文章编号:1007-9629(2023)12-1279-07

利用废弃玻璃制备气凝胶及其改性膨胀 珍珠岩在砂浆中的应用

张 挺^{1,2,3}, 孙振平^{1,2,3,*}, 杨海静^{1,2,3}, 葛好升^{1,2}, 杜维上⁴ (1.同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室,上海 201804; 2.同济大学 材料科学与工程学 院,上海201804;3.上海市水务局城市管网智能评估与修复工程技术研究中心,上海201900; 4.上海倍诗元新材料科技有限公司,上海 200231)

摘要:从废弃玻璃中获得廉价硅源用于制备二氧化硅气凝胶(SA),并将所制得的SA负载于多孔的 膨胀珍珠岩颗粒中进行有效利用.结果表明:玻璃粉在热碱液中的溶解时间须大于4h,所形成的硅 源溶液才能制成结构较为理想的SA,其孔结构和导热性能优于水玻璃;在相对真空压力-0.08 MPa 下处理10min能够制得性能优异的负载SA的膨胀珍珠岩(EPA);将制得的EPA等体积取代膨胀珍 珠岩配制砂浆,随着取代率的提高,砂浆的导热系数随之减小.

关键词:废弃玻璃;二氧化硅气凝胶;膨胀珍珠岩;砂浆;导热系数

中图分类号:TU528.044 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.12.006

Preparation of Aerogel from Waste Glass and Its Application of Modified **Expanded Perlite in Mortar**

ZHANG Ting^{1,2,3}, SUN Zhenping^{1,2,3,*}, YANG Haijing^{1,2,3}, GE Haosheng^{1,2}, DU Weishang⁴ (1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Research Center of Intelligent Evaluation and Restoration Engineering Technology of Urban Pipe Network of Shanghai Water Bureau, Shanghai 201900, China; 4. Shanghai Beishiyuan New Materials Technology Co., Ltd., Shanghai 200231, China)

Abstract: A cheap silica source solution was obtained from waste glass for the preparation of silica aerogel (SA). Subsequently, SA was loaded in porous expanded perlite particles for effective utilization. The results show that the dissolution time of the glass powder in the hot alkali solution must be longer than 4 h, so that the formed silica source solution can be made into structurally desirable SA, whose pore structure and thermal conductivity are better than those of water glass. 10 min of processing time at a relative vacuum pressure of -0.08 MPa can produce expanded perlite loaded with silica aerogel (EPA) with better performance. The same volume of expanded perlite is substituted by EPA for mortar preparation. The thermal conductivity of the mortar decreases as the substitution ratio increases. Key words: waste glass; silica aerogel; expanded perlite; mortar; thermal conductivity

以二氧化硅气凝胶(SA)为骨料制备的砂浆具有 优异的保温隔热性能^[1-3].然而,SA 在砂浆中的应用

收稿日期:2023-01-06;修订日期:2022-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278272,52108240);上海市科委项目(19DZ1202702,19DZ1201404);上海市建委专项课题(住建 管2021-001-002);上海市科委(上海市外专局)项目(22WZ2502400);重庆市科技局专项项目(cstc2020kqjscx-phxm1594);内蒙古自治区科技计 划项目(2022YFDZ0063);云南省科技厅专家工作站项目(202105AF150243)

第一作者:张 挺(1991一),男,安徽黄山人,同济大学博士生.E-mail:1608020138@qq.com 通讯作者:孙振平(1969—),男,新疆奇台人,同济大学教授,博士生导师,博士.E-mail:szhp@tongji.edu.cn

存在2个难题:市场采购SA的价格比较昂贵与SA 直接用作骨料容易破碎.

SA的制备分为凝胶制备、凝胶老化和凝胶干燥 3步,每一步都会影响SA的成本,尤其是凝胶制备过 程中使用的硅源以昂贵的硅醇盐为主^[4].于是,人们 试图从废弃玻璃^[5]、稻壳灰^[6-7]、粉煤灰^[8]等富硅原材 料中获得廉价硅源.其中,废弃玻璃因SiO₂含量高但 回收利用率低格外受到人们的关注.

通常通过水热合成法从废弃玻璃中获得硅源溶 液.而废弃玻璃中硅的溶解及其对SA结构的影响方 面的研究工作还比较缺乏.此外,SA的导热系数可以 低至0.013~0.016 W/(m·K).因此,人们试图将SA 作为骨料用于保温砂浆的制备,其导热系数可以低至 0.1 W/(m·K)^[9].然而,由于SA呈多孔结构,不仅强度 极低,而且脆性很大,作为骨料使用很容易破碎.因 此,需要采取有效措施对SA进行增强增韧处理^[10-11]. 将SA负载于多孔材料中进行增强,能有效解决骨料 的破碎问题^[12].然而,负载SA的多孔材料的结构特性 及其对砂浆性能的影响尚需要开展深入的研究工作.

本文提出从废弃玻璃中获得廉价硅源,用于SA的制备,然后将所制得SA负载于多孔的膨胀珍珠岩(EP) 中,分析负载SA的膨胀珍珠岩(EPA)的取代率对砂浆 性能的影响,以期为废弃玻璃制备SA以及SA在保温隔 热行业的应用提供一定的参考.

1 试验

1.1 原材料

将收集到的废弃玻璃经清洗、烘干、磨碎和过 75 μm(200目)筛,得到所需玻璃粉.碱溶液的配制采 用去离子水和NaOH.强酸苯乙烯阳离子交换树脂用 于去除硅源溶液中的杂质离子.SA的碱催化剂为 1 mol/L的氨水,交换溶剂为无水乙醇和正己烷,疏 水改性剂为三甲基氯硅烷.所有试剂均为化学分析 纯.硅源对比试验采用模数为1.0的市售水玻璃溶 液.用于负载SA的EP购自河南信阳,粒径为0.85~ 4 mm,表观密度为 302 kg/m³.制备砂浆的水泥采用 武汉亚东水泥有限公司生产的P·I 42.5级水泥;硅灰 由上海宝钢新型建材有限公司提供,粒径为 0.1~ 0.3 µm.减水剂为课题组合成的聚羧酸系减水剂 (PCE),固含量(质量分数)为40%.引气剂和可再分散 性乳胶粉由苏州兆佳新材料有限公司提供,均为粉体.

1.2 样品制备

1.2.1 SA的制备

将20g玻璃粉置入100g浓度为4mol/L的NaOH 溶液中充分混合,将混合物在80℃的水浴条件下分别加 热反应2、4、6、8h,使玻璃粉中的SiO₂溶解.将加热反应 后的混合物过滤,得到不同溶解时间的硅源溶液.

采用溶胶-凝胶法制备SA^[4,6]:首先,用阳离子交 换树脂将制得的硅源溶液(或水玻璃溶液)中的杂质 离子去除,并将溶液的pH值调节到1.0±0.5,持续搅 拌2h;随后,加入1mol/L的氨水将硅源溶液的pH 值调节到3.0以实现硅源溶液的凝胶化,凝胶样品在 模具中继续保持1d,即可得到湿凝胶;接着,将湿凝 胶取出并浸没在无水乙醇中进行溶剂置换(即:用乙 醇将水置换出),时间为1d;此后,再利用正己烷置换 乙醇.每12h更换一次新鲜正己烷,持续1d.为了在 常压下实现凝胶的干燥,将完成溶剂置换的湿凝胶 在常温下用三甲基氯硅烷溶液(三甲基氯硅烷和正 己烷的体积比为1:1)进行表面改性,时间为1d.取出 经表面改性后的湿凝胶,依次在60、80、100℃的干燥 箱中分别干燥4、3、2h,最终获得SA.

1.2.2 EPA的制备

按照1.2.1 所述,用浓度为1 mol/L 的氨水将硅源 溶液pH值调节到3.0 后,立即向硅源溶液中投入干燥 的 EP,EP 与硅源溶液的体积比固定为2:1. 在负压真 空条件下处理10 min,以加快 EP 对硅源溶液的吸收. 随后,按照1.2.1 的步骤将完成吸收的 EP 实现内部 SiO₂凝胶化、溶剂置换和干燥过程,即可得到 EPA.

1.2.3 砂浆的制备

表1为砂浆的配合比.EPA作为轻骨料,通过等

表1 砂浆的配合比 Table 1 Mix proportions of mortars

								g
No.	Cement	Silica fume	Water	PCE	Air entraining agent	Dispersible latex powder	EP	EPA
1	330.00	30.00	245.00 3.50		50 0.35	3. 50	153.80	0
2							124.60	31.60
3				2 50			92.30	63.20
4				3.00			60.70	94.80
5							31.10	126.40
6							0	158.00

体积取代 EP 来配制取代率分别为 0%、20%、40%、 60%、80% 和 100% 的轻质砂浆.

首先,将水泥、硅灰、引气剂、乳胶粉、EP和EPA 在搅拌锅中干混2min;然后,将拌和水与PCE混合 均匀后缓慢加入到搅拌锅中继续搅拌3min;搅拌完 成后,将砂浆装入尺寸为40mm×40mm×160mm 的模具中密实成型,在成型室放置1d后脱模;脱模 后的试件继续在标准养护室中养护至28d龄期,测 定其抗压强度.

将砂浆成型为尺寸为300 mm×300 mm× 50 mm的平板试件,养护方法同抗压强度试件,养护 至28 d龄期后测定其导热系数.

1.3 测试方法

采用美国Agilent 5110型全谱直读等离子发射 光谱仪(ICP)测试硅源溶液中的硅含量.

采用上海纽迈电子科技有限公司 PQ-001 型氢 质子低场核磁共振仪(Low field ¹H-NMR)对 SA凝 胶过程中水分子的变化规律进行监测.收集了 200 个弛豫时间点,横向驰豫时间(T₂)范围为 100~ 10 000 ms.基于拉普拉斯逆变换算法的同步迭代重 建技术分析了¹H-NMR弛豫数据.

采用德国 Nicolet Nexus 470型傅里叶变换红外 光谱仪(FTIR)对SA 的化学键进行分析.SA 的比表 面积通过 N₂吸附方法进行测定.样品在分析前于 200℃下真空脱气 8 h,然后在77 K获得吸附-解吸 附等温线.通过 Barrett-Joyner-Halenda (BJH)方法 获得 SA 的孔结构信息.SA 的导热系数按照 GB/T 10297—2015《非金属固体材料导热系数的测定 热线 法》进行测定.

采用美国 FEI 200型扫描电子显微镜(SEM)对 EPA 的微观形貌进行观察.采用 JY-82型接触角测 定仪测试 EP 和 EPA 的接触角,并且结合 GB/T 17431.2—2010《轻集料及其试验方法》测定 EP 和 EPA 的吸水率,以评估 EP和 EPA 的疏水性.

砂浆的强度按照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂 强度检验方法(ISO法)》进行测试.加载速率为 (100±10)N/s.抗压强度代表值是3个试件抗压强度 的算术平均值.采用 DR-300A+型平板式热导仪,按 照 GB/T 10294—2008《绝热材料稳态热阻及有关特 性的测定 防护热板法》测试砂浆的导热系数.

2 结果与讨论

2.1 玻璃的溶解特性

图1为玻璃粉在热碱液中硅的溶解情况.由图1

可见:在前4h内, 硅源溶液中硅的浓度与溶解时间 (t)大致呈线性关系, 表明硅的溶解速率相对稳定; 当 溶解时间为4h时, 硅源溶液中Si的浓度达到 696.3 mmol/L; 此后, Si的溶解速率有所下降.因此, 可以认为玻璃粉在热碱液中硅的溶解可分为2个阶 段: 第1阶段是Si的快速溶解阶段, 此时热碱液中的 OHT对玻璃中SiO₂的结构进行攻击, 使得大量的Si 快速被溶解; 第2阶段是Si的缓慢溶解阶段, 此时Si 的溶解速率由于硅源溶液中Si的逐渐饱和以及SiO₂ 的再沉淀变得越来越慢, 直到与SiO₂的再沉淀过程 达到平衡^[13].



Fig. 1 Dissolution of silicon in hot alkaline solution from glass powder

2.2 SA的结构特性

2.2.1 Low field ¹H-NMR测试结果

采用溶胶-凝胶法制备 SA. 首先,将硅源溶液的 pH值调整至1.0±0.5,使得硅源溶液中的 Si水解形 成大量的初级粒子(Si(OH)4单体粒子);随后,使用 氨水调节 pH 值至 3,使得硅源溶液中的初级粒子不 断缩聚形成次级粒子;接着,次级粒子形成凝胶片段 并彼此连接,构建 SA 的三维网络骨架结构^[4].SA 的 形成过程示意图如图 2 所示.

SA的三维网络骨架结构将直接影响其保温隔 热性能.因此,有必要对SA的凝胶过程中微观结构 的演变规律进行探究.由于水分子中的H原子能产 生核磁共振现象,可以通过核磁共振技术获取SA形 成过程中水分子分布和孔隙结构演变的信息.图3为 SA形成过程中的T₂弛豫分布.由图3可见:

(1)在1d内的凝胶过程中,溶解时间为2h的硅 源溶液的T₂的主峰位置主要位于1000~2000 ms之 间(图3(a)),与自由水的T₂信号峰相一致^[14-15],这意 味着该样品中的水分子主要是以自由水的形式存在. 同时,在对样品的凝胶状态进行观察后发现,样品中 只有少量絮状物的存在.这是由于溶解时间为2h的





硅源溶液中Si含量较少,不足以形成结构理想的SA.
(2)溶解时间分别为4、6、8h的硅源溶液都能够
形成凝胶状物质,并且随着凝胶时间(t₁)的延长,样
品的T₂主峰位置不断向低弛豫时间偏移(图3(b)~
(d)),说明这些硅源溶液能够形成结构较理想的SA.

(3)为了进行对比,利用水玻璃溶液作为硅源溶液,采用同样方法合成了SA,其T2主峰的位置主要位于100~1000ms(图3(e)).随着凝胶时间的延长,样品的T2主峰位置也是不断向低弛豫时间偏移的.

因此可以推断,玻璃粉在热碱液中的溶解时间必须 要大于4h,才能使得硅源溶液中有足够的Si以形成 SA骨架.

2.2.2 FTIR测试结果

图4为SA的FTIR图谱.由图4可见:1414 cm⁻¹ 附近的特征吸收峰是由于SA网络结构中存在C—H 基团,在1250、847 cm⁻¹处的吸收峰是由Si—C基团 引起的,这是由于三甲基氯硅烷的-C(CH₃)₃对SA 结构中的-OH进行取代,赋予了SA-定的疏水性; 由于不对称、对称和弯曲模式的存在,SA的主要键 合形式Si-O-Si在1100、807、470 cm⁻¹处会出现3 个强峰^[3,16].这说明所制备的气凝胶不仅具有良好的 硅质结构,并且具有一定的疏水特性,使得SA能在 常压环境下进行干燥且保持完整的骨架结构.



2.2.3 N₂吸附测试结果

Quantity adsorbed/(cm³ · g⁻¹)

采用N₂吸附法得到SA的吸附--脱附等温线,结

果如图 5(a)所示.由图 5(a)可见,SA 呈现具有介孔 吸附材料典型特征的 IV 型等温线.在介孔结构中,单 层-多层吸附最初发生在孔壁上.由于介孔中气体的 压力(P)小于液体的饱和压力(P₀),因此会发生冷 凝,导致磁滞回线的产生.

对SA的孔结构进行分析,结果如图5(b)和表2所示.其中,D为孔径.由图5(b)可见,SA表现出介孔结构特性,其孔隙结构与玻璃粉在热碱液中的溶解时间有关.

由表2可见:随着玻璃粉在热碱液中溶解时间的延长,硅源溶液中Si的含量增加,这就使得硅源溶液中SiO2与Na2O的摩尔比(模数)模数提高;溶解时间为6h的硅源溶液制备的SA孔体积为1.99 cm³/g,平均孔径为18.43 nm,导热系数为0.025 W/(m·K),优于水玻璃为硅源溶液制备的SA.这意味着硅源溶液中Si的含量太低不能形成SA,而Si的含量太高则会使得SA的孔体积和平均孔径降低,不利于其保温隔热性能.根据Hwang等^[17]的研究,当硅源溶液中Si的含量在4%~8%之间时,所制备的SA具有较为优良的性能,这与本文的试验结果相一致.因此,优选溶解时间为6h的硅源溶液进行多孔材料负载SA试验.





表 2	2 SA的扎结构
Table 2	Pore structure of SA

Silica precursor	Modulus	Specific surface area/ $(m^2 \cdot g^{-1})$	Pore volume/ $(cm^3 \cdot g^{-1})$	Average pore size/ nm	Thermal conductivity/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
Waste glass, $t=4$ h	0.48	328.59	1.75	14.23	0.028
Waste glass, $t=6$ h	0.59	469.32	1.99	18.43	0.025
Waste glass, t=8 h	0.70	473.66	1.93	15.30	0.026
Water glass	1.00	490.12	1.84	12.13	0.031

2.3 EPA的结构特性

2.3.1 吸收工艺

本文设计采用的真空浸渍吸附工艺能够使得 EP内外形成了一定的压力差,可以加速EP对硅源 溶液的吸收.图6为EP对硅源溶液吸收量的影响.由 图 6 可见:在真空压力下,EP的多孔结构对硅源溶液 的吸收呈现先快速增长,随后大幅减慢,最后进入停 滞阶段的规律;真空浸渍10 min时,EP对硅源溶液 的吸收量超过90%,这与贾冠华等^[18]的研究结果相 一致.因此,当相对真空压力为-0.08 MPa、吸收时





间为10min时,SA能够良好地负载于EP中.

2.3.2 微观形貌

图 7 为 EPA 的微观形貌.由图 7 可见,经过真空 浸渍吸附后,SA 能够较好地填充 EP 内部的孔隙.

2.3.3 结构特性

对 SA、EP 和 EPA 的导热系数、接触角及吸水率 进行测定,结果如表3 所示.由表3 可见: SA 的导热系 数为0.025 W/(m·K),这使得SA成为绝佳的保温隔 热材料;尽管干燥的EP表现出较低的导热系数,但由 于EP的亲水性(接触角为32°)和高的吸水性(吸水率 为390.1%),EP作为砂浆的骨料使用时会吸收大量 的拌和水,导致砂浆的工作性能和保温隔热性能劣 化;相比而言,EPA不仅具有低的导热系数,而且其低 的吸水性(吸水率为15.7%)保证骨料不会因吸收大 量的拌和水而导致骨料的导热系数大幅度提高.

表 3 SA、EP和EPA的导热系数、接触角和吸水率 Table 3 Thermal conductivity, contact angle and water absorption of SA, EP and EPA

Material	Thermal conductivity/ $(\mathbf{W} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{K}^{-1})$	Contact angle/(º)	Water absorption (by mass)%
SA	0.025	138	0.5
EP	0.052	32	390.1
EPA	0.038	126	15.7

2.4 EPA 替代 EP 所制备的砂浆的性能

图8为砂浆的抗压强度和导热系数.由图8可见:



图 7 EPA 的微观形貌 Fig. 7 Micromorphology of EPA





(1)砂浆的抗压强度随着 EPA 取代率的提高而降低,这是由于 EPA 颗粒表面是疏水的,其与水泥浆体之间的黏结性能大幅度降低.当 EPA 取代率为100%时,砂浆的抗压强度为0.8 MPa,仅为不掺

EPA砂浆的12%.

(2)砂浆的保温隔热性能可以通过导热系数进行评价.根据Landauer的理论模型,砂浆的保温隔热性能源于2部分:一是硬化水泥浆基体,二是骨料颗

粒^[1].当EPA取代率从0%提高到100%时,砂浆的导热系数从0.192W/(m·K)下降到0.048W/(m·K),降幅高达75%.

3 结论

(1)玻璃粉在热碱液中的溶解时间必须大于4h, 所制备的硅源溶液才能形成结构较理想的二氧化硅 气凝胶(SA).其中,玻璃粉在热碱液中溶解6h所形 成的硅源溶液,制备的SA具有最佳的孔隙结构特 征,其孔体积为1.99 cm³/g,平均孔径为18.43 nm.

(2)在相对真空压力为一0.08 MPa的条件下处 理10 min,能够使膨胀珍珠岩(EP)对硅源溶液的吸 收量超过 90%,所制备的负载 SA 的膨胀珍珠岩 (EPA)的导热系数为0.038 W/(m·K).

(3)将制备的 EPA 通过等体积取代 EP 配制砂浆,随着 EPA 取代率的提高,砂浆的抗压强度下降,导热系数也随之减小.当EPA 取代率达到100%时,砂浆的抗压强度和导热系数值分别为0.8 MPa 和 0.048 W/(m·K).

参考文献:

- [1] LU J, JIANG J, LU Z Y, et al. Pore structure and hardened properties of aerogel/cement composites based on nanosilica and surface modification [J]. Construction and Building Materials, 2020, 245:118434.
- [2] GAO T, JELLE B P, GUSTAVSEN A, et al. Aerogelincorporated concrete: An experimental study[J]. Construction and Building Materials, 2014, 52:130-136.
- [3] JULIO M, SOARES A, ILHARCO L M, et al. Silica-based aerogels as aggregates for cement-based thermal renders [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 72:309-318.
- [4] DORCHEH A S, ABBASI M H. Silica aerogel; synthesis, properties and characterization[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199(1-3):10-26.
- [5] PUERTAS F, TORRES-CARRASCO M. Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag. Mechanical strength and paste characterisation[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 57:95-104.
- [6] ABBAS N, KHALID H R, BAN G, et al. Silica aerogel derived from rice husk: An aggregate replacer for lightweight and thermally insulating cement-based composites[J]. Construction and Building Materials, 2019, 195:312-322.
- [7] 侯贵华. 稻壳裂解制备 SiO₂气凝胶的研究[J]. 无机材料学报, 2003, 18(2):407-412.
 HOU Guihua. Preparation of SiO₂ aerogel by cracking of rice husk

[J]. Journal of Inorganic Materials, 2003, 18(2):407-412. (in Chinese)

[8] WUX, FAN MH, MCLAUGHLIN JF, et al. A novel low-cost

method of silica aerogel fabrication using fly ash and trona ore with ambient pressure drying technique[J]. Powder Technology, 2018, 323:310-322.

- [9] 王飞,刘朝辉,邓智平,等.不同体积掺量的SiO₂气凝胶对砂浆性能的影响[J].功能材料,2016,47(4):4064-4069.
 WANG Fei, LIU Zhaohui, DENG Zhiping, et al. Effect of SiO₂ aerogel with different volume dosing on mortar properties[J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(4):4064-4069. (in Chinese)
- [10] 廖云丹, 吴会军, 丁云飞. SiO₂气凝胶力学性能的影响因素及 改善方法[J]. 功能材料, 2010, 41(增刊 2):201-203.
 LIAO Yundan, WU Huijun, DING Yunfei. Influencing factors and improvement methods of SiO₂ aerogel mechanical properties
 [J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41 (Suppl 2): 201-203. (in Chinese)
- [11] 杨凯,庞佳伟,吴伯荣,等.二氧化硅气凝胶改性方法及研究 进展[J].北京理工大学学报,2009,29(9):833-837.
 YANG Kai, PANG Weijia, WU Borong, et al. Methods of modification of SiO₂ aerogels[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(9):833-837. (in Chinese)
- [12] 贾冠华. 气凝胶膨胀珍珠岩的制备及其在水泥基材料中的应用研究[D]. 太原:太原理工大学, 2018.
 JIA Guanhua. Preparation of aerogel-expanded perlite and its application in cement-based materials [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [13] KOUASSISS, ANDJIJ, BONNETJP, et al. Dissolution of waste glasses in high alkaline solutions[J]. Ceramics Silikaty, 2010, 54(3):1-6.
- [14] 佘安明,马坤,王中平,等.低场核磁共振低温测孔技术表征 硬化水泥浆体孔结构[J].建筑材料学报,2021,24(5):916-920.
 SHE Anming, MA Kun, WANG Zhongping, et al. Characterization of pore structure in hardened cement paste by low field NMR cryoporometry [J]. Journal of Building Materials, 2021,24(5):916-920. (in Chinese)
- [15] 王俊洁,薛善彬,张鹏,等.引气剂对冻融循环前后砂浆毛细 吸水规律的影响[J].建筑材料学报,2022,25(10):1007-1014.
 WANG Junjie, XUE Shanbin, ZHANG Peng, et al. Effect of air entraining agent on capillary water absorption of mortar before and after freeze-thaw cycle[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(10):1007-1014. (in Chinese)
- [16] YUN S, LUO H J, GAO Y F. Superhydrophobic silica aerogel microspheres from methyltrimethoxysilane: Rapid synthesis via ambient pressure drying and excellent absorption properties[J]. RSC Advances, 2014, 4(9):4535-4542.
- [17] HWANG S W, JUNG H H, HYUN S H, et al. Effective preparation of crack-free silica aerogels via ambient drying [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2007, 41:139-146.
- [18] 贾冠华,刘鹏,李珠. 气凝胶/膨胀珍珠岩的制备及其微观特征 对导热性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(3):1039-1046. JIA Guanhua, LIU Peng, LI Zhu. Preparation of aerogel / expanded perlite and effect of its microstructure on thermal conductivity[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(3):1039-1046. (in Chinese)