

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.02.026

面向性能协同的气凝胶水泥基复合材料 基体设计与优化研究

代建波^{1,2}, 芮闯¹, 刘冬¹, 何绍坤¹

(1. 西安石油大学 管道工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西中立检测鉴定有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 在建筑节能与结构加固一体化背景下, 实现气凝胶水泥基材料导热降低与强度保持的协同优化成为关键。为此, 开展基体设计与掺量优化, 构建硅灰粗骨料基体与矿粉细骨料基体两类复合体系, 并采用等质量替换法掺入 0%~8% SiO₂ 气凝胶粉末。通过导热系数、流动度与 28 d 抗压强度测试系统评估宏观性能响应, 并结合 SEM 与 XRD 表征微观结构与水化产物演化。结果表明: 气凝胶掺量增加可显著降低两类材料导热系数, 但抗压强度同步下降; 在相同掺量下, 矿粉细骨料基体整体性能更优, 其中气凝胶掺量为 6% 时导热系数降至 0.2764 W/(m·K), 28 d 抗压强度仍保持 35.2 MPa。矿粉细骨料基体中气凝胶分散更均匀, 界面过渡区更致密, 水化产物包裹更充分, 从而削弱热传导通道并维持界面传力连续性。基体构型与气凝胶掺量的协同优化可有效缓解强度衰减, 实现隔热与力学性能的协同提升。

关键词: SiO₂ 气凝胶; 水泥基复合材料; 导热系数; 抗压强度

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0179-08

Design and Optimization of Aerogel Cement-based Composite Matrix Oriented Towards Performance Synergy

DAI Jianbo^{1,2}, RUI Chuang¹, LIU Dong¹, HE Shaokun¹

(1. School of Pipeline Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Shaanxi Zhongli Testing and Appraisal Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: In the context of integrating building energy conservation with structural strengthening, the synergistic optimization of thermal conductivity reduction and strength retention in aerogel cement-based materials is of critical importance. Accordingly, matrix design and content optimization were conducted by developing two composite systems, namely a silica-fume coarse-aggregate matrix and a slag-powder fine-aggregate matrix, and incorporating 0%~8% SiO₂ aerogel powder through an equal-mass replacement approach. The macroscopic responses were systematically evaluated by tests of thermal conductivity, flowability, and 28-day compressive strength, and the microstructure and hydration-product evolution were characterized using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The results indicate that increasing aerogel content markedly decreases the thermal conductivity of both systems, while the compressive strength decreases concurrently. At identical content, the slag-powder fine-aggregate matrix exhibits superior overall performance; specifically, at 6% content, the thermal conductivity is reduced to 0.2764 W/(m·K) and the 28-day compressive strength remains 35.2 MPa. Microstructural analyses reveal that, within the slag-powder fine-aggregate matrix, the aerogel is more uniformly dispersed, the interfacial transition zone is denser, and the hydration products provide more complete encapsulation, thereby disrupting heat-transfer pathways while maintaining interfacial load-transfer continuity. These findings demonstrate that the coupled optimization of matrix architecture and aerogel content can effectively mitigate strength deterioration and enable concurrent enhancement of thermal insulation and mechanical performance.

Keywords: SiO₂ aerogel; cementitious composites; thermal conductivity; compressive strength

收稿日期: 2026-01-28

修稿日期: 2026-02-19

基金项目: 国家绿色墙体材料质量检验检测中心项目 (KFKT202201); 陕西省技术创新引导专项 (基金) (2024ZC-YYDP-21)

作者简介: 代建波 (1983—), 男, 副教授, 博士, 主要从事工程结构抗震及防灾研究。E-mail: xasydxdbj@163.com

随着我国经济社会的高速发展,能源消耗与环境保护之间的矛盾日益突出,建筑行业作为能源消耗与碳排放的主要领域之一,其节能改造已成为实现可持续发展战略的关键环节^[1]。研究表明,我国建筑总能耗约占社会终端能耗的 35%,而通过建筑围护结构,尤其是墙体散失的热量可占总热损失的 26% 以上^[2-3]。因此开发兼具优异隔热性能与可靠力学性能的新型墙体材料,对推动建筑结构加固与节能保温的一体化实施具有重要意义。

传统水泥基保温材料如玻化微珠混凝土、泡沫混凝土等普遍存在强度低、吸水率高或耐久性差等问题,难以在承重与保温领域实现协同应用^[4-5]。为实现力学承载与隔热保温的性能协同,学者们将目光投向具有纳米多孔结构的 SiO₂ 气凝胶:其超高孔隙率与纳米孔结构可显著抑制孔隙气体对流并削弱固相传热通道,从而在较低掺量下可有效降低导热系数^[6-10]。然而,气凝胶颗粒自身强度低且疏松可压缩,掺入后易引发团聚,在气凝胶水泥基体界面形成薄弱区^[11-13],导致强度与工作性劣化。基于此,本研究通过气凝胶掺量优化与基体适配设计优化承载骨架与界面传力效率,从而实现力-热平衡与性能协同提升。

目前关于改善气凝胶在水泥基材料中的应用已有一些研究,王飞等^[14]利用硅烷偶联剂对气凝胶进行表面改性,在体积替换率为 60% 时,砂浆导热系数可降低至 0.6039 W/(m·K),而抗压强度只有 2.15 MPa;在泡沫混凝土及泡沫保温材料体系中,Liu 等^[15]以气凝胶增强泡沫混凝土为对象,在实现导热率降低约 48.4% 的同时,其抗压强度处于可接受水平;全培周^[16]通过引入粉煤灰和膨胀珍珠岩制备泡沫保温材料,在掺入 18% 膨胀珍珠岩或 SiO₂ 气凝胶复合填料时,导热系数可降至 0.051 W/(m·K),但抗压强度仅为 0.883 MPa,难以承担结构受力。在高强度超高性能混凝土(UHPC)体系中,Ng 等^[17-18]在超高性能混凝土(UHPC)中掺入 60%~70% 体积分数的气凝胶时,虽获得更低的导热系数,但 28 d 抗压强度显著下降至 4~18.1 MPa。可见目前多数研究材料虽具极低的导热系数但强度损失明显。为缓解这一矛盾,部分学者开始从基体设计和界面改性角度入手,例如 Zaidi 等^[19]发现,通过添加纳米 SiO₂ 可以显著提高气凝胶混凝土的抗压强度。掺入纳米 SiO₂ 等高活性矿物掺合料,可提高气凝胶混凝土基体及界面区致密度,在保持保温隔热效果的同时,有效缓解抗压强度的劣化趋势^[20-22]。相关

文献亦指出降低水胶比、使用纳米级 SiO₂、硅灰等矿物掺合料或优化骨料与气凝胶级配,是实现气凝胶水泥基材料隔热性能与力学强度平衡的重要途径^[23-24]。

基于此,本研究设计并制备两种高性能水泥基体:硅灰粗骨料基体(骨料为 200~400 目砂)与矿粉细骨料基体(骨料为 400~600 目砂),探讨复合材料在不同气凝胶掺量下导热系数与抗压强度的演变规律,并通过扫描电镜(SEM)分析其微观结构,借助 X 射线衍射(XRD)揭示水化反应机制。旨在构建与气凝胶特性相适配的高性能水泥基承载骨架,协同优化水泥基复合材料的力学强度与隔热性能,同时阐明“骨料级配-胶凝体系-气凝胶”多级协同作用机理,为突破气凝胶水泥基材料力学强度与隔热性能的适配难题提供新的设计策略与理论依据。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

SiO₂ 气凝胶由广东埃力生高新科技有限公司所生产,具体参数如表 1 所示;水泥采用礼泉海螺水泥有限公司生产的普通硅酸盐水泥,其力学性能如表 2 所示;矿粉为 S95 级矿粉,密度为 2.8~3.0 g/cm³,平均等效粒径约为 10~50 μm;硅灰为郑州恒诺滤材所产的 I 级硅灰,密度为 2.33 g/cm³ 平均粒径为 0.1~0.3 μm,矿粉与硅灰的化学组成见表 3。

表 1 SiO₂ 气凝胶的基本参数

参数	表观密度 /(g· cm ⁻³)	粒径 范围 /mm	比表面积 /(m ² · g ⁻¹)	孔隙 率 /%	孔径 /mm	二氧化 硅纯度 /%
性能	0.10	≤4	500~1000	>90	20~100	>99

表 2 水泥的基本参数

品种	密度 /(g· cm ⁻³)	3 d 强度/MPa		28 d 强度/MPa		粒径 /μm
		抗压强度	抗折强度	抗压强度	抗折强度	
普通硅酸 盐水泥	3.10	17.0	3.5	42.5	6.5	80

表 3 S95 矿粉与硅灰组成成分

项目	组成成分占比/%						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃
S95 矿粉	31.0	13.0	40.0	12.0	4.0	—	—
硅灰	97.7	0.3	0.3	0.3	—	1.3	0.1

1.2 试块制备

本研究设计两种水泥基体(A、B):A 为硅灰粗

骨料体系(200~400目砂),B为矿粉细骨料体系(400~600目砂),具体配合比详见表4。为系统探究气凝胶掺量对水泥基复合材料性能的调控规律,在15 kg总质量固定条件下,采用等质量替换法分别掺入0%、2%、4%、6%、8%的SiO₂气凝胶粉末。水胶比通过前期预试验优化确定,以确保气凝胶的均匀分散与复合材料性能的可靠性。

试件的制备流程如图1所示,首先对SiO₂气凝胶颗粒进行机械粉碎预处理,随后根据配比精确称量各组分,将预处理后的气凝胶粉末与基体原料在立式砂浆搅拌机中先干混3~5 min,再分两次加入拌和水,先加1/2水量搅拌5 min,后加剩余水量继续搅拌10 min;最后将拌合物浇筑入300 mm×300 mm×30 mm(导热测试)与70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm(强度测试)模具中,经振捣密实、室温静置

24 h脱模后,然后将试块置入养护箱中养护28 d,温度为(20±2)℃,相对湿度为90%~95%。

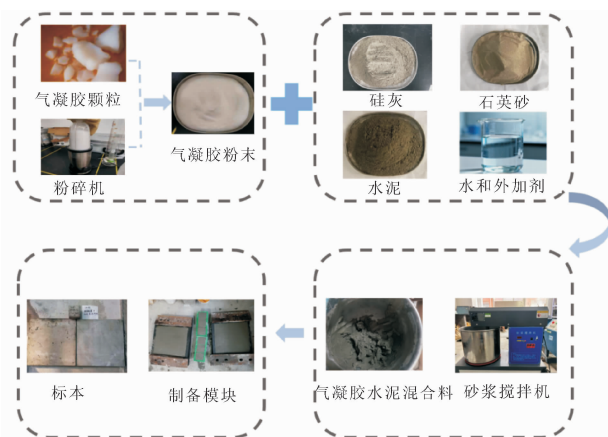


图1 水泥基复合材料的制备过程

表4 气凝胶水泥基复合材料配合比

编号	材料用量/g										气凝胶占比/%	水胶比
	水泥	硅灰	S95 矿粉	砂	气凝胶粉末	减水剂	CaO 膨胀剂	纤维 PVA	消泡剂			
A0	7200	1350	0	5250	0	150	750	30	4.5	0	0.25	
A1	7200	1350	0	5250	150	150	750	30	4.5	2	0.25	
A2	7200	1350	0	5250	300	150	750	30	4.5	4	0.25	
A3	7200	1350	0	5250	450	150	750	30	4.5	6	0.25	
A4	7200	1350	0	5250	600	150	750	30	4.5	8	0.25	
B0	7050	0	1800	5250	0	150	600	30	4.5	0	0.50	
B1	7050	0	1800	5250	150	150	600	30	4.5	2	0.50	
B2	7050	0	1800	5250	300	150	600	30	4.5	4	0.50	
B3	7050	0	1800	5250	450	150	600	30	4.5	6	0.50	
B4	7050	0	1800	5250	600	150	600	30	4.5	8	0.50	

1.3 试验方法

1.3.1 导热系数测试

导热系数测试严格遵循标准《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》^[24](GB/T 10294—2008),采用PDR-3030B型平板导热系数测定仪进行系统测量。测试时将300 mm×300 mm×30 mm的试件置于仪器腔体,设置热板温度35℃,冷板温度15℃,待系统达到热稳态后记录导热系数值。

1.3.2 抗压性能测试

抗压强度测试严格依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[25](GB/T 50081—2019),采用DYE-300S型全自动压力试验机完成,将标准养护至规定龄期的70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm立方体试件从养护环境中取出置于试验机下压板中心,以

(1.0±0.1) kN/s的加载速率连续均匀加载,直至试件破坏,自动记录峰值荷载。

1.3.3 微观结构测定

微观结构表征采用扫描电子显微镜(SEM)和X射线衍射(XRD)联用分析。SEM测试选取5 mm×5 mm×5 mm试样,经喷金处理后使用Tescan Mira4显微镜在20 kV加速电压下观察微观形貌。XRD分析采用布鲁克D8 Advance衍射仪,以CuK α 辐射源在10°~80°范围内扫描,步长0.02°,扫描速度4°/min。每个样品选取3个不同区域进行测试,确保结果可靠性。

1.3.4 流动性能测试

为评估外掺SiO₂气凝胶对水泥基材料流动性的影响,采用胶砂流动度跳桌法进行测试GB/T 2419—2005。拌合物制备完成后立即装入截锥圆模

并按标准程序提模,在跳桌规定冲击次数下测定扩展直径;每组试验不少于 3 次平行测试,取平均值作为结果。为保证组间对比的可比性,本研究在不同气凝胶掺量下保持拌合制度一致,并固定水胶比与减水剂掺量,以排除外加剂调整带来的干扰,从而突出气凝胶掺入对流动性能的影响。

2 试验结果与分析

2.1 导热系数

导热系数是评价气凝胶水泥基复合材料隔热性能的核心指标^[26]。图 2 展示了两种高性能基体在不同气凝胶掺量下的导热系数测试结果,结果显示,随着气凝胶掺量的增加,两种基体材料的导热系数均呈显著下降趋势,当气凝胶掺量从 0% 增至 6%,基体 A 的导热系数从 0.5635 W/(m·K) 降至 0.3357 W/(m·K),基体 B 则从 0.4457 W/(m·K) 降至 0.2764 W/(m·K),降幅分别达到 40.5% 和 38.0%。隔热性能提升主要源于气凝胶独特的纳米多孔结构,有效抑制空气对流传热^[27]。当气凝胶掺量超过 6%,两种基体的导热系数下降趋势均趋于平缓,这可能是由于过量的气凝胶颗粒在基体中发生局部团聚,形成了不连续的热阻隔区域^[28-30]。

对比两种基体,在相同气凝胶掺量下,基体 B 的导热系数始终显著低于基体 A。这是因为基体 B 采用的矿粉细骨料体系形成了更为优化的“基体-气凝胶”复合结构,一方面,较细骨料与气凝胶颗粒形成了更紧密的堆积,减少了界面热阻;另一方面,矿粉的火山灰反应消耗了大量 Ca(OH)₂,生成更多的 C-S-H 凝胶,进一步优化了界面过渡区的热工性能^[31-32]。相比之下,基体 A 中粗骨料与气凝胶之间存在一定的界面缺陷,影响了热阻隔效果的发挥。

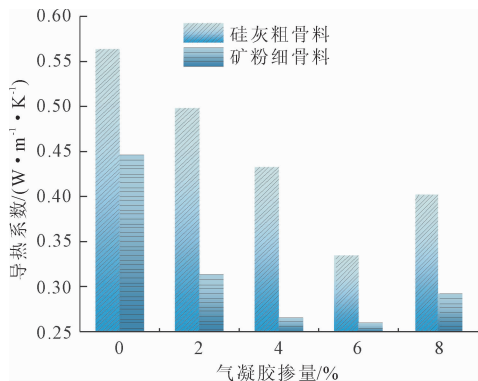


图 2 气凝胶掺量对水泥基复合材料导热系数的影响

2.2 流动度

图 3 给出了两种基体在不同气凝胶掺量下的跳桌流动度结果。随着 SiO₂ 气凝胶掺量增加,胶砂流动度整体呈下降趋势,说明外掺气凝胶会降低水泥基材料的工作性。由于固定水胶比与减水剂掺量,因此流动度的变化可主要归因于气凝胶引入导致的体系流变特性改变。并且在气凝胶掺量相同的情况下,两种基体的流动性能差异不大。

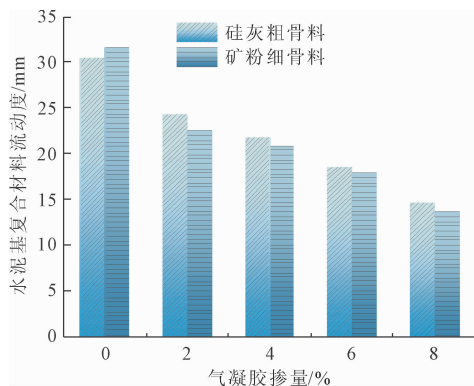


图 3 气凝胶掺量对水泥基复合材料流动度的影响

2.3 抗压强度

抗压强度测试结果如图 4 所示,气凝胶的掺入导致两种基体材料的抗压强度明显降低。随着气凝胶掺量由 0% 提高至 8%,基体 A 的 28 d 抗压强度由 88.69 MPa 降低至 22.52 MPa,降幅为 74.6%;基体 B 的 28 d 抗压强度由 83.4 MPa 降低至 28.6 MPa,降幅为 65.7%,且当气凝胶掺量达 4% 后,增加气凝胶掺量对抗压强度的削弱作用趋于稳定。原因在于低掺量阶段(0%~4%)气凝胶主要取代了原本致密连续的水泥浆体和细骨料,使有效承载骨架迅速削弱、孔隙率明显提高,强度下降最为显著;当掺量超过一定水平后,材料内部的弱化区基本形成,继续增加气凝胶主要在原有薄弱区域内累积,对剩余承载骨架的边际削弱作用减弱,因此宏观抗压强度的下降趋势逐渐趋于平缓。为直观比较两种基体不同气凝胶掺量时的强度差异,图 5 给出了两种基体 28 d 抗压强度的对比情况。当气凝胶掺量处于 0%~4% 范围时,基体 A 与基体 B 的 28 d 抗压强度无显著差异,表明该掺量区间内气凝胶对基体抗压强度的调控效应不明显。当气凝胶掺量达到 6% 时,基体 A 的抗压强度为 26.8 MPa,而基体 B 的抗压强度达 35.2 MPa,显著优于基体 A。基体 A 中粗骨料与气凝胶颗粒的尺寸差异较大,在界面处易形成应力集中,导致强度下降更为明显。气凝胶的掺

入导致力学性能劣化,但基体 B 中的细骨料与经粉碎处理的气凝胶粉末在粒径上更为匹配,这种优化的颗粒级配体系能够形成更为致密的堆积结构,改善气凝胶与基体之间的界面过渡区(ITZ)缺陷^[33]。

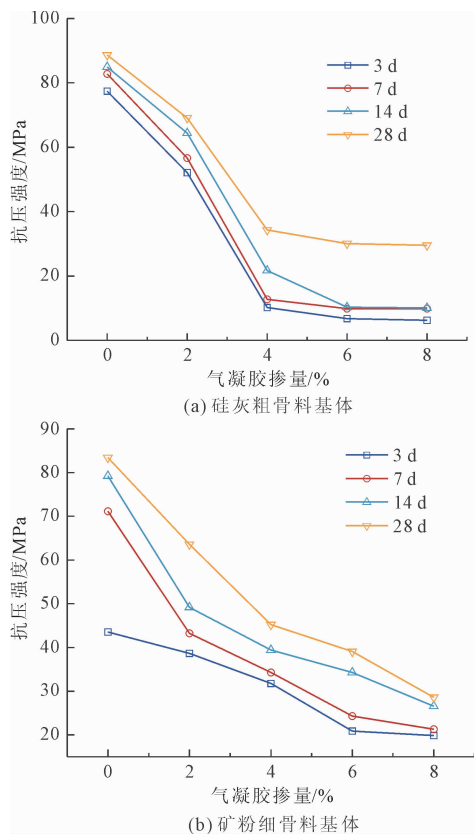


图 4 气凝胶掺量对水泥基复合材料抗压强度的影响

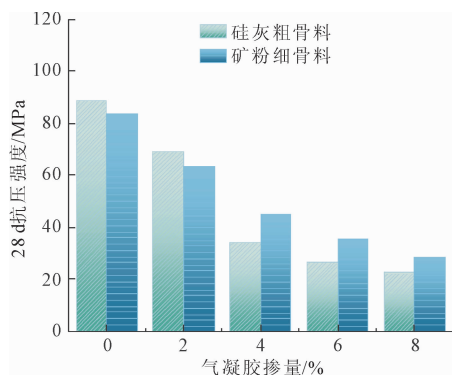


图 5 28 d 基体 A、B 抗压强度对比图

2.4 微观结构分析

气凝胶与水泥基体之间的界面粘结性能直接影响应力传递效率^[34]。借助扫描电子显微镜(SEM)观察两种基体材料的微观结构如图 6 所示,结果显示,本试验采用的高性能基体有效改善了气凝胶与水泥基体的界面特性。在基体 B 中,可观察到气凝胶颗粒被致密的水化产物充分包裹,形成了良好的

界面结合^[35-36]。这种优化的界面结构主要源于细骨料与气凝胶颗粒的紧密堆积,以及矿粉火山灰反应生成的 C-S-H 凝胶对界面区域的强化作用。相比之下,基体 A 的微观结构显示出不同的特征。虽然硅灰的填充效应提升了基体的密实度,但粗骨料与气凝胶颗粒之间的尺寸差异导致界面结合不够理想,部分区域可见明显的界面缝隙。这种结构差异直接影响了应力传递效率,因此力学性能相对较差。

从水化产物形貌观察,基体 B 中可见大量纤维状和网状 C-S-H 凝胶交织形成连续的空间网络,这种结构有利于荷载的均匀分布。同时气凝胶颗粒被有效包裹在水化产物中,既发挥了其隔热功能,又通过良好的界面粘结参与了应力传递。而在基体 A 中,水化产物的分布相对不均匀,特别是在气凝胶颗粒集中分布区域,出现了局部结构疏松现象。

在气凝胶掺量为 6% 的基体 B 样品中,微观结构显示出良好的综合特征,气凝胶分散均匀,界面过渡区致密连续,水化产物发育完善。这种微观结构特征与其优异的宏观性能表现高度一致。当气凝胶掺量增加至 8% 时,两种基体均出现明显的气凝胶团聚现象,团聚体周围形成微观裂纹,破坏了基体的连续性。这一观察结果从微观层面解释了高掺量下材料性能显著下降的原因。

2.5 XRD 分析

为阐明气凝胶外掺后复合材料力学-热工性能变化的物相基础,本文采用 XRD 识别主要晶相与水化产物,并重点比较 CH 峰及熟料残余峰的变化,以表征矿粉火山灰反应与水化程度。结合 SEM 对界面过渡区形貌的观察,进一步说明物相变化、结构致密、ITZ 改善对强度保留与性能协同的支撑作用。

X 射线衍射分析结果如图 7 所示,图中揭示了两种基体材料水化过程和物相组成的差异。其中, S95 矿粉发挥了关键作用,在未掺气凝胶的基准组中,基体 B 在水化反应初期与中期的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 特征衍射峰强度明显低于基体 A,这表明矿粉的火山灰反应更为充分,消耗了大量水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。二次水化产物能够有效地在气凝胶颗粒表面形成牢固的包裹结构^[37]。这种结构极大地增强了气凝胶与水泥基体界面粘结力,这是基体 B 在高气凝胶掺量下仍能保持较优力学性能的根本原因。

随着气凝胶掺量的增加,两种基体的 SiO_2 特征峰均呈现规律性增强,证实了气凝胶的成功引入。在相同掺量下,基体 B 的 SiO_2 特征峰表现出更均匀的峰形分布,说明气凝胶在其中分散更为均匀,且与

基体发生了更充分的界面反应。相比之下,基体 A 中的 SiO_2 特征峰相对尖锐,表明气凝胶的分散程度

较低,存在局部团聚现象。

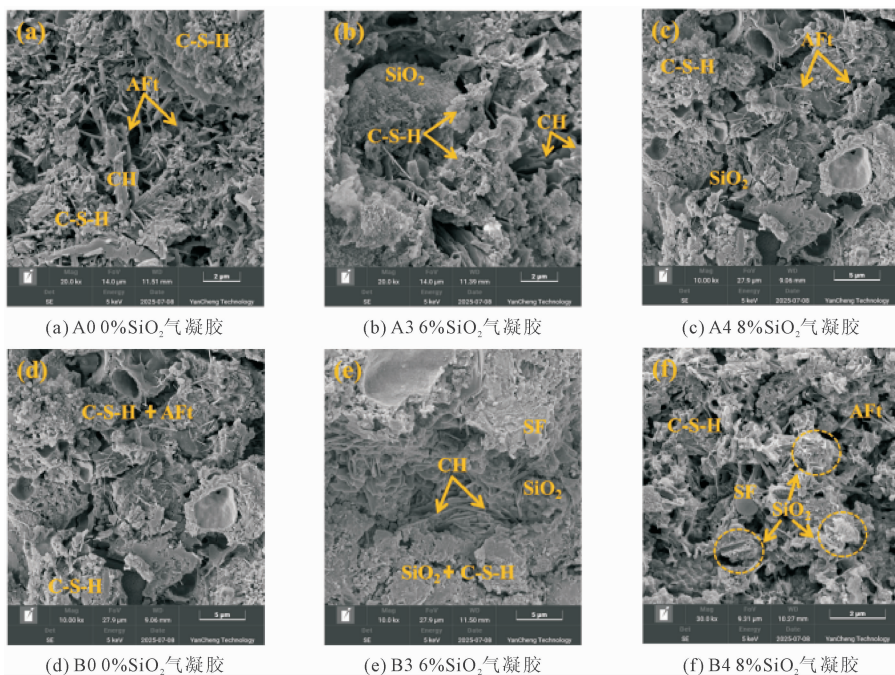


图 6 不同 SiO_2 气凝胶掺量下两种水泥基材料电镜扫描

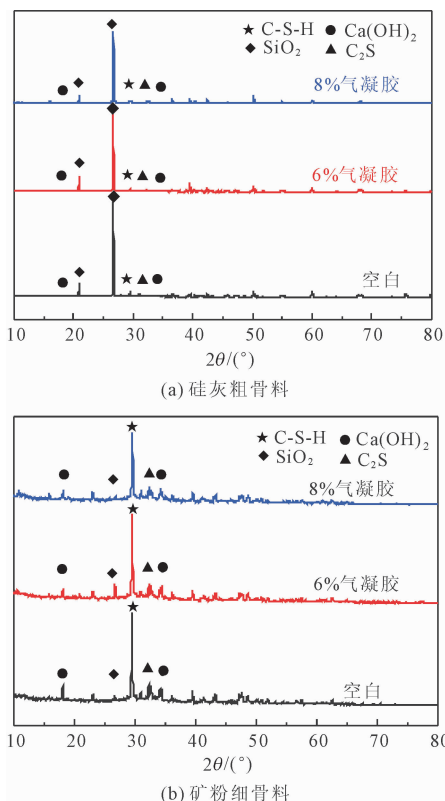


图 7 水泥基复合材料的 XRD 光谱图

在 6% 气凝胶掺量下,基体 B 的衍射图谱显示出独特的物相特征,水化反应中期的 C-S-H 凝胶特

征峰显著增强,同时 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 特征峰进一步减弱。这一现象表明了气凝胶中 SiO_2 参与了二次水化反应,与矿粉协同作用,在气凝胶颗粒表面生成了具有胶凝特性的界面反应层^[38]。这种界面反应显著增强了气凝胶与基体的粘结强度,从而在提升材料保温性能的同时,有效维持其力学性能。基体 B 中水泥熟料特征峰(C_3S 和 C_2S)的衰减速度明显快于基体 A,表明其水化过程更为充分。这种快速而充分的水化反应为材料早期强度提供保障。

2.6 力-热平衡评价与应用建议

SiO_2 气凝胶掺入水泥基复合材料后,一方面显著改变传热通道、降低导热系数;另一方面也会影响承载骨架连续性与界面传力效率。为清晰说明气凝胶对受力与传热的交互作用关系,从受力路径、传热路径与耦合结果三个层次进行归纳,并给出工程应用建议。

(1) 受力路径:气凝胶颗粒及其界面过渡区(ITZ)通常为相对薄弱区域,掺量升高时易诱发局部应力集中、裂纹萌生与扩展,从而造成强度下降。若基体水化产物对气凝胶颗粒的包裹更充分、界面更致密,则可提高界面黏结与传力连续性,减缓强度损失。

(2) 传热路径:气凝胶的高孔隙率与纳米孔结

构能够抑制孔隙气体对流并提高等效热阻,同时削弱连续固相导热通道,从而实现导热系数下降。

(3) 耦合结果:在中低掺量范围内,气凝胶带来的热阻提升明显,而承载骨架仍保持相对连续;当掺量过高时,团聚、引气风险增加,同时削弱界面传力,导致强度降低出现力-热失衡。因此,力-热平衡的实现依赖于掺量、界面强化、分散控气三者协同。

在工程应用层面,围护结构与外墙保温板等保温场景宜选用界面更致密、传力更连续的基体体系,并将气凝胶掺量控制在中等范围,以兼顾降导热与强度之间的平衡;半承重或承载敏感部位应降低掺量,确保骨架连续性,在保证力学性能前提下降低导热;高掺量轻质隔热制品则应重点控制团聚,必要时采用预润湿或制浆分散以提升均匀性,避免缺陷主导导致力-热失衡。

3 结 论

本研究制备了两种不同类型的高性能水泥基体:硅灰粗骨料基体与矿粉细骨料基体并在其中掺入 0%~8% 的 SiO_2 气凝胶粉末,测试了该复合材料的抗压强度与导热系数,并利用扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射 (XRD) 分析其微观结构,综合宏观性能测试与微观结构特征进行分析,主要结论如下:

(1) 随气凝胶掺量增加,两种基体导热系数均显著下降。掺量从 0% 增至 6% 时,基体 A (200~400 目砂) 导热系数从 $0.5635 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 降至 $0.3357 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,降幅 40.5%;基体 B (400~600 目砂) 从 $0.4457 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 降至 $0.2764 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,降幅 38.0%;掺量超 6% 后,导热系数下降趋势趋于平缓。相同气凝胶掺量下,基体 B 的导热系数始终显著低于基体 A,表明其热工性能更优。

(2) 气凝胶的掺入导致两种基体材料的抗压强度明显降低。随着气凝胶掺量由 0% 提高至 8%,基体 A 的 28 d 抗压强度由 88.69 MPa 降低至 22.52 MPa,降幅为 74.6%;基体 B 的 28 d 抗压强度由 83.4 MPa 降低至 28.6 MPa,降幅为 65.7%。基体 B 在 6% 气凝胶掺量时表现出最佳综合性能,导热系数降至 $0.2764 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,28 d 抗压强度保持 35.2 MPa,为推进建筑结构加固与节能改造提供兼具隔热性能与力学强度的解决方案。

(3) 微观结果显示基体 B 中气凝胶颗粒被致密的水化产物充分包裹,气凝胶分散均匀,界面过渡区致密连续,具有良好的界面粘结性能。X 射线衍

射结果显示基体 B 中矿粉火山灰反应带来界面强化效应,颗粒紧密堆积,这是实现性能协同提升的根本原因。

参考文献:

- [1] Hong Tianzhen, Li Cheng, Yan Da. Updates to the china design standard for energy efficiency in public buildings [J]. Energy Policy, 2015,87:187-198.
- [2] 谷燕成,陈思诺,黄恩兴. 建筑节能保温材料的现状及发展[J]. 建筑节能,2016,44(6):34-38.
- [3] 孔祥飞,刘少宁,钟俞良,等. 相变蓄能墙多因素热特性分析及优化研究[J]. 建筑科学,2016,32(8):40-46.
- [4] 付平,植可炜,黄茶,等. 纤维/气凝胶泡沫混凝土的制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(9):2701-2706.
- [5] 金玉杰,李义. 浅谈无机保温材料在建筑中的应用与发展[J]. 吉林建筑工程学院学报,2012,29(6):17-19.
- [6] 李胡勇,杨艳. 无机保温砂浆研究进展[J]. 混凝土与水泥制品,2015(2):69-72.
- [7] Xu Qingmin, Gao Shouzhen, Diao Zixuan, et al. Phenolic modified SiO_2 aerogel as a hybrid thermal insulation systems [J]. Langmuir, 2025,41(11):7592-7604.
- [8] Zemke F, Gonthier J, Scoppola E, et al. Origin of the springback effect in ambient-pressure-dried silica aerogels: the effect of surface silylation [J]. Gels, 2023,9(2):160.
- [9] 赵丽丹,吴宁,孟娟,等. 纳米纤维隔热材料的制备、性能与应用[J/OL]. 复合材料学报,1-22[2026-03-10]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20251215.003>.
- [10] 陈欣妍,陈依玲,彭馨博,等. 隔热材料的制备、结构及应用研究进展[J]. 化工学报,2025,76(12):6179-6195.
- [11] 董健苗,李万金,黄小青,等. 硅灰协同分散石墨烯对水泥基材料性能的影响[J]. 混凝土,2023(12):182-186,191.
- [12] 缪昌文,余伟,吴彰钰,等. 水泥基仿生超材料研究进展与展望[J]. 土木工程与绿色建筑,2025,1(2):1-8.
- [13] 潘月磊,程旭东,闫明远,等. 二氧化硅气凝胶及其在保温隔热领域应用进展[J]. 化工进展,2023,42(1):297-309.
- [14] 王飞,刘朝辉,邓智平,等. 不同体积掺量的 SiO_2 气凝胶对砂浆性能的影响[J]. 功能材料,2016,47(4):4064-4069.
- [15] Liu Sijia, Zhu Kunmeng, Cui Sheng. A novel building material with low thermal conductivity: Rapid synthesis

- of foamconcrete reinforced silica aerogel and energy performance simulation [J]. *Energy & Buildings*, 2018, 177:385-393.
- [16] 全培周. SiO₂ 气凝胶/膨胀珍珠岩粉煤灰泡沫保温材料研究[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(7):130-133.
- [17] Ng S, Jelle B, Gao T. Experimental investigations of aerogel-incorporated ultrahigh performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 77:307-316.
- [18] Ng S, Sangheng L. Insulating and strength properties of an aerogel-incorporated mortar based on UHPC formulations [J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 629-630: 43-48.
- [19] Al Zaidi I K, Demirel B, Atis C D, et al. Investigation of mechanical and thermal properties of nano SiO [J]. *Structural Concrete*, 2020, 21(3):1123-1133.
- [20] 常旭东,何 鑫,孙西文. 水利工程混凝土裂缝成因机理及控制措施[J]. *水泥*, 2025(9):116-119.
- [21] 廖木子,厉双飞,何 亮,等. SiO₂ 气凝胶在水性石膏中的稳定分散工艺及应用性能研究[J/OL]. *材料导报*, 1-16 [2026-03-10]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20260212.1332.034>.
- [22] 侯建业,何 坤,单光贺,等. 气凝胶材料研究进展、成果与展望[J]. *中国建材科技*, 2025, 34(S1):113-123.
- [23] 李羽昂. 基于 SiO₂ 气凝胶新型绝热匀质板的制备与性能研究[D]. 南京:南京林业大学, 2024.
- [24] 王冬丽,杨 策,潘慧敏,等. 水泥基材料孔结构与吸水性能关系研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(5): 1420-1428, 1440.
- [25] 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[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [26] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
- [27] 胡田飞,袁一飞,岳祖润,等. 季节性冻土区铁路路基保温材料应用现状及展望[J]. *水利与建筑工程学报*, 2023, 21(2):169-177.
- [28] 平小凡,郭 亮,沈庆贺,等. 纤维增强气凝胶复合材料的多尺度协同机制:隔热-阻燃性能优化与工程应用[J/OL]. *复合材料学报*, 1-23 [2026-03-10]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20251028.002>.
- [29] 田武逵,王江海,邓小玲,等. SiO₂ 气凝胶力学及高温稳定性能研究进展[J/OL]. *化工新型材料*, 1-7 [2026-03-10]. <https://doi.org/10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.09.030>.
- [30] 林嘉洲,王继梅,左彦峰. 硅基气凝胶改性及其水性隔热涂料的研究进展[J/OL]. *化工新型材料*, 1-7 [2026-03-10]. <https://doi.org/10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.05.09>.
- [31] 王鹏昕,李明俊. 微米级铁尾矿砂/SiO₂ 气凝胶复合材料的制备及其隔热特性[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(4):130-134, 150.
- [32] 汪 洋,宋纪鸿,张 程,等. 粉煤灰对页岩陶粒混凝土技术性能的影响分析[J]. *长春工程学院学报*, 2025, 26(4):56-63.
- [33] 马瑞彦,霍紫玮,张肖艳,等. 纳米 SiO₂ 改性再生混凝土的增韧机理及低温力学性能研究[J]. *功能材料*, 2026, 57(1):154-162.
- [34] 胡晓雯,梅发军. 玻纤复合建筑节能保温砂浆的制备及力学性能研究[J]. *功能材料*, 2025, 56(9):9155-9162, 9195.
- [35] 李 菲,乔 健. 微硅粉基 SiO₂ 气凝胶的制备及热稳定性研究[J/OL]. *有色金属*, 1-24 [2026-03-10]. <https://link.cnki.net/urlid/10.2019.TF.20260121.1038.012>.
- [36] 缪凝彦,王东方. 三聚氰胺树脂-气凝胶复合轻质泡沫涂层的构建与隔热性能研究[J]. *建筑节能*, 2025, 53(12):92-99.
- [37] 韩洪超,郭保林,王 凯,等. 矿物掺合料和养护方式对混凝土保护层耐久性能的影响研究[J]. *混凝土*, 2026(1):16-23.
- [38] 麦曲浪,刘文欢,李 辉,等. 钢渣-矿渣基胶凝材料的制备、性能及应用研究进展[J/OL]. *材料导报*, 1-23 [2026-03-10]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20251220.1155.004>.