

文章编号:1007-9629(2024)12-1143-09

高延性天然水硬性石灰基材料的力学性能

王振波¹, 孟凡超¹, 刘泽², 王栋民^{2,*}, 齐国栋²

(1. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要:以天然水硬性石灰和偏高岭土为复合胶凝材料, 掺加聚乙烯醇(PVA)纤维、聚乙烯(PE)纤维或玄武岩(BF)纤维, 制备了高延性天然水硬性石灰基材料, 并研究了其抗压、轴拉力学性能、裂缝控制能力和纤维增强增韧机理。结果表明: PVA、PE 纤维与石英砂或石灰石砂组合均可使水硬性石灰表现出优异的应变硬化和饱和多缝开裂特征, 显著提高材料的拉伸强度和极限拉伸应变; PE 纤维和石灰石砂组合使材料极限拉伸应变提高至 5.604%, PVA 纤维和石英砂及石灰石砂组合使材料极限拉伸应变提高至 4.000% 以上; PVA、PE 纤维均可将裂缝宽度控制在 100 μm 以下, 材料在获取超高变形能力的同时具备良好的裂缝控制能力。

关键词:天然水硬性石灰; 纤维; 抗压强度; 拉伸性能; 裂缝控制

中图分类号: TU528.58

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.12.009

Mechanical Properties of Natural Hydraulic Lime Based Materials with High Ductility

WANG Zhenbo¹, MENG Fanchao¹, LIU Ze², WANG Dongmin^{2,*}, QI Guodong²

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing),

Beijing 100083, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of

Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The natural hydraulic lime and metakaolin as composite cementitious materials, polyvinyl alcohol (PVA) fibers, polyethylene (PE) fibers, or basalt (BF) fibers were incorporated to prepare the high ductility natural hydraulic lime based materials. The compressive and axial tensile properties, crack control abilities, and the reinforcing and toughening mechanisms of the fibers were experimentally investigated. The results show that the combination of PVA or PE fibers with quartz sand or limestone sand endows the natural hydraulic lime with excellent strain-hardening and saturated multiple-cracking characteristics, and significantly enhances the tensile strength and ultimate tensile strain of materials. The combination of PE fibers and limestone sand increases the ductility materials up to 5.604%, while the joint use of PVA fibers and quartz sand or limestone sand makes the ultimate tensile strain materials increased to more than 4.000%. Both PVA and PE fibers can control the crack width to below 100 μm , adding excellent crack control abilities as well as ultra-high deformation capacity of lime based materials.

Key words: natural hydraulic lime; fiber; compressive strength; tensile performance; crack control

中国现存大量古代建筑和岩石质文物因受自然侵蚀和人为破坏已出现不同程度的损坏, 选择使用恰

收稿日期: 2024-05-31; 修订日期: 2024-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808545, 52072404); 北京市自然科学基金资助项目(2222073); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2023ZKPYLJ05)

第一作者: 王振波(1989—), 男, 江苏徐州人, 中国矿业大学(北京)副教授, 硕士生导师, 博士. E-mail: wangzb@cumtb.edu.cn

通讯作者: 王栋民(1965—), 男, 山西朔州人, 中国矿业大学(北京)教授, 博士生导师, 博士. E-mail: wangdongmin-2008@163.com

当的现代修复材料是建筑遗产保护的核心问题之一^[1]. 石灰材料因其与砖石材料兼容性好、强度适中而被广泛应用于古建筑修复^[2]. 天然水硬性石灰兼具水硬性组分(硅酸盐、钙质铝酸盐)和气硬性组分($\text{Ca}(\text{OH})_2$),在修复建筑文物方面较传统气硬性石灰和水泥更有优势^[3-4]. 而 NHL 性脆、易裂、强度低,用其修复的砖石古建在长期复杂环境影响下容易发生劣化. 研究表明,掺入偏高岭土可通过火山灰反应显著提高水硬性石灰的抗压、抗折强度^[5-7]. 将不同种类的纤维材料包括矿物纤维^[8]、天然纤维^[9]和合成纤维^[10]等用于天然水硬性石灰砂浆的改性,可提高材料弯曲强度、韧性和抗收缩开裂性能. 但以往的纤维增强石灰基材料在开裂后仍然出现应变软化,裂缝宽度得不到有效控制,即使材料韧性有所提升,其对古建筑的修复加固效果以及长期性能改善仍比较有限.

与传统的纤维增强水泥基材料不同,高延性水泥基复合材料(ECC)材料可实现突出的高延性和微裂缝控制功能,能够有效克服水泥基材料的脆性并极大改善其耐久性,现已应用于结构加强、裂缝修补等领域^[11-14]. 如果借鉴 ECC 的设计理念,以特细砂取代普通细骨料,以高强韧高性能有机纤维构建恰当的裂纹桥接属性,开发出高延性天然水硬性石灰基材料,可解决石灰材料性脆、易裂、强度低的问题,并显著增强水硬性石灰体系的可设计性和长期服役性,拓宽其在古建筑修复及新型墙体加固工程中的应用场景. 高延性天然水硬性石灰基材料在保留 NHL 强度适中、凝结硬化较快、透气性好和可溶性盐量低等优势以外,兼具应变硬化、微裂纹控制的高强韧属性,将成为一种较为理想的古建筑遗产修复和墙体加固材料.

本文在天然水硬性石灰-偏高岭土复合胶凝材料体系中掺入适量优选的纤维和特细骨料,制备高延性天然水硬性石灰材料,研究不同纤维和骨料种类及其组合对材料力学性能和裂缝控制能力的影响,并通过微观结构分析揭示其内在增强增韧机理. 开发的新材料可提升水硬性石灰体系的服役性能,拓展其在古建筑修复和新型墙体加固工程中的应用.

1 试验

1.1 原材料与配合比

天然水硬性石灰为法国 Saint-Astier 公司生产的 NHL5 型石灰(NHL5),外观呈浅灰色,其矿物成分包括硅酸二钙(C_2S)、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 和少量 SiO_2 晶体;偏高岭土为内蒙古超牌新材料公司生产的白色粉末状高活性偏高岭土,其主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,是典型的非晶态物质. 胶凝材料的化学组成(质量分数,文中涉及的组成、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比)见表 1, X 射线衍射仪(XRD)图谱见图 1. 拌和水为实验室自来水. 所用纤维为:日本 Kuraray 公司生产的聚乙烯醇(PVA)纤维,出厂时纤维表面已进行涂油憎水处理;郑州登电玄武石纤公司生产的玄武岩(BF)纤维;天地材料公司生产的聚乙烯(PE)纤维. 纤维的物理力学性能参数列于表 2. 试验中使用的细骨料为石英砂(QS)和石灰石砂(CS),粒径范围在 0.075~0.150 mm,属特细砂. 细骨料的光学显微镜照片见图 2.

设置水胶比为 0.55,砂胶比为 0.40,胶凝材料 $m(\text{NHL5}):m(\text{偏高岭土})=0.70:0.30$,纤维体积掺量为 1.7%. 以胶凝材料的质量计,水的用量为 55%,试件的配合比见表 3.

1.2 试件成型与养护

试件的搅拌成型与养护步骤如下:(1)细骨料预湿. 将细骨料投入搅拌机后加入总拌和水的 8%,搅拌 1 min,使其充分润湿以提高表观黏聚性^[15]. (2)浆体搅拌. 将称重好的 NHL5 和偏高岭土加入搅拌机,与预湿细骨料混合搅拌 1 min,然后缓慢加入剩余拌和水继续搅拌 3 min. (3)纤维掺入. 缓慢将纤维均匀撒入浆体,充分搅拌以保证纤维分散均匀. (4)试件浇筑. 将搅拌好的浆体分 2~3 次浇筑入模(立方体抗压试件和狗骨型拉伸试件),在振动台上振动 30 s 后使用抹刀进行抹面,覆盖一层聚乙烯保鲜薄膜防止水分散失. (5)拆模与养护. 将浇筑成型好的试件移至标准养护室($(20\pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度 $\text{RH}\geq 95\%$)养护 3 d 后拆模,再分别养护至 7、28 d. 进行力学测试前 6 h,将试件从养护室取出并静置晾干.

表 1 胶凝材料的化学组成
Table 1 Chemical composition (by mass) of binders

Binder	Unit: %							
	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	K_2O	SO_3	Other
NHL5	77.07	18.00	0.64	1.87	1.22	0.24	0.56	0.07
Metakaolin	0.38	57.65	1.12	38.81	0.21	0.54	0.02	0.06

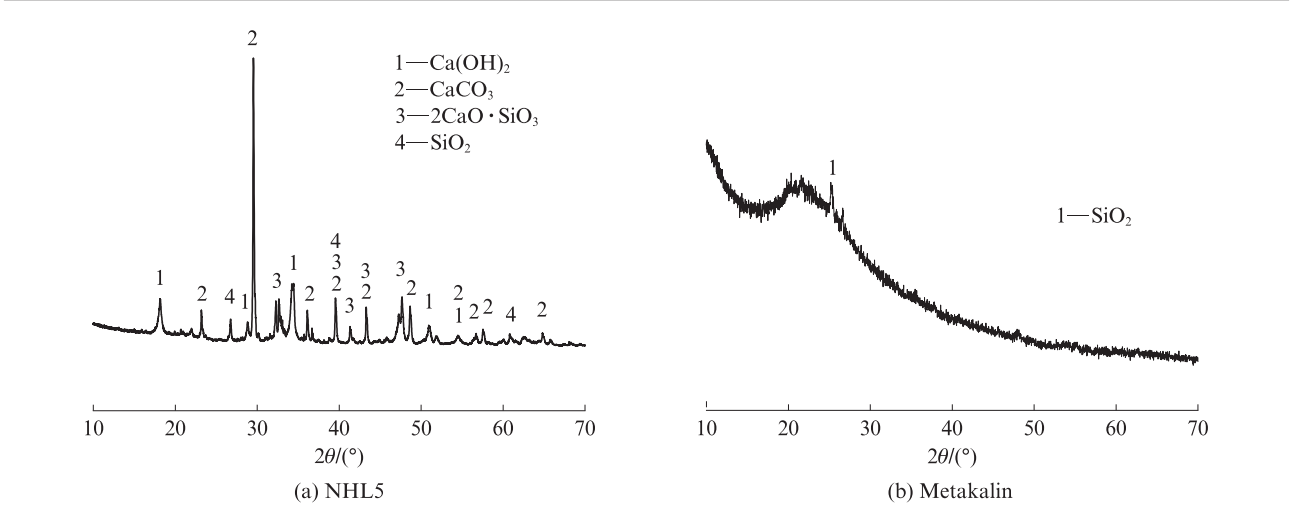


图 1 胶凝材料的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of binders

Table 2 Physical and mechanical properties parameters of fibers						
Fiber	Density/(g·cm ⁻³)	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Diameter/mm	Length/mm	Melting temperature/°C
PVA	1.30	1 620	42.8	0.039	12	243
BF	2.75	2 130	78.0	0.017	12	1 500
PE	0.97	3 000	116.0	0.024	12	144

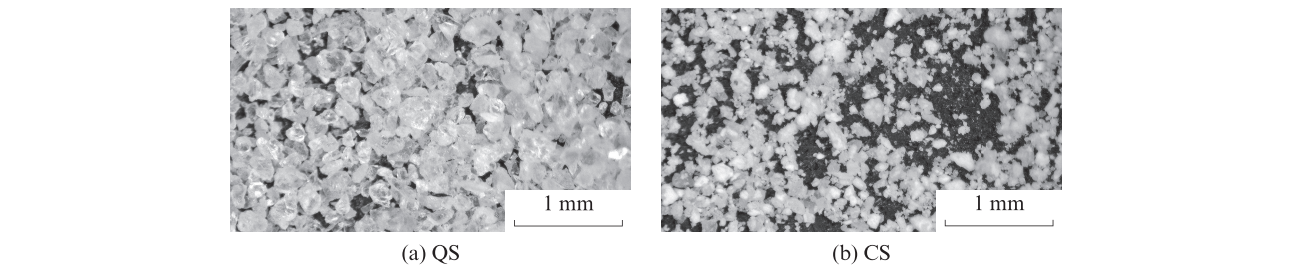


图 2 细骨料的光学显微镜照片
Fig. 2 Optical microscope images of fine aggregates

Table 3 Mix proportions (by mass) of specimens					
Specimen	Sand		Fiber		
	Quartz sand	Limestone sand	PVA	BF	PE
	Unit: %				
QS-PVA	40	0	2.4	0	0
CS-PVA	0	40	2.4	0	0
QS-BF	40	0	0	5.3	0
CS-BF	0	40	0	5.3	0
QS-PE	40	0	0	0	1.8
CS-PE	0	40	0	0	1.8
QS0	40	0	0	0	0
CS0	0	40	0	0	0

1.3 试验方法

1.3.1 立方体抗压试验

采用 40 mm×40 mm×40 mm 的立方体试件,每

组制备 3 个试件,结果取平均值.抗压试验在 YAW4306 型 MTS 电液伺服试验机上进行,采用位移加载模式,加载速率为 0.5 mm/min.加载过程中计算机实时采集加载时间、荷载和承压板位移等数据.

1.3.2 单轴拉伸试验

根据 T/CECS 1212—2022《应变硬化水泥基复合材料结构技术规程》,制备狗骨型试件,每组制备 3 个试件,结果取平均值.单轴拉伸试验在 E45.305 型 MTS 微机控制电子试验机上进行,加载速率为 0.15 mm/min.在试件两侧分别安装标距为 80 mm 的引伸计,通过测控系统实时采集加载时间、荷载、试件两侧拉伸应变等数据.

2 结果与讨论

2.1 抗压性能

试件加载破坏过程的试验现象为:加载初期,试

件表面无明显变化;当荷载增加至约峰值荷载的80%时,表面开始出现微裂缝;随着荷载的继续增大,微裂缝延伸扩展,并伴随新裂纹产生;当加载至峰值荷载附近时,裂缝贯穿试件;此后,荷载随变形增大而下降,裂缝继续扩展,试件横向变形明显增大。

试件的受压破坏形态见图3(展示平面为平行于受压方向的侧面)。由图3可见:掺PVA、PE纤维

的试件裂而不碎、完整性较好,表现出优异的抗压韧性和延性破坏特征,其主裂缝周围形成众多细小裂缝,可将局部变形分配均匀;相比之下,掺BF纤维试件的微裂缝数量明显减少,裂缝内聚能力降低,出现表面碎块的剥离;不掺纤维的试件则表现为脆性破坏,裂缝走向平直,表面起皮、剥落较为严重。

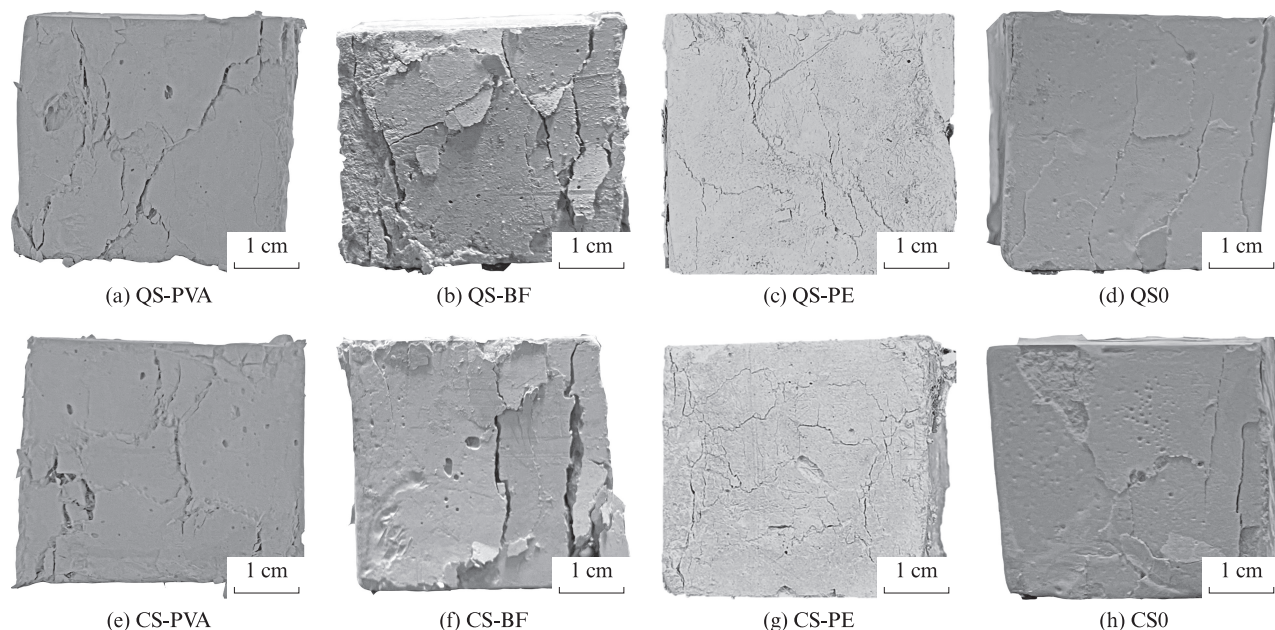


图3 试件的受压破坏形态

Fig. 3 Compression failure modes of specimens

试件7、28 d抗压强度 f_{28d} 、 f_{7d} 及其比值(f_{7d}/f_{28d})见图4。由图4可见:(1)试件的28 d抗压强度均大于5 MPa,满足BS EN 459-1:2015 *Building Lime-Part 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria*的要求。(2)掺入纤维试件的抗压强度均低于基材试件QS0和CS0,这是由于在砂浆搅拌成型中纤维容易引入微细尺度的缺陷,从而在一定程度上降低了试件的抗压强度,纤维对力学性能的主要贡献是提

供桥接能力^[16]。具体而言,与基材试件相比:PVA纤维的掺入使试件QS-PVA的7、28 d抗压强度分别降低了15.9%、18.9%,使试件CS-PVA分别降低了9.3%、16.9%;PE纤维的掺入使试件QS-PE的7、28 d抗压强度分别降低了22.6%、14.6%,使试件CS-PE分别降低了21.2%、16.9%;PVA、PE纤维均提高了试件裂缝内聚能力,微细裂缝的产生更好地耗散了能量,转脆性破坏为延性破坏。BF纤维的掺入使试件QS-BF相对于试件QS0在7、28 d时抗压强度分别下降了40.8%、42.8%,使试件CS-BF相对于试件CS0分别下降了36.6%、39.7%,这主要是因为BF纤维质脆、抗剪能力弱,在受压过程中桥接作用不明显,且纤维分散性差会引入较多的界面和气孔。结合图3中试件的破坏形态可以发现,BF组试件整体性较差,裂缝走向平直且表面出现剥落。(3)在7、28 d龄期下,试件QS0比试件CS0的抗压强度分别高13.6%、12.4%,试件QS-PVA比CS-PVA抗压强度分别高5.3%、9.6%,试件QS-BF比试件CS-BF抗压强度分别高6.2%、6.6%,试件QS-PE比试件CS-PE抗压强度分别高11.6%、15.5%。这是因为:一方面,

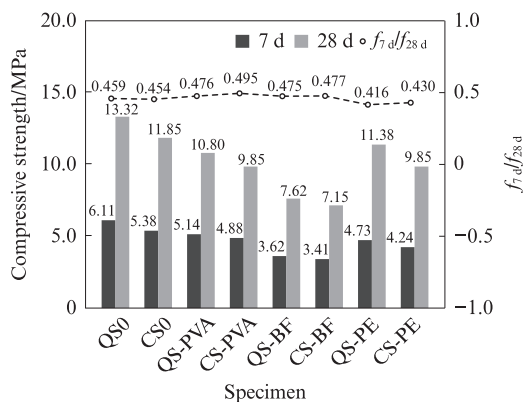


图4 各组试件的抗压强度及其比值

Fig. 4 Compressive strength and its ratio of specimens

QS质硬多棱角,CS质弱圆润,在受压过程中QS可提供更高的机械咬合力;另一方面,较低的圆度和球度会增大骨料与浆体的接触面积,提高界面过渡区性能.对比各组试件7、28 d的抗压强度比,发现各配合比试件的比值均在0.400~0.500之间,低于同等强度下的水泥基ECC材料^[17].这主要是因为天然水硬性石灰中的水硬性成分含量远低于水泥基材料,其强度发展更多依赖碳化,强度发展较水泥缓慢.

2.2 抗拉性能

试件的拉伸应力-应变曲线见图5.由图5可见:掺PVA、PE纤维试件的拉伸应力-应变曲线均可分为3个阶段,即应力随应变线性增加的线弹性阶段、应力随应变波动上升的硬化阶段以及应力在峰值以后下降的软化阶段;掺BF纤维试件拉伸应力-应变曲线并未展现出明显的应变硬化阶段,其应力快速达到峰值后即进入应变软化阶段.

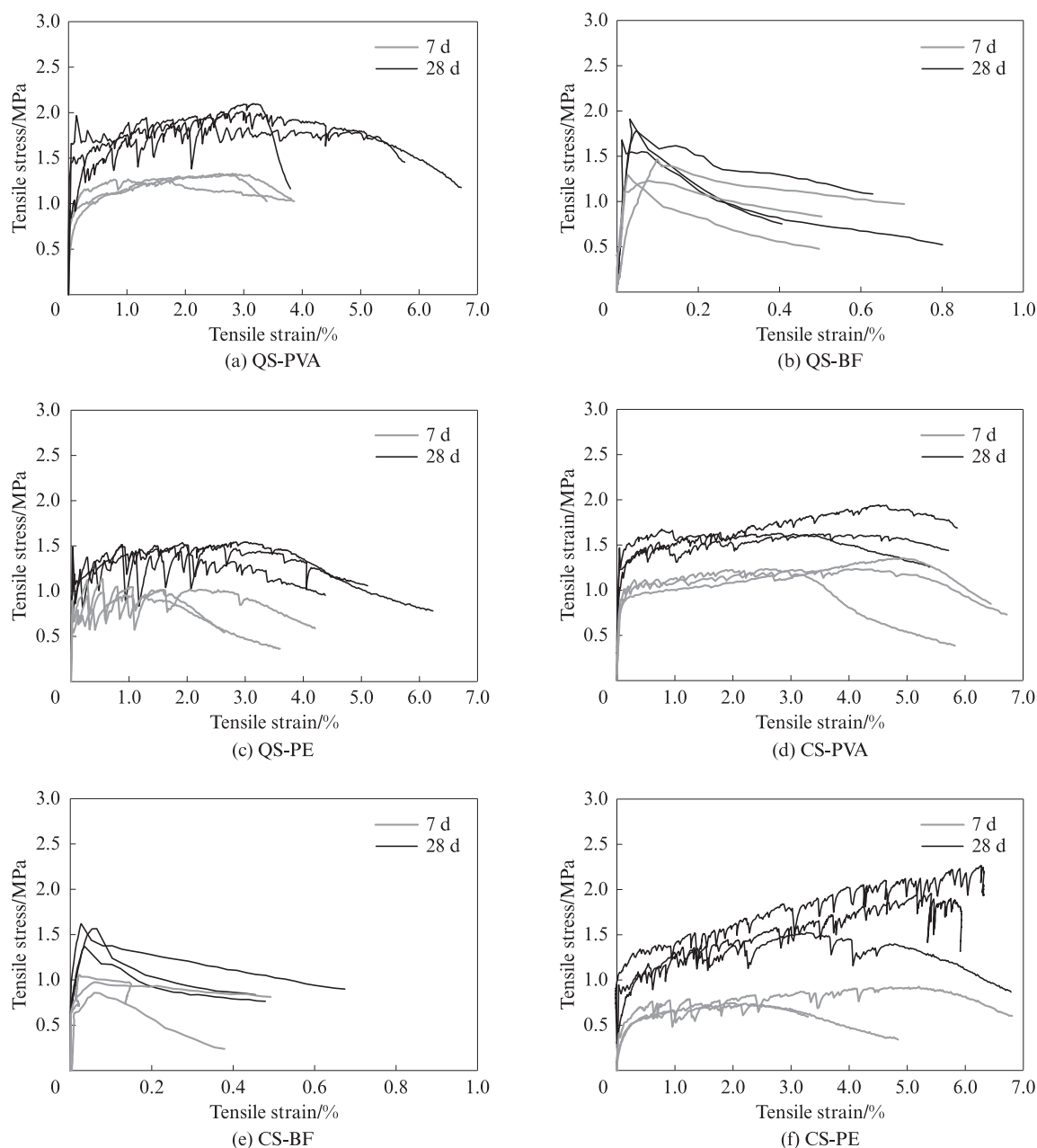


图5 试件的拉伸应力-应变曲线

Fig. 5 Tensile stress-strain curves of specimen

已有研究表明^[18]:得益于PVA、PE纤维良好的界面性能、较高的极限伸长率和拉伸模量,高延性水硬性石灰基材料的抗拉性能显著提升;初期产

生的拉伸应力作用于砂浆基体,在基体开裂后转由裂纹截面间的纤维承担拉伸应力,并传递至两侧未开裂基体;随着拉伸应力的增大,其余截面上相对

薄弱的基体陆续开裂,进而产生新的裂缝;纤维依靠其较高的界面强化性质抑制裂缝发展,从而达到提高抗拉强度、诱发多缝开裂的效果;此外,纤维在基体内的分散效果也是影响其增强效果的重要因素。

由图5可得试件的开裂强度(σ_c)、开裂应变(ϵ_c)、抗拉强度(σ_t)、极限拉伸应变(ϵ_t)和弹性模量(E_t),结果见表4。结合图5和表4可以看出,3种纤维制备的高延性材料的强度和拉伸变形有明显差异:(1)相同掺量下,BF纤维在一定程度上使试件抗拉性能不佳,这与BF纤维在搅拌、成型过程中易发生团聚,以及纤维分布不均有关。(2)对比掺PVA、PE纤维组,试件QS-PVA的28 d开裂强度和抗拉强度达到1.409、1.994 MPa,分别是试件QS-PE的1.24、1.30倍;试件CS-PVA的28 d开裂强度和抗拉强度达到1.267、1.744 MPa,分别是试件CS-PE的1.43、0.91倍。PVA纤维相较于PE纤维对试件强度的提升更显著,这主要是由于PVA纤维与石灰基体界面间存在化学黏结,其与滑移摩擦硬化作用相匹配,能有效传递荷载;而PE纤维是憎水纤维,与石灰基体的界面黏结力相对较弱,对基体(尤其是薄弱基体)的增强作用通常不及PVA纤维。(3)在变形能力方面,掺PVA、PE纤维的试件均出现明显的应变硬化现象,试件QS-PVA、CS-PVA的极限拉伸应变分别为4.197%、4.407%,试件QS-PE、CS-PE的极限拉伸应变分别为3.433%、5.604%,均明显高于掺BF纤维的试件QS-BF、CS-BF,表明PVA、PE纤维相较于BF纤维具有优异的柔韧性、稳定性和伸长率,且与NHL5基体桥接恰当。(4)高延性天然水硬性石灰基材料的拉伸性能还与细骨料种类有关。试件QS-PVA比试件CS-PVA的开裂强度和抗拉强度分别高11.2%、14.3%,极限拉伸应变低4.8%;试件QS-PE比试件CS-PE的开裂强度高27.9%,抗拉强度低20.0%,极限拉伸应变低38.7%。这是因为CS软弱圆润,较低

的圆度和球度有助于将纤维分散均匀并增强骨料与胶凝材料的黏结;而QS质硬多棱角,提供了更强的纤维锚固,因此会加重纤维磨损和断裂,纤维桥接余能降低,进而导致延性下降;另外,虽然薄弱的CS降低了基体开裂强度,但强劲的纤维桥接作用能够诱发更多裂缝,从而使基体可获得更高的极限拉伸应变。

2.3 纤维对裂缝宽度的控制

通常,高延性水硬性石灰材料的破坏裂缝主要从有害缺陷处开始扩展,纤维在缺陷处起到桥接作用,使应力重分布,从而改善应力集中程度,延缓裂缝张开,对石灰基材料起到增强增韧的作用。裂缝间距体现了裂缝密度及多缝开裂的饱和程度,裂缝间距越小代表裂缝密度越大,多缝开裂的饱和程度越高,延性越好。

试件的开裂形态图见图6。参照高延性纤维增强水泥基材料的处理方法,对各组试件的平均裂纹间距(S_a)和平均裂纹宽度(W_a)进行计算^[19],结果见图7。结合图6、7可见:掺BF纤维组试件在拉伸破坏时仅出现单条裂缝,无法抑制纤维拉拔过程中的裂缝发展,其裂缝宽度不在此进行讨论;掺PVA、PE纤维组的平均裂纹宽度可控制在87~100 μm 范围内,满足ECC材料的微裂缝宽度要求;各组试件平均裂纹间距和宽度差别不大,PVA、PE纤维在保证石灰材料高延性的同时均能够把裂缝宽度维持在相当低的水平,这有利于材料耐久性的提升^[20]。

2.4 微观形貌

试件拉伸断面的SEM照片见图8。由图8可以发现:(1)PVA和PE纤维表面出现不同程度的“剥丝”现象,这是因为拉伸过程中骨料/基体对纤维表面有刮削作用。(2)PVA纤维在断面中出现拔出和断裂两种破坏模式,且断裂比例较高,而PE纤维均为拔出破坏。结合单轴拉伸试验和平均裂缝宽度数据,试件QS-PVA的抗拉强度较QS-PE高30.3%,极限应变高22.3%,平均裂纹宽度低11 μm 。(3)与PE纤维相比,PVA纤维和石灰基体的界面黏结力更高,在裂缝控制方面更有优势,拉伸过程中相对更不容易从基体中拔出,从而可以有效传递荷载,并在较高的应力下断裂。(4)PE纤维在较低的应力水平下就被拔出,纤维表面损伤相对轻微,这导致材料抗拉强度通常偏低,但在拔出过程中可以耗散较多能量。上文中,试件CS-PE的抗拉性能最优,这与薄弱石灰石砂诱导裂缝、PE纤维与石灰石砂的匹配(纤维分散、界面滑移)等因素相关。

表4 掺纤维试件的28 d抗拉力学参数
Table 4 Uniaxial tensile properties of specimens incorporating fibers

Specimen	σ_c/MPa	$\epsilon_c/\%$	E_t/GPa	σ_t/MPa	$\epsilon_t/\%$
QS-PVA	1.409	0.026	5.443	1.994	4.197
CS-PVA	1.267	0.032	3.857	1.744	4.407
QS-BF	0.960	0.017	5.433	1.787	0.028
CS-BF	0.798	0.016	4.710	1.517	0.033
QS-PE	1.133	0.019	5.731	1.530	3.433
CS-PE	0.886	0.032	3.942	1.913	5.604

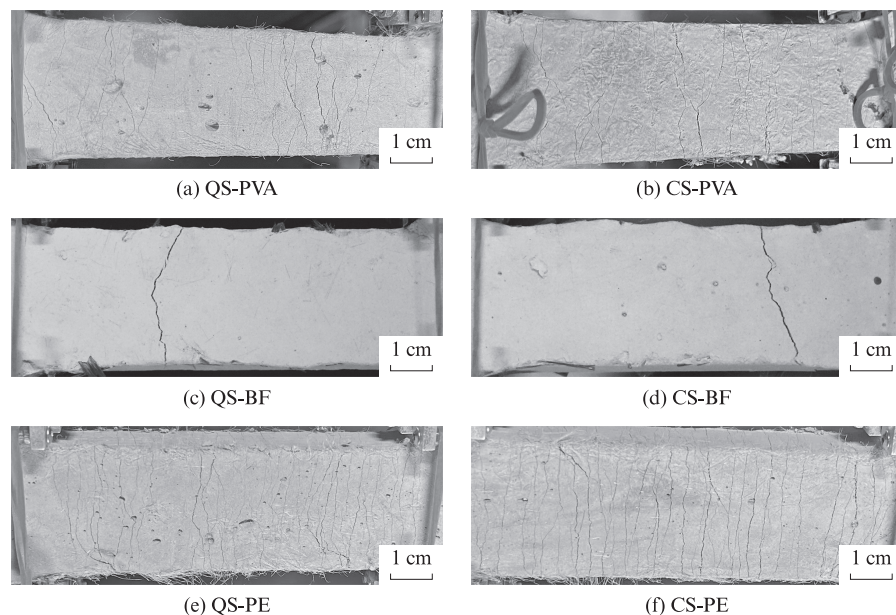


图6 试件的开裂形态图

Fig. 6 Crack morphology diagrams of specimens

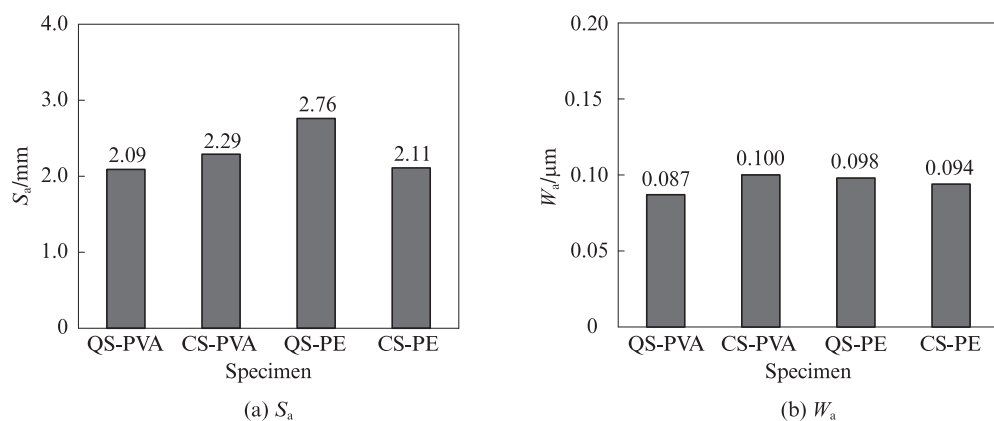


图7 试件的平均裂纹间距和宽度

Fig. 7 Mean crack spacing and width of specimens

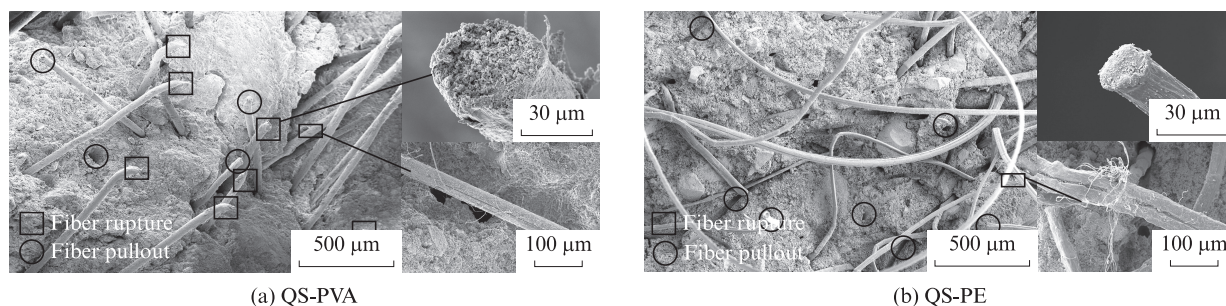


图8 试件拉伸断面的SEM照片

Fig. 8 SEM images of tensile crack plane of specimens

3 结论

(1) 使用 PVA、PE 和 BF 纤维以及石英砂(QS)、石灰石砂(CS)掺入天然水硬性石灰-偏高岭土复合胶凝材料中,制备出具有应变硬化和微裂纹控制功能的高延性天然水硬性石灰基材料,为水硬

性石灰体系的性能提升及其在古建筑修复和新型墙体加固工程中的延伸应用提供了新的选择。

(2) 水硬性石灰基材料表现为脆性破坏特征,而纤维的加入可显著提高其抗压韧性. 掺 PVA、PE 纤维试件的破坏完整性较好, PVA 纤维使 QS 基材 28 d 抗压强度降低 18.9%, 使 CS 基材降低 16.9%; PE 纤

维使QS基材28d抗压强度降低14.6%,使CS基材降低16.9%。掺BF纤维试件出现表面碎块剥离现象,BF纤维使QS基材28d抗压强度降低42.8%,使CS基材降低39.7%。

(3)PVA、PE纤维与QS和CS组合均可显著提高材料的抗拉强度、延性和裂缝控制能力,出现饱和多缝开裂并将裂缝宽度控制在100 μm 以内。试件CS-PE整体抗拉性能最优,抗拉强度达1.913 MPa,极限拉伸应变达5.604%。试件QS-PVA和CS-PVA具有相似的抗拉强度,极限拉伸应变均达4.000%以上。相同掺量下BF纤维组试件均为单缝开裂,在提高石灰延性方面没有贡献。

参考文献:

- [1] 许军.古建筑修缮过程中提高文物建筑保护与利用的技术研究[J].收藏,2023(1):169-172.
XU Jun. Research on the technology of improving the protection and utilization of cultural relics in the process of ancient building repair [J]. Collections, 2023(1):169-172.(in Chinese)
- [2] 兰明章,聂松,王剑锋,等.古建筑修复用石灰基砂浆的研究进展[J].材料导报,2019,33(9):1512-1516.
LAN Mingzhang, NIE Song, WANG Jianfeng, et al. A state-of-the-art review on lime-based mortars for restoration of ancient buildings[J]. Materials Review, 2019,33(9):1512-1516. (in Chinese)
- [3] 徐树强,马清林.文物建筑修复用天然水硬性石灰基砂浆的研究进展[J].石窟与土遗址保护研究,2022,1(2):81-92.
XU Shuqiang, MA Qinglin. Research progress of natural hydraulic lime based mortar for restoration of cultural relics buildings [J]. Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2022,1(2):81-92. (in Chinese)
- [4] LUO K, LI J, LU Z Y, et al. Effect of nano-SiO₂ on early hydration of natural hydraulic lime [J]. Construction and Building Materials, 2019,216:119-127. (in Chinese)
- [5] 顾立龙,商怀帅,吴亚月,等.偏高岭土在人造水硬性石灰修复砂浆中的应用研究[J].硅酸盐通报,2023,42(12):4351-4359, 4367.
GU Lilong, SHANG Huaishuai, WU Yayue, et al. Application of metakaolin in artificial hydraulic lime repair mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023,42(12):4351-4359,4367. (in Chinese)
- [6] 李新明,武迪,张浩扬,等.酸环境下石灰-偏高岭土改性遗址土的强度及色差分析[J].建筑材料学报,2023,26(7):783-791.
LI Xinming, WU Di, ZHANG Haoyang, et al. Strength and color difference analysis of lime-metakaolin modified site soil in acidic environment[J]. Journal of Building Materials, 2023,26(7):783-791. (in Chinese)
- [7] 许栋,张大江,王栋民,等.矿粉/偏高岭土对天然水硬性石灰早期性能的影响[J].矿业科学学报,2022,7(5):632-642.
XU Dong, ZHANG Dajiang, WANG Dongmin, et al. Effects of slag powder/metakaolin on the early performance of natural hydraulic lime[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022,7(5):632-642. (in Chinese)
- [8] SANTARELLI L M, SBARDELLA F, ZUENA M, et al. Basalt fiber reinforced natural hydraulic lime mortars: A potential bio-based material for restoration[J]. Materials and Design, 2014, 63,398-406.
- [9] 卢喆,姚文娟,王社良,等.复掺天然植物油与青麻纤维对古建筑修复灰浆抗盐冻性能的影响[J].材料导报,2023,37(12):22010153.
LU Zhe, YAO Wenjuan, WANG Sheliang, et al. Effect of blending natural plant oil and hemp fiber on salt frost resistance of ancient building restoration mortar[J]. Materials Reports, 2023, 37(12):22010153. (in Chinese)
- [10] BARBERO-BARRERA M M, MEDINA F N. The effect of polypropylene fibers on graphite-natural hydraulic lime pastes[J]. Construction and Building Materials, 2018,184:591-601.
- [11] 姚淇耀,陆宸宇,罗月静,等.PE/PVA纤维海砂ECC的拉伸性能与本构模型[J].建筑材料学报,2022,25(9):976-983.
YAO Qiyao, LU Chenyu, LUO Yuejing, et al. Tensile properties and constitutive model of PE/PVA fiber sea sand ECC [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(9):976-983. (in Chinese)
- [12] 韩宇栋,刘畅,王振波,等.硫酸盐干湿循环下ECC的轴压力学行为[J].建筑材料学报,2020,23(4):846-851.
HAN Yudong, LIU Chang, WANG Zhenbo, et al. Uniaxial compressive behavior of ECC sulfate erosion in drying wetting cycles[J]. Journal of Building Materials, 2020,23(4):846-851. (in Chinese)
- [13] 郭伟娜,张鹏,鲍玖文,等.粉煤灰掺量对应变硬化水泥基复合材料力学性能及损伤特征的影响[J].建筑材料学报,2022,25(6):551-557.
GUO Weina, ZHANG Peng, BAO Jiuwen, et al. Effect of fly ash content on mechanical properties and damage characteristics of strain-hardening cementitious composites [J]. Journal of Building Materials, 2022,25(6):551-557. (in Chinese)
- [14] 杨翌,钟奕岚,杨智,等.SMA/PVA混杂纤维增强水泥基复合材料拉伸性能[J].建筑材料学报,2023,26(5):555-562.
YANG Zhao, ZHONG Yilan, YANG Zhi, et al. Tensile properties of SMA/PVA hybrid fiber reinforced cementitious composites [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(5):555-562. (in Chinese)
- [15] 王振波,范雨润,左建平.温度和骨料预湿对煤矸石砂浆流变性的影响[J].矿业科学学报,2024,9(2):190-198.
WANG Zhenbo, FAN Yurun, ZUO Jianping. The impact of temperature and pre-wetting of aggregates on rheological properties of coal gangue mortars[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024,9(2):190-198. (in Chinese)
- [16] 夏求林,吕兴栋,李平刚,等.PVA纤维、减缩剂和轻烧氧化镁对水工衬砌混凝土性能影响对比研究[J].水利水电技术,2024,55(增刊1):429-433.
XIA Qiulin, LÜ Xingdong, LI Pinggang, et al. Comparative

- study on the effects of PVA fiber, shrinkage reducing agent and light-fired magnesium oxide on the properties of hydraulic lining concrete[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(Suppl 1):429-433. (in Chinese)
- [17] 王振波. 聚乙烯醇-钢纤维混杂增强水泥基复合材料力学性能研究[D]. 北京:清华大学, 2016.
WANG Zhenbo. Studies on mechanical performance of polyvinyl alcohol-steel hybrid fiber reinforced cementitious composites[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)
- [18] 王振波, 王鹏宇, 孙鹏. 高延性水泥基材料纤维分布及其影响因素研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8):2284-2295.
WANG Zhenbo, WANG Pengyu, SUN Peng. Review on fiber distribution effect on engineered cementitious composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(8):2284-2295. (in Chinese)
- [19] 王振波, 张君, 王庆. 混杂纤维增强延性水泥基复合材料力学性能与裂宽控制[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2):216-221, 227.
WANG Zhenbo, ZHANG Jun, WANG Qing. Mechanical behavior and crack width control of hybrid fiber reinforced ductile cementitious composites[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):216-221, 227. (in Chinese)
- [20] ŞAHMARAN M, LI C V. Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(11):1033-1043.