械回收是一种将大块复合材料通过切碎、劈裂和研磨等方式将复合材料加工成颗粒或纤维形态的过程^[24]。机械回收具有多种经济优势, 包括运营成本低、易实现规模化生产等。如今美国一家回收公司开发了玻璃钢回收系统, 可以规模化获得不同尺寸的纤维^[25]。这种回收方式对纤维机械性能影响较小, 所消耗的能量远小于热分解和机械回收, 并对环境影响较低。同时将得到的产物作为混凝土、沥青的增强材料, 为大量废弃玻璃钢提供了一种规模化回收方式^[26]。

1.2 热分解

热解技术是指将复合材料置于无氧高温条件下回收玻璃纤维, 将聚合物基质(环氧树脂、聚酯等)分解成更小的分子, 从而使得聚合物基质和纤维分离^[27]。玻璃钢热解表明在 500 °C 产生了 67.4 wt% (wt% 为重量百分比) 的固体残留物、31.3 wt% 的油类物质、1.2 wt% 的气体。热解得到的纤维仅仅保留了 50% 的原始纤维强度^[28]。并且建立热解生产线成本较高, 能量消耗较大, 产物机械性能下降较大, 有害产物生成难以控制, 使得这种回收方式通常难以产生令人满意的经济价值。

1.3 化学回收

化学回收包括溶剂分解、催化和电化学回收等, 溶剂分解主要用来分解树脂, 通常不需要高温条件, 分解速率通常取决于催化剂种类。无论如何都涉及化学溶剂的使用和环境条件的控制^[29]。COUSINS 等^[30]在标准温度和压力条件下用两种氯仿溶解使得玻璃纤维和树脂分离, 最终得到的纤维抗拉强度并没有下降, 刚度仅下降 15%。化学回收产物虽然机械性能较好, 但这种回收方式常常带来高昂的成本以及废弃物无法处理的新问题, 回收量往往较小, 并且常常在

实验室完成, 回收条件较为严苛。

1.4 小结

通过上述回收方式对比得到的结论是: 机械回收更具有经济和产业化价值; 热分解常常伴随着有害气体和产物机械性能大幅降低等不利影响; 化学回收成本高, 有害产物较多产量较低。因此试验采用了一种机械方式回收退役风机叶片, 并制成纤维钎添加到混凝土中, 旨在改善混凝土的脆性并提升混凝土的机械性能。

2 原材料及试验方法

2.1 玻璃纤维钎预处理

试验所使用的 40 mm ± 2 mm、60 mm ± 2 mm、80 mm ± 2 mm 三种长度纤维钎是从退役的风机叶片上剔除木质影响后通过精细加工得到的(见图 1)。目的是使得纤维比表面积增大, 能够与混凝土接触更加充分, 同时采用劈裂加工的方式使其表面更为粗糙, 这种回收方式比磨成粉末状态所消耗的能量更少, 加工较为方便, 较化学回收和热分解所产生的污染和成本更少。



图 1 回收的纤维钎形态

Fig. 1 Recycled fiber rod form

2.2 混凝土配合比

通过不同 GFRP 纤维钎长度和掺量验证其对混凝土性能的影响, 纤维钎掺量以混凝土体积分数来表征。制作 40 mm ± 2 mm、60 mm ± 2 mm、80 mm ± 2 mm 长度、宽度为 3 mm、厚度为 1~1.5 mm 的纤维钎, 分别在每种长度条件下, 按体积掺量 0.5%、1%、1.5% 掺入混凝土, 制作试验试块。分析同种体积掺量下不同长度纤维钎混凝土力学性能的变化来得到最佳掺量和最佳长度。纤维钎混凝土配合比如表 1 所列。表中组号 L0-0 表示没有添加纤维钎的对照组, L40-0.5 表示添加长度 40 mm 的纤维钎, 体积掺量为 0.5%, 其他组号以此类推, 试验仅以纤维钎长度和体积掺量作为变量。

其中, 对照组设计的抗压强度为 40 MPa, 坍落度 180 mm 左右。水泥为中国海螺 42.5 普通硅酸盐水泥, 水为中国盐城当地的自来水, 细骨料是细度模

表 1 退役风机叶片纤维钎混凝土配合比

Table 1 Concrete mix design for decommissioned fan blade fiber

组号	水泥 /kg·m ⁻³	砂 /kg·m ⁻³	碎石 /kg·m ⁻³	水 /kg·m ⁻³	外加剂 /kg·m ⁻³	纤维体积 掺量/%	退役风机叶片 纤维长度/mm
L0-0	539	610	996	255	2.695	0	0
L40-0.5	539	610	996	255	2.695	0.5	40
L40-1.0	539	610	996	255	2.695	1.0	40
L40-1.5	539	610	996	255	2.695	1.5	40
L60-0.5	539	610	996	255	2.695	0.5	60
L60-1.0	539	610	996	255	2.695	1.0	60
L60-1.5	539	610	996	255	2.695	1.5	60
L80-0.5	539	610	996	255	2.695	0.5	80
L80-1.0	539	610	996	255	2.695	1.0	80
L80-1.5	539	610	996	255	2.695	1.5	80

数为 2.8 的天然河砂, 其粒径范围为 0.075 ~ 4.75 mm。粗骨料为粒径在 5~20 mm 之间且级配良好的碎石, 同时采用减水效率为 25% 聚羧酸高效减水剂, 减水剂含量以水泥重量的 0.5% 来确定, 为了减少加入长纤维引起的和易性损失。

2.3 试样制备

试验中纤维混凝土采用 HJW-60 型单卧轴式混凝土搅拌机进行搅拌。先将水泥、砂子和石子称重后放入搅拌机干搅 1 min; 然后缓慢加入配制好的高效减水剂和水的均匀混合液搅拌 2 min; 最后均匀地加入纤维钎搅拌, 这个过程大约 3 min。将制备好的纤维混凝土放入边长 100 mm 的立方体模具和尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的小梁模具中并使用振动台对试样进行振荡密实。混凝土试件放置在常温自然环境下, 约放置 36 h, 当混凝土试件达到初凝强度以后, 进行拆模处理, 之后将混凝土试件放入标准恒温室内进行养护 28 d。每一根小梁在养护 28 d 之后切割 20 mm 深的预制裂缝^[31]。

2.4 测试方法

2.4.1 坍落度试验和抗压强度试验

坍落度试验是依据《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020) 来进行, 试验是在混凝土搅拌均匀之后立即进行的。坍落度值由三次度数取平均值来确定; 抗压强度试验采用的是边长为 100 mm 的立方体试件, 加载速率为 0.1 mm/min, 并在试块上下铺上一层细砂以受力均匀。最后以每组三个试样的平均值代表试样的有效抗压强度。

2.4.2 三点弯曲试验

为测得纤维钎混凝土的抗折强度, 通过每组三个 100 mm×100 mm×400 mm 且带有预制缺口的小梁进行三点弯曲试验, 试验装置包括微机控制电液伺服万能试验机、声发射设备、以及夹式应变传感器和线性位移计(见图 2), 所有的试验均在 0.05 mm/min 的加

载速度条件下完成的。

2.4.3 扫描电子显微镜观察

随机选取含有纤维钎混凝土粉碎的样品, 并在 60 °C 干燥箱中干燥。待样品完全干燥后, 随机选择一些进行 SEM 分析。使用 Nova Nano SEM 450 表征样品的微观结构。所有的样品都涂有金涂层以增强导电率^[32]。

3 结果讨论

3.1 和易性

试验测得不同纤维钎混凝土的和易性的结果如图 3 所示。纤维钎长度和体积掺量的增加会导致混凝土的坍落度下降, 这种纤维在混凝土中不易结团, 散开之后纤维的比表面积增加, 而纤维表面能吸收部分流动水份, 这会使得拌合物间的流动水减少, 导致混凝土流动性减弱。对比拌合后的普通混凝土和纤维钎混凝土, 发现掺入纤维会使得混凝土拌合物泌水现象减轻, 同时提高了混凝土黏聚性^[33]。这在 PAKTIAWAL 等^[34]的试验中也观察到了同样的现象, 但在长度为 8 cm 体积掺量为 1.5% 时对和易性影响太大, 可以借鉴其加大减水剂或适当增加水量的方法进行改善。

3.2 抗压性能

压缩试验得到的试块平均抗压强度如图 4 所示。相比于对照组, 当纤维长度为 40 mm 时随着纤维长度和体积掺量的增加, 抗压强度随之增大, 但长度为 60 mm 和 80 mm 时随着长度和体积掺量增加而减小, 长度 80 mm 甚至会低于素混凝土的抗压强度。并且 L60-0.5 对混凝土抗压性能提升最大为 21.35%, 在 L80-1.5 时不利影响最大, 此时抗压性能降低了 10.42%。可以解释的是, 较短的纤维钎使得相同体积掺量比表面积大, 吸附了部分游离水, 降低了混凝土的水灰比, 有利于提高混凝土抗压强度; 但长度过长会导致弱结合面显著增加, 因而能够明显的降低混

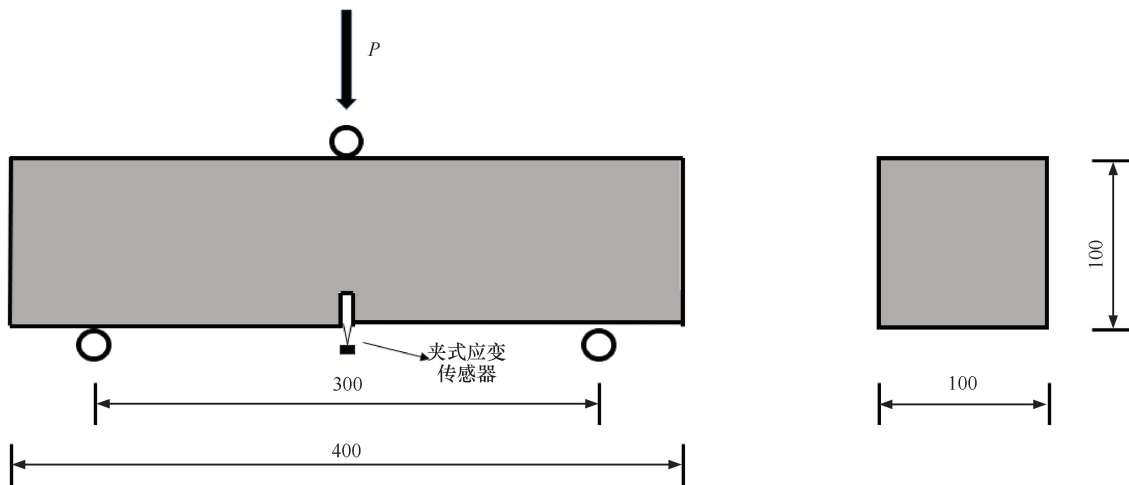
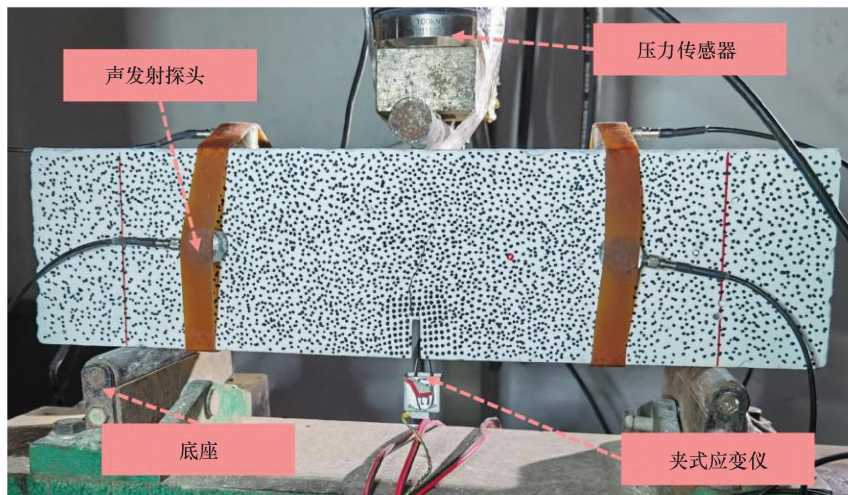


图2 三点弯曲试验装置(单位: mm)

Fig. 2 Three point bending test device (Unit: mm)

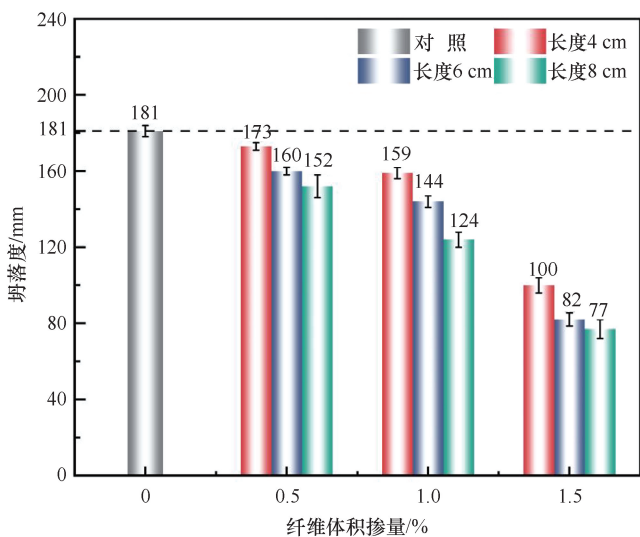


图3 不同纤维钎混凝土的和易性

Fig. 3 The workability of different fiber reinforced concrete

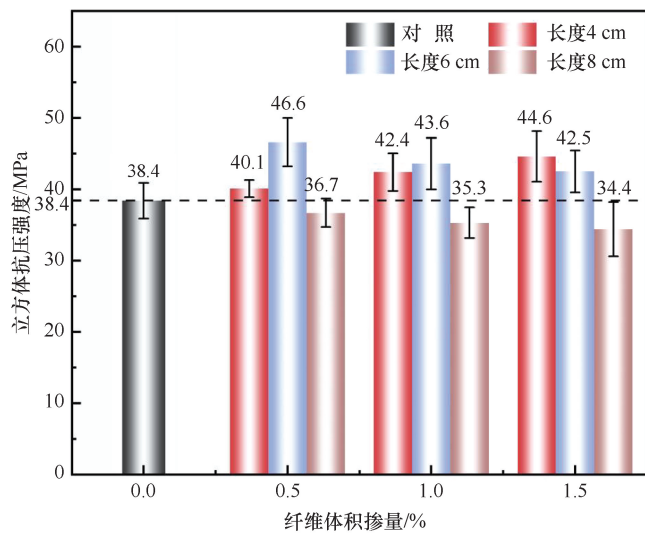


图4 试块的平均抗压强度

Fig. 4 Average compressive strength of the test block

混凝土的抗压强度^[35-36]。这与 SHI 等^[37-38]的纤维混凝土压缩试验结果相似, 纤维掺量低时形成了三维网状结构, 增强了混凝土的均匀性, 但只在纤维含量一定时对混凝土抗压强度有积极影响, 因而在制备纤维混凝土时需注意纤维体积掺量大小。

通过观察素混凝土和纤维钎混凝土抗压强度试验完成后的破坏形态, 素混凝土试件呈现出明显的倒锥形破坏, 试件表面的裂缝较纤维钎混凝土试件压碎后呈现的裂纹多。在受压破坏的过程中, 试件压碎时产生了如同爆裂一般的声响。当纤维钎掺入混凝土后, 在最佳体积掺量 0.5% 和最佳长度 60 mm 的条件下, 纤维钎混凝土的抗压试验表现尤为出色, 试件表面仅出现少量裂缝, 几乎保持了完整的形态。

结果表明, 将纤维钎掺入混凝土中, 对混凝土的变形和抗裂性能有积极影响。在进行抗压强度测试时, 混凝土试样外观上观察到的损伤可归因于在单向压缩下经历的横向膨胀和纵向压缩。达到极限荷载后, 承载能力丧失导致试样完全破坏。但是, 通过将纤维钎掺入混凝土中, 可以在这一过程中有效地连接混凝土中的孔隙, 提高其抗裂能力并延迟试样破坏。因此, 与普通混凝土相比, 掺入的纤维钎对混凝土的变形和抗裂性能有显著提升。

3.3 GFRP 纤维钎对混凝土抗折强度的影响

纤维钎混凝土小梁抗折强度按《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020) 中的抗弯强度公式计算。计算得到的纤维混凝土的抗折强度如图 5 所示, 可以看出纤维的掺入使得混凝土抗折强度获得了 21.93%~105.6% 不等的提升。这表明纤维能通过桥接作用显著改善混凝土的脆性和韧性。同时纤维的长度和掺量增加, 试件韧性也呈现逐步提高的趋势。其中 L80-1.5 组表现出最佳的抗折强度。

通过观察素混凝土和纤维钎混凝土抗折强度试验完成后的断面形态, 对比分析掺入纤维钎后对混凝土性能的影响(见图 6)。当素混凝土试件在接近断裂点时, 会迅速地发生断裂, 并伴随明显的脆性断裂声响。这种断裂方式导致试件的断裂面主要呈现为粗细骨料之间裂缝延伸, 断裂面形态较为平整规则。然而, 纤维钎混凝土试件在裂纹出现后并不会立即断裂。在试验机持续加载的过程中, 试件会呈现出一

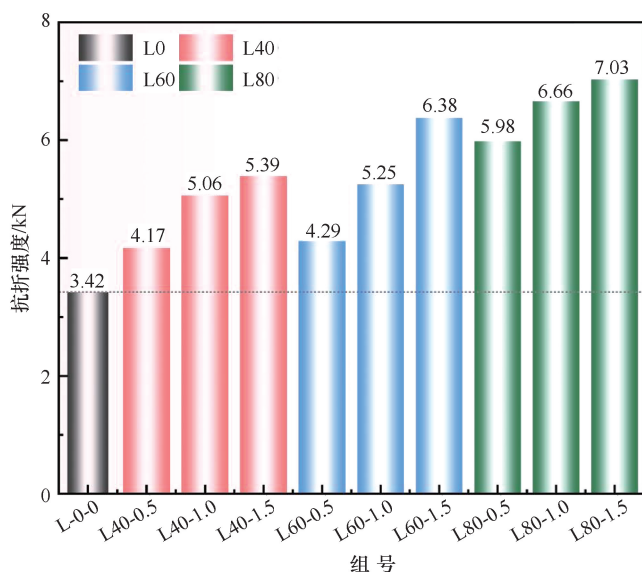


图 5 纤维混凝土的抗折强度

Fig. 5 Flexural strength of fiber-reinforced concrete

种缓慢的断裂过程, 这体现了其韧性特征。与素混凝土不同, 由于纤维的桥接作用, 纤维钎混凝土试件的断裂面更多地表现为裂缝沿着纤维/基体界面绕行, 裂缝发展过程更为曲折, 而断裂面则不平整, 这种现象在纤维长度和掺量均很高时表现更为明显。这种对比凸显了纤维钎混凝土在增强韧性和改善断裂性能方面的优势。试验结论比 XU 等的 GFRP 混合长度纤维混凝土弯曲强度提高 37.85% 大得多, 因此 GFRP 纤维形态设计特别重要。

3.4 声发射观测结果

图 7 给出了峰值荷载条件下的各组试块的声发射正面损伤分布情况。图 7 中点的数量代表声发射设备

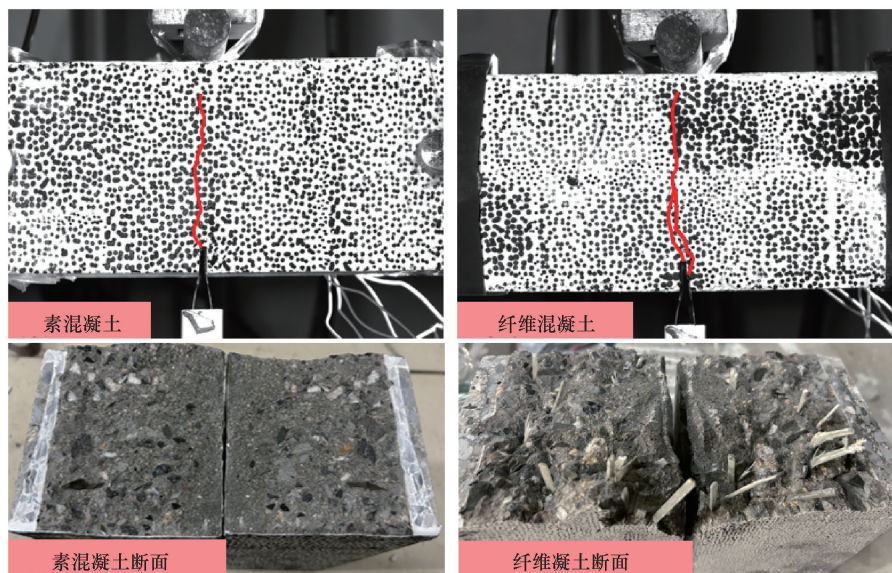


图 6 抗折破坏形态

Fig. 6 Flexural damage pattern

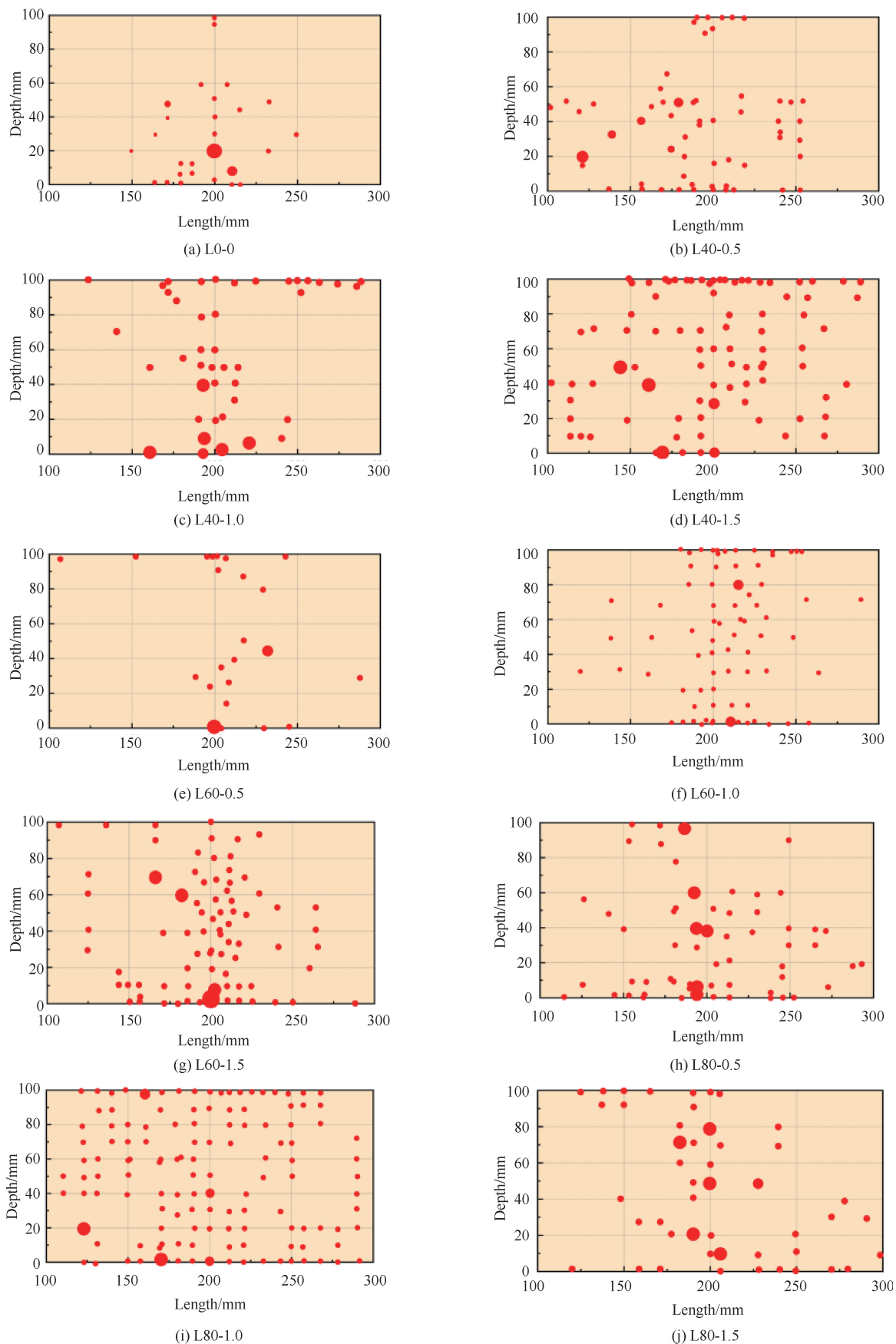


图7 AE正面损伤分布情况
Fig. 7 Distribution of AE frontal damage

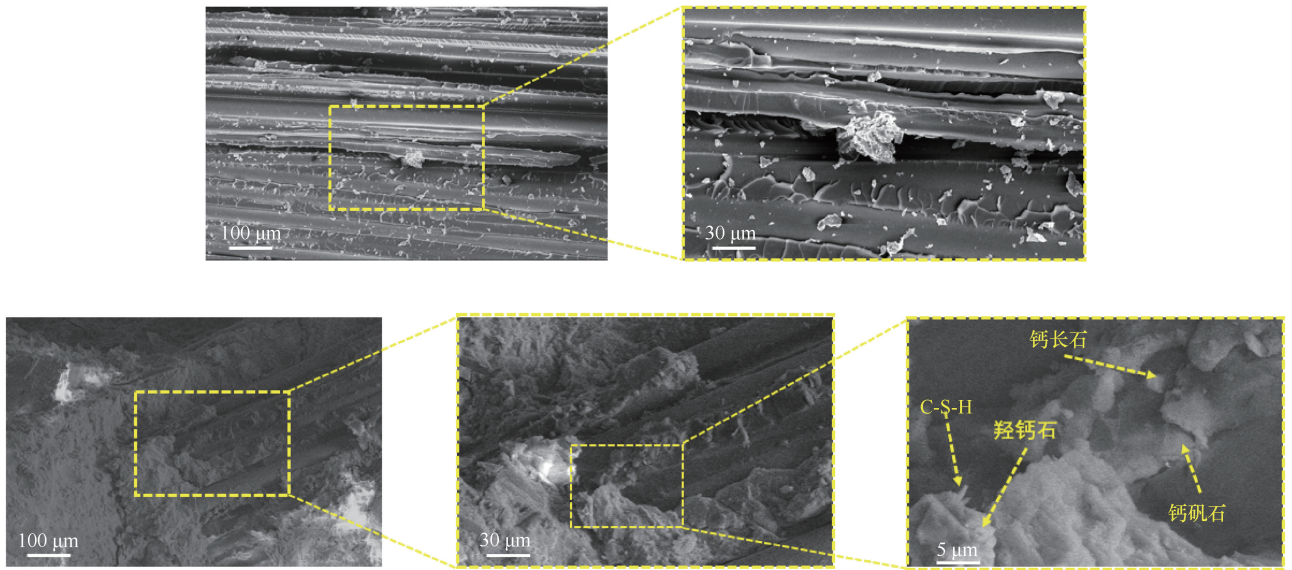


图8 纤维钎和纤维—砂浆界面过渡区

Fig. 8 Transition zone between fiber brazing and fiber mortar interface

采集到的次数,也就是内部损伤源的数量,而点的大小则代表振幅的大小,图7中给出的是试件跨中300 mm范围内的声发射采集情况。可以得出:素混凝土中声发射事件数目较少且较为集中,而随着纤维长度和掺量增加,声发射事件数显著增多,并且范围变得更为随机和广泛,同时在长纤维混凝土中,损伤源振幅显著增加。以L60-1.5为例,微裂纹不仅集中分布在宏观裂缝和纤维附近,在其他部位也较为丰富。因此可以得出的是纤维的引入改变了素混凝土的破坏模式,由突然、单点破坏转变成为纤维增强混凝土的多点破坏^[35]。同时结论与上述图6断面情况较为吻合。声发射观测结果与XU等^[36]混凝土声发射试验结果相似,损伤区主要分布在断裂路径和加载点之间。

3.5 微观机理

图8为扫描电子显微镜(SEM)观察得到的纤维钎表面以及和纤维接触的水泥水化情况。可以看出采用劈裂加工的方式使原本光滑的玻璃纤维聚合物表面变得较为粗糙,相邻纤维被环氧树脂胶结非常致密,纤维纵向分布排列整齐,较好的展现了纤维钎自身优异的机械性能。

通过SEM观察,纤维钎混凝土界面过渡区存在一定数量的孔隙,但纤维钎能有效地将混凝土中的骨料与凝胶、骨料与骨料紧密相连,纤维的这种桥接作用能抑制混凝土内部孔隙扩大的趋势。同时,水泥水化产生的C-S-H凝胶和钙矾石会紧密地包裹住纤维钎,加强了纤维的桥接作用。未发现明显化学反应,

因此纤维与水泥基体之间主要为机械结合。

SEM观察结果与宏观试验中纤维钎加入使得纤维混凝土抗压强度和抗折强度显著提高结论吻合,抗折试验断面可以看出混凝土内部的纤维钎分散均匀,不会因为纤维体积掺量过少而没有很好的桥接作用。可以得出:纤维钎的均匀分布和良好的机械结合情况使得纤维钎能够有效传递应力,增强混凝土的整体强度。而水化物的存在进一步增强了纤维与混凝土的接合力,从而提高了材料的韧性和强度。

4 结论

试验使用机械回收方法将退役的风机叶片玻璃纤维聚合物加工成纤维钎并应用于水工混凝土中,通过和易性、抗压,缺口梁抗折试验进行可行性分析,得到如下结论。

(1)纤维钎长度和体积掺量的增加会导致混凝土的坍落度明显下降。纤维钎长度为40 mm时,随着纤维长度和体积掺量的增加,抗压强度随之增大,但长度为60 mm和80 mm时则表现相反。L60-0.5对混凝土抗压性能提升最大为21.35%,L80-1.5混凝土抗压性能降低了10.42%。

(2)纤维钎的掺入使得混凝土抗折强度提升了21.93%~105.6%。其中L80-1.5表现出最佳的抗折强度。随着纤维长度和掺量增加,声发射事件数显著增多,集中分布在加载点之间,并且范围变得更为随机和广泛。通过抗折破坏断面可以看出,纤维钎的桥接作用使得裂缝发展曲折。

(3)扫描电子显微镜观察到单个纤维钎之间结合

致密, 这种纵向致密分布的排列给纤维钎带来了优异的机械性能。同时观察纤维-砂浆界面过渡区中水泥水化产生的 C-S-H 凝胶和钙矾石会紧密地包裹住纤维钎, 通过机械结合方式加强了纤维的连接作用, 使得混凝土的力学性能得到了显著的提升。

参考文献 (References):

[1] Global Wind Energy Council. GWEC Global Wind Report 2023[R/OL]. Brussels, Belgium; Global Wind Energy Council, 2023. <https://gwec.net/global-wind-report-2023/>.

[2] 严新荣, 张宁宁, 马奎超, 等. 我国海上风电发展现状与趋势综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 1-12.
YAN Xinrong, ZHANG Ningning, MA Kuichao, et al. Overview of current situation and trend of offshore wind power development in China[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 1-12.

[3] BATURKIN D, HISSEINE O A, MASMOUDI R, et al. Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 174: 105807. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105807.

[4] 马文静, 张宇彤, 杨春振, 等. 大宗风电退役风机叶片资源化回收利用技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(10): 17-26. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CN23053101.
MA Wenjing, ZHANG Yutong, YANG Chunzhen, et al. Progress of resourceful recycling technology of retired wind turbine blades for bulk wind power[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(10): 17-26. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CN23053101.

[5] 许淳瑶, 葛立超, 冯红翠, 等. 风力发电现状及叶片组成与回收利用综述[J/OL]. 热力发电, 2022, 51(9): 29-41. DOI: 10.19666/j.rld.202204082.
XU Chunyao, GE Lichao, FENG Hongcui, et al. An overview of the current status of wind power generation and the composition and recycling of blades[J/OL]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 29-41. DOI: 10.19666/j.rld.202204082.

[6] TITTARELLI F, MORICONI G. Use of GRP industrial by-products in cement based composites[J/OL]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(3): 219-225. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.005.

[7] 余丹, 孙永斌, 杨琦, 等. 风机叶片回收技术现状与展望[J/OL]. 南方能源建设, 2023, 10(4): 113-121. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.011.
YU Dan, SUN Yongbin, YANG Qi, et al. Status and prospect of wind turbine blade recycling technology[J/OL]. Southern Energy Construction, 2023, 10(4): 113-121. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.011.

[8] 张聪慧. 南山水库面板堆石坝混凝土面板防裂技术[J]. 西北水电, 2012(3): 34-38.
ZHANG Conghui. Anti-cracking technology for concrete panels of Nanshan Reservoir panel rockfill dam[J]. Northwest Hydropower, 2012(3): 34-38.

[9] 王振波, 周潮, 王家赫, 等. 高延性水泥基材料(ECC)开裂后渗透性研究综述[J]. 水利发展研究, 2024, 24(6): 59-64.

WANG Zhenbo, ZHOU Chao, WANG Jiahe, et al. Summary of research on the permeability of Engineered Cementitious Composites (ECC) after cracking[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(6): 59-64.

[10] 周茗如, 樊乐涛, 于景龙, 等. 基于平板法纤维混凝土早期抗裂性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(8): 2590-2595.
ZHOU Mingru, FAN Le Tao, YU Jinglong, et al. Experimental study on early cracking resistance of fibre concrete based on flat slab method[J]. Silicate Bulletin, 2016, 35(8): 2590-2595.

[11] 张紫键, 姚占全, 马快乐. 钢纤维类型对玄武岩纤维混凝土力学性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(6): 598-604.
ZHANG Zijian, YAO Zhanquan, MA Kuaile. Influence of steel fiber type on mechanical properties of basalt fiber concrete[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(6): 598-604.

[12] ZHANG W, YU H, YIN B, et al. Sustainable transformation of end-of-life wind turbine blades: Advancing clean energy solutions in civil engineering through recycling and upcycling[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 426: 139184.

[13] SPINI F, BETTINI P. End-of-Life wind turbine blades; Review on recycling strategies[J/OL]. Composites Part B: Engineering, 2024, 275: 111290. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111290.

[14] HUANG B T, ZHU J X, WENG K F, et al. Ultra-high-strength engineered/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC): Material design and effect of fiber hybridization[J/OL]. Cement and Concrete Composites, 2022, 129: 104464. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104464.

[15] XU G T, LIU M J, XIANG Y, et al. Valorization of macro fibers recycled from decommissioned turbine blades as discrete reinforcement in concrete[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2022, 379: 134550. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134550.

[16] CAGGIANO A, FOLINO P, LIMA C, et al. On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers[J/OL]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 286-295. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.160.

[17] MERLI R, PREZIOSI M, ACAMPORA A, et al. Recycled fibers in reinforced concrete; A systematic literature review[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119207. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119207.

[18] ASOKAN P, OSMANI M, PRICE A D F. Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(9): 821-829. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.12.004.

[19] CORREIA J R, ALMEIDA N M, FIGUEIRA J R. Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(15): 1745-1753. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.05.018.

[20] YAZDAN-BAKHS H A, C. BANK L, CHEN C. Use of recycled FRP reinforcing bar in concrete as coarse aggregate and its impact on the mechanical properties of concrete[J/OL]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 278-284. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.

2016. 05. 165.
- [21] YAZDAN-BAKHSI A, BANK L C, RIEDER K A, et al. Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades [J/OL]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 128: 11-21. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.005.
- [22] LIU P, BARLOW C Y. The environmental impact of wind turbine blades [J/OL]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 139: 012032. DOI: 10.1088/1757-899X/139/1/012032.
- [23] 许淳瑶, 葛立超, 冯红翠, 等. 风力发电现状及叶片组成与回收利用综述 [J/OL]. *热力发电*, 2022, 51(9): 29-41. DOI: 10.19666/j.rfd.202204082.
- Xu Chunyao, Ge Lichao, Feng Hongcui, et al. An overview of the current status of wind power generation and the composition and recycling of blades [J/OL]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(9): 29-41. DOI: 10.19666/j.rfd.202204082.
- [24] FONTE R, XYDIS G. Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 287: 112269. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112269.
- [25] RAHIMIZADEH A, KALMAN J, FAYAZBAKHSI K, et al. Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in Additive Manufacturing [J/OL]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 175: 107101. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107101.
- [26] ZHOU K, LEI D, CHUN P jo, et al. Evaluation of BFRP strengthening and repairing effects on concrete beams using DIC and YOLO-v5 object detection algorithm [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134594. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134594.
- [27] RAHIMIZADEH A, KALMAN J, FAYAZBAKHSI K, et al. Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in additive manufacturing [J/OL]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 175: 107101. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107101.
- [28] CUNLIFFE A M, JONES N, WILLIAMS P T. Pyrolysis of composite plastic waste [J/OL]. *Environmental Technology*, 2003, 24(5): 653-663. DOI: 10.1080/09593330309385599.
- [29] KUMAR R, SADEGHI K, JANG J, et al. Mechanical, chemical, and bio-recycling of biodegradable plastics: A review [J/OL]. *Science of The Total Environment*, 2023, 882: 163446. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163446.
- [30] COUSINS D S, SUZUKI Y, MURRAY R E, et al. Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades [J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 1252-1263. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.286.
- [31] REN D, LIU B, CHEN S, et al. Visualization of acoustic emission monitoring of fracture process zone evolution of mortar and concrete beams under three-point bending [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249: 118712. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118712.
- [32] BAHORIA B V, PARBAT D K, NAGARNAIK P B. XRD analysis of natural sand, quarry dust, waste plastic (LDPE) to be used as a fine aggregate in concrete [J/OL]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(1): 1432-1438. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.230.
- [33] LOKESH G, NANTHAKUMAR P, AISHWARYA N, et al. Experimental study of the effect of water reducing admixtures on concrete [J/OL]. *Materials Today: Proceedings*, 2023 [2024-09-11]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323027876>. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.05.163.
- [34] PAKTIAWAL A, ALAM M. Alkali-resistant glass fiber high strength concrete and its durability parameters [J/OL]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 47: 4758-4766. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.668.
- [35] WANG Y, HUANG H, ZENG J, et al. Axial compressive behavior of recycled ceramic coarse aggregate concrete-filled steel tubular columns [J/OL]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2023, 210: 108040. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108040.
- [36] XU X, JIN Z, YU Y, et al. Damage source and its evolution of ultra-high performance concrete monitoring by digital image correlation and acoustic emission technologies [J/OL]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 65: 105734. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105734.
- [37] SHI J, LU Y, ZHU R, et al. Experimental evaluation of fracture toughness of basalt macro fiber reinforced high performance lightweight aggregate concrete [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134638. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134638.
- [38] JIANGJIANG Y, GUODONG L, ZHENG YI R, et al. Mixed-mode I-II mesoscale fracture behavior of concrete determined by the realistic aggregate numerical model [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2019, 226: 802-817. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.231.

(责任编辑 王海锋)