文章编号:1007-9629(2024)03-0206-09

PE 纤维与细橡胶颗粒对泡沫混凝土 弯曲韧性的影响

吴 昊,龙广成*,杨 恺,曾晓辉,唐 卓

(中南大学土木工程学院,湖南长沙410018)

摘要:研究了聚乙烯(PE)纤维及其与细橡胶颗粒复掺对泡沫混凝土弯曲破坏模式、峰值强度、能量 吸收特性和弯曲韧性的影响,并结合孔结构分析和微观形貌观察探究了其作用机理.结果表明:PE 纤维使泡沫混凝土出现多缝开裂模式,显著提升了其峰值强度、能量吸收能力和弯曲韧性;复掺细橡 胶颗粒可以进一步提升泡沫混凝土试件的比能量吸收和弯曲韧性;掺入PE纤维可以降低泡沫混凝 土的平均孔径;复掺细橡胶颗粒导致泡沫混凝土试件的平均孔径增大,联通孔增多,对其峰值强度有 不利影响;PE纤维及细橡胶颗粒提升泡沫混凝土弯曲韧性的主要原因在于其削弱了裂纹尖端的应 力集中,同时增强了能量耗散作用.

关键词:泡沫混凝土;PE纤维;细橡胶颗粒;弯曲韧性;机理

中图分类号:TU528.2 文献标志码:A **doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2024.03.003

Effects of PE Fiber and Fine Rubber Particles on Flexural Toughness of Foam Concrete

WU Hao, LONG Guangcheng^{*}, YANG Kai, ZENG Xiaohui, TANG Zhuo (School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410018, China)

Abstract: The effects of polyethylene(PE) fiber and its combinayion with fine rubber particles on the flexural damage mode, peak strength, energy absorption characteristics, and flexural toughness of foam concrete were investigated, and the mechanism of action was explored by combining pore structure analysis with microscopic morphological observation. The results show that PE fibers cause the multiple cracking modes of the foam concrete and significantly improve the peak strength, energy absorption capacity, and flexural toughness of the foam concrete specimens. Combining with fine rubber particles can further enhance the specific energy absorption and flexural toughness of the foam concrete. Combining with fine rubber particles leads to an increase in the average pore size and the number of coupled pores, which has a negative impact on the peak strength of the foam concrete specimens. The main reasons for PE fiber and combination with fine rubber particles to enhance the flexural toughness of foam concrete are their weakening of stress concentration at the crack tip and enhancement of energy dissipation.

Key words: foam concrete; PE fiber; fine rubber particle; flexural toughness; mechanism

泡沫混凝土是一种多孔混凝土,具有低容重¹¹和 高吸能²¹等特点,在工程材料阻拦系统¹³、防护栏等防 护工程领域受到了广泛的关注.但普通泡沫混凝土 在弯拉荷载的作用下容易发生脆性破坏,导致其开

收稿日期:2023-04-06;修订日期:2023-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078490,52208300)

第一作者:吴 吴(2000-),男,河南南阳人,中南大学硕士生.E-mail:214811034@csu.edu.cn

通讯作者:龙广成(1973—),男,江西万载人,中南大学教授,博士生导师,博士.E-mail:longguangcheng@csu.edu.cn

裂后立刻溃散,吸能优势不能充分发挥,严重限制了 泡沫混凝土作为防护材料的工程应用.为解决上述 问题,亟需改善泡沫混凝土的弯曲韧性.

聚乙烯(PE)纤维是一种高强度、高模量的聚合物纤维,将PE纤维掺入水泥基材料中会使试件在拉伸时出现明显的应变硬化^[4],可以极大地提升水泥基材料的变形能力.废旧细橡胶颗粒是一种具有高弹性的固废材料,具有高韧性和大变形^[5]等优良性能.就增韧机理而言,纤维可以通过桥接宏观裂缝来限制裂纹的扩展^[6],延缓试件的破坏^[7],从而达到改善试件吸能能力和韧性的效果^[8].细橡胶颗粒可以吸收弹性变形能,改善水泥基材料的变形能力和延性.

当前,对泡沫混凝土的研究多集中于压缩性能^[9-10]和冲击性能^[11]方面,对弯曲性能的研究较少,特别是对于具有应变硬化特性的PE纤维改性泡沫混凝土的弯曲性能研究亟待开展.另外,泡沫混凝土的宏观性能与孔隙结构联系密切^[12],而目前对PE纤维及其与细橡胶颗粒复掺改性泡沫混凝土性能与孔隙结构联系的认识还存在不足.

鉴于此,本文研究了PE纤维及其与细橡胶颗粒 复掺对泡沫混凝土弯曲破坏模式、力学性能、吸能特 性和弯曲韧性的影响,并结合孔隙结构和微观形貌 分析,探究了PE纤维和细橡胶颗粒对泡沫混凝土弯 曲性能的作用机理,研究结果可以为高比韧性泡沫 混凝土的研发提供参考.

1 试验

1.1 原材料

水泥(PC)为中国建筑材料科学研究院公司生产的P·I 42.5基准水泥,表观密度为3.11 g/cm³,比表面 积为358 m²/kg;硅灰(SF)为上海埃肯国际贸易有限 公司提供的微硅粉,表观密度为2.10 g/cm³,比表 面积为17 800 m²/kg,水泥和硅灰的化学组成(质 量分数,文中涉及的组成、减水率等除特别说明外 均为质量分数)见表1;增稠剂为上海臣启化工科 技有限公司生产的羟丙基甲基纤维素醚(HPMC), 黏度为200 000 mPa·s;稳泡剂(FSA)为硅树脂聚醚 乳液类稳泡剂;发泡剂为山东威海中盛有限公司提 供的高分子复合水泥发泡剂,发泡倍数20倍,pH= 6.5;细橡胶颗粒(RP)的粒径为250~425 µm(40~60 目),表观密度1090 kg/m³;纤维为PE纤维,其基本 性能见表2;减水剂(SP)为聚羧酸类高效减水剂,减 水率为25%;水(W)为自来水.

表 1 水泥和硅灰的化学组成 Table 1 Chemical compositions(by mass) of cement and silica fume

								Jnit: %
Material	SiO_2	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{Fe}_{2}\mathrm{O}_{3}$	CaO	MgO	SO_3	f-CaO	IL
PC	20.84	4.36	3.56	63.43	3.29	2.30	0.78	1.33
SF	92.50	0.40	0.80	0.60	0.60		0.40	3.90

表 2 PE 纤维的基本性能 Table 2 Basic properties of PE fiber

Diameter/µm	Length/mm	Elastic modulus/GPa	Tensile strength/MPa	Elongation/ %	Linear density/ $(g \cdot cm^{-3})$
25	18	122	3 100	3.5	0.97

1.2 配合比

为研究掺入PE纤维与细橡胶颗粒对泡沫混凝 土弯曲韧性的提升效果,本文设置了4组PE纤维单 掺以及3组PE纤维与细橡胶颗粒复掺的试件,共7 组,各组试件的配合比见表3.其中,PE纤维为外掺, 掺量(体积分数)分别为0.4%、0.8%、1.2%;细橡胶 颗粒为内掺,在掺最佳掺量PE纤维的基础上分别以 细橡胶颗粒等体积取代0.02、0.04、0.06 m³基准配合 比(M)的水泥浆体,每1 m³水泥浆体中均加入400 L 泡沫.

表 3 各组试件的配合比 Table 3 Mix proportions of each group of specimens

	Mix proportion/(kg·m ⁻³)							$D_{1} = \frac{1}{2} \frac{1}$	
Specimen	PC	SF	W	HPMC	SP	FSA	PE Fiber	RP	Density/(kg·m)
М	905.900	47.700	286.100	0.286	9.536	1.910	0	0	1 023
MF4	905.900	47.700	286.100	0.286	9.536	1.910	3.900	0	998
MF8	905.900	47.700	286.100	0.286	9.536	1.910	7.800	0	1 007
MF12	905.900	47.700	286.100	0.286	9.536	1.910	11.800	0	840
MR2F8	875.700	46.100	276.600	0.276	9.218	1.850	7.800	21.800	874
MR4F8	845.500	44.500	267.000	0.267	8.900	1.780	7.800	43.600	750
MR6F8	815.300	42.900	257.500	0.257	8.582	1.720	7.800	65.400	715

1.3 试件制备

首先,将PC、SF、HPMC、FSA等干粉料与RP (若有)混合并加入强制式水泥胶砂搅拌锅中干拌 1 min直至均匀;随后,加入水和减水剂的混合溶液; 接着,均匀缓慢加入PE纤维并继续搅拌3 min;然 后,将预先发泡好的相应体积泡沫加入浆料中搅拌 2 min得到复合浆料.其中,预先发泡泡沫的制备方 法为将发泡剂和水按1:20的质量比混合为发泡水, 然后利用空气压缩发泡机对发泡水进行发泡.制备 好的复合浆料分2层浇筑到40 mm×40 mm× 160 mm的模具中,每层振捣5 s,收面完成后覆膜养 护36 h后脱模,最终将试件放入标准养护室内 ((20±1)℃、相对湿度RH>95%)养护至28 d以待 力学测试.

1.4 测试方法

1.4.1 弯曲性能测试

弯曲性能测试采用 INSTRON 1342型材料万能 试验机,由试验机的力传感器和外接位移计测试加 载过程中的力和位移(见图1).测试试件的尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm,加载方式为三点弯曲法 位移加载,加载速率为0.06 mm/min,测试结果均取 3个试件的平均值.



图 1 弯曲性能测试 Fig. 1 Flexural performance test(size:mm)

1.4.2 孔隙结构测试

根据文献[13]提出的方法制备待测样品,将样

品置于 AOSVI AO-HD206 型光学显微镜下放大49 倍,在每个样品的中部不同区域拍摄5张照片计算孔 隙参数.图2为样品的孔隙图像,其视域大小为 6.57 mm×3.69 mm,样品的气孔(白色)和孔壁(灰黑 色)区分度良好.根据文献[13]提出的混凝土孔结构 图像分析方法,使用 Image Pro Plus软件对所制备样 品的孔隙图像进行二值化、对比增强和分割,并计算 得到孔隙率、平均圆度和平均孔径等结果.



图 2 样品的孔隙图像 Fig. 2 Pore image of sample

1.4.3 微观形貌观测

采用QUANTA FEG 250型发射环境扫描电子 显微镜(SEM)对试件的孔隙结构和微观形貌进行 观察.

2 结果与分析

2.1 弯曲破坏特征和荷载-挠度曲线

图 3 为典型试件的破坏特征.由图 3 可见:试件 M 表面仅有 1 条主裂纹,试件 MF4、MF8 和 MF12 表面除主裂纹外,在主裂纹附近还有多条细小裂纹, 这说明掺入 PE 纤维使泡沫混凝土的弯曲破坏特征 变为多缝开裂模式;试件 MR4F8 破坏后表面的可 见裂纹数目明显多于试件 MF8,说明相较于单掺 PE 纤维试件,复掺 PE 纤维和细橡胶颗粒试件产生 的裂纹数量更多且分布更密集,试件的多缝开裂模 式更明显.



图4为试件的弯曲荷载-挠度曲线.相较于传统 水泥基材料的弯曲特性,掺入PE纤维泡沫混凝土的 弯曲破坏过程可分为3个阶段^[14]:

(1)弹性阶段 此阶段可认为由孔壁承担荷载, 试件的承载力和挠度呈线性关系,当达到初裂强度 后试件的薄弱界面出现第1条裂缝,并发生第1次荷 载突降.

(2)应变硬化段 基体在初裂后发生失效,转变为PE纤维发挥桥连裂缝的作用,且随着挠度的增大 会出现多次承载力上升并突降的现象,同时伴随着 试件表面出现多缝开裂现象.



(3)应变软化段 随着挠度的增大,PE纤维不 断被拔出导致其与基体的黏结面积减小,纤维和基 体的黏聚力不足因而承载力不断降低,此时试件表 面的裂纹以主裂纹扩展为主.

由图4可见:纤维的掺入使得泡沫混凝土的 破坏方式脆性破坏转变为延性破坏,显著提升了 试件的变形能力,具体为试件表现出应变硬化段 与应变软化段平缓的特征;与试件MF8相比, 2%、4% 细橡胶颗粒的掺入虽然降低了试件的峰 值强度,但增大了试件的峰值挠度以及峰后的残 余强度.



(b) PE fiber and fine rubber particles compounding



2.2 峰值强度

纤维掺量过多时及细橡胶颗粒掺入后试件的密 度有所变化,而水泥基材料的强度与密度息息相关. 因此,为排除试件密度对峰值强度的干扰,除了峰值 强度外,本文还采用比强度^[15](弯曲峰值强度与密度 之比)来辅助评价其峰值强度.

图 5 为试件的峰值强度与比强度.由图 5 可见: (1)随着纤维掺量的增加,试件的峰值强度和比



Fig. 5 Peak strength and specific strength of specimens

强度先增大后减小,纤维掺量合适时可以显著提升 泡沫混凝土的力学性能.例如,相较于试件M,试件 MF8的峰值强度和比强度分别提升了80.1%和 82.7%,达到了4.90 MPa和4.86×10⁻³ MPa·m³/kg,这 主要得益于纤维对裂缝的桥接作用^[16].

(2)相较于试件 M,试件 MF12的峰值强度和比强度分别提升了5.9%、28.9%,这是因为纤维掺量过多时容易发生团聚,从而导致对泡沫混凝土力学性能的改善效果降低.此外,当纤维掺量固定为0.8%时,随着细橡胶颗粒掺量的增加,试件的峰值强度和比强度不断降低,当细橡胶颗粒掺量为6%时,峰值强度和比强度的下降幅度最大,试件 MR6F8的峰值强度和比强度相较于试件 MF8分别降低了59.8%、43.4%,这是由于细橡胶颗粒表面憎水,细橡胶颗粒和水泥石之间存在1个薄弱的界面过渡区^[17],相当于在孔壁中引入了缺陷.

2.3 能量吸收特性

泡沫混凝土含有大量的孔隙,具有显著的缓冲 吸能特性^[18],因此能量吸收特性是泡沫混凝土的一 项重要性能.本文参考文献[9],以能量吸收能力和 比能量吸收来分析各组试件的能量吸收特性,计算 的挠度范围为0~5mm.

图 6 为试件的能量吸收能力与比能量吸收.由图 6 可见:



Fig. 6 Energy absorption capacity and specific energy absorption of specimens

(1)试件M的能量吸收能力和比能量吸收很小,仅 为0.19 J和0.18×10⁻³ J/(kg·m³),而纤维的掺入显著 提升了试件的能量吸收能力和比能量吸收,这主要得 益于纤维优异的裂缝桥接能力和持续变形能力^[9];随着 纤维掺量的增加,试件的能量吸收能力和比能量吸收 呈现先增加后降低的趋势,其中纤维掺量为0.8%时的 效果最佳,分别为6.46 J和6.42×10⁻³ J·m³/kg,试件 MF8的能量吸收能力和比能量吸收相较于试件M分 别增加了33倍和34.7倍.

(2)当纤维掺量为 0.8% 时,随着细橡胶颗粒掺 量的增加,试件的能量吸收能力逐渐降低,这是由于 细橡胶颗粒的掺入导致其峰值强度不断下降所致. 值得注意的是,合适掺量细橡胶颗粒的掺入增强了 试件的比能量吸收.例如,当细橡胶颗粒掺量为 2% 和 4% 时,试件的比能量吸收分别为 7.31×10⁻³、 7.54×10⁻³J·m³/kg,相比试件 MF8 分别提升了 13.9%、17.4%,说明合适掺量的细橡胶颗粒对纤维 增强泡沫混凝土比能量吸收的提升效果大于由于峰 值强度降低所引起的削弱效果.总而言之,细橡胶颗 粒的掺入虽然会降低试件的峰值强度,但细橡胶颗 粒的掺入虽然会降低试件的峰值强度,但细橡胶颗

2.4 弯曲韧性

水泥基材料的弯曲韧性与不同变形阶段的能量 吸收能力相关,参考ASTM C1018 Standard Test Method for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third Point Loading)定义的弯曲韧性指数的 评价方法,本文计算弯曲韧性指数 I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 、 I_{30} 来评价 弯曲韧性,计算方式为目标挠度为3.0δ_{er}、5.5δ_{er}、 10.5δ_{er}、15.5δ_e前与开裂挠度δ_e(荷载-挠度曲线上升 段出现第1次荷载突降处的挠度值)前荷载-挠度曲 线下面积的比值,在本文中反映了韧性组分相对基 体弯曲韧性的提升效果.

表4为试件的弯曲韧性指数.由表4可见:

表 4 试件的弯曲韧性指数 Table 4 Flexural toughness indexes of specimens

Specimen	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}
М	1.0	1.0	1.0	1.0
MF4	4.6	9.2	15.2	18.8
MF8	5.6	12.8	26.2	35.4
MF12	5.3	11.4	23.2	32.7
MR2F8	6.4	16.7	31.2	45.9
MR4F8	6.2	14.3	32.4	49.9
MR6F8	5.6	12.5	26.4	37.5

(1)随着纤维掺量的增加, I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 、 I_{30} 值均呈现 先增加后降低的趋势,当纤维掺量为0.8%时, I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 、 I_{30} 值均达到最大值,说明泡沫混凝土弯曲韧性指 数的提升效果最佳时,PE纤维的推荐掺量为0.8%.

(2) 细橡胶颗粒掺量的变化对试件的韧性指数 的提升具有不同的积极效果: 细橡胶颗粒掺量为 2% 时对试件 I_5 、 I_{10} 值的提升效果最佳,相较于试件 MF8分别提升了14.3%、30.5%; 细橡胶颗粒掺量为 4% 时对 I_{20} 、 I_{30} 值的提升效果最佳,相较于试件MF8 分别提升了23.7%、41.0%; 当细橡胶颗粒掺量为 6% 时, 对试件弯曲韧性指数的提升效果不显著.

以上结果说明,细橡胶颗粒掺量较低时对试件 峰值挠度前应变硬化段弯曲韧性的提升效果好,而 细橡胶颗粒掺量适中时对整体变形阶段弯曲韧性的 提升效果好,同时细橡胶颗粒的掺量不宜过大,否则 细橡胶颗粒对强度的负面影响导致无法有效地提高 泡沫混凝土的弯曲韧性指数.

在本试验中,15.5 δ_{er} 对应的目标挠度在 3.30~ 4.37 mm 之间,而本试验中测试的极限挠度为 5 mm,故以 I_{30} 来评价试件的峰后弯曲韧性仍具有一 定的局限性.因此,本文根据文献[19]提出的等效 弯曲韧度比来辅助评价弯曲韧性,包括初始弯曲韧 度比($R_{e,p}$)和残余弯曲韧度比($R_{e,k}$),二者分别评价 峰前弯曲韧性和峰后弯曲韧性,计算方式如式(1)~ (4)所示.

$$R_{\rm e,p} = \frac{\sigma_{\rm e,p}}{\sigma} \tag{1}$$

$$\sigma_{\rm e,p} = \frac{3T_{\rm p}L}{2bh^2\delta_{\rm p}} \tag{2}$$

$$R_{\rm e,k} = \frac{1}{\sigma} \tag{3}$$

$$\sigma_{\mathrm{e,k}} = \frac{3T_{\mathrm{p,k}}L}{2bh^2(\delta_{\mathrm{k}} - \delta_{\mathrm{p}})} \tag{4}$$

式中: $\sigma_{e,p}$ 为等效初始弯曲强度,MPa; σ 为峰值强度, MPa; δ_p 为峰值挠度,mm; T_p 为 δ_p 之前试件荷载-挠 度曲线包围的面积,N·mm;L为加载跨距,mm;b为 试件宽度,mm;h为试件高度,mm; $\sigma_{e,k}$ 为等效残余弯 曲强度,MPa; δ_k 为目标挠度,mm,取5mm; $T_{p,k}$ 为 δ_p 至 δ_k 范围内试件荷载-挠度曲线包围的面积,N·mm.

表5为试件的等效弯曲韧度比.由表5可见:当 纤维掺量为0.4%、0.8%和1.2%时,试件的 $R_{e,o}$ 值分 别为 0.469、0.492 和 0.513, R_{e,k} 值分别为 0.307、 0.378、0.495,说明纤维可以改善试件的峰前弯曲韧 性和峰后弯曲韧性,就提升幅度来说对峰后弯曲韧 性的提升更高;试件MR2F8、MR4F8与MR6F8的 $R_{\rm en}$ 值相较试件MF8分别提升了6.7%、8.7%、5.3%, 说明细橡胶颗粒掺入对试件的R_e,值有一定的提升 效果,但并不显著;试件MR2F8、MR4F8与MR6F8 的 R_{e,k} 值 相 较 于 试 件 MF8 分 别 提 升 了 26.2%、 60.3%、63.0%,说明细橡胶颗粒对试件Rek值的提升 较为显著,当掺量大于4%时,可具有高达60%以上 的提升.值得注意的是,当细橡胶颗粒掺量从4%提 高至6%时,试件 $R_{e,k}$ 值的提升幅度并不大,甚至 $R_{e,p}$ 值还略有降低,这说明试件在具有良好的弯曲韧性 下,细橡胶颗粒的推荐掺量为4%.

表 5 试件的等效弯曲韧度比 Table 5 Equivalent flexural toughness ratios of specimens

Specimen	$R_{ m e,p}$	$R_{ m e,k}$
MF4	0.469	0.307
MF8	0.492	0.378
MF12	0.513	0.495
MR2F8	0.525	0.477
MR4F8	0.535	0.606
MR6F8	0.518	0.616

表6为现有研究^[20-22]中纤维增强泡沫混凝土的弯曲韧性指数结果,类型包括玻璃纤维(GF)、聚丙烯纤维(PPF)、玄武岩纤维(BF)、碳纤维(CF)等单掺或 双掺,并与本文试件MF4、MR4F8的弯曲韧性指数 进行了对比.由表6可见:本文试件MR4F8的*I*₁₀、*I*₂₀、 *I*₃₀值均显著高于其他类型纤维增强泡沫混凝土,表明 PE纤维和细橡胶颗粒对泡沫混凝土弯曲韧性的提升 效果相比其他类型纤维更为显著;试件MF4的*I*₂₀、*I*₃₀ 值均高于其他类型纤维增强泡沫混凝土,说明当PE 纤维相比其他类型纤维渗量更低时,也可以得到更

表 6 不同类型纤维增强泡沫混凝土的弯曲韧性指数对比 Table 6 Comparison of flexural toughness index of different types of fiber reinforced Foam concrete

Specimen	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}
MF4	4.6	9.2	15.2	18.8
MF8	5.6	12.8	26.2	35.4
MR4F8	6.2	14.3	32.4	49.9
$0.2\% GF + 1.0\% PPF^{[20]}$	4.2	7.2		18.2
$1.0\% PPF + 0.5\% CF^{[21]}$	6.5	10.5	12.5	
$0.45\% BF^{[22]}$	2.6	3.6		

好的弯曲韧性.

3 机理分析

3.1 孔结构对泡沫混凝土峰值强度的作用机理

表7为试件的孔隙参数,圆度为所测截面接近理 论圆的程度,圆度越接近1则越接近理论圆.图7为 试件的孔隙图像,左图为光学显微镜下的孔隙图像, 右图为SEM下的孔隙图像.通过前期试验得到不含 泡沫的净浆试件的干密度为1922 kg/m³,通过密度 法^[23]计算得到试件的理论孔隙率,由表7可以看出, 实测孔隙率与理论孔隙率相差不大.

表7 试件的孔隙参数

由表7可见:

Table 7 Pore parameters of specimens Measured Theoretical Average porosity Average Specimen porosity pore size/ (by roundness (by volume) μm volume) 0.468 0.462 1.43 Μ 66 MF4 0.481 0.484 1.38 58 MF8 0 477 0 459 1.31 52 0.563 0.573 1.44 60 MF12

MR2F8 0.546 0.538 1.46 64 0.610 MR4F8 0.600 1.48 70 MR6F8 0.628 0.6161.5273 (1)随着纤维掺量的提升,试件的平均圆度先减 小后增大,可见适宜掺量(0.8%以下)PE纤维的掺入 可以提升泡沫混凝土孔隙的规则程度.同时,相较于 试件M,试件MF4、MF8的平均孔径均有不同程度 降低.结合图7(a)、(b)可知,掺入PE纤维使得泡沫 混凝土的小孔数量增多,说明纤维的掺入细化了泡 沫混凝土的孔径.在孔隙率相差不大时,平均孔径越 小、大孔数量越少,则泡沫混凝土的力学性能越高[24], 这与试件MF8与M峰值强度的结果相一致.值得注 意的是,试件MF12的平均孔径虽然相比试件M有

所减小,但试件MF12的实测孔隙率则高达0.573,这 也是试件MF12的峰值强度低于试件M的主要

吴 吴,等:PE纤维与细橡胶颗粒对泡沫混凝土弯曲韧性的影响



(c) MR4F8

(d) MR6F8

图 7 试件的孔隙图像 Fig. 7 Pore images of specimens

原因.

(2)当纤维掺量固定为0.8%且进一步掺入细橡 胶颗粒时,随着细橡胶颗粒掺量的增加,试件的孔隙 率和平均圆度不断增大,这说明掺入细橡胶颗粒后 试件的气孔含量增多且气孔的规则度降低.相比于 试件MF8,掺入细橡胶颗粒后试件的测试面单个大 面积白色区域的数量明显增多,且不同白色区域之 间的联通现象比较明显.结合 SEM 图像和表6分析 可知,上述现象表明细橡胶颗粒的掺入导致试件的 平均孔径增大,内部联通气孔的数目增多.此外,在 SEM 图像下还可以发现,相比于试件 MF8,掺入细 橡胶颗粒试件MR4F8和MR6F8的气孔之间存在着 连通裂纹,以上孔隙结构劣化佐证了细橡胶颗粒对 试件峰值强度的负面影响.

3.2 纤维与细橡胶颗粒对泡沫混凝土弯曲韧性的作 用机理

图8为试件的微观形貌.由图8可见:

(1)纤维粘结于泡沫混凝土的孔壁,其在泡沫混 凝土中的破坏方式为拔出破坏,且纤维表面粘结有 水化产物,表明纤维在拔出破坏过程中与基体发生 粘结滑移,纤维与基体之间的摩擦会消耗大量能 量^[25],有利于试件弯曲韧性的提升.当纤维掺量过高



(a) Fiber pull-out in MF8



(b) Fiber agglomeration in MF12



(c) Fine rubber particles in MR4F8
 (d) Fine rubber particles and PE fiber in MR4F8
 图 8 试件的微观形貌
 Fig. 8 Microscopic morphologies of specimens

(1.2%)时,纤维会发生团聚,同时团聚的纤维附近还 引入了多余的气孔,因此过量纤维的掺入会导致其 对泡沫混凝土弯曲韧性的改善程度减弱.

(2)由图8(c)可以看出,细橡胶颗粒附着于孔壁 内.橡胶是一种弹韧性颗粒,可以通过变形储能来消 耗外界传递的能量[26],故在孔壁受到荷载作用时,细 橡胶颗粒会被挤压并发生变形[27],从而产生一定的 耗能作用;同时,试件在受力过程中孔壁会开裂产生 微裂缝,细橡胶颗粒可以降低这些微裂缝尖端的应 力集中[28],延缓泡沫混凝土的破坏过程,从而达到改 善泡沫混凝土吸能特性和弯曲韧性的目的.此外,细 橡胶颗粒和孔壁间存一个薄弱界面过渡区(见图8 (c)),说明细橡胶颗粒和水泥石之间的黏结性能较 差,这与宏观峰值强度的结果相一致.更重要的是, 结合图 3(c)、(e)和图 8(d)可知,细橡胶颗粒的进一 步掺入使PE纤维产生的多缝开裂模式更加显著,这 会更有利于细橡胶颗粒耗能作用的发挥.因此,二者 复掺可以显著提升试件的变形能力,从而进一步提 升泡沫混凝土的弯曲韧性.

4 结论

(1)PE纤维的掺入使泡沫混凝土产生了应变硬 化特性和多缝开裂模式,进一步复掺细橡胶颗粒可 以使试件的多缝开裂模式更加显著.复掺细橡胶颗 粒可以使试件的峰值挠度增大,同时弯曲荷载-挠度 曲线的下降段更为平缓且残余强度更高.

(2)当PE纤维掺量为0.8%时,试件的峰值强度 和比强度相比基准组的提升幅度高达80%以上,能 量吸收能力和比能量吸收分别增加了33倍和34.7 倍,PE纤维的掺入可以显著提升泡沫混凝土的变形 能力.比能量吸收能够较好地反映细橡胶颗粒对试 件吸能特性的增强作用,细橡胶颗粒推荐掺量为4% 时试件的比能量吸收增幅达到17.4%,复掺细橡胶 颗粒有利于制备高比能泡沫混凝土;细橡胶颗粒对 试件残余弯曲韧性的提升效果显著,推荐掺量为4% 时试件的残余弯曲韧度比相比未掺细橡胶颗粒时提 升了60.3%.

(3)掺入PE纤维可以降低试件的平均孔径和平均圆度,有利于泡沫混凝土峰值强度的提升;进一步复掺细橡胶颗粒会使试件的孔隙率增大,同时伴有平均孔径和平均圆度的增大以及联通孔的增多,从而导致其峰值强度有较大的降低.

(4)细橡胶颗粒可以降低泡沫混凝土裂缝尖段 的应力集中并吸收能量,延缓泡沫混凝土的破坏过 程.PE纤维产生的多缝开裂模式有利于细橡胶颗粒 耗能作用的发挥,二者复掺可以进一步提升泡沫混 凝土的弯曲韧性.

参考文献:

- [1] 宋强,张鹏,鲍玖文,等.泡沫混凝土的研究进展与应用[J].硅 酸盐学报,2021,49(2):398-410.
 SONG Qiang, ZHANG Peng, BAO Jiuwen, et al. Research progress and application of foam concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(2):398-410. (in Chinese)
- [2] YANG Y Y, ZHOU Q, DENG Y, et al. Reinforcement effects of multi-scale hybrid fiber on flexural and fracture behaviors of ultra-low-weight foamed cement-based composites[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 128:104422.
- [3] 曾志军,徐文,谢德擎,等.机场拦阻系统泡沫混凝土海水侵蚀 性能劣化规律[J].交通运输工程学报,2021,21(2):56-65.
 ZENG Zhijun, XU Wen, XIE Deqing, et al. Performance deterioration law of foam concrete in airport arresting system under seawater corrosion[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2):56-65. (in Chinese)
- [4] 王激扬,马卫强,胡志华,等.PE纤维掺量对水泥基复合材料力 学性能的影响[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(11): 2130-2135,2214.
 WANG Jiyang, MA Weiqiang, HU Zhihua, et al. Effect of PE fiber content on mechanical behavior of cementitious composite [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2017, 51(11):2130-2135,2214.(in Chinese)
- [5] 刘家兴,杨荣周,徐颖,等.超高强度橡胶混凝土的力学特性及能量演化[J].建筑材料学报,2023,26(6):612-622.
 LIU Jiaxing, YANG Rongzhou, XU Ying, et al. Mechanical properties and energy evolution of ultra high strength rubber concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6):612-622.
 (in Chinese)
- [6] 王俊颜,庄云芳,刘菲凡,等.减缩剂和PVA纤维对超轻水泥复 合材料收缩开裂行为的影响[J].建筑材料学报,2022,25(7): 744-750.

WANG Junyan, ZHUANG Yunfang, LIU Feifan, et al. Effect of shrinkage reduce admixture and PVA fiber on shrinkage cracking behaviors of ultra lightweight cement composite [J].
Journal of Building Materials, 2022, 25 (7): 744-750. (in Chinese)

- [7] ZHOU W M, MO J X, ZENG L, et al. Fracture behavior of polypropylene fiber reinforced concrete modified by fine rubber particles exposed to elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2022, 346:128439.
- [8] 白光,田义,余林文,等.聚乙烯醇纤维对碱矿渣泡沫混凝土性能的影响[J].材料导报,2018,32(12):2096-2099.
 BAI Guang, TIAN Yi, YU Linwen, et al. Effect of PVA fiber on the properties of alkali activated slag foam concrete [J]. Materials Reports, 2018, 32(12):2096-2099. (in Chinese)
- [9] YANG Y Y, ZHOU Q , DENG Y. The reinforcement attributes

- [10] 李升涛,陈徐东,张锦华,等.不同密度等级泡沫混凝土的单轴 压缩破坏特征[J].建筑材料学报,2021,24(6):1146-1153.
 LI Shengtao, CHEN Xudong, ZHANG Jinhua, et al. Failure characteristics of foam concrete with different density under uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2021,24 (6):1146-1153. (in Chinese)
- [11] 黄海健,宫能平,穆朝民,等.泡沫混凝土动态力学性能及本构 关系[J].建筑材料学报,2020,23(2):466-472.
 HUANG Haijian, GONG Nengping, MU Zhaomin, et al. Dynamic mechanical properties and constitutive relation of foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):466-472. (in Chinese)
- [12] 庞超明,王少华.泡沫混凝土孔结构的表征及其对性能的影响
 [J].建筑材料学报,2017,20(1):93-98.
 PANG Chaoming, WANG Shaohua. Void characterization and effect on properties of foam concrete [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):93-98. (in Chinese)
- [13] 张雄,黄廷皓,张永娟,等. Image-Pro Plus 混凝土孔结构图像分析方法[J].建筑材料学报, 2015, 18(1):177-182.
 ZHANG Xiong, HUANG Tinghao, ZHANG Yongjuan, et al. Image-Pro Plus analysis of pore structure of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1):177-182. (in Chinese)
- [14] SHANG J, ZHAO K Y, ZHANG P, et al. Flexural behavior of plain concrete beams containing strain hardening cementitious composite layers with high-volume fly ash[J]. Construction and Building Materials, 2021, 286:122867.
- [15] SHAFIGH P, CHAI L J, MAHMUD H B, et al. A comparison study of the fresh and hardened properties of normal weight and lightweight aggregate concretes [J]. Journal of Building Engineering, 2018, 15:252-260.
- [16] RAJ B, SATHYAN D, MADHAVAN M K, et al. Mechanical and durability properties of hybrid fiber reinforced foam concrete
 [J]. Construction and Building Materials, 2020, 245:118373.
- [17] SHAO J W, ZHU H, ZHAO B, et al. Combined effect of recycled tire rubber and carbon nanotubes on the mechanical properties and microstructure of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 322;126493.
- [18] 于泽明,陈艳,马嵘萍,等.动/静荷载作用纤维-矿粉-聚苯乙 烯混凝土吸能特征研究[J].材料导报,2021,35(增刊2):669-677. YU Zeming, CHEN Yan, MA Rongping, et al. Study on energy absorption characteristics of BF-SP-EPS concrete under dynamic/ static load[J]. Materials Reports, 2021, 35(Suppl 2):669-677. (in Chinese)
- [19] 高丹盈,赵亮平,冯虎,等.钢纤维混凝土弯曲韧性及其评价方

法[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5):783-789.

GAO Danying, ZHAO Liangping, FENG Hu, et al. Flexural toughness and it's evaluation method of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5):783-789. (in Chinese)

- [20] DAWOOD E T, HAMAD A J. Toughness behaviour of high-performance lightweight foamed concrete reinforced with hybrid fibres[J]. Structural Concrete, 2015, 16(4):496-507.
- [21] DAWOOD E T, MOHAMMAD Y Z, ABBAS W A, et al. Toughness, elasticity and physical properties for the evaluation of foamed concrete reinforced with hybrid fibers[J]. Heliyon, 2018, 4(12):e01103.
- [22] 詹奇淇,詹炳根.玄武岩纤维增强泡沫混凝土韧性及抗压强度 试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(5): 667-672.

ZHAN Qiqi, ZHAN Binggen. Experimental study on toughness and compressive strength of basalt fiber reinforced foamed concrete [J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2020, 43 (5):667-672. (in Chinese)

- [23] GHAHREMANI G, BAGHERI A, ZANGANEH H. The effect of size and shape of pores on the prediction model of compressive strength of foamed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 371:130720.
- [24] 胡艳丽,郝晋高,赵向敏,等.泡沫轻质混凝土性能与孔结构关系研究[J].南京理工大学学报(自然科学版),2019,43(3): 363-366.

HU Yanli, HAO Jingao, ZHAO Xiangmin, et al. Relationship between properties and pore structure offoamed lightweight concrete [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 43 (3) : 363-366. (in Chinese)

- [25] YANG K, LONG G C, TANG Z, et al. Enhancement in strength and toughness of ultra-high performance concrete(UHPC) from micron- and nano-scale [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 69:106308.
- [26] FENG W H, CHEN Z, TANG Y C, et al. Fracture characteristics of sustainable crumb rubber concrete under a wide range of loading rates[J]. Construction and Building Materials, 2022, 359:129474.
- [27] FANG M J, CHEN Y M, DENG Y G, et al. Toughness improvement mechanism and evaluation of cement concrete for road pavement: A review[J]. Journal of Road Engineering, 2023 (2):125-140.
- [28] CHENG Z Q, YANG K, TANG Z, et al. Experimental investigation on flexural and compressive toughness of mortar and concrete with hybrid toughening materials[J]. Structures, 2022, 43:1592-1599.