

玻化微珠和粉煤灰掺量对玻化微珠保温腻子性能的影响研究

李龙飞, 陈芷珊

武汉轻工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年1月12日; 录用日期: 2026年2月4日; 发布日期: 2026年2月13日

摘要

近年来,随着建筑行业对节能环保要求的日益提高,外墙保温系统的研发和应用得到了广泛关注。目前,对外墙保温层保温砂浆的研究已经有很多,但对面层的保温腻子研究却极少。本研究以玻化微珠作为保温填料,粉煤灰与硅酸盐水泥作为胶凝材料,可分散性乳胶粉、聚丙烯纤维和纤维素醚作为外加剂,旨在开发了一种新型玻化微珠外墙保温腻子。研究通过单因素实验、SEM和FIRT分析,探讨了玻化微珠与粉煤灰掺量对玻化微珠保温腻子流动性、干密度、力学性能、耐水性能、保温性能的影响和作用机理。结果显示玻化微珠掺量45 wt%,粉煤灰替代水泥40 wt%时,乳胶粉3 wt%,纤维素醚0.5 wt%,聚丙烯纤维0.3 wt%保温腻子综合性能最优,此为玻化微珠与粉煤灰的协同最佳配方。

关键词

保温腻子, 玻化微珠, 保温性能, 力学性能

Study on the Effect of Glass Beads and Fly Ash Dosage on the Performance of Glass Beads Insulation Putty

Longfei Li, Zhishan Chen

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Light Industry, Wuhan Hubei

Received: January 12, 2026; accepted: February 4, 2026; published: February 13, 2026

Abstract

In recent years, with the increasing demand for energy saving and environmental protection in the construction industry, the research and development and application of external wall insulation

文章引用: 李龙飞, 陈芷珊. 玻化微珠和粉煤灰掺量对玻化微珠保温腻子性能的影响研究[J]. 土木工程, 2026, 15(2): 162-176. DOI: 10.12677/hjce.2026.152036

systems have received widespread attention. At present, there have been a lot of studies on the thermal insulation mortar for the external wall insulation layer, but there are very few studies on the thermal insulation putty for the opposite layer. This study aims to develop a new type of glass bead external wall insulation putty by using glass beads as insulation filler, fly ash and silicate cement as cementitious materials, dispersible latex powder, polypropylene fibre and cellulose ether as additives. The study investigated the effect and mechanism of glass beads and fly ash dosage on the fluidity, dry density, mechanical properties, water resistance, and thermal insulation properties of glass beads thermal insulation putty through one-way experiments, SEM and FIRT analyses. The results show that 45 wt% of glass beads, 40 wt% of fly ash replacement cement, 3 wt% of latex powder, 0.5 wt% of cellulose ether, 0.3 wt% of polypropylene fibre insulation putty with the best comprehensive performance, which is the optimal synergistic formulation of glass beads and fly ash.

Keywords

Thermal Insulation Putty, Glass Beads, Thermal Insulation Properties, Mechanical Properties

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球能源消耗持续增长和环境保护压力日益增大的背景下, 建筑行业的节能减排已成为全球关注的焦点[1]。建筑能耗在总能耗中占据着相当大的比例, 通过改善外墙外保温系统一直是降低建筑能耗、实现绿色建筑目标的关键途径[2][3]。目前, 对外墙保温层保温砂浆的研究已经有很多, 但对面层的保温腻子研究却极少。

保温腻子作为保温系统的最外层保护面层和装饰层的基础, 直接暴露于外界环境, 承受着温度变化、干湿循环、紫外线辐射以及可能的机械冲击[4][5]。它不仅需要具备一定的保温隔热性能, 以辅助保温层共同提升墙体整体保温效果, 同时还需要具备一定的干密度、流动性、力学性能、耐水性能以确保施工质量和效率[6]。因此, 开发性能优异、成本合理、环境友好的保温腻子材料具有重要的理论意义和广阔的工程应用前景[7]。

玻化微珠(Glass Beads)作为一种轻质、闭孔、无机的不燃保温骨料, 因其优异的保温隔热性能、轻质高强、化学稳定性好、吸水率低等优点, 已被广泛应用于轻质砂浆和保温材料中, 是制备保温腻子的理想骨料选择[8][9]。因目前关于玻化微珠对保温腻子性能影响探究的文献极少, 而保温腻子和砂浆在原材料和性能测试上有很多相同之处, 所以本文参考了大量保温砂浆有关文献。

Feng 等人[10]在研究中探讨了膨胀玻化微珠和膨胀珍珠岩在轻质抹灰砂浆中的应用潜力, 实验结果表明, 加入轻质骨料和外加剂后, 砂浆的干密度显著降低, 并且孔隙结构得到显著优化。Jiang 等人[11]将秸秆和落叶纤维作为有机保温组分, 结合玻化微珠和膨胀珍珠岩等无机组分, 制备水泥基复合保温砂浆。研究发现, 植物纤维的掺入虽然提升了 TIM 的保温性能, 但也导致了流动性和机械强度的下降。Mydin 等人[12]研究了植物纤维对轻质泡沫混凝土性能的影响。结果显示, 植物纤维的添加显著改善了流动性、吸水率、孔隙率。Kabay [13]等人采用浆料替代法, 将玻化微珠按体积分别替代水泥浆的 0%、10% 和 20%, 发现砂浆基体孔隙率升高, 临界孔径和平均孔径值降低。龚建清等人[14]研究了不同水胶比对玻化微珠保温砂浆的性能影响。实验结果显示, 水胶比在 1.3、1.4 和 1.5 时, 抗压抗折强度、干密度以及导热系数发生大幅下降。通过 SEM 和压汞试验分析, 发现水胶比增高导致内部孔隙增加, 影响了材料的力

学性能。西振国[15]通过响应曲面法分析了玻化微珠掺量和水胶比对保温砂浆性能的影响。结果表明,减少玻化微珠掺量以及增大水胶比都会导致干密度、抗压抗折强度和导热系数下降。李东、潘宇航[16]也采用了响应曲面法,研究了粉煤灰和炉渣对保温砂浆性能的影响,研究表明粉煤灰在流动性和抗压抗折强度方面起着重要作用,粉煤灰含量 20.73%、炉渣含量 21.49%为最优组合。黄伟[16]在保温砂浆干粉中按质量比例添加粉煤灰,试验结果表明,粉煤灰能改善玻化微珠保温砂浆容重、抗压强度和导热系数,当粉煤灰与保温砂浆干粉质量比为 0.3:1 时,保温砂浆各项性能指标达到最佳。

基于已有的研究,本研究以玻化微珠作为保温填料,粉煤灰与硅酸盐水泥作为胶凝材料,可分散性乳胶粉、聚丙烯纤维和纤维素醚作为外加剂,开发了一种新型玻化微珠外墙保温腻子。研究将系统探讨玻化微珠和粉煤灰掺量对玻化微珠保温腻子性能的影响及作用机理,为优化玻化微珠保温腻子的配方设计、提升其工程应用性能、促进工业固废的高值化利用以及推动建筑节能技术的进步提供重要的理论依据和技术支持。

2. 试验材料与方法

2.1. 胶凝材料

本研究采用湖北省华新水泥股份有限公司生产的 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥,各项性能参数见表 1。

Table 1. Cement performance parameters
表 1. 水泥性能参数

烧失量	比表面积	标准稠度用水量	初凝时间	终凝时间	3d 抗压强度	3d 抗折强度
3.21%	341 m ² /kg	28%	130 min	170 min	30.2 MPa	6.0 MPa

本研究采用河南铂润铸造材料有限公司生产的 I 级粉煤灰,主要性能参数如表 2 所示。

Table 2. Performance parameters of fly ash
表 2. 粉煤灰性能参数

烧失量	5 μm 细度方孔筛余	含水量	密度	堆积密度	初凝时间	终凝时间
2.8%	16%	0.85%	2.55 g/cm ³	1.12 g/cm ³	130 min	170 min

2.2. 保温填料

本研究采用河南省郑州市天宇新材料科技有限公司生产的玻化微珠,具体性能参数见表 3。

Table 3. Performance parameters of porous microbeads
表 3. 玻化微珠性能参数

堆积密度	桶压强度	导热系数	体积吸水率	表面玻化闭孔率	体积漂浮率
110 Kg/m ³	196 Kpa	0.042 W/(m·k)	35%	95%	93%

2.3. 外加剂

本研究采用河北晴俊化工有限公司生产的乙酸乙烯酯-乙烯共聚乳液(vinyl acetateethylene, VAE)制备的可分散乳胶粉,具体性能参数如表 4 所示。

Table 4. Performance parameters of dispersible latex powder**表 4.** 可分散乳胶粉性能参数

外观	堆积密度	不挥发物含量	平均粒径 D50	拉伸强度	断裂伸长率	PH 值
白色粉末	470 g/L	99.2%	92 μm	6.7 MPa	225%	7.2

本研究采用河北晴俊化工有限公司羟丙基甲基纤维素醚(hydroxypropyl methylcellulose, HPMC), 具体性能参数如表 5 所示。

Table 5. Performance parameters of cellulose ethers**表 5.** 纤维素醚性能参数

外观	细度	干燥失重率	PH 值	透光率	保水率	硫酸盐灰分
白色粉末	1.9%	5.8%	7.1	88%	99.2%	1.7%

本研究采用湖南长沙柠祥建材有限公司生产的 3 mm 聚丙烯纤维, 具体性能参数如表 6 所示。

Table 6. Performance parameters of polypropylene fibers**表 6.** 聚丙烯纤维性能参数

抗拉强度	极限延伸率	弹性模量	密度	直径	熔点
350~537 MPa	28.4%	4236 MPa	0.91 g/cm ³	32.7 μm	169℃

2.4. 实验方案设计

通过对国内外玻化微珠保温腻子的研究, 本研究先确定了各组分的适宜掺量范围如表 7 所示, 然后在此范围内进行了大量探索性实验, 选取了其中综合性能最佳的配合比作为基础配方(玻化微珠 45 wt%, 粉煤灰替代水泥 30 wt%, 乳胶粉 3 wt%, 纤维素醚 0.5 wt%, 聚丙烯纤维 0.3 wt%)。实验将在此配方基础上进一步研究玻化微珠和粉煤灰掺量对玻化微珠保温腻子性能的影响。

Table 7. Appropriate dosage ranges for each component of the vitrified microsphere insulation putty**表 7.** 玻化微珠保温腻子各组分适宜掺量范围

组分	掺量
玻化微珠	35 wt%~50 wt%
乳胶粉	1 wt%~4 wt%
纤维素醚	0 wt%~1 wt%
聚丙烯纤维	0 wt%~0.3 wt%
粉煤灰替代水泥	10 wt%~50 wt%

本研究在确定玻化微珠掺量时, 保持其他组分含量不变, 改变玻化微珠的掺量(35 wt%, 40 wt%, 45 wt%, 50 wt%, 55 wt%), 通过对不同玻化微珠掺量制得保温腻子的流动性、干密度、力学性能、耐水性能、保温性能进行测试研究, 确定玻化微珠最佳掺量。随后, 基于此最佳玻化微珠掺量, 采用控制变量法, 进一步探究粉煤灰替代水泥量(10 wt%~50 wt%)对保温腻子性能的影响, 从而确定玻化微珠与粉煤灰的协

同最佳掺量组合, 并通过微观测试深入探讨二者对保温腻子微观结构和性能的影响机理。配合比设计方案如表 8 所示。

Table 8. Design of mixing ratio for porcelain microsphere insulation putty
表 8. 玻化微珠保温腻子配合比设计

编号	水泥	粉煤灰	乳胶粉	纤维素醚	聚丙烯纤维	玻化微珠
G1	840 g	360 g	36 g	6 g	3.6 g	646 g
G2	840 g	360 g	36 g	6 g	3.6 g	800 g
G3	840 g	360 g	36 g	6 g	3.6 g	982 g
G4	840 g	360 g	36 g	6 g	3.6 g	1200 g
G5	840 g	360 g	36 g	6 g	3.6 g	1467 g
F1	1080 g	120 g	36 g	6 g	3.6 g	982 g
F2	960 g	240 g	36 g	6 g	3.6 g	982 g
F3	840 g	360 g	36 g	6 g	3.6 g	982 g
F4	720 g	480 g	36 g	6 g	3.6 g	982 g
F5	600 g	600 g	36 g	6 g	3.6 g	982 g

3. 试验方法

玻化微珠保温腻子的抗压强度、干密度、吸水率和软化系数采用 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的立方体试块测试, 抗折强度测试在 40 mm × 40 mm × 160 mm 的长方体试块上进行。试样在标准养护箱内养护到龄期的前 2 d, 然后在鼓风干燥箱内 105℃ ± 5℃ 烘至恒重。

3.1. 稠度

稠度测试参照标准 JGJ/T 70-2009 进行, 使用砂浆稠度仪进行试验。每组试验测试三次, 然后取平均值作为测定值, 计算结果精确到 1 mm。

3.2. 干密度

干密度测试参照标准 GB/T 20473-2021 进行。干密度计算公式按照 GB/T 5486-2008 式(1)计算, 每组 6 个试件, 试验结果用算术平均值表示。

$$\rho = \frac{G}{V} \quad (1)$$

式中: ρ ——试件的干密度, kg/m³;
 G ——试件烘干后的质量, kg;
 V ——试件的体积, m³。

3.3. 力学性能测试

参照 GB/T 5486-2008 进行力学性能测试, 包括抗压与抗折强度测试。立方体试件在微机控制电液伺服压力试验机(加载速率 10 mm/min)上测抗压强度; 长方体试件在抗压抗折一体机上测抗折强度。结果取

三次测量的算术平均值, 若单值偏差超过平均值 $\pm 10\%$, 则剔除后取剩余结果的平均值。抗压强度计算公式见式(2):

$$f_c = \frac{F_c}{A} \quad (2)$$

式中: f_c ——保温腻子试块的抗压强度, MPa;

F_c ——试验中试块所承受的最大荷载, N;

A ——试块的受压面积, cm^2 。

抗折强度计算公式见式(3):

$$f_b = \frac{1.5F_f L}{b^3} \quad (3)$$

式中: f_b ——保温腻子试块的抗折强度, MPa;

F_f ——试块折断时施加在试块中部的荷载, N;

L ——支撑试块的支点之间的距离, mm;

b ——试块最短边的边长, mm。

3.4. 导热系数

保温腻子的导热性采用瞬变平面热源法测试。DRX-II-PS 导热系数测量仪的 3 号探头参数见表 9, 加热电流 80 mA, 测量结果取三次测试的算术平均值。

Table 9. Parameters of probe No. 3 of the heat conductivity meter

表 9. 导热系数仪 3 号探头参数

参数	常温电阻(Ω)	探头直径(mm)	引线线粗(mm^2)	测试电流(A)
数据	81.1	25	0.25	0.08

3.5. 吸水率和软化系数

参照 JGJ/T 70-2009 测试吸水率与软化系数。试件分两组, 每组 3 块, 龄期为 28 d, 按式(4)和(5)计算吸水率与软化系数。

$$\omega_T = \frac{G_s - G_g}{V_2 \cdot \rho_w} \times 100 \quad (4)$$

式中: ω_T ——试件的体积吸水率, %;

G_s ——试件浸水后的湿质量, kg;

G_g ——试件浸水前的干质量, kg;

V_2 ——试件的体积, m^3 ;

ρ_w ——自来水的密度, 取 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。

$$K = \frac{f}{F} \quad (5)$$

式中: K ——试件的软化系数;

f ——试件在水饱和状态下的抗压强度, MPa;

F ——试件在干燥状态下的抗压强度, MPa。

3.6. 扫描电子显微镜(SEM)

试样养护至 28 d 后将其裁剪为 0.5×0.5 cm 的片状样品, 对样品进行喷金处理后使用日立扫描电子显微镜依次扫描放大 50 倍、1000 倍的试件形貌。

3.7. 红外光谱分析(FTIR)

FTIR 试验中, 通过红外光谱吸收峰的位置和强度分析样品化学组成和分子结构的信息。试验红外光谱仪设置波数范围为 4000 至 600 m^{-1} , 扫描次数为 32, 分辨率设定为 4 cm^{-1} 。

4. 结果与分析

4.1. 稠度

从图 1 中可以看出, 随着玻化微珠掺量的增加, 保温腻子稠度值持续减小。这是因为随着玻化微珠掺量的增加, 保温腻子中固体颗粒间的摩擦力也随之增大, 导致保温腻子内聚力增强, 流动性降低, 且高掺量的玻化微珠除吸收更多的拌合水导致自由水含量降低外, 还容易导致固体颗粒分散不均产生团聚现象, 使浆体更加难以流动[17]。

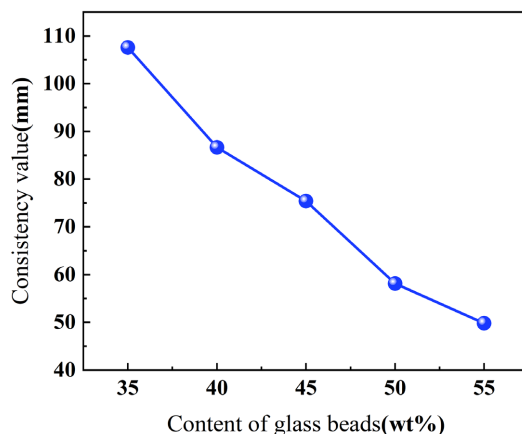


Figure 1. The effect of glass microsphere content on the consistency value

图 1. 玻化微珠掺量对稠度值的影响

从图 2 中可以看出, 随着粉煤灰替代量的增加, 保温腻子稠度值持续增大。这是因为粉煤灰具有形态效应。粉煤灰是一种由煤燃烧后产生的工业副产品, 其颗粒通常呈球形, 能够减少保温腻子各组颗粒间的摩擦阻力确保了腻子具有更好的流动性; 且粉煤灰细度较小, 能填充保温腻子间的微小孔隙形成更均质的浆体结构, 使保温腻子流动性再次提高[18]。

4.2. 干密度

图 3 显示不同玻化微珠掺量对保温腻子干密度的影响。55 wt%掺量下, 因 7 d 强度过低无法脱模, 仅记录 28 d 数据。结果显示, 随玻化微珠掺量增加, 保温腻子 7 d、28 d 干密度持续降低。45 wt%为转折点, 之前降幅显著, 之后减缓。这归因于玻化微珠的轻质多孔特性使其密度远低于水泥等组分。然而, 高掺量时, 微珠破碎增多, 破碎颗粒的紧密堆积导致干密度下降趋势减缓[19]。

图 4 显示不同粉煤灰替代量对保温腻子干密度的影响。结果表明, 随粉煤灰替代量增加, 7 d 及 28 d 干密度持续降低。主要原因为: 粉煤灰为轻质填料, 密度远小于水泥水化产物[20]。且粉煤灰活性较低, 替代水泥后仅少量参与水化反应, 因此显著降低了保温腻子的整体密度[21]。此外, 粉煤灰在搅拌中易引

入气泡, 形成多孔结构, 进一步减小了干密度。

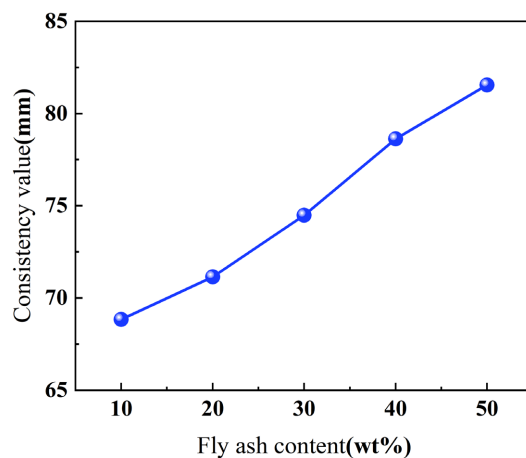


Figure 2. The influence of fly ash content on consistency
图 2. 粉煤灰掺量对稠度的影响

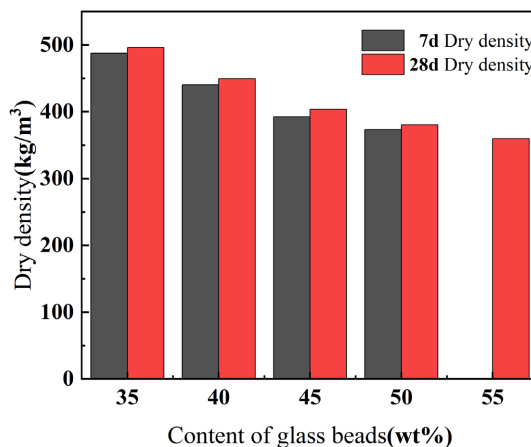


Figure 3. The influence of glass microsphere content on dry density
图 3. 玻化微珠掺量对干密度的影响

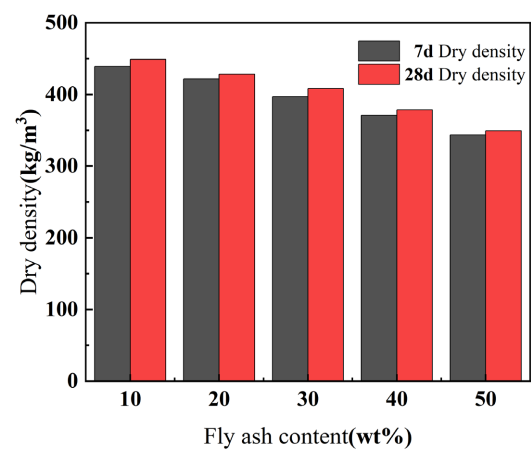


Figure 4. The influence of fly ash content on dry density
图 4. 粉煤灰掺量对干密度的影响

4.3. 抗压强度和抗折强度

图 5 展示不同掺量玻化微珠对保温腻子力学性能的影响。55 wt%玻化微珠时, 保温腻子 7 d 抗压强度过低未脱模, 因此仅记录 28 d 数据。结果显示, 随玻化微珠掺量增加, 抗压、抗折强度持续降低, 降幅分别为 21.7%~34.2%和 11.18%~23.09%。这是因为玻化微珠为低密度、低强度材料, 其掺量增加稀释了高强度水泥基体, 削弱了整体承载能力[22]。同时, 玻化微珠与水泥浆体界面结合较弱, 高掺量导致弱界面区增多, 易引发应力集中, 成为裂纹源, 进一步劣化抗压、抗折强度[23]。

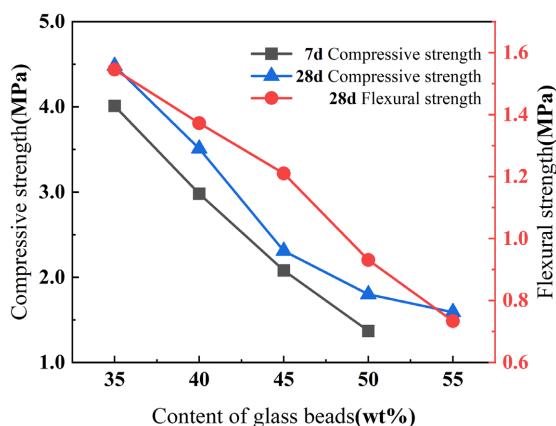


Figure 5. The influence of glass microsphere content on compressive strength and flexural strength
图 5. 玻化微珠掺量对抗压强度和抗折强度的影响

图 6 显示不同粉煤灰替代量对保温腻子力学性能的影响。随粉煤灰替代量增加, 抗压、抗折强度持续下降, 降幅分别为 4.5%~12.8%和 6.71%~14.38%, 且降幅随替代量增大而加剧。主要原因为: 粉煤灰替代水泥后, 导致水化产物生成量降低, 削弱了腻子的整体强度。虽然粉煤灰具有一定火山灰活性, 但其早期反应速率慢, 生成胶凝材料有限。高替代量下, 未反应粉煤灰增多, 主要起填充作用, 其自身强度低于水泥水化产物, 无法有效弥补水泥减少带来的强度损失, 导致减小幅度过逐渐增大[24]。

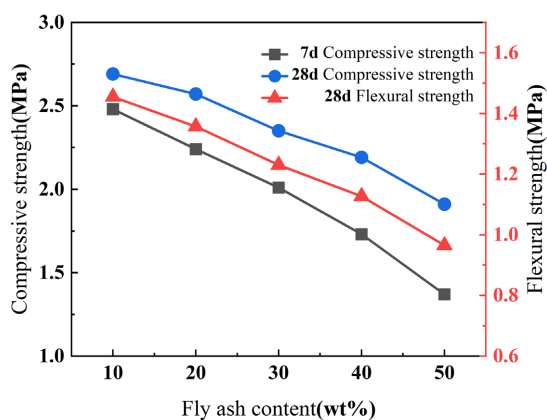


Figure 6. The influence of fly ash content on compressive strength and flexural strength
图 6. 粉煤灰掺量对抗压强度和抗折强度的影响

4.4. 导热系数

图 7 显示不同玻化微珠掺量对保温腻子导热系数的影响。随玻化微珠掺量增加, 导热系数显著降低,

降幅分别为 18.70%、19.15%、10.74%、9.85%。当玻化微珠掺量超过 45 wt% 后, 导热系数下降速率减缓。这是因为玻化微珠独特的表面玻化封闭与内部多孔空腔结构, 有效阻断了热传导路径, 降低了材料导热系数[25]。然而, 高掺量易导致玻化微珠在搅拌及施工中破碎, 破坏其多孔结构, 削弱了隔热效果。此外, 玻化微珠的隔热作用存在饱和效应, 超过一定掺量后, 对导热系数的改善作用有限, 因此导热系数下降速率减缓。

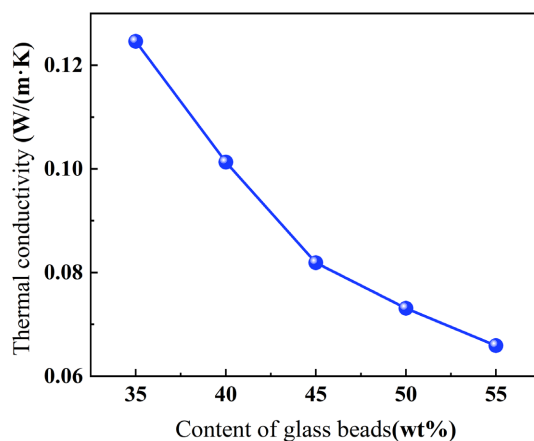


Figure 7. The influence of glass microsphere content on thermal conductivity

图 7. 玻化微珠掺量对导热系数的影响

图 8 显示不同粉煤灰替代量对保温腻子导热系数的影响。随粉煤灰替代量增加, 导热系数逐步下降, 降幅分别为 3.14%、5.91%、8.99%、7.71%, 且在 40 wt% 时降幅逐渐增大。这是因为粉煤灰具有低导热系数的孔隙结构, 替代水泥后, 保温腻子整体导热系数降低。在掺量较小时, 材料密实度增加虽增强固体热传导, 但不足以抵消粉煤灰替代水泥带来的导热性降低。随着替代量增加, 粉煤灰的孔隙结构提升了材料整体孔隙率, 孔隙内空气(低导热系数)增多, 主导了材料整体导热系数的进一步降低, 且降幅随之增大。

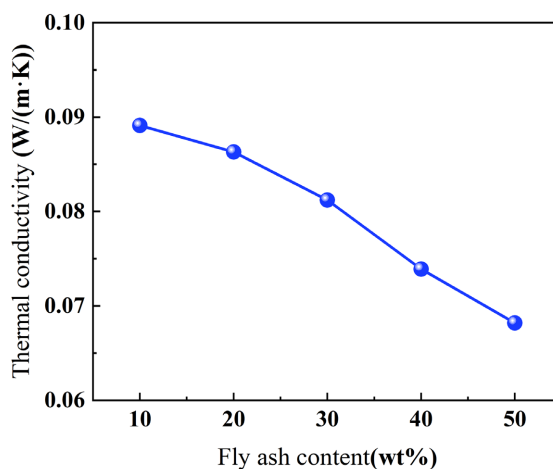


Figure 8. The influence of fly ash content on thermal conductivity

图 8. 粉煤灰掺量对导热系数的影响

4.5. 吸水率和软化系数

图 9 显示, 随玻化微珠掺量增加, 保温腻子的吸水率逐渐升高, 且升高幅度逐渐增大, 尤其在达到

45 wt%后增幅显著。玻化微珠虽表面玻化封闭吸水性低,但其内部多孔结构在搅拌时易破碎,高掺量下破碎比率增大。破碎后,内部空腔暴露,形成“储水”孔隙,导致吸水率上升,且升高幅度逐渐增大。同时,软化系数随玻化微珠掺量增加而降低。这是因为破碎产生的孔隙及吸水增加,易引发应力集中,促进裂纹扩展,削弱材料内部结构稳定性,导致抗压强度下降,进而降低软化系数。

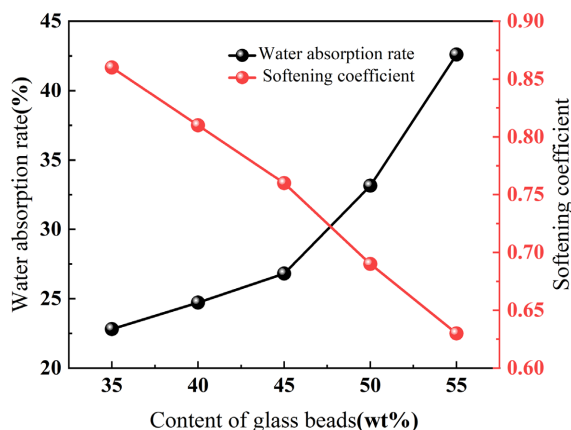


Figure 9. The influence of glass microsphere content on the water absorption rate and softening coefficient
图 9. 玻化微珠掺量对吸水率和软化系数的影响

图 10 显示,随粉煤灰替代量增加,保温腻子吸水率先降后升,软化系数则呈先增后减趋势。低掺量时,粉煤灰细粒径有效填充微细孔隙,改善了颗粒级配,提升了密实度,同时其二次水化反应生成的水化产物进一步填充孔隙,减少吸水途径,故吸水率降低。然而,当替代量超过 20 wt%后,吸水率回升。主要原因:在高掺量下,粉煤灰仍然只有少部分发生水化反应,而自身多孔结构在高掺量下大大增加了材料吸水能力[26]。软化系数的下降则源于高掺量时,粉煤灰反应无法补偿水泥减少带来的强度损失,水泥减少又导致保温腻子的骨架结构稳定性削弱,材料更易受水侵蚀,使其软化系数逐渐下降[27]。

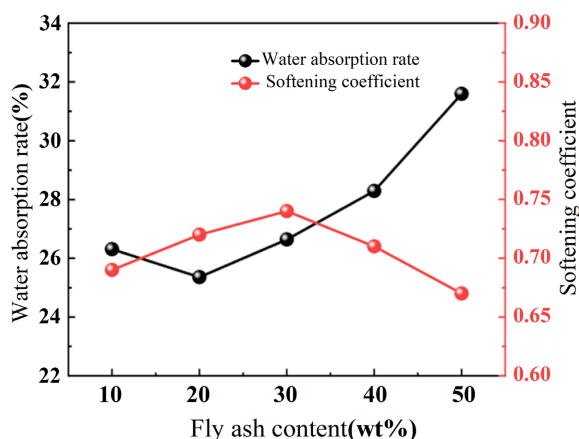
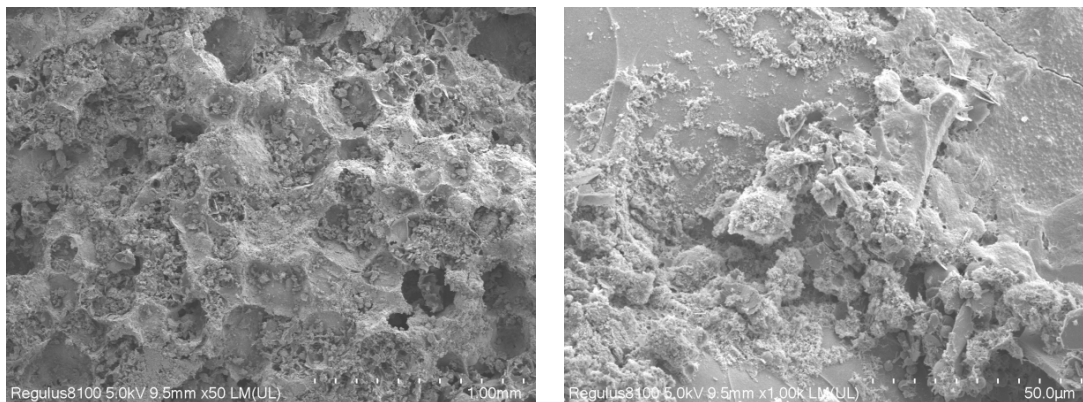


Figure 10. The influence of fly ash content on the water absorption rate and softening coefficient
图 10. 粉煤灰掺量对吸水率和软化系数的影响

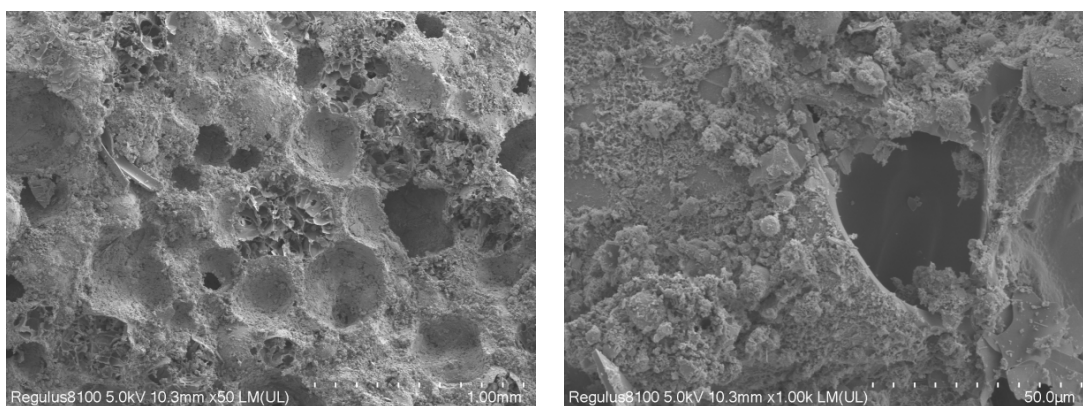
4.6. 扫描电子显微镜(SEM)

图 11(a)、图 11(b)为保温腻子放大 50 倍(左)和 1000 倍(右)的 SEM 图。当玻化微珠掺量从 35 wt%增至 45 wt%,保温腻子孔隙显著增大且更密集,破碎微珠增多。这是因为高掺量下,微珠占比提升,混合

过程因相互碰撞及自身脆性而破碎比率增加, 产生的碎珠形成新孔隙, 增加了孔隙率。同时, 高掺量玻化微珠可能影响水化产物结合, 降低基体粘结性, 进一步促进孔隙形成, 导致材料密实度降低[28]。



(a) 玻化微珠掺量 35 wt%时保温腻子的 SEM 图

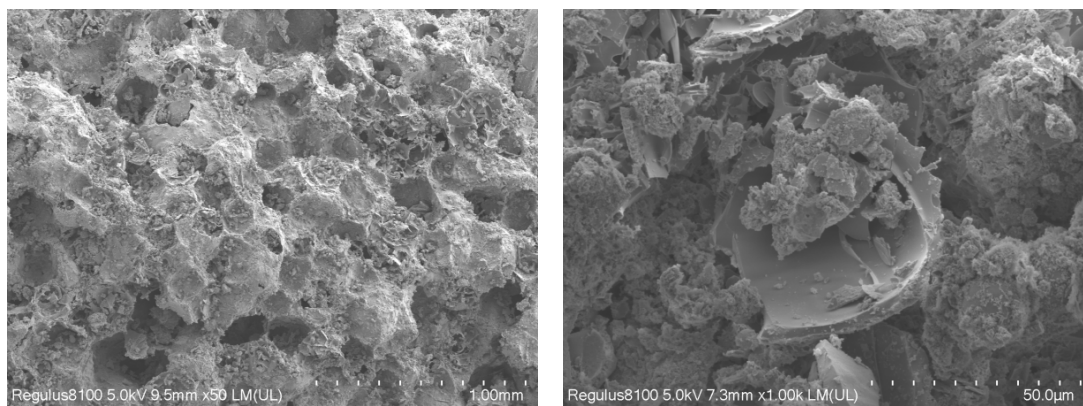


(b) 玻化微珠掺量 45 wt%时保温腻子的 SEM 图

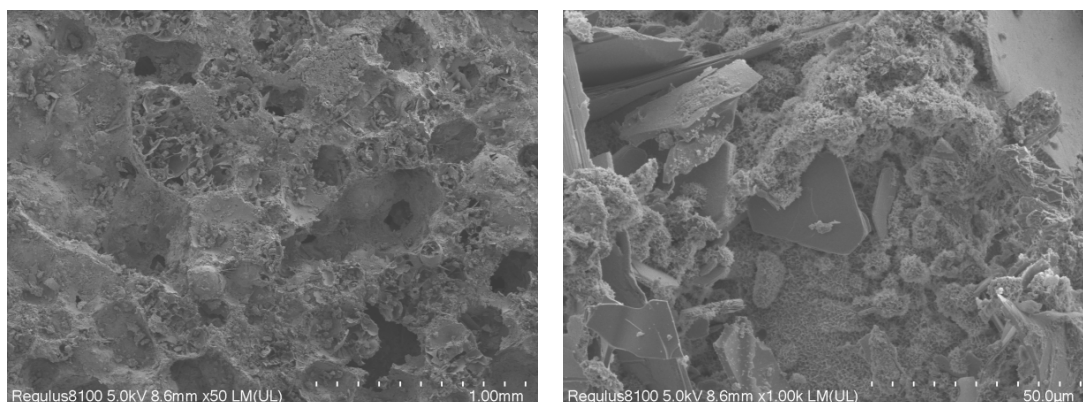
Figure 11. SEM images of insulation putty with different proportions of glass microbeads

图 11. 不同玻化微珠掺量保温腻子的 SEM 图

图 12 SEM 显示, 粉煤灰掺量由 10 wt%增至 40 wt%, 保温腻子孔隙率降低, 结构更致密。因粉煤灰粒径小, 高掺量下能有效填充水泥颗粒及水化产物间隙, 减少孔隙的数量和大小。同时, 粉煤灰作为火山灰质材料, 其二次水化反应生成胶凝物质, 进一步填充孔隙, 能使颗粒间更粘结, 从而显著提高保温腻子密实度。



(a) 粉煤灰掺量 10 wt%时保温腻子的 SEM 图

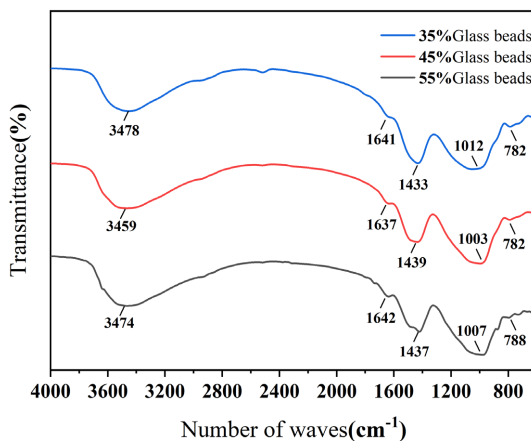


(b) 粉煤灰掺量 40 wt% 时保温腻子的 SEM 图

Figure 12. SEM images of thermal insulation putty with different amounts of fly ash content**图 12.** 不同粉煤灰掺量保温腻子的 SEM 图

4.7. 红外光谱分析(FTIR)

图 13 展示了玻化微珠掺量分别为 35%、45%、55% 的保温腻子傅里叶红外光谱。分析表明, 各配方化学组成与官能团高度相似。3459~3478 cm^{-1} 及 1640 cm^{-1} 处的吸收峰归因于羟基(-OH)或氢键伸缩振动及 H-O-H 弯曲振动, 主要源于样品残留自由水, 同时还有聚合物添加剂(如乳胶粉、纤维素醚)引入的羟基。1437 cm^{-1} 处的峰对应碳酸根(CO_3^{2-})中 O-C-O 键的伸缩振动峰, 与水化产物(如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$)与 CO_2 反应生成的 CaCO_3 有关[29]。从图中可以发现, 随着玻化微珠掺量增加, 该峰强度减弱, 这是由于微珠附着于水泥颗粒表面, 阻碍了水化进程, 减缓了早期水化反应。1007~1012 cm^{-1} 和 788 cm^{-1} 处的峰分别为 Si-O 键的不对称伸缩振动峰与 Si-O-Si 的对称伸缩振动峰, 反映了材料中硅酸盐基体的存在。这既源于水泥水化生成的水化硅酸钙, 也来自玻化微珠中的 SiO_2 。

**Figure 13.** Infrared spectrogram of insulation putty under different proportions of glass microspheres**图 13.** 不同玻化微珠掺量下保温腻子的红外光谱图

5. 结论

本研究采用单因素试验法, 系统探究了玻化微珠与粉煤灰掺量对玻化微珠保温腻子流动性、干密度、力学性能、耐水性能、保温性能的影响, 并通过微观分析揭示了其作用机理。主要结论如下:

(1) 发现随着玻化微珠掺量的增加, 保温腻子稠度持续减小, 流动性变差; 而随着粉煤灰替代量的增

加, 稠度逐渐增大, 流动性变好;

(2) 随着玻化微珠掺量增加, 保温腻子干密度持续下降, 降幅在 45 wt%以下显著, 之后减缓。粉煤灰替代量增加亦使干密度逐步降低;

(3) 随玻化微珠掺量增加, 保温腻子导热系数逐渐降低, 降幅在 45 wt%后减缓。粉煤灰替代量增加亦降低导热系数, 40 wt%前降幅更显著;

(4) 力学性能研究表明, 玻化微珠和粉煤灰掺量增加均导致抗压、抗折强度下降, 后者降幅随掺量增大更显著。综合性能考虑, 增加粉煤灰至 40 wt%在优化保温的同时, 对力学性能的负面影响较小, 故建议采用此掺量;

(5) 耐水性能测试表明, 玻化微珠掺量增加导致保温腻子吸水率升高且幅度逐渐增大, 软化系数降低。粉煤灰替代量增加则使吸水率先降后升, 软化系数先增后减;

(6) SEM 显示玻化微珠掺量增多导致孔隙增大、破碎珠比率增多, 而粉煤灰掺量增多则使断面结构更致密。FTIR 结果则说明玻化微珠抑制了材料水化反应;

(7) 综合评估表明, 玻化微珠掺量 45 wt%、粉煤灰替代水泥 40 wt%时, 保温腻子流动性、干密度、导热性、力学及耐水性能最优, 此为玻化微珠与粉煤灰的协同最佳掺量组合。

参考文献

- [1] 牛春刚, 朱玲. 建筑业绿色低碳转型的关键技术研究[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(8): 133-135.
- [2] 江亿, 胡珊. 中国建筑部门实现碳中和的路径[J]. 暖通空调, 2021, 51(5): 1-13.
- [3] Miryuk, O., Fediuk, R. and Amran, M. (2022) Porous Fly Ash/Aluminosilicate Microspheres-Based Composites Containing Lightweight Granules Using Liquid Glass as Binder. *Polymers*, **14**, Article No. 3461. <https://doi.org/10.3390/polym14173461>
- [4] You, Y., Park, H. and Dembsey, N.A. (2023) Development of an Optimization Tool for Wall-Insulation Systems with a Focus on Fire Safety. *Fire Technology*, **61**, 89-113. <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01479-4>
- [5] 徐峰, 蒋宇平, 王鹏, 等. TJY 建筑保温腻子的研制[J]. 上海涂料, 2020, 58(5): 19-22.
- [6] Ali, A., Issa, A. and Elshaer, A. (2024) A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Energy Conservation in Buildings. *Sustainability*, **16**, Article No. 8782. <https://doi.org/10.3390/su16208782>
- [7] Wang, J. (2020) Analysis of New Inorganic Exterior Insulation Materials and Thermal Energy Storage. *Thermal Science*, **24**, 3195-3203. <https://doi.org/10.2298/tsci191116110w>
- [8] Jelle, B.P. (2011) Traditional, State-of-the-Art and Future Thermal Building Insulation Materials and Solutions—Properties, Requirements and Possibilities. *Energy and Buildings*, **43**, 2549-2563. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015>
- [9] Wi, S., Yang, S., Kim, Y.U., Kang, Y. and Kim, S. (2022) Toxicity Characteristics and Fire Retardant Performance of Commercially Manufactured Organic Insulation Materials for Building Applications. *Construction and Building Materials*, **341**, Article ID: 127898. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127898>
- [10] Feng, T., Xu, L., Shi, X., Han, J. and Zhang, P. (2021) Investigation and Preparation of the Plastering Mortar for Autoclaved Aerated Blocks Walls. *Crystals*, **11**, Article No. 175. <https://doi.org/10.3390/cryst11020175>
- [11] Jiang, D., Lv, S., Cui, S., Sun, S., Song, X., He, S., et al. (2020) Effect of Thermal Insulation Components on Physical and Mechanical Properties of Plant Fibre Composite Thermal Insulation Mortar. *Journal of Materials Research and Technology*, **9**, 12996-13013. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.009>
- [12] Othuman Mydin, M.A., Mohd Nawi, M.N., Odeh, R.A. and Salameh, A.A. (2022) Durability Properties of Lightweight Foamed Concrete Reinforced with Lignocellulosic Fibers. *Materials*, **15**, Article No. 4259. <https://doi.org/10.3390/ma15124259>
- [13] Kabay, N., Miyan, N. and Özkan, H. (2021) Utilization of Pumice Powder and Glass Microspheres in Cement Mortar Using Paste Replacement Methodology. *Construction and Building Materials*, **282**, Article ID: 122691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122691>
- [14] 龚建清, 孙凯强, 龚建清, 等. 不同水胶比对比玻化微珠保温砂浆性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017(1): 143-149.

- [15] 西振国, 西振国. 基于响应曲面法的玻化微珠保温砂浆基本性能研究[J]. 甘肃科技, 2024, 40(5): 20-24.
- [16] Li, D., Pan, Y., Liu, C., Chen, P., Wu, Y., Liu, J., *et al.* (2023) Optimal Design of Glazed Hollow Bead Thermal Insulation Mortar Containing Fly Ash and Slag Based on Response Surface Methodology. *Reviews on Advanced Materials Science*, **62**, Article ID: 20220313. <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0313>
- [17] 黄伟, 葛进进, 等. 粉煤灰-干粉玻化微珠复合保温砂浆性能分析[J]. 长江大学学报(自科版), 2017, 14(13): 39-43.
- [18] Li, Z., Xu, G. and Shi, X. (2021) Reactivity of Coal Fly Ash Used in Cementitious Binder Systems: A State-of-the-Art Overview. *Fuel*, **301**, Article ID: 121031. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121031>
- [19] Ni, G., Fu, Z., Li, Z., Sun, G., Zhang, X., Wang, G., *et al.* (2024) Performance Study of New Lightweight Cementitious Composites with Glass Beads as Filler. *Journal of Building Engineering*, **90**, Article ID: 109477. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109477>
- [20] Hanif, A., Lu, Z. and Li, Z. (2017) Utilization of Fly Ash Cenosphere as Lightweight Filler in Cement-Based Composites—A Review. *Construction and Building Materials*, **144**, 373-384. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.188>
- [21] Park, B. and Choi, Y.C. (2022) Effects of Fineness and Chemical Activators on the Hydration and Physical Properties of High-Volume Fly-Ash Cement Pastes. *Journal of Building Engineering*, **51**, Article ID: 104274. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104274>
- [22] Lu, J., Shen, P., Ali, H.A. and Poon, C.S. (2021) Development of High Performance Lightweight Concrete Using Ultra High Performance Cementitious Composite and Different Lightweight Aggregates. *Cement and Concrete Composites*, **124**, Article ID: 104277. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104277>
- [23] Scott, N.R., Stoddard, D.L., Nelms, M.D., Wallace, Z., Turner, I., Turner, L., *et al.* (2022) Experimental and Computational Characterization of Glass Microsphere-Cementitious Composites. *Cement and Concrete Research*, **152**, Article ID: 106671. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106671>
- [24] Bai, E., *et al.* (2019) Tensile Properties of a Flexible Polymer-Cement Composite Containing Portland Cement and VAE Emulsion. *Ceramics-Silikaty*, **64**, 92-99. <https://doi.org/10.13168/cs.2019.0053>
- [25] Batista, I.L.R., Cabral, K.C., de Souza, W.R.M., de Sousa Fontes, A.É.M. and Martinelli, A.E. (2024) Influence of Hydroxypropylmethylcellulose (HPMC) on Thermal and Mechanical Performance of Cementitious Rendering Mortars. *Materials and Structures*, **57**, Article No. 25. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02297-y>
- [26] Li, X., Bai, C., Qiao, Y., Wang, X., Yang, K. and Colombo, P. (2022) Preparation, Properties and Applications of Fly Ash-Based Porous Geopolymers: A Review. *Journal of Cleaner Production*, **359**, Article ID: 132043. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132043>
- [27] Bala, A., Shelote, K. and Gupta, S. (2024) Durability and Cost Analysis of High-Volume Fly Ash Blended Self-Compacting Mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **36**, Article ID: 04024002. <https://doi.org/10.1061/jmce7.mteng-16780>
- [28] 王巧氢. 掺入玻化微珠的机制砂保温干混砂浆的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- [29] Dai, Y., Yang, R., Xu, C., Al-Mansour, A., Lan, Y., Peng, Y., *et al.* (2023) *In-Situ* M-Xct Characterization of Cement-Waterborne Epoxy Resin Coalescence. *Construction and Building Materials*, **377**, Article ID: 131161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131161>