

PET纤维对陶粒混凝土力学及热工性能的影响

黄伟杰¹, 陈森², 黄孟臣², 林国良²

(1. 中大(福建)工程建设集团有限公司, 福建 南平 353100;

2. 福建理工大学土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 通过试验探究 PET 纤维对页岩陶粒混凝土力学性能及热工性能的影响规律。测试不同水灰比(0.32、0.36、0.40)、PET 纤维长度(6 mm、9 mm、12 mm)和体积掺量(0.25%、0.5%、0.75%)的 PET 纤维陶粒混凝土的坍落度、干密度、28 d 抗压强度及导热系数,并结合压汞法和扫描电子显微镜分析其微观机理。结果表明:PET 纤维的掺入显著降低混凝土坍落度,且坍落度随掺量的增加和纤维长度的增长而下降;水灰比从 0.32 增至 0.40 时,抗压强度下降 30.1%,导热系数降低 5.8%,体现了孔隙效应与界面劣化的耦合作用结果。PET 纤维通过引入低密度孔隙及其自身低导热性可提升混凝土的保温性能,但掺入过量的 PET 纤维(体积掺量 $\geq 0.75\%$)会因团簇引发缺陷导致混凝土强度骤降;掺加 12 mm 长 PET 纤维可优化混凝土的孔隙分布,形成“纤维-陶粒-水泥基体”三元联锁框架,协同提升混凝土的界面粘结强度与热阻效率。

关键词: PET 纤维;陶粒混凝土;力学性能;热工性能;微观结构;孔隙特征

中图分类号: TV523

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)03-0250-08

Effect of PET fibers on mechanical and thermal properties of ceramsite concrete

HUANG Weijie¹, CHEN Sen², HUANG Mengchen², LIN Guoliang²

(1. Zhongda (Fujian) Engineering Construction Group Co., Ltd., Nanping 353100, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Experiments were conducted to explore the influence of PET fibers on the mechanical and thermal properties of shale ceramsite concrete. Tests were performed to find out the slump, dry density, 28 d compressive strength and thermal conductivity of PET fiber ceramsite concrete with different water-cement ratio (0.32, 0.36, 0.40), PET fiber length (6 mm, 9 mm, 12 mm) and volume content (0.25%, 0.5%, 0.75%). The microstructural mechanisms were analyzed using mercury intrusion porosimetry and scanning electron microscopy. Results indicate that the addition of PET fibers significantly reduces concrete slump, with a decrease in slump observed as both fiber content and length increase. When the water-cement ratio increases from 0.32 to 0.40, compressive strength decreases by 30.1% while thermal conductivity decreases by 5.8%. These changes reflect the coupled effects of porosity and interfacial degradation. PET fibers enhance the thermal insulation properties of concrete by introducing low-density pores along with their inherent low thermal conductivity characteristics. However, an excessive content of PET fibers (volume fraction $\geq 0.75\%$) leads to a sudden reduction in strength due to defects induced by agglomeration. Incorporating PET fibers with a length of 12 mm optimizes pore distribution within the concrete matrix, forming a ternary interlocking framework comprising “fiber-ceramsite-cement matrix.” This configuration synergistically enhances both interfacial bond strength and thermal resistance efficiency.

Keywords: PET fiber; ceramsite concrete; mechanical property; thermal property; microstructure; pore characteristics

收稿日期: 2025-07-11

基金项目: 福建省科技计划项目(2023H0016)

第一作者简介: 黄伟杰(1986—), 男, 福建泉州人, 工程师, 研究方向: 土木工程。

通信作者: 林国良(1981—), 男, 福建莆田人, 副教授, 博士, 研究方向: 新型建筑材料、结构健康监测。

页岩陶粒混凝土因其轻质、保温及环保的特性,在建筑节能与结构轻量化领域应用广泛^[1-3]。但其固有的脆性大、抗裂性差等缺陷阻碍了其在结构工程中的应用^[4-5]。近年来,纤维增强技术成为改善混凝土性能的有效方法^[6-8],其中PET纤维因其具有低成本、高延性及耐碱腐蚀等优点,在混凝土改性研究中备受关注^[9]。彭全敏等^[10]发现在再生混凝土中掺加PET纤维,虽然会引入薄弱的界面过渡区,但适量时可使再生混凝土结构致密,提高其抗压强度和劈裂抗拉强度。袁旺等^[11]研究发现,掺加PET纤维格栅可以增强混凝土抗折强度,但对其抗压强度有负面作用。黄斐^[12]通过研究PET废纤对加气混凝土浆料及砌块宏观性能的影响,发现随着PET废纤掺量或长度的增加,加气混凝土浆料的流动性降低;掺加适量的PET纤维会略微降低加气混凝土砌块的干密度和导热系数,提升加气混凝土砌块的力学性能。

现有研究多聚焦于PET纤维对混凝土力学性能的改良,对其与陶粒的界面协同增强机制的关注不足,纤维诱导的孔隙结构演变对材料综合性能的调控机理尚不明确。

本文以页岩陶粒混凝土为基体,掺入PET纤维构建轻质高强隔热复合材料PET纤维陶粒混凝土。探讨水灰比、PET纤维长度及体积掺量对混凝土工作性、物理性能、力学性能和热工性能的影响规律;结合压汞法(mercury intrusion porosimetry, MIP)孔隙定量分析和扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)微观形貌表征,揭示PET纤维-陶粒-水泥基体三相体系的界面增强机制与孔隙调控原理。旨在阐明纤维参数与水灰比的协同优化路径,为设计兼具良好力学性能和高效保温特性的陶粒混凝土提供理论支撑。

1 试验概况

1.1 试验材料

PET纤维陶粒混凝土的主要组成有:水泥、河砂、页岩陶粒、PET纤维、外加剂和拌合水。其中,水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥。粗骨料采用碎石型页岩陶粒,细骨料采用天然河砂,骨料的基本物理性质见表1。PET纤维采用上海臣启化工科技有限公司生产的束状单丝纤维,其主要性能见表2。外加剂选用减水率为27%的聚羧酸系高性能减水剂,拌合水为自来水。

表1 陶粒和河砂的基本物理性质

Tab.1 Basic physical properties of ceramsite and river sand

骨料	粒径/mm	表观密度/kg·m ⁻³	堆积密度/kg·m ⁻³	1 h 吸水率/%	筒压强度/MPa
页岩陶粒	4.75~10	788	1 472	10.0	6.5
河砂	0.075~4.75	2 600	1 480	0.76	—

表2 PET纤维的物理和力学性能

Tab.2 Physical and mechanical properties of PET fibers

纤维名称	长度/mm	密度/g·cm ⁻³	直径/μm	抗拉强度/MPa	断裂延伸率/%
PET纤维	6, 9, 12	1.36	15-25	≥700	21~39

1.2 配合比设计

参照《轻骨料混凝土应用技术标准》(JGJ/T 12-2019)^[13]设计PET纤维陶粒混凝土的基础配合比。配合比计算中粗细骨料用量均以干燥状态为基准,称量前将陶粒和河砂在105℃干燥箱中烘干至恒重。称量好的干燥陶粒在使用前进行预湿处理,即:将陶粒置于塑料箱中,注水直至没过陶粒,1 h后取出陶粒并沥干,在自然状态下风干

至表面无水分。根据绝对体积法计算基本配合比,砂率取45%,用水量为160 kg/m³,减水剂用量为水泥用量的0.5%。在基础配合比的基础上,以水灰比、PET纤维长度和体积掺量作为陶粒混凝土配合比优化设计的控制参数,选取不同的水灰比(0.32、0.36、0.40)、PET纤维长度(6 mm、9 mm、12 mm)和PET纤维体积掺量(0、0.25%、0.5%、0.75%),设计了8组PET纤维陶粒混凝土

土,具体配合比如表 3 所示。其中,未掺加 PET 纤维的陶粒混凝土(0.36w/c)作为对照组。

表 3 PET 纤维陶粒混凝土配合比设计

Tab.3 Mix proportion design of PET fiber ceramsite concrete

单位:kg/m³

样品编号	水泥	陶粒	河砂	水	PET 纤维	减水剂
0.36w/c	444	563	866	160	—	2.22
0.32w/c-0.25PET-9	500	563	866	160	0.25	2.50
0.36w/c-0.25PET-9	444	563	866	160	0.25	2.22
0.40w/c-0.25PET-9	400	563	866	160	0.25	2.00
0.36w/c-0.5PET-9	444	563	866	160	0.50	2.22
0.36w/c-0.75PET-9	444	563	866	160	0.75	2.22
0.36w/c-0.5PET-6	444	563	866	160	0.50	2.22
0.36w/c-0.5PET-12	444	563	866	160	0.50	2.22

注:样品编号规则为“水灰比-PET 纤维体积掺量-PET 纤维长度”。如“0.32w/c-0.25PET-9”代表水灰比为 0.32, PET 纤维体积掺量为 0.25%,PET 纤维长度为 9 mm 的陶粒混凝土样品,其中 w/c 为水灰比。

1.3 试验方法

1.3.1 试件的制备

为使 PET 纤维在陶粒混凝土搅拌过程中能够均匀分散,采用分步加料和延长搅拌时间的方式制备试件。具体步骤为:在单卧轴强制式混凝土搅拌机中加入水泥、河砂及预湿 1 h 并表面风干的陶粒干拌 120 s,再均匀加入 PET 纤维搅拌 60 s,最后加入掺减水剂的拌合水继续搅拌 120 s。然后,将拌合物倒入涂有脱模剂的模具中,置于混凝土振动台上振动密实,振动时间为 60 s。待试件成型后覆塑料薄膜保湿,24 h 后拆模并于标准条件(温度 20±2 ℃,相对湿度 ≥95%)下养护 28 d。

共制备两类试件:用于测试干密度与抗压强度的 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件(每组 6 个试件)和用于测试导热系数的 300 mm×300 mm×30 mm 平板试件(每组 2 个试件)。

1.3.2 试件性能的检测方法

测试试件的系统性能,包括:(1)工作性,依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080-2016)^[14]测试新拌混凝土的坍落度。(2)干表观密度,依据《轻骨料混凝土应用技术标准》(JGJ/T12-2019)^[13],将立方体试件于(105±5)℃下烘至恒重后测定。(3)抗压强度,依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)^[15],采用 HCT306B 压力试验机,以

0.5 MPa/s 的加载速率对立方体试件进行 28 d 抗压测试。(4)导热系数,依据《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法》(GB/T 10294-2008)^[16],将平板试件烘干至恒重后,使用 DRCD-3030 导热仪,在冷板 15 ℃、热板 35 ℃的稳定条件下测定。

2 结果与讨论

2.1 性能测试结果

2.1.1 坍落度

PET 纤维陶粒混凝土的坍落度随水灰比、PET 纤维体积掺量及长度的变化如图 1 所示。结果表明,PET 纤维陶粒混凝土的坍落度随水灰比的增加显著增长,以水灰比 0.32 为对照,当水灰比增至 0.36 和 0.40 时,坍落度分别增加了 46.7% 和 73.3%。PET 纤维陶粒混凝土的坍落度随 PET 纤维体积掺量的增加或纤维长度的增长呈不同程度的下降趋势,与对照组(0.36w/c)相比,样品 0.36w/c-0.25PET-9 的坍落度降低了 21.4%,表明 PET 纤维的加入会削弱混凝土流动性,这是由于较高掺量或较长长度的 PET 纤维易在水泥基体中形成空间网状结构,该结构束缚水泥浆体与骨料的移动,限制混凝土整体变形能力,从而导致坍落度降低^[17],并且,高掺量或过长的 PET 纤维易因搅拌不均形成团簇,进一步阻碍了浆体流动^[18]。

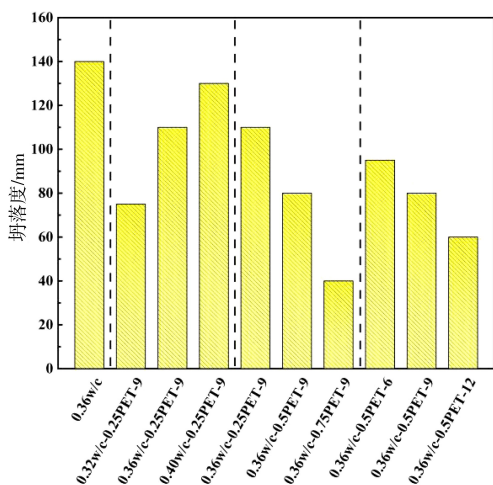
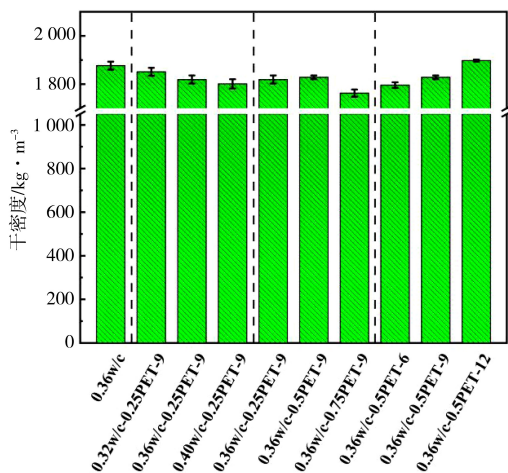


图1 陶粒混凝土的坍落度柱状图

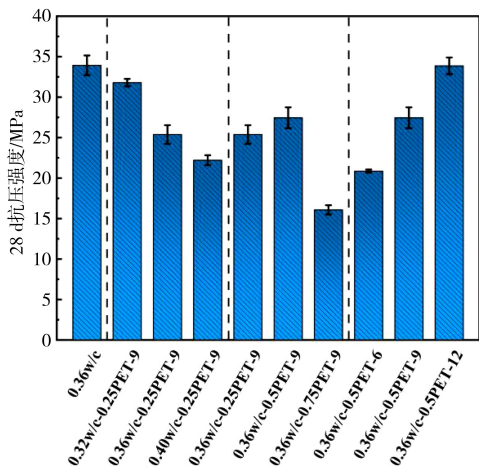
Fig.1 Slump histogram of ceramsite concrete

2.1.2 干密度、抗压强度和导热系数

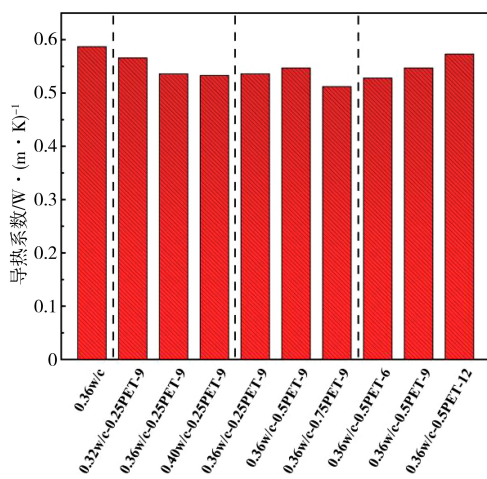
PET纤维陶粒混凝土的物理力学性能与热工特性如图2所示。



(a) 干密度



(b) 28 d抗压强度



(c) 导热系数

图2 陶粒混凝土的物理、热工性能柱状图

Fig.2 Histogram of mechanical and thermal properties of ceramsite concrete

由图2可知,PET纤维陶粒混凝土的抗压强度、干密度和导热系数随水灰比的升高而降低,水灰比由0.32增至0.40时,PET纤维陶粒混凝土的干密度由 1851 kg/m^3 降至 1801 kg/m^3 (降幅2.7%),28 d抗压强度由 31.79 MPa 降至 22.21 MPa (降幅30.1%),导热系数由 $0.566\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 降至 $0.533\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (降幅5.8%)。这种现象体现了性能间的耦合效应,其机理为:水灰比的升高导致过量的自由水在水化反应后蒸发,在水泥基内部形成发达的毛细孔隙网络,这些孔隙直接降低了材料的干密度并削弱了其结构完整性,但孔隙的存在有利于降低导热系数^[19];同时,水灰比的升高削弱了界面过渡区(interface transition zone, ITZ)的质量,陶粒表面因水泥浆体包裹不足形成“弱结合界面”,水泥基体内不连续区域增多致使应力传递效率下降^[20]。因此,孔隙率的增加有利于改善混凝土的隔热性能,但孔隙效应与界面劣化的共同作用又会导致混凝土抗压强度降低使其力学性能下降,这种性能退化的非线性关联对轻质高强隔热混凝土设计具有重要指导意义。

与对照组0.36w/c相比,掺入PET纤维的陶粒混凝土的抗压强度、干密度及导热系数均有不同程度的降低。此现象归因于PET纤维的固有特性:密度低、憎水性和导热系数低。PET纤维的密度(1.36 g/cm^3)较低,致使混凝土整体干密度下降;PET纤维表面光滑且呈憎水性,与亲水

性的水泥水化产物粘结性能较差,易形成薄弱界面并引入孔隙^[21],这些薄弱界面和孔隙破坏了基体的连续性,成为应力集中点和裂缝扩展路径,显著弱化了混凝土的抗压强度;同时,PET 纤维的导热系数为 0.15~0.24 W/(m·K),显著低于水泥基体,所引入的大量孔隙中又充满导热系数极低(约 0.026 W/(m·K))的空气,二者共同阻碍了热量在混凝土中的传导,从而显著降低了混凝土的导热系数。因此,PET 纤维通过引入低密度、低导热的孔隙,在改善混凝土轻质化和保温性能的同时,弱化了混凝土的密实度与力学强度。

所有样品中,掺入 0.75% 体积掺量 PET 纤维的陶粒混凝土(0.36w/c-0.75PET-9)的抗压强度、干密度和导热系数等系统性能最低。其原因为,过量的 PET 纤维易在混凝土内部发生团聚现象,形成毫米级的宏观缺陷,这些缺陷会破坏混凝土整体结构并引发裂缝,使得抗压强度显著降低^[22];并且,过量的 PET 纤维形成的空间网络,不仅会阻碍水泥浆体的流动,更会裹挟大量气泡,导致混凝土的孔隙率显著增大。孔隙率的增大降低了材料的干密度,但其中所封闭的空气则增强了保温性能^[23]。由此可见,PET 纤维的过量掺入会因纤维团簇和孔隙率的增加而严重劣化混凝土的力学性能。

在相同的 0.5% 体积掺量下,掺入 12 mm 长纤维的陶粒混凝土(0.36w/c-0.5PET-12)的力学性能优于掺入 6 mm 短纤维的陶粒混凝土(0.36w/c-0.5PET-6),这是由于较长的 PET 纤维增强了纤维表面与水泥水化产物的机械咬合深度,提升了界面粘结强度^[24],共同维系基体密实度与热流阻隔效率,最终表现为抗压强度、干密度及导热系数的同步改善。因此,增加纤维长度可通过更有效地桥接裂缝和改善纤维-基体界面粘结,实现混凝土综合性能的提升。

2.2 微观机理分析

2.2.1 压汞法(MIP)分析

孔隙结构特征与孔径分布是调控 PET 纤维陶粒混凝土力学及热工性能的关键参数。基于单因素试验,选取 4 个典型样品进行 MIP 孔隙分析。

如图 3(a)所示,所有样品主微孔均小于 100 nm,且均在约 70 nm 处出现第一特征峰;同时,样品中大孔在 1 000~10 000 nm 区间内显著富集。需要指出的是,相较于对照组 0.36w/c,掺入 PET 纤维的 0.36w/c-0.5PET-9 及 0.36w/c-0.75PET-9 样品的峰值显著升高,此现象说明 PET 纤维的引入引发陶粒混凝土孔隙结构的规律性变异。

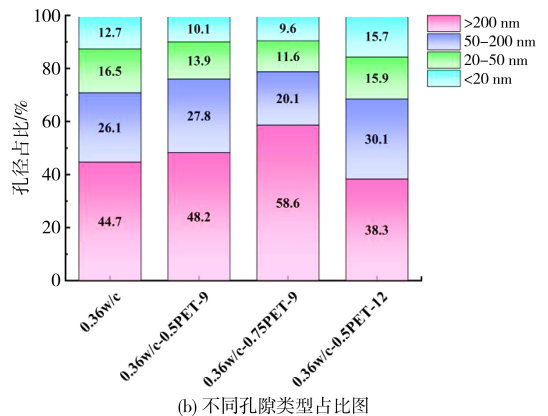
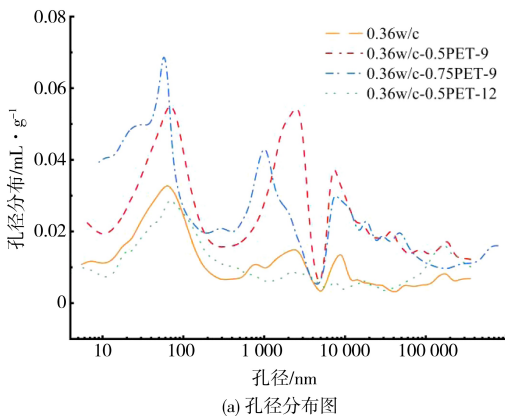


图 3 样品 MIP 测试结果

Fig.3 MIP test results of samples

依据孔径对混凝土性能的影响,将孔隙划分为 4 个等级^[25]:无害孔(孔径 ≤ 20 nm)、较小有害孔(孔径 20~50 nm)、有害孔(孔径 50~200 nm)及受损孔(孔径 >200 nm)。如图 3(b)所示,掺入 PET 纤维的 0.36w/c-0.5PET-9 和 0.36w/c-0.75PET-9 样品的受损孔占比显著增大。特别在

0.36w/c-0.75PET-9 样品中,与对照组 0.36w/c 相比,受损孔比例增加了 13.9%,无害孔与较小有害孔分别降低了 3.1%和 4.9%,证实 PET 纤维诱导陶粒混凝土孔隙结构发生规律性粗化。

0.36w/c-0.5PET-12 样品较同掺量的 0.36w/c-0.5PET-9 样品受损孔比例降低了

9.9%,无害孔与较小有害孔比例分别提升了5.6%和2.0%,这一孔隙结构优化使其抗压强度显著提升至33.84 MPa,反映了微观结构与宏观性能的关联性。归其原因为,较长PET纤维(12 mm)可跨越陶粒-砂浆多相界面协调荷载传递,增强裂缝桥接能力^[26];同时纤维端部微振动效应促进气泡逸出,提升孔隙曲折度,优化孔径分布^[27]。

由表4可知,相较于对照组0.36w/c,0.36w/c-0.75PET-9样品的孔隙率与平均孔径明显增大而总孔面积减小。这归因于PET纤维阻碍水泥颗粒紧密接触,改变了水化产物的分布模式,促使水化过程形成大孔而非微孔,导致孔径增大而数量减少。需要指出的是,掺入12 mm长纤维的0.36w/c-0.5PET-12样品,其孔隙结构参数与对照组0.36w/c最为接近。这表明,较长的纤维在优化孔隙分布、引入适量有益孔隙以改善保温性的同时,最大限度地维持了基体的密实度与结构

完整性,结合图2可知,在宏观上表现为抗压强度与对照组持平,且导热系数显著低于对照组。

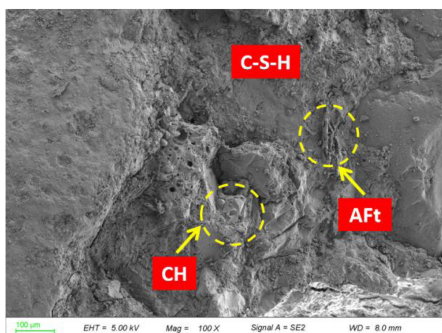
表4 样品孔隙结构参数

Tab.4 Pore structure parameters of samples

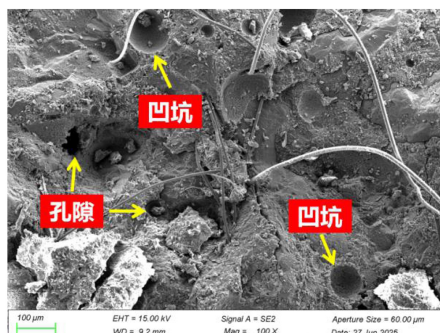
样品编号	孔隙率/ %	总孔面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	平均孔径/ nm
0.36w/c	10.428 3	47.61	4.643
0.36w/c-0.5PET-9	21.204 8	61.86	8.032
0.36w/c-0.75PET-9	25.018 0	41.82	13.880
0.36w/c-0.5PET-12	11.210 9	56.34	3.733

2.2.2 扫描电子显微镜(SEM)分析

使用SEM观察四组MIP代表样品的微观结构,如图4所示。



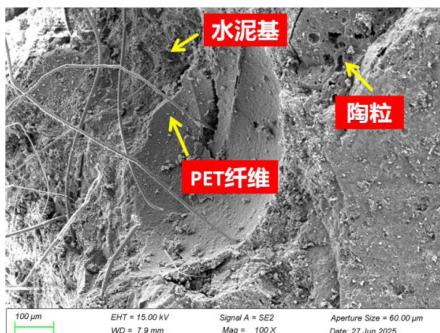
(a) 0.36w/c



(b) 0.36w/c-0.5PET-9



(c) 0.36w/c-0.75PET-9



(d) 0.36w/c-0.5PET-12

图4 样品的SEM图像

Fig.4 SEM images of samples

由图4(a)可见,对照组0.36w/c中浆体-骨料界面结合完整,基体中可见典型的絮状、针状及片状水化产物(分别对应C-S-H凝胶、AFt晶体及CH晶体)相互交织形成致密三维网络结构^[28],这些水化产物有效填充了孔隙,构成了完整性良好的微观基质。

由图4(b)可见,相较于对照组0.36w/c,0.36w/c-0.5PET-9样品在浆体表面存在更显著的孔隙与凹坑,微裂缝宽度增大且结构疏松度上升。这些缺陷由于引入了力学性能薄弱的界面过渡区(ITZ),为裂缝扩展提供了优先路径,最终损害了混凝土的密实度与抗压强度;但此类近球形

封闭孔隙可提升等效热阻,有利于导热系数降低。

由图 4(c)可见,0.36w/c-0.75PET-9 样品中存在明显的 PET 纤维团聚现象。过量的 PET 纤维相互缠结,形成了局部富集的团簇体,这些团簇体破坏了水泥基体的均匀性,在其周围的水泥基体中可观察到明显的界面缝隙与孔隙,团簇体降低了水化产物的键合程度,致使界面结合强度弱化,最终引发力学性能的劣化^[29]。

由图 4(d)可见,在 0.36w/c-0.5PET-12 样品中,一根 PET 纤维横跨于一条微裂缝之上,且其两端被水泥水化产物紧密包裹,牢固地锚固在两侧基体中,体现了 PET 纤维在应力条件下桥接裂缝、抑制陶粒混凝土变形和裂纹扩展的作用。同时,PET 纤维通过物理缠结与界面键合在基体内形成三维网络支撑结构,实现对陶粒表面的完整包裹,由此构建了“纤维-陶粒-水泥基体”三元联锁框架体系^[30]。结合图 2 分析,该体系一方面通过应力重分布缓解局部应力集中现象,显著提升荷载承受能力(0.36w/c-0.5PET-12 样品抗压强度达 33.84 MPa,接近对照组),另一方面借助纤维网络与优化孔隙共同阻断热流路径,形成的

隔热屏障使导热系数低于对照组,从而在微观形貌与宏观性能关联的层面上,阐释了材料实现力学与隔热性能较优平衡的机制。

3 结论

1)PET 纤维陶粒混凝土的坍落度随水灰比的增加而增加;随 PET 纤维体积掺量的增加或长度的增长而下降。

2)随着水灰比的增加,PET 纤维陶粒混凝土的干密度降低,抗压强度下降,导热系数降低,孔隙效应与界面劣化的耦合作用导致混凝土性能退化。

3)PET 纤维通过引入低密度孔隙及其自身低导热性,可有效提升陶粒混凝土的保温性能,但掺加过量的纤维(体积掺量 0.75%)会因团簇而形成毫米级缺陷,显著削弱陶粒混凝土的力学性能。

4)掺加 12 mm 长 PET 纤维可优化陶粒混凝土的孔隙分布,形成“纤维-陶粒-水泥基体”三元联锁框架,协同提升抗压强度与热阻效率。

参考文献:

- [1] TANG K J, AN H N, LIU C B, et al. Safety and environmental protection application of high performance solid waste unburned ceramsite and its lightweight high strength concrete[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2024, 40: 101611.
- [2] 穆龙飞, 冯竟竟, 杨进波, 等. 页岩陶粒粒径对混凝土强度及热工性能影响研究[J]. 混凝土, 2020(11): 52-56.
- [3] ALQAHTANI F K, SHERIF M A, GHANEM A M. Green lightweight concrete utilizing sustainable processed recycled plastic aggregates: technical, economic and environmental assessment [J]. Construction and Building Materials, 2023, 393: 132027.
- [4] 杨圣飞, 李海艳, 向杰. 玄武岩纤维粉煤灰增强陶粒混凝土力学性能试验研究[J]. 中国测试, 2022, 48(4): 166-172.
- [5] 朱楚翔, 夏多田, 吕开清, 等. 玄武岩纤维掺量对页岩陶粒混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(1): 50-53.
- [6] 周凯, 王景全, 王震, 等. 基于低碳目标的混凝土建筑结构设计方法研究进展[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(7): 113-130, 141.
- [7] ANANDAMURTHY A, GUNA V, ILANGO VAN M, et al. A review of fibrous reinforcements of concrete[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2017, 36(7): 519-552.
- [8] SHAFIGH P, MUDA Z C, BEDDU S, et al. Thermo-mechanical efficiency of fibre-reinforced structural lightweight aggregate concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 60: 105111.
- [9] 王晶, 陶耀华, 于康, 等. 混凝土帆布力学性能与应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(1): 22-30, 47.
- [10] 彭全敏, 陈炳蔚, 张彦, 等. 废 PET 塑料纤维对再生混凝土基本性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(2): 666-673.
- [11] 袁旺, 邓安仲, 解亚, 等. PET 纤维格栅/钢纤维增强水泥基复合材料混杂效应研究[J]. 当代化工, 2020, 49(10): 2097-2101.
- [12] 黄斐. PET 废纤增强加气混凝土的制备及性能研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2022.

- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 轻骨料混凝土应用技术标准: JGJ/T 12—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法: GB/T 10294—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [17] 黄炎林. PET纤维增强多成分细骨料混凝土力学性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021.
- [18] 周书澎, 刘泽平, 区庆佑, 等. 混杂纤维对硫铝酸盐水泥基ECC材料性能的影响[J]. 材料导报, 2025, 39(5): 141-147.
- [19] 冯忠绪, 杨发. 搅拌设备设计讲座(第三十二讲) 搅拌对混凝土密实和孔结构的影响[J]. 工程机械, 2025, 56(5): 158-163.
- [20] 苏捷, 秦红杰, 史才军, 等. 钢纤维再生混凝土抗折强度尺寸效应试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(7): 160-167.
- [21] 程然. PET纤维增强HDPE木塑复合材料的成型工艺与性能[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [22] 彭胜, 吴佳隆, 何理, 等. 聚乙烯醇纤维再生混凝土动态压缩力学性能试验研究[J]. 爆破, 2025, 42(3): 18-25.
- [23] 郝华中, 桑明, 张晔, 等. 耐碱玻璃纤维增韧水泥石力学性能及对水泥浆性能影响[J]. 钻采工艺, 2020, 43(5): 134-138.
- [24] 张广泰, 周乘孝, 刘诗拓. 盐渍土环境下纤维锂渣混凝土柱恢复力模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(7): 1944-1957.
- [25] HAN X, WANG B M, FENG J J. Relationship between fractal feature and compressive strength of concrete based on MIP[J]. Construction and Building Materials, 2022, 322: 126504.
- [26] 刘雨松. 矿物材料-聚丙烯纤维复合增强再生骨料混凝土性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2024.
- [27] 王磊, 谷健, 余涵, 等. 纤维对珊瑚水泥基材料强度的影响[J]. 混凝土, 2025(4): 129-133.
- [28] 高磊, 陆军. 冷再生技术在城市道路基层重建中的应用研究[J]. 建筑技术开发, 2025, 52(7): 122-124.
- [29] 陈涛, 章文姣, 陈秀敏. PVA纤维增强地质聚合物复合材料的研究进展[J]. 吉林水利, 2025(1): 71-78.
- [30] ZENG H, ZHANG J, LI Y, et al. Mechanical properties and microstructure of basalt fiber reinforced concrete under the single-side salt-freezing-drying-wetting cycles[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2022, 16(1): 44.

(责任编辑: 马晓磊)