

文章编号:1671-6833(2026)01-0095-07

纳米 SiO₂ 和混杂纤维增强 ECRM 粘结特性研究

王文帅¹, 张鹏¹, 尉晓雪², 吴靖江², 张承实²

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 中建七局交通建设有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 为了制备出高性能的环氧树脂水泥基修复材料(ECRM), 有效解决大坝裂缝修复问题, 通过界面弯拉强度试验分析了环氧树脂、纳米 SiO₂ 和钢-PVA 混杂纤维的掺量对水泥基修复材料粘结性能的影响, 通过扫描电子显微镜试验揭示了水泥基修复材料粘结性能的增强机理。研究表明: 随着环氧树脂、钢纤维和 PVA 纤维掺量的增加, 水泥基修复材料的界面弯拉强度均呈现先升高后降低的变化趋势。当环氧树脂的掺量为 9% (质量分数, 下同), PVA 纤维的体积掺量为 0.9% (体积分数, 下同) 和钢纤维的体积掺量为 1.2% 时, 水泥基修复材料的界面弯拉强度达到最大, 此时相比于基准组 (未掺环氧树脂、纳米 SiO₂、PVA 纤维和钢纤维) 提升了 68.2%; 随着纳米 SiO₂ 的掺量从 0 增加到 2.0%, 水泥基修复材料的界面弯拉强度逐渐增大, 增幅为 14.7%; 相比于掺加纳米 SiO₂、钢纤维或 PVA 纤维, 掺加环氧树脂对水泥基修复材料粘结性能的提升效果更加显著。水泥基修复材料粘结性能的微观增强机理可归结为环氧树脂和钢-PVA 混杂纤维的掺入能够抑制基体内裂缝的产生和扩展, 提高基体的整体性。纳米 SiO₂ 的掺入能够减少基体内部的孔洞缺陷, 提高基体的密实度。

关键词: 纳米 SiO₂; 混杂纤维; 环氧树脂; 界面弯拉强度; 增强机理

中图分类号: TU528.58; TU502; TV431.3

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.04.025

受环境侵蚀、材料劣化及结构设计缺陷耦合作用影响, 中国早期水工混凝土建筑物普遍存在耐久性退化问题, 亟待研发具有高适应性水泥基修复材料。现行修复体系按材料组分可分为三类^[1]: 有机类修复材料具备优异抗渗性能与耐化学侵蚀性, 但存在界面相容性差及长期老化问题; 无机类修复材料虽经济性强且力学性能突出, 却受限于收缩变形大, 与基体粘结薄弱等缺陷; 有机-无机复合材料通过组分协同效应实现性能互补, 已成为工程应用的主流解决方案。

环氧树脂是常用的有机类混凝土修复材料, 能在水环境和高碱度环境中固化。环氧树脂经固化剂的催化作用后, 可在水泥基质中形成具有三维网络拓扑的薄膜结构。该聚合物网络通过界面键合作用与水化硅酸钙凝胶形成互穿结构, 能够有效填充毛细孔隙, 从而优化复合材料孔隙分布, 显著提升体系体积稳定性及渗透阻力。此外, 环氧树脂水泥基修

复材料(ECRM)还具有优良的粘结性能和较好的耐候、耐磨、耐腐蚀性能, 因而被广泛应用于混凝土修复。然而, 环氧树脂的分子结构会阻碍水化产物的形成过程, 进而影响修复材料的力学性能发展。由于纳米 SiO₂ 能够促进水泥水化, 增加水化硅酸钙凝胶的生成量, 因此, 在 ECRM 中掺入纳米 SiO₂ 能够有效消除或削弱环氧树脂对水泥基材料的负面影响^[2-3]。针对开裂混凝土的修复, 若修复材料能够提供较好的韧性和抗裂能力, 则可以最大程度地避免混凝土的二次开裂, 从而提升修复效果^[4]。目前常用的提高水泥基材料韧性和抗裂能力的措施是向水泥基材料中掺加纤维^[5]。钢纤维的高弹性模量和抗拉强度特性能显著提升混凝土的强度和韧性。但是密度大、成本高的特性也会增加混凝土的自重和造价。聚乙烯醇(PVA)纤维自重轻、成本低、尺寸较小的特性能降低混凝土的自重和造价, 减少早期塑性收缩产生的裂缝数量, 但是对混凝土强

收稿日期: 2025-04-03; **修订日期:** 2025-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278283); 河南省杰出青年科学基金资助项目(212300410018)

作者简介: 王文帅(1997—), 男, 河南周口人, 郑州大学博士研究生, 主要从事新型水泥基建筑材料研究, E-mail: wang_ws7@163.com。

通信作者: 张鹏(1978—), 男, 河南方城人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事新型水泥基建筑材料研究, E-mail: zhangpeng@zzu.edu.cn。

引用本文: 王文帅, 张鹏, 尉晓雪, 等. 纳米 SiO₂ 和混杂纤维增强 ECRM 粘结特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2026, 47(1): 95-101, 123. (WANG W S, ZHANG P, WEI X X, et al. Study on the bonding properties of nano-SiO₂ and hybrid fiber reinforced ECRM[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2026, 47(1): 95-101, 123.)

度的提升效果不明显。钢-PVA 混杂纤维能够实现分级抑制微裂纹萌生、扩展及贯通等破坏过程,在保证结构性能的同时具有较好的经济效益。因此,纳米 SiO_2 和钢-PVA 混杂纤维混合掺入到环氧树脂水泥基修复材料中能最大限度地发挥其修复效果。

本文旨在系统探究纳米 SiO_2 与钢-PVA 混杂纤维增强环氧树脂水泥基修复材料(NF-ECRM)的粘结性能。通过多因素变量分析,揭示环氧树脂、纳米 SiO_2 及混杂纤维掺量对 NF-ECRM 粘结强度的宏观影响规律及微观增强机理,为 NF-ECRM 的工程应用提供理论依据。

1 试验方案

1.1 试验原材料

试验原材料包括:P·I 42.5 基准水泥;20~40 目石英砂;环氧树脂乳液和环氧树脂固化剂(主要技术参数见表 1);比表面积 $220 \text{ m}^2/\text{kg}$ 、平均粒径 30 nm 的纳米 SiO_2 ;平均直径 $40 \mu\text{m}$ 、长度 12 mm、抗拉强度 1 560 MPa 的 PVA 纤维;平均直径 0.21 mm、长度 13 mm、抗拉强度 2 750 MPa 的镀铜钢纤维微丝;有机硅消泡剂(主要技术参数见表 2);高效减水剂(各项指标见表 3)。

表 1 环氧树脂乳液和固化剂的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of epoxy resin emulsion and curing agent

原材料	固含量/%	固体当量	pH	相对密度	黏度/ ($\text{MPa}\cdot\text{s}$)
环氧树脂乳液	50±3	400~800	2~7	1.01~1.08	<1 000
环氧树脂固化剂	44±2	260±60	8~11	1.00~1.08	>2 000

表 2 消泡剂的主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of defoaming agent

活性含量/%	pH	黏度/ ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	耐热温度/ $^{\circ}\text{C}$	稳定性
≥30	7±1	800~1 200	≤100	无分层

表 3 减水剂的主要指标

Table 3 Main index of superplasticizer

固含量/%	减水率/%	pH	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	坍落度 1 h 经时 变化量/mm
20.05	27	4.75	1.053	35

1.2 试验配合比

依据文献[6]成果和大量试配试验结果,本文试验的水胶比为 0.5,胶砂比为 1:2.5。如表 4 所示,本文采用单因素变量控制法,分别探究环氧树脂

表 4 NF-ECRM 的配合比

Table 4 Mix proportions of NF-ECRM

试验编号	水泥/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	石英砂/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	环氧树 脂/%	纳米 SiO_2 /%	PVA 纤 维/%	钢纤 维/%	消泡 剂/%	减水剂 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
M	580.0	1 276	290.0	0	0	0	0	0	14.5
E03	580.0	1 276	262.9	3	0	0	0	1.2	14.5
E06	580.0	1 276	235.7	6	0	0	0	1.2	14.5
E09	580.0	1 276	208.6	9	0	0	0	1.2	14.5
E12	580.0	1 276	181.4	12	0	0	0	1.2	14.5
E03N15P09S12	571.3	1 276	262.9	3	1.5	0.9	1.2	1.2	14.5
E06N15P09S12	571.3	1 276	235.7	6	1.5	0.9	1.2	1.2	14.5
E09N15P09S12	571.3	1 276	208.6	9	1.5	0.9	1.2	1.2	14.5
E12N15P09S12	571.3	1 276	181.4	12	1.5	0.9	1.2	1.2	14.5
E09N0P09S12	580.0	1 276	208.6	9	0	0.9	1.2	1.2	14.5
E09N05P09S12	577.1	1 276	208.6	9	0.5	0.9	1.2	1.2	14.5
E09N10P09S12	574.2	1 276	208.6	9	1.0	0.9	1.2	1.2	14.5
E09N20P09S12	568.4	1 276	208.6	9	2.0	0.9	1.2	1.2	14.5
E09N15P0S12	571.3	1 276	208.6	9	1.5	0	1.2	1.2	14.5
E09N15P03S12	571.3	1 276	208.6	9	1.5	0.3	1.2	1.2	14.5
E09N15P06S12	571.3	1 276	208.6	9	1.5	0.6	1.2	1.2	14.5
E09N15P12S12	571.3	1 276	208.6	9	1.5	1.2	1.2	1.2	14.5
E09N15P09S0	571.3	1 276	208.6	9	1.5	0.9	0	1.2	14.5
E09N15P09S04	571.3	1 276	208.6	9	1.5	0.9	0.4	1.2	14.5
E09N15P09S08	571.3	1 276	208.6	9	1.5	0.9	0.8	1.2	14.5
E09N15P09S16	571.3	1 276	208.6	9	1.5	0.9	1.6	1.2	14.5

(3%~12%,质量分数,下同)、纳米 SiO₂(0.5%~2.0%,质量分数,下同)、PVA 纤维(0.3%~1.2%,体积分数,下同)及钢纤维(0.4%~1.6%,体积分数,下同)4 种组分在不同掺量水平下对 NF-ECRM 界面粘结性能的影响规律。其中,环氧树脂采用质量外掺法,纳米 SiO₂ 通过等质量替代水泥的方式引入,混杂纤维按体积外掺法添加。所有试验组均固定掺入 0.5%(质量分数,下同)减水剂以保证良好的工作性能,具体配合比设计见表 4(编码规则:M 为基准组,E 为环氧树脂,N 为纳米 SiO₂,P 为 PVA 纤维,S 为钢纤维,数字表示掺量百分比)。例如,E03N15P09S12 代表该组试件环氧树脂的掺量为 3%,纳米 SiO₂ 掺量为 1.5%,PVA 纤维掺量为 0.9%,钢纤维掺量为 1.2%。

1.3 试件制备及试验方法

本文试验的试件制备工艺如图 1 所示。试验参考 JC/T 2381—2016《修补砂浆》^[7] 和徐奎生^[8] 的试验方法,将界面弯拉强度作为修复材料粘结性能的评价指标,每组配合比采用 6 个尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体。具体试验步骤如下。

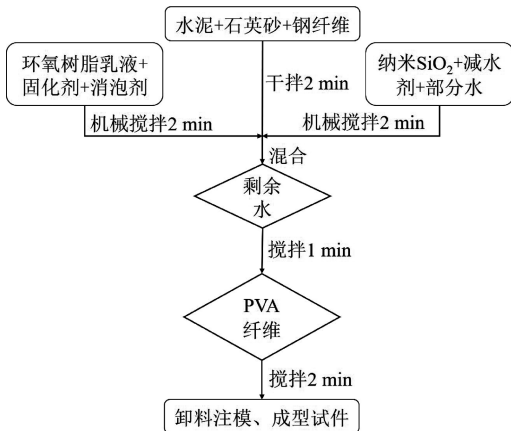


图 1 试件制备工艺

Figure 1 Preparation technology of specimens

(1) 基准水泥、石英砂、水的质量按照 1:2.5:0.5 的比例进行混和搅拌,随后将拌和物装入尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 模具中,脱模后放入标准养护室内养护 28 d。

(2) 将养护完成的基准试件用水泥胶砂抗折试验机压断,清除试件断面上松动的骨料和浆体,并使用钢丝刷对试件断面进行粗糙处理。修复前将基准试件放入水中浸泡 6 h。

(3) 将基准试件放入三联模的一侧,在另一侧倒入新拌修复材料,成型 1 d 后脱模得到粘结试件。

(4) 将粘结试件放入标准养护室养护 28 d 后测试粘结试件的界面弯拉强度,试验试件及试验示意

图如图 2 所示。结果取 6 个界面弯拉强度测试值的平均值。

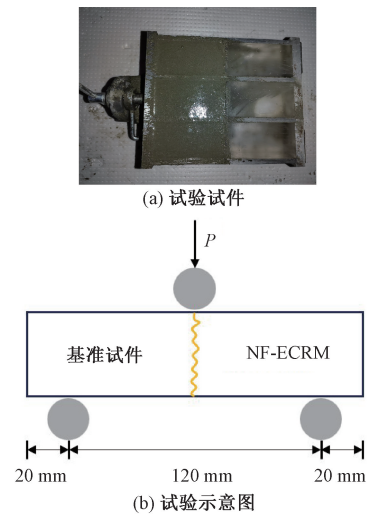


图 2 试验试件及粘结性能试验示意图

Figure 2 Test specimen and bonding properties test diagram

2 分析与讨论

2.1 试件破坏形态

图 3(a)~3(c) 展示了基准组和 ECRM 试件破坏后的粘结界面形态。当施加荷载达到峰值时,试件会突然破坏并断成两部分,且破坏位置均在粘结界面处,试件破坏过程中表现出明显的脆性破坏特征。对比试件的破坏界面可以观察到,基准组试件的破坏界面相对光滑,界面表面仅存在少量浮浆。掺加环氧树脂后,试件界面处存在的修复材料增多,粘结界面的破损也更加明显。图 3(d) 和图 3(e) 展示了 NF-ECRM 试件破坏后的粘结界面形态。在试验加载初期试件表面无明显裂缝。随着荷载的增加,试件侧面粘结界面处首先出现微裂缝,随后裂缝沿着粘结界面慢慢扩展,直至试件断开。破坏试件的粘结表面均分布有少量的 PVA 纤维和钢纤维。此外,随着纳米 SiO₂ 或混杂纤维掺量的增加,粘结界面的粗糙度均逐渐增大。

2.2 环氧树脂对修复材料粘结性能的影响

图 4 展示了不同掺量的环氧树脂对 ECRM 和 NF-ECRM 界面弯拉强度的影响。

从图 4 可以看出,ECRM 和 NF-ECRM 的界面弯拉强度随着环氧树脂掺量的增加均呈先升高后降低的变化规律。ECRM 和 NF-ECRM 界面弯拉强度的峰值均在环氧树脂的掺量为 9% 时达到,此时相比于基准组分别提升了 38.1% 和 68.2%。对于 NF-ECRM 试件而言,当环氧树脂的掺量为 3%,6%,12% 时,修

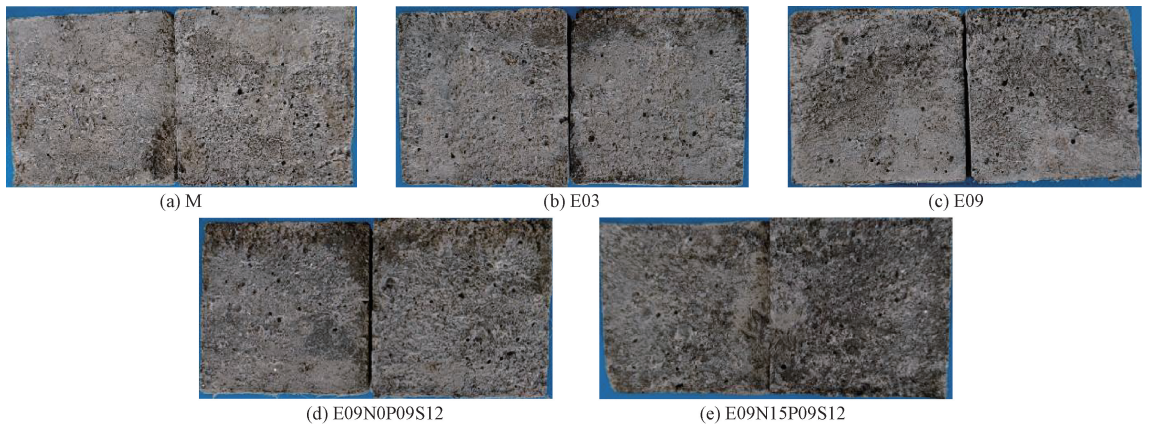


图3 试件粘结界面破坏形态

Figure 3 Failure morphology of specimen bonding interface

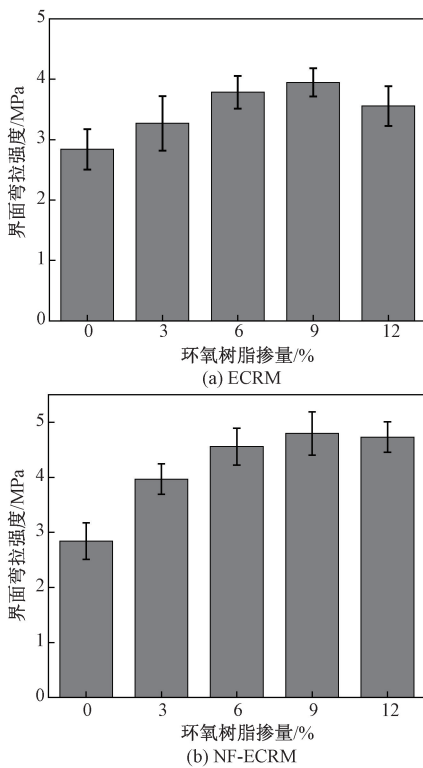


图4 环氧树脂掺量对修复材料界面弯拉强度的影响

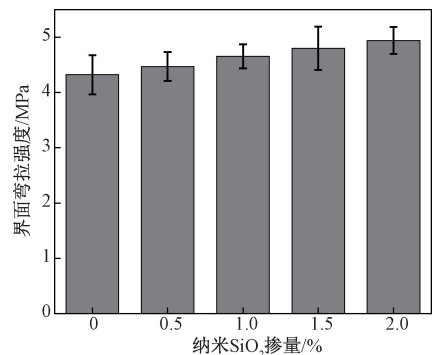
Figure 4 Effect of epoxy resin content on interface flexural bonding strength of repair materials

修复材料的界面弯拉强度相比于基准组分别提高了39.2%、58.0%、65.0%。由此可知,环氧树脂的掺入可以显著改善修复材料的粘结性能。这是因为环氧树脂颗粒能够通过扩散作用渗入基准试件的内部孔隙,并且环氧树脂能在固化剂的作用下固化成聚合物膜,从而改善界面处基体的韧性。随着环氧树脂掺量的增加,基体内聚合物膜的分布更加均匀,这种现象可以通过扫描电子显微镜(SEM)图像观察到。当试件受到荷载作用时,聚合物膜能够产生微裂纹以释放应力。此外,环氧树脂能通过氢键、离子键等化学键与基准试件界面处的水化产物相粘结,进而

提高了界面弯拉强度^[9-10]。然而随着环氧树脂掺量的进一步增加,浆体中环氧树脂的含量过高,固化后形成了较厚的聚合物膜,影响了水泥骨架的形成,导致界面弯拉强度降低^[11]。对比相同掺量环氧树脂的 ECRM 和 NF-ECRM 试件的界面弯拉强度可知, NF-ECRM 试件的界面弯拉强度总是高于 ECRM 试件的界面弯拉强度。当环氧树脂的掺量为9%时,掺加纤维的环氧树脂水泥基修复材料的界面抗拉强度相比于未掺纤维的提高了21.8%。显然,在环氧树脂水泥基修复材料中掺加混杂纤维会进一步改善其粘结性能,环氧树脂能够和纤维发挥协同增强作用。

2.3 纳米 SiO₂ 对修复材料粘结性能的影响

图5展示了纳米 SiO₂ 的掺量对修复材料界面弯拉强度的影响。

图5 纳米 SiO₂ 掺量对 NF-ECRM 界面弯拉强度的影响Figure 5 Effect of nano-SiO₂ content on interface flexural bonding strength of NF-ECRM

从图5中可以看出,随着纳米 SiO₂ 掺量的增加, NF-ECRM 的界面弯拉强度逐渐增大。与纳米 SiO₂ 掺量为0的试件相比,纳米 SiO₂ 掺量为0.5%、1.0%、1.5%和2.0%的修复材料的界面弯拉强度分别提升了4.2%、8.4%、12.1%和14.7%。由此可知,纳米 SiO₂ 的掺入有利于提升修复材料的界面弯

拉强度。这是因为具有火山灰活性的纳米 SiO₂ 能与基准试件中的 Ca(OH)₂ 反应生成 C—S—H 凝胶,增加了基体内的凝胶含量。凝胶含量的增加能够在 SEM 图像中直观地观察到。凝胶一方面能对粘结界面的孔隙起到填充作用,从而提高了界面处基体的致密性;另一方面,凝胶能改善粘结界面的界面过渡区特性,从而提高了 NF-ECRM 的粘结性能。此外,纳米 SiO₂ 的小尺寸特性也可以填充粘结界面的微小缝隙,从而增强了修复材料与基准试件表面的机械咬合力^[12]。

2.4 混杂纤维对修复材料粘结性能的影响

图 6 展示了混杂纤维中的 PVA 纤维掺量变化时,NF-ECRM 的界面弯拉强度的变化趋势。

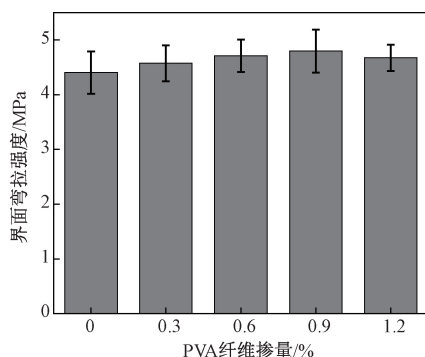


图 6 PVA 纤维掺量对 NF-ECRM 界面弯拉强度的影响

Figure 6 Effect of PVA fiber content on interface flexural bonding strength of NF-ECRM

从图 6 中可以看出,当环氧树脂和纳米 SiO₂ 掺量固定,且掺加了 1.2% 钢纤维时,随着 PVA 纤维掺量的增加,NF-ECRM 的界面弯拉强度呈先升高后降低的变化规律。当 PVA 纤维的掺量增加到 0.9% 时,NF-ECRM 的界面弯拉强度达到峰值,此时相较于未掺 PVA 纤维的界面弯拉强度提高了 9.8%,与乔庆浩等^[13] 研究结果趋势一致。造成上述现象的原因是:PVA 纤维是一种吸水性较强的纤维,表面会聚集大量水化产物,截断水分蒸发的通道,从而限制了基体的收缩,并抑制了粘结界面的收缩裂缝的发展^[14]。然而,纤维掺量过高时,PVA 纤维易与钢纤维缠绕结团。此外,包裹纤维的浆体也会减少,无法有效发挥纤维的桥接作用,导致 NF-ECRM 的界面弯拉强度降低。

图 7 展示了混杂纤维中的钢纤维掺量变化时,NF-ECRM 的界面弯拉强度的变化趋势。

从图 7 中可以看出,当环氧树脂和纳米 SiO₂ 掺量固定,且掺加了 0.9% PVA 纤维时,随着钢纤维掺量的增加,NF-ECRM 的界面弯拉强度呈先升高后降低的变化规律。与未掺钢纤维的试件相比,钢纤维

掺量为 0.4%,0.8%,1.2% 和 1.6% 的界面弯拉强度分别提升了 4.1%,6.1%,8.3% 和 6.5%。钢纤维对修复材料的界面弯拉强度起到了一定的提升作用,主要归因于以下两方面:第一,掺加的钢纤维会在基体内部交错分布,形成网状结构,当受到荷载作用时会传递和分散应力,且能够有效限制基体的收缩,减少粘结界面的收缩裂缝^[15-16];第二,钢纤维能够嵌入基准试件界面处的粗糙面,当受到荷载作用时能够提供一定的摩擦阻力,提高了修复材料的粘结性能。值得一提的是,相比于环氧树脂掺量变化的配比组,纤维掺量变化的水泥基修复材料的界面弯拉强度的增长幅度相对较小。从经济性的角度考虑,采用纤维会增加复合材料的制备成本。然而,水泥基修复材料对于性能的要求是多方面的,修复材料不但要具备优异的粘结性能,还要具备较高的弯曲韧性。

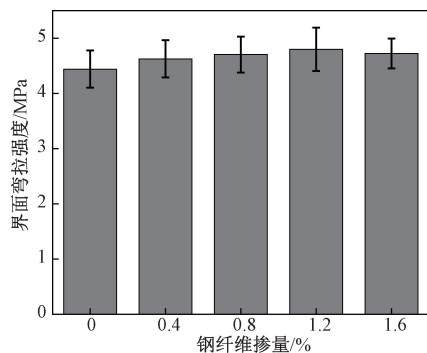


图 7 钢纤维掺量对 NF-ECRM 界面弯拉强度的影响

Figure 7 Effect of steel fiber content on interface flexural bonding strength of NF-ECRM

2.5 增强机理分析

基于以上宏观性能的分析结果可知,环氧树脂、纳米 SiO₂ 和混杂纤维的掺入对 NF-ECRM 粘结性能的提升是有利的。为进一步从微观形貌层面揭示性能的增强机理,本文开展了 SEM 微观试验,试验结果如图 8 所示。图 8(a) 展示了基准组试件基体表面的微观形貌,具体表现为基体表面整体结构松散,水化产物较少,孔洞缺陷较多,能明显观察到几条长裂缝。基准组试件基体内部较多的缺陷和松散结构使得其粘结界面的性能较差^[17]。掺加环氧树脂后,水泥基修复材料的基体内部能观察到大量的聚合物膜,如图 8(b) 所示。覆盖在基体表面的聚合物膜能够一定程度上抑制微裂纹的产生和扩展。另一方面,起填充作用的环氧树脂颗粒能够黏附基体内的水化产物,从而减小基体的孔洞数量及尺寸。随着环氧树脂掺量的增加,聚合物膜覆盖的区域逐渐增多,从而显著提升了基体致密性和整体性,如图

8(c)所示。由于纳米 SiO_2 的火山灰特性,图 8(d)中能观察到较多的水化产物,基体表面的孔洞缺陷显著减少,基体结构的致密性较好。纤维和纳米 SiO_2 在基体内部的分散程度影响着增强材料对水泥基修复材料粘结特性的增强效果:当纤维掺量较少,纳米 SiO_2 的掺量较多时,纤维之间的间距较大,纤维表面的凝胶含量较多,如图 8(e)所示。保持纳米 SiO_2 的掺量不变,随着纤维掺量的增加,纤维之间的间距减小,各纤维在基体内部交错分布,有效抑制了裂缝的产生和扩展,增加了基体的整体性。然而,纤维表面的凝胶含量显著减少,这可能与较高掺量的纤维降低了拌和物的工作性能,导致纳米 SiO_2 的分散程度降低有关^[18],如图 8(f)所示。Mohammadalipour 等^[19]通过 X 射线衍射试验探究了纳米粒子、纤维和环氧树脂的掺入对复合材料界面性能的影响。研究表明,纳米粒子的掺入能够显著提升纤维/环氧树脂复合材料的界面剪切强度和粘结性。Hu 等^[20]采用计算机断层扫描试验探究了纳米 SiO_2 和纤维复合掺入到工程水泥基复合材料中对其微观结构的影响。研究表明,适当掺量组合的纳米 SiO_2 和纤维能够优化基体内的孔隙结构,充分发挥基体与纤维之间的粘结作用。综上所述,环氧树脂、纳米 SiO_2 和纤维的掺入能够有效抑制基体内裂缝的产生和扩展,减少基体内的缺陷数量,提高结构的致密性和整体性,这是 NF-ECRM 粘结性

能较好的主要原因。

3 结论

(1)掺加环氧树脂能够显著提高 ECRM 和 NF-ECRM 的界面弯拉强度,当环氧树脂的掺量为 9% 时,ECRM 的界面弯拉强度较基准组提高了 38.1%,NF-ECRM 的界面弯拉强度较基准组提高了 68.2%。

(2)随着纳米 SiO_2 掺量的增加,NF-ECRM 的界面弯拉强度不断增大。当纳米 SiO_2 的掺量为 2% 时,NF-ECRM 的界面弯拉强度达到峰值,较未掺纳米 SiO_2 的配比组提高了 14.7%。

(3)随着混杂纤维中的 PVA 纤维或钢纤维掺量的增加,NF-ECRM 的界面弯拉强度均呈现先升高后降低的趋势。混杂纤维的最佳掺量组合是:体积掺量为 1.2% 的钢纤维和体积掺量为 0.9% 的 PVA 纤维进行混杂,此时 NF-ECRM 的界面弯拉强度达到峰值,较单掺钢纤维时提高了 9.8%,较单掺 PVA 纤维时提高了 8.3%。

(4)环氧树脂和纳米 SiO_2 的掺入均能够减少孔洞缺陷数量,提高基体的致密性。此外,高活性的纳米 SiO_2 还能提高基体内的水化产物含量,从而改善基体内部结构。混杂纤维能够有效抑制基体内部微裂缝的产生和发展,提高了基体的整体性。

参考文献:

- [1] 叶丹玫,孙振平,郑柏存,等. 聚合物改性水泥基修补材料的研究现状及发展措施[J]. 材料导报, 2012, 26(7): 131-135.
YE D M, SUN Z P, ZHENG B C, et al. Current research status and development initiative of polymer-modified cementitious repair material[J]. Materials Review, 2012, 26(7): 131-135.
- [2] 李刊,魏智强,乔宏霞,等. 纳米 SiO_2 改性聚合物水泥基材料性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(11): 150-159.
LI K, WEI Z Q, QIAO H X, et al. Experimental study on property of polymer cement based composite modified by nano- SiO_2 [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(11): 150-159.
- [3] 肖其远,朱英英,杨奕,等. 纳米 SiO_2 对不同条件下聚合物改性砂浆强度的影响[J]. 混凝土, 2022(2): 136-139.
XIAO Q Y, ZHU Y Y, YANG Y, et al. Effects of nano- SiO_2 on mechanical properties of polymer modified mortar under different environments[J]. Concrete, 2022(2): 136-139.
- [4] 买淑芳,方文时,杨伟才,等. 海岛结构环氧树脂材

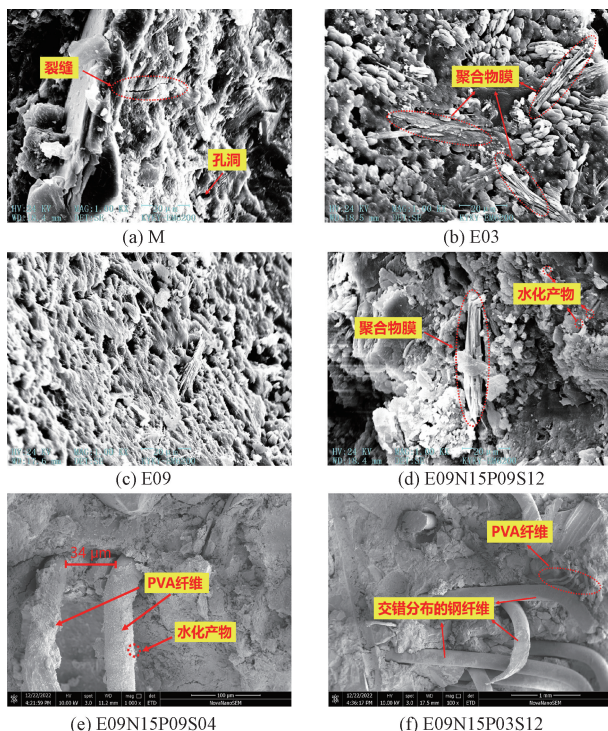


图 8 NF-ECRM 基体的微观形貌

Figure 8 Microstructure of NF-ECRM matrix

- 料的抗冲磨试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1498-1502.
- MAI S F, FANG W S, YANG W C, et al. Experimental study on abrasion resistant performance of epoxy resin with sea island structure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1498-1502.
- [5] 郭寅川, 杨雪瑞, 申爱琴, 等. 湿热环境下玄武岩纤维桥面混凝土早期抗裂性[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(6): 99-104, 118.
- GUO Y C, YANG X R, SHEN A Q, et al. Early cracking resistance of basalt fiber bridge deck concrete in hot and humid environment[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(6): 99-104, 118.
- [6] 魏士尧. 纳米 SiO₂ 和混杂纤维增强环氧树脂水泥基修复材料力学性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
- WEI S Y. Mechanical properties of nano-SiO₂ and hybrid fiber reinforced epoxy resin cementitious repair materials [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2023.
- [7] 中华人民共和国工业和信息化部. 修补砂浆: JC/T 2381—2016[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2016.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Repairing mortar: JC/T 2381—2016[S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2016.
- [8] 徐奎生. 环氧树脂乳液改性水泥砂浆性能的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- XU K S. Study on properties of epoxy resin emulsion modified cement mortar [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [9] GUO S Y, ZHANG X, CHEN J Z, et al. Mechanical and interface bonding properties of epoxy resin reinforced Portland cement repairing mortar[J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 120715.
- [10] ZHENG Z, LI Y X, HE S A, et al. High density and high strength cement-based mortar by modification with epoxy resin emulsion[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 319-330.
- [11] HARMUTH H. Investigation of the adherence and the fracture behaviour of polymer cement concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(3): 497-502.
- [12] 李国民. 耐盐冻水泥基修补材料与旧混凝土粘结性能研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(4): 20-23.
- LI G M. Study on the bonding properties of salt-resistant cement based patching material with old concrete [J]. New Building Materials, 2019, 46(4): 20-23.
- [13] 乔庆浩, 李志华, 张聪. 硅灰增强混杂纤维水泥基灌浆料与老混凝土粘结强度研究[J]. 功能材料, 2020, 51(6): 6143-6149.
- QIAO Q H, LI Z H, ZHANG C. Study on bond strength of silica fume reinforced hybrid fiber cement based grouting material and old concrete [J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(6): 6143-6149.
- [14] 张成龙, 刘漪, 张明. PP/PVA 纤维增强硫铝酸盐水泥基快速修补材料试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2174-2183.
- ZHANG C L, LIU Y, ZHANG M. PP/PVA fiber reinforced sulphoaluminate cement-based rapid repair material [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(7): 2174-2183.
- [15] 高丹盈, 程红强. 纤维混凝土与既有混凝土黏结性能研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- GAO D Y, CHENG H Q. Study on bond performance of fiber reinforced concrete and existing concrete [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [16] 卜良桃, 罗兴华. 钢纤维水泥砂浆与老混凝土双面剪切粘结性能研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(9): 90-94.
- BU L T, LUO X H. Two-sided shearing bonding strength of steel fiber cement mortar to old concrete [J]. Industrial Construction, 2009, 39(9): 90-94.
- [17] 陈正发, 陈振飞, 刘健鹏, 等. 碳纳米管改性黏土力学性能及微观机制研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(4): 86-91.
- CHEN Z F, CHEN Z F, LIU J P, et al. Experimental study on mechanical properties and micro-mechanism of clay modified by carbon nanotubes [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(4): 86-91.
- [18] 陈广, 孙敏, 孔令康, 等. PVA-纳米 SiO₂ 混杂纤维混凝土力学性能研究[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2022, 35(2): 9-14.
- CHEN G, SUN M, KONG L K, et al. Study on mechanical properties of PVA-nano-SiO₂ hybrid fiber concrete [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology Edition), 2022, 35(2): 9-14.
- [19] MOHAMMADALIPOUR M, MASOOMI M, AHMADI M, et al. Interfacial shear strength characterization of GMA-grafted UHMWPE fiber/epoxy/nano clay hybrid nanocomposite materials [J]. RSC Advances, 2016, 6(48): 41793-41799.
- [20] HU Y, GAO S L. Macro mechanical properties and microstructure analysis of nano-modified ECC at low temperature [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2022, 50(4): 2156-2174.

The Impact of Narrow Sections in Reservoir Areas on the Evolution of Dam Failure Floods and Its Mechanism

YANG Ziyue¹, LU Yang¹, WANG Jian^{1,2}, XIANG Kai¹, CAO Ziyang¹, WANG Shuai³

(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Graduate College for Elite Engineers, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Liaoning Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Shenyang 110021, China)

Abstract: The complex topographic features of the reservoir area, especially the common narrow sections, have a significant impact on the flood evolution process. To reveal the influence mechanism of narrow sections and other natural special terrains on the evolution of dam failure floods, a study was conducted on terrain refinement and dam failure calculation methods. Taking a reservoir project as an example, Civil 3D and HEC-RAS software were used to refine the narrow sections of the upstream reservoir area and the downstream main channel in the DEM data. An improved calculation method was proposed, defining the reservoir area as a two-dimensional flow region, compensating for the limitations of conventional methods in reflecting the real terrain of the upstream reservoir. It allowed for a more accurate simulation of the impact of actual terrain on the evolution of dam failure floods. The calculation results showed that the flood arrival time was delayed by an average of 1 hour, and the maximum inundation depth of dam failure flood peak was reduced by 49.52%. It was evident that narrow sections could play a significant role in peak shifting and peak cutting, increasing the emergency evacuation time for downstream residents and effectively reducing inundation risk. The promotion and application of the improved method could help optimize the design of evacuation schemes and improve the economic and scientific basis for flood control decision-making.

Keywords: HEC-RAS; DEM refinement; narrow section; dam failure; peak shifting; peak shaving

(上接第 101 页)

Study on the Bonding Properties of Nano-SiO₂ and Hybrid Fiber Reinforced ECRM

WANG Wenshuai¹, ZHANG Peng¹, WEI Xiaoxue², WU Jingjiang², ZHANG Chengshi²

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Communications Construction Company of CSECE 7th Division Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: To prepare high-performance epoxy resin cementitious repair materials (ECRM) for effectively addressing dam crack rehabilitation, the influence of the content of epoxy resin, nano-SiO₂, and steel-PVA hybrid fiber on the bonding properties of cementitious repair materials was analyzed by the interface flexural bonding strength test. The strengthening mechanism of the bonding properties of cementitious repair materials was revealed by the scanning electron microscope test. The results showed that the interface flexural bonding strength of cementitious repair materials increased first, and then decreased with the increase of epoxy resin, steel fiber, and PVA fiber content. When the content of epoxy resin was 9% (mass fraction, the same below), the volume content of PVA fiber was 0.9% (volume fraction, the same below), and the volume content of steel fiber was 1.2%, the interface flexural bonding strength of cementitious repair materials reached the maximum, which was an increase of 68.2% compared to the control group (without epoxy resin, nano-SiO₂, PVA fibers, and steel fibers). As the content of nano-SiO₂ increased from 0% to 2.0%, the interface flexural bonding strength of cementitious repair materials gradually rose with an increase of 14.7%. Compared to nano-SiO₂, steel fiber, or PVA fiber, the addition of epoxy resin had a more significant effect on the improvement of the bonding properties of cementitious repair materials. The microscopic strengthening mechanism of cementitious repair materials could be concluded as follows, the addition of epoxy resin and steel-PVA hybrid fiber could inhibit the formation and expansion of cracks in the matrix and improve the integrity of the matrix. The addition of nano-SiO₂ could reduce the hole defects in the matrix and improve the compactness of the matrix.

Keywords: nano-SiO₂; hybrid fiber; epoxy resin; interface flexural bonding strength; strengthening mechanism