

## 多因素及干湿循环对泡沫混凝土性能的影响

谢洪阳, 戴宜文, 任宇航, 邓 勇

(南昌航空大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330063)

**摘要:** 为了探索泡沫掺量(质量分数,下同)、砖粉掺量、水料比(质量比,下同)和羟丙基甲基纤维素(HPMC)掺量、干湿循环对掺砖粉的泡沫混凝土性能的影响,开展四因素五水平的正交实验,并结合功效系数法确定掺砖粉泡沫混凝土的最优配合比。结果表明:泡沫混凝土的最优配合比为泡沫、砖粉、HPMC掺量分别为3%、30%、0.05%、水料比为0.55。泡沫混凝土的抗压强度随泡沫和砖粉掺量的增加呈下降趋势、随水料比和HPMC掺量的增加呈现先上升后下降的趋势;随着干湿循环次数的增加,掺砖粉泡沫混凝土的抗压强度不断减小,原因是泡沫混凝土内部的完整气孔在吸水 and 脱水之后,周围会产生类似于应力集中的现象,产生微小裂缝,导致原先密闭的孔洞变为有害孔洞,甚至会产生贯穿裂缝,极大地影响掺砖粉泡沫混凝土的耐久性。

**关键词:** 泡沫混凝土; 砖粉; 正交试验; 水料比; 羟丙基甲基纤维素; 干湿循环; 功效系数法

中图分类号:TU528.2

文献标志码:A

引用格式:

谢洪阳, 戴宜文, 任宇航, 等. 多因素及干湿循环对泡沫混凝土性能的影响[J]. 中国粉体技术, 2023, 29(5): 125-134.  
XIE H Y, DAI Y W, REN Y H, et al. Effects of multiple factors and wetting and drying cycles on properties of brick powder foamed concrete[J]. China Powder Science and Technology, 2023, 29(5): 125-134.

## Effects of multiple factors and wetting and drying cycles on properties of brick powder foamed concrete

XIE Hongyang, DAI Yiwen, REN Yuhang, DENG Yong

(School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of foam content (mass fraction, the same below), brick powder content, water-to-material ratio (mass ratio, the same below), hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) content, and dry-wet cycle on the properties of brick-doped foam concrete, orthogonal experiments of four factors and five levels were carried out, and the optimal mixing ratio of brick-doped powder foam concrete was determined by combining the power coefficient method. The results show that the optimal mixing ratio of brick-doped powder foam concrete is that foam, brick powder and HPMC content are 3%, 30%, 0.05%, and the water-to-material ratio is 0.55. The compressive strength of foam concrete shows a downward trend with the increase of foam and brick powder content, and a trend of first increasing and then decreasing with the increase of water-to-material ratio and HPMC content. With the increase of the number of dry and wet cycles, the compressive strength of brick-doped powder foam concrete continues to decrease, because the complete pores inside the foam concrete will produce a phenomenon similar to stress concentration around after water absorption and dehydration, resulting in tiny cracks, resulting in the original closed holes becoming harmful holes, and even through cracks, which greatly affects the durability of brick-doped powder foam concrete.

**Keywords:** foam concrete; brick powder; orthogonal test; water-material ratio; hydroxypropyl methylcellulose; wet and dry cycle; power coefficient method

收稿日期: 2022-01-11, 修回日期: 2023-07-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 52068054; 南昌航空大学研究生创新专项资金项目, 编号 YC2022-130。

第一作者简介: 谢洪阳(1973—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为结构工程。E-mail: xiehongyang486@163.com。

通信作者简介: 戴宜文(1999—), 硕士研究生, 研究方向为结构工程。E-mail: dyw2458751868@163.com。

随着我国工业化进程不断加快,能源消耗与污染的问题变得越来越尖锐,采用更环保更低能耗的新型材料成为建筑行业的当务之急<sup>[1-3]</sup>。在工程建设中,泡沫混凝土作为新型环保建筑材料,与传统建筑材料相比具有质轻、保温、隔热的特点;但其成本较高,因此通常加入其他材料来降低成本,同时增强其性能。林在健等<sup>[4]</sup>、金明山等<sup>[5]</sup>、林国忠等<sup>[6]</sup>研究粉煤灰对泡沫混凝土物理性能的影响,结果表明,适量的粉煤灰可以密实泡沫混凝土骨架,提高抗压强度。随着环保意识的增强,越来越多的废弃再生骨料被加入到泡沫混凝土中,起到降本增效且经济环保的作用。张松等<sup>[7]</sup>、Pasupathy 等<sup>[8]</sup>探究废物再生骨料对泡沫混凝土稳定性的影响,发现再生骨料的质量分数为 25%时,可最大程度增强泡沫混凝土的强度。薛翠真等<sup>[9]</sup>、Chandni 等<sup>[10]</sup>探究再生建筑垃圾在泡沫混凝土中的应用,并分析其对泡沫混凝土性能的影响,发现再生建筑垃圾可以提高泡沫混凝土性能并降低建筑成本。Soon 等<sup>[11]</sup>、Benazzouk 等<sup>[12]</sup>开展再生橡胶颗粒导热率的研究,发现橡胶颗粒的质量分数为 10%时,泡沫混凝土的分裂拉伸强度提高了 6.7%,Zaher 等<sup>[13]</sup>开展基于极限学习机模型的轻量化泡沫混凝土抗压强度预测,由废弃砖粉研磨制得的砖粉也可以加入泡沫混凝土中起到提升强度又节约资源的目的。邵家虎等<sup>[14]</sup>研究砖粉对泡沫混凝土性能的影响,发现砖粉的质量分数为 30%时,抗压强度最大。

目前对掺砖粉泡沫混凝土性能的研究只围绕砖粉这一因素展开,而泡沫掺量、水灰比以及稳泡剂掺量等因素均会对泡沫混凝土的性能产生重要影响。泡沫混凝土作为道路路基的填充材料时,经常处于干湿交替的工作环境<sup>[15]</sup>,但关于干湿循环对泡沫混凝土性能影响的研究鲜有报道。基于上述考虑,本研究中针对 4 个因素泡沫掺量(质量分数,下同)、砖粉掺量、水料比(质量比,下同)和羟丙基甲基纤维素(HPMC)掺量,采用正交试验法研究不同因素对泡沫混凝土性能的影响,得到泡沫混凝土的最优配合比;并进行干湿循环试验,借助电镜扫描技术,从微观角度研究泡沫混凝土试块中各材料的成分、状态及其发挥的作用。

## 1 实验

### 1.1 主要材料和仪器设备

#### 1.1.1 材料

水泥: P.O.42.5 普通硅酸盐水泥,湖南海螺水泥有限公司生产,基本性能和化学组分如表 1、2 所示。

表 1 水泥的基本性能

Tab.1 Basic properties of cement

项目	初凝时间/min	终凝时间/min	3 d 抗折强度/MPa	28 d 抗折强度/MPa	3 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
指标	≥60	≤600	≥3.5	≥6.5	≥17	≥42.5
结果	176	310	4.2	7.1	22.3	48.2
判定	合格	合格	合格	合格	合格	合格

表 2 水泥的化学组分

Tab.2 Chemical composition of cement

组分	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
质量分数/%	22	4.2	5.2	63	1.5	2.2

砖粉: 将普通烧结黏土砖用锤式破碎机粉碎至粒径为 4.75 mm 左右的颗粒,然后用球磨机将颗粒继续碾磨至 10~80 μm 的砖粉颗粒,其主要成分为 SiO<sub>2</sub>。

发泡剂: 符合市场规格的河南华泰建材公司生产的 HT 牌复合发泡剂,其物理性能指标如表 3 所示。

依照《气泡混合轻质土填筑工程技术规范》<sup>[16]</sup>进行发泡剂性能试验,得出复合发泡剂稀释 30 倍泌水量最少,沉降最小。

稳泡剂: 羟丙基甲基纤维素(HPMC),富强精细化公司,物理性能指标如表 4 所示。

表3 HT牌复合发泡剂物理性能指标

Tab.3 Physical properties of HT composite foaming agent

外观颜色	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	固体的质量分数/%	pH	发泡倍数	1 h 沉降距离/mm	1 h 泌水率/%
深褐色	1.05	23.8	9.2	15~30	≤50	≤70

表4 HPMC 的物理性能指标

Tab.4 Physical performance indicators of HPMC

外观形态	黏度(MPa·s)	pH	含水率/%
白色粉末	15	6.5	2.1

### 1.1.2 仪器设备

QJ-I-20 型环保型锤式破碎机(南昌光明化验设备有限公司); SM-500 型球磨机(中国无锡建仪仪器机械有限公司); QJ-I-20 型胶砂搅拌机(中国建材检验认证集团西安有限公司); FP-X180 型水泥发泡机(烟台驰龙建筑节能科技有限公司); BDHG-9143BS-III(中华人民共和国重庆试验设备厂); Regulus 8100 型扫描电子显微镜(SEM,日立(中国)有限公司)。

## 1.2 方法

### 1.2.1 试块的制备

按照质量法确定每组水泥的质量后,按照各组比例准确称量各掺料和水的质量,之后将混料用搅拌机干拌 150 s,使各组分材料充分混合后,再加入水并搅拌 150 s。

将复合发泡剂水溶液加入到水泥发泡一体机中,通过空气加压发泡,称取定量的泡沫加入至搅拌好的水泥浆液中,搅拌 120 s,待搅拌均匀且浆体表面没有浮出气泡时,立即进行 160~200 mm 的流动性测试,记录泡沫混凝土的流动值,满足要求后倒入边长为 100 mm 的正方体模具中。

静制 36 h 后刮平模具表面并用气枪拆模,然后存放在温度为(20±2)℃、相对湿度为 95% 以上的标准养护室中,养护 28 d 龄期<sup>[17]</sup>。

将养护好的试件进行干湿循环实验,干循环是将养护好的试件放入温度为 60℃ 的烘箱内,12 h 后取出试件,冷却至室温。湿循环是将干循环结束后的试件放入 20℃ 水中,12 h 后取出。干湿循环一次的时间为 1 d,分别测试干湿循环 3、7 d 后掺砖粉泡沫混凝土的抗压强度,并与未进行干湿循环的掺砖粉泡沫混凝土的强度进行对比,计算干湿循环后强度的损失率。

### 1.2.2 配合比的设计

实验中对实验结果造成影响的因素是多样的,且因素之间的影响也会随着掺量的变化而变化,因此设计正交实验表<sup>[18-20]</sup>,设置 4 组因素泡沫掺量(A)、砖粉掺量(B)、水料比(C)、HPMC 掺量(D)以及 5 个变化水平,根据正交实验的方法制备 25 组、每组 3 份不同配合比的试块,分别研究未经过干湿循环、经过 3、7 d 干湿循环的泡沫混凝土的强度差异。具体因素水平见表 5,正交试验设计方案见表 6。

表5 正交实验因素水平

Tab.5 Factor level of orthogonal experiment

水平	因素			
	质量分数/%			水料质量比
	泡沫掺量	砖粉掺量	HPMC 掺量	
1	3	10	0.03	0.45
2	4	20	0.04	0.50
3	5	30	0.05	0.55
4	6	40	0.06	0.60
5	7	50	0.07	0.65

表 6 正交实验设计方案

Tab.6 Orthogonal experimental design protocol

组号	因素				组号	因素			
	A	B	C	D		A	B	C	D
1	1	1	1	1	14	3	4	1	3
2	1	2	2	2	15	3	5	2	4
3	1	3	3	3	16	4	1	4	2
4	1	4	4	4	17	4	2	5	3
5	1	5	5	5	18	4	3	1	4
6	2	1	2	3	19	4	4	2	5
7	2	2	3	4	20	4	5	3	1
8	2	3	4	5	21	5	1	5	4
9	2	4	5	1	22	5	2	1	5
10	2	5	1	2	23	5	3	2	1
11	3	1	3	5	24	5	4	3	2
12	3	2	4	1	25	5	5	4	3
13	3	3	5	2					

## 2 结果与讨论

### 2.1 干湿循环正交实验

对各组试块进行抗压强度测试,并通过方差公式(1)进行方差分析:

$$S_z = S_w + S_y, \quad (1)$$

式中:  $S_z$ 、 $S_y$ 、 $S_w$  分别为总的、各列因素的、试验误差的偏差平方和。方差分析的目的在于将实验误差所引起的结果差异区分开来,从而得出各因素对实验结果的影响<sup>[21]</sup>,对正交模拟计算软件求得的数据结果用 Origin 软件做进一步处理,并且取实验后破坏的试件进行 SEM 形貌分析。

图 1 为泡沫和砖粉掺量对泡沫混凝土性能的影响,图 2 为第 1、25 组试块的 SEM 图像。结合图 1、2 可知,泡沫的增加使得泡沫混凝土流动性升高,泡沫和砖粉的增加使得泡沫混凝土内部的有害孔隙增加,胶凝材料占比减少,材料之间的黏结减弱,且砖粉为粉质或砂质黏土,主要化学成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和结晶水<sup>[21]</sup>,强度较低,因此砖粉掺量的增加会使强度和流动性均降低。经过 3、7 d 的干湿循环后,泡沫混凝土内部分子的黏结被进一步破坏,抗压强度降低,可见泡沫与砖粉掺量的增加使泡沫混凝土的强度降低,质量损失率的最大值分别为 75%、42%,经过 7 d 干湿循环后,泡沫掺量为 4%,砖粉掺量为 20%时,泡沫混凝土强度损失率达到了最大值 39.7%。

图 3 为 HPMC 掺量和水料比对泡沫混凝土性能的影响,图 4 为第 1、25 组试块的 SEM 图像。结合图 3、4 可知,随着泡沫和砖粉掺量的增加,泡沫混凝土的强度不断降低,HPMC 掺量和水料比的增加,使泡沫混凝土内水化反应的进行越来越彻底,混凝土内部骨架不断密实强度不断提高。HPMC 的增加使其流动性降低,泡沫混凝土中的泡沫状态稳定,在混凝土中的分布更加均匀,试件中的密闭孔增多,因此,在泡沫混凝土内部能完整发挥作用的泡沫逐渐增多,泡沫混凝土强度提高。而随着水料比和 HPMC 掺量的不断增加会破坏混凝土内的有效泡沫,使得有害孔洞增加,强度下降,且水量过多时,混凝土内会因密度不同产生分层现象,减弱了胶凝材料与砖粉及其他材料之间的黏结,试件内有害孔洞增加,流动性升高而强度降低<sup>[22]</sup>,故 HPMC 和水料比的增加,使泡沫混凝土的强度分别先升高至 4.976 MPa 再降低至 2.793 MPa。经过 7 d 干湿循环后,HPMC 掺量为 0.04%,水料比为 0.5 时,泡沫混凝土的强度损失率最大值为 42.5%。

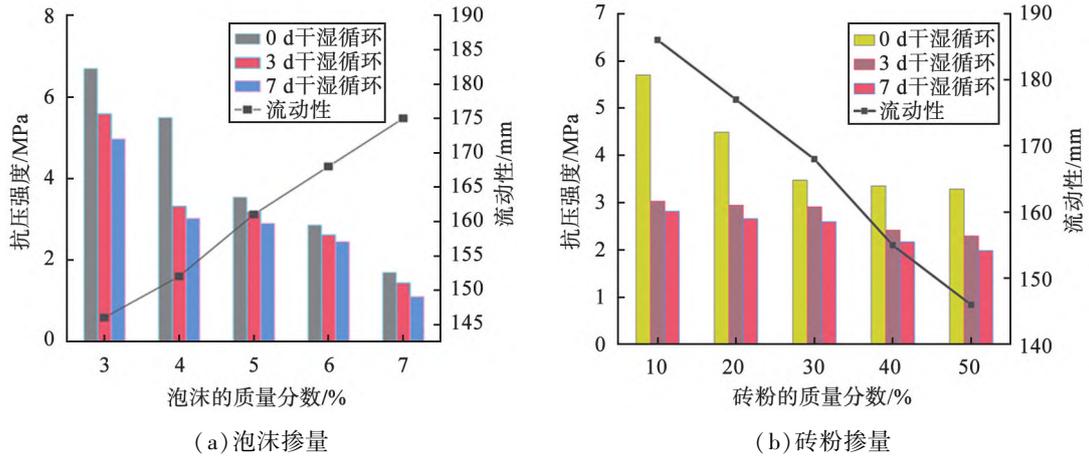


图 1 泡沫和砖粉掺量对泡沫混凝土性能的影响

Fig.1 Effect of foam and brick powder content on properties of foam concrete

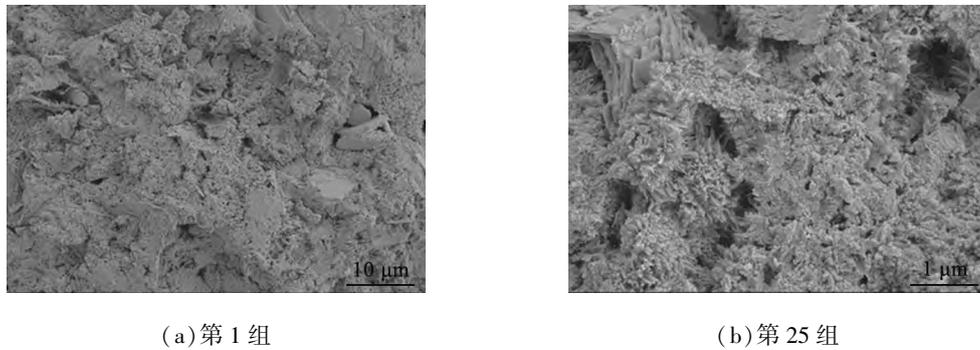


图 2 第 1、25 组试块的 SEM 图像

Fig.2 SEM images of groups 1 and 25

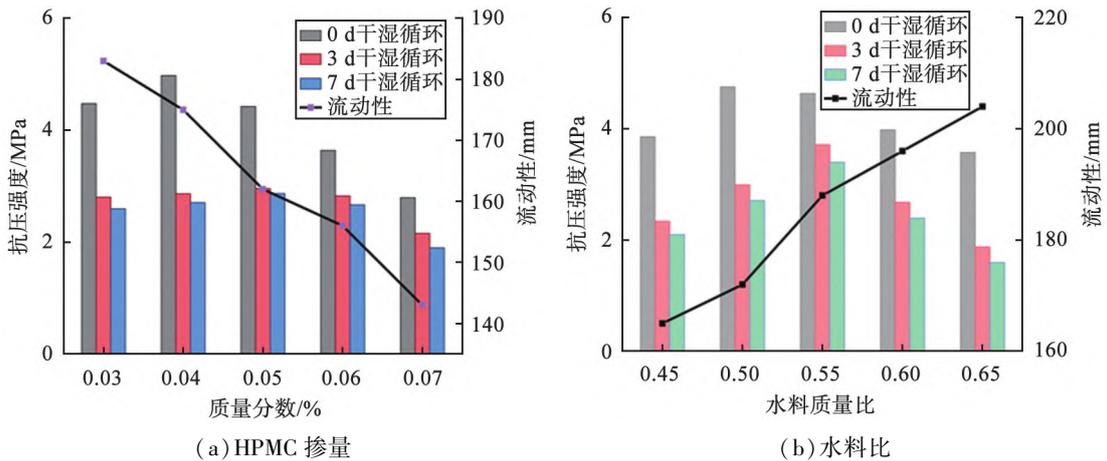


图 3 HPMC 掺量和水料比对泡沫混凝土性能的影响

Fig.3 Effect of HPMC content and water-to-material ratio on properties of foam concrete

由图 1、3 可知,无论各因素的掺量对泡沫混凝土强度有怎样的影响,经过干湿循环后,抗压强度都会降低。原因可能是掺砖粉泡沫混凝土内部的完整气孔在吸水 and 脱水之后,其周围会产生类似于应力集中的现象,产生微小裂缝,导致原先密闭的孔洞变为有害孔洞,甚至产生贯穿裂缝,极大地影响了泡沫混凝土的耐久性。

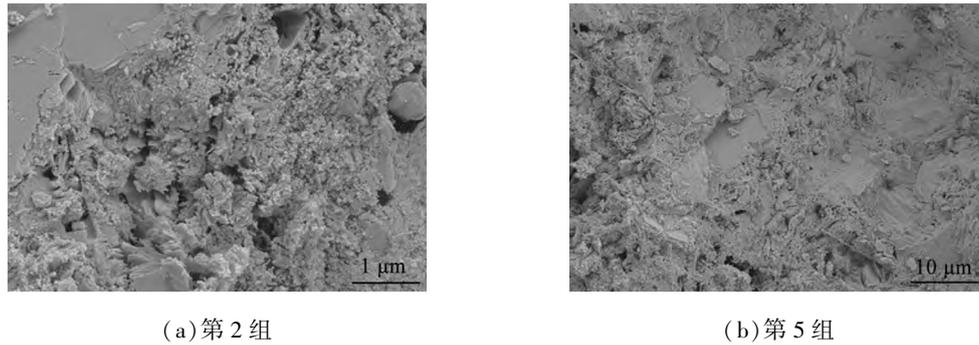


图4 第2、25组试块的SEM图像

Fig.4 SEM images of groups 2 and 25

图5为正交实验各因素水平的极差值,极差值反映了该因素对抗压强度的影响程度。由图可知,不论是经过3 d还是7 d干湿循环,泡沫掺量对泡沫混凝土抗压强度影响的极差值都最大,分别为4.988、4.552 MPa;砖粉掺量对泡沫混凝土的强度极差值最小,分别为1.642、0.734 MPa,因此通过极差值可知,各因素对泡沫混凝土强度的影响程度大小排序为泡沫掺量、水料比、HPMC掺量、砖粉掺量,即泡沫掺量对泡沫混凝土抗压强度的影响最为显著,砖粉掺量对泡沫混凝土的强度的影响最小。

## 2.2 最优配合比

混凝土的2个重要指标干密度和抗压强度之间一般呈正比线性关系,二者可反映泡沫混凝土的物理性能,泡沫混凝土干密度越小,抗压强度越高,则性能越好,因此对泡沫混凝土性能的评价应综合考虑干密度与抗压强度指标。功效系数法可根据多目标规划原理,对多评价对象的实验值进行加权平均,得到综合、稳定、可靠的结果,从而降低评价的复杂性,减少误差<sup>[23]</sup>。

本文中采用功效系数法对实验结果进行分析,将泡沫混凝土的干密度和抗压强度分别等效换算为功效系数 $d_1$ 、 $d_2$ 代入功效系数公式,求得总功效系数

$$d = \sqrt{d_1 d_2}, \quad (2)$$

作为考量泡沫混凝土最优配合比的指标。图6为未经过干湿循环与经过7 d干湿循环泡沫混凝土的功效系数图,由图可知,2个图中的功效系数 $d_1$ 在干湿循环前后都趋于稳定,而功效系数 $d_2$ 在干湿循环前后变化显著,说明干湿循环对泡沫混凝土的强度有影响。第9组试块在干湿循环后,强度损失率最大达到68.79%,该组泡沫混凝土受干湿循环影响最为显著,受到的破坏也最大。第3组试块经过干湿循环后强度最大,强度损失率最小,且无论是否经过干湿循环,第3组试块的总功效系数均最大,因此在此配合比下得到的泡沫混凝土性能最好,最能满足实际工程需要,故泡沫混凝土的最优配合比为 $A_1B_3C_3D_3$ ,即泡沫、砖粉、HPMC掺量分别为3%、30%、0.05%、水料比为0.55。

设置1组泡沫、HPMC质量分数分别为3%、0.05%,水料比为0.55的泡沫混凝土为对照组,分别从对照组、表6中的第3组、第3组经过3 d和7 d干湿循环后的试件中取尺寸为10 mm×10 mm×10 mm(长度×宽度×高度)的碎块进行SEM实验。图7为放大倍数为500时对照组与第3组试块的SEM图像,图8为第3组试块干湿循环3、7 d后放大倍数为500时的SEM图像。

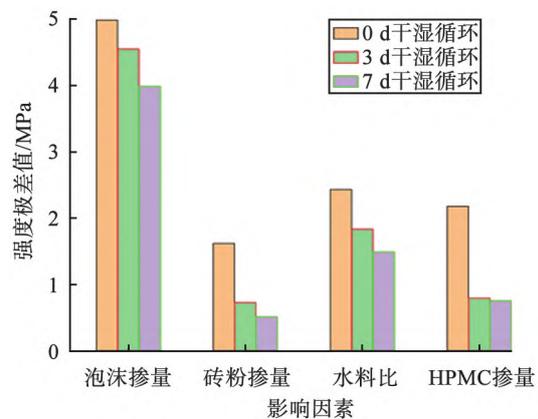
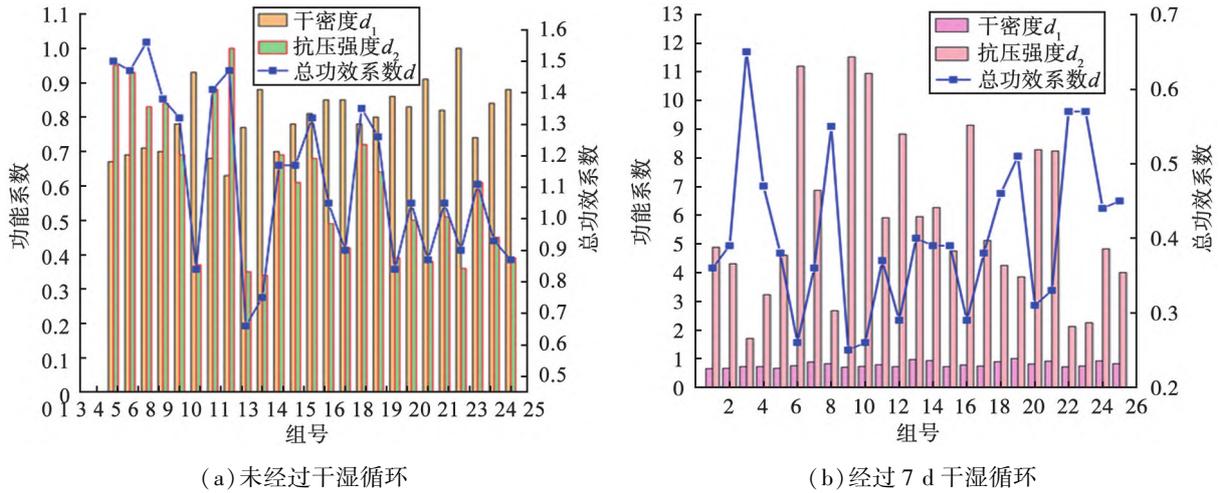


图5 各因素水平的极差值

Fig.5 Range of factor levels

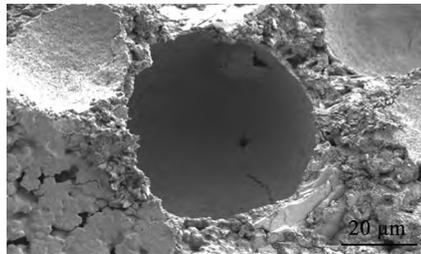


(a) 未经过干湿循环

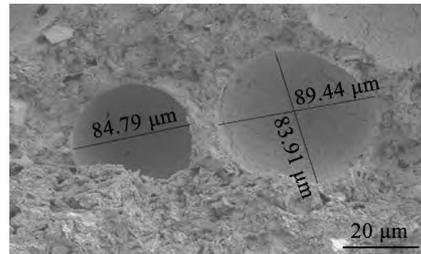
(b) 经过 7 d 干湿循环

图 6 未经过干湿循环与经过 7 d 干湿循环泡沫混凝土的功效系数

Fig.6 Efficacy coefficient of foamed concrete without wet and dry cycle and after the 7 d wet and dry cycle



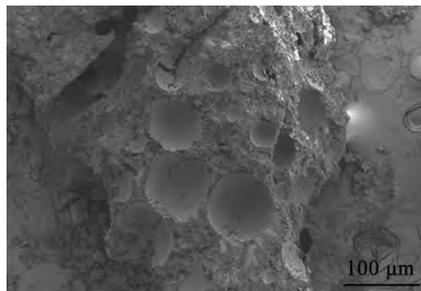
(a) 对照组



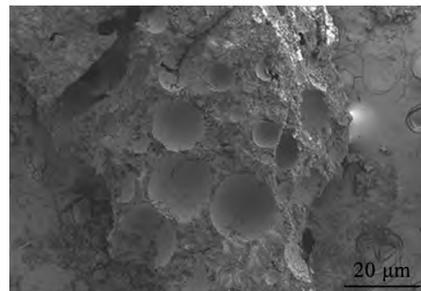
(b) 第 3 组

图 7 对照组与第 3 组试块的 SEM 图像

Fig.7 SEM images of control versus and group 3



(a) 3 d



(b) 7 d

图 8 第 3 组试块干湿循环 3 d 和 7 d 后的 SEM 图像

Fig.8 SEM image of the third group of test blocks after 3 d, 7 d and dry and wet cycles

在放大倍数为 500 倍时,图 7(a)中的孔壁光滑,无其他形态物质,孔壁较薄,说明水泥水化完全,但内部存在较多肉眼可见的连通孔隙;图 7(b)中的气孔孔径较小,且气孔结构更均匀,连通孔变少,闭合孔增多,孔间壁厚且密实,颗粒状物质十分明显,该物质就是砖粉颗粒,它对泡沫混凝土有明显的微填充作用,密实了泡沫混凝土的骨架。从图 8(a)可以发现,经过 3 d 干湿循环后,掺砖粉泡沫混凝土内部孔壁仍较光滑,但开始出现细小的裂纹,且孔洞间出现细小孔隙;从图 8(b)可以看出,经过 7 d 干湿循环后,泡沫混凝土内部气孔的孔壁粗糙且孔径较大,存在明显的连通孔隙,泡沫混凝土基体处于松散状态。

从 SEM 的表征结果可以得出: 1) 掺砖粉泡沫混凝土抗压强度的提升是由于所加砖粉细化了孔隙, 增加了混凝土基体的密实度; 2) HPMC 作为稳泡剂, 降低了泡沫在混凝土成型过程中的破坏程度, 减少了试件中有害孔洞的产生, 使气孔分布更加均匀; 3) 干湿循环会破坏泡沫混凝土内部完整的气孔, 减弱了胶凝材料之间的黏结, 产生连通孔隙。

### 2.3 相关性拟合

根据图 1、3 的结果, 将 HPMC 掺量、泡沫掺量、水料比、砖粉掺量对抗压强度的影响进行相关性拟合, 结果如图 9 所示。

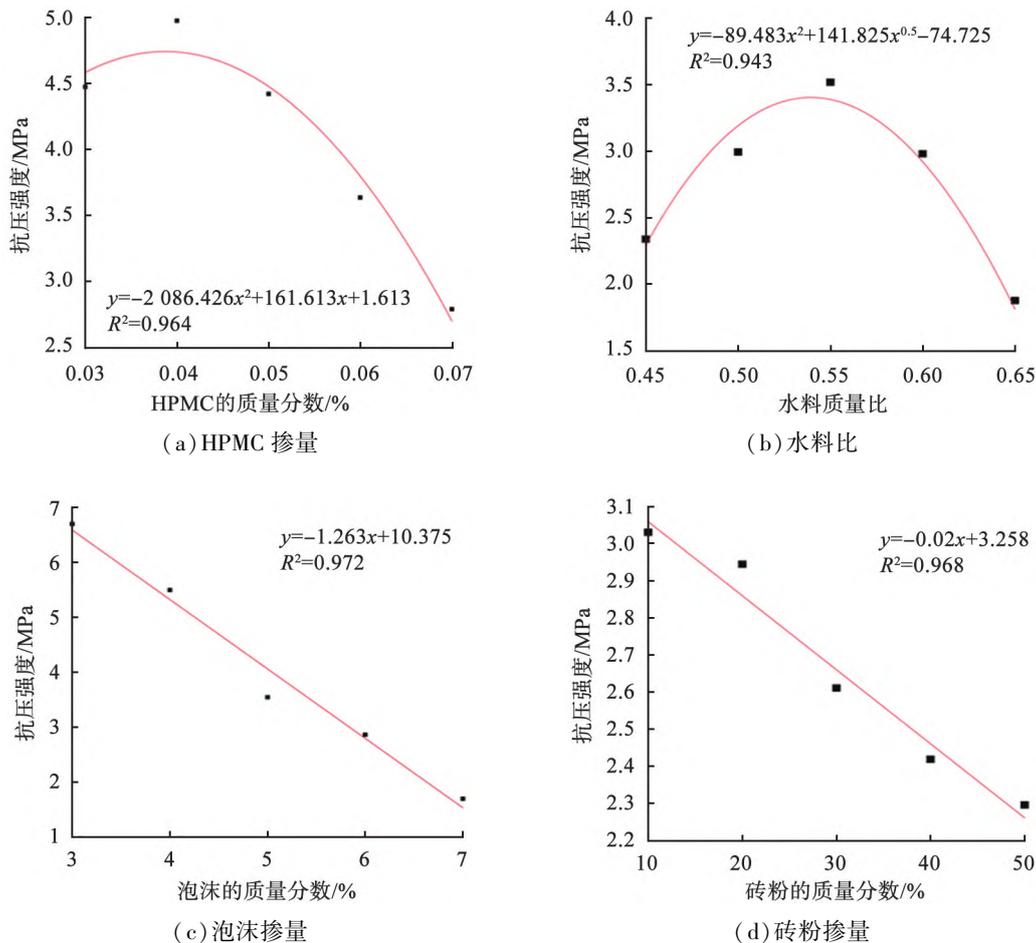


图 9 不同因素、水平与抗压强度的拟合效果图

Fig.9 Effect diagram of fitting of each factor level and compressive strength

由图 9(a)、(b) 可知, HPMC 掺量、水料比与抗压强度均呈现非线性关系, 非线性相关性公式分别为  $y = -2086.426x^2 + 161.613x + 1.613$ 、 $y = -89.483x^2 + 141.825\sqrt{x} - 74.725$ , 相关性系数分别为 0.964、0.943; 在图 9(c)、(d) 中泡沫、砖粉掺量与抗压强度均呈现线性关系, 线性相关性公式分别为  $y = -1.263x + 10.375$ 、 $y = -0.02x + 3.258$ , 相关性系数分别为 0.972、0.968, 且 4 种因素水平拟合的相关性系数均在 0.9 以上, 拟合精度较高, 拟合效果好。

## 3 结论

在实际施工过程中, 干湿循环交替现象是造成泡沫混凝土性能改变的主要因素之一, 同时在相同的干湿循环条件下, 不同配合比对泡沫混凝土性能的影响也是不同的。

1) HPMC、砖粉掺量的增加会使得泡沫混凝土的流动性降低, 而水料比和泡沫掺量的增加则使泡沫混凝土的流动性增强。通过极差分析, 得出干湿循环作用下对掺砖粉泡沫混凝土性能有影响的因素

从高到低依次为泡沫掺量、水料比、HPMC 掺量、砖粉掺量。

2) 普通条件下及干湿循环后最符合轻质高强要求的掺砖粉泡沫混凝土最优配合比均为泡沫、砖粉、HPMC 掺量分别为 3%、30%、0.05%, 水料比为 0.55。

3) 掺砖粉泡沫混凝土的抗压强度随着泡沫和砖粉掺量的增加均呈现下降趋势, 随着水料比和 HPMC 掺量的增加均呈现先上升后下降的趋势。

4) 在干湿循环过程中, 泡沫混凝土内部完整气孔在吸水和脱水时会出现类似于应力集中的现象, 导致泡沫混凝土产生微小裂缝, 原先密闭的孔洞变为有害孔洞, 甚至会产生贯穿裂缝, 在一定程度上降低了泡沫混凝土的强度, 因此当工作环境存在干湿循环条件且对强度无太大要求时, 比如作为路基及桥梁的填充材料, 泡沫混凝土可以满足要求。

### 参考文献 (References):

- [1] 李秋义, 全洪珠, 秦原. 混凝土再生骨料[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 171.  
LI Q Y, QUAN H Z, QIN Y. Concrete recycled aggregate[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011: 171.
- [2] 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.  
ZHANG X M, HUANG P Z, CUI Q Y. Research on the performance of micro-powder foam concrete recycled from construction waste [J]. Concrete and Cement Products, 2020(5): 96-98.
- [3] 郭峻骅, 闫亚杰. 大掺量粉煤灰微珠泡沫混凝土试验研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(1): 79-81.  
GUO J Y, YAN Y J. Experimental study on microbeads foamed concrete with large amount of fly ash[J]. New Building Materials, 2019, 46(1): 79-81.
- [4] 林在健. 复掺粉煤灰矿渣对岩溶空洞泡沫混凝土性能影响研究[J]. 广东建材, 2021, 37(12): 4-6.  
LIN Z J. Study on the influence of fly ash slag on the performance of karst cavity foamed concrete[J]. Guangdong Building Materials, 2021, 37(12): 4-6.
- [5] 金明山, 宋杨, 彭飞, 等. 粉煤灰泡沫混凝土抗冻性能研究[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(7): 94-98.  
JIN M S, SONG Y, PENG F, et al. Research on frost resistance of fly ash foamed concrete [J]. Water Science, Technology and Economy, 2022, 28(7): 94-98.
- [6] 林国忠. 粉煤灰及化学激发剂制备泡沫混凝土的试验研究[J]. 福建建筑, 2022(2): 67-70.  
LIN G Z. Experimental study on preparation of foamed concrete with fly ash and chemical activator [J]. Fujian Construction, 2022(2): 67-70.
- [7] 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.  
ZHANG S, LI R Y, DONG X, et al. Preparation of foamed concrete with recycled micro powder instead of cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(9): 2948-2953.
- [8] PASUPATHY K, RAMAKRISHNAN S, SANJAYAN J. Influence of recycled concrete aggregate on the foam stability of aerated geopolymer concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 271: 121850.
- [9] 薛翠真, 朱翔琛, 乔宏霞. 建筑垃圾砖粉颗粒特征与砂浆强度灰熵分析[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(6): 992-997.  
XUE C Z, ZHU X C, QIAO H X. Particle characteristics of brick powder and ash entropy analysis of mortar strength[J]. Chinese Journal of Materials Science and Engineering, 2022, 40(6): 992-997.
- [10] CHANDNI T J, ANAND K B. Utilization of recycled waste as filler in foam concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 19: 154-160.
- [11] SOON C N, KAW S L. Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete panel[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(12): 2452-2456.
- [12] BENAZZOUK A, DOUZANE O, MEZREB K, et al. Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: experimental study and modelling[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(4): 573-579.
- [13] ZAHER M Y, RAVINESH C D, AMEER H. Predicting compressive strength of lightweight foamed concrete using extreme learning machine model[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 115: 112-125.
- [14] 邵家虎, 高建明, 赵亚松. 再生黏土砖粉水泥胶凝体系的特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 375-379.

- SHAO J H, GAO J M, ZHAO Y S. Characteristics of cement cementitious system of recycled clay brick powder[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2019, 49(2): 375-379.
- [15] 吴小流. 轻质泡沫混凝土在高陡填方路基中的应用研究[J]. 西部交通科技, 2022(10): 91-92, 153.  
WU X L. Research on the application of lightweight foam concrete in high and steep fill subgrade[J]. Western Transportation Science and Technology, 2022(10): 91-92, 153.
- [16] 李应权, 朱立德, 李菊丽, 等. 泡沫混凝土配合比的设计[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2011, 26(2): 1-5.  
LI Y Q, ZHU L D, LI J L, et al. Design of mix ratio of foam concrete[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Science Edition), 2011, 26(2): 1-5.
- [17] 蒋冬青. 泡沫混凝土应用新进展[J]. 中国水泥, 2003(3): 46-48.  
JIANG D Q. New progress in the application of foam concrete[J]. China Cement, 2003(3): 46-48.
- [18] 李龙珠, 唐惠东, 孙媛媛. 利用正交试验法研究泡沫混凝土制备工艺对其强度的影响[J]. 混凝土, 2010(8): 23-24.  
LI L Z, TANG H D, SUN Y Y. Study on the influence of foam concrete preparation process on strength by orthogonal experimental method[J]. Concrete, 2010(8): 23-24.
- [19] 马永炯, 杨安, 洪芬, 等. 基于正交试验的泡沫混凝土配合比设计[J]. 混凝土, 2021(7): 147-150.  
MA Y J, YANG A, HONG F, et al. Mix design of foamed concrete based on orthogonal test[J]. Concrete, 2021(7): 147-150.
- [20] 高允彦. 正交及回归试验设计方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.  
G Y Y. Orthogonal and regression test design method[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988.
- [21] 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, 2019, 43(3): 363-366.  
HU Y L, HAO J G, ZHAO X M, et al. Study on the relationship between performance and pore structure of foamed lightweight concrete[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(3): 363-366.
- [22] 李方贤, 余其俊, 罗云峰, 等. 泡沫混凝土气孔结构数学表征及其分析[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(6): 1205-1210.  
LI F X, YU Q J, LUO Y F, et al. Mathematical characterization and analysis of pore structure of foamed concrete[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(6): 1205-1210.
- [23] 吴博, 赵法锁, 吴韶艳. 基于组合赋权-功效系数法的黄土边坡稳定性评价[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 34-38.  
WU B, ZHAO F S, WU S Y. Stability evaluation of loess slope based on combined weighting and efficiency coefficient method[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(2): 34-38.

(责任编辑:赵雁)