

# 再生微粉泡沫混凝土力学性能研究

Study on Mechanical Properties of Foam Concrete with Recycled Micro-Powder

陈思豫<sup>1</sup>, 石恩华<sup>1</sup>, 周永贵<sup>1</sup>, 李欣<sup>2</sup>, 卢亚<sup>2</sup>

(1. 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100195; 2. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 为提升建筑垃圾资源化利用水平, 开展物理发泡工艺制备再生微粉泡沫混凝土的研究。固定再生微粉掺量为胶凝材料总量的 10%。分析再生微粉泡沫混凝土 X 射线衍射图, 揭示了水胶比对再生微粉泡沫混凝土强度的影响规律, 分析了掺入胶粉和纤维对再生微粉泡沫混凝土性能的提升效果。结果表明: 再生微粉泡沫混凝土的抗折和抗压强度随着水胶比的减小而增大, 整体规律与普通混凝土相似, 但增幅更大; 胶粉、纤维的加入可以改善泡沫混凝土中孔径的分布, 使试件的小孔占比增多, 对再生微粉泡沫混凝土抗压强度及抗折强度均有提高。结论可为相关工程提供参考。

**关键词:** 再生微粉; 泡沫混凝土; 孔结构; 力学性能

中图分类号: TU55 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 03-0043-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.008

CHEN Siyu<sup>1</sup>, SHI Enhua<sup>1</sup>, ZHOU Yonggui<sup>1</sup>, LI Xin<sup>2</sup>, LU Ya<sup>2</sup>

(1. PIESAT Information Technology Co., Ltd., Beijing 100195, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to improve the level of resource utilization of construction waste, the research on the preparation of recycled micro-powder foam concrete by physical foaming process was carried out. The amount of fixed recycled fine powder is 10% of the total amount of cementitious materials. The X-ray diffraction pattern of recycled micro-powder foam concrete was analyzed, and the influence of water-binder ratio on the strength of recycled micro-powder foam concrete was revealed. The effect of adding rubber powder and fiber on the performance of recycled micro-powder foam concrete was analyzed. The results show that the flexural and compressive strength of recycled micro-powder foam concrete increase with the decrease of water-binder ratio, and the overall law is similar to that of ordinary concrete, but the increase is greater. The addition of rubber powder and fiber can improve the distribution of pore size in foam concrete, increase the proportion of small pores in the specimen, and improve the compressive strength and flexural strength of recycled fine powder foam concrete. The findings may provide guidance for related engineering projects.

**Key words:** recycled powder; foam concrete; pore structure; mechanical properties

基金项目: 郑州市自然资源和规划局郑州多要素城市地质调查项目 建筑垃圾现状调查与资源化利用研究 (郑财招标采购-2020-475)。

作者简介: 陈思豫 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 建筑垃圾资源化应用等。

收稿日期: 2024-07-03

## 0 引言

随着我国新型城镇化建设的不断推进, 我国建筑垃圾年产生量已突破 20 亿 t。《十四五循环经济发展规划》提出, 到 2025 年建筑垃圾综合利用率达到 60%, 因此合理处置建筑垃圾及资源化利用已经成为我国建筑业发展的重要课题之一<sup>[1]</sup>。目前主要的

## 材料科学

资源化利用方式是将废弃混凝土和砖石等建筑垃圾进行破碎、筛分,并通过除铁、除轻质物环节,以获得满足工程技术要求的再生粗细骨料。然而,资源化处理生成的再生微粉由于活性低、需水量大,难以在普通水泥制品或混凝土中直接利用,大量积存将影响资源化利用项目的生产运营,且会对环境造成严重的危害。

泡沫混凝土材料注重保温隔热性能,对强度要求不高,因此,国内外学者开展了再生微粉作为惰性掺合料对泡沫混凝土性能的影响研究。Kumar等<sup>[2]</sup>、Binici等<sup>[3]</sup>将再生微粉与矿渣分别以不同比例部分取代水泥进行试验,研究发现将矿渣和再生微粉经粉磨后,可以起到填充胶凝材料内部孔隙的作用,降低胶凝材料水化热,提高混凝土后期强度;Ma等<sup>[4]</sup>通过试验发现,当再生细粉掺量小于30%时,混凝土的抗冻性和抗氯离子性受再生细粉掺量影响较小;Schackow等<sup>[5]</sup>通过将掺入再生砖粉的砂浆与不掺再生砖粉的砂浆作对比,发现当再生砖粉掺量在10%~25%时,砂浆具有较好的抗氯离子性和抗碳化性,但是抗硫酸盐侵蚀能力较弱;Kuzielova等<sup>[6]</sup>采用恒定的水胶比0.55,用微波和超声波处理过的发泡剂制备泡沫混凝土,发现孔隙尺寸减小,抗压强度提高;张肖明等<sup>[7]</sup>研究发现泡沫混凝土流动度随着微粉掺量的增大而减小,掺加再生微粉明显降低泡沫混凝土的抗压强度;张松等<sup>[8]</sup>研究发现当再生微粉的掺入量为10%时,泡沫混凝土28d抗压强度增强效果最优,其抗压强度达到3.09 MPa,相比纯泡沫混凝土提高了11.6%;刘香等<sup>[9]</sup>研究发现当水泥、再生微粉、粉煤灰质量比为70:15:15时,可最大程度利用再生微粉,此时的泡沫混凝土抗压强度为4.7 MPa;葛星等<sup>[10]</sup>研究发现当砖粉掺量为60%、水胶比为0.5、胶粉掺量为0.1%、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>掺量为8%时,再生砖粉泡沫混凝土可基本达到泡沫混凝土标准;罗向东<sup>[11]</sup>研究发现再生细粉品质直接影响了混凝土性能的优劣,采用C60废弃混凝土制备得到的再生细粉,相比不掺矿物掺合料的基准混凝土,内部微观结构得到明显改善;赵世颖等<sup>[12]</sup>研究发现增加再生细粉掺量,抗压强度降低;当水胶比为0.35时,再生细粉混凝土抗压强度处于较高水平。

泡沫混凝土研究大多采用H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>等化学发泡的方

式,这种利用发泡剂化学反应产生气体而发泡的方式,往往发泡速率不宜控制,因此,探讨先制备泡沫再与水泥基浆料混合的物理发泡工艺下,再生微粉对泡沫混凝土性能的影响,并通过添加胶粉、纤维等手段优化完善再生微粉泡沫混凝土的制备技术,为相关研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料

试验采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰;再生微粉来源于郑州市某建筑垃圾资源化利用项目除尘设备收集的再生微粉,D<sub>50</sub>=22.3 μm,D<sub>90</sub>=136 μm。水泥、粉煤灰、再生微粉的化学组成见表1。发泡剂、稳泡剂分别为松香酸钠、硬脂酸钙;聚丙烯纤维长度为6 mm,密度为0.92 g/cm<sup>3</sup>。

表1 水泥、粉煤灰、再生微粉化学成分  
Table 1 Chemical composition of cement, fly ash and recycled micro-powder

材料	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	其他	/%
水泥	61.33	20.49	7.56	3.36	2.18	2.89	0.65	0.20	0.97	0.37	
粉煤灰	4.31	51.93	32.68	5.09	0.64	0.70	2.13	0.28	1.48	0.76	
再生微粉	39.80	36.10	8.94	5.45	4.12	1.05	0.98	0.87	1.97	0.72	

### 1.2 试验方案

水泥和粉煤灰质量比为8:2,固定水胶比为0.35,发泡剂松香酸钠发泡液浓度为1.6%,稳泡剂硬脂酸钙掺量固定为3.0%,再生微粉掺量分别为不添加和添加胶凝材料总量的5%、10%、15%、20%,研究再生微粉掺量对抗压强度的影响。根据强度试验结果确定再生微粉掺量,在0.35、0.45、0.55不同水胶比时,分别掺加2%胶粉和1%聚丙烯纤维进行性能优化试验,试验配合比见表2。

表2 试验配合比  
Table 2 Test mix ratio

组别	编号	水胶比	胶粉/%	聚丙烯纤维/%
基准组	0.35	0.35		
	0.45	0.45		
	0.55	0.55		
掺胶粉组	0.35-F	0.35	2	
	0.45-F	0.45	2	
	0.55-F	0.55	2	
掺纤维组	0.35-X	0.35		1
	0.45-X	0.45		1
	0.55-X	0.55		1

### 1.3 发泡成型工艺

制备流程如图 1 所示。将稳泡剂与胶凝材料一起倒入干锅中低速搅拌 60 s，再加入称量好的水，搅拌 90 s，使料浆拌和均匀；随后加入预备的泡沫；固定泡沫与料浆体积比为 2:1，控制料浆容重在  $700 \sim 800 \text{ kg/m}^3$ 。低速搅拌 60 s 后倒入模具浇筑成型。将试件用塑料薄膜覆盖并移至阴凉处养护 24~48 h，试件具有足够强度后拆模，放入标准养护室。

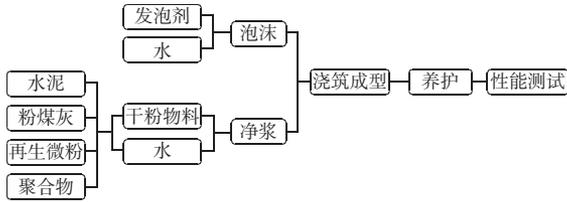


图 1 物理发泡制备流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the physical foaming preparation process

### 1.4 试验方法

试件的抗折、抗压强度按照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法》进行；干密度试验按照 JG/T 266—2011《泡沫混凝土》进行。孔结构分析采用图像分析法，对试样截面图像二值化处理后并分析孔径分布情况。考虑到气孔形状不规则，选取 Feret 直径作为孔径的测定值。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 再生微粉掺量对泡沫混凝土抗压强度的影响

不同再生微粉掺量时泡沫混凝土的抗压强度如图 2 所示。抗压强度随着再生微粉掺量的增大，呈现先升高后降低的趋势。当再生微粉掺量为 5% 时抗压强度出现最大值；当微粉掺量到 10% 时，抗压强度较未掺再生微粉的基准组降低约 10%。为尽可能利用更

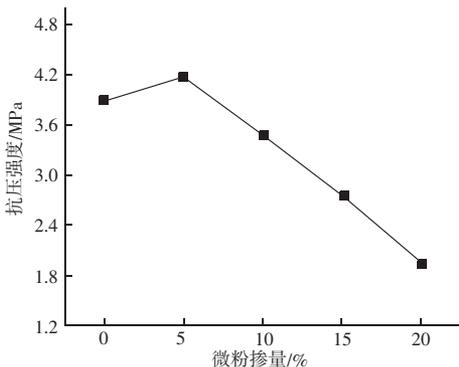


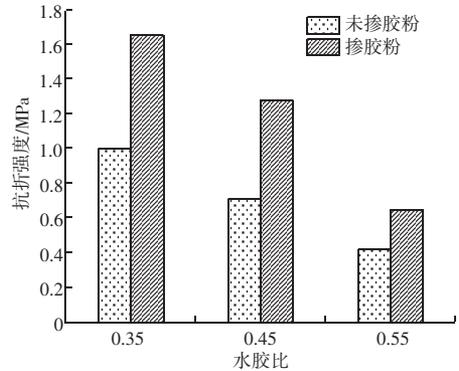
图 2 再生微粉掺量对抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of recycled micro-powder content on compressive strength

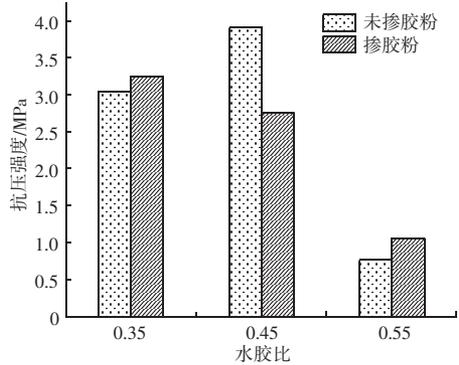
多的再生微粉，选用再生微粉掺量为胶凝材料总量的 10%（水泥:粉煤灰:再生微粉质量比为 8:1:1），进行后续试验来探究水胶比和聚合物种类对泡沫混凝土性能的影响。

### 2.2 胶粉对泡沫混凝土的影响

未掺胶粉的基准组和掺胶粉的泡沫混凝土的抗折和抗压强度如图 3 所示。



(a) 抗折强度



(b) 抗压强度

图 3 胶粉对泡沫混凝土 28 d 强度的影响

Fig. 3 Effect of redispersible polymer powder on 28-day strength of foam concrete

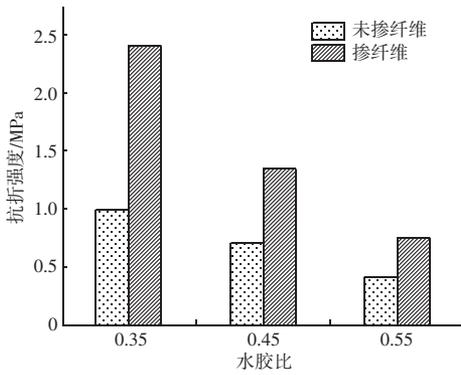
随着胶粉的加入，在水胶比为 0.35 和 0.55 时，试件的 28 d 抗折强度与抗压强度均提高，其中抗折强度提高较明显。在水胶比为 0.35、0.45、0.55 时，掺胶粉的试件抗折强度分别较基准组提高 66.0%、80.3%、54.8%；在水胶比为 0.35、0.55 时，掺胶粉的试件抗压强度分别较基准组提高 6.9%、37.7%。在水泥中掺入胶粉，遇水形成稳定的分散体系，其覆盖在水泥凝胶体或颗粒表面，形成了一个完整、连续、密实的膜结构<sup>[13]</sup>，随着水化产物的增多，胶粉颗粒堆积在凝胶体表面，水泥水化产物与胶粉相互渗透，形成网络结构，增大了浆体内部不同粒子间的接触面积，提高了泡沫混凝土抗折强度及抗压

## 材料科学

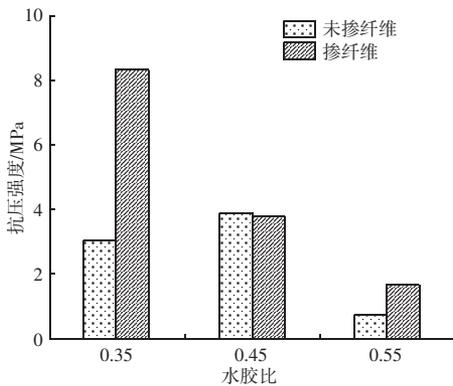
强度。

### 2.3 纤维对泡沫混凝土的影响

由图4可知,掺入纤维对泡沫混凝土抗折强度和抗压强度均有明显的提高。在水胶比为0.35、0.45、0.55时,掺纤维的试件抗折强度分别较基准组提高141.0%、90.1%、81.0%;在水胶比为0.35、0.55时,掺纤维的试件抗压强度分别较基准组提高173.4%、119.5%。其作用机理主要是纤维的掺入对泡孔有一定的保护作用,使泡沫在浆料中的分散过程中不易破裂,也不易形成连通结构,较好地改善了泡孔结构;纤维与其他原材料混合物经充分搅拌后,均匀的分布在浆料内,在泡沫混凝土基体中与水化产物和未水化物黏结在一起形成三维网状结构,可以产生支撑效应,且纤维高弹性模量的优势,改善了再生微粉泡沫混凝土干燥收缩大的缺点,进而抵抗侧向变形,形成套箍效应,有利于提高泡沫混凝土的抗裂性能<sup>[14]</sup>,进而增强泡沫混凝土的力学性能。



(a) 抗折强度



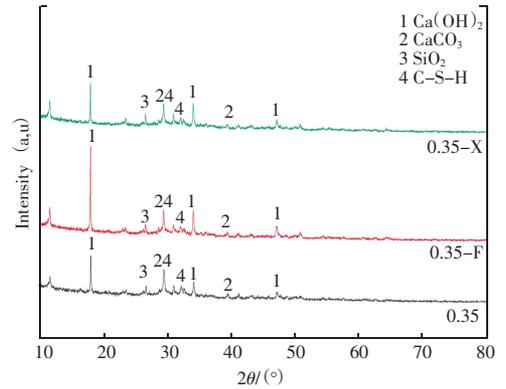
(b) 抗压强度

图4 纤维对泡沫混凝土28 d强度的影响

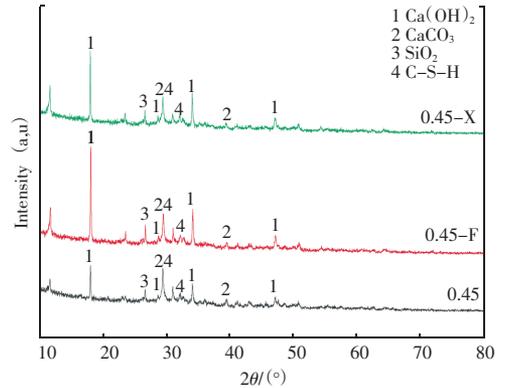
Fig. 4 Effect of fiber on 28-day strength foam concrete

### 2.4 不同水胶比的泡沫混凝土X射线衍射图

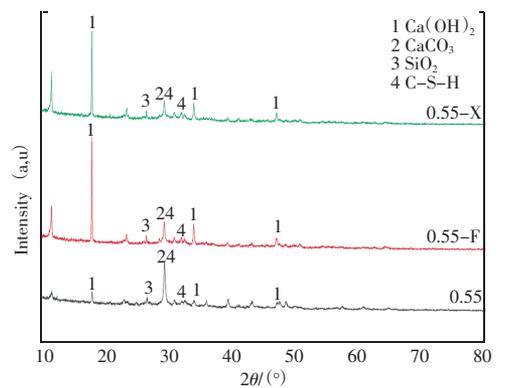
由图5可知,再生微粉泡沫混凝土的主要矿物相是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、C-S-H凝胶和 $\text{SiO}_2$ 。出现 $\text{CaCO}_3$ 的原因是水泥水化产物的氢氧化钙与空气中 $\text{CO}_2$ 发生化学反应生成的,也就是制品碳化现象;再生微粉泡沫混凝土的气孔孔壁主要是由水泥发生水化反应生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H凝胶和因碳化产生的 $\text{CaCO}_3$ 等水化产物组成,同时也含有部分未完



(a) 0.35 水胶比



(b) 0.45 水胶比



(c) 0.55 水胶比

图5 再生微粉泡沫混凝土X射线衍射图

Fig. 5 X-ray diffraction pattern of recycled micronized foam concrete

全反应的  $\text{SiO}_2$  构成，为泡沫混凝土强度提供来源。当水胶比为 0.35 时，掺胶粉的泡沫混凝土  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  特征峰较强。当水胶比为 0.45 和 0.55 时，无论是加入胶粉还是纤维， $\text{Ca}(\text{OH})_2$  特征峰都较强。

## 2.5 孔结构分析

由图 6 可知，胶粉的加入在水胶比较低（0.35、0.45）时，可略微提高泡沫混凝土的孔隙率，但抗折、抗压强度仍有提高，即掺入胶粉后能提高泡沫混凝土的比强度。纤维的加入，在水胶比为 0.35 和 0.55 时，孔隙率略有降低，幅度在 20% 以内。而泡沫混凝土中掺入聚丙烯纤维后，纤维对泡沫的保护作用，使泡沫在浆体中分散的过程中破裂得更少，合并得更少，加入的有效泡变多，泡沫混凝土料浆的稳定性变好。

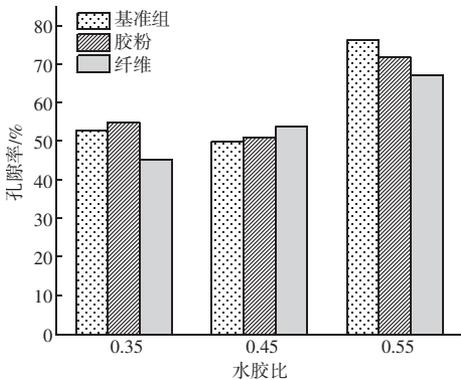


图 6 胶粉和纤维对孔隙率的影响

Fig. 6 Effect of rubber powder and fiber on porosity

由图 7 可知，随着干密度的增加，泡沫混凝土的孔隙率逐渐降低。泡沫混凝土孔隙率与密度之间具有良好的线性相关性 ( $R^2 = 0.98$ )。随着泡沫混凝土中引入的有效泡沫增加，干密度降低，孔隙率逐渐增大。

在总孔隙率分析的基础上，选取 0.55、0.55-F、0.55-X 三组配合比进行孔结构分析，孔径分布结果如图 8 所示。

在水胶比为 0.55 时，泡沫混凝土的孔径主要分布在 500  $\mu\text{m}$  以下，孔径 500  $\mu\text{m}$  以下的几乎占到 85% 以上，其中 200  $\mu\text{m}$  以下的占比高达 60%。掺入胶粉、纤维的泡沫混凝土小孔占比比较基准组多，这是因为胶粉、纤维的加入可以改善泡沫混凝土中孔

径的分布，使孔径分布较为均匀，对强度的提升有一定效果。

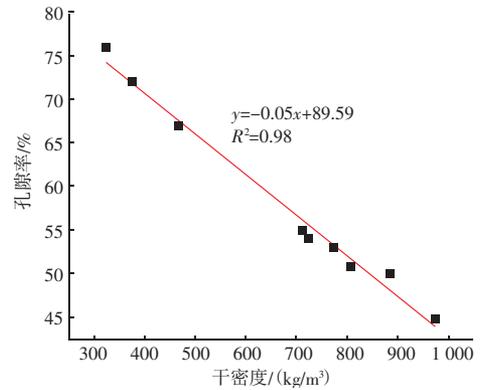


图 7 干密度和孔隙率的关系

Fig. 7 Relationship between dry density and porosity

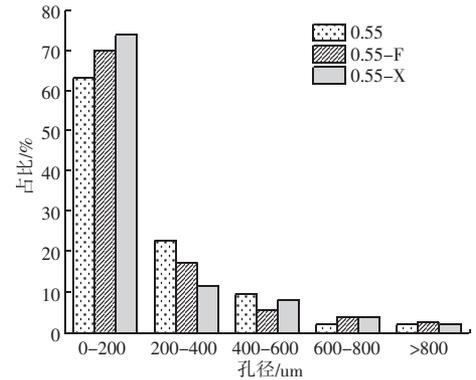


图 8 孔径分布图

Fig. 8 Aperture distribution diagram

## 3 结论

通过抗折、抗压强度试验和泡沫混凝土水化产物、孔结构分析，探究了再生微粉掺量、胶粉及纤维掺入等因素对再生微粉泡沫混凝土的影响，得出主要结论如下：

(1) 在微粉掺量为 5% 时，再生微粉泡沫混凝土强度出现最大值，当微粉掺量到 10% 时，强度较未掺再生微粉的基准组降低约 10%。

(2) 再生微粉泡沫混凝土的抗折和抗压强度随着水胶比的减小而增大，整体规律与普通混凝土相似，但增幅更大。

(3) 在低水胶比时，胶粉、纤维的加入可以使试件的小孔占比增多，对再生微粉泡沫混凝土抗压强度及抗折强度均有提高。

## 材料科学

## 参 考 文 献

- [1] 华经产业研究院. 2022-2027年中国建筑垃圾处理行业市场调研及投资战略规划建议报告 [M]. 华经产业研究院, 2021.
- [2] KUMAR S, KUMAR R, BANDOPADHYAY A, et al. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30 (8): 679-685.
- [3] BINICI H, TEMIZ H, MEHMET M, et al. The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 21 (5): 1122-1128.
- [4] MA Z, LI W, WU H, et al. Chloride permeability of concrete mixed with activity recycled powder obtained from C&D waste [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 199: 652-663.
- [5] SCHACKOW A, STRINGARI D, SENFF L, et al. Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 62: 82-89.
- [6] KUZIELOVA E, PACH L, PALOU M. Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125: 998-1004.
- [7] 张肖明, 黄沛增, 崔庆怡. 建筑垃圾再生微粉泡沫混凝土性能研究 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2020 (5): 96-98.
- [8] 张松, 李如燕, 董祥, 等. 再生微粉有效代替水泥制备泡沫混凝土 [J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37 (9): 2948-2953.
- [9] 刘香, 运喜刚, 张君瑞, 等. 再生微粉制备泡沫混凝土的试验研究 [J]. *新型建筑材料*, 2016, 43 (3): 77-80.
- [10] 葛星, 李瑶. 活性砖粉制备泡沫混凝土物理性能研究 [J]. *低温建筑技术*, 2021, 43 (6): 1-6.
- [11] 罗向东. 再生微粉对混凝土体积稳定性的影响 [J]. *市政技术*, 2020, 38 (1): 259-261, 264.
- [12] 赵世颖, 李滢, 康晓明, 等. 再生微粉混凝土抗冻性能试验研究 [J]. *工业建筑*, 2020, 50 (11): 112-118, 96.
- [13] 李应权, 徐洛屹, 扈士凯, 等. 聚合物水泥泡沫保温材料的研究 [J]. *新型建筑材料*, 2010, 37 (2): 29-33.
- [14] 林兴胜. 纤维增强泡沫混凝土的研制与性能 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.

## (上接第 27 页)

- [9] 徐存东, 李智睿, 连海东, 等. 冻融循环下玄武岩纤维混凝土的耐久性寿命预测 [J]. *混凝土*, 2022 (1): 1-6.
- [10] 王振山, 李亚坤, 韦俊, 等. 玄武岩纤维混凝土氯盐侵蚀行为及力学性能试验研究 [J]. *实验力学*, 2020, 35 (6): 1060-1070.
- [11] 陶友海. 纤维素纤维混凝土抗冻耐久性劣化规律 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22 (2): 715-720.
- [12] 徐存东, 李博飞, 李准, 等. 早期受盐-冻耦合作用下掺玄武岩纤维混凝土耐久性劣化规律 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43 (3): 816-824.
- [13] 翟思敏, 黄金霞. 建筑用不同取代率粉煤灰再生混凝土的力学性能及耐久性研究 [J]. *功能材料*, 2024, 55 (4): 4121-4126.
- [14] 徐超. 纤维混杂效应对混凝土复合材料的力学及耐久性的影响 [J]. *功能材料*, 2021, 52 (1): 1202-1207.
- [15] 普少昌, 周喻, 张宏博, 等. 含铁尾矿粉和粉煤灰混凝土强度和耐久性研究 [J]. *非金属矿*, 2021, 44 (6): 84-87, 93.
- [16] GB/T 50082—2024, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准 [S].

## (上接第 42 页)

- [9] 邹小童, 武建好, 李星辰, 等. 减缩剂对水泥砂浆及超高性能混凝土收缩性能的影响 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2024 (6): 18-21, 26.
- [10] 张信, 陈航宇, 王航, 等. 减缩剂在混凝土中的作用效果研究 [J]. *工业建筑*, 2023, 53 (增刊2): 722-725, 693.
- [11] 左俊卿, 房霆宸, 朱敏涛, 等. 裂缝控制材料对混凝土收缩及微观性能影响 [J]. *混凝土*, 2024 (1): 95-100, 106.
- [12] 光鉴森, 邹小童. 减缩剂对水泥砂浆塑性收缩开裂的影响及机理分析 [J]. *新型建筑材料*, 2023, 50 (9): 57-61.
- [13] GB/T 50081—2019. 混凝土物理力学性能试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.