

引文格式:朱 健,高 镇,曹军平,等.聚甲醛纤维增强聚苯乙烯轻型混凝土冻融劣化研究[J].建筑科学与工程学报,2025,42(4):92-104.  
ZHU Jian, GAO Zhen, CAO Junping, et al. Study on freeze-thaw deterioration of POM fiber reinforced expanded polystyrene lightweight concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(4): 92-104.

DOI:10.19815/j.jace.2023.12092

# 聚甲醛纤维增强聚苯乙烯轻型混凝土冻融劣化研究

朱 健,高 镇,曹军平,廖文杰,郭文昊,林潮俊

(佛山大学 土木与交通学院,广东 佛山 528225)

**摘要:**为有效提高聚苯乙烯轻型混凝土在严寒地区的安全性和使用寿命,在聚苯乙烯轻型混凝土中掺加不同质量分数的聚甲醛纤维,通过对比分析掺入聚甲醛纤维的聚苯乙烯轻型混凝土试件在不同冻融条件下的质量损失率、强度、弹性模量、刚度及毛细吸水率变化规律,研究了聚甲醛纤维对聚苯乙烯轻型混凝土抗冻性的影响。结果表明:聚甲醛纤维对聚苯乙烯轻型混凝土冻融环境下的抗劈裂和抗拉性能有持续性改善作用;当聚甲醛纤维掺量为0.6%时,相对弹性模量在冻融循环中的下降趋势最缓;当聚甲醛纤维掺量为0.9%时,质量损失率、相对动弹性模量和强度在冻融循环下变化最小,同时冻融循环后的抗毛细吸水性能最高;建立的二次多项式和 Weibull 分布强度衰减预测模型均能较好地预测聚甲醛纤维增强聚苯乙烯轻型混凝土抗压强度在冻融循环下的劣化过程,且二次多项式衰减预测模型的准确率在99%以上。

**关键词:**聚甲醛纤维;聚苯乙烯轻型混凝土;强度损失;衰减模型;毛细吸水率

**中图分类号:**TU528

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-2049(2025)04-0092-13

## Study on freeze-thaw deterioration of POM fiber reinforced expanded polystyrene lightweight concrete

ZHU Jian, GAO Zhen, CAO Junping, LIAO Wenjie, GUO Wenhao, LIN Chaojun

(School of Civil Engineering and Transportation, Foshan University, Foshan 528225, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to effectively improve the safety and service life of expanded polystyrene (EPS) lightweight concrete in extremely cold regions, different mass fractions of polyoxymethylene (POM) fibers were added to EPS lightweight concrete. By comparing and analyzing the changes in mass loss rate, strength, elastic modulus, stiffness, and capillary water absorption rate of EPS lightweight concrete specimens with added POM fibers under different freeze-thaw conditions, the influence of POM fibers on the frost resistance of EPS lightweight concrete was studied. The results show that POM fibers have a sustained improvement effect on the anti-cracking and tensile properties of EPS lightweight concrete under freeze-thaw conditions. When the POM fiber content is 0.6%, the relative elastic modulus exhibits the slowest decreasing trend during freeze-thaw cycles. When the POM fiber content is 0.9%, the mass loss rate, relative dynamic elastic modulus and strength show minimal changes during freeze-thaw cycles. Simultaneously, the

收稿日期:2023-12-27

投稿网址:<http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(52208235);广东省本科高校质量工程建设项目(2023-1047);

广东省研究生教育创新计划项目(2025JGXM157)

作者简介:朱 健(1975-),男,工学博士,教授,E-mail:zhujian@fosu.edu.cn。

resistance to capillary water absorption after freeze-thaw cycles is the highest. The established secondary polynomial and Weibull distribution strength decay prediction models can both effectively predict the degradation process of compressive strength in freeze-thaw cycles for POM fiber-reinforced EPS lightweight concrete. The accuracy of the secondary polynomial decay prediction model exceeds 99%.

**Key words:** POM fiber; EPS lightweight concrete; strength loss; attenuation model; capillary water absorption

**Author resume:** ZHU Jian(1975-), male, PhD, professor, E-mail: zhujian@fosu.edu.cn.

## 0 引言

全球每年有大量的聚苯乙烯(EPS)塑料被丢弃,存在难以降解和污染环境等问题,造成“白色污染”<sup>[1]</sup>。将聚苯乙烯废旧塑料回收制备成EPS轻型混凝土可有效解决环境问题,对中国早日实现“碳达峰”和“碳中和”具有重大意义。聚苯乙烯轻型混凝土是由EPS颗粒、骨料和胶凝材料混合配制而成<sup>[2]</sup>,具有轻质、保温、隔音、低廉、绿色环保和抗冲击等优异特性。然而传统EPS轻型混凝土材料存在强度低、收缩变形大等缺点。

添加纤维是改善EPS混凝土性能最显著的手段,许多学者在这方面做了研究。添加聚丙烯纤维可显著改善EPS混凝土的和易性和抗拉强度,降低收缩率<sup>[3]</sup>。Sun等<sup>[4]</sup>对比聚丙烯纤维、玻璃纤维和碳纤维对EPS混凝土性能的影响,发现碳纤维对其物理力学性能和微观形貌改善最为明显。赵子斌等<sup>[5]</sup>研究发现,随着碳纤维掺量增加,EPS混凝土的力学性能先增加后降低,当碳纤维体积掺量为3%时,力学性能最佳。张文华等<sup>[6]</sup>研究发现钢纤维对EPS混凝土的抗压性能改善不明显,且存在分层问题。目前国内外对EPS轻型混凝土的研究主要集中在力学和收缩,对抗冻性能研究较少,混凝土的抗冻性能关乎结构的寿命和安全,尤其在寒冷地区,作为保温围护结构的EPS轻型混凝土,复杂的严寒环境会使其保温性能、力学性能和耐久性能下降,所以必须保障EPS轻型混凝土正常工作。

聚甲醛(POM)纤维是以熔融纺丝法为基本原理制备而成的一种新型合成纤维,具有强度高、拉伸回复性强、耐磨耐碱性优良等特点,可用于混凝土、绳索和棕丝等材料制备<sup>[7]</sup>。作为增强EPS轻型混凝土的材料,POM纤维拥有比其他纤维更强的优势。POM纤维(密度为 $1.4\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )与钢纤维(密度为 $7.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )相比,密度大幅降低而抗拉强度仍高达约1 000 MPa,且无生锈问题。POM纤维的

抗拉强度是聚丙烯纤维的1.26倍,且分散性更优<sup>[8-9]</sup>。POM纤维和玄武岩纤维相比,其与基质的黏结性更强。Zhang等<sup>[10]</sup>研究了POM纤维长度(6、8、12 mm)对砂浆力学性能的影响,其中12 mm的POM纤维增益效果最佳,与对照组相比,抗压强度和弹性模量分别提高19.8%和8.38%。夏旻昊等<sup>[11]</sup>研究表明,12 mm的POM纤维对超高性能混凝土的起裂韧性提升效果优于16 mm和20 mm。周至阳等<sup>[12]</sup>研究表明,12 mm的POM纤维较6 mm的POM纤维能产生更有效的桥接作用,其峰值荷载、残余强度和弯曲韧性更大。马明龙等<sup>[13]</sup>研究12 mm的POM纤维对超高性能混凝土(UHPC)的影响发现,当12 mm的POM纤维体积掺量为0.9%时,UHPC的抗压强度最高。姚运航<sup>[14]</sup>的研究表明,当POM纤维长度为12 mm、体积掺量为0.6%时,海水海砂混凝土的力学性能提升效果最优。Yu等<sup>[15]</sup>研究了13 mm的POM纤维对UHPC性能的影响,发现当体积掺量为1.0%时,UHPC的性能提高效果最优,且内部密实度最高。整体而言,12 mm的POM纤维对砂浆以及各类型混凝土的力学性能都有所改善,且掺量在0.6%~1.0%不等,但针对该长径比( $L/d=60$ )下的POM纤维在EPS轻型混凝土中的掺量及冻融损伤的研究相对较少,其损伤机理有待进一步深入探索。

因此,本文在EPS轻型混凝土中加入POM纤维,配制得到POM纤维增强EPS轻型混凝土(PRELC)。通过冻融循环试验研究PRELC的抗冻性能,试验数据和结论填补了PRELC抗冻性研究方向的空白。冻融损伤评价指标与该材料未来的应用场景有关,因为试验制备的PRELC材料是作为承重功能一体化材料来开发的,因此材料的抗压承重性能是第一重要性的指标。本文研究了PRELC在冻融循环条件下的强度、质量、相对动弹性模量、刚度和毛细吸水率等指标的变化情况。通过建立PRELC冻融模型和微观电镜分析,揭示了POM纤维

维对 PRELC 冻融损伤性能的影响机理。

1 试验概况

1.1 原材料

水泥为 P. O42.5 普通硅酸盐水泥,密度为  $3.1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,堆积密度  $0.975\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;粉煤灰等级为一级,密度为  $2.55\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,堆积密度为  $0.93\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;硅粉密度为  $2.1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,堆积密度为  $0.23\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,胶凝材料的化学成分如表 1 所示。EPS 表观密度为  $0.025\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,导热系数为  $0.04\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ,EPS 为直径 3~5 mm 的球状颗粒[图 1(a)];POM 纤维由重庆云天化聚新材料有限公司生产,长度为 12 mm,形貌如图 1(b)所示,其主要参数见表 2;砂取天然河砂,参照《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》测得为细度模数 2.52 的中砂,表观密度为  $2.484\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,堆积密度为  $1.575\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,粒径分布如表 3 所示;聚羧酸减水剂由南通浦发建材有限公司生产,固体质量含量为 40%,减水率为 25%。

表 1 胶凝材料化学成分

胶凝材料	不同化学成分的质量分数/%						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	其他
水泥	20.11	5.03	3.14	1.35	62.34	0.21	7.82
硅灰	96.65	0.31	0.07	0.11	0.12	0.97	1.76
粉煤灰	45.10	24.20	5.31	6.93	5.60		12.86

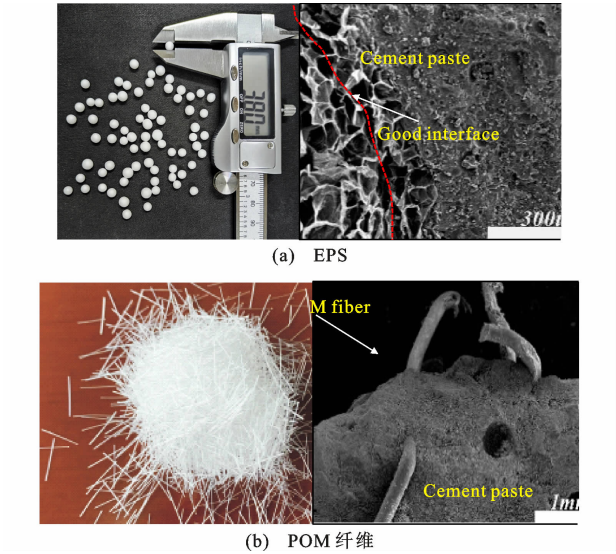


图 1 EPS 和 POM 纤维形貌

Fig.1 EPS and POM fiber morphology

1.2 配合比与试样制备

依据国家行业标准《轻骨料混凝土应用技术标准》中配合比设计要求,并参考国内外文献<sup>[1,16-17]</sup>,

表 2 POM 纤维主要参数

Table 2 Main parameters of POM fiber

参数	长度/ mm	直径/ mm	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	拉伸强度/ MPa
取值	12	0.2	1.4	$>8\,000$	$>967$

表 3 砂粒径分布

Table 3 Sand particle size distribution

筛号	筛孔直径/mm	累计筛余/%	细度模数
A1	4.75	1.46	2.52
A2	2.36	9.87	
A3	1.18	26.48	
A4	0.60	46.33	
A5	0.30	78.64	
A6	0.15	94.32	

研配了功能承重一体化 EPS 轻型混凝土,确定了 EPS 轻型混凝土基础配合比,如表 4 所示。具体试验配合比见表 5,其中 EPS 掺量为胶凝材料总体积的 35%,水灰比为 0.30,硅灰和粉煤灰的掺量分别为水泥质量的 20%和 39%,POM 纤维掺量分别为材料总质量的 0.6%、0.9%、1.2%。

PRELC 制备流程如图 2 所示。为防止搅拌时破坏 EPS 和 POM 纤维的形态,采用二次投料法。先将胶凝材料和砂子倒入搅拌机拌匀,加入 2/3 减水剂混合液搅拌 2 min,形成均匀料浆;然后倒入 EPS 和 POM 纤维,再将剩余减水剂混合液加入,搅拌 2 min;最后将混凝土浆体装模,振荡 15~20 s,试样成型后脱模,置于  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  的水中浸泡养护 28 d,如图 3 所示。

1.3 试验方法

冻融循环下 PRELC 出现不同程度的损伤劣化,表现为质量损失、相对动弹性模量、刚度、强度和毛细吸水率发生变化。为深入研究 POM 纤维掺量对 PRELC 抗冻性能的影响,每组制备了 3 个  $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 300\text{ mm}$  的棱柱体试样,用于测量质量和相对动弹性模量变化,54 个  $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的立方体试样用于测定抗压、抗拉强度和毛细吸水率。

质量损失率和相对动弹性模量依据《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行测量。冻融试验采用快速冻融循环试验机进行,试块浇筑成型,养护 24 d 后,将试块放在水中浸泡 4 d,测量此时试块的初始质量  $W_{0i}$ ,使用非金属超声波测量试块的初始时速  $V_{0i}$ ;然后放入快速冻融循环试验机中进行水冻,每隔 25 次取出试块,测量试件质量  $M_{ni}$  和声速  $V_{ni}$ ,直到试块质量损失率  $\Delta W_{ni}$  超过 5%,或者相

表 4 EPS 轻型混凝土基础配合比

Table 4 EPS lightweight concrete elementary mix ratio

材料	水泥(C)	硅灰(SF)	粉煤灰(FA)	水(W)	河砂(S)	EPS	减水剂(SP)
基础配合比	1	0.20	0.39	0.33	1.08	0.004 9	0.047

表 5 PRELC 配合比

Table 5 Mix ratio of PRELC

组号	材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )							
	C	SF	FA	W	S	EPS	SP	POM 纤维
P0	575	114	223	173	621	2.83	27	0.00
P6	575	114	223	173	621	2.83	27	9.52
P9	575	114	223	173	621	2.83	27	14.28
P12	575	114	223	173	621	2.83	27	19.04

注:P0、P6、P9 和 P12 分别为 POM 纤维含量为 0%、0.6%、0.9%和 1.2%的试验组。

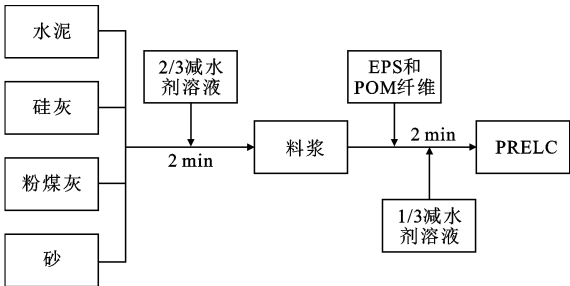


图 2 PRELC 制备流程图

Fig. 2 PRELC preparation flow chart



图 3 试件室温浸水养护

Fig. 3 Specimen soaked in water for curing at room temperature

对冻弹性模量  $P_i$  降低 60%。冻融试验如图 4 所示。每冻融循环 25 次后拿出试件,擦干表面水分,迅速测量试件的质量和相对动弹性模量后,将试件调头重新装入试件盒内并加满清水,继续试验,每组试样的质量损失率和相对动弹性模量以 3 个试件试验结果的算术平均值为测定值。

抗压和劈裂抗拉试验如图 5 所示,采用抗压强度、劈裂抗拉强度指标表征其力学性能变化,根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行试验。试

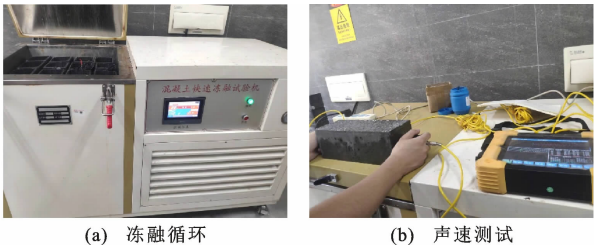


图 4 冻融循环试验

Fig. 4 Freeze-thaw cycle test

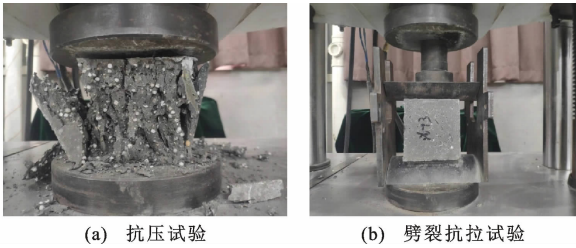


图 5 EPS 轻型混凝土抗压试验和抗拉试验

Fig. 5 Compressive and tensile tests of EPS lightweight concrete

验采用伺服万能试验机进行,每冻融循环 50 次后取出试件,擦干表面水分,测定抗压强度和劈裂抗拉强度。测定抗压强度时,加载速度为  $0.3\text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ;测定劈裂抗拉强度时,需要借助定位支架,加载速度取  $0.02\text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,每组试样的抗压强度和劈裂抗拉强度均以 3 个试件测量值的算术平均值为强度值。

毛细吸水率可在一定程度上反映其内部损失,参考 ASTM C1585-13<sup>[18]</sup>进行测量,每冻融循环 50 次测量毛细吸水率。试验前用干燥箱设置  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  恒温将试件烘干至恒重,然后将试件 4 个侧面涂抹一层环氧树脂防水剂,再用塑料薄膜密封顶面,保证试件一维吸水后,将试件触水面浸入水中  $5\text{ mm}$  以内,定时称量记录试件质量。每组试样毛细吸水率以 3



个试件试验结果的算术平均值为测定值。

从微观角度分析 POM 纤维增强 PRELC 抗冻机理,微观试验采用 Hitachi SU 1500 型扫描电镜 (SEM) 进行(图 6)。微观试验试样取每次力学试验后试件上、中、下内部区域同时含 POM 纤维和 EPS 颗粒的混凝土碎片,然后用无水乙醇浸泡 3 d,再用干燥箱恒温 55 ℃烘干至恒重,最后将试样喷金处理后置于 SEM 中观察,放大倍数为 3 000 倍。

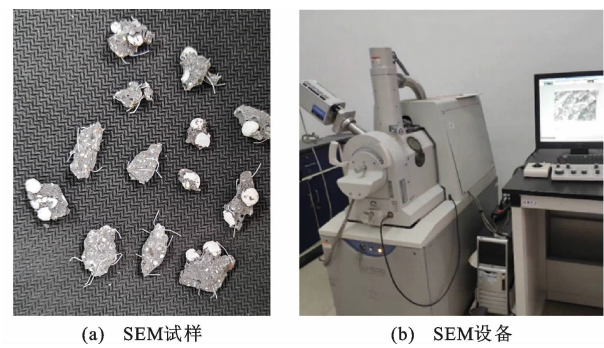


图 6 微观试验设备与试样

Fig. 6 Microscopic test equipment and samples

2 结果与讨论

2.1 POM 纤维对 PRELC 抗冻性能的影响

2.1.1 试件外观损伤

PRELC 在冻融循环过程中,基质内部的静水压和渗透压持续循环作用,试件损伤不断积累,当超过试块的抗拉强度时,试件产生裂缝,随后试件表面混凝土剥落,形成孔洞。不同纤维掺量下的 PRELC

在冻融循环下的表面损伤情况如图 7 所示。

冻融循环前,各组 PRELC 表面完整,存有少量的小孔洞;冻融循环 100 次时,P0 表面小孔洞部分变大,有 EPS 颗粒外露,部分试件存在边角混凝土剥落,掺入纤维的试件四周完好;冻融循环 250 次时,P0 剥落严重,四边残缺,掺入纤维各组试块表面孔洞数量增加,EPS 外露明显,但试块仍然整体完整。这表明 POM 纤维可以抑制冻融循环下混凝土的剥落,原理主要是 POM 纤维表面含有醚键<sup>[19]</sup>,并三维乱向分布,与基体紧密黏结,混凝土的密实性和整体性增加,从而减少了剥落。

2.1.2 质量损失率

冻融循环下 PRELC 的冻融循环次数与质量损失率的关系见图 8。可以看出:冻融循环前 100 次,各组 PRELC 的质量变化较小,均在 0.1% 之内;冻融循环 225 次后,各组 PRELC 的质量损失变化较大,P0 的质量损失率不断增加,表层剥落的质量超过吸收的水分,质量下降,其他各组的质量损失率则与 P0 组相比有明显的差异,均呈现质量损失率负增长的变化规律,其中 P9 变化最小,其次是 P6,P12 变化最大;当冻融循环 300 次时,P0、P6、P9 和 P12 的质量损失率分别为 1.48%、-0.01%、-0.21%和 -1.9%。由于冻融过程不断膨胀收缩的影响,无纤维的 P0 表层剥落混凝土不断增多,质量损失率持续增加;P6 纤维掺量低,纤维在浆体内分布稀疏,对边缘混凝土的拉结作用效果不显著,导致冻融循环后期表面混凝土剥落,试件质量降低;P12 纤维掺量

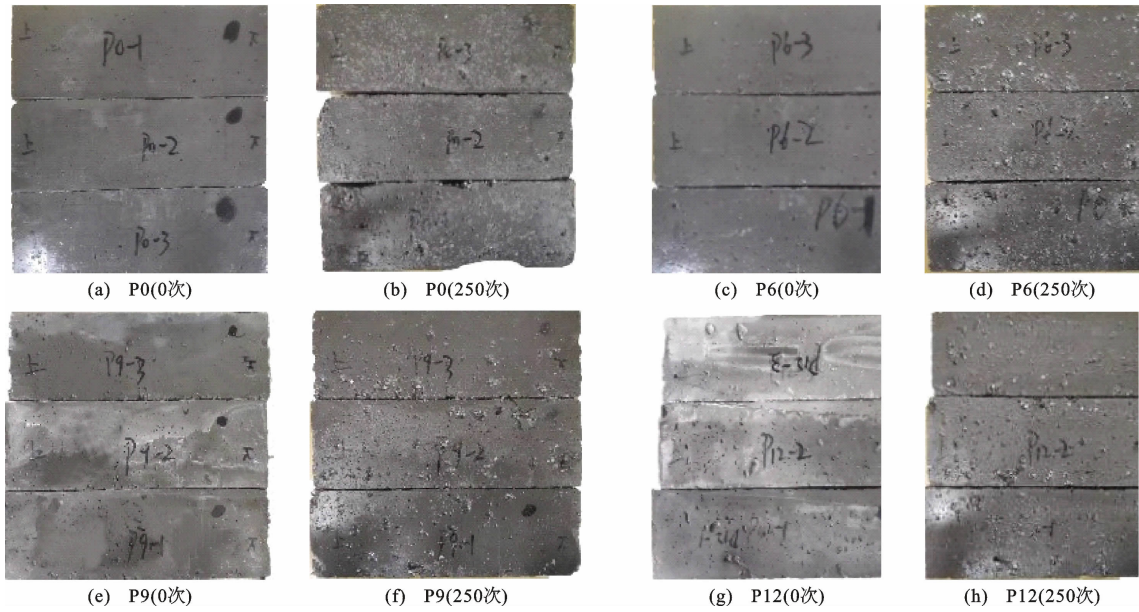


图 7 各组试件 0 次和 250 次冻融循环下的外观对比

Fig. 7 Comparison of appearance of each group of specimens under 0 and 250 freeze-thaw cycles

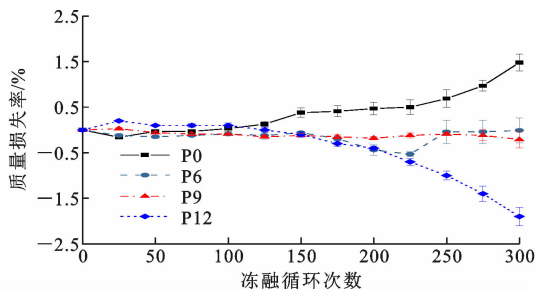


图 8 PRELC 的质量损失率在冻融循环下的变化  
Fig. 8 Changes of mass loss rate of PRELC under freeze-thaw cycles

高,纤维团积,在基体内部产生有害孔洞,导致在冻融循环中产生较多冻融胀缩裂缝,不断吸收水分,而在纤维的强拉结作用下,表层混凝土剥落少,小于吸收水分的质量,试件质量增加。P9 纤维掺量适宜,纤维对混凝土的拉结作用充足,且不易在基体中团积,故 P9 的质量损失率变化小。因此,从质量损失率的指标判断,POM 纤维掺量在 0.9% 最优。

### 2.1.3 相对动弹性模量

冻融循环中 PRELC 的内部损伤可以通过相对动弹性模量的变化来反映,相对动弹性模量越小,内部损伤程度越大,当相对动弹性模量降低至 60% 时,混凝土达到抗冻极限,不同 POM 纤维掺量下 PRELC 的相对动弹性模量如图 9 所示。

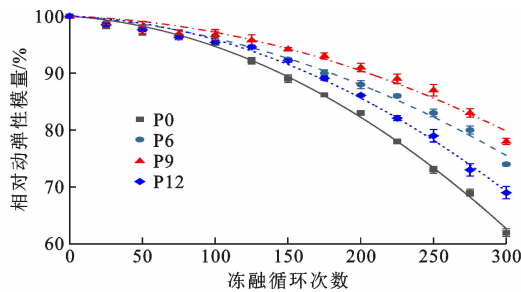


图 9 PRELC 的相对动弹性模量在冻融循环下的变化  
Fig. 9 Changes of relative dynamic elastic modulus of PRELC under freeze-thaw cycles

随着冻融循环次数的增加,各组相对动弹性模量呈现先缓慢下降后急速下降的趋势。当冻融循环 300 次时,P0 的相对动弹性模量下降至 62%,P6、P9 和 P12 的相对动弹性模量分别下降至 74%、78%和 69%,与 P0 相比,P6、P9 和 P12 相对动弹性模量分别减缓 19.4%、25.8%和 11.3%,可见 EPS 轻型混凝土中掺入 POM 纤维可以延缓相对动弹性模量下降,提高其抗冻性能。这主要由于 POM 纤维与混凝土之间相容性较好,密实了混凝土的内部结构。然而纤维掺入过多,容易结团引入气体<sup>[20]</sup>,

混凝土的密实性降低,其中 POM 纤维质量掺量为 0.9% 时,PRELC 的相对动弹性模量指标最佳。

### 2.1.4 强度

冻融循环过程中,PRELC 的内部损伤不断累积,宏观方面表现为强度的下降,冻融循环 300 次后 PRELC 的破坏现象如图 10 所示。

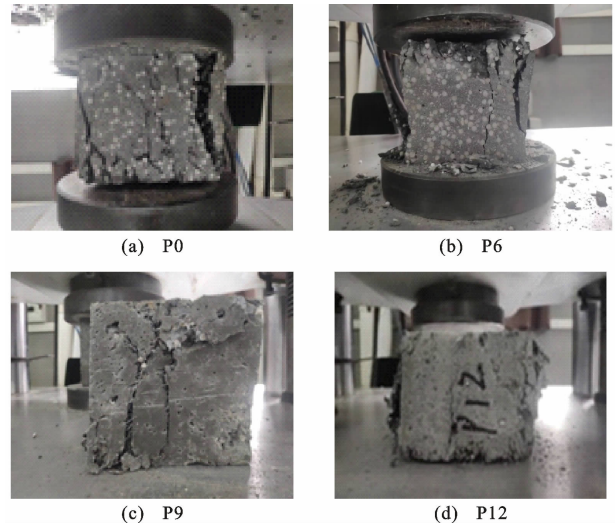


图 10 冻融循环 300 次后 PRELC 的破坏现象  
Fig. 10 Damage phenomenon of PRELC after 300 freeze-thaw cycles

图 10(a)为冻融循环下 P0 受压破坏现象,碎片剥落大,裂缝多且宽,破坏声音大,压缩破坏严重。由图 10(b)~(d)可以看出,随着 POM 纤维掺量的增加,碎片剥落逐渐减少,试块完整性逐渐提高。与 P0 相比,POM 纤维对 PRELC 的损伤改善十分明显,并且随着 POM 纤维掺量的增加,POM 纤维发挥了阻裂作用,试件表面裂缝数量逐渐减少。

为研究冻融损伤与 PRELC 宏观强度的关系,冻融循环下抗压强度和抗拉强度变化分别如图 11 和图 12 所示。由图 11(a)可知:冻融循环前,P0 的抗压强度为 33.9 MPa,掺入 POM 纤维后,P9 的抗压强度可达 41.19 MPa;冻融循环 200 次时,P0 抗压强度降低了 20.3%,POM 纤维掺量为 0.6%、0.9%和 1.2% 的 PRELC 抗压强度分别下降 16.3%、14%和 17.9%,可见 POM 纤维提高了 PRELC 冻融前后的力学性能,减缓了抗压强度的下降速率。P9 组的力学和抗冻性能优异,若再继续增加 POM 纤维掺量,封闭孔洞随冻融次数增加导致内部结构急剧破坏,强度下降。图 12(a)的抗拉强度变化规律与抗压强度变化规律类似。冻融循环前 P0 抗拉强度为 1.95 MPa,掺入 POM 纤维后,抗拉强度分别提高了 55.8%、91%、81%。这表明 POM



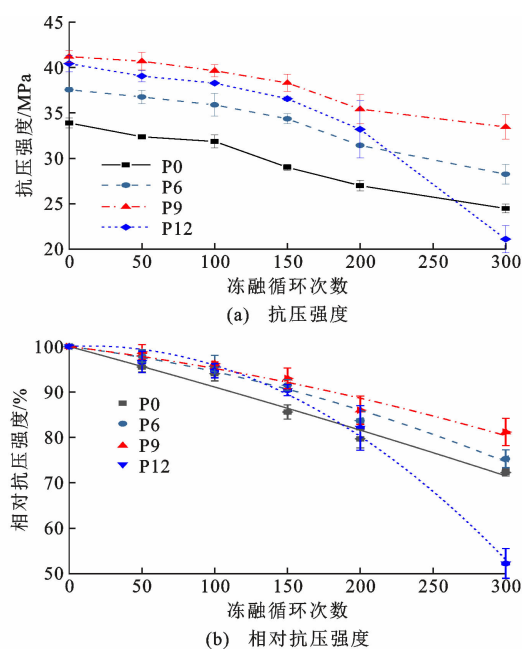


图 11 PRELC 抗压强度在冻融循环下的变化  
Fig. 11 Changes of compressive strength of PRELC under freeze-thaw cycles

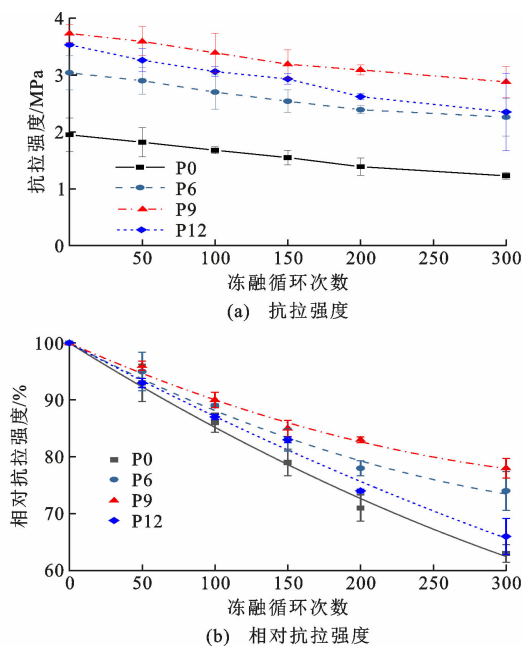


图 12 PRELC 的抗拉强度在冻融循环下的变化  
Fig. 12 Changes of tensile strength of PRELC under freeze-thaw cycles

可大幅改善 PRELC 的抗拉性能,同时纤维掺量为 0.9%时性能最佳。随着冻融循环次数的增加,P0 组抗拉强度下降最快,当冻融循环 300 次时,P0 组抗拉强度下降 37%,P9 组抗拉强度仅下降 22%,衰减量最小。

通过分析图 11(b)和图 12(b)相对强度指标可

以发现,相对抗拉强度和相对抗压强度随冻融循环次数的增加呈现的损伤衰变速率有明显区别,不同组 PRELC 的相对抗拉强度随冻融次数增加呈现损伤收敛,而对应的相对抗压强度随冻融次数的增加呈现损伤加速的趋势。这表明 POM 纤维对 EPS 轻型混凝土冻融条件下抗劈裂和抗拉性能有持续的改善作用。

### 2.1.5 弹性模量和刚度

弹性模量反映了 EPS 轻型混凝土应力-应变关系,对力学性能有重要的影响。刚度是表征材料/构件力学性能的重要指标,材料组成的构件刚度与材料的弹性模量直接相关,因此研究中采用弹性模量值表征刚度,各组试件的应力-应变曲线形状相似,分为初始段、上升段、平台段和下降段,图 13(a)为 P9 冻融循环 50 次的应力-应变曲线。荷载作用前期,由于试件表层分布的 EPS 颗粒受压变形,EPS 轻型混凝土呈现出明显的初始压缩变形现象,此阶段的应变值小于 0.01;随着荷载的增大,EPS 轻型混凝土开始进入受压弹塑性变形上升段;当应力超过峰值应力后,曲线逐渐由平台段转为下降段,EPS 轻型混凝土处于残余强度阶段。取应力-应变曲线上上升段中  $0.5f_c$  ( $f_c$  为混凝土轴心抗压强度)的样本切线模量均值  $\bar{K}$  作为 EPS 轻型混凝土的弹性模量<sup>[21]</sup>,具体计算公式见式(1)。对各组样本的应力-应变曲线进行处理后得到曲线切线斜率即弹性模量值,如表 6 所示,得到的弹性模量变化曲线如图 13(b)所示。

$$\bar{K} = \frac{K_1 + K_2 + K_3}{3} \quad (1)$$

式中: $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为每一组 3 块混凝土试验样本对应于材料轴心抗压应力-应变曲线  $0.5f_c$  值处的切线模量值。

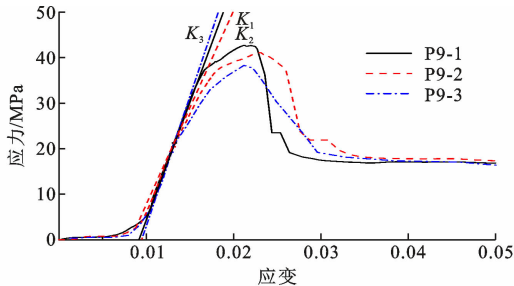
从弹性模量-冻融循环次数曲线[图 13(b)]可以看出,掺入适量的 POM 纤维可以提高 EPS 轻型混凝土的弹性模量和刚度。在冻融循环下,各组试块的弹性模量都呈现下降趋势,其中 P9 组各次冻融循环后的弹性模量值最高,下降斜率适中。从相对弹性模量-冻融循环次数曲线[图 13(c)]来看,冻融循环前 150 次,各组试块的弹性模量下降较为缓慢,冻融循环后期下降斜率逐渐增加,并且随着掺量的增加出现加速下降趋势。其中 P6 组对应的相对弹性模量下降幅度最小,其次为 P9 组,而 P12 组弹性模量和相对弹性模量均下降最多,表明材料的相对弹性模量与 POM 纤维掺量成反比。

表 6 冻融循环下的弹性模量

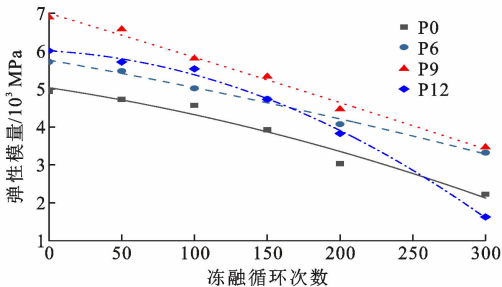
Table 6 Elastic modulus under freeze-thaw cycles

弹性模量	冻融循环 0 次				冻融循环 150 次				冻融循环 300 次			
	P0	P6	P9	P12	P0	P6	P9	P12	P0	P6	P9	P12
$K_1/\text{MPa}$	4 825	5 744	6 676	6 426	3 657	4 456	5 008	4 946	2 124	3 370	3 249	1 600
$K_2/\text{MPa}$	5 233	5 474	6 973	5 882	4 189	4 561	5 444	4 452	2 104	3 346	3 773	1 296
$K_3/\text{MPa}$	4 728	5 927	7 036	5 713	3 932	5 187	5 547	4 771	2 453	3 247	3 379	2 006
$\bar{K}/\text{MPa}$	4 928	5 715	6 895	6 007	3 926	4 738	5 333	4 723	2 227	3 321	3 467	1 654
$S/\text{MPa}$	268	228	192	373	266	395	286	250	196	65	273	356

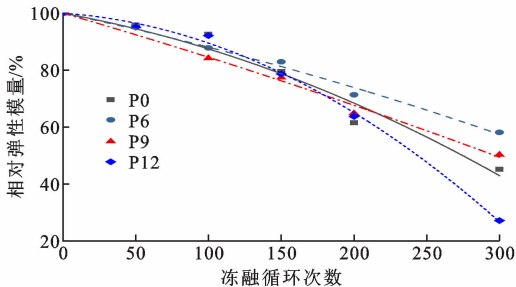
注:S 为样本标准偏差。



(a) 应力-应变曲线



(b) 弹性模量



(c) 相对弹性模量

图 13 PRELC 弹性模量和相对弹性模量在冻融循环下的变化

Fig. 13 Changes of elastic modulus and relative elastic modulus of PRELC under freeze-thaw cycles

2.2 毛细吸水率

混凝土冻融破坏的重要原因是水分在混凝土内部渗透和迁移,毛细吸水率在一定程度上可反映混凝土的内部损伤。混凝土的单位累积吸水量和毛细吸水率的关系<sup>[22]</sup>如式(2)所示,单位累积吸水量的计算公式见式(3)。

$$s=\frac{I-b}{\sqrt{t}}$$

(2)

$$I=\frac{\Delta m}{A\rho}$$

(3)

式中: $s$  为吸水率; $t$  为吸水时间; $b$  为曲线偏差; $I$  为试件的单位累积吸水量; $\Delta m$  为质量变化; $A$  为吸水面积; $\rho$  为水的密度。

2.2.1 累积吸水量曲线

各组 PRELC 在不同冻融循环下的累积吸水量曲线见图 14。PRELC 的毛细吸水可分为两个阶段<sup>[23]</sup>:0~6 h 阶段,在毛细吸附作用下,大孔和毛细孔快速吸收水分;1~6 d 阶段,小孔和凝胶孔缓慢吸收水分。

由图 14 可知:冻融循环前,P6、P9、P12 与 P0 相比,6 d 的累积吸水量分别降低 15.5%、22.7%和 8.3%;在冻融循环过程中,各组 PRELC 的毛细吸水量由大到小依次为 P0、P12、P6、P9;当冻融循环 200 次时,P6、P9 和 P12 的累积吸水量分别比 P0 降低 10.3%、18%和 5%。

2.2.2 毛细吸水率与冻融循环次数的关系

冻融循环下 PRELC 的初始吸水率  $S_1$  随冻融循环次数呈指数递增(图 15),冻融循环前,P0 的吸水率最大,P9 的毛细吸水率为  $4.94\text{ mm}\cdot\text{s}^{-0.5}$ ,比 P0 降低了 20.4%,EPS 轻型混凝土吸水率由大到小依次为 P0、P12、P6、P9,说明掺入 POM 纤维改善了 EPS 轻型混凝土材料的密实性,降低了材料内部的缺陷,从而大幅降低了吸水速率。冻融循环 200 次时,P6、P9 和 P12 的吸水率与 P0 相比,分别降低 7.8%、32.4%和 0.5%,其中 P9 组性能最佳。由图 15(b)可以看出,二次吸水率  $S_2$  与初始吸水率相比小得多,随着冻融循环次数的增加,PRELC 的二次吸水率变化趋势各不相同,整体上二次吸水率呈现下降趋势。

根据图 15(a)的试验数据发现,PRELC 的初始吸水率和冻融循环次数满足二次多项式的关系,通过式(4)预测各组 EPS 轻型混凝土在不同冻融循环次数下的初始吸水率  $S_1$ ,拟合系数见表 7。各组的



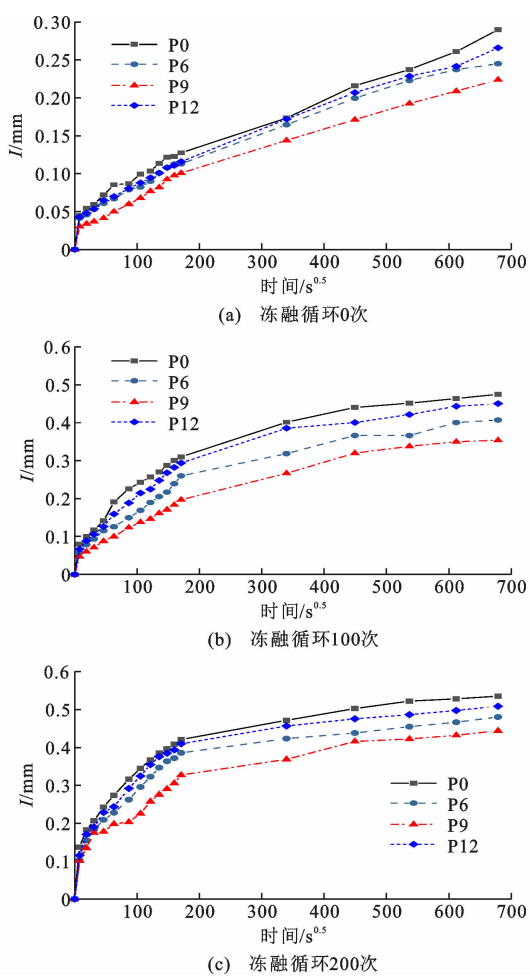


图 14 PRELC 在冻融循环下的累积吸水量曲线  
Fig. 14 Cumulative water absorption curves of PRELC under freeze-thaw cycles

判定系数  $R^2$  均在 0.91 以上,精度较高。

$$S_1 = a_1 n^2 + a_2 n + a_3 \quad (4)$$

式中:  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为拟合系数;  $n$  为冻融循环次数。

2.3 POM 纤维增强微观机制

图 16 为冻融循环下 PRELC 微观形貌。可以看出,冻融前 P9 的微观结构最为致密,P0 基体存有微孔洞,对比发现 POM 纤维改善了 PRELC 的内部结构。图 17 为 POM 断裂区域微观图。可以看出:纤维表面被水化产物包裹,并与基体紧密黏结,受力后 POM 纤维消耗和吸收裂缝开裂扩展的能量;当荷载进一步增大时,纤维变形消耗一部分能量,从而阻止裂缝的快速扩展;当裂缝扩展到纤维处,纤维与裂纹基体处发生脱黏,进而消耗能量;当裂缝穿过纤维后,与纤维相黏的基体发生破坏,基体释放的应变能全部转化为纤维的应变能,从而阻止裂纹的扩展。因此,PRELC 中掺入适量 POM 纤维可以提高其力学性能。

冻融循环 300 次后,PRELC 的内部结构发生了

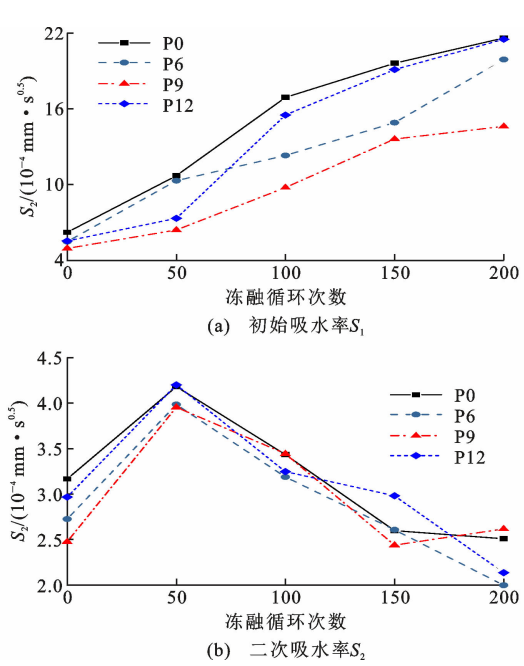


图 15 冻融循环下 PRELC 初始吸水率和二次吸水率  
Fig. 15 Initial and secondary water absorption of PRELC under freeze-thaw cycles

表 7 二次多项式拟合结果  
Table 7 Quadratic polynomial fitting results

组号	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$R^2$
P0	$-2.42 \times 10^{-4}$	0.127	5.855	0.981
P6	$2.74 \times 10^{-5}$	0.060	6.023	0.951
P9	$-1.26 \times 10^{-5}$	0.055	4.493	0.937
P12	$-9.60 \times 10^{-5}$	0.107	4.566	0.913

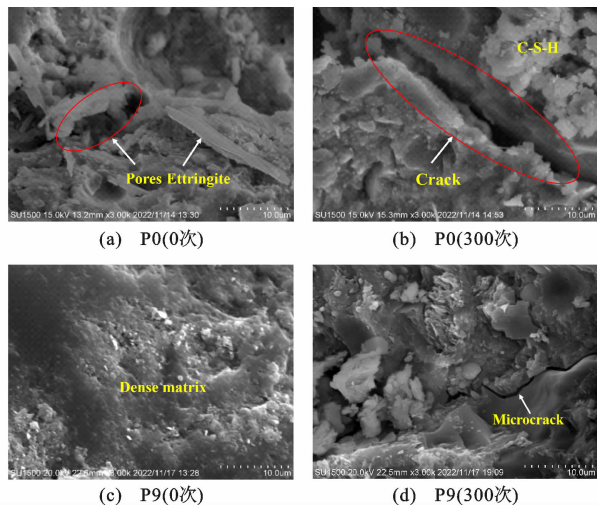


图 16 冻融循环下 PRELC 微观形貌  
Fig. 16 Microscopic morphology of PRELC under freeze-thaw cycles

不同程度损伤,P0 基体的裂缝变宽,裂缝深度较大.P9 的裂缝较窄,基体依旧维持致密状态。这说明 POM 纤维可以明显改善 PRELC 的抗冻性能。

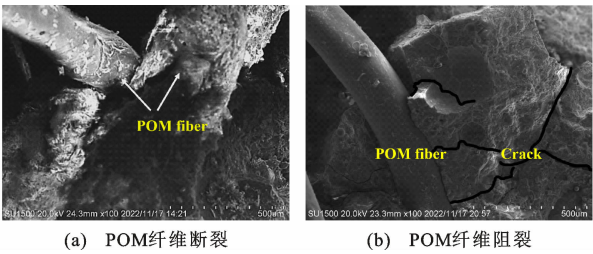


图 17 POM 断裂区域微观图

Fig. 17 POM fracture zone microscopic diagram

2.4 冻融强度衰减模型

混凝土的冻融破坏是一个不断发展劣化的过程,在宏观方面表现为强度下降。本文试验基于抗压强度数据描述 PRELC 的冻融强度劣化规律,并建立冻融强度衰减预测模型。根据损伤力学定义 PRELC 的强度损失度  $D_C$ ,采用二次多项式和 Weibull 概率分布模型<sup>[24-25]</sup>预测冻融强度劣化过程,强度衰减模型分别如式(5)、(6)所示,将式(6)取两次对数变化整理成式(8)以方便计算。图 18(a)给出了选定冻融循环下各组的强度损失均值(标点值),并标注了统计误差棒,它代表了不同样本在经历冻融循环后的强度劣化率。基于二次多项式的概率统计特征值见表 8。

$$D_N=1-(a_1n^2+a_2n) \tag{5}$$

$$D_N=1-\exp[-(\frac{n}{\eta})^\beta] \tag{6}$$

$$A=\beta,B=\beta\ln(\frac{1}{\eta}) \tag{7}$$

$$D_N=1-\exp[-(\frac{n}{e^{-B/A}})^A] \tag{8}$$

$$D_C=(1-\frac{f_{cn}}{f_{c0}})\times 100\% \tag{9}$$

式中: $D_N$ 为冻融循环  $n$  次下的冻融强度衰减度; $\eta$ 为尺度因子; $\beta$ 为 Weibull 形状因子; $f_{cn}$ 为冻融循环  $n$  次时的抗压强度; $f_{c0}$ 为冻融循环 0 次时的抗压强度。

两类模型的抗压强度拟合参数如表 9 所示,基

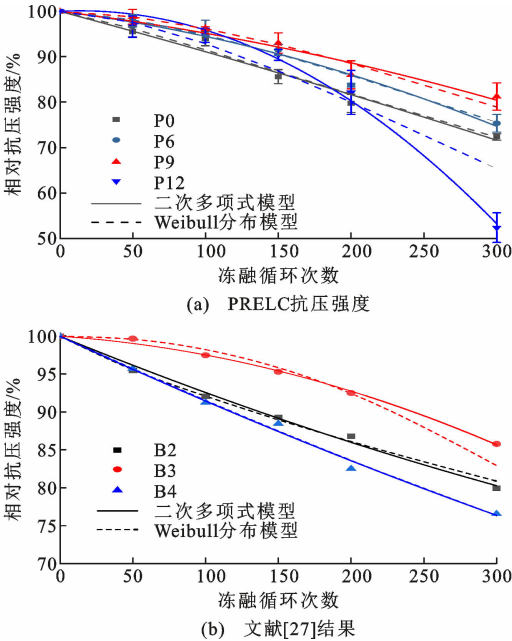


图 18 PRELC 和文献[27]的抗压强度与冻融循环次数预测结果

Fig. 18 Predicted results of compressive strength and freeze-thaw cycles of PRELC and reference [27]

于文献[27]的冻融数据对预测模型进行回归验算,如图 18(b)所示。由于在以往研究中大多采用 Weibull 概率分布模型对冻融循环下材料抗压强度损失度进行预测<sup>[27-28]</sup>,研究中对两种预测模型进行了优劣比较,计算结果证明二次多项式模型预测结果精度更高,其判定系数  $R^2$  均在 0.99 以上,能更准确地预测冻融循环下 PRELC 材料的强度劣化规律。

3 结 语

(1)掺入适量的 POM 纤维可以提高 EPS 轻型混凝土的弹性模量和刚度。在冻融循环下,各组试块的弹性模量和刚度都呈现下降趋势,其中 P9 组在各次冻融循环后的弹性模量最高,下降斜率适中。EPS 轻型混凝土的相对弹性模量随 POM 纤维掺量的增加而下降,呈反比关系,且随着冻融循环次数的

表 8 二次多项式模型概率分析结果

Table 8 Probability analysis results of quadratic polynomial model

冻融循环次数	P0 相对抗压强度			P6 相对抗压强度			P9 相对抗压强度			P12 相对抗压强度		
	试验均值/%	预测均值/%	标准偏差/%	试验均值/%	预测均值/%	标准偏差/%	试验均值/%	预测均值/%	标准偏差/%	试验均值/%	预测均值/%	标准偏差/%
50	95.5	95.6	0.36	97.9	97.6	1.47	98.8	97.8	1.94	96.9	99.3	1.25
100	94.0	91.1	1.44	95.6	94.4	2.50	96.2	95.1	1.37	94.7	95.8	0.28
150	85.6	86.5	0.64	91.5	90.5	1.06	93.0	92.1	1.89	90.4	89.5	0.43
200	79.7	81.6	1.17	83.7	85.9	0.04	86.0	88.6	3.24	82.1	80.2	6.28
300	72.3	71.6	0.95	75.5	74.5	2.15	81.2	80.3	2.69	52.3	53.1	3.00

表 9 PRELC 和文献[27]的抗压强度拟合参数

Table 9 Fitting parameters of compressive strength of PRELC and reference [27]

组号	二次多项式模型			Weibull 分布模型		
	$a_1$	$a_2$	$R^2$	$A$	$B$	$R^2$
P0	$-2.84\times10^{-5}$	-0.086	0.999	1.182	-7.864	0.915
P6	$-1.47\times10^{-4}$	-0.041	0.999	1.504	-9.580	0.975
P9	$-8.56\times10^{-5}$	-0.040	0.999	1.649	-10.840	0.983
P12	$-5.74\times10^{-4}$	-0.016	0.999	1.594	-9.943	0.870
B2	$4.26\times10^{-5}$	-0.079	0.999	0.862	-6.468	0.993
B3	$-1.15\times10^{-4}$	-0.013	0.999	2.143	-13.900	0.963
B4	$3.35\times10^{-5}$	-0.089	0.999	1.015	-7.100	0.991

增加出现不断加速下降的趋势,其中 P6 组指标值最佳。

(2)冻融循环下 PRELC 的初始吸水率  $S_1$  随冻融循环次数呈现指数递增,二次吸水率  $S_2$  与初始吸水率  $S_1$  相比小得多。随冻融循环次数的增加,PRELC 的二次吸水率变化趋势各不相同,整体上二次吸水率呈现下降趋势。

(3)PRELC 的相对抗拉强度和相对抗压强度随冻融循环次数的增加而呈现不同的损伤衰变规律,其中纤维掺量为 0.9% 时指标值最佳。各组 PRELC 的相对抗拉强度随冻融循环次数增加呈现损伤收敛,而相对抗压强度随冻融循环次数的增加呈现损伤加速的趋势,这表明 POM 纤维对 EPS 轻型混凝土冻融环境下的抗劈裂和抗拉性能有持续性改善作用。

(4)基于试验结果建立了冻融循环作用下的 PRELC 材料抗压强度衰减模型,多项式函数和 Weibull 分布模型均可较准确预测 PRELC 材料的冻融强度损失值,其中二次多项式的预测精度达到 0.99 以上,为后续基于该新型材料开展构件研究提供了可靠的理论依据。

(5)PRELC 作为一种新型的绿色轻型建筑保温材料,在 POM 纤维质量掺量为 0.6%~0.9% 时,长期冻融环境下材料的质量损失率、相对动弹性模量、强度、刚度和吸水率均较未添加纤维材料的性能大幅改善,体现了优异的工程应用潜力和价值。

参考文献:

References:

[1] 曹军平,朱健,高镇. 基于正交试验的 EPS 轻型混凝土配合比设计及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2023,42(4):1270-1281.  
CAO Junping, ZHU Jian, GAO Zhen. Mix proportion design and performance study of EPS lightweight

concrete based on orthogonal experiment[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(4): 1270-1281.  
[2] 李碧雄,汪知文,苏柳月,等. 减小 EPS 混凝土收缩的配合工艺试验研究[J]. 材料导报, 2021, 35(16): 16021-16027.  
LI Bixiong, WANG Zhiwen, SU Liuyue, et al. Experimental study on matching process to reduce the shrinkage properties of EPS concrete[J]. Materials Reports, 2021, 35(16): 16021-16027.  
[3] ARVIN M R, GHAFARY G R, HATAF N, et al. Shear behavior of EPS geofom reinforced with polypropylene fiber[J]. Geomechanics and Engineering, 2021, 25(5): 347-355.  
[4] SUN Y, LI C X, YOU J J, et al. An investigation of the properties of expanded polystyrene concrete with fibers based on an orthogonal experimental design [J]. Materials, 2022, 15(3): 1228.  
[5] 赵子斌,孙红,赵丽平. 改性碳纤维增强聚苯乙烯泡沫混凝土的制备及其性能研究[J]. 塑料科技, 2022, 50(3):33-36.  
ZHAO Zibin, SUN Hong, ZHAO Liping. Preparation and properties of modified carbon fiber reinforced polystyrene foamed concrete[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(3): 33-36.  
[6] 张文华,吕毓静,刘鹏宇. EPS 混凝土研究进展综述[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2214-2228.  
ZHANG Wenhua, LYU Yujing, LIU Pengyu. Review on the research progress of EPS concrete[J]. Materials Reports, 2019, 33(13): 2214-2228.  
[7] 李满枝,陈威,李亚斌. 国内聚甲醛纤维研究进展与应用展望[J]. 天津化工, 2021, 35(2): 17-18.  
LI Manzhi, CHEN Wei, LI Yabin. Research progress and application prospect of polyoxymethylene fiber in China[J]. Tianjin Chemical Industry, 2021, 35(2): 17-18.  
[8] 吕志恒,程铭,蒋喜生,等. 玻璃纤维和聚丙烯纤维



- 改善混凝土微观结构研究[J]. 中外公路, 2020, 40(6):267-270.
- LU Zhiheng, CHENG Ming, JIANG Xisheng, et al. Study on improving the microstructure of concrete with glass fiber and polypropylene fiber[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(6): 267-270.
- [9] 田国峰,李建华,战佳宇,等. 聚甲醛纤维对砂浆性能的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(7):51-54.
- TIAN Guofeng, LI Jianhua, ZHAN Jiayu, et al. Influence research of polyoxymethylene (POM) fiber on properties of mortar[J]. China Concrete and Cement Products, 2017(7): 51-54.
- [10] ZHANG J C, LIU T X, DONG B, et al. Experimental investigation of mechanical characterizations of a POM fiber-reinforced mortar material[J]. Frontiers in Physics, 2022, 10: 837355.
- [11] 夏畅昊,杨鼎宜,高函,等. 聚甲醛纤维超高强混凝土断裂性能研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(12):179-185.
- XIA Yanghao, YANG Dingyi, GAO Han, et al. Research on fracture properties of ultra-high strength concrete with polyformaldehyde fibers[J]. Industrial Construction, 2022, 52(12): 179-185.
- [12] 周至阳,梅军鹏,李海南,等. 聚甲醛纤维增强砂浆的力学性能和干燥收缩试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2022,41(10):3386-3393.
- ZHOU Zhiyang, MEI Junpeng, LI Hainan, et al. Mechanical properties and drying shrinkage of polyoxymethylene fiber reinforced mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(10): 3386-3393.
- [13] 马明龙,杨合,白冰,等. 聚甲醛纤维对超高性能混凝土力学性能的影响研究[J]. 混凝土, 2022(11): 101-105.
- MA Minglong, YANG He, BAI Bing, et al. Study on the effect of polyoxymethylene fiber on the mechanical properties of ultra-high performance concrete [J]. Concrete, 2022(11): 101-105.
- [14] 姚远航. 聚甲醛纤维海水海砂混凝土力学性能及耐高温性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2022.
- YAO Yunhang. Study on mechanical properties and high temperature resistance of polyoxymethylene fiber seawater and sea-sand concrete [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [15] YU R, LIU K N, YIN T Y, et al. Comparative study on the effect of steel and polyoxymethylene fibers on the characteristics of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 127: 104418.
- [16] DIXIT A, PANG S D, KANG S H, et al. Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 102: 185-197.
- [17] 曹军平,朱健,郭文昊. 矿物掺合料对聚苯乙烯轻型混凝土力学性能的影响[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2022, 40(2):14-22, 35.
- CAO Junping, ZHU Jian, GUO Wenhao. The influence of mineral admixture on lightweight cement composites with expanded polystyrene [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2022, 40(2): 14-22, 35.
- [18] Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes: ASTM C1585-13[S]. West Conshohocken: ASTM, 2020.
- [19] 张丽辉,周华新,刘建忠,等. 聚甲醛纤维增强砂浆塑性抗开裂性能的研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(6):48-52.
- ZHANG Lihui, ZHOU Huaxin, LIU Jianzhong, et al. Research on anti-plastic cracking property of polyoxymethylene fiber-reinforced cement mortar[J]. New Building Materials, 2018, 45(6): 48-52.
- [20] 李杨,彭子凌,李家正,等. 聚甲醛(POM)纤维对混凝土工作性和力学性能影响的研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(增2):1004-1009.
- LI Yang, PENG Ziling, LI Jiazheng, et al. Influences of polyformaldehyde (POM) fiber on workability and mechanical properties of hydraulic concrete [J]. Building Structure, 2022, 52(S2): 1004-1009.
- [21] 刘凯华,严佳川,胡琼,等. 冻融循环后自密实混凝土受压本构关系研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(12): 76-81, 111.
- LIU Kaihua, YAN Jiachuan, HU Qiong, et al. Research on the compressive constitutive model of self-compacting concrete after freeze-thaw cycles[J]. Industrial Construction, 2020, 50(12): 76-81, 111.
- [22] 关斌,张鹏鑫,邱继生,等. 冻融环境下活化煤矸石粉混凝土毛细吸水性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(5):483-491.
- GUAN Xiao, ZHANG Pengxin, QIU Jisheng, et al. Capillary water absorption properties of activated coal gangue powder concrete in freeze-thaw environment [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(5): 483-491.

[23] 邱继生,郭 鹏,关 琥,等.冻融损伤下煤矸石陶粒混凝土毛细吸水性能研究[J].新型建筑材料,2019,46(12):32-36, 46.  
QIU Jisheng, GUO Peng, GUAN Xiao, et al. Study on capillary water absorption performance of coal gangue ceramsite concrete under freeze-thaw damage [J]. New Building Materials, 2019, 46(12): 32-36, 46.

[24] 解国梁,申向东,刘金云,等.玄武岩纤维再生混凝土抗冻性能及损伤劣化模型[J].复合材料科学与工程,2021(4):55-60.  
XIE Guoliang, SHEN Xiangdong, LIU Jinyun, et al. Frost resistance and damage degradation model of basalt fiber regenerated concrete[J]. Composites Science and Engineering, 2021(4): 55-60.

[25] 郑 攀.混合盐-冻融循环耦合作用下混杂纤维混凝土试验研究[D].武汉:湖北工业大学,2021.  
ZHENG Zhi. Experimental study on hybrid fiber reinforced concrete under the coupling action of mixed salt freeze thaw cycle[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021.

[26] 吴瑞东.石英岩型铁尾矿微粉及废石对水泥基材料的性能影响及机理[D].北京:北京科技大学,2020.  
WU Ruidong. Performance and mechanism analysis of quartz-type iron tailings powder and waste rock in cement-based materials [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.

[27] 肖 鑫,王嘉宇,李 进,等.冻融循环作用下高黏高弹沥青混凝土动力学特征及损伤演化行为[J].中国公路学报,2023,36(12):64-76.  
XIAO Xin, WANG Jiayu, LI Jin, et al. Dynamic performance and damage evolution behavior of high-viscosity high-elasticity asphalt concrete under repeated freeze-thaw effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(12): 64-76.

[28] SHI X S, WANG X Q, WANG Q Y, et al. Experimental analysis and establishment of strength attenuation model of POM fiber reinforced geopolymeric recycled concrete under freeze-thaw cycles[J]. Materials, 2023, 16(4): 1-15.