

磷酸镁水泥浆体与硅酸盐水泥混凝土界面断裂

刘 飞, 王宝民, 仇艺诺, 安 星

(大连理工大学建设工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 磷酸镁水泥(MPC)因其快硬、早强、高黏结性能等优势被广泛用于混凝土结构修复, 但其与普通水泥混凝土(PCC)之间的界面易形成脆性断裂区, 限制了整体结构的耐久性与服役寿命。为提升界面的力学性能, 本工作引入纳米二氧化硅(NS)对 MPC 进行复合改性, 系统探讨其对 MPC/PCC 界面断裂行为的调控作用。首先, 设计 L9(3⁴)正交试验, 选取镁磷比、水灰比、硼砂掺量及 NS 掺量为主要影响因素, 对 NS 改性 MPC(NS-MPC)3 h 与 1 d 龄期抗压、抗折强度结果进行分析, 确定 NS-MPC 的最佳配比; 其次, 采用非对称半圆弯曲(ASCB)试验, 研究界面在纯 I 型、纯 II 型及 I/II 混合型断裂条件下的力学性能和非线性断裂机理, 分析界面断裂韧性演化规律; 最后, 通过扫描电子显微镜/能谱分析(SEM/EDS)对界面微观结构组成进行表征。结果表明, 力学性能最佳的 NS 掺量为 4%, NS-MPC 在 3 h 龄期抗压强度达到 47.3 MPa, 28 d 达 88.7 MPa, 明显优于纯 MPC; 折压比由 5%提高至 9%, 表现出更高的韧性。断裂参数分析表明, 界面黏结强度具有一定的缝径比(a/R)敏感性, 随着 a/R 不断增大而减小, 纯 II 型断裂强度最高为 12.04 MPa, I 型最低为 4.13 MPa, 混合型居中。力-位移曲线揭示断裂过程呈脆性主导并伴随非线性演化, 裂纹路径由沿界面直线扩展逐渐转变为偏离界面的复杂分支模式。界面裂缝尖端应力强度因子(SIF)随 a/R 变化呈显著非线性断裂特征, 界面应避免混合断裂度为 0.455 的破坏模式。SEM/EDS 分析进一步证实, NS 通过促进 MPC 进一步反应在界面处生成更致密的产物, 形成连续致密的复合结构, 显著提高了 MPC 的基体致密性与界面结合强度, 延缓了界面裂纹扩展。

关键词: 磷酸镁水泥; 纳米二氧化硅; 非对称半圆弯曲试验; 界面断裂; 应力强度因子

中图分类号: TQ172.1 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)08-2716-14

网络出版时间: 2026-06-25



磷酸镁水泥(MPC)是一种由氧化镁(MgO)与可溶性磷酸盐反应生成的低碱性胶凝材料, 具有早强、快硬、高黏结性、良好的体积稳定性等一系列优异性能^[1-3]。近年来, MPC 因其较强的快速修复能力, 在道路、桥梁及机场跑道等混凝土结构的修复工程中得到了广泛应用^[4]。

然而, 由于 MPC 与普通硅酸盐水泥混凝土(PCC)在化学组成、固化产物及界面过渡区(ITZ)结构等方面存在显著差异, 二者在黏结界面处易形成脆性断裂区^[5]。界面弱化显著降低了修复层与基体之间的协同承载能力, 进而影响整体结构的服役寿命与耐久性。相较于传统钙基胶凝材料, 镁基胶凝材料在界面黏结性能方面表现更优, 其中 MPC 尤为突出^[6-8]。Qiao 等^[9]通过系统的实验与现场研究发

现, 低镁磷比的 MPC 与 PCC 基体之间可形成更高的界面黏结强度, 同时材料本身具有良好的体积稳定性。Li 等^[10]的研究进一步指出界面黏结破坏的受力形式之间也存在差异。尽管 MPC 与 PCC 或水泥砂浆组合件的界面轴向拉伸强度难以恢复至原始构件水平, 但在劈裂、弯拉和剪切强度测试中, 其组合构件性能可接近甚至达到原始水平。更重要的是, MPC 具备一定的渗透能力, 其水化产物 K 型鸟粪石(MKP)可在微观尺度上实现与水泥基材的有效结合, 从而提升整体界面黏结能力^[11]。

目前, 关于 MPC 修复体系界面性能的研究主要集中在宏观尺度上的黏结强度与剪切强度测试^[12-13], 但对界面微观结构演化机制、裂纹扩展路径以及断裂过程中的应力传递特征的研究仍相对不

收稿日期: 2025-07-24。 修订日期: 2025-10-09。

基金项目: 国家自然科学基金(52408238, 52272016); 中国博士后科学基金(2024M760330, 2025T180889); 国家资助博士后研究人员计划 B 档资助(GZB20250751)。

第一作者: 刘 飞(1993—), 男, 博士, 助理研究员。

通信作者: 王宝民(1972—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2025-07-24. Revised date: 2025-10-09.

First author: LIU Fei (1993—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: liufei@dlut.edu.cn

Correspondent author: WANG Baomin (1972—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: wangbm@dlut.edu.cn

足。钱觉时等^[14]通过对 MPC 与旧 PCC 界面的微观表征,发现界面区域水化产物复杂,结合强度较高,且可溶性磷酸盐在界面处发生渗透反应与填充作用,表明 MPC 与 PCC 在化学相容性方面具有良好基础。Jia 等^[15]通过引入铝酸铁水泥(FAC)制备 MPC-FAC 复合胶凝材料,研究其与水泥砂浆基材的黏结性能,结果表明粗糙界面有助于提升黏结强度^[16],改性后的界面过渡区结构更致密,机械互锁、渗透填充与二次水化等复合作用共同提升了界面性能。

然而,在高梯度应力作用下,界面作为力学性能薄弱环节,其断裂行为表现出高度非线性并具有明显的尺寸效应,亟须通过高分辨率测试技术探究界面断裂行为,并采用纳米尺度调控策略实现改进。近年来,纳米材料在水泥基材料中的应用为界面强韧化提供了新的研究思路和技术路径^[17-19]。其中,纳米二氧化硅(NS),作为一种具有高比表面积和高火山灰活性的材料,能够有效填充孔隙结构、促进水化反应与酸盐反应产物的致密生成,从而显著提升材料的整体致密性与力学性能^[20-22]。然而,目前针对 NS 改性 MPC 用于 PCC 快速修复体系中界面断裂行为的系统研究仍较匮乏,尤其缺乏从微观结构、反应产物、界面应力传递特征与裂纹扩展路径等方面对界面耦合机制的深入探讨。

鉴于此,本工作针对 MPC 与 PCC 界面存在的断裂脆性问题,提出采用 NS 对 MPC 进行复合改性,以调控界面过渡区结构、提升界面能及抗断裂性能。首先通过非对称半圆弯曲(ASCB)试验量化界面断裂韧性,随后分析界面的非线性断裂特征和断裂参数演化规律,最后结合扫描电子显微镜/能谱分析(SEM/EDS)微观表征手段进一步分析界面微观形

貌。本工作旨在阐明 NS 对 MPC-PCC 界面物理结构与化学组成的调控机理,构建“纳米改性-ITZ 性能演化-界面断裂行为”的多尺度分析框架,为 MPC 修复体系的界面韧性优化设计提供理论依据。

1 实验

1.1 试样原材料与制备

本工作所用原材料包括重烧镁砂(DBM, 记为 M)、磷酸二氢钾(KH_2PO_4 , 记为 P)、纳米二氧化硅(NS)、去离子水(W)、缓凝剂硼砂($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 记为 B)及 PCC 基体。DBM 由辽宁省海城市拓然矿产品有限公司提供,纯度 92%,比表面积(BET) (250.00 ± 0.82) m^2/kg ,其化学成分见表 1,粒径分布如图 1a 所示。 KH_2PO_4 由济南铭仕港商贸有限公司提供,纯度 99%。硼砂由天津大茂化学试剂厂提供,纯度 99.5%,用于延缓水化反应。NS 由博华斯纳米科技(宁波)有限公司提供,纯度 $\geq 99.9\%$,平均粒径 7 nm,比表面积为 $(3.8 \times 10^5 \pm 3.0 \times 10^4)$ m^2/kg 。拌和水为去离子水。

表 1 DBM 和 OPC 的化学成分
Table 1 Chemical composition of DBM and ordinary Portland cement (OPC)

Oxide/phase	P·O 42.5R OPC	DBM
Magnesium oxide/MgO	2.89	92.66
Silicon dioxide/SiO ₂	20.55	2.86
Ferric oxide/Fe ₂ O ₃	2.72	1.36
Calcium oxide/CaO	65.73	2.04
Aluminium oxide/Al ₂ O ₃	5.36	0.56
Sulfur oxide/SO ₃	2.58	
Others	0.17	0.52

w is mass fraction.

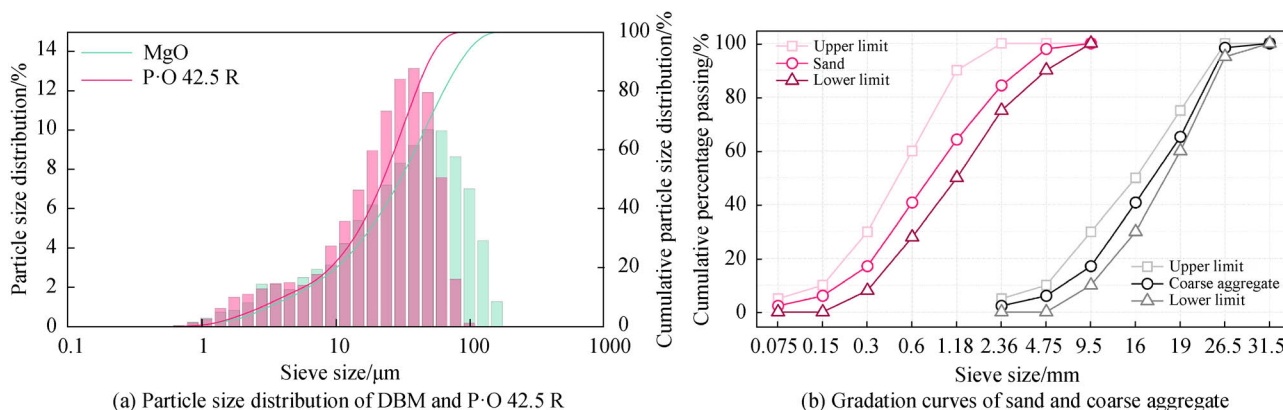


图 1 原材料基本信息

Fig. 1 Basic information of raw materials

制备流程如下: 首先将 DBM、 KH_2PO_4 与硼砂干拌均匀; 将 NS 超声分散于去离子水中后加入干

料, 搅拌 2 min; 随后将浆料倒入模具, 静置 30 min 脱模, 并于 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、 $(60\% \pm 10\%)$ 相对湿度(RH)

条件下空气养护至规定龄期。不同 NS 掺量的试件均按相同步骤制备, 每组设置 3 个平行样, 以保证数据可靠性。

本工作采用 C30 水泥混凝土, 水泥为 P·O 42.5R 型普通硅酸盐水泥(OPC), 其氧化物组成见表 1, 粒径分布如图 1a 所示。PCC 配合比为水泥: 水: 石子: 砂: 减水剂: 引气剂=1.000 0: 0.400 0: 3.000 0: 1.500 0: 0.009 0: 0.000 5; 砂和石子的粒径分布如图 1b 所示, 砂为细度模数为 2.81 的中砂。制备 PCC 28 d 抗压强度为 43.2 MPa, 弯拉强度为

4.87 MPa。

ASCB 断裂试件的 PCC 部分制备步骤如下: 首先浇筑 $\Phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 标准圆柱体, 如图 2a 所示; 再切割为若干 $\Phi 150 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 圆柱体, 如图 2b 所示。随后将圆柱体切割为标准 1/4 试件, 并在 $40 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 切面底部加工宽 2.5 mm 的预制凹槽, 深度按设计缝径比调整, 如图 2c 所示。凹槽处粘贴 5 mm 塑料片, 以形成预设裂缝。最后将试件置于模具中灌注 NS-MPC, 得到完整的 ASCB 试件($\Phi 150 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$), 其成型过程及受力示意如图 2 所示。

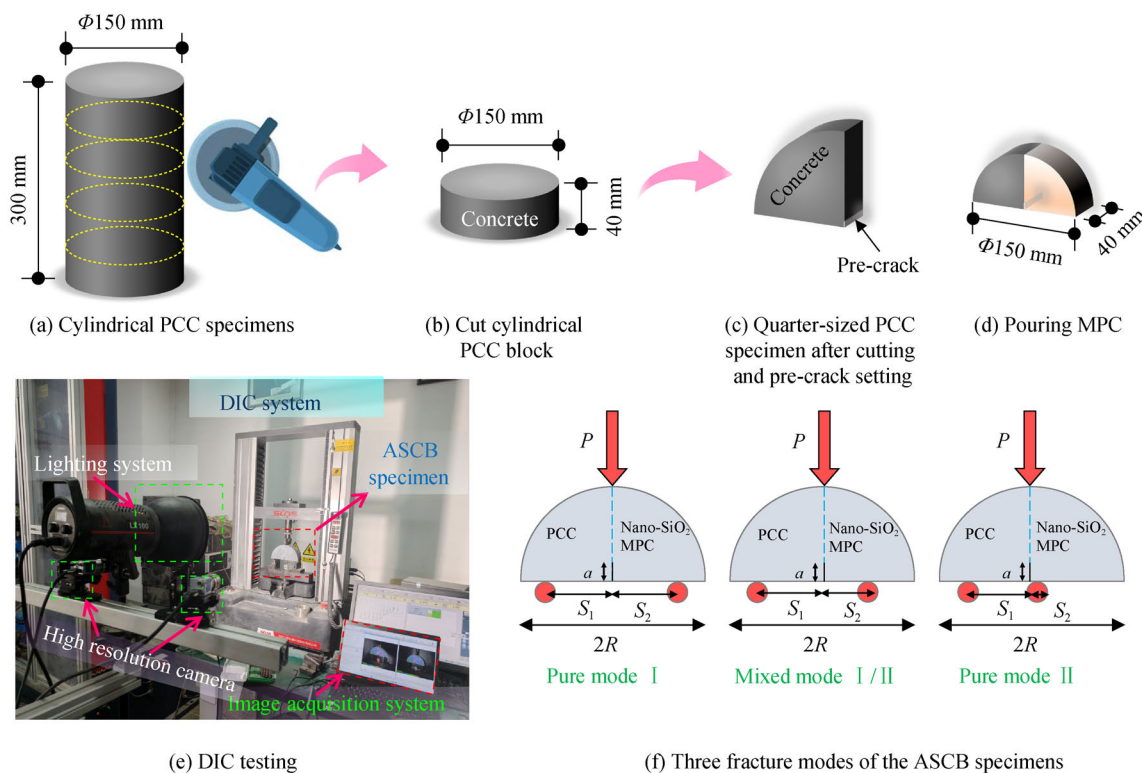


图 2 ASCB 界面断裂试件制作和试验过程
Fig. 2 Fabrication and testing process of ASCB interface fracture specimens

1.2 方法

1.2.1 强度试验 依据 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》, NS-MPC 试件采用 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 三联钢模成型。抗折试验后, 破坏棱柱体的半截块用于抗压试验。抗折与抗压加载速率分别为 50 N/s 和 2400 N/s。每组抗折试验含 3 个试件, 每组抗压试验含 6 个半截块, 试验误差控制在 $\pm 10\%$ 。强度按式(1)~式(2)计算:

$$f_c = \frac{F_s}{S_0} \quad (1)$$

$$f_t = \frac{1.5F_s \cdot S}{b^3} \quad (2)$$

式中: f_c 为抗压强度, MPa; F_s 为试件破坏时的最大荷载, N; S_0 为承压面积, mm^2 。 f_t 为抗折强度, MPa; S 为支撑圆柱中心距, mm; b 为试件断面正方形的边长, 40 mm。

1.2.2 ASCB 界面断裂试验 依据上述制样方法, 制备了纯 I 型、纯 II 型及混合 I/II 型 ASCB 试件, 如图 2 所示。试件加载采用传统三点弯曲夹具, 通过调节支撑位置实现不同断裂模式: 1) 当左右支撑距裂纹根部的距离相等(即 $S_1=S_2$)时, 裂纹尖端仅出现张开型变形, 对应纯 I 型断裂; 2) 当支撑距离不相等(即 $S_2 \neq S_1$)时, 裂纹尖端产生张开与剪切的复合变形, 对应 I/II 型混合断裂。随着不对称度增大

(有效跨度比减小), I 型分量逐渐削弱, 而 II 型分量显著增强。理论上存在一个临界跨度, 使张开分量降为零, 此时试件呈现纯 II 型断裂。与中心裂纹巴西圆盘或倾斜裂纹半圆弯曲试件相比, ASCB 试件可通过几何调节覆盖纯 I 型至纯 II 型的完整断裂谱, 且制备工艺简便、可控。

裂纹尖端应力/应变场的强度可用断裂力学中的应力强度因子(SIF)表征^[23-24]。ASCB 试件的 I 型与 II 型 SIF 随几何参数与加载条件变化, 可分别表示为式(3)与式(4):

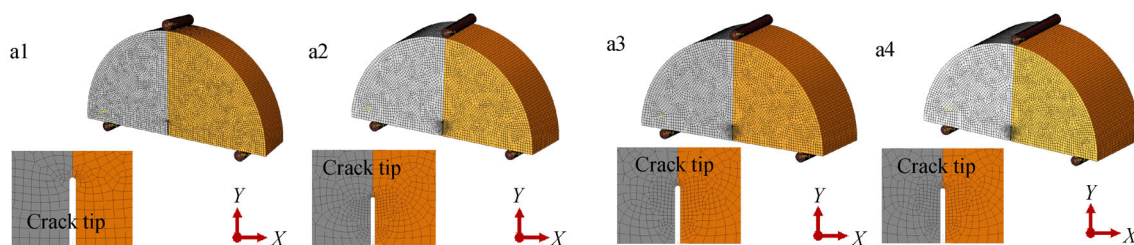
$$K_{\text{I}} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{2Rt} f_{\text{I}}(a/R, S_1/R, S_2/R) \quad (3)$$

$$K_{\text{II}} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{2Rt} f_{\text{II}}(a/R, S_1/R, S_2/R) \quad (4)$$

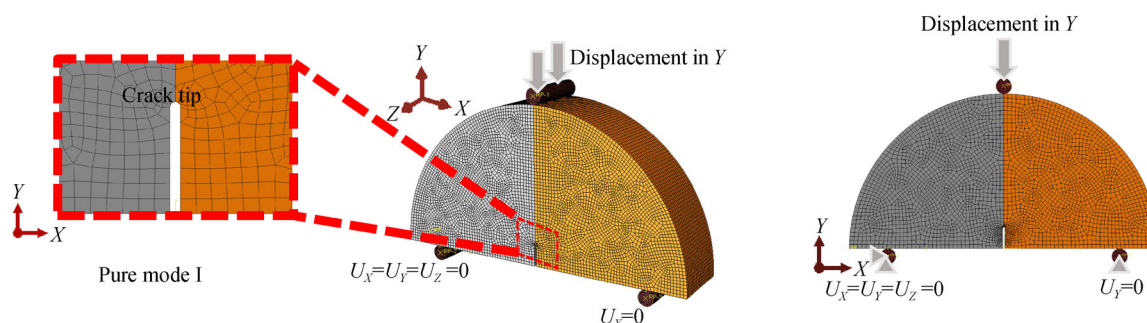
式中: $f_{\text{I}}(a/R, S_1/R, S_2/R)$ 和 $f_{\text{II}}(a/R, S_1/R, S_2/R)$

分别为 I 型和 II 型几何因子, 即裂缝长度比(a/R)和有效加载跨度比(S_1/R 和 S_2/R)的函数。在式(3)~式(4)中, P 为施加荷载, kN; t 为 ASCB 试件厚度, mm; R 为 ASCB 试件的半径, 75 mm。

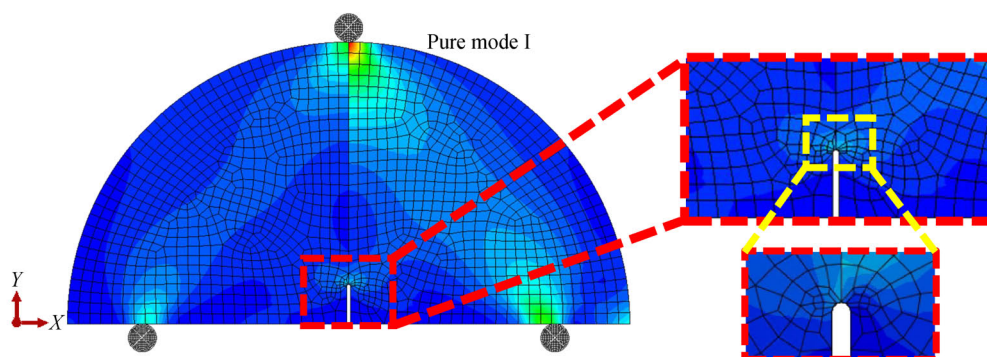
为考察对称与非对称加载情形, 需分别计算对应的 f_{I} 和 f_{II} , 本工作采用 ABAQUS/Standard 2021 建立 ASCB 有限元模型(直径 150 mm, 厚度分别为 30、40、50 mm 及 60 mm), 如图 3a 所示, 模型约含 20 000 个六面体单元, 裂纹尖端区域精细划分为 360 个实心六面体单元。材料按线弹性假设, MPC 弹性模量 36.61 GPa、泊松比 0.21; PCC 弹性模量 30 GPa、泊松比 0.2^[25-26]。加载工况为三点弯曲, 竖向荷载 10 kN, 左支座全约束, 右支座仅限位 Y 向, 如图 3b 所示。在纯 I 型断裂下, 几何因子由 J 积分法直接提取; 在纯 II 型断裂下, 通过调整右支



(a) Finite element models of four thicknesses of ASCB specimens



(b) Crack setting of the finite element model for the ASCB specimen



(c) Finite element simulation calculation results

图 3 建立固定直径、4 种不同厚度的 ASCB 试件的三维有限元模型及边界条件

Fig. 3 Establishment of three-dimensional finite element models and boundary conditions of ASCB specimens with fixed diameters and four different thicknesses

点位置, 在固定裂缝长度比 a/R 与有效加载跨径比 S_1/R 条件下迭代计算, 直至满足 $K_I=0$ 而 $K_{II} \neq 0$ 。计算结果表明, 几何因子 f_I 与 f_{II} 对试件厚度不敏

感, 但随 a/R 和 S_1/R 显著变化。图 3c 和图 4 分别是应力分布云图及几何因子随参数变化的规律, 为界面断裂定量分析提供依据。

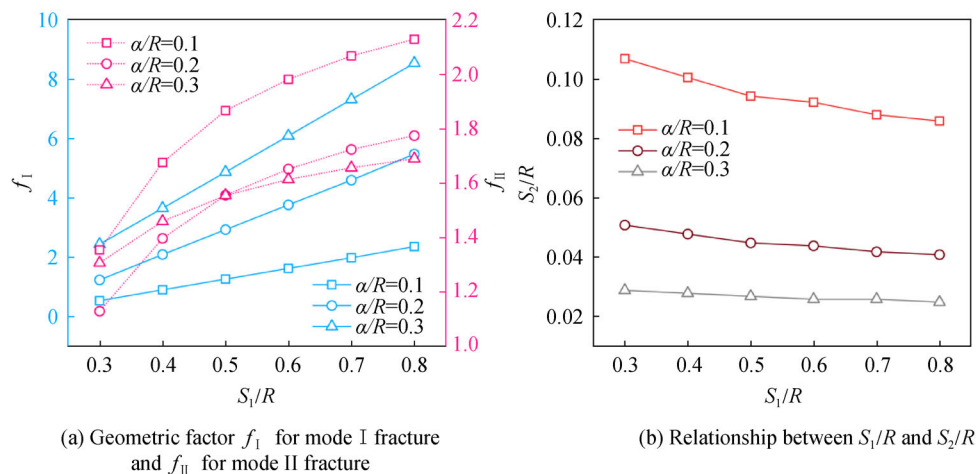


图 4 不同 a/R 情况下几何因子随 S_1/R 变化的曲线

Fig. 4 Curves of geometric factors with respect to S_1/R under different a/R conditions

通过上述有限元分析结果, 可以对试验中有效加载跨径进行测量和标定。试验试样的尺寸和相关参数如表 2 所示, 所有试件均设置 $S_1=60$ mm。在本工作中, 每组试件配置 3 组不同的 S_2 , 即有 3 种不同模式混合, 其混合模态用参数 M^e 表示^[27], 定义为式(5):

$$M^e = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{K_I}{K_{II}} \right) \quad (5)$$

表 2 3 种混合模态对应的 ASCB 试样几何因子

Table 2 Geometric factors of ASCB specimens at three fracture modes

a/R	Fracture modes	Pure mode I	Mixed mode I / II	Pure mode II
0.1	$(S_1, S_2)/\text{mm}$	(60, 60)	(60.00, 40.87)	(60.00, 6.15)
	M^e	0	0.8	1.0
	f_I	4.85	1.54	0.90
	f_{II}	0.72	0.61	1.88
0.2	$(S_1, S_2)/\text{mm}$	(60, 60)	(60.00, 40.87)	(60.00, 4.95)
	M^e	0	0.8	1.0
	f_I	5.47	1.83	0.53
	f_{II}	0.400	0.560	2.021
0.3	$(S_1, S_2)/\text{mm}$	(60, 60)	(60.00, 40.87)	(60.00, 3.75)
	M^e	0	0.8	1.0
	f_I	8.54	1.92	0.35
	f_{II}	0.21	0.49	2.13

在本工作中, ASCB 弯拉强度计算公式^[28–29], 如式(6)所示:

$$\sigma = \frac{4.976 P_{\max}}{2(R-a) \times t} \quad (6)$$

式中: $P_{\max}$ 为 ASCB 试件的峰值破坏力, kN; R 为 ASCB 试件的半径, mm; t 为 ASCB 试件厚度, mm。

本工作选定 3 种缝径比(即预设裂缝长度与半径比值, 0.1、0.2 和 0.3)以及 3 种不同的断裂模式(I 型、II 型和混合断裂度为 0.8 的 I/II 混合型), 每种试验条件设置 3 组平行试样, 确保实验数据的可靠性与重复性, 共计 36 个试件。此外对 $a/R=0$ 的纯黏结强度也进行了测试。加载速率为 0.1 mm/min。

1.2.3 SEM/EDS 采用 FEI 公司 Nova NanoSEM 450 场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)对 NS-MPC/PCC 界面的微观形貌及水化产物元素组成进行表征。试样经 50 °C 干燥 2 h 以终止水化, 随后继续干燥 24 h 并进行喷金处理。由于界面试样不具备导电性, 测试前需通过导电胶固定于样品台。测试条件为: 工作电压 230 V、工作电流 8 A; 加速电压范围 200 V~30 kV; 电子束流范围 0.3 pA~100.0 nA。在高真空模式下分辨率达 1.0 nm(15 kV), 低真空模式下分辨率为 1.5 nm(10 kV)。

2 结果与讨论

2.1 正交试验分析与力学性能测试

在正交试验设计前需确定主要影响因素, 对于 NS-MPC 体系, 选取镁磷质量比(M/P, 因素 A)、水灰比[W/(M+P+NS), 因素 B]、硼砂掺量(Bo/M, 因素 C)及 NS 掺量[NS/(M+P), 因素 D]作为考察变

量。因素 A 设置为 2.5/1.0、3.0/1.0、3.5/1.0, 因素 B 设置为 0.14、0.16、0.18, 因素 C 设置为 0.06、0.08、0.10, 因素 D 设置为 0.02、0.04、0.06。采

用 L9(3⁴)正交表进行 9 组配比试验, 力学性能结果如表 3 所示, 评价指标为 3 h 与 1 d 的抗压、抗折强度。

表 3 正交试验设计下 NS-MPC 的强度试验结果
Table 3 Strength test results of NS-MPC by orthogonal test design

No.	A	B	C	D	3 h compressive strength/MPa	3 h flexural strength/MPa	1 d compressive strength/MPa	1 d flexural strength/MPa
1	2.5/1.0	0.14	0.06	0.02	38.99	4.86	64.03	6.32
2	2.5/1.0	0.16	0.08	0.04	32.62	5.22	52.90	6.24
3	2.5/1.0	0.18	0.10	0.06	31.11	4.97	47.81	6.23
4	3.0/1.0	0.14	0.08	0.06	32.22	4.81	38.21	5.90
5	3.0/1.0	0.16	0.10	0.02	19.14	4.19	38.68	5.69
6	3.0/1.0	0.18	0.06	0.04	34.49	3.00	57.95	4.90
7	3.5/1.0	0.14	0.10	0.04	33.74	5.79	60.26	6.66
8	3.5/1.0	0.16	0.06	0.06	17.98	4.01	31.08	4.61
9	3.5/1.0	0.18	0.08	0.02	23.61	5.41	34.06	7.02

A is Mg/P mass ratio. B is water-cement ratio, W/(M+P+NS). C is borax content, Bo/M. D is NS content, NS/(M+P). M is dead burned magnesia, P is KH₂PO₄, NS is nanometer silica dioxide, W is water.

根据正交试验结果, 优选出 NS-MPC 的最佳配比, 即 M/P=2.5/1.0, W/C=0.14, Bo/M=0.08, NS/C=0.04。以纯 MPC(M/P=3/1, W/C=0.16, Bo/M=0.08)为对照, 不同龄期下 NS-MPC 的力学性能如图 5 所示。3 h 龄期 NS-MPC 的抗压与抗折强度分别为 47.3 MPa 和 7.3 MPa, 较纯 MPC(27.5 MPa 和 5.0 MPa)显著提高, 表明 NS 对早期水化具有明显促进作用。至 1 d 龄期, NS-MPC 抗压与抗折强度进一步增至 76.5 MPa 与 8.6 MPa, 显著优于纯 MPC (32.2 MPa 与 6.7 MPa), 说明 NS 仍在持续促进晶体有序生长。至 7 d 与 28 d, 抗压强度分别为 81.3 MPa 与 88.7 MPa, 抗折强度为 9.1 MPa 与 9.4 MPa, 强度增长逐渐趋缓, 结构趋稳。相比之下,

纯 MPC 在 7 d 与 28 d 的抗压强度仅为 49.8 MPa 与 56.3 MPa。值得注意的是, NS-MPC 的折压比始终维持在 9%, 显著高于纯 MPC(5%), 表明其韧性得到改善。这可能与 NS 对孔隙结构的细化及在微裂纹萌生过程中的“桥联”或能量耗散作用有关。综上, NS 的引入不仅显著提高了 MPC 的早期与长期强度, 还增强了韧性和结构稳定性, 使 NS-MPC 兼具高强、早强与良好延展性, 适用于快硬修复及高性能结构胶凝体系。

2.2 ASCB 界面断裂分析

2.2.1 界面强度试验结果 图 6 为不同断裂类型下界面黏结强度随 a/R 比的变化规律。由图 6 可见, 界面黏结强度均随 a/R 增大而下降, 且趋势在各断裂模式中均保持一致。具体而言, a/R 从 0 增大至

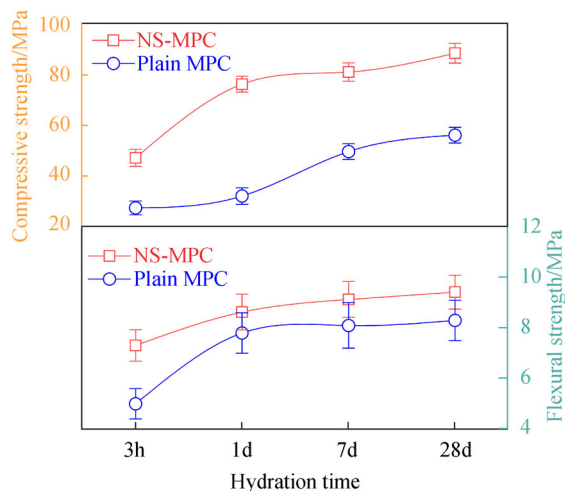


图 5 NS-MPC 的抗压强度和抗折强度

Fig. 5 Compressive strength and flexural strength of NS-MPC

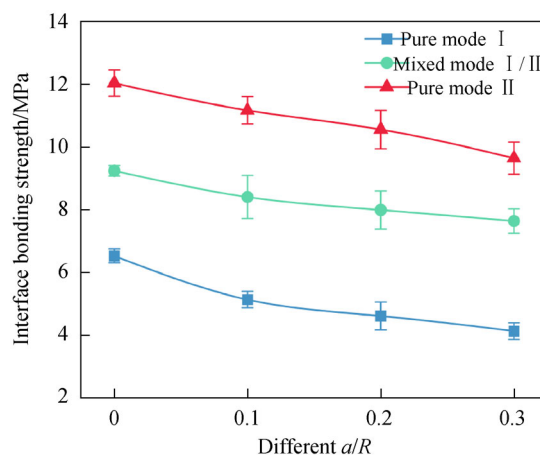


图 6 NS-MPC/PCC 界面黏结强度

Fig. 6 Interface bonding strength of NS-MPC/PCC

0.3 情况下, 纯 I 型断裂下, 界面黏结强度由 6.53 MPa 降至 4.13 MPa; 纯 II 型断裂下, 由 12.04 MPa 降至 9.65 MPa; 混合 I / II 型断裂下, 则由 9.25 MPa 降至 7.64 MPa。

图 7 揭示了纯 I 型断裂下 NS-MPC/PCC 界面的力-位移响应及其对 a/R 的敏感性。从图 7a 可以看出, 曲线均表现出典型的脆性特征: 初始阶段呈线性增长, 达到峰值后荷载骤降, 无明显塑性变形。随着 a/R 从 0 增至 0.3, 峰值荷载显著降低, 符合裂尖应力集中增强、有效承载面积减小的断裂力学规

律。相同 a/R 下曲线高度重合, 表明试验重复性良好。图 7b 拟合结果($R^2=0.95$)显示峰值载荷与位移呈接近单调线性关系, 反映了界面趋于线性断裂特性。对于破坏模式与裂纹扩展路径, 如图 7c 所示, 当 $a/R=0$ 时, 断裂面平整, 裂纹沿界面直线扩展, 为典型的 I 型张开型断裂。当 $a/R=0.1$ 时, 裂纹仍以 I 型为主导, 但在缺陷附近出现轻微偏折, 表明局部应力场发生扰动。当 $a/R=0.3$ 时为较大缺陷界面, 裂纹路径明显偏离原界面, 形成次级分支裂纹, 呈现 I / II 复合型断裂特征。

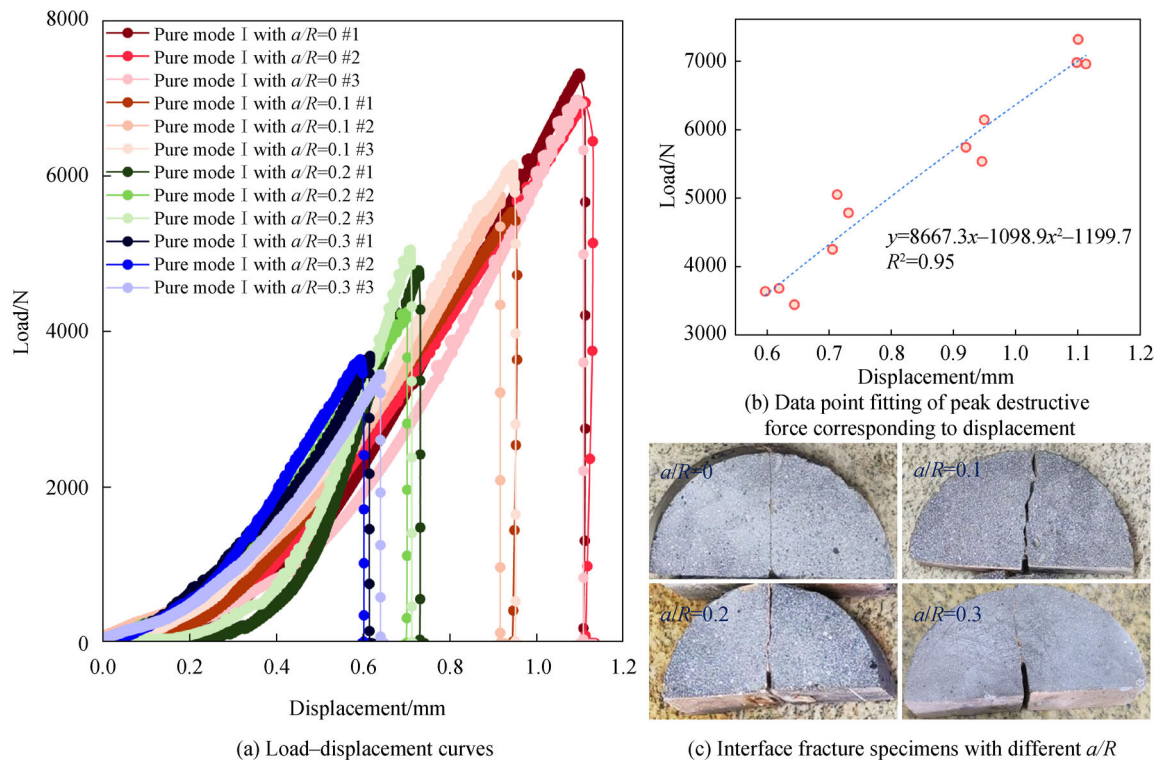


图 7 NS-MPC/PCC 界面纯 I 型断裂

Fig. 7 Pure mode I fracture at NS-MPC/PCC interface

图 8a 是不同 a/R 条件下 NS-MPC/PCC 界面的力-位移响应。曲线均呈 3 阶段特征: 初始线性、非线性裂纹扩展及峰值后突降失稳。当 $a/R=0$ 时, 界面承载力最高接近 11 500 N, 位移达 1.3 mm, 表现出优异的完整性和延迟破坏特性; 随着 a/R 增大, 峰值载荷与位移显著下降, $a/R=0.3$ 时降至约 7500 N, 表现为更脆性断裂。这表明初始缺陷削弱了承载能力并加速失稳扩展。图 8b 拟合结果($R^2=0.91$)显示峰值载荷与位移呈非单调线性关系, 反映了界面能量耗散机制的复杂性。这可能与试件微观界面损伤演化和裂尖塑性区扩展不一致有关, 说明界面在不同裂纹扩展阶段的能量耗散机制具有多样性。图 8c 表明, $a/R=0$ 时断裂面平整, 黏结力强; $a/R=0.1\sim0.3$

时裂缝偏离界面并趋向预制裂纹扩展, 断裂面粗糙不规则, 揭示初始缺陷在裂纹扩展路径选择与失效模式转变中的主导作用。

图 9 展示了不同 a/R 条件下 NS-MPC/PCC 界面纯 II 型断裂的力-位移响应与破坏模式。所有试件均经历线性增长-非线性扩展-失稳断裂的典型过程。图 9a 所示, 随着 a/R 增加, 峰值载荷由 14 000 N 降至约 11 000 N, 说明初始缺陷显著削弱了界面剪切承载力。低 a/R 时曲线延展性强, 表现出裂尖钝化与耗能能力; 高 a/R 时曲线陡峭、位移峰值降低, 断裂更趋脆性。如图 9b 所示, 峰值载荷与位移呈二次多项式关系($R^2=0.95$), 揭示界面抗剪强度与变形能力的非线性耦合演化。图 9c 所示, 断口形貌进一

步表明: $a/R=0$ 时裂纹沿界面对称扩展, 断口整齐;
 $a/R=0.1\sim 0.3$ 时裂纹逐渐偏离界面并伴随分支或扭

曲, 断口粗糙化增强, 反映出缺陷驱动下的非稳定扩展特征。

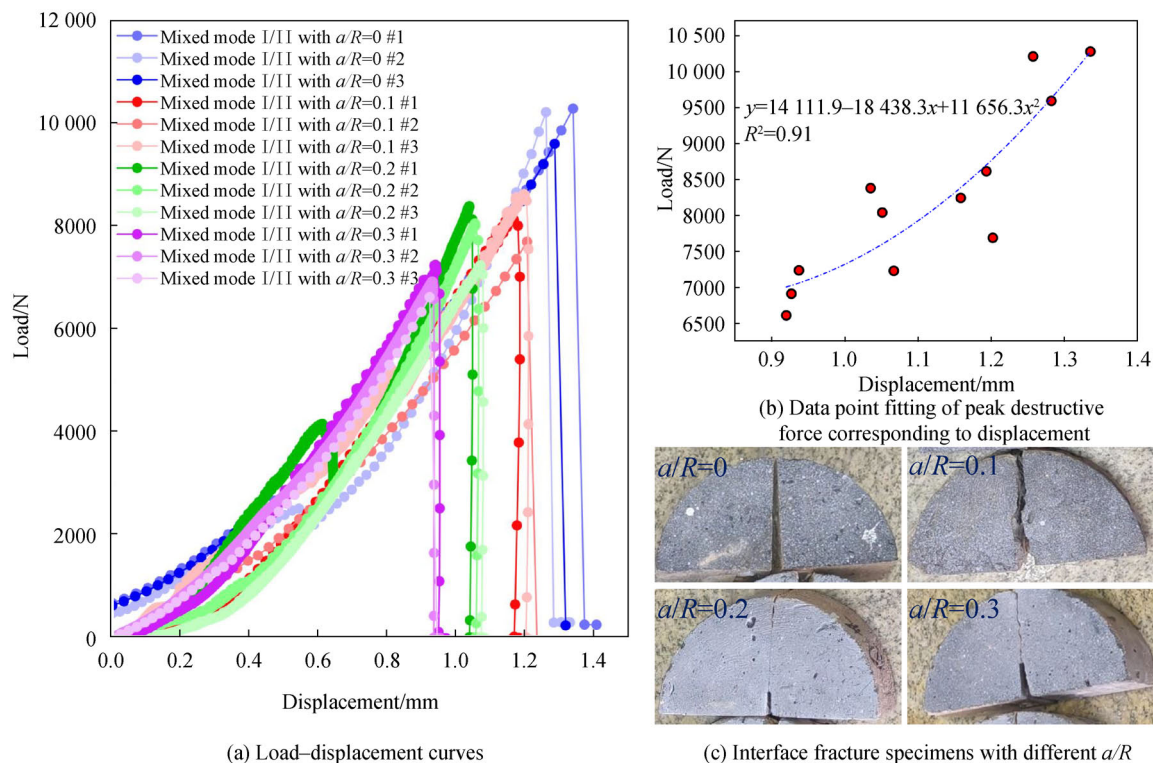


图 8 NS-MPC/PCC 界面 I / II 混合型断裂
 Fig. 8 NS-MPC/PCC interface with I / II mixed fracture

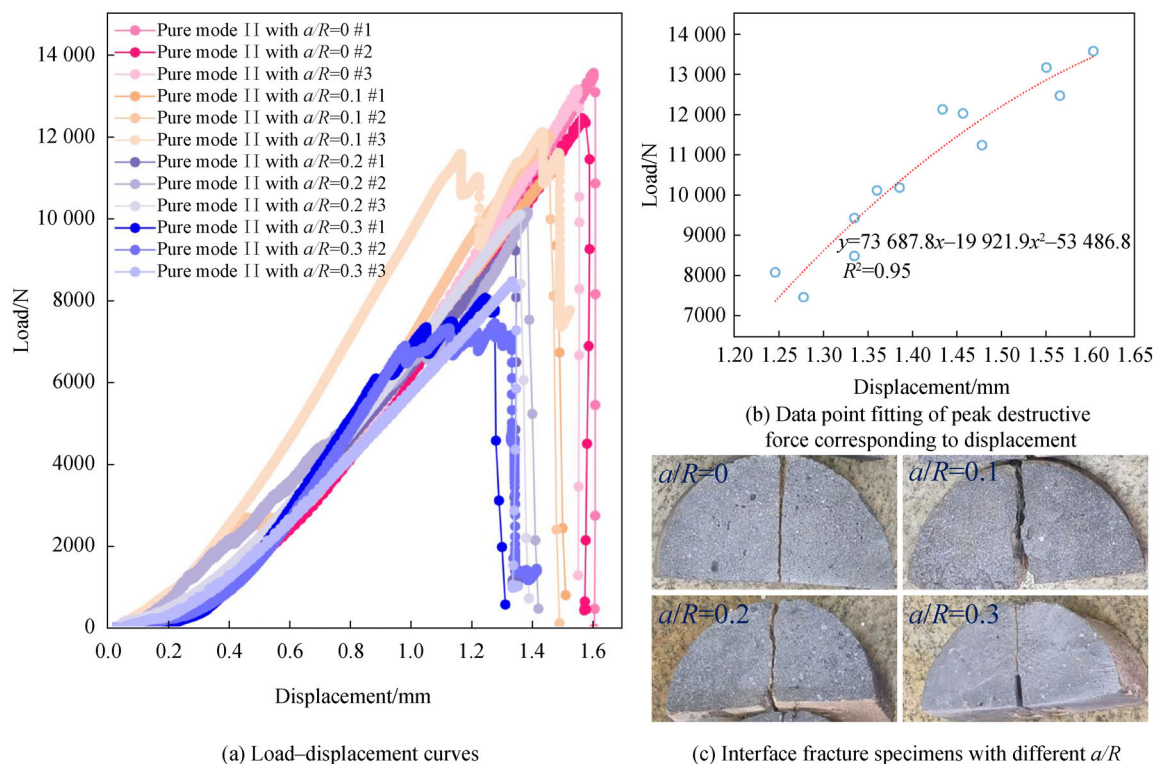


图 9 NS-MPC/PCC 界面纯 II 型断裂
 Fig. 9 Pure mode II fracture at NS-MPC/PCC interface

2.2.2 界面非线性断裂参数分析 为了更好地理解断裂模式 NS-MPC/PCC 断裂韧性数据的变化趋势, 并比较混合度对断裂参数的影响, 用有效断裂韧性 K_{eff} 评估, 其计算公式如式(7)^[30]所示:

$$K_{\text{eff}} = \sqrt{K_{\text{IC}}^2 + K_{\text{IIC}}^2} \quad (7)$$

式中: K_{IC} 和 K_{IIC} 分别为界面断裂对应的应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

由于本工作研究的 ASCB 界面裂纹扩展涉及双侧水泥基材料(NS-MPC 和 PCC), 不可避免地存在裂纹尖端的应力振荡, 因此采用能量释放率法^[31–32]计算 I 型、II 型以及 I/II 混合型断裂的 SIF, 计算公式如式(8)~式(17)所示:

$$\hat{G}_1 = \frac{1}{2}G + C \left[A_R (K_1^2 - K_2^2) - 2A_1 K_1 K_2 \right] \quad (8)$$

$$\hat{G}_2 = \frac{1}{2}G - C \left[A_R (K_1^2 - K_2^2) - 2A_1 K_1 K_2 \right] \quad (9)$$

$$G = \frac{1}{16} \left(\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} + \frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2} \right) (K_1^2 + K_2^2) \quad (10)$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{4A_R S + 4A_1^2 \frac{G}{F} \pm 4 \sqrt{\left(A_R S + A_1^2 \frac{G}{F} \right)^2 - (A_R^2 + A_1^2) S^2}}{8(A_R^2 + A_1^2)}} \quad (11)$$

$$K_2 = \frac{2A_R K_1^2 - S}{2A_1 K_1} \quad (12)$$

$$A = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\frac{1}{2} + i\varepsilon \right) \left(\frac{\Delta c}{4c} \right)^{-2i\varepsilon} \Gamma \left(\frac{1}{2} - i\varepsilon \right) / \Gamma(1 - i\varepsilon) \quad (13)$$

$$S = \frac{\hat{G}_1 - \hat{G}_2}{2C} + \frac{A_R G}{F} \quad (14)$$

$$C = \frac{\cosh(\pi\varepsilon)}{8(1+4\varepsilon^2)} \pi \left(\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} + \frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2} \right) \left(1 + \frac{\Delta c}{2c} \right) \quad (15)$$

$$F = \frac{1}{16} \left(\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} + \frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2} \right) \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{\left(\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} \right)}{\left(\frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_1} \right)} \right] \quad (17)$$

式中: $\hat{G}_1$ 和 $\hat{G}_2$ 为裂纹有限延伸时的应变能释放率; G 为总应变能释放率; $\Gamma()$ 是伽马函数; K_1 和 K_2 为应力强度因子; S 、 A 、 C 和 F 均为计算应力强度因子的参数; $A_R = \text{Re}(A)$, $A_1 = -\text{Im}(A)$ 分别表示复数的实部和虚部; $\kappa_i = \frac{3-\nu_i}{1+\nu_i}$, $\mu_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)}$, $i=1$ 或 2, 1 和 2 分别为 NS-MPC 和 PCC; ν 、 E 、 μ 和 x 分别为泊松比、弹性模量、剪切模量和参数; ε 是计算参数; $2c$ 是裂缝长度; Δc 裂缝扩展长度。

图 10 是 ASCB 试件的不同 a/R 与 K_{IC} 、 K_{IIC} 和 K_{eff} 的关系图。从图 10a 可以看出, 在 I 型和 I/II 混合型断裂模式下, a/R 与 K_{IC} 呈现逐渐增大的趋势, 随着 a/R 增大, II 型断裂模式下 K_{IC} 逐渐减小。从图 10b 可以看出, K_{IIC} 在 II 型断裂模式下随着 a/R 增大而逐渐增大, 而在 I 型和 I/II 混合型断裂模式下 K_{IIC} 逐渐减小。从图 10c 可以看出, 各断裂模式下 K_{eff} 随着 a/R 增大均逐渐增大。

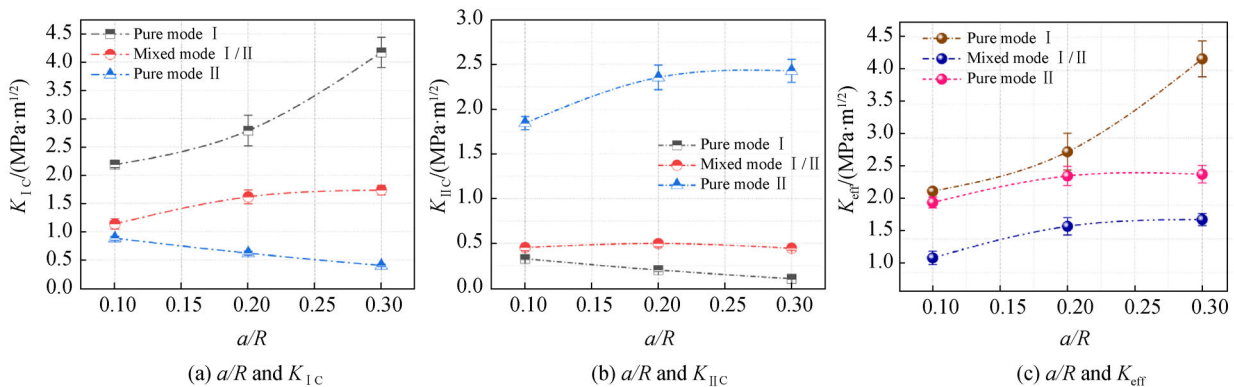


图 10 ASCB 界面断裂参数
Fig. 10 Relationship of ASCB interface fracture parameters

ASCB 试件混合断裂模式的包络图 K_{IC} 和 K_{IIC} 曲线如图 11 所示。从图 11 中纯 I 型和纯 II 型 NS-MPC/PCC 界面断裂的数据集表现出明显的各向

异性, 并且混合模态占据了数据集的中间区域。与图 11 中试验结果拟合最佳的非线性曲线为 NS-MPC/PCC 界面断裂的 K_{IC} 和 K_{IIC} 关系曲线, 如式

(18)所示, 该曲线以下为安全区域, 曲线以上为裂纹扩展。结合图中拟合曲线和断裂韧度值可以看出, 纯 I 型断裂韧度值几乎全在拟合曲线外, 这表明纯 I 型模式易引发界面断裂; 具有界面黏结强度最高的纯 II 型, 也有若干点处于拟合曲线外, 这些断裂韧度值均为 a/R 为 0.3 时的数值, 这表明裂缝长度越长越容易引起界面断裂。对于 I / II 混合型断裂下, a/R 越小则越不易引起断裂。上述分析结果与界面断裂试验和黏结强度发展趋势一致。

$$K_{IIc} = 0.1 + \frac{2.5}{1 + e^{\frac{K_{Ic} - 0.21}{dK_{Ic}}}} \quad (18)$$

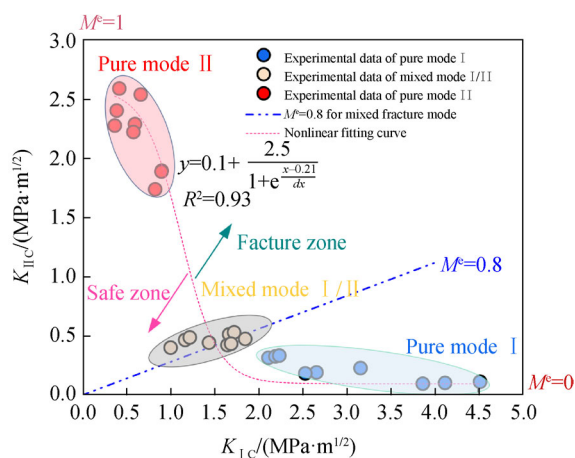


图 11 ASCB 断裂模式下 K_{Ic} 和 K_{IIc} 包络图、安全区域和断裂区域

Fig. 11 Envelope diagram, safety zone and fracture zone of K_{Ic} and K_{IIc} under ASCB fracture modes

图 12 为 ASCB 组合试件的混合断裂度 M^e 与有效断裂韧度 K_{eff} 的关系图。从图 12 中可以看出, 对于 M^e 的均值而言, 随着 M^e 的增加, K_{eff} 逐渐减小。对 M^e 与 K_{eff} 进行二次非线性拟合, 拟合精度 $R^2=0.93$, 用式(19)描述 M^e 与 K_{eff} 之间的关系。通过这一公式表达的关系可以进一步分析得到, ASCB 组合试件的最小断裂韧度值为 $0.564 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($M^e = 0.455$, 为 I / II 混合断裂模式), 在此条件下, 表明此时 NS-MPC/PCC 界面处于最不利的 I / II 型混合断裂状态。在该断裂模式下, 拉伸与剪切作用的耦合作用导致裂纹尖端应力场集中度最大, 从而促使裂纹更易萌生与扩展, 此时界面抗裂性能最低, 界面断裂破坏最显著。从工程意义上看, 识别界面的最不利断裂模式有助于在结构设计与材料选配过程中, 针对性地提高对应模式下的韧性储备; 从科学角度看, 该规律可证实 NS 通过改善界面致密度与化学结合来提升界面抗裂能力的机理。

$$K_{eff} = 2.29 - 7.58 \times M^e + 8.3 \times (M^e)^2 \quad (19)$$

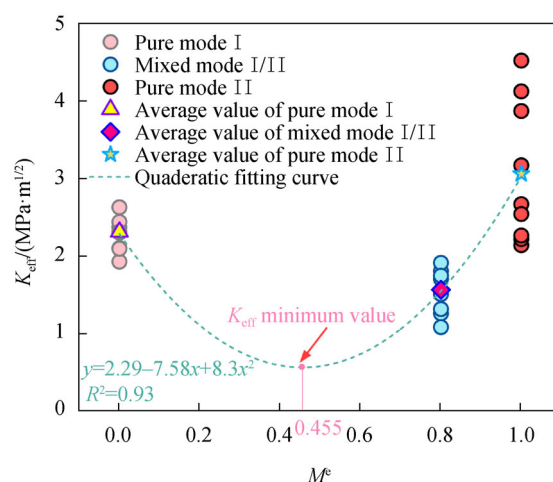


图 12 NS-MPC/PCC 界面断裂参数 M^e 与 K_{eff} 之间的关系
Fig. 12 Relationship between the fracture parameters M^e and K_{eff} at the NS-MPC/PCC interface

2.3 界面微观分析

NS-MPC/PCC 的界面微观结构形貌表征如图 13 所示。结合图 13a 和图 13b 可以清晰看到 NS-MPC 与 PCC 之间的界面内存在裂缝缺陷, 同时均匀介质粗骨料表面更光滑, 可以通过 EDS 观察到具有多相夹杂的 OPC 砂浆内分布不均匀。值得注意的是, NS-MPC 与骨料和 OPC 砂浆的界面内物质存在差异, 从图 13c 和图 13d 中可以明显看到, NS-MPC 与骨料的界面内有一些片状水化产物生成, 如类 MKP 晶体、钙磷硅共生物、类 C-S-H 等低晶凝胶相, 从 EDS 结果可以看出, 界面内的水化产物是由 Si 和 Mg 以及 P 元素构成, 其来源于 NS 以及以 P 和 Mg 的水化产物, 而且 Mg、K、P 等 MPC 组分元素在向 PCC 方向有一定程度的迁移。NS-MPC 与 OPC 砂浆的界面内裂缝较明显, 且没有 NS-MPC 与骨料间界面水化产物密实。在界面区可观察到特征性的混合水化产物, 证实了界面存在复合反应机制, 表明界面并非单纯物理接触, 而是形成了化学耦合型界面层。此类混合产物的存在强化了界面结合, 提高了界面黏结强度, 是纳米改性效果显著的重要佐证。总之, 分析结果充分揭示 NS-MPC 与 PCC 之间形成具有反应活性与结构连续性的界面。NS 通过提升界面反应活性、促进离子扩散与反应产物共生, 从而实现从物理接触到化学耦合的界面结构转变。该过程有效压缩了界面区域宽度, 增强了界面黏结强度与结构完整性, 为实现复合结构体系的高韧性与高可靠性提供了微观基础与理论支持。

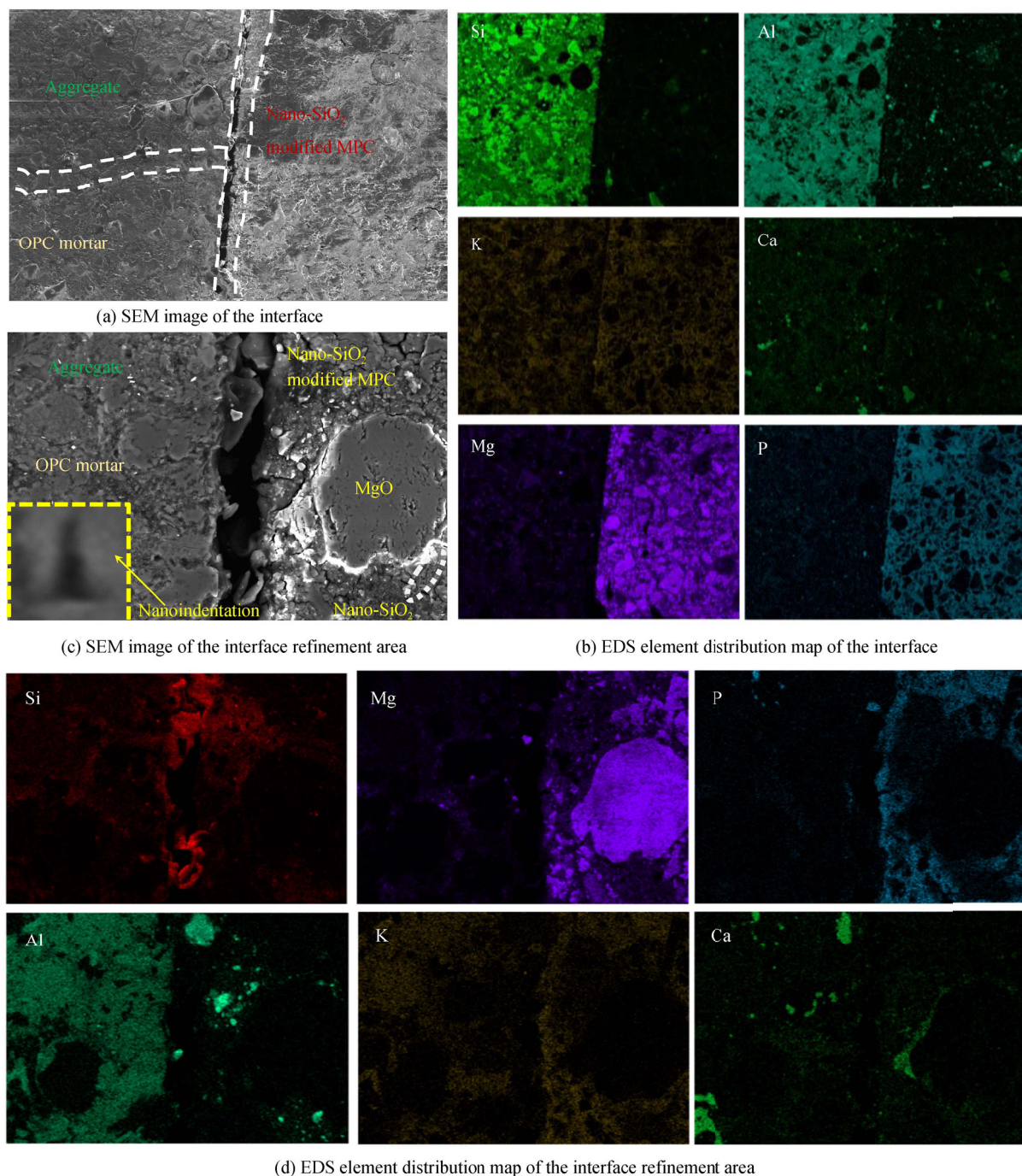


图 13 NS-MPC/PCC 界面微观结果分析

Fig. 13 Microscopic results analysis of the NS-MPC/PCC interface

3 结论

1) 经过正交试验分析得到, NS-MPC 的力学性能最佳配合比为: 镁磷质量比 2.5/1.0, 水灰比 0.14, 硼砂掺量为 8%, NS 的最佳掺量为 4%。该配比的 3 h、1 d、7 d 和 28 d 的抗压强度分别为 47.34、76.48、81.26 MPa 和 88.72 MPa, 抗折强度分别为 7.31、8.63、9.13 MPa 和 9.42 MPa。

2) 在纯 I 型、I/II 混合型和纯 II 型界面断裂模式下, 随着 a/R 比值不断增大, 界面黏结强度不断减小。各界面断裂模式下, 界面破坏峰值力与其对应的位移间呈非线性关系, 表明界面的非线性断裂特征。

3) 界面断裂参数分析结果表明, a/R 与 K_{IC} , K_{IIC} 和 K_{eff} 均存在非线性断裂特征。 K_{IC} 和 K_{IIC} 分别在纯 II 型和纯 I 型断裂模式下, 随着 a/R 逐渐增大

而减小; K_{IC} 和 K_{IIC} 分别在纯 I 型和纯 II 型断裂模式下, 随着 a/R 逐渐增大而增大, 符合双侧水泥基材料界面断裂特征。 K_{eff} 在不同断裂模式下随着 a/R 逐渐增大而增大。

4) NS-MPC/PCC 界面 K_{IC} 和 K_{IIC} 呈现非线性关系, 非线性断裂分析表明界面纯 I 型的断裂韧度值均处于断裂区域, 少量纯 II 型断裂韧度值在易断裂区域表明 a/R 越大越易引起界面断裂失效。部分 I / II 型混合断裂韧度值处于断裂区, 表明 NS-MPC/PCC 界面具有较强的抗裂性能。

5) 从混合断裂度与有效断裂韧度二次拟合关系得到, 混合断裂度为 0.455 时具有最低的有效断裂韧度, 为 $0.564 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 此时 NS-MPC/PCC 界面抗裂性能最低, 界面断裂破坏最显著。

6) SEM/EDS 结果表明, NS-MPC 与骨料的界面内有以 Si、P 和 Mg 的水化产物构成, NS 有明显的填充界面裂缝的作用, 使得整个界面区域的宽度约为 $18 \mu\text{m}$, 但在 NS-MPC 与 OPC 砂浆的界面中并不明显。

参考文献:

- [1] WALLING S A, PROVIS J L. Magnesia-based cements: A journey of 150 years, and cements for the future [J]. Chem Rev, 2016, 116(7): 4170–4204.
- [2] GARDNER L J, CORKHILL C L, WALLING S A, et al. Early age hydration and application of blended magnesium potassium phosphate cements for reduced corrosion of reactive metals[J]. Cem Concr Res, 2021, 143: 106375.
- [3] XU B W, WINNEFELD F, LOTHEBACH B. Effect of temperature curing on properties and hydration of wollastonite blended magnesium potassium phosphate cements[J]. Cem Concr Res, 2021, 142: 106370.
- [4] 秦继辉, 钱觉时, 宋庆, 等. 磷酸镁水泥的研究进展与应用[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(6): 1592–1606.
QIN Jihui, QIAN Jueshi, SONG Qing, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(6): 1592–1606.
- [5] LIU F, PAN B F, CAO P, et al. Multi-scale characterization on behaviors of the interface between magnesium phosphate cement and Portland cement[J]. Constr Build Mater, 2021, 275: 122139.
- [6] WANG R, SONG A X, CHEN X, et al. Experimental study on the properties of phosphate-based materials for rapid repair of concrete cracks[J]. KSCE J Civ Eng, 2022, 26(5): 2342–2353.
- [7] 李涛, 胡夏闽, 杨建明, 等. 磷酸钾镁水泥基材料与硅酸盐水泥混凝土的粘结性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(8): 2144–2150.
LI Tao, HU Xiamin, YANG Jianming, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2015, 34(8): 2144–2150.
- [8] 李明. 磷酸镁水泥基材料加固混凝土板受弯性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
LI Ming. Research on flexural behavior of RC slabs strengthened with magnesium phosphate cement based materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [9] QIAO F, CHAU C K, LI Z J. Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material[J]. Constr Build Mater, 2010, 24(5): 695–700.
- [10] LI Y, BAI W L, SHI T F. A study of the bonding performance of magnesium phosphate cement on mortar and concrete[J]. Constr Build Mater, 2017, 142: 459–468.
- [11] 杜玉兵, 曹德万, 荀勇, 等. 磷酸钾镁水泥砂浆与混凝土粘结抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(4): 35–38.
DU Yubing, CAO Dewan, XUN Yong, et al. Build Struct, 2017, 47(4): 35–38.
- [12] LIU F, PAN B F, ZHOU C J. Experimental study on a novel modified magnesium phosphate cement mortar used for rapid repair of Portland cement concrete pavement in seasonally frozen areas[J]. J Mater Civ Eng, 2022, 34(3): 04021483.
- [13] 范英儒, 秦继辉, 汪宏涛, 等. 磷酸盐对磷酸镁水泥粘结性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 218–225.
FAN Yingru, QIN Jihui, WANG Hongtao, et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(2): 218–225.
- [14] QIN J H, QIAN J S, YOU C, et al. Bond behavior and interfacial micro-characteristics of magnesium phosphate cement onto old concrete substrate[J]. Constr Build Mater, 2018, 167: 166–176.
- [15] JIA L, ZHAO F L, YAO K, et al. Bond performance of repair mortar made with magnesium phosphate cement and ferroaluminate cement[J]. Constr Build Mater, 2021, 279: 122398.
- [16] ZHANG S H, LI Q Y, YUAN Q, et al. Effect of roughness on bonding performance between Portland cement concrete and magnesium phosphate cement concrete[J]. Constr Build Mater, 2022, 323: 126585.
- [17] WANG X Y, DONG S F, LI Z M, et al. Nanomechanical characteristics of interfacial transition zone in nano-engineered concrete[J]. Engineering, 2022, 17: 99–109.
- [18] JIANG L B, WANG Z, XU H Z, et al. Nanoparticle stabilized carbon dioxide foam: Improving hydration, carbonation and pore structure of foamed concrete[J]. Compos Part B Eng, 2025, 305: 112714.
- [19] JIA L, JIA W W, GUO J, et al. Nano-silica-enhanced high-performance magnesium phosphate cement repair mortars: Optimization of interfacial bonding[J]. Constr Build Mater, 2025, 490: 142447.
- [20] HOSAN A, SHAIKH F U A, SARKER P, et al. Nano- and micro-scale characterisation of interfacial transition zone (ITZ) of high volume slag and slag-fly ash blended concretes containing nano SiO_2 and nano CaCO_3 [J]. Constr Build Mater, 2021, 269: 121311.
- [21] NAJI GIVI A, ABDUL RASHID S, AZIZ F N A, et al. Experimental investigation of the size effects of SiO_2 nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete[J]. Compos Part B Eng, 2010, 41(8): 673–677.
- [22] XU J, CORR D J, SHAH S P. Nanomechanical investigation of the effects of nano SiO_2 on C–S–H gel/cement grain interfaces[J]. Cem Concr Compos, 2015, 61: 7–17.
- [23] YUAN X Z, TIAN Y Z, LIU Q L, et al. K_{IC} and K_{IIC} measurement for hot mix asphalt mixtures at low temperature: Experimental and theoretical study using the semicircular bend specimen with different thicknesses[J]. Fatigue Fract Eng Mater Struct, 2021, 44(3): 832–846.
- [24] GUO T F, LIU K W, SONG R T. Crack propagation characteristics and fracture toughness analysis of rock-based layered material with pre-existing crack under semi-circular bending[J]. Theor Appl Fract Mech, 2022, 119: 103295.
- [25] LIU F, PAN B F, ZHOU C J, et al. A novel insight into the interface fracture between magnesium phosphate cement mortar and cement concrete[J]. Int J Pavement Eng, 2023, 24(1): 2220062.

- [26] NIE Y, XIE T Y, CHEN G M, et al. A 2D generic multi-surface cohesive zone model for simulating FRP-to-concrete mixed-mode debonding failure[J]. *Compos Struct*, 2022, 296: 115890.
- [27] LIU F, PAN B F, ZHOU C J, et al. Mixed mode fracture properties of interface for composite MPC and cement concrete specimen with asymmetric semicircular bending beam[J]. *Eng Fract Mech*, 2024, 306: 110196.
- [28] HUANG B S, SHU X, TANG Y J. Comparison of semi-circular bending and indirect tensile strength tests for HMA mixtures[C]// *Advances in Pavement Engineering*. Austin, Texas, USA. American Society of Civil Engineers, 2005: 1-12.
- [29] 刘宇, 张肖宁. 沥青混合料半圆弯拉强度与间接拉伸强度对比分析[J]. *公路交通技术*, 2011, 27(3): 34–37.
LIU Yu, ZHANG Xiaoning. *Technol Highw Transp*, 2011, 27(3): 34–37.
- [30] AYATOLLAHI M R, ALIHA M R M. Fracture toughness study for a brittle rock subjected to mixed mode I/II loading[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2007, 44(4): 617–624.
- [31] SUN C T, QIAN W. The use of finite extension strain energy release rates in fracture of interfacial cracks[J]. *Int J Solids Struct*, 1997, 34(20): 2595–2609.
- [32] SUN C T, JIH C J. On strain energy release rates for interfacial cracks in bi-material media[J]. *Eng Fract Mech*, 1987, 28(1): 13–20.

作者贡献声明:

刘 飞: 提出研究方向、设计论文框架、绘制图表、参与数据分析、撰写论文

王宝民: 完善论文框架, 修订论文

仇艺诺: 实验测试、参与数据分析

安 星: 实验测试、绘制图表、参与数据分析与论文撰写

Interfacial Fracture of Magnesium Phosphate Cement Paste and Portland Cement Concrete

LIU Fei, WANG Baomin, QIU YINUO, AN XING

(School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Extended Abstract

Introduction Magnesium phosphate cement (MPC) has attracted recent attention due to its rapid setting, high early strength, and excellent bonding performance, making it a promising material for rapid repair and strengthening of concrete structures. In composite repair systems, the interfacial behavior between MPC-based repair materials and Portland cement concrete (PCC) substrates plays a decisive role in the overall structural performance, durability, and failure mode. However, the interface between MPC and PCC is often characterized by microstructural heterogeneity, the mismatch of mechanical properties, and the presence of initial defects, significantly reducing interfacial fracture resistance, especially under complex loading conditions. Nano-modification is widely recognized as an effective strategy to enhance the mechanical properties and microstructure of cement-based materials. Nanoparticles of silica (NS) can accelerate hydration, refine pore structure, and improve interfacial bonding through physical filling and chemical coupling effects due to its extremely high specific surface area and high pozzolanic reactivity. Despite extensive studies on the mechanical performance and modification mechanisms of NS-modified MPC (NS-MPC), systematic investigations on the interfacial fracture behavior between NS-MPC and PCC under mixed-mode loading conditions remain limited. It is thus essential to clarify the interfacial fracture mechanism and fracture resistance of NS-MPC/PCC systems under different fracture modes. In this study, asymmetric semi-circular bending beam (ASCB) specimens were employed to comprehensively investigate the mixed-mode interfacial fracture behavior of NS-MPC/PCC interface. The combined effects of initial crack length and fracture mix on the interfacial bonding strength, fracture parameters and nano-modification were investigated.

Methods NS-MPC was prepared with dead-burned magnesia (M), potassium dihydrogen phosphate (P), NS, borax retarder (Bo), and deionized water (W). An orthogonal experimental design L₉(3⁴) was adopted to optimize the mix proportion, considering four factors (*i.e.*, Mg/P mass ratio, water-to-cement ratio (W/C), borax content (Bo/M), and NS content (NS/C)). The compressive and flexural strengths at 3 h and 1 d were selected as evaluation indices. According to the standard GB/T 17671—2021, the specimens NS-MPC of 40 mm × 40 mm × 160 mm were prepared to conduct flexural and compressive strength tests. Based on the results of orthogonal analysis, the optimal mix proportion of NS-MPC was determined and further compared with conventional MPC at different curing ages.

The interfacial fracture performance was evaluated by ASCB test, and the pure mode I, pure mode II and mixed mode I/II fracture were achieved *via* adjusting the support position. Different crack length ratios (*i.e.*, $a/R=0.1, 0.2$, and 0.3) and mixed mode parameters were selected to systematically investigate the mechanical response of the NS-MPC/PCC interface under different fracture modes. The geometric factors of the ASCB specimens were calibrated by the finite element method to achieve the quantitative analysis of the interfacial fracture parameters.

The microstructure and elemental composition of the interface were characterized by scanning electron microscopy/energy dispersive spectroscopy (SEM/EDS). After the samples were dried at a low temperature to terminate hydration and treated for conductivity, the interface morphology and the distribution characteristics of hydration products were analyzed under high vacuum conditions.

Results and discussion Based on the results of orthogonal experimental design, the mechanical properties of NS-MPC are systematically investigated. The optimal mix is determined to be M/P of 2.5/1, W/C of 0.14, Bo/M of 0.08, and NS/C of 0.04. NS-MPC exhibits significantly enhanced mechanical properties. The compressive and flexural strengths at 3 h increase to 47.3 MPa and 7.3 MPa, respectively, and increase to 76.5 MPa and 8.6 MPa at 1 d. From 7 to 28 d, the compressive strength increases slowly from 81.3 MPa to 88.7 MPa, and the flexural strength increases from 9.1 MPa to 9.4 MPa, which still maintains a high value. The flexural-to-compressive strength ratio of NS-MPC is 9%, which is higher than that of pure MPC (*i.e.*, 5%). It is indicated that NS can improve the strength and the toughness.

The interface bonding strength of NS-MPC/PCC decreases with the increase of a/R . This is consistent across all the fracture modes (*i.e.*, pure mode I, pure mode II, and mixed mode I/II). The interface bonding strength corresponding to pure mode II fracture is the maximum value, while that of pure mode I is the minimum value. The force-displacement response shows that the interface fracture process is dominated by brittle failure. The increase of crack length significantly reduces the peak load-bearing capacity and deformation ability, and promotes the crack to expand dominantly from the interface to bend and branch, especially at larger a/R rates.

The fracture parameter analysis indicates that the interface fracture toughness is highly sensitive to the fracture modes and a/R . As the mix of fracture increases, the effective fracture toughness shows an overall downward trend. The most unfavorable fracture condition occurs in the mixed mode I/II fracture, where the interface crack resistance is the lowest. Pure mode I fracture causes a damage to the interface, and the larger crack length significantly weakens the crack resistance of the pure mode II interface.

The microscopic analysis reveals that the interface of approximately 20 μm wide is formed between NS-MPC and PCC. The hydration products K-struvite can occur in the interface. Moreover, elements Mg, P, and Si appear certain degrees of infiltration and enrichment on the both sides of the interface. The addition of NS effectively improves the interface reaction activity and microstructure densification.

Conclusions NS-MPC demonstrated significantly enhanced compressive and flexural strength, indicating that NS could effectively promote the hydration reaction and structural densification. The results of the ASCB test indicated that the bonding strength of the NS-MPC/PCC interface decreased as a/R increased. The interface fracture process showed a significant nonlinear characteristic. The pure mode I fracture was the most unfavorable. The mixed fracture analysis revealed the nonlinear relationship between the effective fracture toughness and the mixity of fracture. The SEM images and EDS spectra further confirmed that NS enhanced the chemical bonding and crack resistance at the interface *via* promoting the formation and filling of Si-P-Mg composite hydration products in the interface.

Keywords magnesium phosphate cement; nano-silica; asymmetric semi-circular bending beam; interface fracture; stress intensity factor