

李彦苍, 宁钰, 石华旺, 等. 基于响应曲面法的水库底泥泡沫混凝土配合比优化研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(4): 211-224. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.017

LI Yancang, NING Yu, SHI Huawang, et al. Optimization of mix ratio of reservoir sediment foamed concrete based on response surface method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(4): 211-224. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.017

基于响应曲面法的水库底泥泡沫混凝土配合比优化研究

李彦苍^{1,2}, 宁钰¹, 石华旺¹, 冯胜雷¹, 张晓雄¹, 张春元³, 于锐源¹,
朱骥², 靳子栋⁴, 乔威涛⁴

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北地质大学 土地科学与空间规划学院, 河北 石家庄 050031; 3. 广东理工学院 建设学院, 广东 肇庆 526100;
4. 冀中能源峰峰集团有限公司, 河北 邯郸 056017)

摘要:【目的】为了提高水库底泥的高值化利用率, 拟使用水库底泥来制备泡沫混凝土, 以水胶比、底泥掺量、泡沫掺量为变量【方法】采用 Design-Expert 13.0 软件中响应曲面法对水库底泥泡沫混凝土的配合比进行优化设计, 分析变量对水库底泥泡沫混凝土抗压强度和导热系数的影响。采用 SEM 和 XRD 探究了底泥泡沫混凝土微观结构。【结果】研究结果显示, 对水库底泥泡沫混凝土 28 d 抗压强度影响顺序为: 水胶比>泡沫掺量>底泥掺量, 而导热系数的影响顺序为: 水胶比>底泥掺量>泡沫掺量。随着水胶比增加, 抗压强度先升高后下降, 导热系数逐渐降低。增加泡沫和底泥掺量会导致抗压强度和导热系数均下降。孔隙率与导热系数呈现负相关, 符合指数模型。【结论】经优化配比, 水库底泥泡沫混凝土在水胶比 0.4、底泥掺量 30%、泡沫掺量 4.2% 条件下制备, 其 28 d 抗压强度为 18.19 MPa, 导热系数为 0.121 4W/(m·K), 表观密度为 701.2 kg/m³。微观结果分析表明, 底泥掺入量为 30% 条件下, 试块内部物相结合紧密, 孔隙分布均匀。研究成果为水库底泥在建筑材料领域的利用提供了新途径。

关键词: 水库底泥; 泡沫混凝土; 响应曲面法; 抗压强度; 导热系数; 影响因素; 水胶比; SEM 图

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.017

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)04-0211-14



Optimization of mix ratio of reservoir sediment foamed concrete based on response surface method

LI Yancang^{1,2}, NING Yu¹, SHI Huawang¹, FENG Shenglei¹, ZHANG Xiaoxiong¹, ZHANG Chunyuan³,
YU Kaiyuan¹, ZHU Ji², JIN Zidong⁴, QIAO Weitao⁴

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China; 2. School of Land

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-08-26; 录用日期: 2024-08-27; 网络出版日期: 2024-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278171); 河北省自然科学基金项目(E2020402079); 河北工程大学大学生创新创业训练计划项目(X202410076013)

作者简介: 李彦苍(1974—), 男, 教授, 博士, 从事固体废弃物资源化利用研究。E-mail: liyancang@hebeu.edu.cn

通信作者: 张晓雄(1991—), 男, 讲师, 博士, 从事固体废弃物资源化利用研究。E-mail: zhangxiaoxiong@hebeu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Science and Space Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 3. School of Construction, Guangdong Technology College, Zhaoqing 526100, Guangdong, China; 4. Jizhong Energy Fengfeng Group Co., Ltd., Handan 056017, Hebei, China)

Abstract: [Objective] To improve the high-value utilization of reservoir sediment, reservoir sediment foamed concrete was prepared by taking the water binder ratio, reservoir sediment mixing amount and foam mixing amount as variables. [Methods] The response surface method in the Design-Expert 13.0 software was used to optimize the mix ratio design, analyze the effects of variables on the compressive strength and thermal conductivity of the reservoir sediment foamed concrete. SEM and XRD were used to explore the microstructure of the reservoir sediment foamed concrete. [Results] The results show that the influence of each factor on the 28 d compressive strength of reservoir sediment foamed concrete is in the following order: water binder ratio > foam content > reservoir sediment content, and the thermal conductivity is in the following order: water binder ratio > reservoir sediment content > foam content. With the increase of water binder ratio, the compressive strength increases at first and then decreases, and the thermal conductivity gradually decreases. Increasing foam and reservoir sediment mixing result in a decrease in both compressive strength and thermal conductivity. Porosity showed a negative correlation with thermal conductivity, consistent with an exponential model. [Conclusion] The optimal mix ratio of reservoir sediment foamed concrete is 0.4, 30% of reservoir sediment and 4.2% of foam content, and the 28 d compressive strength of the foamed concrete is 18.19 MPa, and the thermal conductivity is 0.1214 W/(m·K), apparent density is 701.2 kg/m³. The analysis of microscopic result showed that the internal material of the specimen was tightly bound and the pores were uniformly distributed under the condition that the amount of reservoir sediment was 30%. Reservoir sediment foamed concrete provide a new way for the use of reservoir sediment in the field of construction materials.

Keywords: reservoir sediment; foamed concrete; response surface method; compressive strength; thermal conductivity; influencing factors; water cement ratio; SEM image

0 引言

随着降雨引发的水土流失和工业化进程的加快,我国每年至少会产生 7 000 万 t 以上的水库底泥^[1]。水库底泥因含水量高和重金属含量多,若沉积过多会加剧水质恶化,对水中生物生存环境构成重大威胁。过厚的底泥也会影响水库的蓄洪能力,因此需定期疏浚水库。疏浚水库底泥的传统方式为海洋倾倒、吹填造陆以及卫生填埋等^[2],但是这些处理方式具有二次污染风险、较高的成本以及占用大面积土地等缺点^[3]。因此,如何对疏浚底泥进行减量化和无害化处理,实现底泥的大规模消纳和资源化利用^[4-5],是当前研究的重要课题。

国内外学者将底泥应用在土体固化、路基填方和新型建材三个方面^[6-9],不仅解决了疏浚底泥的处置问题,还为工程行业提供新型建筑材料。例如,雷颖等^[10]将灞河河道疏浚底泥用作滨河沙坑回填材料,结果显示,高分子吸水树脂掺入降低了固化底泥试样的抗剪强度,而三乙醇胺的加入明显增强了固化底泥的抗剪强度,选用 10%水泥与 0.3%三乙醇胺的配比方案对灞河底泥固化处理最佳。DENG 等^[11]提出一种创新固化方法,将水泥、膨润土和柑橘皮粉作为南

京黑臭河段底泥固化剂,通过响应曲面法确定胶凝材料的最佳配比为水泥 14.68 g/kg,膨润土 5.85 g/kg,柑橘皮粉 9.31 g/kg,平均抗压强度为 3.14 MPa,该研究证明膨润土和柑橘皮粉的吸附作用可以降低重金属的浓度并且在提高底泥强度和降低碱度方面有显著优势。JAMSAWANG 等^[8]将泰国水库疏浚底泥经过水泥和粉煤灰处理后用作道路材料,研究结果显示,当水泥含量为 5%,粉煤灰含量 10%时,复合材料的力学性能达到 3.6 MPa,满足泰国公路局标准。LYU 等^[12]将黄河底泥、赤泥与粒化高炉矿渣通过 90 °C 高温水浴养护制备出早期强度可达 86.7 MPa 的高强度地质聚合物胶凝材料,并进一步制备出 28 d 抗压强度达到 28.1 MPa 的多孔地质聚合物,平均总孔隙率达到 19.02%,满足透水性能的要求。

泡沫混凝土是一种利用发泡剂将气孔引入的轻质多孔建筑材料^[13],具有自重轻、流动性高、强度可调控等工程特性^[14-16],被广泛应用于隔震、墙体保温、路基填充等领域^[17]。将底泥作为泡沫混凝土的填料时,既能固定底泥中污染物,避免底泥中污染物的二次污染,又能利用底泥中的微孔结构提高混凝土保温隔热性能^[18],同时减少对河砂等矿物资源的需求,为泡沫混凝土的填料提供新的选择,是实现底泥

安全消纳的合理途径。当前, 泡沫混凝土被广泛用作框架结构的填充墙, 成为装配式住宅的一种新型墙体。然而, 尽管泡沫混凝土在轻质保温层方面表现出色, 但其强度通常不足, 而具有承重能力的泡沫混凝土又往往密度较大。这种现状限制了装配式住宅的高层化发展。因此, 研发一种既轻质又高强的泡沫混凝土芯材用于装配式框架结构住宅的填充墙是非常必要的。

目前, 利用水库底泥制备泡沫混凝土是高效化利用的方向之一。马小莉等^[19]通过对污水处理厂的剩余污泥进行改性处理, 发现污泥渣及污泥蛋白液不存在重金属及微生物污染风险, 可用于建材生产, 利用污泥蛋白发泡剂及4%污泥渣制备的泡沫混凝土28 d抗压强度超过了3.8 MPa, 但是使用污泥渣含量低, 不能大量消耗疏浚底泥。杨小云等^[18]对太湖底泥进行风干研磨处理后制备底泥泡沫混凝土, 当底泥掺量50%、泡沫掺量54%时, 可得到干密度850 kg/m³、导热系数0.2368 W/(m·K)的泡沫混凝土试块, 在此基础上用5%微硅粉取代水泥, 得到抗压强度4.65 MPa、导热系数0.2022 W/(m·K)的试块, 但该研究结果抗压强度较低且导热系数较高。YANG等^[20]提出了一种创新方法, 在加热和加压的情况下, 太湖底泥掺入量50%制备出抗压强度5 MPa、干密度850 kg/m³、导热系数0.198 W/(m·K)的生态友好型泡沫混凝土, 但该研究结果抗压强度较低, 未能得到广泛应用。

尽管国内外学者对底泥研究取得了一些进展, 但利用河道、湖泊疏浚底泥以及工业污泥制备的泡沫混凝土产品在抗压强度和导热系数方面仍有提升空间, 并且大多数研究仅关注单一因素, 忽视了因素之间的相互作用, 未能充分发挥材料性能的潜力。响应曲面设计方法^[21-23](Response Surface Methodology, RSM)是一种统计方法, 通过分析回归方程来寻求最优工艺参数, 特别适用于解决多变量问题。由于充分考虑了因素间的交互作用, RSM在多组分材料的配合比优化中表现出色。因此, 本研究提出了利用响应曲面法对多组分、多目标的水库底泥泡沫混凝土进行配合比优化。本文利用水库底泥替代部分水泥制备泡沫混凝土, 采用响应曲面法设计配合比, 研究水胶比、底泥

掺量、泡沫掺量对水库底泥泡沫混凝土抗压强度、导热系数的影响, 借助图像处理与分析软件^[24]研究水库底泥泡沫混凝土的孔结构与导热系数的关系, 采用XRD和SEM对试块微观组织形貌进行观察和分析, 以期得到水库底泥泡沫混凝土的最优配合比。

1 试验设计和测试方法

1.1 原材料

1.1.1 水库底泥

水库底泥来自河北省邯郸市磁县岳城水库, 颜色呈灰褐色, 用前对水库底泥进行脱水预处理, 105℃烘至恒重后过1.25 mm的方孔筛, 使用XRF(X射线荧光光谱)测其化学成分如表1所列, 主要化学成分为SiO₂、Al₂O₃和CaO。水库底泥XRD(X射线衍射仪)测试结果如图1所示, 水库底泥的主要矿物相为石英、白云母、钠长石、斜绿泥石和方解石等。

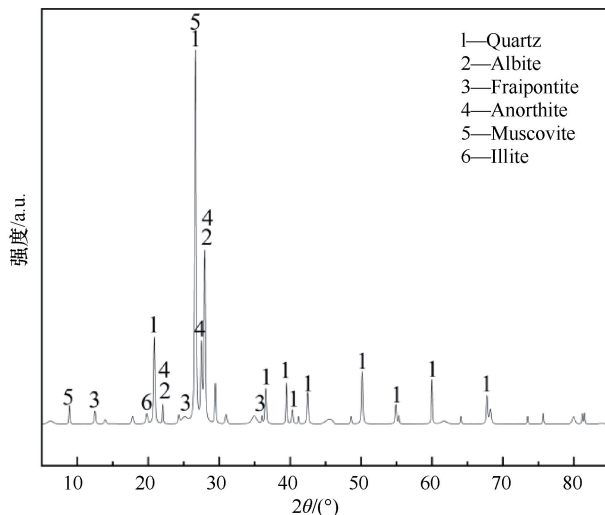


图1 水库底泥XRD谱图

Fig. 1 XRD pattern of reservoir sediment

1.1.2 水泥

水泥使用邯郸市金隅水泥有限公司生产的P.O 42.5水泥, 其主要化学成分如表1所列, 性能指标如表2所列。

1.1.3 发泡剂

发泡剂购自郑州市高斯化工建材有限公司生产的高效浓缩发泡剂, 性能指标如表3所列。

表1 水库底泥和水泥化学成分

Table 1 Chemical composition of reservoir sediment and cement

材料	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MnO	LOI
水库底泥	59.95	10.30	14.62	6.20	2.62	1.38	2.87	0.18	0.09	1.80
水泥	21.60	64.44	4.13	4.57	1.06	0.11	0.56	1.74	1.03	0.76

质量分数%

mass fraction%

表2 水泥的基本性能指标

Table 2 Basic performance index of cement

密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	抗压强度/ MPa		抗折强度/ MPa		凝结时间/ min	
		3 d	28 d	3 d	28 d	初凝	终凝
3.025	355	26.7	49.8	6.5	8.7	220	275

表3 发泡剂的性能参数

Table 3 Performance parameters of blowing agent

发泡倍数	pH值	稀释倍数	1 h 沉降距/ mm	1 h 泌水率/ $\%$
30~35	7.5	12.5	25	35

表4 因素水平

Table 4 Factors and levels

影响因素	代码	水平		
		-1	0	1
水胶比	X_1	0.38	0.4	0.42
底泥掺量/ $\%$	X_2	0	15	30
泡沫掺量/ $\%$	X_3	2.8	3.5	4.2

1.1.4 水

取用实验室自来水。

1.2 试验设计

使用 Design-Expert 软件(版本 13.0)响应曲面法中的 Box-Behnken Design(BBD)法对水库底泥泡沫混凝土进行配合比设计,在前期试验的基础上,确定底泥泡沫混凝土性能的主要影响因素为水胶比、底泥掺量、泡沫掺量,分别用 X_1 , X_2 和 X_3 表示。水胶比变化范围为 0.38~0.42,底泥掺量(底泥质量/胶凝材料总质量)为 0%~30%,泡沫掺量(泡沫质量/水泥浆质量)为 2.8%~4.2%。以底泥泡沫混凝土 28 d 抗压强度和导热系数作为响应值,分别用 Y_1 和 Y_2 表示。试验方案为三因素三水平,中心点为 5 个,共计 17 组,试验因素水平如表 4 所列。

1.3 样品制备

水库底泥泡沫混凝土试件制备流程如下:首先按照表 5 中的配合比,将水泥和底泥倒入搅拌机(JJ-5,无锡市建工试验仪器制造有限公司)中干拌 2 min,然后倒入水中继续搅拌 3 min 形成水泥浆。然后,将发泡剂与水按体积比 1:12.5 高速打发形成泡沫,称取相应质量的泡沫倒入水泥浆中搅拌 3 min,待稳定后,将泡沫混凝土拌合物倒入模具中成型,覆盖保鲜膜,室温养护 24 h 后脱模。最后,将试块移至标准养护室(温度 $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 $\geq 90\%$)中养护至 28 d,进行测试。试件制备流程如图 2 所示。

1.4 测试方法

依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)在水泥全自动抗折抗压一体机(DYE-300S,浙江英松仪器设备制造有限公司)测试抗压强度,试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times$

100 mm,每组 3 块试件,加荷速度为 0.2 MPa/s 。

表观密度测试方法依据《泡沫混凝土》(JG/T 266—2011)规范,将试块在温度为 $(60 \pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥箱内烘干至恒重后进行测试。

导热系数测试参考 Plastics Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity—Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method (ISO 22007-2:2015)中的瞬态平面热源法进行,使用 Hot Disk(TPS 2022,瑞典 Hot Disk 有限公司)仪器进行测试,测试前需要将试件烘干至恒重。

孔隙率测定采用相机对试件截面进行图像采集,

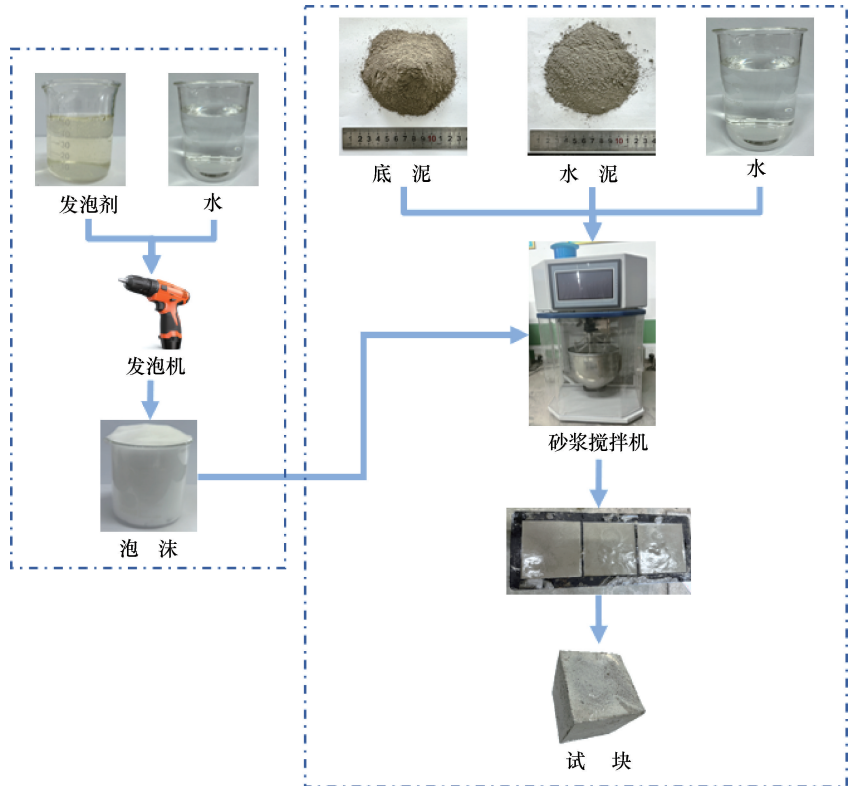
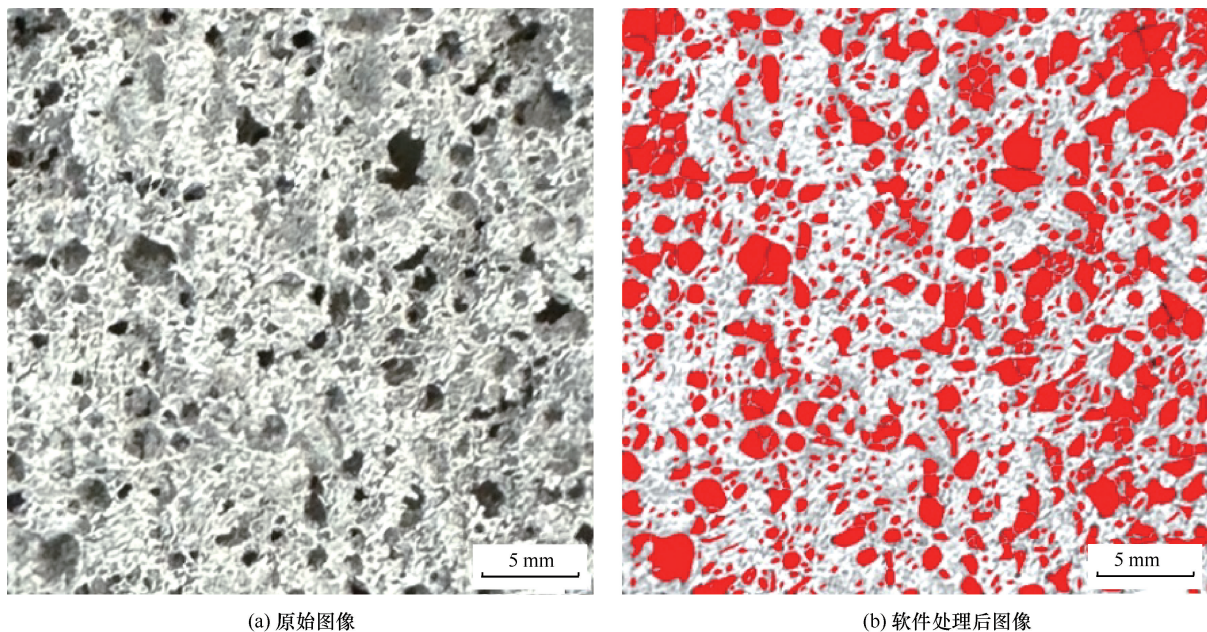


图2 试件制备过程

Fig. 2 Process of specimen preparation



(a) 原始图像

(b) 软件处理后图像

图3 水库底泥泡沫混凝土截面

Fig. 3 Foam concrete section for reservoir sediment

再通过 Image Pro Plus (IPP, 版本 6.0) 对照片进行黑白二值化处理, 截取 30 mm×30 mm 大小的图片, 最后利用 count 功能测定孔隙率。图 3 是某一底泥泡沫混凝土试件的原始图像和经过软件分析后的图像。

X 射线衍射 (X-ray Diffraction, XRD) 测试采用 X 射线粉末衍射仪 (D/Max-2200, 日本理学株式会社), 扫描速度为 2°/min, 扫描角度 5°~90°, 测试前需要将样品研磨并过 200 目筛。

微观形貌采用电子探针显微分析仪 [Electron Probe Microanalyzer (EPMA)] (JAX-8230, 日本电子株式会社) 进行测试, 元素分布采用能量色散 X 射线谱仪 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) 进行分析, 测试前将样品干燥并表面镀碳。

2 结果与讨论

2.1 试验结果及拟合

通过前期试验研究可知, 抗压强度随着水胶比增大呈现先增大后减小的趋势, 并且在 0.38~0.42 之间出现最高峰, 故水胶比设置区间为 0.38~0.42, 底泥掺量和泡沫掺量的增加使得抗压强度呈现下降趋势, 因此底泥掺入量在 0%~30% 之间, 泡沫掺量在 2.8%~4.2% 之间。28 d 抗压强度在 8.76~24.93 MPa 之间, 导热系数在 0.1208~0.2087 W/(m·K) 之间, 孔隙率在 27.8%~52.6% 之间, 表观密度在 680.7~1113.2 kg/m³ 范围内变化。根据响应曲面法中 BBD 设计出的水库底泥泡沫混凝土配合比及试验

数据结果如表 5 所列。

为得到精确、有效的数学模型, 基于表 5 的试验结果, 利用 Design-Expert 软件进行多元非线性拟合分析, 回归模型的拟合性分析及方差分析如表 6 和表 7 所列。

复合相关因子反应模型之间的关联性, 其数值越接近 1 说明该模型的关联性越强; 校正决定系数和预测决定系数反应模型的拟合程度, 其数值相差小于 0.2 说明模型具有较高的解释; 信噪比是通过最大预测响应与最小预测响应的差值除以所有预测响应的平均标准偏差计算得到。反应模型的抗干扰能力, 数值大于 4 即证明模型合理; 变异系数值小于 10% 则说明试验结果可靠; 由表 6 可知, 底泥泡沫混凝土 28 d 抗压强度和导热模型拟合数据均符合条件, 表明该模型具有较高的可靠性和拟合精度。

当 P 值小于或等于显著性水平时 (一般为 0.05), 可以得出相应变量与该项之间的关联在统计意义上显著, F 值越大说明显著性越好。由表 7 可知, 28 d 抗压强度和导热系数模型结果显著, 且失拟模型结果不显著, 表明该模型的可靠性和拟合程度高。

由表 6 拟合性分析可知, 拟合效果最佳为二阶响应面回归模型, 其结果 28 d 抗压强度 Y_1 和导热系数 Y_2 模型如下

$$Y_1 = 17.97 - 2.35X_1 - 1.73X_2 - 1.82X_3 + 2.73X_1X_2 + 3.1X_1X_3 + 0.96X_2X_3 - 6.59X_1^2 + 0.6485X_2^2 + 1.73X_3^2 \quad (1)$$

表5 不同配合比响应面试验结果

Table 5 Test results of response surfaces with different mix ratios

试验编号	水胶比 X_1	底泥掺量 $X_2/\%$	泡沫掺量 $X_3/\%$	抗压强度 Y_1/MPa	导热系数 $Y_2/\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	孔隙率/ $\%$	表观密度 $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
1	0.42	30	3.5	10.43	0.134 5	52.6	759.5
2	0.42	15	4.2	12.34	0.120 8	57.9	680.7
3	0.38	30	3.5	9.28	0.179 2	33.9	1 000.3
4	0.4	15	3.5	16.87	0.177 5	38.8	891.3
5	0.38	0	3.5	19.07	0.208 7	27.8	1113.2
6	0.4	15	3.5	17.95	0.172 8	41.3	885.6
7	0.38	15	2.8	20.08	0.182 6	32.1	1001.5
8	0.38	15	4.2	11.25	0.196 6	29.5	1031.4
9	0.4	30	2.8	20.43	0.172 2	42.3	882.8
10	0.4	15	3.5	16.92	0.170 5	44.8	874.3
11	0.4	0	4.2	18.35	0.167 7	45.7	792.8
12	0.4	15	3.5	19.26	0.177 0	39.1	888.2
13	0.4	0	2.8	24.93	0.182 3	36.7	924.2
14	0.42	15	2.8	8.76	0.176 1	39.9	890.9
15	0.4	30	4.2	17.69	0.133 4	56.3	701.2
16	0.4	15	3.5	18.84	0.173 9	40.3	894.5
17	0.42	0	3.5	9.31	0.159 1	46.6	780.4

表6 响应模型拟合性分析

Table 6 Fitting analysis of response model

模型	复合相关因子	校正决定系数	预测决定系数	信噪比	变异系数/ $\%$
Y_1	0.976 4	0.946 0	0.808 3	18.966 2	6.96
Y_2	0.989 6	0.976 2	0.896 0	33.511 0	2.02

表7 回归模型方差分析

Table 7 Analysis of variance of regression model

响应值	来源	平方和	均方	F值	P值	显著性
Y_1	模型	358.56	39.84	32.16	< 0.000 1	显著
	X_1	44.37	44.37	35.81	0.000 6	
	X_2	23.91	23.91	19.30	0.003 2	
	X_3	26.54	26.54	21.42	0.002 4	
	$X_1 X_2$	29.76	29.76	24.02	0.001 8	
	$X_1 X_3$	38.50	38.50	31.08	0.000 8	
	$X_2 X_3$	3.69	3.69	2.98	0.128 2	
	X_1^2	183.08	183.08	147.77	< 0.000 1	
	X_2^2	1.77	1.77	1.43	0.270 8	
	X_3^2	12.65	12.65	10.21	0.015 2	
	残余	8.67	1.24			
	失拟模型	3.94	1.31	1.11	0.443 4	不显著
Y_2	模型	0.007 8	0.000 9	73.89	< 0.000 1	显著
	X_1	0.003 9	0.003 9	331.04	< 0.000 1	
	X_2	0.001 2	0.001 2	102.98	< 0.000 1	
	X_3	0.001 1	0.001 1	95.19	< 0.000 1	
	$X_1 X_2$	6.002×10^{-6}	6.002×10^{-6}	0.509 7	0.498 4	
	$X_1 X_3$	0.001 2	0.001 2	101.95	< 0.000 1	
	$X_2 X_3$	0.000 1	0.000 1	12.43	0.009 6	
	X_1^2	1.416×10^{-6}	1.416×10^{-6}	0.120 3	0.738 9	
	X_2^2	0.000 1	0.000 1	7.39	0.029 9	
	X_3^2	0.000 1	0.000 1	12.42	0.009 7	
	残余	0.000 1	0.000 0			
	失拟模型	0.000 0	0.000 0	1.86	0.276 6	不显著

注: $P < 0.001$ 为极显著; $P < 0.05$ 为显著。

$$Y_2 = 0.1743 - 0.0221X_1 - 0.0123X_2 - 0.0118X_3 + 0.0012X_1X_2 - 0.0173X_1X_3 - 0.0060X_2X_3 + 0.0006X_1^2 - 0.0045X_2^2 - 0.0059X_3^2 \quad (2)$$

由表7方差分析可知,抗压强度 Y_1 和导热系数 Y_2 模型的 F 值分别为32.16、73.89, P 值均小于0.0001,表明非常显著。 Y_1 、 Y_2 对应的校正决定系数与预测决定系数分别为 $R_{adj}^2 = 0.9460$ 、 $R_{pre}^2 = 0.8083$ 和 $R_{adj}^2 = 0.9762$ 、 $R_{pre}^2 = 0.8960$,表明94.6%的水库底泥泡沫混凝土28d抗压强度值变化可由该模型进行预测,97.6%的水库底泥泡沫混凝土导热系数值变化可由该模型进行预测。图4为模型预测值与实际值对比,预测值与实际值基本呈直线分布在直线两侧,进一步说明模型拟合度较好。

2.2 各因素对水库底泥泡沫混凝土抗压强度的影响

根据方差分析表及模型的选择绘制出三维响应面图和等高线图,分析水胶比、底泥掺量、泡沫掺量各因素交互作用对水库底泥泡沫混凝土28d抗压强度的影响规律,结果如图5所示。

从图5(a)中可以看出,固定底泥掺量为0%时,抗压强度随着水胶比的增加呈现先上升后下降的趋势^[25-26],表现为圆弧形响应曲面,水胶比在0.4时28d抗压强度最大达到24.93MPa。当水胶比较低时,由于游离水含量较少,水泥和底泥等材料无法完全发生水化反应,导致泡沫混凝土在初凝阶段部分吸收泡沫中的水分,从而导致泡沫破裂并形成内部大量连通孔,甚至会引起模块出现沉降和坍塌现象,最终造成试块内部结构破坏,泡沫混凝土的抗压强度降低。随着水胶比的增大,浆体的流动性提高,底泥、水泥等胶凝材料可以得到充分的水化作用,生成更多

的胶凝产物,有利于提高泡沫混凝土的抗压强度。当水胶比过高时,泡沫混凝土浆料出现泌水现象,导致试块出现分层现象,多余的游离水在上层蒸发出去,在试块受压时出现受力不均匀现象,导致其抗压强度的降低。

从图5(b)可以看出,当水胶比在0.38~0.4之间时,泡沫混凝土随着泡沫掺量的增多,抗压强度呈现线性降低的趋势,与文献[27-28]结论相同,下降趋势较为陡峭,在泡沫掺量为2.8%时,抗压强度最大达到20.08MPa。泡沫掺量的增加,需要足够的水使泡沫在浆体中均匀分散,水分不足时,导致浆体的流动性较差,在搅拌混合的作用下,气泡之间相互挤压破坏孔壁,形成大量的连通孔,引起孔隙率的增大,使得底泥泡沫混凝土的抗压强度降低。泡沫掺量固定时,抗压强度随水胶比的增大呈现先上升后下降的趋势,表现为圆弧响应面。当水胶比为0.4时,底泥泡沫混凝土抗压强度最大达到19.26MPa。当水胶比为0.42时,随着泡沫掺入量的增多,在搅拌过程中泡沫发生碰撞融合,导致部分气泡消散,试块密实度增大,泡沫掺入量为2.8%的试块干密度890.9kg/m³,泡沫掺入量为4.2%的试块干密度为680.7kg/m³。随着干密度增加,抗压强度有略微的增长。

从图5(c)中可以看出,固定泡沫掺量,泡沫混凝土随着底泥掺量的增加呈现下降的趋势,当泡沫掺量为2.8%时,底泥掺量从0%~30%,底泥泡沫混凝土抗压强度从24.93MPa降低到20.43MPa,下降趋势较为平缓。预处理后的底泥主要矿物相为石英(见图1),其化学性能稳定,很难与其他物质发生反应^[9],在泡沫混凝土中主要起填充作用,水泥在水

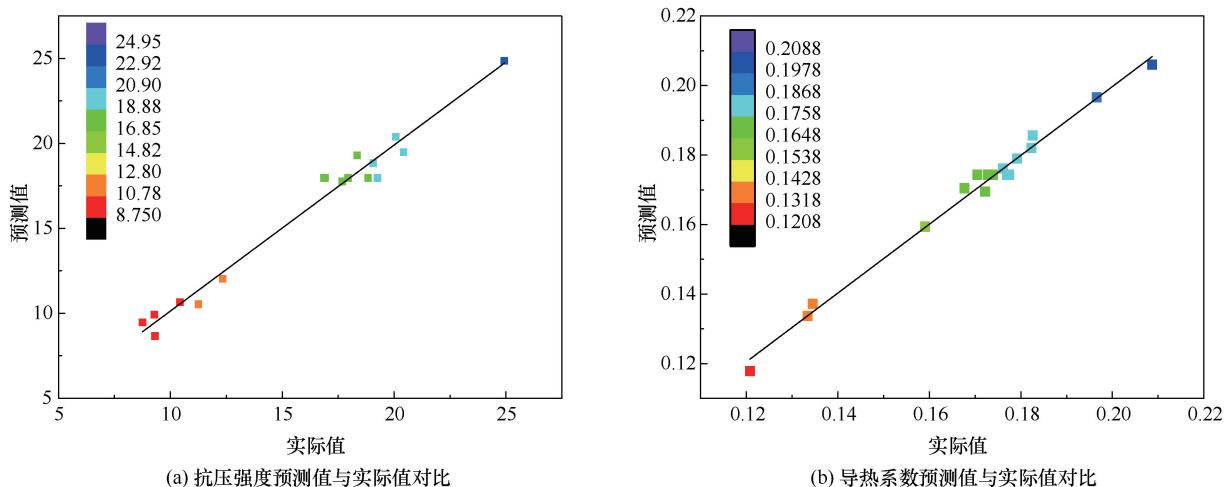
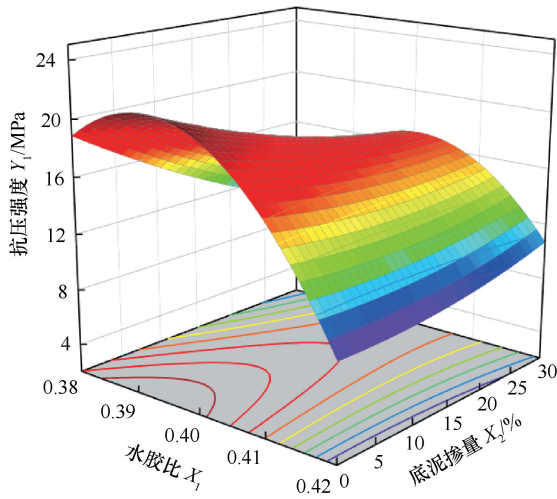
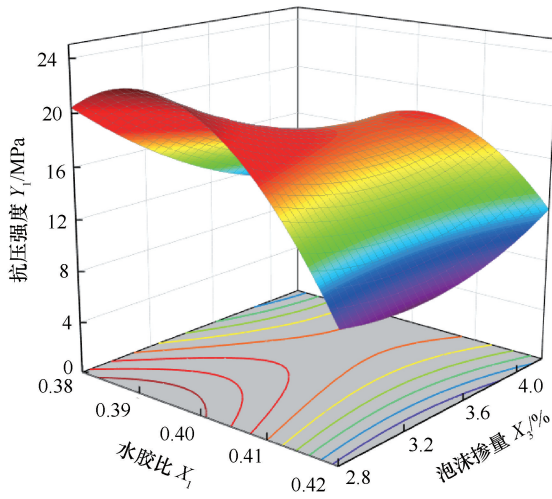


图4 模型拟合预测值与实际值

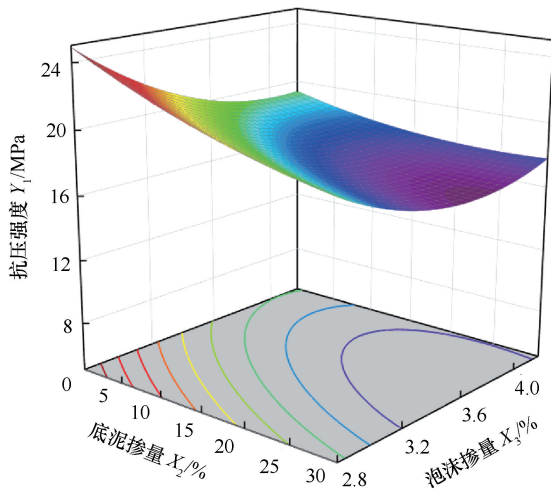
Fig. 4 Model fit predicted and actual values



(a) 水胶比和底泥掺量响应曲面和等高线



(b) 水胶比和泡沫掺量响应曲面和等高线



(b) 底泥掺量和泡沫掺量响应曲面和等高线

图5 各因素交互作用对抗压强度影响

Fig. 5 Effect of interaction of factors on compressive strength

化过程中产生的 C-S-H 凝胶、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体等, 是泡沫混凝土抗压强度的主要来源。因此, 底泥掺量越小, 水泥掺量越大, 底泥泡沫混凝土的抗压强度越高。

在模型方差分析表 7 中, 水胶比、底泥掺量和泡沫掺量 P 值均小于 0.05, 因此对抗压强度值影响显著。各因素交互项中 X_1X_2 、 X_1X_3 的 P 值也小于 0.05, 对抗压强度值影响显著, X_2X_3 对抗压强度值影响不显著, 影响的显著性顺序为 $X_1 > X_1X_3 > X_1X_2 > X_3 > X_2 > X_2X_3$, 即水胶比 > 水胶比泡沫掺量交互作用 > 底泥掺量 > 水胶比底泥掺量交互作用 > 泡沫掺量 > 底泥掺量泡沫掺量交互作用。结合图 5(a)(b) 三维响应曲面及等高线, 水胶比 X_1 所对应的响应曲线最为陡峭且等高线密集, 表明水胶比对评价指标的影响最大, 这与方差表 7 分析吻合。

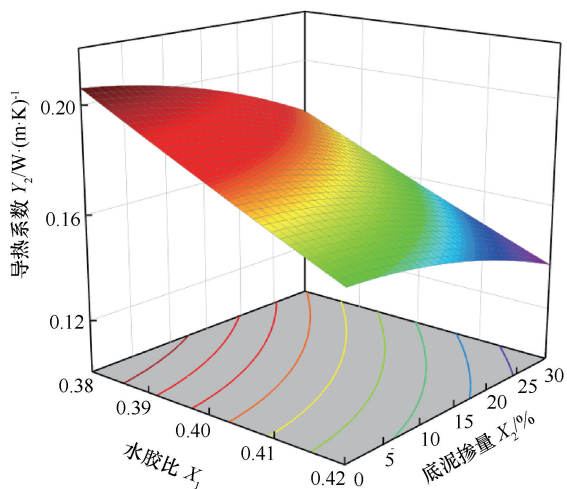
2.3 各因素对水库底泥泡沫混凝土导热系数的影响

根据方差分析表及模型绘制出三维响应面和等高线, 分析水胶比、底泥掺量和泡沫掺量各因素交互作用对水库底泥泡沫混凝土 28 d 导热系数的影响规律, 结果如图 6 所示。

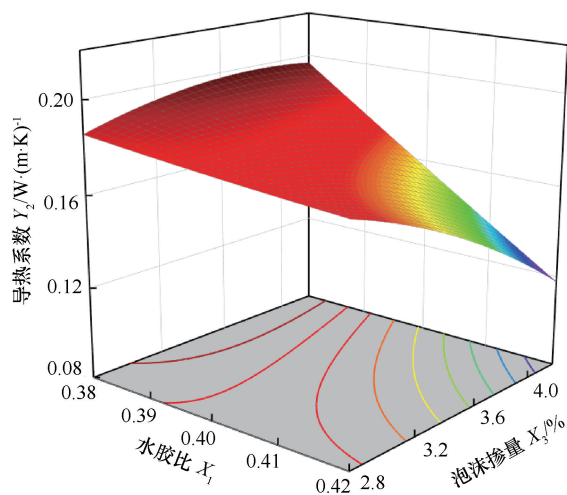
图 6(a) 所示水胶比和底泥掺量作用对导热系数影响, 当底泥掺量为 0% 时, 当水胶比从 0.38 上升到 0.42, 导热系数从 $0.2087 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 下降到 $0.1591 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。随着水胶比的增加, 净浆的流动度增大, 和易性得到了改善, 搅拌过程中泡沫在底泥水泥浆体中分散得更加均匀, 从而优化了孔结构, 保留的封闭气孔较多, 使得泡沫混凝土的孔隙率上升, 从而降低了导热系数^[30]。

图 6(b) 所示水胶比和泡沫掺量交互作用对导热系数影响, 当水胶比一定时, 随着泡沫掺量的增多, 导热系数呈下降趋势^[31]。泡沫混凝土属于两相多孔材料, 由连续的固体相和离散的气体相组成, 随着泡沫掺量的增多, 气体相所占比例就会相应的提高, 而空气的导热系数为 $0.0259 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 水泥净浆的导热系数为 $0.997 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[32], 因此, 泡沫掺量的增多导致泡沫混凝土的导热系数下降。

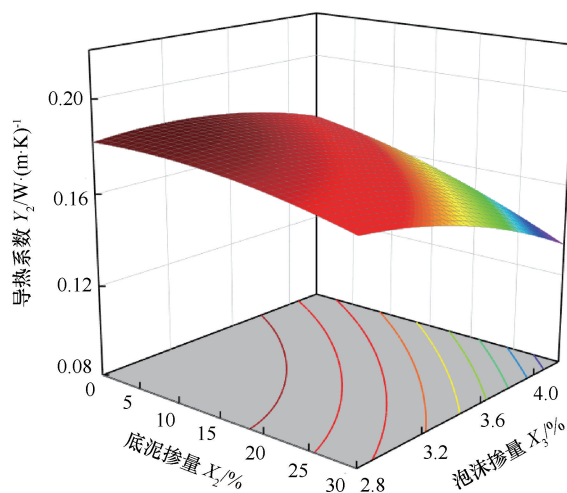
图 6(c) 所示底泥掺量和泡沫掺量交互作用对导热系数影响, 当泡沫掺量一定时, 泡沫混凝土随着底泥掺量的增多, 导热系数降低。底泥掺量的较高时, 净浆的稠度变大以及颗粒之间的摩擦阻力增大, 使得泡沫混凝土内部的消泡率增大, 从而导致泡沫混凝土连通孔的数量增多, 而固相的传热能力优于气相, 气相所占比例越高, 热量传递效率越低^[31], 从而导致了导热系数下降。



(a) 水胶比和底泥掺量响应曲面和等高线



(b) 水胶比和泡沫掺量响应曲面和等高线



(c) 底泥掺量和泡沫掺量响应曲面和等高线

图6 各因素交互作用对导热系数影响

Fig. 6 Effect of interaction of factors on thermal conductivity

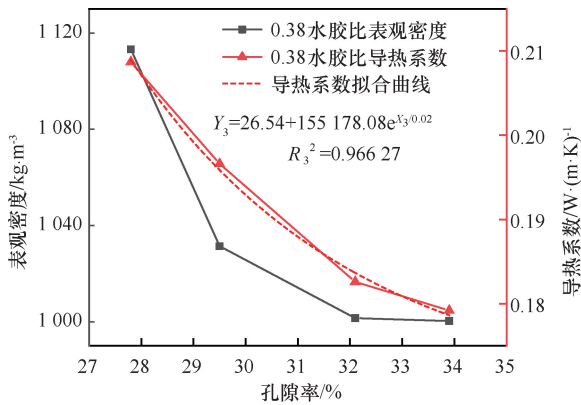
在模型方差分析表7中,水胶比、底泥掺量和泡沫掺量 P 值均小于0.05,因此对导热系数值影响显著。各因素交互项中 X_2X_3 、 X_1X_3 的 P 值也小于0.05,对导热系数值影响显著, X_1X_2 对导热系数值影响不显著。影响显著性顺序依次为 $X_1 > X_2 = X_1X_3 > X_3 > X_1X_2 > X_2X_3$,即水胶比>底泥掺量=水胶比泡沫掺量交互作用>泡沫掺量>水胶比底泥掺量交互作用>底泥掺量泡沫掺量交互作用。结合三维响应曲面及等高线图6(a)(b)中, X_1 所对应的响应曲面更为陡峭,并且等高线更加密集,表明水胶比对导热系数的影响最为显著,与方差分析表7结果吻合。

2.4 导热系数与孔隙率的关系

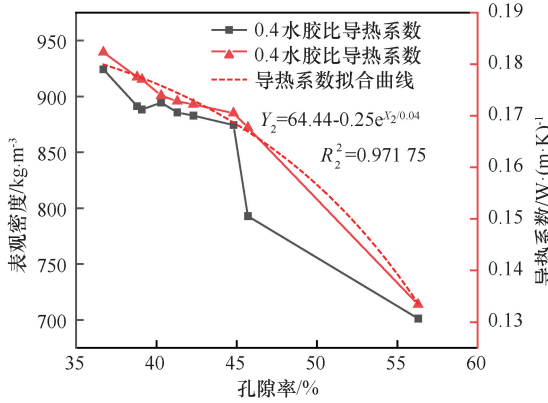
根据表5中孔隙率数据可知,不同水胶比底泥泡沫混凝土的导热系数与孔隙率的关系如图7所示。由方差表7分析可知,水胶比对底泥泡沫混凝土导热系数影响因素最为显著,因此,根据不同水胶比对导热系数和孔隙率关系进行分析较为合理。导热系数随着孔隙率的增大而降低,有研究者通过试验研究,发现泡沫混凝土导热系数与孔隙率模型符合指数关系,例如周顺鄂^[32]模型($\lambda = 0.848 4e^{-3.136\phi} + 1.151 5e^{-24.35\phi}$)和朱明^[14]模型($\lambda = e^{-23.33+20 395.74/(\phi+916.1)}$),其中 λ 表示导热系数, ϕ 表示孔隙率。

由图7(a)可知,当水胶比为0.42时,孔隙率从39.9%增大到57.9%,表观密度从890.9 kg/m³降低到680.7 kg/m³,导热系数从0.176 1 W/(m·K)下降到0.120 8 W/(m·K),指数拟合公式为 $\lambda_{0.42} = 136.43 - 51.27e^{(\phi_{0.42}/0.28)}$,相关性系数 $R_{0.42}^2 = 0.973 16$ 。图7(b)当水胶比为0.4时,孔隙率从36.7%增大到56.3%,表观密度从924.2 kg/m³降低到701.2 kg/m³,导热系数从0.182 3 W/(m·K)下降到0.133 4 W/(m·K),指数拟合公式为 $\lambda_{0.4} = 64.44 - 0.25e^{(\phi_{0.4}/0.04)}$,相关性系数 $R_{0.4}^2 = 0.971 75$ 。图7(c)当水胶比为0.38时,孔隙率从27.8%增大到33.9%,表观密度从1 113.2 kg/m³降低到1 000.3 kg/m³,导热系数从0.208 7 W/(m·K)下降到0.179 2 W/(m·K),指数拟合公式为 $\lambda_{0.38} = 26.54 + 155 178.08e^{(\phi_{0.38}/0.02)}$,相关性系数 $R_{0.38}^2 = 0.966 27$ 。

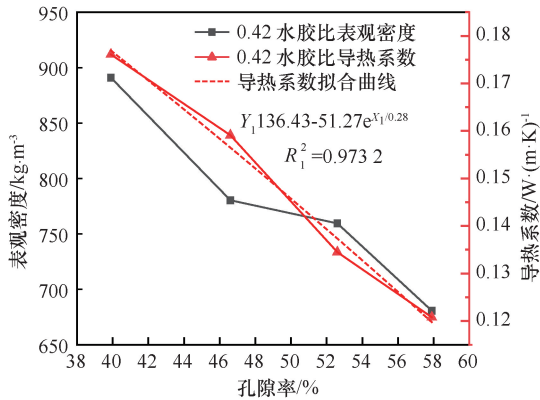
不同水胶比的导热系数与孔隙率均存在较好的指数相关性。水胶比变小,导热系数变化率也随之减小。水胶比较大时,泡沫掺量的增多,气孔在浆体分布更加均匀密集中,气相所占比逐渐增大,导致孔隙率的增加,导热系数变小,孔隙率变化幅度大,导热系数跨度大。底泥掺量的增多,底泥与水泥颗粒不均



(a) 0.42水胶比的导热系数与孔隙率关系



(b) 0.4水胶比的导热系数与孔隙率关系



(c) 0.38水胶比的导热系数与孔隙率关系

图7 不同水胶比孔隙率与导热系数和表观密度的关系

Fig. 7 Porosity versus thermal conductivity and apparent density for different water-cement ratios

匀地吸附在泡沫液膜上, 导致浆料消泡率提高, 内部连通孔的数量变多, 胶凝材料的占比降低, 导致结构中的水化产物数量减少, 泡沫混凝土导热系数呈下降趋势^[15-17]。

2.5 微观分析

图8为0%、15%、30%底泥掺量的泡沫混凝土在28d龄期下XRD图。当底泥掺入量0%时, 泡沫混凝土为纯水泥泡沫混凝土, 在18°附近出现了明显的CH衍射峰, 在22°附近出现Ettringite(钙矾石)衍

射峰。这是因为水泥中的主要物相为硅酸三钙(C₃S)、硅酸二钙(C₂S)和铝酸三钙(C₃A), 其中C₃S和C₂S的水化产物为水化硅酸钙(C-S-H)和氢氧化钙(CH), C₃S水化速度较快, 为水泥提供早期强度, C₂S与C₃S水化产物相似, 但反应速度较慢, 钙矾石的出现是因为C₃A水化产物最初所形成。

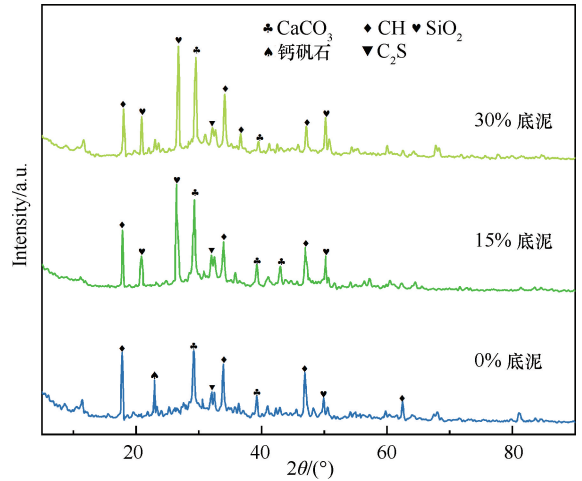


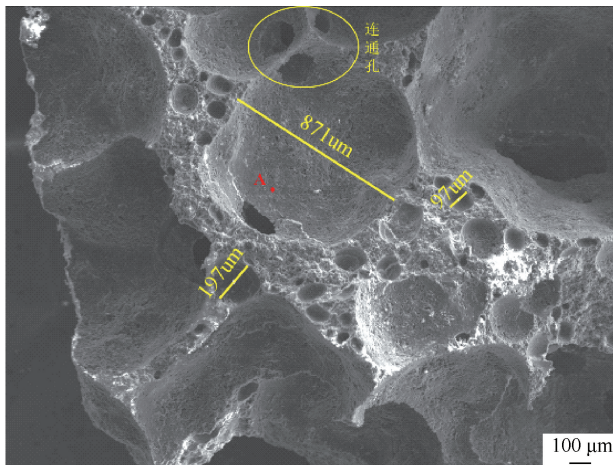
图8 不同底泥掺量的泡沫混凝土XRD图

Fig. 8 XRD patterns of foam concrete with different amounts of reservoir sediment

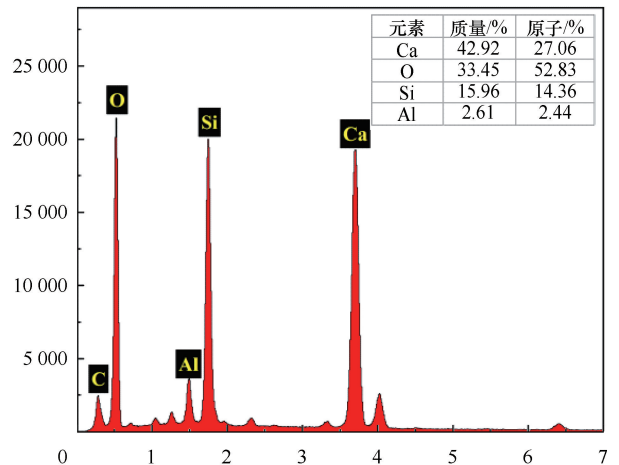
随着底泥取代率的增加, 在18°和57°附近的CH衍射峰强度不断降低, 当底泥掺入量为15%时, 在水泥水化产物的碱性环境下, 底泥中的Si-O和Al-O键解体, 与CH发生二次水化反应, 生成C-S-H和水化硅酸钙(C-A-S-H)胶凝物质, 填充内部空隙。

当底泥掺入量为30%, CH衍射峰强度最低, Quartz(SiO₂)和Calcium carbonate(CaCO₃)衍射峰强度达到最高。在29°附近出现的CaCO₃衍射峰随着底泥掺入量的增多不断变高变窄, 这是因为孔内的空气与CH发生碳化反应, 生成CaCO₃。在21°和50°附近出现的SiO₂衍射峰随着底泥量增多不断变高, 这是因为底泥中59.95%成分为SiO₂, 除去参与反应的SiO₂, 其余量会在底泥泡沫混凝土中不断积累。

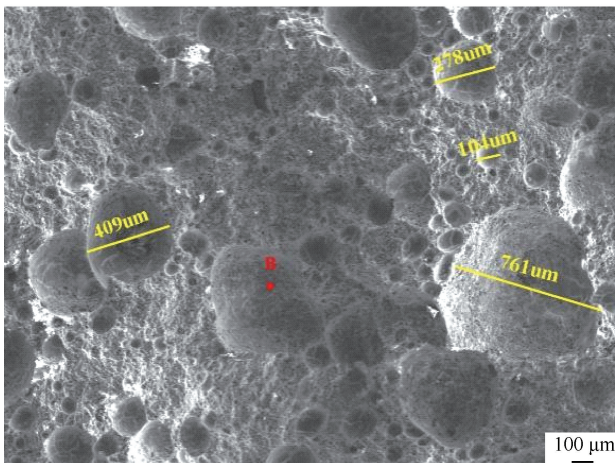
图9分为0%、15%、30%底泥掺量的泡沫混凝土28d龄期下SEM图及EDS图。SEM图如图9(a)所示, 泡沫混凝土中出现的连通孔较多, 孔径分布不均匀, 有效气孔直径在97~871 μm。当底泥掺量为0%时, Ca(OH)₂含量最高, SiO₂和CaCO₃含量相对较少, 水泥基固化的主要反应为水化反应, 水泥中的C₃S和C₂S生成水化硅酸钙, 这些水化产物是泡沫混凝土强度的主要来源之一, 这些胶凝材料在颗粒的间隙中相互连接、包裹填补颗粒间的空隙形成网架结构。



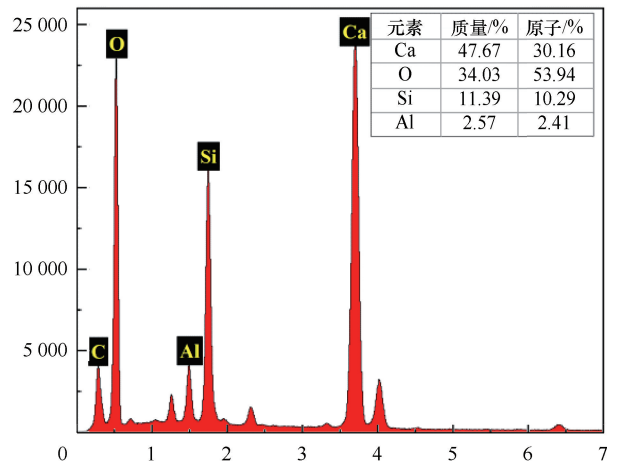
(a) 0%底泥掺量的泡沫混凝土SEM图



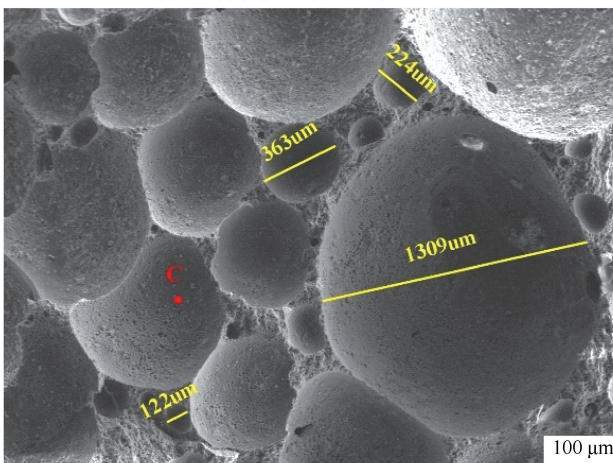
(b) 0%底泥掺量的泡沫混凝土EDS图



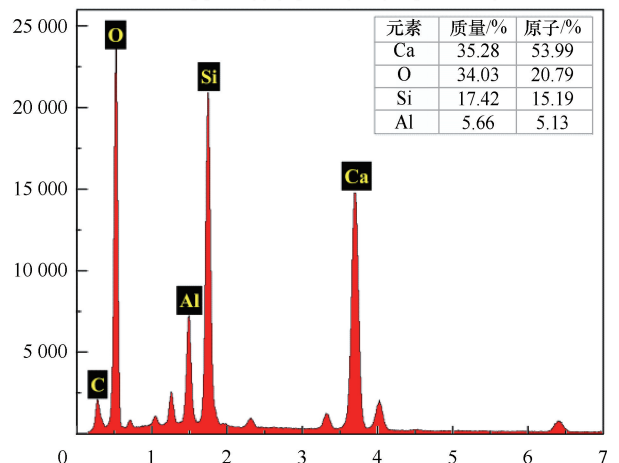
(c) 15%底泥掺量的泡沫混凝土SEM图



(d) 15%底泥掺量的泡沫混凝土EDS图



(e) 30%底泥掺量的泡沫混凝土SEM图



(f) 30%底泥掺量的泡沫混凝土EDS图

图9 不同底泥掺量的泡沫混凝土 SEM 和 EDS 图

Fig. 9 SEM images and EDS plots of foam concrete with different amounts of reservoir sediment mixing

如图9(c)所示,随着底泥掺量的增多,当底泥掺量为15%的时候, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰值逐渐降低,这可能是因为底泥替代了部分水泥,减少了水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的产生量,或是底泥与水泥的水化产物发生火山灰反应生成 C-S-H 凝胶,消耗部分

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ [6]。在水化反应过程中,生成的胶凝产物 CH, 在空气中发生碳化反应,生成 CaCO_3 可以有效填充泡沫混凝土的孔隙,此时有效气孔的分布多为 104~761 μm 之间,气孔直径较小,孔隙率较低,导热系数相较于底泥掺入量 0% 的泡沫混凝土变大。

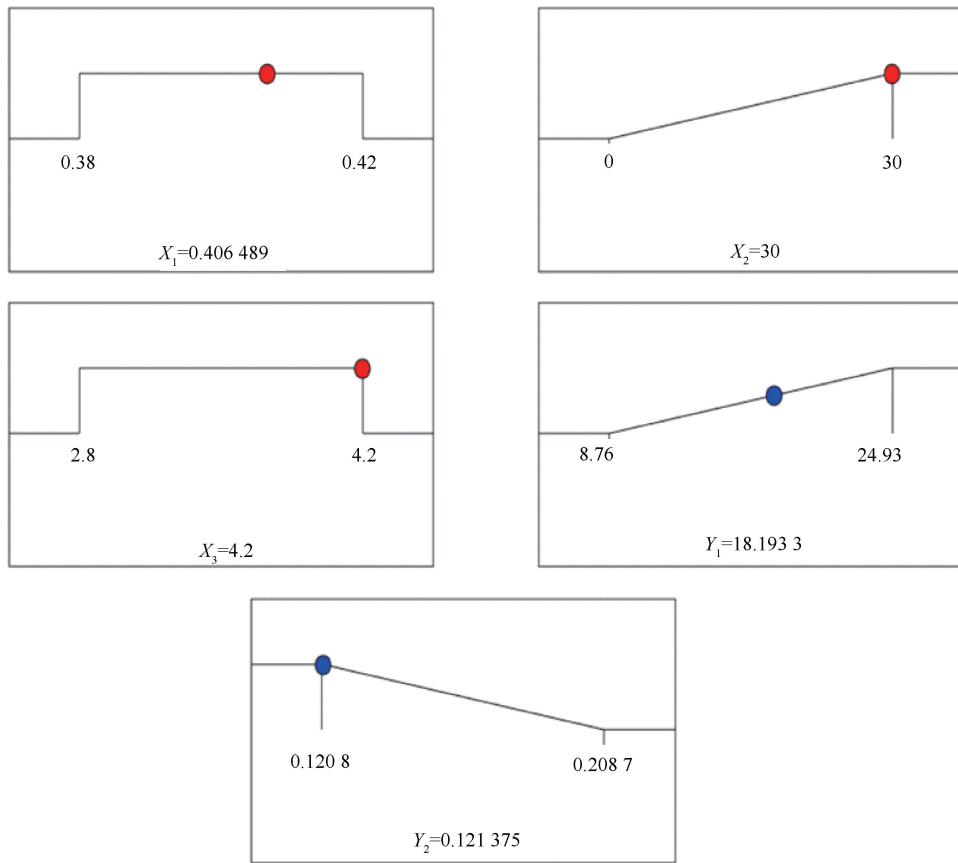


图 10 优化结果

Fig. 10 Optimization result

如图 9(e) 所示, 当底泥掺量为 30% 的时候, 水化反应生成的 CaCO_3 含量较多, CaCO_3 对颗粒之间的孔隙起到填充作用, 也有部分碳酸钙在颗粒表面凝结聚合。底泥颗粒吸附在泡沫壁上填充空隙, 使得泡沫混凝土中的连通孔和大孔数量变少, 并且气孔在水化过程中保存的较为完整, 提高了孔隙率, 使试块的保温隔热能力增强, 30% 底泥泡沫混凝土导热系数相较于 15% 底泥掺入量时降低。随着底泥掺入量的增多, 剩余未参与反应的 SiO_2 含量有所提高, 30% 底泥掺入量的泡沫混凝土的抗压强度相较于 15% 底泥掺入量提高, 有效气孔直径在 $122\sim 1\ 309\ \mu\text{m}$ 之间。

根据图 9(a)(c)(e) 中的 A、B、C 点进行能谱分析测定, 结果如图 9(b)(d)(f) 所示, 泡沫混凝土水化反应生成产物的主要元素有 Ca、O、Si、C、Al, 各元素含量有较大的差别, 但各组水化产物元素组成大致相同。

3 多目标优化与模型验证

利用 Design-Expert 软件分析, 以抗压强度最大、

导热系数最小为指标, 通过对回归方程模型的极值求解, 得到水胶比为 0.4、底泥掺量 30%、泡沫掺量 4.2% 的最优配合比设计参数, 其 28 d 的抗压强度可达到 18.19 MPa, 导热系数可达到 $0.121\ 4\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 具体结果如图 10 所示。

为了验证模型最优值的正确性, 在实际条件中以水胶比 0.4、底泥掺量 30%、泡沫掺量 4.2% 展开三组验证试验, 结果如表 8 所列。

表 8 预测及验证试验结果

Table 8 Predicted and verified test results

数值	抗压强度/MPa	导热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
预测值	18.19	0.121 4
	18.89	0.122 1
实际值	18.61	0.122 0
	18.52	0.121 9
平均值	18.68	0.122 0
误差/%	2.70	0.580 0

由表 8 可知, 在实际试验中, 水库底泥泡沫混凝土的抗压强度和导热系数与模型预测值误差范围均控制在 3% 范围内, 证明可以用该模型对水库底泥泡沫混凝土配合比进行优化。

4 结 论

(1)根据响应曲面法中的 Box-Behnken 中心组合原理,得到水库底泥泡沫混凝土最优配合比参数为水胶比 0.4,底泥掺量 30%,泡沫掺量 4.2%,28 d 抗压强度为 18.19 MPa,导热系数为 0.1214 W/(m·K),预测值与实际值的误差均小于 3%,表明该模型精度较高。

(2)水库底泥泡沫混凝土抗压强度随着水胶比的增大呈现先增大后减小的规律,随着底泥和泡沫掺量的增多,抗压强度呈下降趋势。导热系数随着水胶比的增大、泡沫掺量和底泥掺量的增多均呈现降低的规律。

(3)底泥泡沫混凝土的导热系数与孔隙率有很好的指数相关性。底泥泡沫混凝土的导热系数随着孔隙率的增加呈下降趋势,水胶比为 0.4 时可用 $\lambda_{0.4} = 64.44 - 0.25e^{(\varphi_{0.4}^{0.04})}$ 拟合方程表示,相关系数为 $R_{0.4}^2 = 0.97175$ 。

(4)根据微观分析结果显示,水库底泥的掺入填充内部结构,减少大孔和连通孔的产生,当底泥掺入量为 30%时,试块内部物相结合紧密,孔隙分布均匀,相较于底泥掺入量为 15%时,导热系数降低并且抗压强度有所提高。

参考文献 (References):

- [1] 奚本锋,李洪年,张亚梅,等. 利用湖泊淤泥烧结多孔砖的研究[J]. 新型建筑材料, 2007(11): 20-22.
XI Benfeng, LI Hongnian, ZHANG Yamei, et al. Study on sintered perforated brick using lake silt[J]. New Building Materials, 2007 (11): 20-22.
- [2] 邓琪丰,刘卫东,韩云婷. 河湖疏浚底泥资源化利用研究进展[J]. 中国水运, 2022(2): 138-140.
DENG Qifeng, LIU Weidong, HAN Yunting. Research progress on resource utilization of dredged sediment in rivers and lakes[J]. China Water Transport, 2022(2): 138-140.
- [3] 都正良,吴振元,刘正雄,等. 河湖疏浚底泥处理处置与资源化利用技术进展及展望[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(2): 248-259.
DU Zhengliang, WU Zhenyuan, LIU Zhengxiong, et al. Advances and prospects in technology for treatment, disposal and resource utilization of river and lake dredged sediments [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(2): 248-259.
- [4] 张政. 底泥建材化利用研究进展[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(7): 142-146.
ZHANG Zheng. Research progress of building materials utilization of sediment[J]. Journal of Building Energy Efficiency, 2022, 50(7): 142-146.

- [5] AMAR M, BENZERZOUR M, KLEIB J, et al. From dredged sediment to supplementary cementitious material: Characterization, treatment, and reuse[J]. International Journal of Sediment Research, 2021, 36(1): 92-109.
- [6] ALMOKDAD M, ZENTAR R. Characterization of recycled dredged sediments: Toward circular economy in road construction [J]. Construction and Building Materials, 2023, 402: 132974.
- [7] 邵吉成,李送根,张旺兴,等. 淤泥初始含水率及压实度对固化土强度的影响[J]. 土木工程学报, 2024: 1-13. <https://doi.org/10.15951/j.tmgxb.23070579>.
SHAO Jicheng, LI Songgen, ZHANG Wangxing, et al. Effect of initial moisture content and compactness of sludge on strength of solidified soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2024: 1-13. <https://doi.org/10.15951/j.tmgxb.23070579>.
- [8] JAMSAWANG P, CHAROENSIL S, NAMJAN T, et al. Mechanical and microstructural properties of dredged sediments treated with cement and fly ash for use as road materials[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(11): 2498-2522.
- [9] SHAH S N, MO K H, YAP S P, et al. Lightweight foamed concrete as a promising avenue for incorporating waste materials: A review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 164: 105103.
- [10] 雷颖,高德彬,马学通,等. 澜河河道疏浚底泥固化化学特性试验研究[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(1): 183-188.
LEI Ying, GAO Debin, MA Xuetong, et al. Experimental study on mechanical properties of the solidified riverway dredged sediment in Bahe River [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29 (1): 183-188.
- [11] DENG Y J, YUE Z X, WANG Z J, et al. Optimization and mechanism of the novel eco-friendly additives for solidification and stabilization of dredged sediment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024.
- [12] LYU Y, CHEN Y, DAI W, et al. Preparation and properties of porous concrete based on geopolymer of red mud and Yellow River sediment[J]. Materials, 2024, 17(4): 923.
- [13] TRAN N P, NGUYEN T N, NGO T D, et al. Strategic progress in foam stabilisation towards high-performance foam concrete for building sustainability: A state-of-the-art review [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 375: 133939.
- [14] 曹政,朱雅静,吴小军,等. 轻质混凝土的制备研究综述[J]. 混凝土, 2022(9): 184-187.
CAO Zheng, ZHU Yajing, WU Xiaojun, et al. Review with preparation of lightweight concrete [J]. Concrete, 2022(9): 184-187.
- [15] 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.
- [16] AMRAN Y H M, FARZADNIA N, ABANG ALI A A. Properties and applications of foamed concrete: A review [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 990-1005.
- [17] JIA H, ZOU Q, CUI B, et al. Thermal insulation properties and

- simulation analysis of foam concrete regulated by mechanical and chemical foaming[J]. ACS Omega, 2023, 50(8): 48091-48103.
- [18] 杨小云,赵玲,陈兵,等. 河道疏浚底泥制备泡沫混凝土试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(1): 86-91.
YANG Xiaoyun, ZHAO Ling, CHEN Bing, et al. Experiment study on preparation of foamed concrete with dredged river sediment[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(1): 86-91.
- [19] 马小莉,相玉琳. 改性污泥制备泡沫混凝土的可行性研究[J]. 化工进展, 2016, 35(9): 2997-3001.
MA Xiaoli, XIANG Yulin. Feasibility study on foam concrete prepared by modification sludge [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(9): 2997-3001.
- [20] YANG X, ZHAO L, HAQUE M A, et al. Sustainable conversion of contaminated dredged river sediment into eco-friendly foamed concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119799.
- [21] 曹启坤,景昊星,李豪. 基于响应曲面法的粉煤灰泡沫混凝土配合比优化[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(4): 1427-1435.
CAO Qikun, JING Haoxing, LI Hao. Optimization of fly ash foam concrete mix proportion based on response surface methodology[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(4): 1427-1435.
- [22] 桂苗苗. 响应曲面法优化加气混凝土砂浆配方研究[J]. 材料导报, 2010, 24(S1): 249-251.
GUI Miaomiao. Optimization autoclaved aerated concrete mortar formula using response surface methodology[J]. Materials Reports, 2010, 24(S1): 249-251.
- [23] 刘登贤,韩跃伟,谢鹏. 基于响应曲面法优化泡沫混凝土性能的研究[J]. 混凝土世界, 2020(12): 60-63.
LIU Dengxian, HAN Yuewei, XIE Peng. Optimization of foam concrete properties based on response surface methodology[J]. China Concrete, 2020(12): 60-63.
- [24] 张雄,黄廷皓,张永娟,等. Image-Pro Plus 混凝土孔结构图像分析方法[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 177-182.
ZHANG Xiong, HUANG Yanhao, ZHANG Yongjuan, et al. Image-Pro Plus Analysis of pore structure of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 177-182.
- [25] 曹星星,党钧陶,李凤兰. 水灰比对泡沫混凝土抗压强度和导热系数的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(11): 68-71.
CAO Xingxing, DANG Juntao, LI Fenglan. Effect of water-cement ratio on the compressive strength and thermal conductivity of foamed concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2022(11): 68-71.
- [26] 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 Yanli, HAO Jingao, ZHAO Xiangmin, et al. Relationship between properties and pore structure of foamed lightweight concrete [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(3): 363-366.
- [27] ZHANG X, YANG Q, SHI Y, et al. Effects of different control methods on the mechanical and thermal properties of ultra-light foamed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120082.
- [28] OTHMAN R, JAYA R P, MUTHUSAMY K, et al. Relation between density and compressive strength of foamed concrete[J]. Materials, 2021, 14(11): 2967.
- [29] BEDDAA H, FRAJ A B, DUCLÉROIR S. Experimental study on river sediment incorporation in concrete as a full aggregate replacement; Technical feasibility and economic viability [J]. Construction and Building Materials, 2021, 313: 125425.
- [30] OREN O H, GHOLAMPOUR A, GENCEL O, et al. Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117774.
- [31] 周学军,戚国栋,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.
- [32] 周顺鄂,卢忠远,严云. 泡沫混凝土导热系数模型研究[J]. 材料导报, 2009, 23(6): 69-73.
ZHOU Shune, Lu Zhongyuan, YAN Yun. Study on thermal conductivity model of foamed concrete[J]. Materials Reports, 2009, 23(6): 69-73.
- [33] 朱明,王方刚,张旭龙,等. 泡沫混凝土孔结构与导热性能的关系研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(3): 20-25.
ZHU Ming, WANG Fanggang, ZHANG Xulong, et al. Research on the relationship between pore structure and thermal conductivity of foamed concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(3): 20-25.
- [34] 袁志颖,陈波,陈家林,等. 泡沫混凝土孔结构表征及其对力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 4117-4127.
YUAN Zhiying, CHEN Bo, CHEN Jialin, et al. Characterization of pore structure of foamed concrete and its influence on performance [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 4117-4127.
- [35] JANSSEN H, VAN DE WALLE W. The impact of pore structure parameters on the thermal conductivity of porous building blocks[J]. Construction and Building Materials, 2022, 324: 126681.
- [36] GENCEL O, BILIR T, BADEMLER Z, et al. A detailed review on foam concrete composites; Ingredients, properties, and microstructure [J]. Applied Sciences, 2022, 12(11): 5752.

(责任编辑 王海锋)