Mine Engineering 矿山工程, 2026, 14(6), 1427-1434
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.146142

Hans汉斯

矿用气凝胶水泥基隔热材料研究综述

徐　叶[1*]，曹淑烈[2*]

[1]山东黄金矿业科技有限公司深井开采实验室分公司，山东　烟台
[2]山东黄金矿业(沂南)有限公司，山东　临沂

收稿日期：2026年9月1日；录用日期：2026年10月11日；发布日期：2026年11月3日

摘　要

深部矿井开采中，围岩温度随采深增加而显著升高，高地温热害已成为制约矿井安全高效生产的关键因素之一。利用隔热材料对高温岩层进行主动隔离，是解决深井降温问题的有效途径。SiO_2气凝胶凭借其超低导热系数(0.012~0.025 W/(m·K))与A级防火性能，为突破传统隔热材料“隔热与防火不可兼得”的瓶颈提供了全新路径。然而，纯气凝胶力学性能差、生产成本高，将其与水泥基材料复合是实现工程应用的有效策略。本文系统梳理了SiO_2气凝胶水泥基隔热材料的研究进展，涵盖气凝胶的基本特性、复合材料的制备方法、热工与力学性能的演化规律及性能增强策略。分析表明，气凝胶的掺入可显著降低水泥基材料的导热系数，最高降幅可达80%以上，但同时导致力学性能严重劣化，强度损失可达90%。围绕这一核心矛盾，学界发展了表面改性、纤维增强、多元复配及超临界发泡等协同优化策略。在工程应用层面，重点综述了CO_2泡沫混凝土及气凝胶复合隔热材料在深井巷道围岩隔热领域的最新进展，揭示了该类材料“隔热－支护－固碳”多功能协同的应用潜力。最后指出了当前研究在隔热－强度协同优化、微观作用机制及长期耐久性方面的不足，并对未来发展方向进行了展望。

关键词

SiO_2气凝胶，水泥基复合材料，矿井隔热，导热系数，力学性能，深部热害

A Review of Research on Aerogel-Based Cementitious Thermal Insulation Materials for Mining Applications

Ye Xu[1*], Shulie Cao[2*]

[1]Deep-Well Mining Laboratory Branch, Shandong Gold Mining Technology Co., Ltd., Yantai Shandong
[2]Shandong Gold Mining (Yinan) Co., Ltd., Linyi Shandong

[*]共同一作。

文章引用: 徐叶, 曹淑烈. 矿用气凝胶水泥基隔热材料研究综述[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1427-1434.
DOI: 10.12677/me.2026.146142

Received: September 1, 2026; accepted: October 11, 2026; published: November 3, 2026

Abstract

In deep mining operations, the temperature of surrounding rock increases significantly with mining depth, and high geothermal damage has become one of the key factors constraining safe and efficient mine production. The active isolation of high-temperature rock strata using thermal insulation materials represents an effective approach to mitigating the cooling demands in deep mines. SiO_2 aerogel, characterized by its ultra-low thermal conductivity (0.012~0.025 W/(m·K)) and Class A fire resistance, offers a novel pathway to overcome the longstanding trade-off between thermal insulation and fire safety in conventional insulation materials. However, the poor mechanical properties and high production costs of pure aerogel necessitate its incorporation into cement-based matrices for practical engineering applications. This paper systematically reviews the research progress on SiO_2 aerogel cement-based thermal insulation materials, covering the fundamental characteristics of aerogels, preparation methods of cementitious composites, evolution of thermal and mechanical properties, and performance enhancement strategies. The analysis reveals that the incorporation of aerogel can significantly reduce the thermal conductivity of cement-based materials by up to 80% or more, yet simultaneously causes severe deterioration in mechanical performance, with strength losses reaching up to 90%. To address this core contradiction, various synergistic optimization strategies have been developed, including surface modification, fiber reinforcement, multi-component compounding, and supercritical foaming. In terms of engineering applications, this review focuses on the latest advances in CO_2 foamed concrete and aerogel composite thermal insulation materials for surrounding rock insulation in deep mine roadways, highlighting the multifunctional synergistic potential of "insulation-support-carbon sequestration" in these materials. Finally, this review identifies the shortcomings of current research in the synergistic optimization of thermal insulation and mechanical strength, microscopic mechanisms, and long-term durability, and provides perspectives on future research directions.

Keywords

SiO_2 Aerogel, Cement-Based Composite, Mine Thermal Insulation, Thermal Conductivity, Mechanical Properties, Deep Geothermal Damage

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

建筑行业占全球能源消耗的 30%~40%，是碳排放的主要来源之一。建筑围护结构的热损失约占建筑能耗的 50%，提高围护结构的保温隔热能力是实现建筑节能的关键路径。传统有机保温材料(如聚苯乙烯泡沫、聚氨酯)虽具有优良的隔热性能，但易燃、耐久性差；无机保温材料(如岩棉、玻化微珠)虽防火性能优异，但导热系数偏高、保温效果不理想。在这一背景下，兼具超低导热系数与 A 级防火性能的 SiO_2 气凝胶成为建筑保温领域的理想候选材料。

SiO_2 气凝胶是一种由纳米级颗粒聚集形成的三维多孔固体材料，孔隙率高达 80%~99.8%，室温导热系数可低至 0.012~0.025 W/(m·K)，远低于静止空气的导热系数(约 0.026 W/(m·K))。然而，纯气凝胶力学性能差、生产成本高，限制了其直接工程应用[1]-[4]。将气凝胶与水泥基材料复合，既能发挥气凝胶的超

绝热优势，又能借助水泥基体的结构承载能力，是实现气凝胶建筑应用的有效途径。

近年来，围绕气凝胶水泥基复合材料的研究取得了长足进展，涵盖材料制备、性能优化、增强改性与工程应用等多个层面。本文基于国内外代表性研究成果，系统综述气凝胶水泥基隔热材料的研究现状，分析关键科学问题与技术挑战，并展望未来发展方向。

2. SiO_2 气凝胶的基本特性

2.1. 结构与热物理性能

SiO_2 气凝胶是通过溶胶－凝胶法合成硅酸盐网络，再经特殊干燥(超临界干燥或常压干燥)去除溶剂而获得的三维纳米多孔材料。其核心结构特征包括：纳米级骨架颗粒(1~10 nm)、纳米级孔隙(1~100 nm)、超高比表面积(500~1000 m^2/g)以及极高的孔隙率(>90%)。

气凝胶的超低导热系数源于三种传热机制的同时抑制：(1) 固体传导因骨架体积分数极低而被大幅削弱；(2) 气体传导因孔隙尺寸小于空气分子平均自由程(约 70 nm)而受到 Knudsen 效应的限制；(3) 辐射传热因纳米孔壁的多重散射而显著降低。这些机制使气凝胶的隔热性能远超传统多孔材料。

2.2. 气凝胶的局限性

尽管隔热性能优异，纯气凝胶在建筑应用中面临两大瓶颈。其一，力学性能极差——气凝胶的脆性大、强度低，抗压强度通常仅为 0.5~4.2 MPa，难以独立承载。其二，生产成本高昂——超临界干燥工艺复杂、能耗高，即便采用常压干燥，气凝胶的价格仍远高于传统保温材料。此外，疏水性气凝胶与水泥基体之间的界面相容性差，也是制约复合材料性能的重要因素。

3. 气凝胶水泥基复合材料的制备与基本性能

3.1. 制备方法与工艺

气凝胶水泥基复合材料的制备方法主要分为三类：直接掺混法、预发泡法和超临界发泡法。

直接掺混法是最常用的方法，将气凝胶粉末或颗粒与水泥、砂等原材料直接混合搅拌。为避免气凝胶在搅拌过程中上浮或飞扬，通常需控制搅拌速度和加料顺序。于本田等采用 KH570 硅烷偶联剂对气凝胶进行表面改性后等体积置换砂，制备了改性气凝胶水泥基复合砂浆[5]。

预发泡法适用于气凝胶泡沫混凝土的制备。先将发泡剂与气凝胶粉体混合发泡，再与水泥浆体拌合。张海英等采用超轻质气凝胶(75 kg/m^3)代替传统轻质气凝胶(170 kg/m^3)，通过等体积置换方法制备了超轻气凝胶泡沫混凝土[6]。

超临界 CO_2 发泡法的核心原理是利用超临界 CO_2 在水泥浆体中的溶解－扩散－反应过程，他旭鹏等通过快速卸压引发 CO_2 析出成泡，制备了超临界 CO_2 泡沫混凝土。该方法将 CO_2 的矿化固定与材料发泡相结合，兼具隔热与固碳双重功能[7]。

3.2. 热工性能

大量研究表明，气凝胶的掺入可显著降低水泥基材料的导热系数，且降幅与气凝胶掺量呈正相关。

在常规水泥砂浆中，Gao 等将 60 vol%气凝胶掺入混凝土后，导热系数从 1.95 W/(m·K)降至 0.26 W/(m·K)，降幅约 87%。Ng 等在超高性能混凝土中掺入 60 vol%气凝胶，导热系数从 2.3 W/(m·K)降至 0.26 W/(m·K) [3]。

在泡沫混凝土体系中，隔热效果更为突出。张海英等制备的超轻质气凝胶泡沫混凝土在泡沫体积比 70%时，导热系数低至 0.058 W/(m·K) [6]。Liu 等制备的气凝胶泡沫混凝土导热系数达 0.049 W/(m·K)，较

传统泡沫混凝土降低 48.4% [8]。

气凝胶的隔热机理可从微观层面理解：气凝胶颗粒在水泥基体中引入大量纳米级闭孔，这些孔隙不仅增加了热传导路径的曲折度，而且孔隙内的空气因 Knudsen 效应而导热系数大幅降低。数值模拟表明，当孔径减小至纳米尺度时，气态热传导被显著抑制，材料整体导热系数随之下降。

3.3. 力学性能

气凝胶掺入对水泥基材料力学性能的负面影响是制约其应用的核心问题。研究表明，随着气凝胶掺量的增加，复合材料的抗压、抗折强度均呈显著下降趋势。

在砂浆体系中，于本田等发现当气凝胶等体积置换砂的比例从 0 增至 40%时，28 d 抗压强度从 45.24 MPa 降至 14.45 MPa，降幅达 68% [5]。在混凝土体系中，Gao 等的研究表明 60 vol%气凝胶掺量下抗压强度从 75 MPa 降至 8.3 MPa，降幅接近 90% [2]。在高性能混凝土中，Ng 等也观察到类似的大幅强度衰减[3]。

强度劣化的主要原因包括：(1) 气凝胶颗粒自身强度极低，无法有效承载荷载；(2) 气凝胶的疏水表面与水泥基体相容性差，界面过渡区存在大量微裂纹和孔隙；(3) 气凝胶的高吸水特性会吸附拌合水，影响水泥的正常水化。

值得注意的是，气凝胶掺量与力学性能之间并非简单的线性关系。权宗刚等发现，在气凝胶掺量从 0 增至 5%时，复合保温材料的 28 d 抗压强度从较低水平增至 1.93 MPa，出现短暂提升[9]。这可能源于少量气凝胶对孔隙结构的优化效应。

4. 性能增强策略

围绕“高隔热”与“高强度”的矛盾，研究者发展了多种协同优化策略。

4.1. 表面改性

表面改性是改善气凝胶与水泥基体界面相容性的重要手段。KH570 硅烷偶联剂是应用最广泛的改性剂之一。

于本田等的研究表明，经 KH570 改性后，气凝胶颗粒可较完整地镶嵌在水泥砂浆中，界面粘结明显改善。改性后复合砂浆的 28 d 抗压强度从 17.13 MPa (未改性)提升至 17.92 MPa，抗折强度从 2.83 MPa 提升至 3.05 MPa。FTIR 分析证实，KH570 在气凝胶表面接枝了丙烯酸酯基团，使疏水表面转变为亲水状态[5]。

何森等将纳米硅溶胶加入气凝胶水泥基复合隔热板中，利用硅溶胶胶粒水解缩合后形成的三维网状结构，为孔隙提供了力学支撑，减少了养护过程中骨架的塌陷。当硅溶胶掺量为 10%时，比表面积从 53.53 m^2/g 增至 72.92 m^2/g，增幅达 36.22% [10]。

4.2. 纤维增强

纤维增强是补偿气凝胶引起强度损失的有效途径。

张雪键等研究了碳纤维对气凝胶/水泥基复合隔热材料的影响。当碳纤维添加量为 1 wt%时，复合材料的热导率降至最低(0.085 W/(m·K))，较未添加时降低 21.15%。碳纤维的桥联和支撑作用增强了孔洞的韧性，孔径和孔容均有所提高[11]。

在磷酸镁水泥体系中，聚丙烯纤维的掺入同样发挥了显著的增韧效果。Hou 的研究表明，经表面改性的聚丙烯纤维与磷酸水泥基体形成了更紧密的粘结，在改善力学性能的同时降低了复合材料的能

耗[12]。

4.3. 多元复配

将气凝胶与其他轻质骨料或辅助胶凝材料复配，可在保持隔热性能的同时改善力学性能。

权宗刚等将 SiO_2 气凝胶与钼尾矿、膨胀珍珠岩复配制备复合保温材料。钼尾矿中富含的硅铝质成分可参与火山灰反应，形成 C-S-H 凝胶，补偿因气凝胶引入导致的强度损失。当气凝胶掺量为 5%时，导热系数达 0.0904 W/(m·K)，28 d 抗压强度为 1.93 MPa [9]。

丰桢敏等将气凝胶与空心玻璃微珠复配于白色硅酸盐水泥中。空心玻璃微珠的低导热系数(0.031 W/(m·K))和较高的抗压强度，在不过度牺牲隔热性能的前提下提升了材料的力学性能[13]。

4.4. 超临界发泡技术

他旭鹏等发展的超临界 CO_2 相变发泡技术代表了气凝胶水泥基材料制备的创新方向。该方法通过在超临界温压条件下使 CO_2 溶解于水泥浆体，再快速卸压引发 CO_2 析出成泡，形成孔径均匀(约 0.2 mm)、相互独立的闭孔结构。所制备的超临界 CO_2 泡沫混凝土 28 d 抗压强度达 4.90~5.79 MPa，导热系数为 0.1246~0.2226 W/(m·K)。更重要的是，该材料兼具 CO_2 固碳功能，固碳率达 6.27%~10.36% [7]。

4.5. 增强策略的综合对比

上述四种性能增强策略在作用机理、提升效果及适用条件上各有侧重。为便于系统比较，表 1 汇总了各策略的力学性能提升幅度、对导热系数的影响、技术成熟度及核心优缺点。

Table 1. Comprehensive comparison of performance enhancement strategies for aerogel-based cementitious composites
表 1. 气凝胶水泥基复合材料性能增强策略综合对比

增强策略	力学性能提升	对导热系数影响	技术成熟度	预估成本	核心优点	主要缺点	适用条件
表面改性(KH570)	抗压提升 4.6%，抗折提升 7.8%	略有下降(改善界面)	实验室成熟	低	操作简单，效果明显	仅改善界面，不增加基体强度	各类气凝胶水泥基体系
碳纤维增强	抗折强度提升显著	降低 21.15% (1%掺量时)	中等	中	桥联增韧，导电导热可调	分散性控制困难，掺量过高反作用	对韧性要求高的场景
多元复配(钼尾矿)	28 d 抗压 1.93 MPa	0.0904 W/(m·K)	中等	低	固废利用，成本低	强度提升有限	非承重保温结构
超临界 CO_2 发泡	28 d 抗压 4.90~5.79 MPa	0.1246~0.2226 W/(m·K)	较低	高	孔径均匀，兼具固碳功能	设备要求高，工艺复杂	深井隔热与 CO_2 封存协同场景

从作用机理层面分析，表面改性通过化学键合改变气凝胶颗粒表面性质，降低其疏水性，从而改善界面过渡区的微观结构，属于“界面工程”范畴。该策略的优势在于普适性强，几乎适用于所有气凝胶–水泥复合体系，但对气凝胶本体的低强度缺陷无能为力。纤维增强依靠纤维的桥联效应和拔出耗能机制来提升材料的韧性和抗裂能力，属于“力学补强”策略，其效果取决于纤维类型、长径比、掺量及分散均匀性。碳纤维因高弹性模量适用于增强刚性，聚丙烯纤维因高延展性适用于增韧。多元复配通过引入辅助胶凝材料(如钼尾矿)参与火山灰反应，生成 C-S-H 凝胶填补孔隙，属于“基体强化”策略。该策略

的优势在于可实现固废资源化利用，但强度提升的上限受限于辅助胶凝材料的反应活性。超临界发泡技术则通过物理成泡方式构建均匀闭孔结构，在降低密度的同时保持一定的强度，属于“结构重构”策略，但设备投入和工艺控制要求较高，目前尚处于实验室验证阶段。

5. 工程应用与案例分析

气凝胶水泥基隔热材料在高温矿井岩体隔热领域展现出独特的应用价值。深部矿井开采中，围岩温度随采深增加而显著升高——我国采深超过 1000 m 的矿井，原岩温度可达 40℃~45℃，工作面温度达 34℃~36℃。围岩放热是深部矿井热害的主要来源，采用隔热材料对高温岩层进行主动隔离，是解决深井降温问题的有效途径之一。

5.1. 泡沫混凝土在巷道围岩隔热中的应用

泡沫混凝土因其质轻、隔热、施工便捷等特点，被广泛应用于井下隔热降温工程。游波等选用 5 种矿用隔热材料开展深井巷道隔热降温模拟研究，结果表明泡沫混凝土的隔热性能最佳、经济成本最低，5~10 cm 为最佳隔热层厚度[14]。研究进一步发现，隔热材料导热系数与巷道围岩温度梯度呈负相关，采用泡沫混凝土隔热层后巷道隔热和降温效果显著。吴栋等以普通硅酸盐水泥、粉煤灰、砂子和玻化微珠为原料，通过正交试验优化配比，研制出一种轻质、隔热好且承载能力强的矿用隔热材料[15]。借助相似模拟试验系统验证了喷浆隔热巷道的可行性，结果表明喷浆层厚度愈大，隔热阻碍效果愈明显；隔热材料导热系数越低，隔热效果越好。

5.2. CO_2 泡沫混凝土的矿井隔热应用与固碳协同

CO_2 泡沫混凝土作为矿用隔热材料，既可服务于深部矿井热害治理，又可实现 CO_2 的封存利用，形成了“隔热 + 固碳”的协同技术路径。覃述兵等系统研究了不同发泡气体泡沫混凝土的物理力学性能，发现相同密度等级下 CO_2 泡沫混凝土的导热系数最低，为 0.1158~0.1963 W/(m·K)；相较于 CO_2 泡沫混凝土，氮气泡沫混凝土的导热系数高 21.9%~32.9%，空气泡沫混凝土高 25.8%~36.6% [16]。微观分析表明，CO_2 泡沫混凝土的串联孔和畸形孔更少、气孔结构更细密、水化产物中碳酸钙含量更多。

他旭鹏等进一步发明了超临界 CO_2 相变发泡制备泡沫混凝土的方法。在干密度 787.14~993.52 kg/m^3 范围内，超临界 CO_2 泡沫混凝土导热系数为 0.1246~0.2226 W/(m·K)，较普通泡沫混凝土具有强化的隔热性能[7]。该材料的固碳率达 6.27%~10.36%，利用坑口电厂 CO_2 制备泡沫混凝土用于矿井封存利用被证明是可行的。基于巷道围岩“阻热圈”理论开展的数值模拟研究表明，CO_2 泡沫混凝土可有效降低巷道风流温度、削弱围岩散热。

5.3. 气凝胶复合隔热材料在深井巷道中的探索

SiO_2 气凝胶的超低导热系数使其在深井热害防治中受到关注。李夕兵等构建了由秸秆纤维、SiO_2 气凝胶、黏土陶粒和钢纤维组成的多组分隔热复合材料体系，用于深部金属矿巷道壁面隔热[17]。通过正交实验多目标优化，最佳配比(6%秸秆纤维、3% SiO_2 气凝胶、10%黏土陶粒、0.9%钢纤维)实现了抗压强度 43.07 MPa、抗拉强度 5.43 MPa、导热系数 0.1998 W/(m·K)的综合性能。该研究为深部高温–高应力耦合环境下巷道的隔热与支护一体化提供了有效途径。孙建飞等以多孔 SiO_2 气凝胶和玉米秸秆纤维素为原料制备了纤维基隔热材料，在 45℃~75℃温度范围内的测试表明，其隔热系数显著低于传统岩棉、聚氨酯等材料，更适用于矿井等复杂服役环境[18]。

综合来看，气凝胶水泥基隔热材料在矿井岩体隔热中的应用已从实验室研究走向工程验证阶段。泡沫混凝土(尤其是 CO_2 泡沫混凝土)因其兼具隔热与固碳的双重功能，成为深井热害治理与碳减排协

同推进的重要方向。气凝胶复合材料则凭借超低导热系数，在兼顾隔热与支护一体化的高性能材料研发中展现出潜力。未来研究应进一步关注：(1) 隔热材料在井下高湿、高应力环境中的长期服役性能；(2) 隔热层与锚喷支护结构的协同工作机制；(3) 低成本、大掺量固废基气凝胶隔热材料的工程化制备技术。

6. 关键问题与展望

6.1. 当前研究不足

尽管成果丰硕，气凝胶水泥基隔热材料的研究仍存在若干不足。

其一，隔热与强度的矛盾尚未根本解决。气凝胶掺量超过一定阈值后，强度损失急剧加速，限制了材料在承重结构中的应用。如何在保持超低导热系数的同时将抗压强度提升至结构级水平(>20 MPa)，仍是核心挑战。

其二，耐久性研究相对薄弱。现有研究多聚焦于新拌性能和短期力学性能，对长期服役性能的关注不足。气凝胶水泥基复合材料在冻融循环、干湿交替、高温环境下的性能演变规律尚不清晰。

其三，微观机理的理解有待深化。气凝胶与水泥水化产物之间的界面结构、气凝胶纳米孔隙对水化进程的影响等微观问题，尚缺乏系统性的机理解释。

其四，经济性问题制约规模化应用。尽管常压干燥技术已显著降低了气凝胶的生产成本，但其价格仍远高于传统保温材料。如何在性能与成本之间取得平衡，是工程推广的关键。

6.2. 未来研究方向

展望未来，气凝胶水泥基隔热材料的研究可从以下方向深化。

(1) 低成本气凝胶的开发利用。以稻壳灰、粉煤灰等工业废弃物为硅源制备气凝胶，可大幅降低原料成本。Abbas 等已从稻壳灰中成功制备气凝胶并用于水泥基复合材料。

(2) 多尺度增强体系的构建。将纳米增强(如碳纳米管、石墨烯)、微米增强(如纤维)与化学增强(如表面改性)相结合，构建多尺度的协同增强网络，有望在保持低导热系数的同时实现力学性能的突破。

(3) 多功能一体化。除隔热外，赋予材料吸声、自感知、CO_2 封存等多功能性，拓展其应用场景。

(4) 标准化的性能评价体系。建立气凝胶水泥基材料热工与力学性能的统一测试标准和评价方法，为工程设计和应用提供可靠依据。

7. 结论

(1) 气凝胶水泥基复合材料是实现高效隔热与防火安全兼顾的有效途径。SiO_2 气凝胶的掺入可使水泥基材料导热系数降低 80%以上，但强度损失可达 90%。表面改性、纤维增强与多元复配是缓解这一矛盾的主要策略。

(2) 气凝胶泡沫混凝土墙体相较于普通泡沫混凝土，在各气候区传热量平均减少 23.1%，延迟时间为普通混凝土的 2 倍，衰减倍数约为其 3.5 倍。经济性分析表明，严寒地区最具推广价值。

(3) 在深部矿井热害防治中，CO_2 泡沫混凝土兼具隔热与固碳双重功能。相同密度下，CO_2 泡沫混凝土导热系数较空气泡沫混凝土低 25.8%~36.6%；超临界 CO_2 泡沫混凝土固碳率达 6.27%~10.36%。气凝胶－纤维复合隔热材料可实现抗压强度 43.07 MPa、导热系数 0.1998 W/(m·K)的综合性能，为深部巷道“隔热－支护一体化”提供了可行路径。

(4) 当前研究在隔热－强度协同优化、微观作用机制及长期耐久性方面仍存在不足，未来应聚焦低成本气凝胶开发与多尺度增强体系构建，推动其在矿井热害防治与建筑节能领域的规模化应用。

参考文献

[1] 陈春, 钱春香, 陈惠苏, 等. 水泥基保温材料导热系数的模型研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 348-351.

[2] Gao, T., Jelle, B.P., Gustavsen, A. and Jacobsen, S. (2014) Aerogel-Incorporated Concrete: An Experimental Study. *Construction and Building Materials*, **52**, 130-136. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.100

[3] Ng, S., Jelle, B.P., Sandberg, L.I.C., Gao, T. and Wallevik, Ó.H. (2015) Experimental Investigations of Aerogel-Incorporated Ultra-High Performance Concrete. *Construction and Building Materials*, **77**, 307-316. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.064

[4] Kim, S., Seo, J., Cha, J. and Kim, S. (2013) Chemical Retreating for Gel-Typed Aerogel and Insulation Performance of Cement Containing Aerogel. *Construction and Building Materials*, **40**, 501-505. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.046

[5] 于本田, 杨玉祥, 刘江, 等. 改性 SiO_2 气凝胶水泥基复合砂浆性能及冻融损伤研究[J]. 材料导报, 2023, 37(23): 41-46.

[6] 张海英. 气凝胶泡沫混凝土保温墙体热工与节能性能研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2024.

[7] 他旭鹏. 超临界 CO_2 泡沫混凝土发泡机理及其巷道围岩隔热应用研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.

[8] Liu, S., Zhu, K., Cui, S., Shen, X. and Tan, G. (2018) A Novel Building Material with Low Thermal Conductivity: Rapid Synthesis of Foam Concrete Reinforced Silica Aerogel and Energy Performance Simulation. *Energy and Buildings*, **177**, 385-393. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.014

[9] 权宗刚, 王科颖, 吕梦琪. 水泥基 SiO_2 气凝胶-钼尾矿复合保温材料性能研究[J]. 中国建材科技, 2025, 34(S1): 64-68.

[10] 何森, 黄冬梅, 丰桢敏, 等. 硅溶胶对气凝胶水泥基复合保温材料结构和性能的影响[J]. 化工新型材料, 2023, 51(S1): 273-278.

[11] 张雪键, 黄冬梅, 李德, 等. 碳纤维对气凝胶/水泥基复合隔热材料结构与性能的影响[J]. 化工新型材料, 2023, 51(12): 267-272.

[12] Hou, J.H. (2026) Research on Energy-Saving Thermal Insulation Technology of Fiber-Reinforced Phosphate Cement Composites for Green Building Construction. *AIP Advances*, **16**, Article ID: 035327. https://doi.org/10.1063/5.0301874

[13] 丰桢敏, 黄冬梅, 李德, 等. 纳米 SiO_2 气凝胶/水泥复合隔热板的制备与性能研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(2): 124-127.

[14] 游波, 崔大雄, 刘何清, 等. 不同隔热材料下的深井巷道隔热降温模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2): 153-160.

[15] 吴栋. 高地温巷道喷浆隔热机理的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.

[16] 覃述兵. 矿用二氧化碳泡沫混凝土制备及巷道围岩隔热实验研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.

[17] Li, X., Wang, Y. and Huang, L. (2026) Performance of Composite Thermal-Insulating Concrete for Integrated Thermal-Mechanical Performance in Deep Metal Mine Tunnels. *Journal of Central South University*, **33**, 3647-3667. https://doi.org/10.1007/s11771-026-6333-z

[18] Jin, C.J., Gao, C., Mu, H.W., *et al*. (2025) Study on Preparation and Thermal Insulation Properties of Silica Aerogel and Fiber-Based Thermal Insulation Materials. *ACS Omega*, **10**, 59913-59925.