

引用格式: 何小军, 高承基, 何怡媚, 等. 纳米粒子-长-短纤维协同改性碱激发材料的弯曲韧性及多缝开裂机理研究[J]. 中国材料进展, 2025, 44(12): 1120-1127.

HE X J, GAO C J, HE Y M, *et al.* Study on Bending Toughness and Multi-Crack Cracking Mechanism of Nano-Particle and Long-Short Fiber Co-Modified Alkali-Activated Material[J]. Materials China, 2025, 44(12): 1120-1127.

纳米粒子-长-短纤维协同改性碱激发材料的 弯曲韧性及多缝开裂机理研究

何小军¹, 高承基², 何怡媚², 李黎²

(1. 陕西省宝鸡峡工程局, 陕西 宝鸡 721001)

(2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为提高灌区渠道修复材料的抗变形、抗裂和抗渗性能, 研究了纳米碳酸钙与聚丙烯(PP)纤维混杂对碱激发材料弯曲韧性、裂缝演变及微观机理的影响。结果表明: 纳米碳酸钙(质量分数为1%)与长-短PP纤维(0.4% 6 mm+0.8% 12 mm, 体积分数)混掺可显著提升弯曲韧性(较对照组提高42.9倍), 改性后碱激发材料达到荷载峰值后荷载下降速率减缓, 荷载达峰值前呈现挠曲硬化行为。裂缝演变和SEM微观分析表明, 纳米碳酸钙通过增强纤维-基体界面化学粘结与物理摩擦, 结合纤维桥联与拔出机制, 显著延长裂缝扩展路径、增加了裂缝数量, 提高能量耗散, 从而改善弯曲韧性。混杂效应分析显示, 纤维因子为387.10且纳米碳酸钙掺量为1%时, 正混杂效应最显著($S=0.596$), 验证了多尺度协同增韧机制的有效性。

关键词: 碱激发材料; 纳米碳酸钙; PP纤维; 弯曲韧性; 多缝开裂; 混杂效应

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2025)12-1120-08

Study on Bending Toughness and Multi-Crack Cracking Mechanism of Nano-Particle and Long-Short Fiber Co-Modified Alkali-Activated Material

HE Xiaojun¹, GAO Chengji², HE Yimei², LI Li²

(1. Baoji Gorge Engineering Bureau, Baoji 721001, China)

(2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To enhance the deformation, crack resistance and impermeability of channel repair materials in irrigation districts, the hybridization effects of nano CaCO_3 and polypropylene (PP) fibers on the flexural toughness, crack evolution and micro-mechanism of alkali-activated material were investigated. The results show that the hybridization of 1wt% nano CaCO_3 and 0.4vol% 6 mm+0.8vol% 12 mm long-short PP fibers can significantly improve the flexural toughness (42.9 times higher than the control group). The post-peak load drop rate is slowed down, and the flexural hardening behavior is present before the peak. Crack evolution and SEM microstructure analysis indicate that nano CaCO_3 significantly extends the crack propagation path, increases the number of cracks, and enhances energy dissipation by strengthening the chemical bonding and physical friction at the fiber-matrix interface, and combining the fiber bridging and pull-out mechanism, thereby improving the flexural toughness. The hybrid effect analysis shows that when the fibro factor is 387.10 and the nano CaCO_3 dosage is 1wt%, the positive hybrid effect is the most significant ($S=0.596$), verifying the effectiveness of the multi-scale synergistic toughening mechanism.

Key words: alkali-activated material; nano CaCO_3 ; PP fiber; bending toughness; multi-crack opening; hybrid effect

收稿日期: 2025-03-24 修回日期: 2025-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52109168)

第一作者: 何小军, 男, 1974年生, 高级工程师

通讯作者: 李黎, 男, 1986年生, 副教授,

Email: drlili@nwafu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202503025

1 前言

近年来, 随着我国“双碳战略”的提出, 在水利、土

本工程领域利用固体废弃物制备建筑材料成为研究热点^[1-4]。其中,碱激发胶凝材料由碱性激发剂催化铝质原料(如粉煤灰、矿渣等)反应生成,具有强度高、耐久性好、生产能耗低等优势,被视为替代传统硅酸盐水泥的绿色材料^[4,5],尤其适用于水工结构的修复与加固^[6]。然而,碱激发材料仍存在脆性显著、抗拉性能不足的问题,在灌区渠道等对变形和抗裂要求较高的环境易出现单缝特征的脆性破坏,难以满足长期服役需求^[7]。因此,开发具有高韧性与多缝开裂特征的碱激发修复材料具有重要工程意义。

聚丙烯(PP)纤维因其高延性和低成本,常被用于改善水泥基材料的韧性。研究表明,PP纤维通过桥联裂缝和拔出耗能机制,可有效延缓裂缝扩展并提升残余承载力^[8]。李黎等^[7]进一步指出,添加体积分数 1.8%的 PP 纤维可以使碱激发材料的折压比提高 5 倍,裂缝分形维数增大了 29%。然而,单一纤维的阻裂能力有限,且易因纤维结团导致材料缺陷。与此同时,纳米碳酸钙作为纳米级改性剂,可通过填充效应和界面强化作用提升基体密实度及与纤维粘结性能^[9]。纳米碳酸钙增强硅酸盐水泥混凝土材料的研究已较为充分,涵盖了工作性^[10]、强度^[11]、抗冻性^[12]、抗渗性^[10]、耐磨性^[13]、耐疲劳性能^[14]等方面,但关于纳米碳酸钙改性碱激发材料的研究却较少。仅有 Assaedi 等^[15]的研究发现纳米碳酸钙可显著增强碱激发材料的抗弯强度,但其与纤维协同作用下的多缝开裂机制尚未明确。

目前,针对碱激发砂浆的多尺度改性研究仍存在以下不足:① 纳米碳酸钙与 PP 纤维的协同效应对裂缝演变规律的影响尚未系统揭示;② 微观尺度下界面强化与多缝协同耗能的关联机制缺乏深入分析;③ 混杂纤维与纳米粒子的最佳配比及其与弯曲韧性的定量关系仍需优化。基于此,本文通过混杂不同长度 PP 纤维(6 mm 与

12 mm)与纳米碳酸钙(0%~2%,质量分数),研究协同改性对碱激发修复砂浆弯曲韧性、裂缝形貌及微观结构的影响,重点阐明多缝开裂行为与界面强化机理的关联,以期灌区渠道修复提供高韧性、多缝协同耗能的绿色材料。

2 实验

2.1 原材料

纳米碳酸钙:上海麦克林生化科技有限公司生产,粒径为 50 nm。氢氧化钠:广东光华科技股份有限公司生产,相对表观密度为 2.13,NaOH 含量大于等于 96%。水:杨凌新华水务有限公司所生产的市政自来水。中砂:厦门艾思欧标准砂有限公司生产,粒度 0.5~1.0 mm。硅酸钠溶液:巩义市昌隆泡花碱厂生产,表观密度为 2.61 g/cm³,其中 Na₂O 和 SiO₂ 的质量分数分别为 9.0% 和 28.08%,模数为 3.22。粉煤灰:陕西渭河电厂生产,表观密度为 2.3 g/cm³。矿渣:西安德龙粉体工程材料有限公司生产的 S95 粒化高炉矿渣粉末,表观密度 2.8 g/cm³。硅灰:河南鼎诺净化材料有限公司生产,表观密度为 2.0 g/cm³。纤维:浙江史尉卡材料科技有限公司生产的 PP 纤维,长度选择 6 和 12 mm 两种,表观密度为 0.91 g/cm³,直径为 31 μm。

2.2 配合比

结合作者的前期研究^[7,16],确定本文实验水胶比为 0.40,粉煤灰、矿渣和硅灰的质量比为 7:1:2,砂胶比(砂的质量与粉煤灰、矿渣、硅灰 3 者质量之和的比值)为 0.2,碱激发剂(水玻璃)采用硅酸钠溶液与固体氢氧化钠复配,模数为 1.5。通过改变 PP 纤维体积掺量、纤维长度和纳米碳酸钙掺量,共设置了 19 个试验组,各组分的具体掺量如表 1 所示。

表 1 纳米碳酸钙-PP 纤维增强碱激发砂浆的配合比

Table 1 Mixture ratio of nano calcium carbonate-PP fiber reinforced alkali activated mortar (kg/m³)

No.	Slag	Fly ash	Silica fume	PP Fiber		Nano-CaCO ₃	Water glass	Water	Sand
				6 mm	12 mm				
0.40-6P0-12P0-N0(control group)	86.03	614.48	178.20	0.00	0.00	0.00	318.39	163.52	175.74
0.40-6P0-12P0.4-N0	85.68	614.48	177.49	0.00	3.64	0.00	317.11	162.86	175.53
0.40-6P0.4-12P0-N0	85.68	612.02	177.49	3.64	0.00	0.00	317.11	162.86	175.04
0.40-6P0-12P0.8-N0	85.34	612.02	176.77	0.00	7.28	0.00	315.84	162.21	174.83
0.40-6P0.8-12P0-N0	85.34	609.56	176.77	7.28	0.00	0.00	315.84	162.21	174.33
0.40-6P0-12P0-N1	86.03	600.77	178.20	0.00	0.00	10.54	318.39	163.52	173.00
0.40-6P0-12P0-N2	86.03	596.90	178.20	0.00	0.00	21.09	318.39	163.52	172.23
0.40-6P0.4-12P0.4-N0	85.34	614.48	176.77	3.64	3.64	0.00	315.84	162.21	175.32

续表

No.	Slag	Fly ash	Silica fume	PP Fiber		Nano-CaCO ₃	Water glass	Water	Sand
				6 mm	12 mm				
0.40-6P0.4-12P0.8-N0	84.99	609.56	176.06	3.64	7.28	0.00	314.57	161.55	174.12
0.40-6P0.8-12P0.4-N0	84.99	607.10	176.06	7.28	3.64	0.00	314.57	161.55	173.63
0.40-6P0.8-12P0.8-N0	84.65	607.10	175.35	7.28	7.28	0.00	313.29	160.90	173.42
0.40-6P0.4-12P0.4-N1	85.34	595.93	176.77	3.64	3.64	10.46	315.84	162.21	171.61
0.40-6P0.4-12P0.8-N1	84.99	600.88	176.06	3.64	7.28	10.42	314.57	161.55	172.39
0.40-6P0.8-12P0.4-N1	84.99	598.42	176.06	7.28	3.64	10.42	314.57	161.55	171.89
0.40-6P0.8-12P0.8-N1	84.65	598.46	175.35	7.28	7.28	10.38	313.29	160.90	171.69
0.40-6P0.4-12P0.4-N2	85.34	587.21	176.77	3.64	3.64	20.92	315.84	162.21	169.86
0.40-6P0.4-12P0.8-N2	84.99	592.20	176.06	3.64	7.28	20.84	314.57	161.55	170.65
0.40-6P0.8-12P0.4-N2	84.99	589.74	176.06	7.28	3.64	20.84	314.57	161.55	170.16
0.40-6P0.8-12P0.8-N2	84.65	589.81	175.35	7.28	7.28	20.75	313.29	160.90	169.96

Notes: 0.40 represents the water-binder ratio; 6Px indicates a volume fraction of 6 mm PP fibers of x%; 12Py indicates a volume fraction of 12 mm PP fibers of y%; Nz represents the mass fraction of nano-CaCO₃ in the cementitious materials of z%

2.3 拌合与成型

本试验采用水泥胶砂搅拌机进行搅拌, 首先将粉煤灰、矿渣、硅灰、中级砂和纳米碳酸钙按照配合比称量后加入水泥胶砂搅拌机, 慢拌 3 min 后加入提前称量好的碱激发剂和水, 先慢拌 1 min, 在拌合的同时少量多次地加入 PP 纤维, 以防止纤维结团, 结束后再快拌 3 min, 使纤维能够均匀分布。搅拌制度的具体流程如图 1 所示。

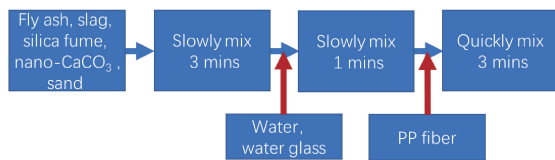


图 1 搅拌流程图

Fig. 1 Flowchart of mixing procedure

碱激发砂浆搅拌结束后, 将砂浆装入规格为 40 mm×40 mm×160 mm 的塑料模具内, 并振捣 1 min 后在表面覆盖一层塑料薄膜, 防止试件表面干缩开裂。试件硬化 24 h 后进行拆模, 随后将试件放入高温养护箱进行养护, 养护温度 80 °C, 24 h 后转入养护室标准养护, 标准养护条件为温度 (20±2) °C, 相对湿度 ≥95%, 养护时间共 28 d。

2.4 弯曲韧性及裂缝特征测试

本文采用四点弯抗折试验测试纳米碳酸钙-PP 纤维碱激发材料的荷载-位移曲线 (图 2), 使用的仪器为 WDW-100 型微机控制电子万能试验机。试验中选择位移控制, 加载速度设定为 0.5 mm/min, 当位移达到 7.5 mm

或荷载-位移曲线趋近于横轴时停止加载。在试件断裂后, 使用数码相机采集其破坏形态照片, 进而分析其破坏模式。

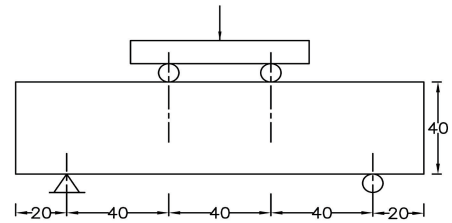


图 2 抗折试验加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of loading in bending test

2.5 微观结构表征

采用日立 5-3400 N 扫描电子显微镜 (SEM) 观察纳米碳酸钙-PP 纤维碱激发砂浆四点弯曲试验破坏后的微观形貌特征, 分析宏观力学性能演变的微观机制。

3 结果与讨论

3.1 典型受弯荷载-位移曲线

典型纳米碳酸钙-PP 纤维碱激发砂浆四点弯抗折试验的荷载-位移曲线如图 3 所示。碱激发砂浆表现出很强的脆性, 当试验荷载达到峰值荷载时试件发生脆性破坏, 荷载在峰值后直线下降, 且峰值荷载均低于掺入 PP 纤维的试件, 如图 3a 中黑色实线所示。仅掺入少量 (0.4%) 短 (6 mm) PP 纤维的碱激发砂浆试件在峰值荷载后就出现了一定的延性特征, 具体来说, 荷载在峰值后并未直接下降到 0, 而是仍具有一定的残余承载力, 荷

载维持在 0.5 kN 左右, 之后缓慢下降, 如图 3a 中红色虚线所示。

如图 3b 中黑色实线所示, 仅加入纳米碳酸钙提高了峰值荷载(从 2 kN 左右提高至 2.5 kN 左右), 但并未改变碱激发砂浆的受弯荷载-位移曲线的形状, 峰值后荷载仍迅速下降至 0。出现这种问题的原因是纳米碳酸钙的尺度过小, 很难在开裂后对裂缝起到控制作用。如图 3b

中红色虚线所示, 同时加入纳米碳酸钙和较高掺量的 PP 纤维后, 碱激发砂浆受弯荷载-位移曲线的延性大幅度提高。具体来说, 峰值荷载显著增大(提高至 3.5 kN 以上), 曲线变得较为饱满, 峰值前出现了一定程度的应变硬化特征, 峰值后荷载下降很缓慢, 在 4.0 mm 位移前持续维持在 3.0 kN 以上, 4.0 mm 位移后荷载才开始大幅下降, 且下降后仍能维持 0.5 kN 以上的残余承载力。

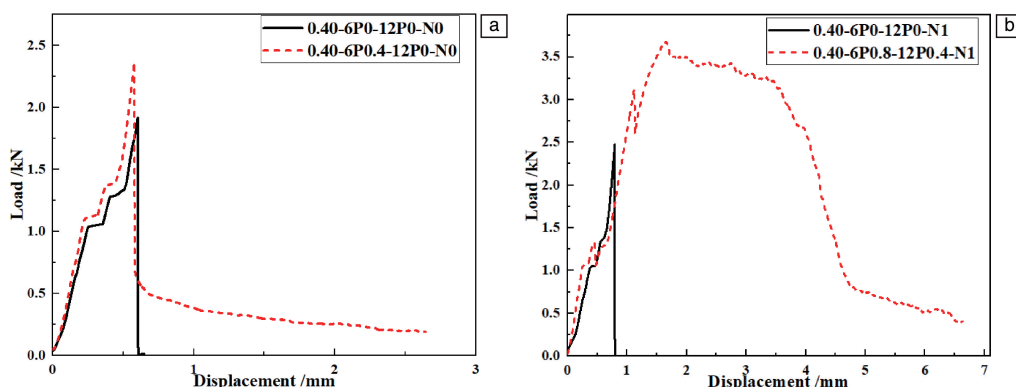


图 3 碱激发砂浆受弯荷载-位移曲线: (a) 单掺 PP 纤维, (b) PP 纤维与纳米碳酸钙混掺

Fig. 3 Bending load-displacement curves of the alkali-activated mortar: (a) modified by PP fibers, (b) modified by PP fibers and nano-CaCO₃

从荷载传递的角度来说, 荷载为 0 到达到初裂荷载这一阶段, 由基体和 PP 纤维共同承担所承受的荷载; 试件出现裂缝后, 裂缝迅速扩展的同时将荷载传递给抗拉强度较高的 PP 纤维, 在荷载作用下 PP 纤维从基体中拔出、拉断的过程中可以消耗更多能量, 从而提高了试件的韧性, 因此荷载-位移曲线呈现出显著的延性。随着纤维掺量的增大和纳米碳酸钙的加入, 试件的破坏荷载增大, 延性得到明显提升。纤维掺量较大时, 当试件达到初裂荷载出现第一道裂缝后, 荷载并不会迅速下降, 而是小幅度下降后继续上升, 直至试件出现第二道裂缝后, 荷载开始缓慢下降, 曲线呈现出很好的延性特征。

3.2 弯曲韧性

为了定量研究纳米碳酸钙和 PP 纤维对碱激发砂浆韧性的影响, 引入弯曲韧性指标, 弯曲韧性指的是碱激发砂浆在弯曲破坏过程中的能量耗散能力, 由荷载-位移曲线的下包面积表示, 具体计算如式(1)所示:

$$T_b = \int P(\sigma) d\sigma \quad (1)$$

式中: T_b —弯曲韧性, N·m; P —弯曲荷载, kN; σ —位移, mm。

图 4 所示为碱激发砂浆的弯曲韧性与 PP 纤维掺量的关系。随着纤维掺量的增加, 碱激发砂浆的弯曲韧性呈增大趋势。单掺 6 mm PP 纤维时, 掺量为 0.8% 时弯曲韧性最大, 为 3.97 N·m, 与对照组相比提升了 5.9 倍; 单掺 12 mm PP 纤维时, 最大弯曲韧性为 13.02 N·m, 较对

照组提升了 21.7 倍; 6 和 12 mm PP 纤维混掺时, 最大弯曲韧性为 19.76 N·m, 较对照组提升了 33.4 倍; 6 和 12 mm PP 纤维混掺, 并掺入 1% 的纳米碳酸钙时, 最大弯曲韧性为 25.21 N·m, 较对照组提升了 42.9 倍。可以看出, 单掺一种尺寸的 PP 纤维时, 长径比较大的纤维对碱激发砂浆的韧性增强作用更加明显, 这主要因为长径比较大的纤维与基体间接触面积更大, 锚固长度更长, 粘结更牢固, 基体受到弯曲破坏时纤维更难被拔出, 可以耗散更多能量, 从而提升碱激发砂浆的韧性。同时, 长短纤维混掺对碱激发砂浆的增韧效果亦十分显著, 因为在弯拉荷载作用下, 长短纤维能够“接力”阻裂, 在短

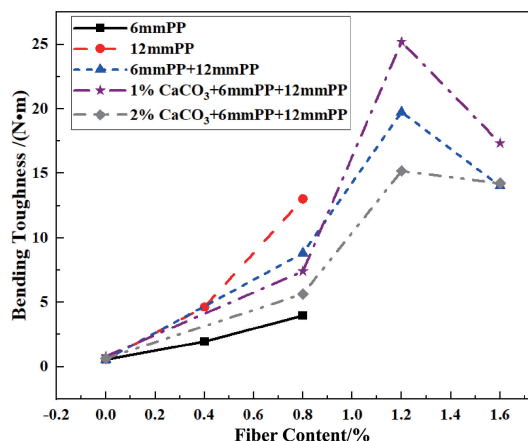


图 4 弯曲韧性与纤维掺量的关系

Fig. 4 Relationship between bending toughness and fiber content

纤维被拔出后,长纤维仍可继续桥接裂缝,提升碱激发砂浆的韧性。

图 5 所示为碱激发砂浆的弯曲韧性与纳米碳酸钙掺量的关系曲线。从图中可以看出,碱激发砂浆的韧性随着纳米碳酸钙掺量的增加先升高后降低,且在纳米碳酸钙掺量为 1% 时出现最大弯曲韧性。不掺纤维,纳米碳酸钙掺量为 1% 时,碱激发砂浆的弯曲韧性为 $0.82 \text{ N}\cdot\text{m}$,较对照组提升了 42.26%; 0.4% 6 mm PP 纤维与 0.8% 12 mm PP 纤维混掺,纳米碳酸钙掺量为 1% 时,弯曲韧性为 $25.21 \text{ N}\cdot\text{m}$,较对照组提升了 42.9 倍,此时增韧效果最好。1% 的纳米碳酸钙可以显著提高碱激发砂浆弯曲韧性的原因主要是,颗粒更小的纳米碳酸钙加入后能够附着在纤维表面,有效提升纤维/基体界面粘结力,提升了纤维拔出过程中耗能能力,从而提高碱激发砂浆的韧性。

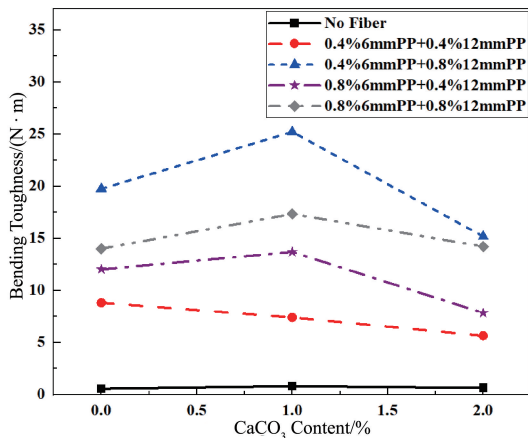


图 5 弯曲韧性与纳米碳酸钙掺量的关系

Fig. 5 Relationship between bending toughness and the content of nano calcium carbonate

为了更加清楚地展示出纤维掺量和纤维长度对碱激发材料的复合增韧作用,参考文献[7]中的做法,本文引入了纤维因子的概念,计算方法为纤维的体积掺量百分比与长径比的乘积。图 6 所示为碱激发砂浆的弯曲韧性与纤维因子的关系曲线。从图中可以看出,碱激发砂浆的弯曲韧性随着纤维因子的增加,整体上呈增大趋势,表现出良好的二次函数关系,相关系数大于 0.86。在本文中 PP 纤维的纤维因子为 387.10 时,弯曲韧性提高 33.4 倍。而 Noushini 的研究^[8]中在 PP 纤维因子为 409.09,大于本文纤维因子时,对碱激发混凝土弯曲韧性的提高仅为 3.88%。原因是,一方面,在含有粗骨料的混凝土中纤维的分散及桥联作用远不如其在砂浆中的效果;另一方面是由于适量长短纤维混杂,改善了纤维的增韧效果。这也一定程度上说明长短纤维混杂增强在碱激发砂浆中使用的效果更好,有利于工程中的推广应用。

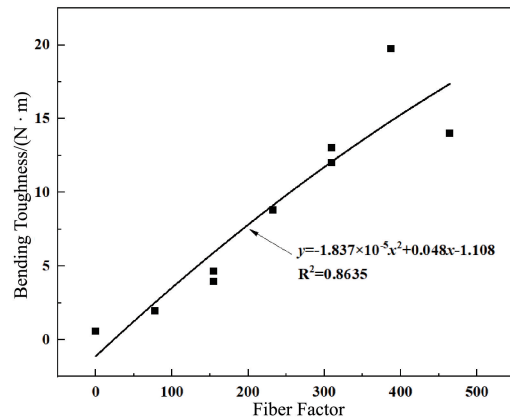


图 6 弯曲韧性与纤维因子的关系

Fig. 6 Relation between bending toughness and fiber factor

当纤维因子为 387.10 时,即 0.4% 6 mm PP 纤维与 0.8% 12 mm PP 纤维混掺,弯曲韧性为 $19.76 \text{ N}\cdot\text{m}$,相比对照组提升了 33.4 倍,此时增韧效果最显著。纤维因子超过 387.10 后,碱激发砂浆的弯曲韧性出现降低趋势,因为纤维因子过大时,一方面纤维容易相互搭接结团,造成缺陷;另一方面随着缺陷过多,纤维与基体间粘结效果也逐渐变差,不利于纤维阻裂增韧。

3.3 纳米碳酸钙与 PP 纤维的混杂效应

为了进一步量化分析纳米碳酸钙和不同长度的 PP 纤维混掺对碱激发砂浆弯曲韧性的混杂效应,参照 Bantia 等^[17]提出的弯曲韧性混杂效应系数计算方法,并结合本文试验结果,定义纳米碳酸钙-PP 纤维碱激发砂浆弯曲韧性的混杂效应系数为 S ,具体计算如式(2)所示:

$$S = \frac{T_{\text{Hybrid-mix}}}{\sum T_{\text{Single-fiber-mix}}} - 1 \quad (2)$$

式中: $T_{\text{Hybrid-mix}}$ 是混杂纤维(或纳米碳酸钙)时碱激发砂浆的弯曲韧性; $T_{\text{Single-fiber-mix}}$ 是单掺纤维(或纳米碳酸钙)时碱激发砂浆的弯曲韧性。 S 越大,表示长短纤维与纳米碳酸钙混掺对碱激发砂浆弯曲韧性的增强作用较单掺越好。当 $S > 0$ 时,表现出正混杂效应;当 $S < 0$ 时,则表现出负混杂效应。统计了不同纳米碳酸钙掺量和不同纤维因子时的混杂效应系数,如图 7a 和 7b 所示。

由图 7a 可知,除部分结果绝对值小于 0.03 无法显示外,随着纳米碳酸钙掺量的增加,碱激发砂浆弯曲韧性的混杂效应系数整体上呈现出先增大后减小的趋势。纳米碳酸钙掺量为 0% 时有 3 个试验组均表现出正混杂效应,这证明相较于单掺单一尺寸的纤维,长短纤维混掺更能增强碱激发砂浆的弯曲韧性。当纳米碳酸钙掺量为 1% 时混杂效应系数出现最大值 0.596,此时正混杂效应显著。相较于单掺 PP 纤维,1% 的纳米碳酸钙与 PP 纤维混掺时更有助于增强碱激发砂浆的弯曲韧性。纳米碳酸

钙掺量为 2% 时各组均表现出负混杂效应，这主要是由于纳米碳酸钙掺量过大时对碱激发砂浆工作性劣化作用显著，导致试件内缺陷过多。

根据图 7b 可知，随着纤维因子的增大，混杂效应系数整体上呈现先增大后减小趋势。当纤维因子为 387.10，且纳米碳酸钙掺量为 1% 时混杂效应系数最大，此时表现出最优的正混杂效应，这证明 0.4% 的 6 mm PP 纤维、

0.8% 的 12 mm PP 纤维与 1% 的纳米碳酸钙混掺是增强碱激发砂浆弯曲韧性的最优混合掺配方案。

3.4 裂缝形貌

混凝土裂缝特征和形貌与其受力变形、破坏的过程存在直接的关系，能够更加直观地反映纤维在混凝土中的作用效果和机理^[18-20]。纳米碳酸钙-PP 纤维碱激发砂浆破坏后的裂缝形貌如图 8 所示。



图 7 混杂效应系数 S 与纳米碳酸钙掺量 (a) 以及纤维因子 (b) 的关系

Fig. 7 Relationship between S and content of nano-calcium carbonate (a), relationship between S and fiber factor (b)

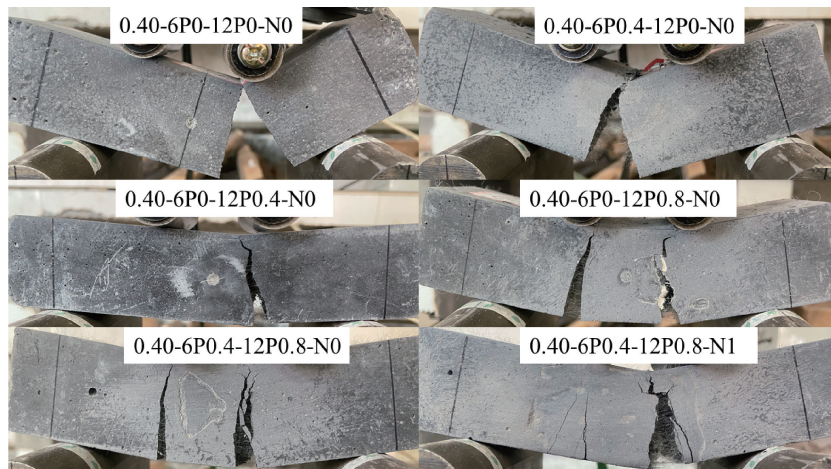


图 8 碱激发砂浆弯曲破坏后的裂缝形貌

Fig. 8 Cracks after bending failure of the alkali-activated mortar

无纤维组 0.40-6P0-12P0-N0 为显著的脆性破坏，裂缝基本与加载方向平行，且裂缝顺直无转折，对应于荷载-位移曲线峰后荷载的迅速下降和较低的弯曲韧性。0.4% 6 mm 短 PP 纤维加入后，0.40-6P0.4-12P0-N0 为单一裂缝，且裂缝贯通整个试件，断面上能够看到拔出后的大量 PP 纤维，但裂缝在试件顶面发生了一定程度的弯折，对应于荷载-位移曲线峰后获得了一定的残余承载力，但较为有限。纤维掺量仍为 0.4% 的 12 mm 长 PP 纤维加入后，0.40-6P0-12P0.4-N0 仍为单一裂缝，但试件

持荷能力显著增大，试件破坏后变形较小，且保持了良好的完整性，没有发生整体断裂，裂缝在扩展过程中发生了 3~4 处明显的弯折，此时碱激发砂浆的峰后韧性已经得到有效提升。12 mm 长 PP 纤维掺量由 0.4% 提高至 0.8% 后，0.40-6P0-12P0.8-N0 的破坏模式已转变为多裂缝扩展，由单一裂缝转变为 2 条裂缝，这不仅对应于碱激发砂浆荷载峰值后韧性提高，峰值前也已开始出现一定程度的应变硬化，弯曲韧性约为无纤维组的 21.7 倍 (见图 4)。

当 0.8% 12 mm 长 PP 纤维与 0.4% 短 PP 纤维混掺使

用时, 0.40-6P0.4-12P0.8-N0 的多裂缝扩展更加明显, 有两条主裂缝, 且其中一条主裂缝出现了明显的分叉, 裂缝尖端仍有继续开叉的现象, 总裂缝数为 3 条, 弯曲韧性约为无纤维组的 33.4 倍(见图 4)。而当 0.8% 12 mm 长 PP 纤维、0.4% 6 mm 短 PP 纤维与 1% 纳米碳酸钙混杂使用时, 0.40-6P0.4-12P0.8-N1 的多裂缝扩展已变得十分显著, 有 3 条主裂缝, 且每条裂缝都不同程度地存在局部分叉, 总裂缝数为 4 条, 弯曲韧性约为无纤维组的 42.9 倍(见图 4)。可以看到, 相比 0.40-6P0.4-12P0.8-N0, 裂缝数量每增加一条, 弯曲韧性提升的倍数约增加 10, 在没有条件采集纤维碱激发材料荷载-位移全曲线的情况下, 也可以用于粗略地评估完全韧性的提升程度。纳米粒子和纤维的加入不仅使得峰前曲线的应变硬化特征明显, 也使得峰后段的持荷能力大大增强, 从而极大地提升了碱激发砂浆试件的延性和韧性, 试件破坏时的挠度明显增大。

3.5 微观结构分析

混凝土宏观裂缝特征、受力破坏的变化源于其微观结构的演变^[21], 本节将通过微观结构分析, 揭示纳米碳

酸钙和 PP 纤维改性的碱激发砂浆增韧的内在机理。本文中纳米碳酸钙-PP 纤维碱激发砂浆破坏后的 SEM 形貌如图 9 所示。如图 9a 中箭头所示位置, PP 纤维横亘在碱激发砂浆基体的裂缝中间, 起到桥联裂缝、传递应力的作用, 从而使碱激发砂浆开裂后能够继续承担荷载, 增大了试件的变形能力, 也是纤维加入后碱激发砂浆峰后残余承载力的来源。此外, 基体中也可以观察到 PP 纤维拔出后在碱激发砂浆基体中留下的孔道, 如图 9a 中圆环所示位置。纤维在拔出过程中耗散大量能量, 从而起到增韧作用。

对比图 9a 和图 9b 可以发现, 无纳米碳酸钙基体中纤维表面光滑, 残余的砂浆颗粒很少, 也没有明显的划痕。而加入纳米碳酸钙后, 纤维表面可以观察到很多残余的砂浆颗粒, 证明纳米碳酸钙增强了纤维与基体的化学粘结作用, 如图 9b 中箭头所示位置。而且纤维表面出现了显著的划痕, 说明纤维与基体间的摩擦力增大, 这是碱激发砂浆出现应变硬化特征的重要来源。此外, 也可以观察到纳米碳酸钙加入后, 碱激发砂浆整体的密实度提高, 缺陷减少。

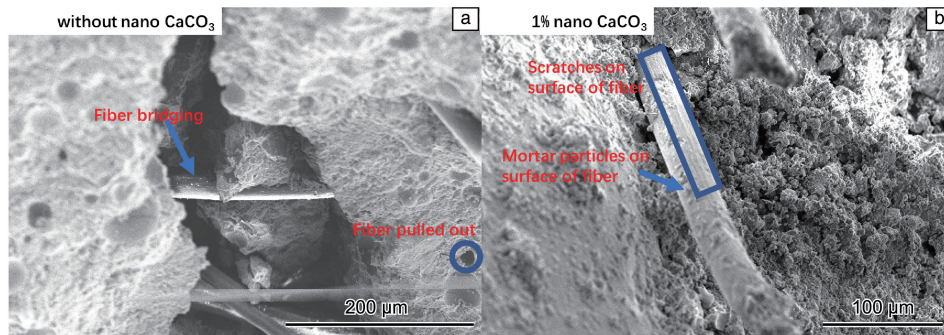


图 9 碱激发砂浆弯曲破坏后的微观结构

Fig. 9 Microstructure of the alkali-activated mortar after bending failure

4 结 论

(1) 纳米碳酸钙(1%, 质量分数)与 PP 纤维(0.4% 6 mm+0.8% 12 mm, 体积分数)混掺可显著提升碱激发砂浆的弯曲韧性(较对照组提高 42.9 倍), 并诱导多缝开裂特征。峰前挠曲硬化行为与峰后持荷能力的改善表明, 纤维桥联与纳米粒子界面强化的协同作用有效延长了裂缝扩展路径, 并通过多缝分叉及协同耗能提升了能量吸收能力。

(2) 微观结构分析表明, 纳米碳酸钙通过增强纤维-基体界面的化学粘结与物理摩擦, 以及减少基体缺陷并提高密实度, 从而优化了纤维的拔出耗能机制。界面强化效应是应变硬化特征和韧性提升的关键机理, 其作用在纤维因子为 387.10、且纳米碳酸钙掺量为 1% 时达到

最优(混杂效应系数 $S=0.596$)。

(3) 裂缝演变规律显示, 混杂纤维与纳米碳酸钙的协同作用显著改变了弯曲破坏模式: 无纤维组为单缝脆性破坏, 混杂改性后裂缝数量增至 3 条, 且分叉现象显著。多缝开裂特征与界面强化效应共同作用, 使试件破坏时的挠度增加, 延性显著改善。

(4) 本研究揭示了对碱激发材料的多尺度协同增韧机制: 纳米碳酸钙通过微观界面优化增强纤维阻裂效率, 而混杂纤维通过“长短接力”阻裂延长荷载传递路径, 二者的协同效应为开发高韧性、多缝耗能的碱激发修复材料提供了理论依据。

参考文献 References

[1] LI L, JIN P, ZHANG K, *et al.* Theoretical and Applied Fracture Me-

- chanics[J], 2025, 135: 104774.
- [2] 梁超, 邢永明, 侯小虎. 内蒙古工业大学学报(自然科学版)[J], 2024, 43(3): 278-283.
LIANG C, XING Y M, HOU X H. Journal of Inner Mongolia University of Technology(Natural Science Edition)[J], 2024, 43(3): 278-283.
- [3] 关英林, 邹承君, 康亚明, 等. 内蒙古工业大学学报(自然科学版)[J], 2024, 43(1): 63-69.
GUAN Y L, ZOU C J, KANG Y M, *et al.* Journal of Inner Mongolia University of Technology(Natural Science Edition)[J], 2024, 43(1): 63-69.
- [4] SHI Y, LI J, ZHANG Y, *et al.* Journal of Wuhan University of Technology(Materials Science)[J], 2025, 40(1): 65-78.
- [5] 高绮, 刘霖, 宋向阳, 等. 内蒙古工业大学学报(自然科学版)[J], 2024, 43(1): 77-81.
GAO Q, LIU L, SONG X Y, *et al.* Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition) [J], 2024, 43(1): 77-81.
- [6] HUANG J, WANG B, SHEN L. Ceramics International[J], 2024, 50(19): 35089-35102.
- [7] 李黎, 委玉杰, 李宗利, 等. 硅酸盐学报[J], 2022, 50(8): 1-9.
LI L, WEI Y J, LI Z L, *et al.* Journal of the Chinese Ceramic Society[J], 2022, 50(8): 1-9.
- [8] NOUSHINI A, HASTINGS M, CASTEL A, *et al.* Construction and Building Materials[J], 2018, 186: 454-475.
- [9] 詹培敏, 孙斌祥, 何智海, 等. 硅酸盐通报[J], 2018, 37(3): 881-887.
ZHAN P M, SUN B X, HE Z H, *et al.* Bulletin of the Chinese Ceramic Society[J], 2018, 37(3): 881-887.
- [10] 郭志明, 胡旭, 曾维圣. 工业建筑[J], 2023, 53(S1): 608-611.
GUO Z M, HU X, ZENG W S. Industrial Construction[J], 2023, 53(S1): 608-611.
- [11] 黄政宇, 祖天钰. 硅酸盐通报[J], 2013, 32(6): 1103-1109.
HUANG Z Y, ZU T Y. Bulletin of the Chinese Ceramic Society[J], 2013, 32(6): 1103-1109.
- [12] 周艳华. 科学技术与工程[J], 2016(28): 277-281.
ZHOU Y H. Science Technology and Engineering[J], 2016(28): 277-281.
- [13] 田竞, 苏骏, 吴鹏, 等. 混凝土与水泥制品[J], 2020(6): 9-12.
TIAN J, SU J, WU P, *et al.* Concrete and Cement Products[J], 2020(6): 9-12.
- [14] 邓友生, 张克钦, 付云博, 等. 硅酸盐通报[J], 2022, 41(12): 4254-4262.
DENG Y S, ZHANG K Q, FU Y B, *et al.* Bulletin of the Chinese Ceramic Society[J], 2022, 41(12): 4254-4262.
- [15] ASSAEDI H, ALOMAYRI T, KAZE C R, *et al.* Construction and Building Materials[J], 2020, 252: 119137.
- [16] LI L, WEI Y, LI Z, *et al.* Journal of Cleaner Production[J], 2022, 354: 131629.
- [17] BANTHIA N, SOLEIMANI S M. ACI Materials Journal[J], 2005, 6(102): 382-389.
- [18] 曹明莉, 许玲, 张聪. 硅酸盐学报[J], 2015, 43(5): 632-642.
CAO M L, XU L, ZHANG C. Journal of the Chinese Ceramic Society [J], 2015, 43(5): 632-642.
- [19] 张聪, 曹明莉. 复合材料学报[J], 2014, 31(3): 661-668.
ZHANG C, CAO M L. Acta Materiae Compositae Sinica[J], 2014, 31(3): 661-668.
- [20] 曹明莉, 李黎, 李志文, 等. 复合材料学报[J], 2017, 34(11): 2614-2623.
CAO M L, LI L, LI Z W, *et al.* Acta Materiae Compositae Sinica [J], 2017, 34(11): 2614-2623.
- [21] 孙悦, 朱伟庆, 贾金青, 等. 内蒙古工业大学学报(自然科学版)[J], 2024, 43(4): 351-359.
SUN Y, ZHU W Q, JIA J Q, *et al.* Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition) [J], 2024, 43(4): 351-359.