

硅藻新材料在未来建筑中的应用：场景驱动与规模化路径

张育新¹, 杜智岚¹, 王玉合², 王 春³

(1.重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2.重庆建筑工程职业学院 城市治理学院, 重庆 400072;

3.重庆科技大学 管理学院, 重庆 401331)

摘要: 硅藻材料凭借独特的二氧化硅骨架结构与表面活性特征, 在推动建筑材料绿色低碳化与多功能化方面展现出巨大潜力。研究表明, 硅藻基复合材料可高效吸附 CO₂ 并调控环境湿度, 在废水处理中去除氮、磷及有机污染物, 并具备优异的抗菌除螨性能。硅藻与光子晶体或相变储能材料的复合进一步实现光学调控与热能管理, 为建筑节能与环境舒适性提升提供了新途径。从场景培育与大规模应用的视角看, 硅藻新材料的微纳米多孔结构、高比表面积与生态兼容性, 使其成为构建健康建筑、节能建筑与资源循环型建筑等新场景的理想材料, 其发展需经历从实验室验证、典型场景示范到规模化推广的路径。本文系统梳理了硅藻新材料在未来建筑中的多功能应用, 旨在为相关新场景的培育与大规模应用提供理论参考。

关键词: 硅藻; 材料; 绿色; 场景培育; 大规模应用

DOI: 10.33142/dfc.v1i1.20151 **中图分类号:** TU52 **文献标识码:** A

The Application of Diatom-Based New Materials in Future Architecture

Zhang Yuxin¹, Du Zhilan¹, WANG Yuhe², WANG Yuhe³

(1.College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2.School of Urban Governance, Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China; 3.School of Management, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: Diatom-based materials, characterized by their unique silica frustule structure and surface reactivity, exhibit great potential in promoting the green, low-carbon, and multifunctional development of building materials. Studies have demonstrated that diatom composites can efficiently adsorb CO₂ and regulate ambient humidity, remove nitrogen, phosphorus, and organic pollutants from wastewater, and provide excellent antibacterial and mite-resistant properties. Moreover, the integration of diatoms with photonic crystals or phase-change materials enables optical regulation and thermal energy management, offering new approaches for building energy conservation and indoor environmental optimization. From the perspective of scene cultivation and large-scale application, the micro nano porous structure, high specific surface area and ecological compatibility of diatom new materials make it an ideal material for building new scenes such as healthy buildings, energy-saving buildings and resource recycling buildings. Its development needs to go through the path from laboratory verification, typical scene demonstration to large-scale promotion. This paper systematically reviews the multifunctional application of diatom new materials in future buildings, aiming to provide theoretical reference for the cultivation and large-scale application of relevant new scenes.

Keywords: diatom; materials; green; Scene cultivation; Large scale application

收稿日期: 2026 年 7 月 24 日

基金项目: 重庆市建设信息中心信息化能力提升重点项目 (2026-002)。

作者简介: 张育新 (1978—), 男, 博士, 教授。E-mail: zhangyuxin@cqu.edu.cn。

0 引言

在全球城市化迅速推进与现代生活方式日益复杂的背景下，建筑已不再是单纯的空间载体，而成为集环境调控、能源管理与健康保障于一体的综合系统。然而，传统建筑材料在应对室内空气污染、温湿不均、能源高消耗及密闭空间健康风险方面仍存在明显局限，如二氧化碳积聚、挥发性有机物浓度升高以及地下或封闭空间缺氧等问题，直接影响人类健康与生活质量。因此，开发具有多功能与可持续性的建筑材料已成为绿色建筑设计未来建筑技术发展的核心方向^[1]。在这一过程中，新场景的培育与开放为新材料提供了关键的验证空间和应用载体。硅藻材料凭借天然微纳米孔结构、高比表面积及丰富表面官能团展现出独特优势^[2]，其多孔骨架赋予优异的气体与污染物吸附能力，可用于室内空气净化；光学特性及可负载功能分子的能力使光催化降解、杀菌抑螨及智能响应成为可能；与水凝胶、混凝土等基材复合应用，或作为微胶囊的外壳负载功能物质，则进一步拓展了其在温湿调控、养分吸附、氧气生成及空气质量改善等综合性建筑场景中的潜力。因此，硅藻新材料有望在未来建筑中实现“结构功能化”与“环境智能化”的融合，为绿色与健康建筑提供全新材料方案，其大规模应用将依赖于特定场景的持续培育、开放验证与系统集成。本综述旨在系统梳理硅藻新材料在未来建筑中的多功能应用，并初步探讨其场景化推广路径，以期对相关研究与实践提供理论支撑与创新思路。

1 硅藻新材料的类型与特性

1.1 硅藻壳体

硅藻壳体是由二氧化硅构成的天然微纳米级多孔结构，具有高度规则的三维骨架和多级孔道分布，其孔径范围通常在纳米至微米级别^[3]。该微纳结构不仅赋予壳体较高的比表面积和优异的流体渗透性，还能在气体吸附、污染物捕获及界面反应中发挥显著作用^[4]。硅藻壳的光学特性同样独具特色，其规则排列的孔道结构使其具备光子晶体效应和特殊的光散射性能，可在光传导、光催化及光学调控材料中展现潜在应用价值^[5]。与此同时，硅藻壳表面富含硅羟基（Si-OH）等官能团，赋予其优良的表面化学活性^[6]。硅羟基既可与金属氧化物、功能高分子或生物分子发生结合，又便于通过物理吸附或化学修饰实现功能化负载，从而扩展其在空气净化、光催化降解、杀菌抑螨以及复合建筑材料中的应用潜能。凭借这种兼具结构与化学优势的天然模板，硅藻壳体被认为是未来功能化建筑材料设计的重要基础单元。

1.2 硅藻水凝胶

硅藻水凝胶是以硅藻壳体或其改性产物为骨架基础，通过与高分子凝胶材料复合而形成的一类功能性材料^[7]。其显著特征在于具有高吸附性和可调控的孔隙结构，能够在吸湿释湿、气体吸附及污染物捕获等方面表现出优异性能。由于水凝胶具有高度的柔性和可塑性，结合硅藻壳体的刚性骨架与多孔特性，可实现湿度响应性和良好的力学稳定性。更为重要的是，硅藻水凝胶表面丰富的官能团为其负载金属离子、光催化剂或生物活性分子提供了条件，使其在室内空气净化、CO₂ 吸附与转化、温湿度调控及环境友好型建材中具有广阔的应用前景。

1.3 硅藻微胶囊

硅藻微胶囊通常是利用硅藻壳体作为天然外壳，将功能物质（如药剂、抗菌因子、光催化剂或相变储能材料）包裹其中，从而形成具有缓释或定向释放特性的微纳米载体体系^[8]。这类微胶囊兼具硅藻的结构优势与负载功能，一方面通过其多孔骨架和表面孔口实现对功能物质的高效封装与保护，另一方面利用壳体表面官能团的化学可修饰性实现对释放速率与反应活性的调控。与传统微胶囊相比，硅藻微胶囊具有来源天然、结构规则、机械强度高和环境相容性好等优点，可在空气净化、杀菌抑螨、室内健康管理以及水处理等建筑相关领域中展现出独特应用潜力。

1.4 硅藻复合建筑材料

硅藻复合建筑材料是将硅藻壳体或其衍生物与混凝土、泡沫材料、涂层或聚合物基材结合，形成兼具

力学性能与环境功能的多功能建材^[9]。硅藻的多孔结构和高比表面积不仅有助于改善基材的轻质化、隔热性与透气性^[10]，还能为功能分子的负载和反应界面提供空间，从而赋予材料空气净化、光催化和热湿调控等附加性能。这类复合建筑材料通过将硅藻的天然功能性与传统建材的结构性相融合，为实现建筑材料的“结构-功能一体化”提供了新的可能性，也为绿色建筑和健康建筑的开发奠定了重要基础。

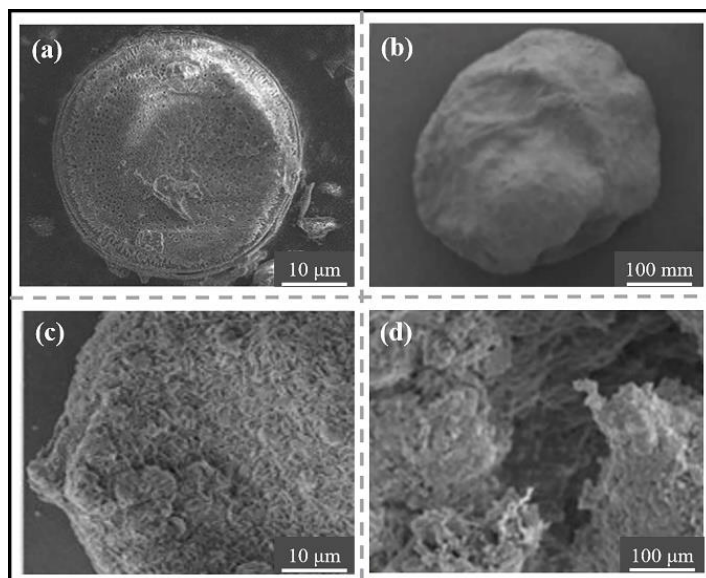


图1 (a) 硅藻结构^[11]；(b) 硅藻水凝胶^[12]；(c) 硅藻微胶囊^[13]；(d) 硅藻泡沫混凝土^[14]

2 功能应用场景与大规模应用潜力

2.1 空气净化与温湿调节

在空气净化与温湿调节方面，硅藻材料由于其比表面积大和独特的孔隙结构及分布展现出显著的应用潜力^[10]。Zhang 等^[15]设计的由人工培养硅藻截头体与聚乳酸组成的新型纳米纤维膜，不仅具备优异的过滤性能和可控的降解速率，对空气污染物的去除效率高达 99.99%。此外，研究者还开发了富含硅藻的微藻生物炭作为室内空气洗涤材料，显著提升了颗粒物、总挥发性有机物和甲醛的去除效果。Ouwhand 等^[16]则利用二氧化钛功能化的硅藻截头体光催化剂，在高湿度和长时间反应条件下表现出良好的空气净化性能。这些成果充分证明，基于硅藻独特的多孔结构和表面活性设计，可以为室内空气质量的改善提供高效且可持续的解决方案。同时，利用硅藻土封装相变材料用于建筑材料，例如混凝土或石膏中，可以提高墙壁和地板的温度调节性能^[17]。在实际建筑应用中，已有研究将硅藻基净化材料融入室内墙面和天花板装饰层，实现对甲醛和 $\text{PM}_{2.5}$ 的高效去除，同时利用其多孔结构调节湿度，从而提升居住环境的舒适性。未来，硅藻基空气净化与调湿材料可率先在密闭或半密闭建筑场景（如地下空间、地铁站、医院病房）中开展示范应用。通过将硅藻水凝胶薄膜集成于通风系统或墙面材料中，构建“吸附-释放”动态调控场景，验证其在实际复杂环境下的性能与耐久性。其大规模推广有赖于低成本制造工艺的突破以及与现有建筑部品的集成技术标准化。

未来，硅藻水凝胶和硅藻/微藻复合体系有望在空气净化与温湿调节方面展现更广阔的应用前景。硅藻水凝胶凭借其高度可调的微纳米孔结构，具有显著的 CO_2 吸附和储存潜力，若与功能性基团或金属有机骨架结合，可能进一步提升对温室气体的选择性捕获效率；同时，材料在保持吸附性能的同时还可通过结构优化实现湿度的动态调节，满足不同环境的舒适需求。硅藻/微藻复合体系则利用微藻的光合作用实现持续的 O_2 释放与 CO_2 消耗，构建“自循环”空气净化系统，为密闭或半密闭环境（如地下空间、地铁、潜艇、航天舱）提供更加稳定和可持续的空气质量调控路径，例如在地铁车厢内集成硅藻水凝胶薄膜，不仅可降

低乘客密集时的 CO_2 累积, 还能在空气干燥时缓释湿度, 从而提升舒适性。在材料设计层面, 未来的重点可能集中在多功能协同与智能化调控: 例如, 通过孔隙结构精细调控提升 CO_2 吸附容量, 通过表面功能化改善与水分子或污染物的相互作用, 或将光响应、温湿响应等智能单元引入硅藻材料中, 使其在环境条件变化时能够自动调节吸附与释放过程。同时, 复合体系也可以通过三维打印、涂层化等方式与墙体、通风管道或空气净化设备集成, 实现建筑材料与空气净化装置的深度融合。在性能评价方面, 除常规的 CO_2 吸附容量、 O_2 释放速率和湿度调控能力外, 未来研究还需关注动态工况下的稳定性、循环使用寿命以及能耗与碳足迹, 以评估其在绿色建筑和低碳城市中的实际应用价值。

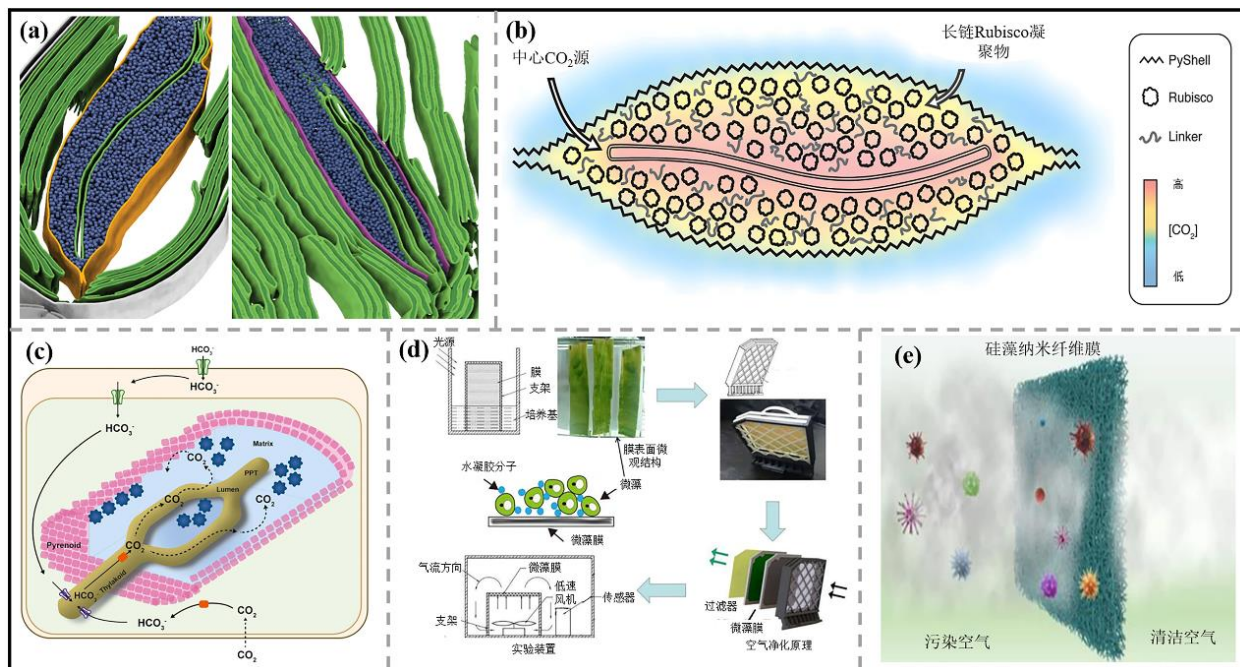


图2 (a) 硅藻断层扫描和3D分割的二维概览切片^[18]; (b) 硅藻细胞碳固定^[18]; (c) CO_2 浓缩机制的结构和功能模型^[19]; (d) 微藻膜的空气净化器^[20]; (e) 硅藻纳米纤维膜净化空气示意图^[15]

2.2 健康防护与杀菌抑螨

在健康防护与杀菌抑螨方面, 硅藻材料展现出独特的优势。已有研究表明, 硅藻材料本身可对一些公共卫生害虫产生致死作用, 天然和合成二氧化硅产品均被用于害虫防治, 其中合成产品主要由无定形 SiO_2 构成, 而天然产物则主要基于硅藻土。硅藻颗粒能够附着在昆虫或螨虫的角质层表面, 通过机械磨损和/或吸附角质层中的保护性脂质, 导致生物体水分流失, 最终引起脱水和死亡^[21]。此外, 硅藻材料还可作为微胶囊壳体, 用于负载并缓释杀菌剂或天然抗菌物质, 从而实现持续、可控的抗菌与抑螨效果。通过调控硅藻壳体的孔径和壁厚, 可以有效控制活性物质的释放速率与稳定性, 其性能评价通常依赖于杀菌效率、抑螨率及长期作用持久性。已有研究表明, 硅藻作为残余墙喷雾剂施用于水环境中时, 能够有效控制蚊虫种群长达六个月^[22]; Ulrichs 等^[23]发现天然硅藻土在 48 小时内可杀死 100% 的成年鸡虱, 其对螨虫的半致死时间分别为 31.7 和 34.9 小时。Dong 等^[24]进一步证实, 硅藻土对长角螨的幼虫、若虫和成虫均具有显著杀灭作用。而 He 等^[25]则开发了一种硅藻土@聚多巴胺与壳聚糖@葛根素复合的水凝胶, 展现出优异的防螨、抗菌及活性氧清除性能, 同时具有良好的生物安全性。医院、学校、老年公寓等对卫生环境要求高的公共建筑, 是硅藻基健康防护材料的首要示范场景。通过在内墙涂料、建材涂层中复合硅藻微胶囊, 构建“长效抗菌防螨”的健康环境场景。大规模应用需解决活性物质缓释控制的精确性、长期使用的安全性评价以及成本控制等关键问题。

未来, 硅藻基杀菌与防螨技术的发展可进一步朝着靶向性提升、智能响应、多功能协同和可持续利用

方向推进。例如,通过对硅藻壳体表面进行功能化修饰(如引入特定配体或带电基团),有望实现对尘螨或耐药菌的定向作用,从而降低对非靶生物的干扰;结合智能高分子材料,则可赋予硅藻微胶囊在温度、湿度或病原体代谢产物变化时按需释放的能力,避免药物过量释放并延长有效期;同时,硅藻基材料还可与空气净化或抗过敏功能结合,构建多功能室内防护体系;在应用形式上,除了传统粉末外,还可拓展至纺织品、建筑涂层或空气净化膜,实现从卧室到医院的多场景健康保障;在可持续性方面,硅藻与天然抗菌剂(如茶多酚、壳聚糖、植物精油)复合,不仅减少了环境负担,还能利用可再生资源制备低碳环保的防护材料。以医院病房为例,若将硅藻微胶囊复合涂层应用于墙面和天花板,不仅能够持续缓释抗菌成分,降低耐药菌感染风险,还可同时实现空气净化和湿度调控,为高危患者提供一个更加安全、健康的医疗环境。

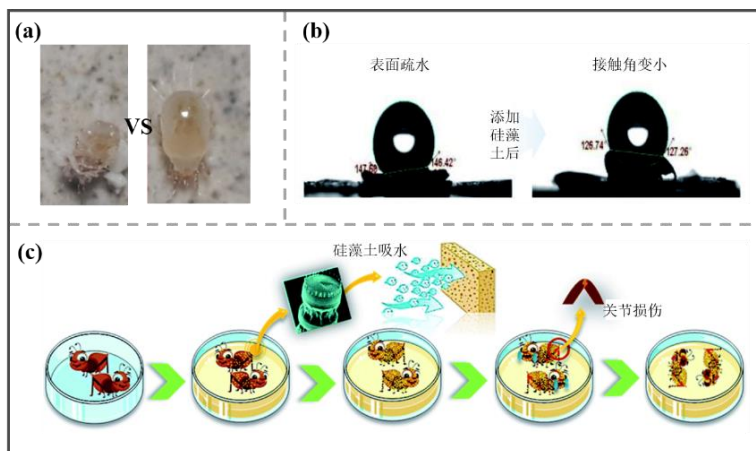


图3 (a) 经过硅藻土处理的和未经处理腐烂酪蚜成虫^[26]; (b) 不含硅藻土和含硅藻土的锯齿谷甲虫尸体接触角^[27]; (c) 硅藻土杀虫剂的杀虫机制^[27]

2.3 光催化与尾气降解

在光催化方面,与常规无机光催化剂相比,硅藻材料因其独特的硅质三维结构和高度有序的多孔骨架,展现出显著的应用潜力^[28]。这种天然形成的微纳米结构能够增强光的散射与捕获,从而有效提升光催化剂的利用效率和稳定性^[29]。Putri 等^[30]发现,二氧化钛负载的硅藻生物二氧化硅具有优异的光催化活性;Gholami 等^[31]利用硅藻截头体作为天然模板制备的氮掺杂磁性 $\text{WO}_{3-x}@\text{介孔碳}$ 材料表现出更强的光催化效率和持久性能;Pan 等^[32]报道的硅藻状分层二氧化钛(TiO_2)-聚脲胺装饰双层三聚脲胺泡沫结构,则通过多重光反射与光散射实现了全光谱吸收和高效的光热转换。这些成果充分表明,基于硅藻的天然光学特性与多孔骨架设计,可以大幅提升光催化材料在污染物降解中的性能。在实际应用中,已有研究提出将硅藻/ TiO_2 复合透光混凝土应用于建筑墙体和地面装饰层,以改善空气中挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, 简称 VOC)与氮氧化物(NO_x)的去除效率,同时赋予材料透光与装饰功能。城市隧道、地下车库、临近交通干道的建筑外围护结构是典型的高浓度尾气污染场景。在此类场景中开放并部署硅藻基光催化建材,可系统验证其在真实污染负荷下的净化效能与维护周期。推动其大规模应用,需要开发适应低光照条件的催化材料,并建立与建筑结构一体化的设计与施工规范。

未来,硅藻基光催化材料有望在尾气净化与绿色建筑建材中展现更广阔的发展前景。通过调控硅藻壳体的孔径分布与表面功能化,可进一步优化光的散射路径和催化剂负载方式,从而在低光条件下依旧保持高效催化反应。同时,将硅藻基光催化剂与导电聚合物、金属有机骨架或碳基材料复合,可能实现光催化与光热效应、吸附作用的协同,提升多污染物降解效率。在应用层面,硅藻光催化材料不仅可作为室内装饰层,还可直接应用于地下车库等半封闭空间的建材中。例如,在车库墙体或天花板中引入硅藻/ TiO_2 透光混凝土,并结合自然采光井或节能 LED 光源,可在高车流量时显著分解尾气中的 NO_x 和 VOC。若在中型地下车库全面铺设此类材料,能够有效降低 NO_x 浓度,既改善空气质量,又减少机械通风需求,降低能源

消耗。在性能评价方面,除关注 VOC/NO_x 去除效率和光催化持久性外,未来研究还需重视低光环境下的催化活性、建材长期耐候性以及能耗与碳减排效益,以支撑其在绿色城市与低碳建筑中的推广应用。

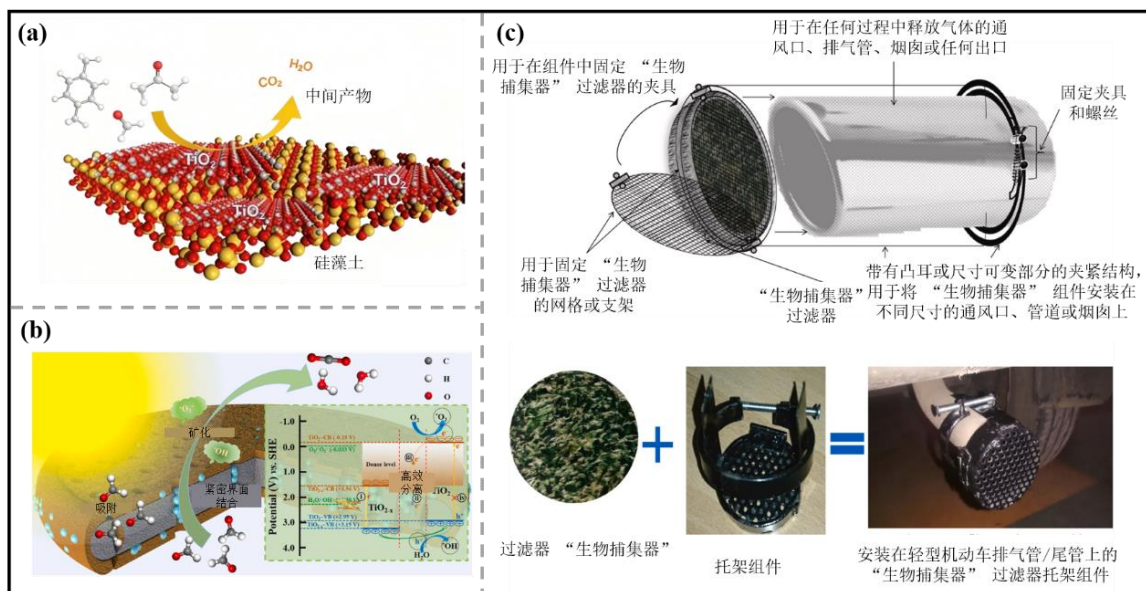


图4 (a) TiO₂/硅藻土复合材料光催化降解 VOC^[33]; (b) 天然硅藻土负载富氧空位 TiO_{2-x}-TiO₂ 同质结光催化性能增强机理示意图^[34]; (c) 安装在尾气尾管上的生物渗透捕集器设计和实际图像^[35]

2.4 水处理与养分吸附

在水处理与养分吸附方面,与其他微藻不同,硅藻凭借独特的二氧化硅细胞结构和代谢特性,展现出显著的应用潜力。硅藻能够在包括废水在内的多种环境中生长,既可通过自身的吸附作用去除污染物^[36],又能在胁迫条件下产生次生代谢物,从而增强环境适应性。作为水生生态系统的重要初级生产者,硅藻在利用废水中残余氮、磷等营养物促进生长的同时,还能释放氧气并实现养分的循环利用,为生物质生产和肥料开发带来双重生态与经济效益^[37, 38]。已有研究表明,经十六烷基三甲基溴化铵改性的锂皂石@硅藻土对有机污染物表现出优异的吸附能力^[39];亚铁离子改性锂皂石@硅藻土展现出良好的光-芬顿性能,可有效去除复杂有机污染物^[40];Liao 等^[41]制备的低成本 CuNiFe 双层氢氧化物@硅藻土复合材料,则兼具吸附与光催化功能,在四环素废水治理中取得了理想效果。这些研究充分证明,基于硅藻多孔骨架与表面活性位点的设计,可以为废水净化和资源回收提供高效、可持续的材料途径。在建筑领域的应用探索中,硅藻改性泡沫混凝土不仅具备轻质与隔热特性,还能通过多孔结构和微胶囊负载实现对氮、磷的高效捕获,屋顶绿化实践表明该材料可使雨水中氮、磷去除率超过 70%,同时保持良好的隔热性能,为绿色屋顶与雨水收集系统提供了兼具功能与环境效益的解决方案。“海绵城市”建设中的绿色屋顶、雨水花园、生态滤池等,是硅藻基水处理材料理想的培育场景。在此类场景中,材料同时发挥结构、保温和水处理三重功能。大规模应用的关键在于提升材料在干湿循环和冻融环境下的稳定性,并评估其长期运行下的养分饱和与再生能力。

未来,硅藻基材料在水处理与养分吸附领域有望进一步拓展应用边界。通过精准调控硅藻壳体孔径分布与表面官能团,可实现对多种污染物的高选择性捕获,并结合光-芬顿或光催化反应实现吸附与降解的协同;此外,将硅藻材料与导电聚合物或碳基材料复合,还可能提升其电子传输性能和反应活性。在建筑工程中,硅藻土是制备轻质混凝土的优质骨料来源,且煅烧后或经发泡处理的硅藻土有利于减小混凝土的密度和导热系数^[42]。硅藻基吸附/催化材料可作为地下水收集池或景观水体的衬层,不仅有效去除雨水径流中的氮、磷及有机污染物,还能实现养分回收并用于后续的屋顶农业或立体绿化。例如,在城市综合体的雨水花园系统中集成硅藻改性泡沫混凝土模块,可在保证景观功能与生态调节的同时,大幅降低水体富营养

化风险,推动建筑与环境的双重可持续发展。在性能评价方面,除氮、磷吸附量和有机污染物去除率外,未来研究还应重视材料在动态水力条件下的稳定性、再生循环利用效率以及长期环境安全性,从而为其在绿色建筑和海绵城市中的规模化推广提供科学支撑。

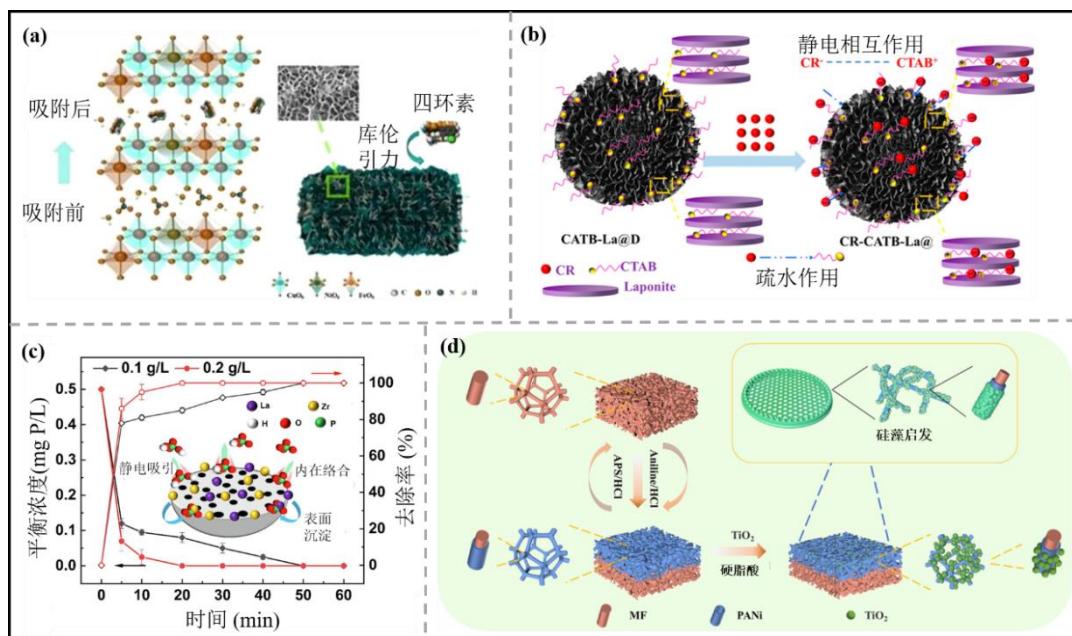


图5 (a) CuNiFe 双层氢氧化物@硅藻土吸附去除四环素示意图^[41]; (b) 十六烷基三甲基溴化铵改性的锂皂石@硅藻土吸附刚果红机理图^[39]; (c) La/Zr 氢氧化物改性硅藻土吸附磷酸盐^[43]; (d) 硅藻启发 TiO_2 -聚氰胺装饰双层三聚氰胺的装饰的双层光热泡沫制造工艺图^[32]

2.5 前沿探索与智能响应

在未来建筑发展中,硅藻材料与光子晶体或相变储能材料的复合被视为实现智能化与低碳化的前沿方向。其多孔透明“玻璃壳”结构不仅能够提升自然光利用效率,还可通过与光子晶体耦合实现光流导向,从而改善室内采光与空间舒适度。同时,相变储能单元的引入为热湿环境的平衡提供了可能^[44],使建筑材料具备白天吸收并存储能量、夜间逐步释放的功能^[45],显著降低室温波动和能耗^[46]。未来研究的重点将集中在智能传感与动态调控的深度融合,例如通过湿度、温度或污染物浓度的实时监测,使材料能够自主调节空气流通与光通道,构建动态适应性强的室内环境。性能评价不仅局限于光导效率与能量释放能力,还需关注长期循环使用下的稳定性与全生命周期碳足迹。一个前沿设想是利用硅藻/微藻复合体系在密闭或半密闭建筑空间中构建“人工氧吧”,通过光合作用持续消耗 CO_2 、释放 O_2 ,同时调节湿度与空气质量,为地下室、封闭会议室甚至深海舱和航天居住舱等极端环境提供可持续的生命支持与舒适保障。这种融合了空气净化、能量调控与智能响应的硅藻复合体系,将成为未来智慧建筑实现健康、低碳与生态化的关键突破口。“近零能耗建筑”、“智慧建筑”是这些前沿技术的高端示范场景。通过在示范建筑中集成硅藻-相变墙体、硅藻光导系统等,构建“光-热-湿”协同调控的智能场景。这些前沿技术的成熟与成本下降,是其未来能否走向大规模应用的决定性因素。

3 挑战与发展前景

尽管硅藻新材料在建筑领域展现出多功能性与可持续发展的巨大潜力,但其实际推广与应用仍面临诸多挑战。首先,材料的长期耐久性与场景适应性有待进一步验证。硅藻材料在高湿度、强紫外辐射或酸碱等特定建筑场景环境下可能出现结构劣化或性能衰减,影响其长期稳定性和功能发挥。因此,亟需通过表面改性、复合包覆或结构优化来提升其在复杂建筑环境中的耐久性。

其次,大规模场景应用的可行性与成本问题亦是制约其推广的重要因素。目前,硅藻基水凝胶、微胶囊及透光混凝土的制备多停留在实验室或中试阶段,工艺复杂、成本偏高,难以满足建筑行业对于大批量、低成本材料的需求。因此,未来需发展面向规模化场景的低能耗、可规模化的制备与改性工艺,探索利用天然硅藻资源或工业副产硅藻土进行绿色高效转化。

再次,硅藻新材料在与智能建筑和绿色建筑技术的场景融合深度方面尚处于起步阶段。尽管已有研究将硅藻与光伏、传感或储能单元结合,但其在智慧调控、实时监测及建筑能耗管理等方面的系统性应用仍不足。未来研究可考虑通过多功能集成与跨学科合作,推动硅藻材料与物联网、大数据及人工智能在具体运营场景中的深度结合,实现建筑环境的动态感知与智能调节。

最后,推动硅藻新材料的场景化与规模化应用,需要构建“技术-场景-政策”的协同生态。通过在国家重点研发计划、绿色建筑标准中纳入硅藻材料应用导向,鼓励政府与市场主体开放测试场景,建设从材料研发、场景验证到产业推广的全链条创新体系。

综上所述,硅藻新材料在建筑应用中仍需解决耐久性、成本与系统集成等关键问题,但随着绿色建材技术与智能建筑理念的不断发展,其在未来建筑中的广泛应用前景值得期待。

4 结语

硅藻新材料凭借其独特的微纳米多孔结构、高比表面积和表面化学活性,在建筑领域展现出广阔的应用潜力。从空气净化、温湿调控、杀菌抑螨到光催化降解与水处理,硅藻材料为解决室内环境污染和能源消耗问题提供了新思路。

总体来看,硅藻新材料的多功能性与可持续性,是其有望成为推动向绿色化、健康化、智能化转型的重要材料选择。然而,要实现其在不同建筑场景中的大规模应用,仍需解决材料在真实场景中的耐久性、规模化制备的经济性以及与建筑系统深度融合等技术与难题。未来,应加强以场景需求为牵引的跨学科研发,加速从实验室到典型场景的示范验证,并构建有利于其规模化推广的政策标准体系,从而充分释放硅藻新材料在未来建筑中的巨大价值。

参考文献

- [1] 张海昆,李杨红.节能环保建筑材料与传统建筑材料的对比及应用[J]. 粘接, 2022, 49(10): 101-104.
- [2] LI B W, WANG T, LE Q J, et al. Surface reconstruction, modification and functionalization of natural diatomites for miniaturization of shaped heterogeneous catalysts[J]. Nano Materials Science, 2023, 5(3): 293-311.
- [3] 刘萍,谭浩若,冯民生,等.硅藻基相变储能材料的研究进展[J]. 功能材料, 2024, 55(09): 9053-9063.
- [4] 闫良国,任丽瑶,于欢,等.硅藻土复合催化材料在有机污水治理中的应用[J]. 中国粉体技术, 2025, 31(04): 131-142.
- [5] 邵亚馨,李强文,杨小盛,等. TiO₂/硅藻土材料复合方法及应用研究进展[J]. 化工管理 2020, (10): 89-90.
- [6] ROYCHOUDHURY P, BOSE R, DABEK P, et al. Photonic Nano-/Microstructured Diatom Based Biosilica in Metal Modification and Removal-A Review[J]. Materials, 2022, 15(19).
- [7] 伊天星. 硅藻土复合隔膜及改性水凝胶材料的制备及性能研究[D]. 吉林大学, 2024.
- [8] LIU S P, LI J J, ZHANG Y C, et al. Progress in the Preparation and Applications of Microcapsules for Protective Coatings Against Corrosion[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(4).
- [9] LIU S P, JIN Z Y, LIU D D, et al. Recent Progress and Development Trends in the Research and Application of Anti-Icing Coatings[J]. Chemistry – A European Journal, 2025, 31(38).
- [10] 王鑫,张杰. 硅藻土的改性及在室内设计中的研究进展[C]. 2020 年全国土木工程施工技术交流会论文

- 集(上册), 2020: 612-615.
- [11] LU W, ZHANG X F, YIN C Q, et al. Diatomite@MoS₂ Nanocomposite Layers as Composite Coating Targeting for Mg Alloys Endowed with Properties of Anticorrosion and Antiwear[J]. *Langmuir*, 2024, 40(15): 8233-8247.
- [12] LI X, XU W, PAN G, et al. Sodium alginate/ diatom-based blotting hydrogel material for Pb(II) removal: Effect of crosslinker optimization on its composition, selectivity, and desorption rate[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 688.
- [13] LI M H, LIU S P, CAO M M, et al. Fabrication of natural mesoporous Diatom biosilica microcapsules with high oil-carrying capacity and tribological property[J]. *Tribology International*, 2024, 200.
- [14] NING H L, LI Z W, LIU N, et al. Fabrication of Sustainable Diatomite-Based Foams with a Micro-Macroporous Synergistic Structure[J]. *Materials*, 2025, 18(9).
- [15] ZHANG C T, SUN J X, LYU S, et al. Poly(lactic acid)/artificially cultured diatom frustules nanofibrous membranes with fast and controllable degradation rates for air filtration[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022, 5(2): 1221-1232.
- [16] OUWEHAND J, VAN EYNDE E, DE CANCK E, et al. Titania-functionalized diatom frustules as photocatalyst for indoor air purification[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018, 226: 303-310.
- [17] 缪鹏. 硅藻土相变混凝土力学性能与热工性能试验研究[D]. 安徽理工大学, 2025.
- [18] SHIMAKAWA G, DEMULDER M, FLORI S, et al. Diatom pyrenoids are encased in a protein shell that enables efficient CO₂ fixation[J]. *Cell*, 2024, 187(21): 5919-5934.e5919.
- [19] NAM O, MUSIAL S, DEMULDER M, et al. A protein blueprint of the diatom CO₂-fixing organelle[J]. *Cell*, 2024, 187(21): 5935-5950.e5918.
- [20] LU Q, JI C C, YAN Y P, et al. Application of a novel microalgae-film based air purifier to improve air quality through oxygen production and fine particulates removal[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2018, 94(4): 1057-1063.
- [21] ZENI V, BALIOTA G V, BENELLI G, et al. Diatomaceous Earth for Arthropod Pest Control: Back to the Future[J]. *Molecules*, 2021, 26(24).
- [22] DEGUENON J M, AZONDEKON R, AGOSSA F R, et al. ImergardTMWP: A Non-Chemical Alternative for an Indoor Residual Spray, Effective against Pyrethroid-Resistant *Anopheles gambiae* (s.l.) in Africa[J]. *Insects*, 2020, 11(5).
- [23] ULRICH S C, HAN Y J, ABDELHAMID M T, et al. Management of the poultry red mite, *Dermanyssus gallinae*, using silica-based acaricides[J]. *Experimental and Applied Acarology*, 2020, 82(2): 243-254.
- [24] DONG L, THEKISOE O, RAMATLA T, et al. Acaricidal effects of diatomaceous earth on *Haemaphysalis longicornis* under laboratory conditions[J]. *Experimental and Applied Acarology*, 2025, 95(3).
- [25] HE T S, TANG W L, CHEN J L, et al. Hydrogel-Based Treatment of House Dust Mite-Induced Atopic Dermatitis through Triple Cleaning of Mites, Bacteria, and ROS-Related Inflammation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(26): 33121-33134.
- [26] KILIÇ N. Efficacy of Dust and Wettable Powder Formulation of Diatomaceous Earth (Detech®) in the Control of *Tyrophagus putrescentiae* (Schrank) (Acari: Acaridae)[J]. *Insects*, 2022, 13(10).
- [27] LI C Y, SHENG X R, LI N, et al. Insecticidal characteristics and mechanism of a promising natural insecticide against saw-toothed grain beetle[J]. *RSC Advances*, 2022, 12(12): 7066-7074.
- [28] 刘晓丹, 任庆敏, 王寅初, 等. 硅藻纳米材料研究进展[J]. *生物学杂志*, 2019, 36(01): 79-82.
- [29] 王利剑, 岳昊. 负载量对硅藻土基 TiO₂ 复合材料应用性能的影响[J]. *非金属矿*, 2024, 47(04): 6-8.

- [30] PUTRI R M, ALMUNADYA N S, AMRI A F, et al. Structural Characterization of Polycrystalline Titania Nanoparticles on *C. striata* Biosilica for Photocatalytic POME Degradation[J]. ACS Omega, 2022, 7(48): 44047-44056.
- [31] GHOLAMI P, KHATAEE A, BHATNAGAR A, et al. Synthesis of N-Doped Magnetic WO_{3-x} @Mesoporous Carbon Using a Diatom Template and Plasma Modification: Visible-Light-Driven Photocatalytic Activities[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(11): 13072-13086.
- [32] PAN J F, YU X H, DONG J J, et al. Diatom-Inspired TiO_2 -PANi-Decorated Bilayer Photothermal Foam for Solar-Driven Clean Water Generation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(48): 58124-58133.
- [33] ZHANG G X, LIU Y Y, HASHISHO Z, et al. Adsorption and photocatalytic degradation performances of TiO_2 /diatomite composite for volatile organic compounds: Effects of key parameters[J]. Applied Surface Science, 2020, 525.
- [34] YUAN F, YANG R F, LI C Q, et al. Enhanced visible-light degradation performance toward gaseous formaldehyde using oxygen vacancy-rich $\text{TiO}_{2-x}/\text{TiO}_2$ supported by natural diatomite[J]. Building and Environment, 2022, 219.
- [35] YEWALE P, WAGLE N, LENKA S, et al. Studies on Biosmotrap: A multipurpose biological air purifier to minimize indoor and outdoor air pollution[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 357.
- [36] DAI N, FENG L, ZHAO L, et al. A high-performance adsorbent of 2D Laponite in-situ coated on 3D diatomite for advanced adsorption of cationic dye[J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(10): 2304-2316.
- [37] 张义, 朱吉颖, 张聪, 等. 硅藻土在环境领域的研究和应用[J]. 生态环境学报, 2022, 31(12): 2441-2448.
- [38] 张育新, 丁杰航, 鄢文磊, 等. 硅藻土基硅肥的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(04): 85-93.
- [39] DAI N, LIU X Y, YANG L, et al. Cetyltrimethylammonium Bromide-Modified Laponite@Diatomite Composites for Enhanced Adsorption Performance of Organic Pollutants[J]. Langmuir, 2024, 40(16): 8427-8439.
- [40] DAI N, YI S, ZHANG X T, et al. Typical synthesis of an iron-modified Laponite@diatomite composite for photo-Fenton degradation of methyl orange dyes[J]. Applied Surface Science, 2023, 607.
- [41] LIAO Q Y, DAI N, ZHANG C Z, et al. S-Cu Doubly Doped NiFe LDH@Diatomite with Adjustable Surface Characteristics for the Efficient Removal of Tetracycline[J]. Langmuir, 2024, 40(41): 21499-21513.
- [42] 代楠, 张育新, 李凯霖, 等. 硅藻土在胶凝材料领域的应用进展[J]. 材料导报, 2022, 36(14): 145-153.
- [43] YU L Y, MA L, ZHU N, et al. Enhanced phosphate adsorption in low-concentration solutions using La/Zr hydroxide-modified diatomite: mechanisms and efficiency[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 372.
- [44] 姚立民, 王伟芳, 谢恒星. 一种改性节能硅藻土载体建筑材料制备及应用性能[J]. 粘接, 2025, 52(04): 75-78.
- [45] 柯倩倩. 石蜡/硅藻土基相变储能砂浆制备及其保温隔热性能研究[J]. 广州建筑, 2024, 52(09): 90-93.
- [46] 曾嘉令. 硅藻土基相变储能材料的制备、性能及建筑应用研究[D]. 西京学院, 2024.