

引用本文:霍俊芳,慈天义,郝负洪,等.集料增强粉煤灰泡沫混凝土性能试验研究与模型预测[J].建筑科学与工程学报,2023,40(4):33-40.  
HUO Junfang, CI Tianyi, HAO Yunhong, et al. Experimental study and model prediction on performance of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(4): 33-40.

DOI:10.19815/j.jace.2021.11072

# 集料增强粉煤灰泡沫混凝土性能试验研究与模型预测

霍俊芳<sup>1,2</sup>, 慈天义<sup>1</sup>, 郝负洪<sup>1,2,3</sup>, 孙浩<sup>1</sup>, 邬卓轩<sup>1</sup>, 查克乐汗<sup>1</sup>

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051;

3. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区建筑检测鉴定与安全评估工程技术研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:**研究了水胶比、砂胶比、粉煤灰掺量、石英砂和石英粉质量比例对集料增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度和劈裂抗拉强度的影响,测试了不同砂胶比集料增强粉煤灰泡沫混凝土的孔结构和微观形貌;通过灰色理论分析了4种因素对集料增强粉煤灰泡沫混凝土强度的影响,对集料增强粉煤灰泡沫混凝土强度进行预测,并对预测的结果进行误差分析。结果表明:水胶比0.4、砂胶比0.8、粉煤灰掺量25%、石英粉与石英砂质量比例1:1时试件立方体抗压强度与劈裂抗拉强度较好;不同砂胶比的集料增强粉煤灰泡沫混凝土孔径分布范围为0.1~10  $\mu\text{m}$ ,砂胶比0.8的试件孔径分布范围较好,微观结构致密,微观形貌良好;4种因素对集料增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度的影响程度由大到小依次为砂胶比、石英粉与石英砂比例、水胶比、粉煤灰掺量;传统灰色理论模型与MGM灰色理论模型对预测立方体抗压强度与劈裂抗拉强度效果较好,模型精度均达到二级,试验结果和预测模型可以为集料增强粉煤灰泡沫混凝土的研究和应用提供参考。

**关键词:**粉煤灰;泡沫混凝土;立方体抗压强度;孔径分布;灰色理论

中图分类号: TU528.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)04-0033-08

## Experimental study and model prediction on performance of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete

HUO Junfang<sup>1,2</sup>, CI Tianyi<sup>1</sup>, HAO Yunhong<sup>1,2,3</sup>, SUN Hao<sup>1</sup>, WU Zhuoxuan<sup>1</sup>, CHA Kelehan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics of Inner Mongolia, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Research

Center of Structure Inspection, Appraisal and Safety Assessment, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** The effects of water binder ratio, sand binder ratio, fly ash content, quartz sand and quartz powder mass ratio on cubic compressive strength and splitting tensile strength of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete were studied. The pore structure and micro

收稿日期: 2021-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51468049, 11162011); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2018MS05047);  
内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0014); 内蒙古草原英才资助项目(107-841025);  
内蒙古高校青年科技英才支持计划项目(NJYT-17-A09)

作者简介: 霍俊芳(1971-), 女, 工学博士, 教授, E-mail: princess\_0@163.com.

通信作者: 慈天义(1996-), 男, 工学硕士研究生, E-mail: 906539557@qq.com.

morphology of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete with different sand binder ratios were tested. The influences of four factors on the strength of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete were analyzed through gray theory, the strength of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete was predicted, and the error of the prediction results was analyzed. The results show that when the water binder ratio is 0.4, sand binder ratio is 0.8, the content of fly ash is 25%, and the mass ratio of quartz powder to quartz sand is 1 : 1, the cubic compressive strength and splitting tensile strength of the test piece are better. The pore size distribution of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete with different sand binder ratios ranges from 0.1 to 10  $\mu\text{m}$ . The pore size distribution range of the specimen with a sand cement ratio of 0.8 is good, with a dense microstructure and good microstructure. The influence degree of four factors on cube compressive strength of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete from large to small is sand binder ratio, quartz powder and quartz sand ratio, water binder ratio and fly ash content. The traditional grey theory model and MGM grey theory model have good effects on predicting the cubic compressive strength and splitting tensile strength, and the model accuracy reaches the second level. The test results and prediction model can provide reference for the research and application of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete.

**Key words:** fly ash; foamed concrete; cubic compressive strength; pore size distribution; grey theory

## 0 引言

中国大宗固体废弃物面临产生强度高、利用不充分、综合利用产品附加值低的严峻挑战<sup>[1]</sup>。目前,大宗固废累计堆存量约  $600 \times 10^8 \text{ t}$ , 年新增堆存量近  $30 \times 10^8 \text{ t}$ , 而利用率只有 30% 左右, 为提高大宗固废资源化利用, 促进实现碳达峰、碳中和目标, 需研究新型节能环保、功能多样化的绿色建筑材料<sup>[2]</sup>。

泡沫混凝土的多孔结构导致其面临强度较低、易开裂、孔隙率不均匀等问题, 极大地影响了泡沫混凝土的应用与发展<sup>[3]</sup>。目前泡沫混凝土仍然多应用于隔热墙板、地面保温等领域。学者们对影响泡沫混凝土强度的主要因素开展了许多研究, 发现泡沫混凝土强度与密度、孔隙率、发泡剂、骨料、掺合料、水灰比以及纤维掺量与种类密切相关<sup>[4]</sup>。在提升泡沫混凝土强度方面, 目前研究主要集中在 4 个方面: 一是改变其发泡方式, 改变泡沫混凝土内部孔结构和孔径分布<sup>[5]</sup>; 二是掺入矿粉、硅灰、粉煤灰、玻化微珠等活性粉末, 产生微集料效应, 促进水泥水化反应<sup>[6]</sup>; 三是加入高效减水剂、早强剂等外加剂, 改变泡沫混凝土的水灰比与凝结硬化时间等<sup>[7]</sup>; 四是采用高温蒸压等养护制备, 改变泡沫混凝土后期养护条件<sup>[8-9]</sup>, 快速提高水泥水化程度。灰色系统理论是一种贫数据处理方法<sup>[10-11]</sup>, 在有限的信息情况下对系统演化规律、数据内部变化趋势进行准确预

判。灰色理论在混凝土领域的应用以单变量灰色模型预测最为普遍<sup>[12]</sup>, 而运用多变量灰色模型预测集料增强粉煤灰泡沫混凝土强度的研究较少<sup>[13]</sup>。

本文针对提高泡沫混凝土的立方体抗压强度与劈裂抗拉强度, 研究了水胶比、砂胶比、粉煤灰掺量和石英粉与石英砂比例对泡沫混凝土强度的影响, 观察其孔径分布与微观形貌, 用灰色理论分析各因素对泡沫混凝土强度的影响, 并对其立方体抗压强度与劈裂抗拉强度进行预测。

## 1 试验

### 1.1 原材料

石英砂: 40~70 目, 粒径范围为 0.25~0.45 mm。石英粉: 200~400 目, 粒径范围为 0.037~0.075 mm。天然河砂: 表观密度  $2\,558.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 细度模数 2.42, 含水率 4.2%, 含泥量 2.3%。水泥: P. O42.5 冀东普通硅酸盐水泥, 其化学成分及物理性能见表 1。粉煤灰的化学成分及物理性能见表 2。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 基本力学性能测试

集料增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度与劈裂抗拉强度测试方法依据行业标准《泡沫混凝土应用技术规程》(JTJ/T 341—2014) 中规定的测试方法进行, 试件尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 制作完成后按标准养护至 28 d 龄期, 采用 600

表 1 水泥的化学成分及物理性能

Table 1 Chemical composition and physical properties of cement

CaO 质量 分数/%	SiO <sub>2</sub> 质量 分数/%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 质量 分数/%	FeO <sub>3</sub> 质量 分数/%	MgO 质量 分数/%	SO <sub>3</sub> 质量 分数/%	初凝时间/ min	终凝时间/ min	立方体抗压强度/ MPa	立方体劈裂抗拉 强度/MPa
63.35	22.15	4.75	3.58	1.38	2.48	161	280	56.3	7.6

表 2 粉煤灰的化学成分及物理性能

Table 2 Chemical composition and physical properties of fly ash

细度(45 μm 方筛)/%	需水量比/%	烧失量/%	SO <sub>3</sub> 质量分数/%	含水量/%	CaO 质量分数/%
≤30	≤105	≤8	≤3	≤1	≤10

kN 万能试验机进行立方体抗压强度与劈裂抗拉强度测试。

1.2.2 微观结构测试

采用 MesoMR 型核磁共振分析系统测定集料增强粉煤灰泡沫混凝土的孔隙特征,试件尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm,测试集料增强粉煤灰泡沫混凝土孔径分布。采用 HITACHI S3400N 型扫描电

子显微镜(SEM),测试集料增强粉煤灰泡沫混凝土水化产物微观形貌,试件尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm。

2 结果与讨论

集料增强粉煤灰泡沫混凝土干密度、立方体抗压强度和劈裂抗拉强度测试结果见表 3。

表 3 集料增强粉煤灰泡沫混凝土试验结果

Table 3 Test results of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete

水胶比	砂胶比	粉煤灰掺量/%	石英粉与石英砂比例	干密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	立方体抗压强度/MPa	立方体劈裂抗拉强度/MPa
0.32	0.60	20	1.00	1 002	7.33	0.83
0.32	0.70	25	1.20	1 103	9.78	0.89
0.32	0.80	30	1.50	1 142	10.13	1.29
0.32	0.90	30	1.50	1 055	9.07	1.53
0.36	0.70	30	1.50	1 205	10.43	1.28
0.36	0.60	30	1.00	1 214	10.90	1.29
0.36	0.80	20	1.20	1 180	11.57	1.65
0.36	0.90	20	1.20	1 105	9.68	1.08
0.40	0.80	25	1.00	1 305	20.17	2.23
0.40	0.70	25	1.00	1 289	18.73	2.16
0.40	0.60	25	1.00	1 205	12.80	1.72
0.40	0.90	30	1.20	1 247	12.36	1.59
0.44	0.90	30	1.50	1 069	11.70	1.34
0.44	0.80	25	1.20	1 211	13.20	1.89
0.44	0.70	20	1.50	1 120	11.90	1.41
0.44	0.60	20	1.20	1 134	12.50	1.57

根据表 3 可知本试验较优的立方体抗压强度与劈裂抗拉强度的配合比为:水胶比 0.4,砂胶比 0.8,粉煤灰掺量 25%,石英粉与石英砂的比例为 1:1。《泡沫混凝土应用技术规程》(JTJ/T 341—2014)规定密度 1 200 kg·m<sup>-3</sup>的集料增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度范围为 4.5~6.0 MPa,本试验中集料增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度最大超出 236.2%。

2.1 基本力学性能分析

图 1 为不同水胶比、砂胶比、粉煤灰掺量、石英粉与石英砂比例下集料增强粉煤灰泡沫混凝土的立

方体抗压强度和劈裂抗拉强度。

2.1.1 水胶比

由图 1(a)可知:随着水胶比增大,立方体抗压强度与劈裂抗拉强度先增大后减小。水胶比为 0.4 时,集料增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度达到 20.17 MPa。当水胶比高于 0.4 时,两种强度都降低。这是因为集料增强粉煤灰泡沫混凝土中胶凝材料水化反应不完全,会吸收周围泡沫中水分,造成集料增强粉煤灰泡沫混凝土初期泡沫破裂或泡沫分布不均匀,减少了完整气孔的数量,导致集料增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度降低;当水胶比逐

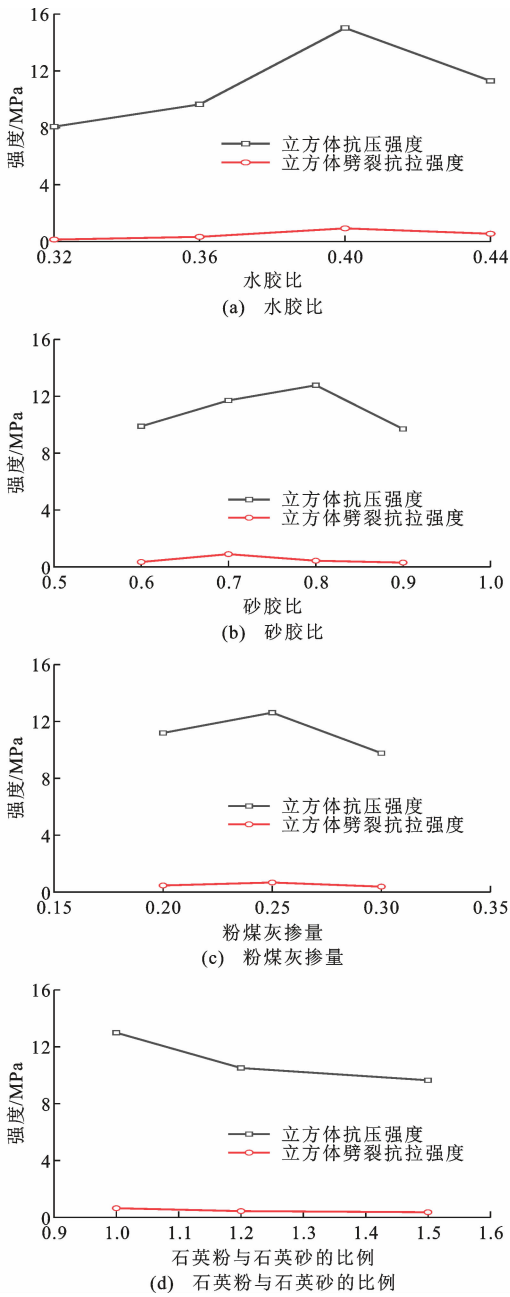


图1 各因素影响下的泡沫混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度

Fig. 1 Compressive strength and splitting tensile strength of foamed concrete under influence of various factors

渐升高时,浆体的流动性增加,气泡在混凝土中分布均匀,有利于强度的提高;当水胶比超过 0.4 时,集料增强粉煤灰泡沫混凝土出现泌水现象,产生大气泡,造成易损点,导致强度降低。

2.1.2 砂胶比

由图 1(b)可知:砂胶比 0.8 时的立方体抗压强度比砂胶比 0.6 时提升了 25.9%,劈裂抗拉强度提升了 6.7%。原因是砂胶比提高时,降低了混凝土的流动性,影响了内部的均质性。集料增强粉煤灰泡沫混凝土是一种非均匀的多孔体,其内部的均质

性主要由浆体与骨料的差异性导致,调整好砂胶比、石英粉与石英砂的比例是平衡浆体与骨料两相差异的关键,减少混凝土内部缺陷,提高均质性,可以改善泡沫混凝土的力学性能。

2.1.3 粉煤灰掺量

由图 1(c)可知:随着粉煤灰掺量增大,立方体抗压强度与劈裂抗拉强度先增大后减小,粉煤灰掺量 25% 为较优掺量。粉煤灰掺量较低时,浆体固化的前期集料增强粉煤灰泡沫混凝土的塑性较大,加之气泡不断产生,表面张力较大,导致气泡分布不均,因粉煤灰自身为球形,在浆体中产生一定的滚珠效应,可以促使气泡分布均匀,强度提高。粉煤灰的微集料填充效应有利于水泥之间的级配;粉煤灰的火山灰效应促进水泥水化反应。粉煤灰掺量过高时,会导致集料增强粉煤灰泡沫混凝土前期凝结时间加长,后期强度降低。

2.1.4 石英粉与石英砂比例

由图 1(d)可知:石英粉与石英砂比例为 1:1 时,集料增强粉煤灰泡沫混凝土的级配最好,强度提升明显。石英粉掺量的增加可以增加微集料填充效应与火山灰反应,同时过高的掺量降低了集料增强粉煤灰泡沫混凝土的流动性能,导致基体内部泡沫分布不均匀,强度降低。由于石英砂的憎水性,在集料增强粉煤灰泡沫混凝土中加入石英砂可提升浆体的流动性,促进内部泡沫分布均匀,从而提升集料增强粉煤灰泡沫混凝土的力学性能。

2.2 微观及孔结构分析

2.2.1 集料增强粉煤灰泡沫混凝土孔结构分析

通过各因素与立方体抗压强度的关联性分析可知,砂胶比对集料增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度影响较大,研究不同砂胶比集料增强粉煤灰泡沫混凝土的孔径  $r$  分布,结果如图 2 所示。

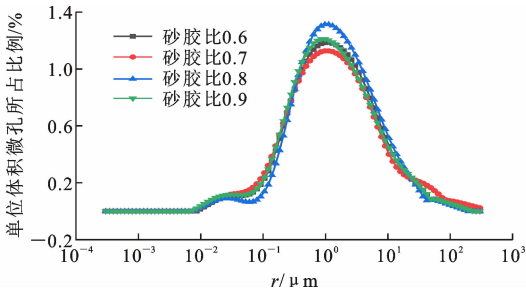


图2 集料增强粉煤灰泡沫混凝土孔径分布

Fig. 2 Pore size distribution of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete

由图 2 可知:集料增强粉煤灰泡沫混凝土的孔径主要分布在 0.1~10  $\mu\text{m}$  之间,分布范围较小,相

比于普通泡沫混凝土孔径范围 100~500 mm,集料增强粉煤灰泡沫混凝土小孔数量明显增多,且孔径分布范围更小。砂胶比 0.8 的试件孔径分布范围最小,导致成型集料增强粉煤灰泡沫混凝土畸形孔和连通孔数量越少,孔径分布越均匀,改善了集料增强粉煤灰泡沫混凝土的力学性能。

2.2.2 微观形貌分析

利用 HITACHI S3400N 型扫描电子显微镜观察随着砂胶比增大,集料增强粉煤灰泡沫混凝土的微观形貌,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,集料增强粉煤灰泡沫混凝土拥有良好的结晶度,微晶质之间彼此交叉和连生。同时可观察到随着砂胶比增大,聚集成簇的针棒状钙矾石晶体、层板状或六角板状的氢氧化钙晶体及云状、颗粒状、网状 C—S—H 凝胶不断增多,不同的水化产物之间形成了具有结构支撑能力的硬化体系,且球状的粉煤灰与基体胶凝材料胶结较好,致密的微观结构能改善集料增强粉煤灰泡沫混凝土的宏观力学性能。当砂胶比增大到 0.9 时,集料增强粉煤灰泡沫混凝土中自由水减少,导致氢氧化钙晶体发育速度降低,试件结构疏松且存在少许裂缝,强度下降。

3 模型预测

3.1 各因素与立方体抗压强度的关联性分析

绝对关联度代表数据的接近性,相对关联度代表数据的相似性,而灰色综合关联度结合了上述两种关联度各自的优势,在考察接近性的基础上还会考察各数据序列相对于始点变化速率的相似性。采用灰色综合关联度分析集料增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度与水胶比、砂胶比、粉煤灰掺量、石英粉与石英砂比例的相关性。

综合关联度计算公式为

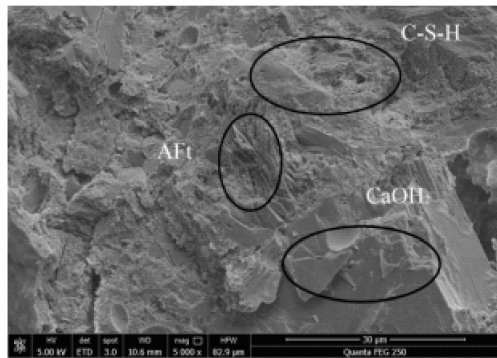
$$\rho_{oi} = \theta \epsilon_{oi} + (1 - \theta) \gamma_{oi} \quad (1)$$

式中: $\rho_{oi}$ 为综合关联度; $\epsilon_{oi}$ 为绝对关联度; $\gamma_{oi}$ 为相对关联度; $\theta$ 为常数,一般取为 0.5,表明对数据的接近性和数据的相似性重视程度相同。

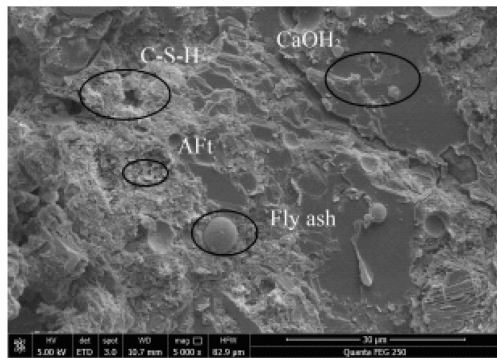
图 4 为各因素与立方体抗压强度灰色综合关联度。由图 4 可知,所得关联度由高到低依次为砂胶比、石英粉与石英砂的比例、水胶比、粉煤灰掺量,砂胶比的灰色综合关联度最高,因此砂胶比是对集料增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度的较大影响因素。



(a) 砂胶比0.6



(b) 砂胶比0.7



(c) 砂胶比0.8



(d) 砂胶比0.9

图 3 集料增强粉煤灰泡沫混凝土 SEM 照片

Fig. 3 SEM photos of aggregate-reinforced fly ash foamed concrete

3.2 灰色模型模拟及预测

灰色理论基于“小样本,贫数据”,通过不确定性数据选取有价值信息,从系统内部结构及参数去研

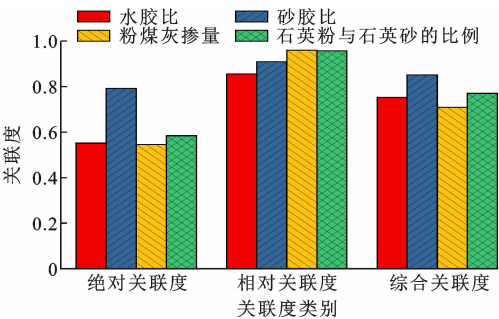


图 4 各因素与立方体抗压强度灰色综合关联度

Fig. 4 Grey comprehensive correlation degree between all factors and compressive strength

究系统<sup>[11]</sup>。已知集料增强粉煤灰泡沫混凝土的立方体抗压强度与劈裂抗拉强度数据较少,未知因素与水平的集料增强粉煤灰泡沫混凝土强度具有不确定性,因此选用 GM(1,N)模型[式(2)]。从式(2)可以看出:发展系数  $a$  和驱动系数  $b_i$  为模型准确的关键因素,GM(1,N)模型加入灰作用量  $u$  和延缓算子  $\omega$ ,对模型进行优化,得到 MGM(1,N)模型[式(3)]。本文集料增强粉煤灰泡沫混凝土有 4 个因素变量,采用 MGM(1,5)模型与 GM(1,5)模型的模拟数据进行集料增强粉煤灰泡沫混凝土强度预测,选取更为适当的灰色预测模型<sup>[14-15]</sup>,集料增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度、劈裂抗拉强度的预测结果与试件强度的对比如图 5 所示。

传统 GM(1,N)模型<sup>[16]</sup>:

$$X_1^{(0)}(k) + aZ_1^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^N b_i X_j^{(1)}(k) \quad (2)$$

MGM(1,N)模型:

$$X_1^{(0)}(k) + aZ_1^{(1)}(k) = \sum_{j=2}^N b_j \omega X_j^{(1)}(k) + u \quad (3)$$

式中: $X$  为原始数据序列; $k$  为原始数列编号; $Z$  为紧邻均值生成数列。

第一组偏离试验数据 85% 以上,因此舍弃不用。由图 5 可知,GM(1,5)模型与 MGM(1,5)模型对集料增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度与劈裂抗拉强度均表现出很好的接近性。由于 GM(1,N)模型加入灰色作用量  $u$  和延缓算子  $\omega$ <sup>[17]</sup>,对模型进行优化,导致数据序列中初始迭代基值有一定影响,数据波动更小,累减还原求特征变量拟合值与预测值更加准确。GM(1,5)模型与 MGM(1,5)模型对立方体抗压强度与劈裂抗拉强度具有较高的预测精度与可靠性。

3.3 模型误差分析

通过 GM(1,5)模型与 MGM(1,5)模型对集料

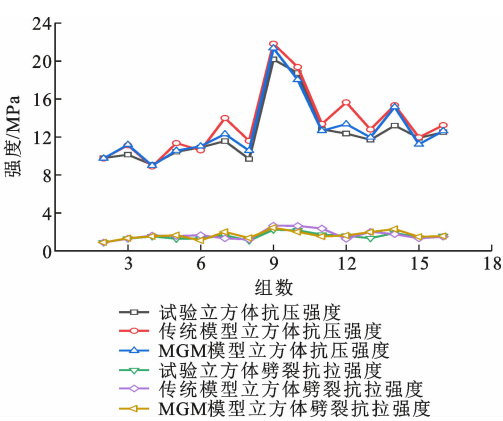


图 5 GM(1,5)模型与 MGM(1,5)模型验证结果

Fig. 5 Verification results of GM(1,5) model and MGM(1,5) model

增强粉煤灰泡沫混凝土立方体抗压强度和劈裂抗拉强度与试件强度做相对误差分析,进行模型精度检验。

对于灰色理论模型误差分析主要包括残差检验、关联度检验、后验差比 3 个方面<sup>[18]</sup>,判断模型的精度等级如表 4 所示。对于残差检验,本文多变量灰色模型立方体抗压强度预测平均相对误差为 8.57%与 6.36%,劈裂抗拉强度预测相对误差为 9.42%与 8.29%,均满足多变量灰色预测模型相对误差小于 15%的要求<sup>[19]</sup>,且精度达到二级;对于关联度检验,试验值序列与模型预测值的关联度均大于 0.7,模型精度达到二级;对于后验差比,试验数据方差、拟合残差数据方差、后检验差比值均满足一级模型精度要求<sup>[20]</sup>。图 6 为 GM(1,5)模型与 MGM(1,5)模型误差。由图 6 可知,MGM(1,5)模型所得的强度预测结果相对误差较小,对立方体抗压强度与劈裂抗拉强度有更高的预测精度与可信度,各指标均满足模型精度要求,可应用于数据预测及相关试验参考。

表 4 灰色模型判断标准

Table 4 Judgment criteria of grey model			
精度等级	残差检验值	关联度	后检验差比值
一级	0.01	0.90	0.35
二级	0.05	0.80	0.50
三级	0.10	0.70	0.65
四级	0.20	0.60	0.80

4 结 语

(1)当水胶比为 0.4,砂胶比为 0.8,粉煤灰掺量为 25%,石英粉与石英砂比例为 1:1 时可配置出力学性能较优的集料增强粉煤灰泡沫混凝土,立方



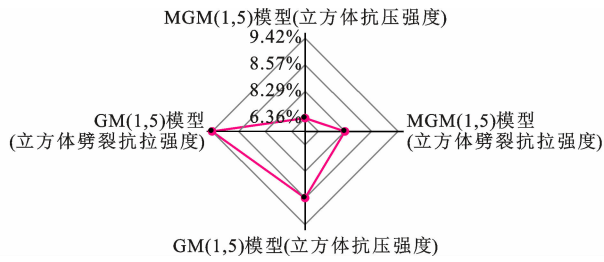


图6 GM(1,5)模型与 MGM(1,5)模型误差

Fig. 6 Error between GM(1,5) model and MGM(1,5) model

体抗压强度超出普通泡沫混凝土的 236.2%。

(2)砂胶比 0.8 的集料增强粉煤灰泡沫混凝土孔径分布范围小,拥有良好的微观形貌。

(3)通过灰色理论得到各因素对立方体抗压强度的影响由大到小依次为砂胶比、石英粉与石英砂比例、水胶比、粉煤灰掺量;MGM(1,5)模型精度检验分析可知多变量灰色优化模型具有更高的预测精度和数据可靠性。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见[R]. 北京: 中华人民共和国国家发展改革委员会, 2021.  
National Development and Reform Commission. Guidance on comprehensive utilization of bulk solid wastes in the 14th five year plan[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2021.
- [2] 陈立延, 杨安, 洪芬, 等. 不同粉煤灰掺量对泡沫混凝土性能及其孔径的影响[J]. 混凝土, 2021(8): 137-140.  
CHEN Liyan, YANG An, HONG Fen, et al. Influence of different fly ash content on the performance and pore size of foamed concrete[J]. Concrete, 2021(8): 137-140.
- [3] 吴子豪, 王武祥, 刘广东, 等. EPS 颗粒对超轻水泥基复合保温材料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2527-2533.  
WU Zihao, WANG Wuxiang, LIU Guangdong, et al. Effects of EPS particles on properties of ultra-light cement-based composite thermal insulation materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(8): 2527-2533.
- [4] 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.

- [5] 荣辉, 张静, 张颖, 等. 微生物发泡剂发泡机制及在泡沫混凝土中的应用[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 419-426.  
RONG Hui, ZHANG Jing, ZHANG Ying, et al. Foaming mechanism of microbial foaming agent and its application in foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2): 419-426.
- [6] MAYHOUB O A, NASR E S A R, ALI Y A, et al. The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: a review[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(1): 145-158.
- [7] 魏向明, 董超, 冯竟竟, 等. 双掺粉煤灰矿渣泡沫混凝土性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(7): 63-66.  
WEI Xiangming, DONG Chao, FENG Jingjing, et al. Experimental study on properties of foamed concrete mixed with fly ash and slag[J]. China Concrete and Cement Products, 2019(7): 63-66.
- [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 Review, 2018, 32(12): 2096-2099.
- [9] 弓中伟, 王颖. 氧化石墨烯掺量及分散性对泡沫混凝土性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(2): 146-149.  
GONG Zhongwei, WANG Ying. Effect of graphene oxide content and its dispersion on properties of foam concrete[J]. New Building Materials, 2021, 48(2): 146-149.
- [10] 曾亮. 改进的灰色多变量 GM(1, N) 模型及其应用[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(9): 68-76.  
ZENG Liang. An improved grey multivariable GM(1, N) model and its application[J]. Journal of Southwest University (Natural Science: Edition), 2019, 41(9): 68-76.
- [11] BATOOL F, RAFI M M, BINDIGANAVILE V. Microstructure and thermal conductivity of cement-based foam: a review[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 20: 696-704.
- [12] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 7版. 北京: 科学出版社, 2014.  
LIU Sifeng, YANG Yingjie, WU Lifeng, et al. Grey

system theory and its application[M]. 7th ed. Beijing: Science Press, 2014.

[13] 张含瑞. 多变量灰色优化模型在山东省粮食产量预测中的应用[D]. 烟台: 鲁东大学, 2018.

ZHANG Hanrui. Application of multivariate grey optimization model for the forecasting grain production of Shandong province[D]. Yantai: Ludong University, 2018.

[14] 李 佳, 刘 清, 邓培元, 等. 基于灰色理论掺风积沙自密实混凝土强度分析与预测[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(3): 361-376.

LI Jia, LIU Qing, DENG Beiyuan, et al. Strength analysis and prediction of self-compacting concrete based on grey theory[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(3): 361-376.

[15] CHUNG S Y, ABD ELRAHMAN M, KIM J S, et al. Comparison of lightweight aggregate and foamed concrete with the same density level using image-based characterizations[J]. Construction and Building Materials, 2019, 211: 988-999.

[16] 周学军, 咸国栋, 王 振, 等. 高强度低导热泡沫混凝土性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(4): 1186-1192.

ZHOU Xuejun, XIAN Guodong, WANG Zhen, et al. Performance of high strength and low thermal conductivity foamed concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(4): 1186-1192.

[17] NG S, JELLE B P, SANDBERG L I C, et al. Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 77: 307-316.

[18] BUBENIK J, ZACH J. The use of foam glass based aggregates for the production of ultra-lightweight porous concrete for the production of noise barrier wall panels [J]. Transportation Research Procedia, 2019, 40: 639-646.

[19] 陈 兵, 胡华洁, 刘 宁. 生土泡沫混凝土试验研究[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 1-6.

CHEN Bing, HU Huajie, LIU Ning. Experimental research on immature soil-based foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 1-6.

[20] 张 旭, 王武祥, 杨鼎宜, 等. 超轻泡沫混凝土孔结构调控措施研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2255-2259, 2267.

ZHANG Xu, WANG Wuxiang, YANG Dingyi, et al. Study on control measures of pore structure of ultra light foam concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7): 2255-2259, 2267.