

墙体用聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的 制备与阻燃保温性能研究

王 征

(河南理工大学,河南 焦作 454000)

摘 要: 实验制备一种具有多尺度协同结构的聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料。以硅烷偶联剂改性纳米二氧化硅与苯乙烯经种子乳液聚合制备复合颗粒,并以此为基体,分别引入经有机硅活化的膨胀珍珠岩和钛酸酯改性的空心玻璃微珠,制备聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料。结果表明:仅添加体积分数12%膨胀珍珠岩的聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料在燃烧时形成致密隔热屏障,极限氧指数升至26.9%,燃烧热值降至5.5 MJ/kg。仅添加16%空心玻璃微珠的聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料则凭借其空心结构及“微滚珠”效应,将极限氧指数提高至28.2%,导热系数降至0.129 W/(m·K)。多尺度复合设计显著增强了材料的阻燃、保温与力学性能,赋予材料优异的热稳定性与耐久性。因此,研究制备的聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料是一种综合性能突出的绿色安全保温墙体材料,在建筑节能与消防一体化应用中具有广阔的前景。

关键词: 复合泡沫混凝土;阻燃保温材料;功效系数法;抗压强度;导热系数

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0068-07

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.013

Preparation of Polystyrene/Nano Foam Composites for Wall and Study on Their Flame Retardant and Thermal Insulation Properties

WANG Zheng

(Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: A polystyrene/nano foam composite with multi-scale synergistic structure was prepared in the experiment. Composite particles were prepared by seed emulsion polymerization of styrene with silane-coupling-agent-modified nano-silica. Using these particles as the matrix, polystyrene/nano foam composites were then prepared by introducing organosilicon-activated expanded perlite and titanate-modified hollow glass microspheres. The results show that the single doped polystyrene/nano foam composites rock with only 12% volume fraction of expanded perlite forms a dense thermal barrier during combustion, which increases the limited oxygen index to 26.9% and reduces the combustion heat to 5.5 MJ/kg. The single doped polystyrene/nano foam composite with only 16% volume fraction of hollow glass microspheres increased the limited oxygen index to 28.2% and reduced the thermal conductivity to 0.129 W/(m·K) by virtue of its hollow structure and "micro ball" effect. Multi scale composite design significantly enhances the flame retardancy, thermal insulation, and mechanical properties of materials, endowing them with excellent thermal stability and durability. Therefore, the polystyrene/nano foam composites prepared in the experiment is a green and safe thermal insulation wall material with outstanding comprehensive performance, which has broad prospects in the integrated application of building energy conservation and fire protection.

Keywords: Composite foam concrete; Flame retardant thermal insulation materials; Efficiency coefficient method; Compressive strength; Thermal conductivity

收稿日期 Submitted date 2025-04-19; 修回日期 Revised date 2025-05-21; 录用日期 Accepted date 2025-06-25

联系人, 2913521062@qq.com

引用本文: 王征. 墙体用聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的制备与阻燃保温性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 68-74.

Citation: WANG Z. Preparation of polystyrene/nano foam composites for wall and study on their flame retardant and thermal insulation properties[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 68-74.

近年来,建筑节能与消防安全需求的持续升级对墙体保温材料提出了更高要求^[1]。传统聚苯乙烯泡沫因其轻质、低成本和优异的隔热性能被广泛应用于建筑保温领域^[2]。然而,聚苯乙烯泡沫固有的易燃性(极限氧指数仅17%~18%)、力学强度低(抗压强度常低于0.2 MPa)及长期使用下的保温性能衰减等问题,不仅增加了建筑火灾风险,还导致能源效率下降和废弃物环境污染^[3-4]。在此背景下,开发兼具高效阻燃、持久保温与强化力学性能的绿色保温材料,已成为建筑节能与安全领域的迫切需求。

近年来,纳米复合改性为突破聚苯乙烯泡沫性能瓶颈提供了全新思路。纳米二氧化硅具有比表面积大、表面硅羟基丰富、热稳定性高(熔点>1 600 °C)等特性。一方面,硅烷偶联剂疏水化改性可在苯乙烯基体中形成纳米级分散,显著提高泡孔成核密度、细化孔径,从而同步提升闭孔率与机械强度^[5];另一方面,燃烧时纳米二氧化硅在聚合物表面迁移聚集,与降解产物发生交联反应,构筑致密、连续的Si—O—C陶瓷炭层,有效阻隔热量与可燃挥发分传递,抑制自由基链式反应,实现凝聚相-气相协同阻燃^[6]。然而,单一纳米二氧化硅的引入量受限于体系黏度与经济性,过量添加反而导致团聚,使闭孔率下降,阻燃效率与保温性能难以同步提升。因此,亟须引入第二尺度无机功能填料,借助多尺度协同效应实现性能再升级。

膨胀珍珠岩是一种经850~1 050 °C瞬时高温膨胀而成的蜂窝状多孔轻质骨料,堆积密度仅60~120 kg/m³,常温导热系数低至0.035~0.055 W/(m·K),且软化温度大于1 100 °C^[7]。其丰富的开孔-闭孔复合结构能在聚合物基体中形成“空气-固相”多级屏障,不仅稀释可燃组分、降低热释放速率,燃烧时还能在材料表面构筑隔热-抑烟层,显著改善火安全性^[8]。空心玻璃微珠则是一种粒径10~150 μm、壁厚1~3 μm的中空球形玻璃微球,真密度0.15~0.60 g/cm³,内部密闭空气腔赋予其极低导热系数和优异热反射能力;其光滑、刚性的外壳可充当“微滚珠”,在泡沫孔壁中均匀分散应力,抑制裂纹扩展,从而协同提升隔热与力学性能^[9]。然而,膨胀珍珠岩表面富含亲水羟基,空心玻璃微珠表面呈化学惰性,二者与聚苯乙烯界面相容性差,直接共混易团聚沉降,破坏泡孔完整性,导致性能劣化^[10]。因此,需要通过表面改性技术(如有机硅防水剂、钛酸酯偶联剂)调控填料-基体界面能,实现均匀、稳定的多级结构构筑^[11-12]。

尽管目前已有研究分别报道了纳米二氧化硅、膨胀珍珠岩或空心玻璃微珠对聚苯乙烯泡沫阻燃或隔热性能的单—提升效果。但是没有系统地探讨多尺度协同作用机制,尤其在墙体保温应用场景下,如何基于材料-结构-工艺一体化设计实现轻质、阻燃、隔热、高强与耐久性的协同优化,仍是亟待突破的问题。

本研究以改性纳米二氧化硅与苯乙烯经种子乳液聚合制备的复合颗粒为基体,继而引入经有机硅防水剂活化的膨胀珍珠岩或者经钛酸酯偶联剂改性的空心玻璃微珠,采用一体化工艺构筑多尺度轻质泡沫复合材料,系统研究膨胀珍珠岩与空心玻璃微珠掺量对复合材料极限氧指数、燃烧热值、导热系数、闭孔率、干密度及抗压强度的耦合规律,旨在为新一代绿色、安全、耐久墙体保温材料的设计提供实验依据。

1 实验部分

1.1 主要原料

聚苯乙烯颗粒,质量分数≥99.9%,国药集团化学试剂有限公司;亲水性纳米二氧化硅,粒径20 nm,上海阿拉丁试剂有限公司;硅酸盐水泥,42.5R,海螺水泥股份有限公司;膨胀珍珠岩,粒径0.5 mm~1.0 mm,信阳珍珠岩厂;空心玻璃微珠,过200目筛,3M中国有限公司;中性氧化铝,200目,国药集团化学试剂有限公司;无水乙醇,分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;硅烷偶联剂,分析纯,南京曙光化工集团有限公司;十二烷基硫酸钠,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;过硫酸钾,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;有机硅防水剂,固含量20%,道康宁有限公司;钛酸酯偶联剂,NDZ-201,南京曙光化工集团股份有限公司;蛋白发泡剂,FP-40,聊城之慧建材有限公司,去离子水,自制。

1.2 仪器与设备

不锈钢反应釜,5 L,威海行雨化工有限公司;高速搅拌机,AD-100E,上海标本模型厂;高速涡流发泡机,JF-5,广州基旭机械有限公司;氧指数测定仪,ZDHW-6000,河北循天科技有限公司;氧弹量热仪,DRPL-III,长沙奔特仪器有限公司;导热系数测定仪,TC3000,湘潭市仪器仪表有限公司;电子天平,FA,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;万能试验机,WDW-100E,济南时代试金有限公司;烘箱,65 L(室温~300 °C),上海精宏实验设备有限公司;冷冻干燥机,LGJ-18S(-50 °C),北京博医康技术有限公司;超声分散仪,1 000 W(20~40 kHz),宁波新芝生物科技有限公司;离心机,TG16-WS(6 000 r/min),湖南湘仪实验室仪器;水泥胶砂搅拌机,JJ-5型行星式,无锡建仪仪器机械有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 聚苯乙烯/纳米粒子的制备

将50 mL高纯度苯乙烯通过装填中性氧化铝(200目)的层析柱纯化,去除阻聚剂得到无色滤液。然后将1.0 g亲水性纳米二氧化硅(粒径20 nm)分散于100 mL无水乙醇中,加入0.5 mL硅烷偶联剂,然后在70 °C回流搅拌后离心3 h并洗涤3次,80 °C真空干燥,得到疏水性二氧化硅。接着制备预乳液。该乳液由20 g纯化苯乙烯作为成膜基质单体,0.4 g(2%)改性纳米二氧化硅充当力学增强相,0.6 g十二烷基硫酸钠提供乳化-稳定作用,以200 mL去离

子水为连续分散介质,构成水包油型聚合体系^[13]。将制备的纯化苯乙烯、纳米二氧化硅、乳化剂和去离子水加入三口烧瓶,超声乳化 30 min,形成均匀乳白色预乳液。然后进行种子乳液聚合,通氮气除氧 15 min 后升温至 70 °C。加入 0.15 g 引发剂过硫酸钾(溶于 10 mL 水),以 200 r/min 速率搅拌引发聚合,先在 70 °C 恒温反应 6 h,体系由乳白转为淡蓝半透明。再升温至 80 °C 反应 1 h,确保单体转化率大于 99%。最后破乳与纯化,将乳液冷却至室温,加入 10 mL 10% 氯化铝溶液破乳。之后 8 000 r/min 离心 10 min,依次用乙醇/水洗涤 3 次,冷冻干燥 24 h,得到白色粉末状复合颗粒,即为聚苯乙烯/纳米粒子。

1.3.2 膨胀珍珠岩及空心玻璃微珠的处理

膨胀珍珠岩活化方法:取粒径 0.5~1.0 mm 的膨胀珍珠岩颗粒 15 g,喷淋 5% 有机硅防水剂,80 °C 烘干干燥 1 h^[14]。

空心玻璃微珠分散处理:将 10 g 空心玻璃微珠加入 0.5% 钛酸酯偶联剂的乙醇溶液中,超声分散 30 min,45 °C 干燥,过 200 目筛^[15-16]。

1.3.3 预制泡沫的制备

将 1% 的蛋白发泡剂、99% 的去离子水以及 0.05% 的稳泡剂混合,预冷至(10±2) °C 后,磁力搅拌 15 min 至完全溶解,配制成发泡溶液。接着采用高速涡流发泡机在转速(2 800±100) r/min、发泡时间(3.0±0.5) min、空气流量 1.2 L/min 的条件下进行机械发泡,制得的泡沫密度为(50±2) kg/m³,孔径分布中 0.1~0.5 mm 的体积占比不低于

90%。最后将发泡后的泡沫置于密闭容器中,在 25 °C 下静置熟化 10 min,使液膜排水平衡,泌水率降至 3% 以下,从而完成预制泡沫的制备^[17-20]。

1.3.4 聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的制备

表 1 为聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的配方。根据表 1 配方,首先精确称取 180 g 硅酸盐水泥,并量取 90 g 的去离子水。将水泥与去离子水加入行星式搅拌机中,以(180±10) r/min 搅拌 2 min,形成均匀的水泥净浆。随后,将计量好的 0.25 L 预制泡沫与聚苯乙烯/纳米粒子乳液缓慢、均匀地加入水泥净浆中,并保持低速搅拌 3 min,使泡沫群与浆体充分混合,形成流变性稳定的泡沫混凝土基体。接着,加入预先经活化处理的膨胀珍珠岩或经分散处理的空心玻璃微珠(表中膨胀珍珠岩和空心玻璃微珠体积分数是指这两种骨料占聚苯乙烯/纳米粒子的体积比),继续低速搅拌 2 min,确保轻骨料在复合浆体中分布均匀,避免因搅拌过度导致泡沫破裂或轻骨料破碎。将混合均匀的浆料迅速注入预定尺寸的模具,用于性能测试研究。如阻燃性能检测需要 80 mm×80 mm×80 mm 体积大小的试块。注入过程须沿模具内壁缓慢进行,以减少泡沫消损。注入后轻微振动模具 5~8 次,并用刮刀刮平表面,以促进浆体密实并消除大气孔。最后,将试模置于室温、相对湿度 95% 以上的标准养护箱中静置 24 h。脱模后,将试件移至同一温湿度条件的养护室中,继续养护至 28 d 龄期,以备后续性能测试。

表 1 聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的配方

Tab.1 Formula of polystyrene/nano foam composites

样品编号	$m_{\text{硅酸盐水泥/g}}$	$m_{\text{去离子水/g}}$	$V_{\text{预制泡沫/L}}$	$V_{\text{聚苯乙烯/纳米粒子/L}}$	$V_{\text{膨胀珍珠岩/L}}$	$\varphi_{\text{膨胀珍珠岩/\%}}$	$V_{\text{空心玻璃微珠/L}}$	$\varphi_{\text{空心玻璃微珠/\%}}$
1	180	90	0.25	0.25	0.00	0	0.00	0
2	180	90	0.25	0.24	0.01	4	0.00	0
3	180	90	0.25	0.23	0.02	8	0.00	0
4	180	90	0.25	0.22	0.03	12	0.00	0
5	180	90	0.25	0.21	0.04	16	0.00	0
6	180	90	0.25	0.20	0.05	20	0.00	0
7	180	90	0.25	0.24	0.00	0	0.01	4
8	180	90	0.25	0.23	0.00	0	0.02	8
9	180	90	0.25	0.22	0.00	0	0.03	12
10	180	90	0.25	0.21	0.00	0	0.04	16
11	180	90	0.25	0.20	0.00	0	0.05	20

1.4 性能测试与表征

阻燃性能测试:根据 GBT 2406.2—2009,使用氧指数测定仪,将制备好的 80 mm×80 mm×80 mm 聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料试块置于氮氧混合气流中点燃,测定维持燃烧的最低氧浓度,即极限氧指数^[21]。根据 GB/T 14402—2007,采用氧弹量热仪,称取 1.0 g 聚苯乙烯/纳米泡沫复合

材料粉末样品,在 25 MPa 氧气中点燃,记录单位质量放热量,即燃烧热值^[22]。

保温性能检测:根据 GB/T 10294—2008,将 200 mm×200 mm×200 mm 聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料试块置于导热仪冷热板间,使用导热系数测定仪测定 25 °C 下热流密度,即导热系数^[23]。根据 JC/T 647—2014,采用压汞法,

取 200 mm×200 mm×200 mm 聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料干燥试块测试孔隙体积,计算闭孔体积占比,即闭孔率^[24]。

力学性能检测:根据 GB/T 5486—2008,将 100 mm³立方体试块在 105 °C 温度下烘至恒重,使用电子天平称重并计算单位体积质量,即干密度^[25]。根据 GB/T 50081—2019,使用万能试验机,以 0.5 MPa/s 速率加载 100 mm³立方体试块,记录破坏荷载,即抗压强度。

2 结果与讨论

2.1 膨胀珍珠岩-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料性能分析

2.1.1 阻燃性能分析

图 1 为膨胀珍珠岩-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的阻燃性能。从图 1a 可以看出,未添加膨胀珍珠岩的聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的极限氧指数约为 16.3%。而添加膨胀珍珠岩后,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的极限氧指数先增加后减少,并在 12% 添加体积分数时达到峰值,约为 26.9%。膨胀珍珠岩的多孔结构和高比表面积使其在燃烧时于材料表面形成致密隔热层。此屏障能够有效阻隔氧气扩散和热量回传,抑制气相燃烧反应,导致极限氧指数显著提升,燃烧热值降低。从图 1b 可以看出,未添加膨胀珍珠岩的聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的燃烧热值约为 8.3 MJ/kg。而添加膨胀珍珠岩后,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的燃烧热值逐渐减少。当膨胀珍珠岩添加体积分数为 12% 时,燃烧热值逐渐稳定,约为 5.5 MJ/kg。膨胀珍珠岩作为无机填料,稀释了基体中有机可燃物浓度,减少可燃气体释放量,从而降低燃烧强度。这说明添加体积分数 12% 膨胀珍珠岩,可最大化增加膨胀珍珠岩-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的阻燃性能。

2.1.2 保温性能分析

图 2 为膨胀珍珠岩-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的保温性能。从图 2a 可以看出,添加膨胀珍珠岩后,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的导热系数持续减少,直到膨胀珍珠岩添加体积分数为 8% 后开始稳定,此时材料的导热系数约为 0.124 W/(m·K)。继续添加膨胀珍珠岩,导热系数仍会减少但不明显。从图 2b 可以看出,添加膨胀珍珠岩后,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的闭孔率先增加后减少。直到膨胀珍珠岩添加体积分数为 8% 时,闭孔率达到峰值,约为 93.5%。这说明添加 8% 膨胀珍珠岩可最大化增加膨胀珍珠岩-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的保温性能。

2.1.3 力学性能分析

图 3 为膨胀珍珠岩-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的力学性能。从图 3a 可以看出,膨胀珍珠岩添加体积分数为 12% 时,膨胀珍珠岩-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的干密度最高,0 d 时约为 536.4 kg/m³,28 d 时约为 598.3 kg/m³。从图 3b 可以看出,膨胀珍珠岩添加体积分数为 12% 时,膨

胀珍珠岩-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的抗压能力最强最高,0 d 时约为 0.44 MPa,28 d 时约为 2.25 MPa。这说明膨胀珍珠岩添加体积分数为 12% 时,可最大化膨胀珍珠岩-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的力学性能。

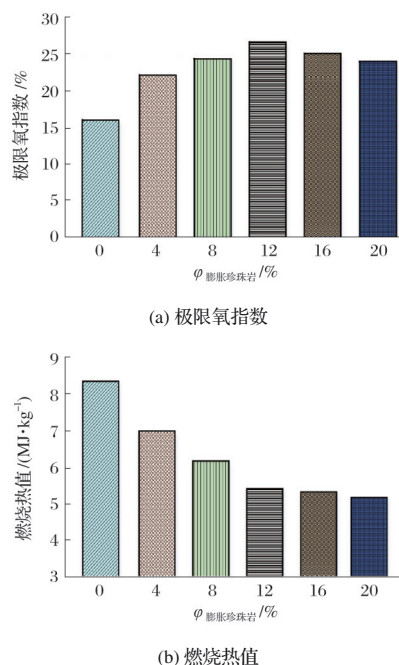


图 1 膨胀珍珠岩-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的阻燃性能

Fig.1 Flame retardancy of expanded perlite-polystyrene/nano foam composites

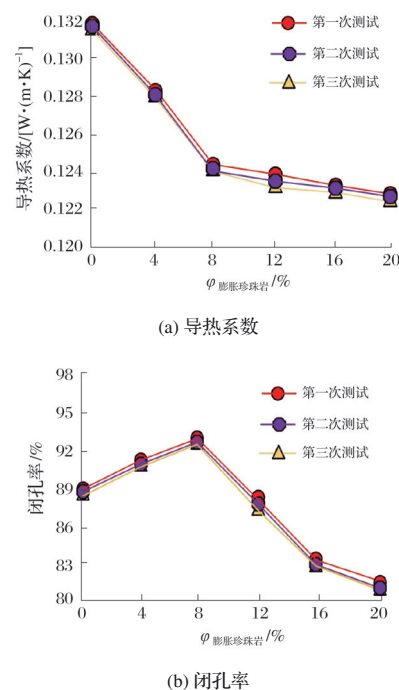


图 2 膨胀珍珠岩-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的保温性能

Fig.2 Thermal insulation performance of expanded perlite-polystyrene/nano foam composites

在阻燃性能方面,聚苯乙烯本身易燃,添加膨胀珍珠岩后情况改变。膨胀珍珠岩具有较高的比表面积和多孔

结构,能在材料表面形成隔热层,阻碍氧气和热量传递,使极限氧指数上升,燃烧热值下降。当添加体积分数为12%时,膨胀珍珠岩在基体中分布均匀,隔热层效果最佳,阻燃性能达最优。但添加量过多时,其分散性变差,团聚现象出现,导致部分区域隔热保护作用减弱,极限氧指数降低,燃烧热值变化不明显。

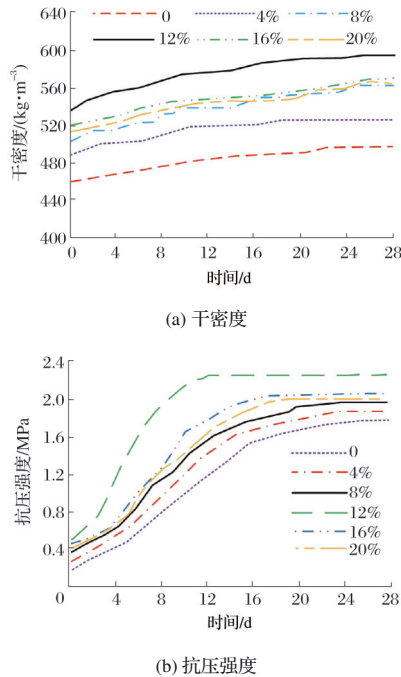


图3 膨胀珍珠岩-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的力学性能
Fig.3 Mechanical properties of expanded perlite-polystyrene/nano foam composites

在保温性能方面,膨胀珍珠岩的多孔结构可降低材料整体密度,减少热传导途径,使导热系数下降。添加体积分数为8%时,多孔结构充分填充基体,闭孔率升高,保温性能显著提升^[26-27]。继续增加膨胀珍珠岩,虽导热系数仍降低,但多孔结构优势已充分发挥,降低幅度减小,闭孔率开始下降,保温性能提升不明显。

2.2 空心玻璃微珠-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料性能分析

2.2.1 阻燃性能分析

图4为空心玻璃微珠-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的阻燃性能。从图4a可以看出,未添加空心玻璃微珠的聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的极限氧指数约为16.3%。而添加空心玻璃微珠后,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的极限氧指数先增加后减少。添加体积分数16%的空心玻璃微珠时,极限氧指数最高,约为28.2%。极限氧指数越大,说明材料在更高浓度的氧气环境中才能维持燃烧,提高了材料的阻燃等级。从图4b可以看出,未添加空心玻璃微珠的聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的燃烧热值约为8.3 MJ/kg。而添加空心玻璃微珠后,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的燃烧热值逐渐减少。当空心玻璃微珠添加体

积分数为16%时,燃烧热值逐渐稳定,约为5.7 MJ/kg。这说明材料在燃烧过程中释放的热量显著减少,进一步降低火灾蔓延的风险和强度。上述结果表明,体积分数16%的空心玻璃微珠显著提升了复合材料的阻燃性能。

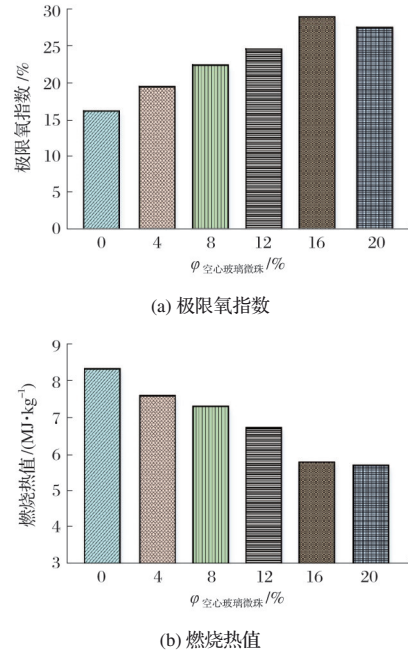


图4 空心玻璃微珠-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的阻燃性能
Fig.4 Flame retardancy of hollow glass microsphere-polystyrene/nano foam composites

2.2.2 保温性能分析

图5为空心玻璃微珠-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的保温性能。从图5a可以看出,添加空心玻璃微珠后,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的导热系数先增加后减少,直到空心玻璃微珠添加体积分数为16%后开始稳定,此时材料的导热系数约为0.129 W/(m·K)。继续添加空心玻璃微珠,导热系数仍会减少但不明显。少量空心玻璃微珠(体积分数<8%)的加入导致导热系数不降反增。这可能是由于初始添加量不足时,微珠在基体中分散不均,未能形成有效的连续隔热网络。同时,少量微珠可能破坏了原有相对均匀的泡沫闭孔结构,引入了额外的界面或微小缺陷,反而增加了固体热传导路径或促进了微对流,削弱了材料的整体隔热能力。随着空心玻璃微珠添加体积分数增加(如8%~16%),其数量足以在材料内部形成密集且相对均匀分布的“隔热单元”。空心玻璃微珠的核心优势在于其内部封闭的空气腔。这些空腔有效阻隔了热量通过固体传导的路径,显著增加了热流传递的曲折度。同时,微珠本身的导热系数也远低于聚合物基体。这两个因素共同作用,使导热系数显著下降。从图5b可以看出,添加空心玻璃微珠后,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的闭孔率先增加后减少。直到空心玻璃微珠添加体积分数为16%时,闭孔率达到峰值,约为96.4%。这是因为空心玻璃微珠具有光滑、规则的球形表面和良好的化学

稳定性。适量添加空心玻璃微珠可以作为高效的成核剂,促进泡沫形成过程中气泡的均匀产生和稳定,有利于形成数量更多、尺寸更小且更均匀的闭孔泡沫结构。微珠本身占据空间也减少了开孔或连通孔的形成。因此,闭孔率随空心玻璃微珠添加量的增加而显著上升。在空心玻璃微珠添加体积分数为16%时,闭孔率达到最高值。这表明此时泡沫结构最致密、开孔缺陷最少,对阻止气体对流和湿气渗透最为有利。超过此最佳添加量,过量的空心玻璃微珠可能开始干扰泡沫的稳定和固化过程,导致气泡合并、破裂的风险增加。微珠之间也可能因过于拥挤而产生应力集中点,在材料内部或界面处诱发微小裂纹或孔隙连通,从而导致闭孔率开始缓慢下降^[28-29]。上述结果说明添加体积分数16%膨胀珍珠岩,可最大化增加空心玻璃微珠-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的保温性能。

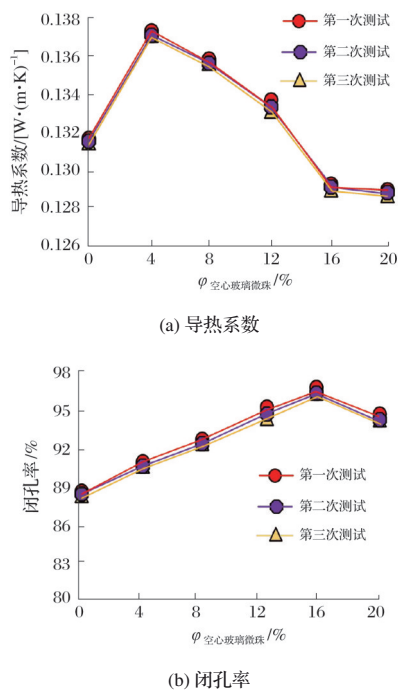


图5 空心玻璃微珠-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的保温性能

Fig.5 Thermal insulation performance of hollow glass microsphere-polystyrene/nano foam composites

2.2.3 力学性能分析

图6为空心玻璃微珠-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的力学性能。从图6a可以看出,空心玻璃微珠添加体积分数为16%时,空心玻璃微珠-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的干密度最高,0 d时约为 582.4 kg/m^3 ,28 d时约为 613.4 kg/m^3 。从图6b可以看出,空心玻璃微珠添加体积分数为16%时,空心玻璃微珠-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的抗压能力最强,0 d时约为1.01 MPa,28 d时约为2.32 MPa。这说明空心玻璃微珠添加体积分数为16%时,可最大化空心玻璃微珠-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的力学性能。此时,空心玻璃微珠在聚苯乙烯/纳米泡沫基体中分散理想,无严重

团聚,作为高效成核剂,促使形成高闭孔率、细密均匀的泡沫微观结构,在阻燃、隔热和力学增强三方面发挥最大协同效应。

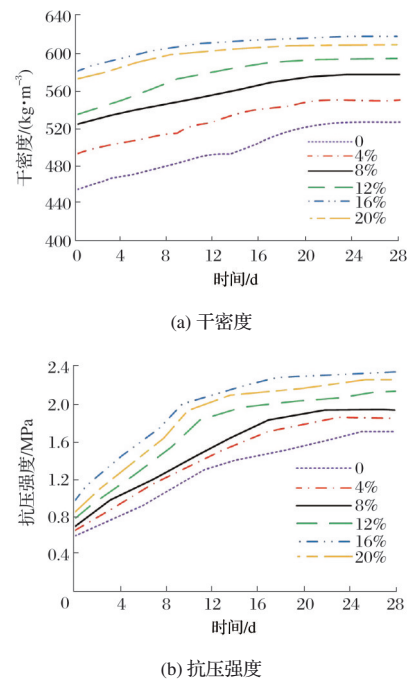


图6 空心玻璃微珠-聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料的力学性能

Fig.6 Mechanical properties of hollow glass microsphere-polystyrene/nano foam composites

3 结论

研究通过纳米二氧化硅改性聚苯乙烯,并分别加入膨胀珍珠岩和空心玻璃微珠,制备聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料。主要结论如下:(1)复合材料的阻燃性能显著提升。当膨胀珍珠岩添加体积分数为12%时,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料极限氧指数达26.9%,较空白样提高65.0%,燃烧热值降至 5.5 MJ/kg ;空心玻璃微珠添加体积分数为16%时,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料极限氧指数可达28.2%,热值为 5.7 MJ/kg ,阻燃效果最优。(2)复合材料的保温性能明显改善。膨胀珍珠岩添加体积分数为8%时,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料导热系数最低,为 $0.124 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,闭孔率达93.5%;空心玻璃微珠添加体积分数为16%时,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料导热系数为 $0.129 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,闭孔率为96.4%,表现出更优的隔热性能。(3)复合材料的力学性能得到增强。膨胀珍珠岩添加体积分数为12%时,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料28 d抗压强度为2.25 MPa;空心玻璃微珠添加体积分数为16%时,聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料28 d抗压强度可达2.32 MPa,同时28 d干密度均控制在 600 kg/m^3 左右,显示良好的轻质高强特性。

虽然本研究优化了材料的微观结构,实现了聚苯乙烯/纳米泡沫复合材料阻燃、保温和力学性能的平衡提升。但是增加墙体荷载,需要进一步轻量化,这也是未来的主要研究方向。

参考文献

- [1] 刘阿敏, 薛静云, 黄天奕, 等. 严寒地区工业建筑节能改造技术研究[J]. 智能城市, 2024, 10(8): 90-93.
- [2] 张玉, 张春寅, 王苏盼. 低速热颗粒点燃聚苯乙烯泡沫的实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2023(4): 460-466.
- [3] 王凯锋, 张春寅, 王苏盼. 高速热颗粒点燃聚苯乙烯泡沫的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2024(8): 2496-2501.
- [4] 王佩, 何怡楠, 罗艳彦, 等. 轻质高强交联聚苯乙烯泡沫的软模板法制备: 从块材到选择性透过膜材料[J]. 中国科学: 化学, 2024(10): 1663-1669.
- [5] 刘韵, 张安妤, 闵妍茜, 等. 聚苯乙烯泡沫材料压缩力学性能和吸能特性研究[J]. 塑料科技, 2024(12): 97-101.
- [6] RASAI AH N, EUGINE R, MANICKS R. Efficiency, productivity and economic analysis of polystyrene foam-insulated conventional and modified double-slope solar still using nanofluids[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2025, 32(21): 12713-12742.
- [7] 陈有成, 代张音, 江泽标, 等. 纳米二氧化硅三相A类抑燃泡沫的稳定性及阻燃效能研究[J]. 河北工业科技, 2024(6): 461-469.
- [8] DURMUŞ G, TOPUZ H C. Thermal characterization of foam concrete panels containing expanded perlite-polystyrene, foam and aerogel layer[J]. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 2022, 10(1): 39-49.
- [9] 徐伟华. 纳米二氧化硅/有机磷协同阻燃木塑复合材料性能的研究[J]. 林产工业, 2022, 59(2): 13-16.
- [10] HU H D, WANG Y W. Preparation and properties of halogen-free flame retardant PE based wood-plastic composite materials[J]. Materials Research Innovations, 2024, 28(6): 402-411.
- [11] 郑占模, 董从林, 袁成清, 等. 二氧化硅纳米颗粒协同碳纤维增强复合材料防滑和耐磨性能研究[J]. 摩擦学学报, 2025(4): 593-607.
- [12] 杨倩, 杨璨瑜, 孙孔春, 等. 手性聚苯胺/二氧化硅核/壳复合物的合成及应用[J]. 高等学校化学学报, 2018, 39(7): 1587-1591.
- [13] 曹西平, 邓伟, 程冠之, 等. 细乳液聚合法制备 Fe_3O_4 /聚(苯乙烯-丙烯酸异辛酯)复合乳液及其胶膜阻尼性能[J]. 复合材料学报, 2024(1): 261-270.
- [14] 曾兴华, 秦原, 杨良, 等. 锂云母渣免烧陶粒滤料制备及酸侵蚀机理研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(5): 106-109.
- [15] 邓龙, 贺辉, 张立国, 等. 空心玻璃微珠改性对喷涂型环氧涂层性能影响[J]. 表面技术, 2024, 53(16): 129-138.
- [16] 王泽文, 李建. 乙烯基树脂/空心玻璃微珠复合材料的制备及性能[J]. 塑料科技, 2023, 51(2): 25-30.
- [17] 吴基桦, 吴丹忱, 张宗富. 泡沫混凝土夹心预制外挂墙板防水优化设计[J]. 工程技术研究, 2024(19): 171-173.
- [18] 姚田帅, 田青, 张苗, 等. 碱激发再生微粉-矿渣制备泡沫保温材料及其性能[J]. 硅酸盐学报, 2023(11): 2966-2977.
- [19] 王靖东, 刘鹏, 李元, 等. 晶须泡沫磷石膏胶凝材料力学和保温性能研究[J]. 非金属矿, 2022, 45(6): 39-43.
- [20] 王映昀, 赵静, 苏薇. 泡沫混凝土无机保温材料的制备及其导热性能研究[J]. 功能材料, 2023(5): 5101-5106.
- [21] 李丽英, 姜如愿, 王林, 等. 高氧指数高刚性聚丙烯的制备及其性能[J]. 合成树脂及塑料, 2023(3): 11-16.
- [22] 颜蓓蓓, 刘晓芸, 周生权, 等. 多源低热值燃气无焰燃烧的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(增刊1): 362.
- [23] 胡飞扬, 王起才, 代金鹏, 等. 混凝土导热系数与抗压强度的关系研究[J]. 混凝土, 2024(6): 53-56.
- [24] 赵志颖, 江皓, 李晓东, 等. 闭孔率及密度对聚氨酯弹性体泡沫力学性能及吸能性的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2023(12): 35-44.
- [25] 蔡国庆, 车睿杰, 孔小昂, 等. 非饱和砂土抗拉强度的试验研究[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 623-630.
- [26] 魏鑫, 盘荣俊, 周治洲, 等. 粉煤灰免烧多孔保温陶粒的制备及孔结构调控研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2022(5): 36-44.
- [27] 陈国权. 粉煤灰复合膨胀珍珠岩对泡沫混凝土性能影响研究[J]. 福建建设科技, 2023(5): 59-62.
- [28] 刘浩, 张永明. 引气剂对轻质抹灰石膏砂浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(3): 259-266.
- [29] 王磊, 彭浩, 刘明晓, 等. 空心玻璃微珠掺量对塑料泡沫混凝土性能的影响[J]. 武汉工业学院学报, 2022(3): 109-115.