

空心玻璃微珠改性膨胀珍珠岩板的制备与性能研究

周 健^{1*}, 郭胜飞², 白少伟², 王龙涛², 林双龙¹, 胡江浦¹, 次立杰¹

¹ 石家庄学院, 石家庄市绿色装饰板材技术创新中心 河北石家庄

² 广骏新材料科技股份有限公司, 河北省节能住宅保温材料技术创新中心 河北石家庄

【摘要】为了解决传统膨胀珍珠岩板抗压强度低、导热系数高的问题,本文采用空心玻璃微珠(HGM)对其进行改性。将HGM、水泥、膨胀珍珠岩粉、胶粉、纤维及水按比例混合制备成砂浆,再将其灌入特定尺寸的模具中,经过养护、干燥,制得测试样块。通过激光粒度、红外、扫描电镜表征了HGM的形貌与官能团,系统测试了样块的容重、抗压强度、导热系数,并与未改性板材进行对比。实验表明:5%HGM掺量为综合最优配比,其容重408.7 kg/m³、抗压强度1134.3 kPa、导热系数0.085193 W/(m·K),均优于未掺HGM的珍珠岩板。其核心机理为:5%掺量时完整HGM占主体,破碎少,形成“点-壳”骨架,既切断了热桥又分担了载荷;当空心玻璃微珠掺量≥10%后,微珠破碎率提高,容重和导热系数反弹,强度虽有提升,却是以牺牲轻质为代价。本研究为外墙保温轻质高强板材提供了5%空心玻璃微珠均衡配比及其机理依据,为后续改善工艺以减少破损打下基础。

【关键词】珍珠岩板; 空心玻璃微珠; 容重; 抗压强度; 导热系数

【基金项目】石家庄市驻冀高校产学研合作项目 241160101A; 石家庄市科技计划项目 231070271

【收稿日期】2024 年 11 月 25 日 **【出刊日期】**2024 年 12 月 20 日 **【DOI】**10.12208/j.ijms.20240010

Preparation and properties of hollow glass microsphere modified expanded perlite board

Jian Zhou^{1*}, Shengfei Guo², Shaowei Bai², Longtao Wang², Shuanglong Lin¹, Jiangpu Hu¹, Lijie Ci¹

¹Shijiazhuang University, Shijiazhuang, Hebei

²Guangjun New Materials Co., Ltd., Hebei Energy Saving Residential Insulation Material Technology Innovation Center, Shijiazhuang, Hebei

【Abstract】To address the limitations of traditional perlite boards—namely, low compressive strength and inadequate thermal insulation—this study introduced hollow glass microspheres (HGM) into the formulation. A mortar was prepared by combining HGM, cement, perlite powder, adhesive powder, fibers, and water in specific ratios. This mixture was poured into molds of defined dimensions. After curing and drying, test specimens of suitable sizes were obtained. The morphology and functional groups of HGM were characterized by laser particle size, infrared and scanning electron microscopy. Their bulk density, compressive strength, and thermal conductivity were then measured and compared with those of control specimens without HGM. The results showed that the modified perlite board containing 5% HGM demonstrated the most balanced overall performance, with a bulk density of 408.7 kg/m³, compressive strength of 1134.3 kPa, and thermal conductivity of 0.085193 W/(m·K)—all representing improvements over the unmodified specimens. The core mechanism is as follows: at 5% dosage, intact HGM predominate with minimal fragmentation, forming a "point-shell" framework that effectively cuts thermal bridges while distributing loads. However, when the microbead content increases to ≥10%, the fragmentation rate rises, causing a rebound in bulk density and thermal conductivity. Although strength improves, this enhancement comes at the expense of reduced lightweight performance. This study provides a balanced 5% hollow glass microbead ratio and its mechanistic basis for lightweight high-strength exterior wall insulation boards, laying the foundation for

*通讯作者: 周健(1983-)男, 高级工程师, 研究方向: 材料学。

subsequent process optimization to reduce breakage.

【Keywords】Perlite board; HGM; Bulk density; Compression strength; Thermal conductivity

前言

随着我国社会经济的高速发展, 能源的消耗越来越高, 其中建筑能耗尤为突出, 据统计, 建筑能耗约占国民经济总能耗的 30%~50%^[1-3]。因此, 对建筑节能提出了更高的要求。建筑节能的一个重要部分是建筑围护结构的保温, 其中, 尤其以外墙外保温技术发展最为迅速。外墙外保温技术能够通过改善墙体潮湿, 防止内墙结露, 消除热桥, 保持室温稳定, 从而延长建筑物寿命, 现已逐步发展为建筑围护结构保温的主流技术^[4]。我国在发展节能减排和建筑节能材料的过程中, 建筑外墙外保温材料大多以有机保温材料为主^[5,6], 如: 聚苯板、改性聚苯板、挤塑板等, 其特点是保温性能佳、密度低、施工简单、价格便宜^[7]。然而, 有机材料的防火等级较低, 近年来在国内外高层建筑的使用中, 外墙外保温材料引起的火灾不断发生, 造成了巨大的损失和人员伤亡, 引起了人们的高度重视。与有机材料相比, 无机建筑材料则具有较好的阻燃效果, 但重量却相对较高, 长时间使用后容易造成外墙脱落。因此, 选择一种轻质、隔热、强度高的无机型外墙外保温建筑材料成为研究热点之一。

膨胀珍珠岩板是一种将珍珠岩、松脂岩、黑曜岩矿石等原料, 经破碎、筛分、预热并在 1260℃左右高温中悬浮瞬时急剧加热膨胀制成多孔颗粒状材料后, 再与无机胶凝材料、外加剂等混合, 然后经过加压成型、烘干、养护等工序而制成的板材^[8]。膨胀珍珠岩保温板密度低、导热性差、且稳定性和强度较高, 可达到 A 级防火性能, 是一种良好的保温材料^[9]。

然而, 随着隔热保温材料使用行业的迅速发展, 传统保温产品已不能满足社会和工业需求。尤其是在世界能源危机的今天, 大力倡导有效地利用热能, 保护环境, 节约能源, 积极地开发和研究高性能隔热保温材料显得尤为重要。因此, 开发质量更轻、强度更高的保温材料势在必行^[10,11]。

其中, 空心玻璃微珠(Hollow Glass Microspheres, HGM)是一种比膨胀珍珠岩更轻的材料, 其密度只有 0.08~0.60 g/cm³ (即 80~600 kg/m³), 其主要成分为硼硅酸盐, 具有中空、轻质、耐热、化学性能稳定

性好等特点, 因此为誉为“二十一世纪的空间材料”^[12-15], 在石油钻井、隔热保温涂料、工程塑料、橡胶弹性体、重防腐涂料、胶黏剂、浮力材料、乳化炸药、电磁屏蔽材料等领域有着广阔的应用空间^[16-21]。基于空心玻璃微珠的一系列优势, 我们将空心玻璃微珠对传统珍珠岩板进行改性, 旨在制备一种质量比珍珠岩板更轻、强度更高、更加隔热保温的外墙外保温无机建筑材料, 促进建筑业绿色节能的发展^[22]。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

珍珠岩粉购自信阳弘生保温材料有限公司; 普通硅酸盐水泥(PO42.5)购自石家庄曲寨水泥有限公司; 胶粉 Vinnapas 4115 N, 购自德国瓦克化学有限公司; 聚丙烯纤维购自灵寿县嘉硕建材加工有限公司; 空心玻璃微珠(HGM), 购自温州维真新材料有限公司。

砂浆搅拌机 HJW-60, 广骏新材料科技股份有限公司; IKARW20 Digital 机械搅拌器; Bettersize2600 激光粒度分布仪; 中科锐捷 Great 20 傅里叶变换红外光谱仪; 日立 SU8600 扫描电子显微镜; 双平板导热系数测定仪 IMDRY3001-II, 英贝儿(天津)测控设备有限责任公司; 电子万能试验机 ZNWDW-20, 济南中诺仪器设备有限公司。

1.2 实验方法

本实验的基础配方(不含 HGM)为: 珍珠岩粉 13.5kg, 水泥 11.8kg, 胶粉 160 g, 聚丙烯纤维 116 g, 水 20 kg。按配方称量原材料, 并按照膨胀珍珠岩粉、水泥、胶粉、聚丙烯纤维和水的顺序加入砂浆搅拌机, 搅拌 30 min, 得到基础砂浆。取出 2.5 kg 基础砂浆于小桶中, 加入一定量的 HGM, 用机械搅拌器继续低速搅拌 10 min, 得到均匀的混合砂浆, 再将其倾倒入模具中(根据不同测试项目使用不同的模具), 养护, 晾干, 脱模, 再加热硬化, 即得到待测试样。

1.3 实验表征

1.3.1 容重和抗压强度

按照 1.2 中的试验方法, 将试样制成 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方块, 每个配方制备 3 块, 见图 1。参考标准 GB/T20473-2021, 测试每个样块的容重和抗压强度, 计算平均值。

1.3.2 导热系数

参考标准 GB/T20473-2021, 按 1.2 中的试验方法,

将试样制成 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的板状测试块, 见图 2, 相同的样块制备两块, 测试样块的导热系数。



图 1 容重及抗压强度测试样块图



图 2 导热系数测试样块图

2 结果与讨论

2.1 激光粒度分析

使用激光粒度分布仪对 HGM 的粒度进行分析,

结果见图 3。可以看出, HGM 的粒度范围为 $2\sim 200\text{ }\mu\text{m}$, 其体积加权平均粒径为 $42.14\text{ }\mu\text{m}$, 其中分布最多的粒径范围是 $37.49\sim 42.17\text{ }\mu\text{m}$, 其区间分布为 6.0%。

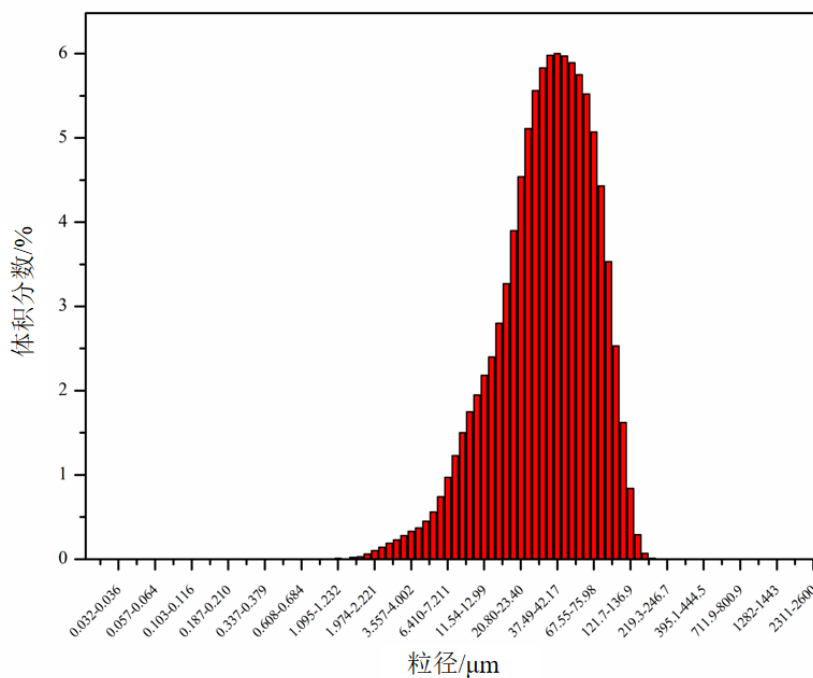


图 3 空心玻璃微珠的粒径分布

2.2 FTIR 红外光谱分析

使用傅里叶变换红外光谱仪对 HGM 进行红外光谱分析, 用 KBr 压片法进行制样, 结果见图 4。

其中, 3458 cm^{-1} 是 Si-OH 的 O-H 伸缩振动峰, 976 cm^{-1}

cm^{-1} 是玻璃微珠网络中 Si-O-Si 的不对称伸缩振动峰, 780 cm^{-1} 是无定形 SiO_2 中 Si-O-Si 的对称伸缩振动峰, 458 cm^{-1} 是 Si-O 弯曲振动峰。

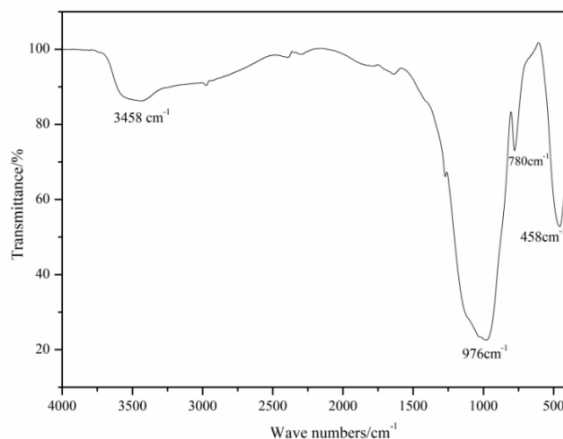


图 4 空心玻璃微珠红外光谱图

2.3 空心玻璃微珠对容重的影响

固定珍珠岩、水泥、胶粉和纤维的量, 仅改变空

心玻璃微珠的量, 进行制样, 测试不同配方的容重, 见表 1 和图 5:

表 1 空心玻璃微珠对容重的影响

容重	1# (kg/m^3)	2# (kg/m^3)	3# (kg/m^3)	平均值 (kg/m^3)
不含 HGM	433.60	427.26	425.06	428.6
1%HGM	344.46	345.72	343.24	344.5
3%HGM	350.39	351.53	356.25	352.7
5%HGM	410.68	412.11	403.24	408.7
10%HGM	414.15	419.04	416.39	416.5
20%HGM	507.88	496.93	510.64	505.2

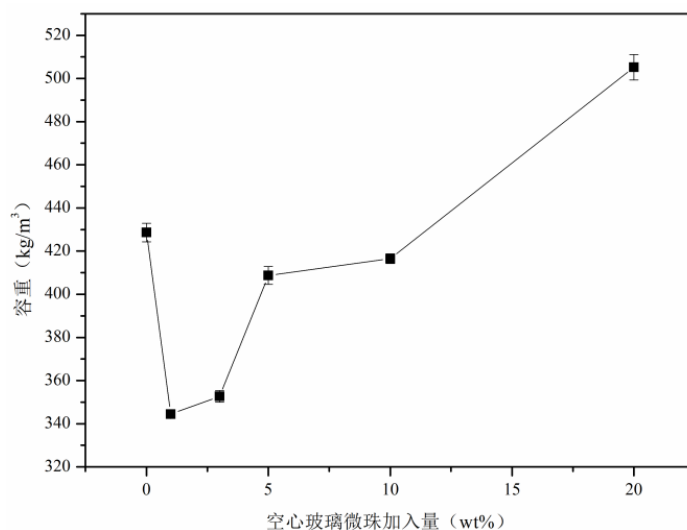


图 5 空心玻璃微珠对容重的影响

由表 1 和图 5 可以看出: 当不掺 HGM 时, 样块的容重为 422 kg/m^3 。当掺入 1%~3%HGM 时, 容重下降至 $344.5\sim352.7\text{ kg/m}^3$, 这是因为 HGM 的表观密度 ($0.08\sim0.60\text{ g/cm}^3$, 即 $80\sim600\text{ kg/m}^3$) 远低于珍珠岩 ($0.8\sim1.2\text{ g/cm}^3$, $800\sim1200\text{ kg/m}^3$) 和水泥 ($\approx 3.1\text{ g/cm}^3$, 3100 kg/m^3), 微珠内部封闭空气体积大于被顶替材料的体积, 总质量下降而总体积几乎不变, 因此容重降低。当 HGM 增至 5%~10% 时, 容重反弹至 $408.7\sim416.5\text{ kg/m}^3$, 高于 3% 水平, 但仍低于无 HGM 基准 ($\approx 420\text{ kg/m}^3$), 这是由于微珠间相互挤压, 部分空心微珠破碎, 由 $0.2\sim0.4\text{ g/cm}^3$ ($200\sim400$

kg/m^3) 的空心壳变为 2.5 g/cm^3 (2500 kg/m^3) 的实心玻璃片, 失去了轻质优势, 同时破碎片与砂浆共同填充原 HGM 所占的宏观空隙, 使体系孔隙率下降, 容重回升。HGM 掺量继续增至 20% 时, 容重升至 505.2 kg/m^3 , 已高于无 HGM 基准, 表明更多空心壳破碎, 大量密度为 2500 kg/m^3 的玻璃片取代密度为 $200\sim400\text{ kg/m}^3$ 的空腔, 所以容重显著增加。

2.4 空心玻璃微珠对抗压强度的影响

固定珍珠岩、水泥和胶粉的量, 仅改变空心玻璃微珠的量, 进行制样, 测试不同配方的抗压强度, 见表 2 和图 6。

表 2 空心玻璃微珠对抗压强度的影响

抗压强度	1# (kPa)	2# (kPa)	3# (kPa)	平均值 (kPa)
不含 HGM	1736.86	1847.32	1741.15	1775.1
1%HGM	883.27	831.62	746.95	820.6
3%HGM	819.96	922.71	832.52	858.4
5%HGM	1133.16	1194.67	1075.12	1134.3
10%HGM	1363.15	1439.46	1329.18	1377.3
20%HGM	1370.75	1306.22	1362.72	1346.6

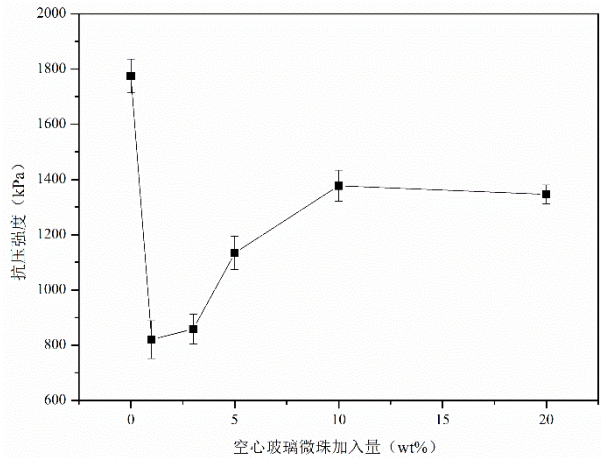


图 6 空心玻璃微珠对抗压强度的影响

由表 2 和图 6 可见: 未掺入 HGM 时, 样块抗压强度为 1775.1 kPa 。掺入 1%~3%HGM 时, 抗压强度降至 $820.6\sim858.4\text{ kPa}$, 此时微珠稀少、彼此孤立, 未能形成有效骨架, 而且玻璃-基体界面结合弱, 受压后界面处应力集中, 导致强度显著下降。掺入 5%HGM 时, 强度明显回升至 1134.3 kPa , 这是由于微珠密度增加, 开始相互接触并与珍珠岩形成“微珠-珍珠岩”复合连续骨架, 应力传递路径增多, 抗压性能改善。当掺入 10%~20%HGM 时, 强度继续升至 1300 kPa 以上, 这是由于高掺量下微珠间相互挤压,

部分空心壳破碎, 生成密度为 2.5 g/cm^3 的刚性玻璃碎片, 同时填充原有大孔隙, 使基体进一步致密化, 但这种增密是以容重大幅上升和隔热性能下降为代价的, 并不是单纯的强度提升, 因此, 5%~10%HGM 区间为强度-容重-导热协同最优窗口, 过高掺量仅通过“增重致密”提升强度, 与轻质初衷相悖。

2.5 空心玻璃微珠对导热系数的影响

固定珍珠岩、水泥和胶粉的量, 仅改变空心玻璃微珠的量, 进行制样, 测试不同配方的导热系数, 见图 7。

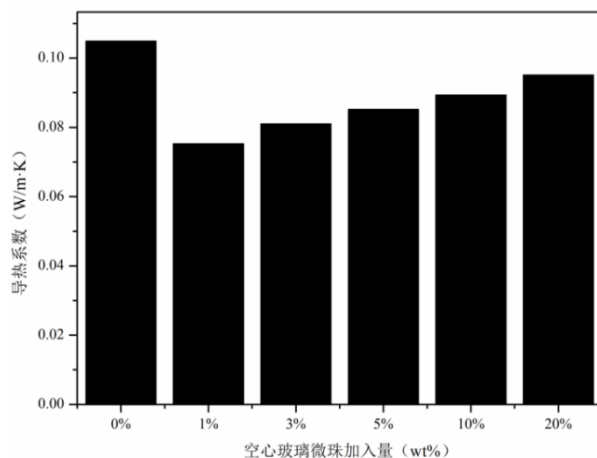


图7 空心玻璃微珠对导热系数的影响

由图7可见, 导热系数随HGM掺量呈“先骤降, 再微升, 然后持续升高”的趋势。当不掺入HGM时, 导热系数为0.104881 W/m·K。当掺入1%HGM时, 导热系数骤降至0.075284 W/m·K (降幅28%), 这时微珠稀少、分散均匀, 几乎无团聚, 每个空心球内部惰性气体及玻璃-基体界面形成大量“点状热阻”, 热传导路径被最大程度截断, 因此整体热阻最大。当掺入3%HGM时, 导热系数微升至0.081014 W/m·K, 此时微珠间距缩小, 局部出现“珠-珠”接触, 形成少量固相热桥, 热量可沿接触点跳跃传导, 导致整体热阻略有下降。当掺入5%~20%HGM时, 导热系数持续升高 (由0.085193 W/m·K升至0.089325 W/m·K再升至0.095132 W/m·K), 此时团聚网络逐渐完整, 固相热桥密度增加, 同时破碎玻

璃片 (密度为2.5 g/cm³) 填充原有大孔隙, 基体有效导热系数升高, 但导热系数仍未回到无HGM时的水平, 说明体系中仍存在大量空心微球, 总体隔热性能优于掺入HGM之前。

综上, 1%~3%HGM为隔热最优区间; 当HGM掺量≥5%后热桥效应起主导, 隔热效果递减, 但这与“轻质高强”综合最优窗口 (5%~10%) 并不矛盾, 因为该窗口需要在强度、容重与导热三者间平衡。

2.6 空心玻璃微珠在珍珠岩板中的扫描电镜SEM分析

为了更直观理解空心玻璃微珠在珍珠岩板中的作用, 我们对掺杂5%HGM的珍珠岩板截面进行扫描电镜分析, 结果如图8。

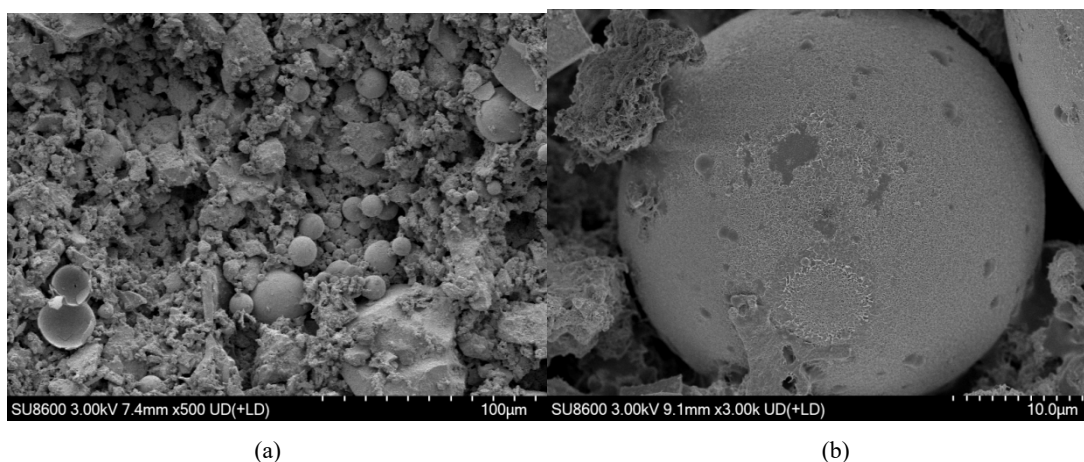


图8 掺杂空心玻璃微珠的珍珠岩板横截面SEM图: (a)×500倍; (b)×3000倍

图8给出了放大500倍和放大3000倍的岩板截面图, 由图8(a)可以看出, HGM分布在板材中, 并且能看出在5%掺量时, 大部分微球保持完整, 只有

少量微球发生破碎。图8(b)给出了一个单一玻璃微珠, 其粒径约为30~40 μm, 这与前面的激光粒度的结果基本一致。

3 结语

(1)激光粒度与红外光谱结果表明,所用 HGM 分布最多的粒径范围是 37.49-42.17 μm , 分布窄,表面含 Si-OH 与烷氧基,为后续界面偶联提供活性位点;

(2)HGM 掺量对珍珠岩板性能呈“先优后劣”趋势:掺量为 1%~3%时容重与导热系数显著下降,但抗压强度低(<0.9 MPa),掺量为 5%时三指标达到均衡:容重 409 kg/m^3 (下降 4.5%)、抗压强度 1.1 MPa(满足 ≥ 0.8 MPa 的国标)、导热系数 0.085 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (下降 18.8%),掺量 $\geq 10\%$ 后 HGM 破损率提高,增密效应使容重与导热反弹,强度提升以牺牲轻质为代价,与高强轻质的初衷相悖;

(3)SEM 证实 5%掺量下 HGM 多数较完整,形成“点-壳”骨架;

(4)本研究确定 5% HGM 为膨胀珍珠岩板综合最优配比,后续将优化工艺,使破碎率进一步下降,并开展户外耐久性验证。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Kwok K Y G, Jonghoon K, Wai K, et al. Structuring a comprehensive carbon-emission framework for the whole life-cycle of building, operation, and construction[J]. Journal of Architectural Engineering, 2016, 22(3): 04016006.
- [3] 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023 年)[R]. 建筑, 2024, (2): 46-59.
- [4] 王飞. 框架结构外围护墙膨胀珍珠岩板保温饰面层抗震性能试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
- [5] 邢军, 赵英良, 孙晓刚, 等. 外墙泡沫保温材料的技术现状及用铁尾矿试制[J]. 有色金属: 矿山部分. 2016, 68(4): 45-49.
- [6] 王颖佳. 新型轻质高强材料在装配式建筑中的应用[J]. 建材与装饰. 2016, 24(20): 138-139.
- [7] 高锦秀. 新型建筑墙体无机保温隔热板材的研究与开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [8] 李占兵. 膨胀珍珠岩保温板的制备及性能研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [9] 王文娟. 膨胀珍珠岩保温板在建筑节能中的应用[J]. 江苏建材. 2024, 1: 26-27.
- [10] 魏莹莹, 胡文, 聂成才. 绿色环保建筑材料及其应用[J]. 江西建材. 2016, (1): 29.
- [11] 王岩, 王玮玮, 白锡庆, 等. 墙体保温材料的现状及其发展趋势[J]. 天津建设科技, 2017, 27(1): 1-3+11.
- [12] 马玉民, 蔡耀武, 张勇, 等. 空心玻璃微珠的研究进展和应用现状[J]. 有机硅材料. 2023, 37(4): 75-80.
- [13] 申娜娜. 空心玻璃微珠轻质高强材料的制备与性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [14] 桂术鹏. 空心玻璃微珠的制备及性能研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [15] 韩复兴. 我国空心玻璃微珠制备技术进展与发展方向[J]. 佛山陶瓷. 2022, 32(3): 6-11.
- [16] 张勇, 马玉民, 陆瑜翀, 等. 空心玻璃微珠在高性能保温涂料中的应用[J]. 山东化工, 2024, 53(2): 157-160.
- [17] 彭寿, 王芸, 彭程, 等. 空心玻璃微珠制备方法及应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(6): 1508-1513.
- [18] 刘亚辉, 冯建林, 许传华. 高性能空心玻璃微珠的应用研究[J]. 化学工程与装备, 2011, 5: 33-35.
- [19] 赵体鹏, 莫荣强, 万虎. 空心玻璃微珠改性低密度 PA6 材料研究[J]. 广东化工, 2021, 48(20): 91-93+90.
- [20] 王晴, 吴陶俊, 邱琳格, 等. 空心玻璃微珠对泡沫混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2014(2): 71-74.
- [21] Qi X, Gao C, Zhang Z. Production and characterization of hollow glass microspheres with high diffusivity for hydrogen storage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(2): 1518-1530.
- [22] 李雨霏. 节能减排下绿色建筑设计的原则[J]. 低碳世界. 2018, (4): 175-176.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS