综述与专论

DOI：10.11949/0438-1157.20250329

隔热材料的制备、结构及应用研究进展

陈欣妍，陈依玲，彭馨博，胡靖杰，江学良，游峰

（武汉工程大学材料科学与工程学院，湖北省等离子体化学与新材料重点实验室，湖北 武汉 430205）

摘要： 随着全球能源消耗和温室气体排放问题日益严峻，开发高效、环保的隔热材料已成为材料科学与工程领域的重要课题。隔热材料在建筑、工业、航空航天等领域应用广泛，尤其在减少能量损失和提高能源效率方面起着关键作用。综述了近年来隔热材料的制备、结构研究进展，重点介绍了有机、无机及其复合气凝胶和泡沫的结构特性及其隔热性能，通过对比分析各类材料的热导率及耐温性能，系统梳理了不同材料体系的适用场景与应用现状。最后，展望了隔热材料未来的发展趋势，认为多尺度结构设计、仿生结构和可持续材料的结合将成为提高隔热性能的关键路径。

关键词： 隔热材料；气凝胶；热导率；孔隙率；复合材料；制备；泡沫

中图分类号： TB 34　　**文献标志码：** A

文章编号： 0438-1157（2025）12-6179-17

Recent progress in the preparation, structure, and application of thermal insulation materials

CHEN Xinyan, CHEN Yiling, PENG Xinbo, HU Jingjie, JIANG Xueliang, YOU Feng

(*Hubei Key Laboratory of Plasma Chemistry and Advanced Materials, School of Materials Science & Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan* 430205, *Hubei, China*)

Abstract: As global energy consumption and greenhouse gas emissions become increasingly severe, the development of efficient and environmentally friendly thermal insulation materials has become a significant topic in the field of materials science and engineering. Thermal insulation materials are widely used in construction, industry, aerospace and other fields, especially in reducing energy loss and improving energy efficiency. This paper summarizes the recent progress in the preparation and structural research of thermal insulation materials, with a focus on the structural characteristics and thermal insulation performance of organic, inorganic, and their composite aerogels and foams. By comparing and analyzing the thermal conductivity and temperature resistance of different materials, the review systematically outlines the applicable scenarios and current applications of various material systems. Finally, the future development trends of thermal insulation materials are discussed, suggesting that the integration of multi-scale structural design, biomimetic structures, and sustainable materials will be the key path to enhancing thermal insulation performance.

Keywords: thermal insulation materials; aerogels; thermal conductivity; porosity; composites; preparation; foam

收稿日期： 2025-04-01　　**修回日期：** 2025-04-19

通信作者： 游峰（1985—），男，博士，教授，youfeng.mse@wit.edu.cn

第一作者： 陈欣妍（2004—），女，本科生，1980215892@qq.com

引用本文： 陈欣妍, 陈依玲, 彭馨博, 胡靖杰, 江学良, 游峰. 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

Citation: CHEN Xinyan, CHEN Yiling, PENG Xinbo, HU Jingjie, JIANG Xueliang, YOU Feng. Recent progress in the preparation, structure, and application of thermal insulation materials[J]. CIESC Journal, 2025, 76(12): 6179-6195

引 言

热传递是自然界中普遍存在的一种现象，从高温区域向低温区域的热量流动无时无刻不在发生。自人类文明诞生以来，人们便一直在努力与极端的热或冷环境作斗争，以寻求更舒适的生活条件[1]。随着现代社会对生活品质要求的不断提高，隔热材料在建筑、工业、航空航天等众多领域的重要性愈发凸显。然而，传统隔热材料在生产和使用过程中往往伴随着高能耗和高碳排放，其隔热性能与其他性能，如力学性能、密度等存在诸多局限性，其隔热效果难以满足日益增长的节能环保需求。相关研究表明，全球近30%的能源消耗和10%的温室气体排放与建筑物的供暖和制冷密切相关[2]。因此，开发高性能、环保型隔热材料，以提高能源利用效率、降低碳排放，已成为当前科学研究和技术开发的重要方向。

隔热材料的应用领域极为广泛。在建筑领域，隔热材料被广泛应用于墙体、屋顶和地面的保温，以减少能量损失，提高建筑的能源效率。在航空航天领域，隔热材料用于保护飞行器免受高温气动加热的影响[3]。在工业领域，隔热材料被用于管道、储罐和设备的外部保温，以防止热量损失，保护设备，延长其使用寿命。此外，在汽车、船舶和飞机等交通工具中，隔热材料也发挥着重要作用，用于减少外界温度对内部环境的影响，提高乘客的舒适度。这些应用领域对隔热材料的性能提出了不同的要求，包括隔热效率、力学性能、耐久性和环境适应性等，推动了隔热材料研究的不断深入。

隔热材料种类繁多，包括气凝胶、多孔陶瓷、多孔聚合物基材料等。其中，气凝胶因其独特的纳米多孔结构，展现出低密度、低热导率、高孔隙率和高比表面积等优异特性，其热导率甚至低于静止空气的热导率，被认为在隔热领域具有广阔的应用前景[4]。然而，尽管气凝胶具有诸多优势，但在实际应用中仍面临一些挑战，如在高温环境下容易烧结、结构不稳定等。

为了进一步提升隔热材料的性能，优化其微观结构成为研究热点。例如，通过调控气凝胶的孔径、孔隙率和密度等参数，可以显著提高其隔热性能[5]。同时，随着可持续发展理念的深入，生物基隔热材料因其环保性和可再生性受到广泛关注。这些发展趋势不仅有助于满足不同领域对隔热材料的高性能要求，也为隔热材料的广泛应用提供了更广阔的空间。本文总结了近几年来相关领域的学者在隔热材料方面的一些进展，如陶瓷气凝胶和泡沫、碳气凝胶和泡沫、有机高分子气凝胶、生物质衍生气凝胶、有机高分子-无机非金属杂化气凝胶，并梳理了其在航天热保护、可穿戴防护衣物、电池热管理及建筑隔热等方面的应用，其总结如图1所示。同时也列出了一些其他隔热材料的发展现状及其存在的不足之处，希望能为今后隔热材料的制备及结构设计提供借鉴。

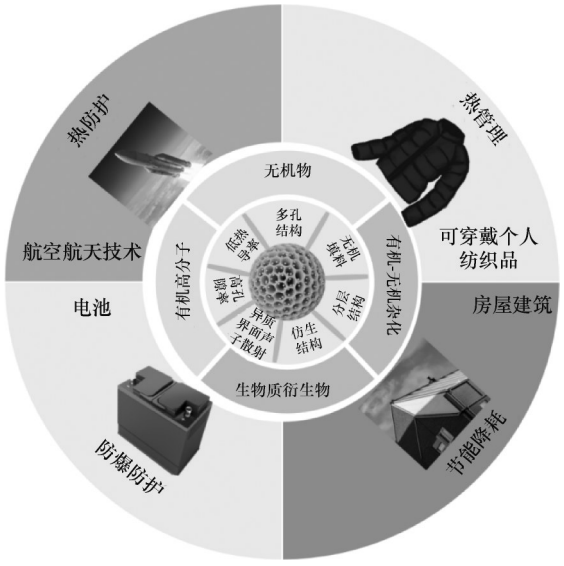


图1 隔热材料的特点、分类及应用总结

Fig.1 Summary of the characteristics, classification and applications of thermal insulation materials

1 隔热材料的分类及制备方法

1.1 隔热材料的分类

热导率(λ)是衡量材料导热能力的关键参数，其定义为单位时间内通过单位面积的热量与该处温度梯度的比值，通常用式(1)表示。

$$\lambda = \frac{Qd}{A\Delta T} \tag{1}$$

式中，Q为通过材料的热量，kJ；d为材料厚度，m；A为传热面积，m^2；ΔT为温度差，K。热导率越低，材料的隔热性能越好。热导率主要受材料的微观结构、孔隙率、孔径大小以及成分等因素的影响。例如，气凝胶和泡沫等隔热材料由于其多孔的微纳米结构，传热过程同时涉及对流、辐射和传导三种途径[6]。基于这些原理，隔热材料通常被分为三大类：有机隔热材料、无机隔热材料和有机-无机杂化

表1 常见隔热材料及其相关性能

Table 1 Common thermal insulation materials and their properties

分类	典型材料	形态	热导率/(W/(m·K))	性能特点	制备方法	文献
有机高分子材料	聚苯乙烯泡沫板(EPS)	泡沫	40.0	轻质易切割,吸水性较高,需阻燃处理;挤出法、泡沫塑料加工法广泛用于建筑墙体保温	—	
	聚苯乙烯泡沫挤塑板(XPS)	泡沫	30.0	闭孔结构,抗压强度高,防潮性好;适用于地暖、冷库	挤出成型法	—
	聚氨酯泡沫(PUR)	泡沫	20.0~30.0	高黏结性,无缝填充,阻燃性优于EPS;用于冷链、管道保温	发泡法、喷涂法	[7]
	聚酰亚胺	泡沫	100.0~50.0	耐温性较好,低烟无毒,脆性较高	热固化法、发泡法	[8]
生物质材料	纤维素	颗粒	40.0~60.0	天然可再生,弹性好,但易受潮霉变;用于红酒塞、装饰保温	—	[9]
	壳聚糖	松散填充	50.0~200.0	高孔隙率,吸声性强,防虫蛀;适用于热带地区建筑隔热	—	[10]
	木质素	板材	50.0~70.0	农业废弃物再生利用,成本低,但耐火性差;用于临时建筑夹层	—	[11]
无机材料	硅酸铝纤维	纤维棉	30.0~40.0	耐高温,抗热震,但对皮肤有刺激性;用于窑炉内衬	纤维化法、吹气法	[12]
	碳纳米线圈	—	20.0~40.0	超弹性,电磁屏蔽效能高,表面活性位点多;用于催化载体,柔性传感器	—	[13]
	石墨烯	—	10.0~20.0	超高导电性,超轻,力学强度可调;应用于超级电容器电极,高效散热片	—	[14]
	二氧化硅	气凝胶	10.0~20.0	超轻,憎水性强,柔性可裁剪;用于航天服、管道包裹	超临界干燥法、溶胶-凝胶法	[15]
	碳	气凝胶	10.0~20.0	导电性可控,耐高温,纳米多孔结构;用于电池隔热、电子器件	—	[16]
	玻璃棉	纤维卷材	30.0~40.0	成本低,吸声性能好,但易碎裂;广泛用于建筑吊顶、管道保温	纤维化法、吹气法	[17]
有机-无机杂化材料	二氧化硅气凝胶/聚酰亚胺泡沫	泡沫	24.0	高温稳定性强,良好的隔热性能	液氮气化法	[18]
	聚酰亚胺气凝胶/二氧化硅复合材料	气凝胶	7.4	卓越的低热导率和结构稳定性	3D打印与氢键网络调控	[19]
	间位芳纶纤维/氟化空心玻璃微球	气凝胶	21.6	高的隔热性能及耐热性	溶胶-凝胶法	[20]

隔热材料。常见的隔热材料及其相关性能如表1所示。

无机隔热材料以高孔隙率和纳米级孔隙结构为特点,通过减少固体和气体的热传导实现隔热效果。矿棉(如岩棉和玻璃棉)通过其纤维间的空气孔隙抑制热传导,兼具良好的隔音性能。有机隔热材料则通过其多孔结构和低密度特性实现隔热效果。此外,有机材料的柔韧性和加工性能使其在建筑和工业领域具有广泛应用。然而,有机材料的耐高温性能通常较差,需要通过改性或与其他材料杂化来提高其综合性能。有机-无机杂化隔热材料结合了有机材料的柔韧性和无机材料的耐高温性,展现出优异的综合性能[21]。

Wang等[22]研究发现,长程层状多拱形微结构的碳基气凝胶通过减少薄片连接、延长热传导路径和抑制空气分子运动,将热导率降至12.7 mW/(m·K)。此外,Zhang等[23]利用凝胶化静电纺丝技术制备的微/纳米纤维气凝胶,凭借其99.7%的超高孔隙率,显著降低了热传导。这些研究表明,多孔结构通过增加空气静态捕获和限制空气分子运动,可有效降低热传导。

Wang等[18]通过液氮气化制备了聚酰亚胺纳米纤维泡沫(PINF),其低至8.8 mg/cm^{3}的密度和高达90.2%的孔隙率使其热导率低至24.0 mW/(m·K),表现出优异的隔热性能。此外,Yu等[24]通过在硬质聚氨酯泡沫(RPUF)中引入生物质气凝胶颗粒,将杂化

材料的热导率从36.5 mW/(m·K)降低至28.6 mW/(m·K),降幅达21.6%。这一结果进一步证实了孔隙率对隔热性能的积极作用。

以上研究表明,通过优化材料孔隙率、构建多尺度孔隙结构以及采用有机-无机复合策略可显著降低材料热导率并提升隔热性能,这为新型高性能隔热材料的设计提供了重要理论依据。

1.2 隔热材料的制备方法及机理

隔热材料的制备方法与其微观结构密切相关,不同的制备工艺直接影响材料的热传导路径与隔热性能。近年来,气凝胶和泡沫材料因其低密度、高孔隙率和优异的热隔离性能成为研究的热点。通过对制备工艺的优化,可实现对热传导路径的有效调控,从而提升材料的隔热性能。

气凝胶的制备方法常采用溶胶-凝胶法和超临界干燥技术,以确保其低密度和高孔隙率,从而达到优异的隔热性能。通过调节前体和干燥过程,如使用水热辅助干燥工艺,可以控制气凝胶的微观结构,进而优化其热传导路径。泡沫材料则采用了多种发泡技术,如液氮气化、微模板法、化学发泡及超临界发泡技术等,这些方法可以控制泡孔的尺寸和分布,从而有效降低热导率。

了解隔热材料的导热机理对于优化其隔热性能有重要意义。隔热材料的性能优化主要围绕热传导路径调控、辐射抑制和结构稳定性三个维度展开,其核心在于通过微观结构设计降低材料的总热导率。当以宏观泡沫为研究对象时,多孔材料的换热特性可以用式(2)描述。

$$\lambda_{total} = \lambda_{solid} + \lambda_{gas} + \lambda_{rad} + \lambda_{convection} \tag{2}$$

式中,λ_{total}为绝缘材料的总热导率;λ_{rad}、$\lambda_{convection}$、λ_{gas}和λ_{solid}分别为辐射热导率、对流热导率、气体热导率和固体热导率。多孔材料中的热传导是由孔隙中的气体分子和固相中的声子进行的,因此气体和固体的传导是隔热性能的重要因素[25]。在固相传导中,无定形聚合物中的热传递主要通过原子振动依次传递,而晶态材料则依赖声子传播。由于聚合物链的无规排列和大量缺陷的存在,声子平均自由程被显著限制,这是合成聚合物普遍具有低热导率的根本原因。对于纳米多孔材料(如气凝胶),固相传导还受到结构单元尺寸效应的强烈影响,当颗粒直径或接触界面尺寸接近或小于声子平均自由程时,边界散射导致热导率急剧下降。在气相传导方面,纳米孔隙中气体分子的运动路径变得高度曲折,分子与壁面的频繁碰撞使能量传递效率降低,这一现象在孔径小于气体分子平均自由程时尤为明显。在辐射抑制方面,SiC纳米线作为红外遮光剂的引入显著降低了λ_{rad}项。Zhang等[26]设计的SiO_2/SiC气凝胶中,SiC_w通过局域表面等离子体共振效应吸收2.5~25 μm波段的红外辐射,使材料在800℃下的红外透过率降至7.3%,对应λ_{rad}贡献减少约42%。

在宏观多孔材料体系中,总热导率的叠加模型揭示了固体导热、气体导热、辐射及对流传热的耦合作用,而微观结构的精准设计能够通过孔隙限域效应削弱气体对流,并通过纳米线/纤维网络重构热传导路径以降低λ_{solid}。

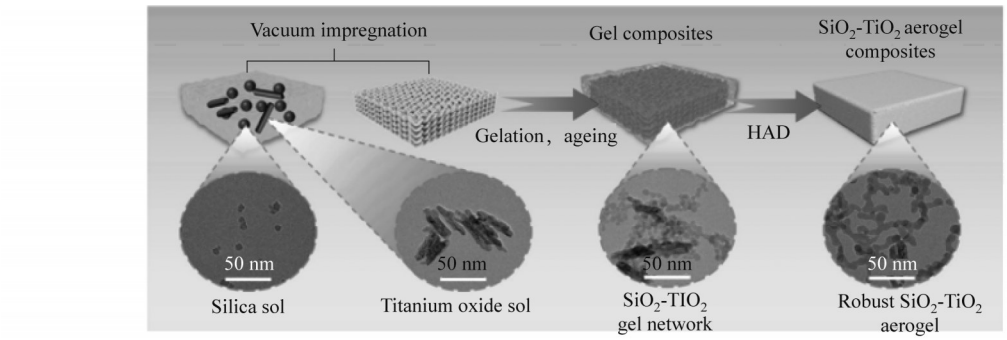
2 隔热材料的制备、结构及性能

2.1 无机非金属隔热材料的制备及性能

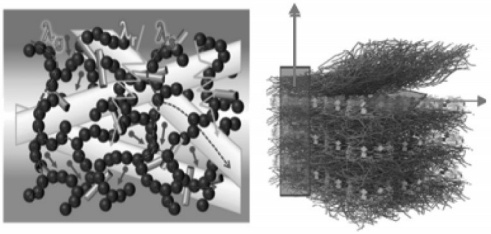
无机气凝胶与泡沫材料常用于隔热领域,主要通过陶瓷或碳基前体在高温条件下烧结制备而成。其中,陶瓷泡沫因其卓越的热稳定性与固有的防火特性而备受关注,能够承受超过1000℃的高温火焰而不发生开裂。尽管多数无机材料展现出较高的强度,但其变形能力相对较弱,这一特性显著制约了其在外部载荷作用下的结构稳定性。鉴于此,当前众多研究致力于在保持优良隔热性能以及耐热、防火性能的基础上,提升无机气凝胶的柔韧性(涵盖压缩与拉伸性能)和抗疲劳性能。

2.1.1 陶瓷气凝胶和泡沫隔热材料 陶瓷气凝胶因其独特的物理和化学性质,在隔热材料领域展现出巨大的应用潜力。然而,如何在极端条件下实现优异的隔热性能和机械稳定性,一直是材料科学与工程领域的研究热点。传统超临界干燥或常压干燥工艺虽能制备轻质低导热陶瓷气凝胶复合材料,但在规模化生产中存在有机溶剂易燃易爆的安全隐患。Xie等[27]提出如图2(a)所示的水热辅助干燥工艺(HAD),该工艺通过调控二氧化硅颗粒颈缩形成三维纳米多孔骨架,结合介孔结构的分层孔隙设计,室温下平衡λ_{gas}与λ_{solid}[图2(b)],使合成的SiO_2-TiO_2气凝胶复合材料(STAC)总热导率降至44.0 mW/(m·K),较传统工艺降低40.6%,且在1000℃下热导率低至68.0 mW/(m·K)。

通过将不同尺度的结构特性有机结合,优化材料的热传导路径,可以有效地抑制热量的传播并提升材料的整体隔热效果。Wen等[28]构建了微尺度的

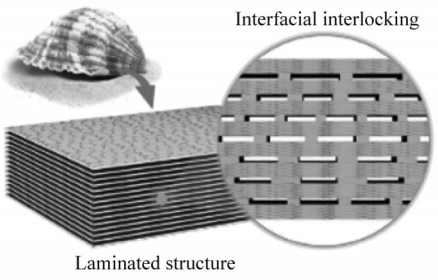


(a) STAC的HAD过程示意图[27]

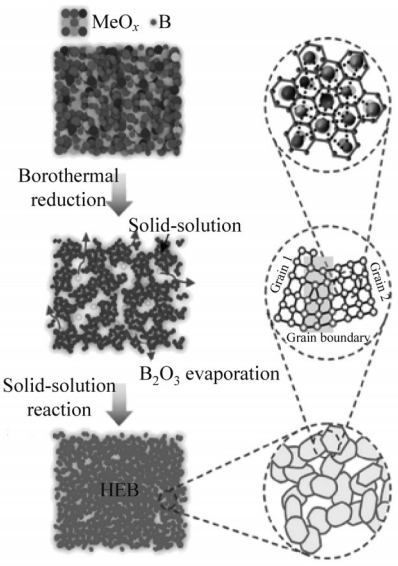


(b) STAC的总有效热导率组成[27]

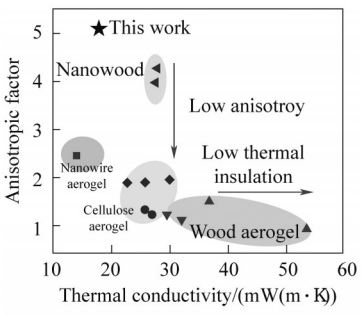
(c) 受珍珠粉启发的概念结构设计原则[29]



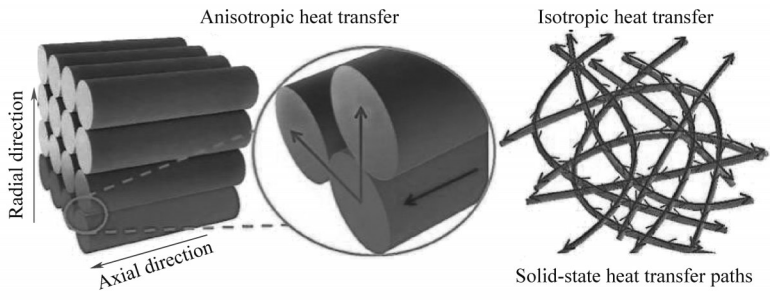
(d) 界面拓扑互锁结构原理图[29]



(e) 阳离子多孔高熵二硼化物陶瓷材料(PHEB)样品的多尺度设计示意图[28]



(f) 各向异性气凝胶材料的热导率与各向异性因子的关系图[35]



(g) 设计高各向异性结构以实现高效保温性能的机理示意图[35]

图2 陶瓷隔热材料制备方法、微观形貌以及隔热机理分析

Fig.2 The preparation methods, microstructures and thermal insulation mechanism analysis of ceramic thermal insulation materials

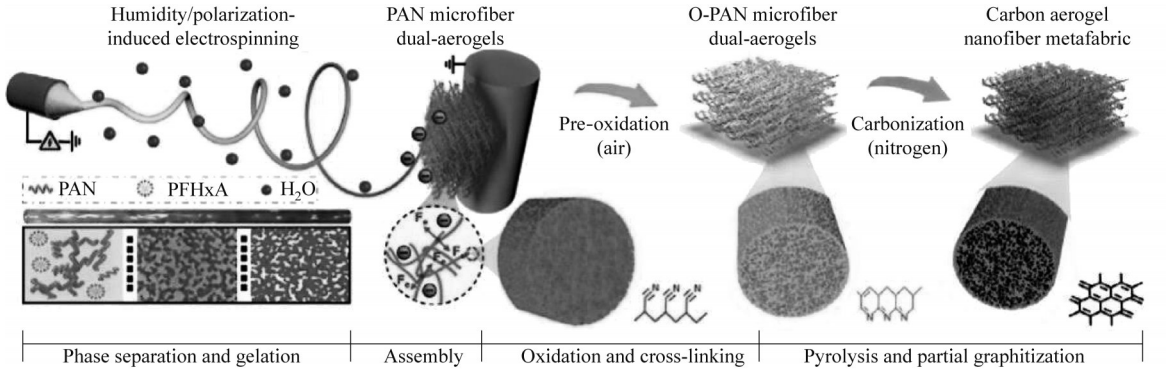
超细孔结构[图2(e)],显著减少了气体分子的运动和碰撞,并在2000℃的高温下仍保持优异的隔热性能。与之类似,Zhang等[29]通过仿珍珠层多拱形结构设计[图2(c)],设计了如图2(d)的二元焊接组装界面拓扑互锁结构,将陶瓷气凝胶的热导率降至39.7 mW/(m·K)。在纳米尺度界面处,晶体蒙脱土(MMT)与无定形SiO_2形成的桥接结构使声子平均自由程缩短至2.3 nm,有效抑制了热传导。值得注意的是,Yu等[30]通过构建三维层状结构进一步验证了多尺度设计的普适性,其纤维层间距控制在12.5~35.8 μm,使λ_{solid}降至18.7 mW/(m·K),最终实现25.4 mW/(m·K)的综合热导率。此外,Li等[31]制备的钽铽矿($DyTaO_4$)纤维海绵,展现出各向异性传热特性,其轴向热导率为23.5 mW/(m·K),仅为径向的58%。

Miao等[32]制备的SiO_2–Al_2O_3–B_2O_3陶瓷纳米纤维气凝胶，其热导率随孔隙率增加而降低，当发泡剂Tween80用量增加时，热导率从42.5 mW/(m·K)降至33.1 mW/(m·K)，且10 mm厚的气凝胶在高温丁烷喷灯火焰下暴露20 min后，背面温度仅达470℃，展现出良好的隔热性能。

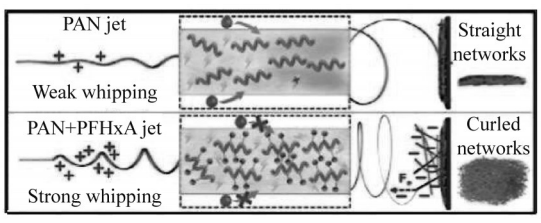
在此基础上，仿生结构设计的多样性和灵活性使其成为提升陶瓷气凝胶隔热性能的重要途径。Dang等[33]受孤雌草卷须的启发，设计了一种由高度卷曲纳米纤维构建的超拉伸陶瓷气凝胶，通过双组分静电纺丝形成非对称变形结构，其拉伸应变达150%时热导率仅增加3.1%，使该材料在1000℃动态拉伸下热导率为106.7 mW/(m·K)，较传统柔性陶瓷气凝胶降低62%。这种仿生结构设计通过增加材料的机械变形冗余，显著提高了陶瓷气凝胶在极端条件下的热机械稳定性，为隔热性能的提升提供了新的思路。此外，Zhang等[34]设计的二元网络拓扑结构，其各向异性片层结构将辐射传热降低至总导热的12%，拉伸应变85%时的热导率变化率控制在7.8%，网格截面的等效热导率为28.7 mW/(m·K)，较传统随机结构降低26%，证明拓扑设计可有效打破“隔热–力学”性能的权衡关系。Zhang等[35]通过静电纺丝和冷冻干燥技术制备了如图2(f)、(g)所示的各向异性SiO_2@SiC陶瓷纤维气凝胶，其横向热导率仅为18.0 mW/(m·K)，轴向热导率约为91.4 mW/(m·K)，使热量优先沿轴向传导，形成分层传热。

综合上述研究，图2展示了陶瓷气凝胶与泡沫材料的部分制备方法和结构设计，包括水热辅助干燥工艺、仿珍珠层结构设计以及多尺度设计的PHEB等，更直观地表明，多尺度结构设计、仿生结构应用以及材料特性优化为材料隔热性能提升提供了新思路和方法。然而，已有研究尚未充分考虑材料在动态环境中的长期稳定性，尤其是在反复热冲击和机械应力作用下的性能变化。未来的研究需要进一步探索这些策略的协同作用机制，并开发出能够在更复杂环境下长期稳定运行的陶瓷气凝胶材料。

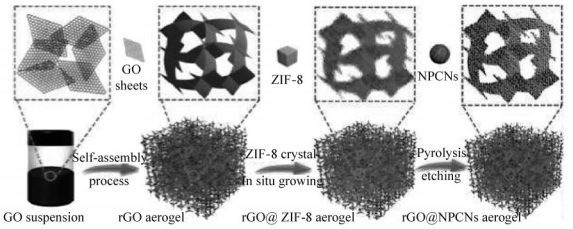
2.1.2 *碳气凝胶和泡沫隔热材料* 碳气凝胶是一种具有三维多孔结构的轻质材料，其低密度和高比表面积使其在隔热领域表现出显著优势。如图3所示，当前碳气凝胶的隔热性能优化主要依赖于纤维网络拓扑设计与多级孔隙调控的协同作用。Zhou等[36]通过三维组装的纳米纤维化芳纶纳米纤维(ANF)制备了碳纳米纤维气凝胶(CNFAs)，该材料在室温下的热导率仅为19.9 mW/(m·K)，远低于空气，这归因于材料的超低密度会减少固相的热传



(a) 超织物制造示意图[39]



(b) 纤维卷曲网络形成机理示意图[39]



(c) 巢状网络结构rGO@NPCNs气凝胶的制备过程[40]

图3 碳基隔热材料制备方法、热导率比较及隔热机理分析

Fig.3 Preparation methods of carbon-based thermal insulation materials, comparison of thermal conductivity, and analysis of insulation mechanisms

导。此外，Wu等[8]研究的聚酰亚胺/碳纳米管（PI/CNTs）气凝胶的定向微通道结构，使其热导率在室温和200℃时分别为61.0和76.0 mW/(m·K)，显示出良好的隔热稳定性和高温适应性。

近年来，研究者们通过引入多种材料和结构设计，进一步提升了碳气凝胶的隔热性能。Wu等[37]制备的MXene/C气凝胶通过三维网络结构显著降低了材料密度，其5 mm厚的气凝胶在82℃时可产生超过30℃的温度梯度，表现出良好的隔热和红外隐身能力。Ma等[38]通过构建不对称结构的ANF/MXene-NH_2气凝胶（ASAMA），实现了冷热环境下的可持续热调节，高孔隙率ANF层以90 nm孔径主导多重光散射，致密MXene层则以10 nm孔隙通过Knudsen数抑制气体分子平均自由程，使λ_{gas}贡献度低于8%。Tian等[39]通过双气凝胶策略制备了碳气凝胶纳米纤维超织物[图3(a)、(b)]，利用纳米孔结构抑制空气分子运动，显著降低了热传导。该材料在-196~600℃的宽温度范围内表现出优异的隔热性能。值得注意的是，Gai等[40]通过壳工程策略制备了具有独特嵌套网络结构的三维还原氧化石墨烯（rGO）基气凝胶材料（rGO@NPCNs）[图3(c)]，其多孔结构通过限制气体分子运动和增加热辐射散射，进一步提升了隔热性能。

以上研究表明，碳气凝胶和泡沫因其独特的微观结构和优异的隔热性能，在隔热材料领域展现出广阔的应用前景。通过低密度、多孔结构和合理的结构设计，这些材料能够有效降低热传导，同时具备良好的力学性能和多功能性。然而，现有研究尚未充分考虑材料在极端环境下的长期稳定性，以及在复杂工况下的综合性能优化。未来的研究应进一步探索新型材料体系和结构设计，以满足更高标准的隔热需求，并推动碳气凝胶在航空航天、工业炉和低温系统等领域的广泛应用。

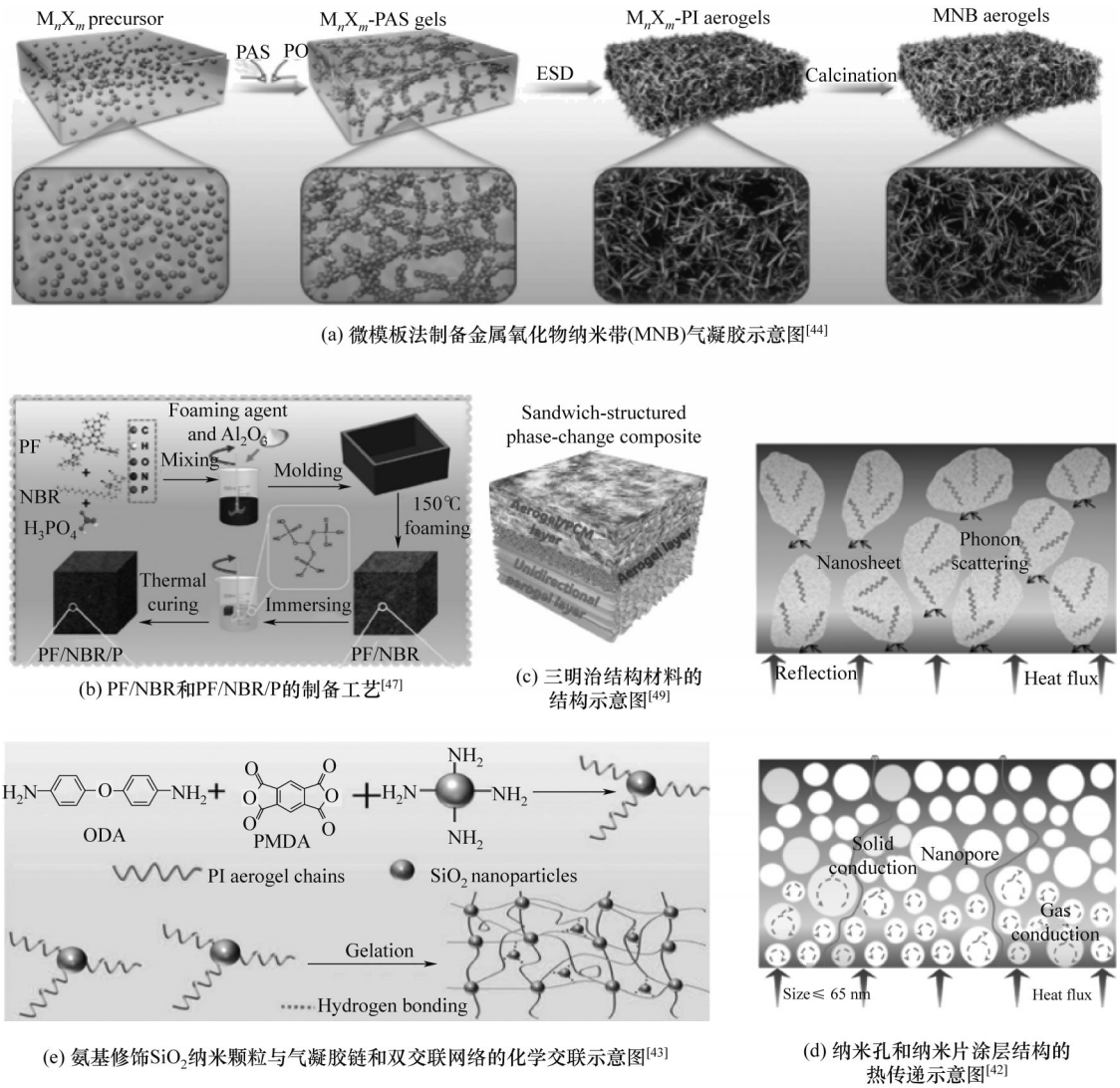
2.2 有机高分子隔热气凝胶及泡沫的制备及性能

有机高分子隔热材料通常具有低密度、高孔隙率、良好的柔韧性和优异的隔热性能。这些特性使其在隔热领域具有显著优势。如气凝胶纤维结合了气凝胶的轻质和多孔性以及纤维的柔韧性和耐磨性，展现出优异的隔热性能[41]。此外，通过化学改性或多层结构设计，可以进一步提升这些材料的隔热性能和机械稳定性。

通过制备具有纳米片结构的聚电解质涂层，能够显著降低材料的热导率，进而提升其隔热性能。Luo等[42]采用Cu^{2+}辅助水相分离（APS）策略，成功地在RPUF表面组装了纳米片结构的聚电解质涂层[图4(d)]，将热导率从30.0 mW/(m·K)降至28.1 mW/(m·K)，降幅达6.3%。这种结构优化策略在气凝胶体系中得到延伸，Chen等[43]开发的双交联聚酰亚胺气凝胶复合材料，通过氨基修饰SiO_2纳米颗粒和多级孔结构的协同作用[图4(e)]，将热导率控制在35.7 mW/(m·K)，其纳米气凝胶链尺寸和纳米孔结构显著抑制了气体分子平均自由程，使材料在-110~300℃宽温域内保持稳定的隔热性能。此外，Wang等[44]通过微模板法[图4(a)]制备了具有纳米带结构的金属氧化物气凝胶，减少了热传导路径，抑制了结晶相转变，从而在高温下保持了良好的隔热性能。

在发泡材料体系的结构创新方面，研究者通过分子改性与工艺调控实现了多尺度孔隙的精准构筑。Yang等[45]通过紫外辐射接枝将甲基丙烯酸甲酯引入聚丙烯分子链（PP-*g*-MMA），使改性PP泡沫的热导率从186.7 mW/(m·K)降至65.3 mW/(m·K)。接枝改性的组分不仅将泡孔尺寸从微米级拓展至纳米级，更通过酯基官能团将红外吸收率提升至92%，实现了辐射传热与固体传导的双重抑制。Hu等[46]通过硼氧键交联构建了具有超支化拓扑结构的形状记忆硼酚醛气凝胶，使材料在30%压缩形变后经100℃热处理能恢复97.2%的原始形状，同时热导率从42.3 mW/(m·K)恢复至39.8 mW/(m·K)。值得注意的是，此类动态交联结构的构建策略与近期发展的磷酸盐改性酚醛泡沫具有内在关联性。Song等[47]通过向酚醛塑料（PF）中引入丁腈橡胶（NBR）和磷酸盐开发了PF/NBR/P复合泡沫[图4(b)]，在保持闭孔结构的同时，其低密度特性使固体传导λ_{solid}显著降低。同样，Zhang等[48]通过添加4%（质量分数）羟基锡酸钙使RPUF的泡孔密度提升69.5%，平均孔径缩小37.7%，将材料热导率从38.2 mW/(m·K)降至29.5 mW/(m·K)。

在孔隙结构优化的基础上，层状结构设计进一步提升了材料的隔热性能。Shi等[49]开发的三明治结构聚酰亚胺气凝胶复合材料，如图4(c)所示，其下层单向氟化聚酰亚胺（FPI）气凝胶通过定向冷冻技术形成层状多孔结构，沿垂直方向的热导率降至32.0 mW/(m·K)；中间层传统PI气凝胶的闭孔率经压汞法测定达到78.3%，有效抑制了对流传热的贡献。值得关注的是，Fu等[50]通过微流控纺丝技术制备的梯度全纳米结构芳纶气凝胶纤维（GAFs），梯度



(a) 微模板法制备金属氧化物纳米带(MNB)气凝胶示意图[44]

(b) PF/NBR和PF/NBR/P的制备工艺[47]

(c) 三明治结构材料的结构示意图[49]

(d) 纳米孔和纳米片涂层结构的热传递示意图[42]

(e) 氨基修饰SiO_2纳米颗粒与气凝胶链和双交联网络的化学交联示意图[43]

图4 有机高分子隔热材料制备工艺、结构设计以及传热机理分析

Fig.4 The preparation process, structural design, and heat transfer mechanism analysis of organic polymer thermal insulation materials

界面产生的热阻使径向热导率低至22.8 mW/(m·K),较传统湿纺气凝胶纤维降低约34.5%。这种梯度结构设计理念与Chen等[51]的核鞘结构PI/ANF气凝胶纤维形成理论呼应。此外,通过两步相分离法构建梯度孔结构,其中致密外壳层使表面热流反射率提高至82%,而多孔内核将热导率稳定在34.0 mW/(m·K)。

综合以上研究,研究者通过多种制备方法和结构设计(如微模板法、化学交联、层状结构等)开发的高性能隔热材料,通过调控纳米片、纳米孔、梯度结构等因素显著降低了热导率并提升了机械稳定性。然而,现有研究多集中于理想条件下的性能优化,对材料在实际应用中的长期稳定性、环境适应性以及成本效益的综合考量仍显不足。未来研究应聚焦于开发兼具高性能与经济性的隔热材料,并深入探究其在极端条件下的失效机制,以推动有机高分子隔热材料从实验室走向实际应用,满足建筑、航空航天、电子设备等领域的多样化需求。

2.3 生物质衍生隔热气凝胶与泡沫材料的制备及性能

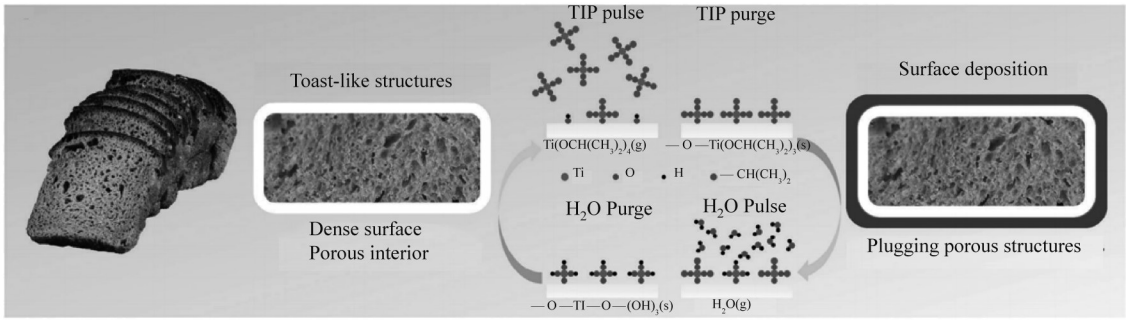
在近年来的研究中,生物质衍生的气凝胶和泡沫材料因其优异的隔热性能和环境友好特性而受到广泛关注。这些材料主要来源于天然纤维素和木质素,具有良好的机械强度和热稳定性,适用于建筑节能和温度敏感型电子元件的保护等先进应用。图5展示了部分生物质气凝胶和泡沫材料的多尺度结构设计及其传热机制,这些结构设计为抑制

热传导、对流和辐射提供了重要策略，是提升材料隔热性能的关键。

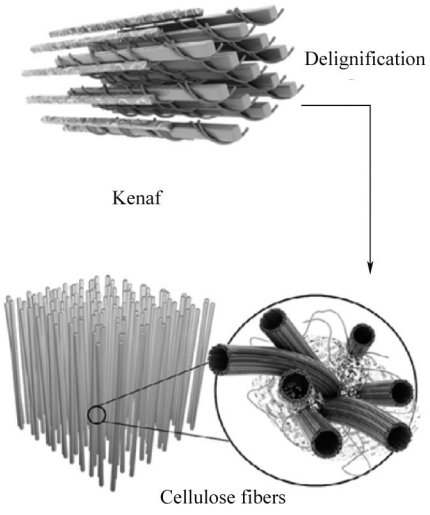
为进一步提升隔热性能，研究者通过结构优化策略，在多孔气凝胶的微观设计中引入声子散射与气体传导协同抑制机制。如图5(a)所示，Huang等[52]开发的再生纤维素/木质素复合气凝胶具有独特的面包状结构，能够有效保护内部多孔结构，通过引入木质素增强了气凝胶的网络结构，降低了热导率。此外，Liu等[53]提出了一种由电纺纳米纤维组成的分级纤维素气凝胶，利用其层次多孔结构和超高孔隙率，使气凝胶的热导率降至28.5 mW/(m·K)。

在多级材料组分方面，研究者通过引入纳米填料或优化生物质基体特性实现隔热性能的协同提升。Zhong等[54]开发了分级纤维素气凝胶(HCA)，通过中空微纤维结构，使内部空气的热导率显著低于纤维素本体，降低了固体传导[图5(b)、(c)]，配合纳米孔道产生的Kapitza界面热阻，使材料整体热导率降至20.0 mW/(m·K)以下。Gao等[56]的研究进一步揭示，当材料孔隙率达98.2%时，气体分子平均自由程被压缩至亚微米级，气态热导率贡献可降低至总热流的12.5%。类似原理在壳聚糖-石墨烯复合气凝胶中得到验证，Le等[57]发现掺入10%(质量分数)石墨烯时，纳米片层产生的曲折路径使气体分子平均自由程缩短，气态热导率下降幅度超过40%，整体热导率降至38.0 mW/(m·K)。Wicklein等[55]则通过冷冻浇铸法制备了纳米纤维素/氧化石墨烯泡沫，其热导率为15.0 mW/(m·K)，仅为传统膨胀聚苯乙烯的一半；材料中的管状孔隙抑制了自然对流[图5(d)]，而3 nm的介孔细胞壁通过限制气体分子运动使气态热导率低于1.0 mW/(m·K)。

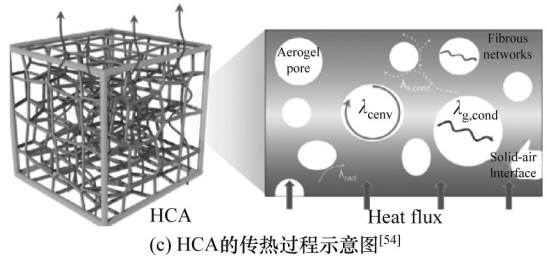
除此之外，还可以通过仿生策略和纳米级构筑显著改善材料的热性能。如图6所示，受硅藻生物



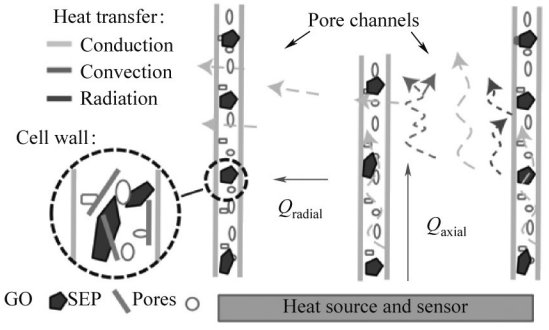
(a) 面包状结构的再生纤维素气凝胶片和原子层沉积(ALD)反应过程[52]



(b) 采用脱木质素工艺从天然红麻中分离出中空微纤维示意图[54]



(c) HCA的传热过程示意图[54]



(d) 具有定向孔的泡沫在径向和轴向热导率的贡献示意图[55]

图5 生物质隔热材料结构设计、多孔调控及热传导路径优化研究

Fig.5 Research on structural design, porosity regulation, and thermal conduction path optimization of biomass insulation materials

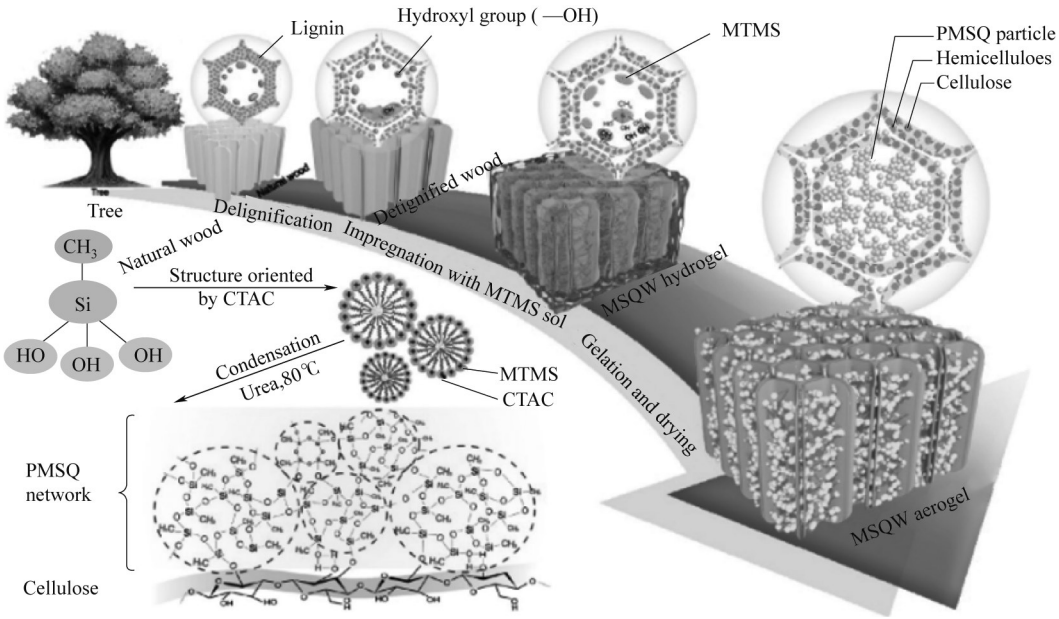


图6 通过脱木质素、原位矿化、干燥等步骤仿生制备MSQW[58]

Fig.6 Biomimetic preparation of MSQW through steps such as lignin removal, *in situ* mineralization, and drying[58]

矿化启发，Liu等[58]开发了一种超强阻燃的聚甲基硅氧烷-木材气凝胶（MSQW），通过纳米组装与溶胶-凝胶工艺优化了材料结构，实现了94.0 mW/(m·K)的低热导率。类似地，Zhang等[59]开发的珍珠层仿生气凝胶结合细菌纤维素与聚甲基倍半硅氧烷，在介观尺度构建20 nm孔径层状网络，最终实现17.4 mW/(m·K)的低热导率并保持超弹性。进一步研究表明，Men等[60]通过壳聚糖增强碳气凝胶网络，确保大尺寸样品维持9~130 nm均匀孔径分布，其高温热导率为47.0 mW/(m·K)，较传统材料降低35%。

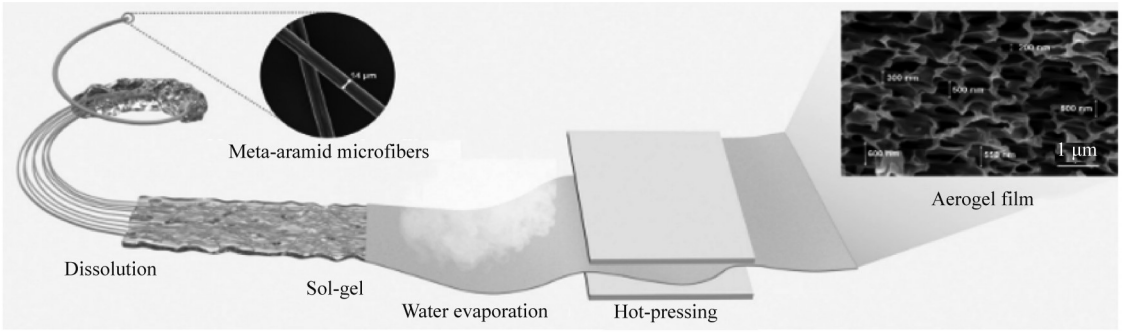
当前，生物质衍生气凝胶和泡沫隔热材料的研究在极端环境适配性和生命周期评估方面仍存在局限。多数文献聚焦于实验室尺度性能优化，如Zhong等[54]虽实现了0~100℃宽温域稳定性，但未验证材料在湿热循环或紫外线老化下的长期性能衰减。Wicklein等[55]的阻燃泡沫虽通过UL-94V-0认证，但其制备过程涉及海泡石纳米棒等不可再生矿物，与生物质材料的可持续性主张存在内在矛盾。未来研究需建立涵盖原料获取、加工能耗和使用周期的全链条评估体系。

2.4 有机-无机杂化隔热气凝胶和泡沫的制备及性能

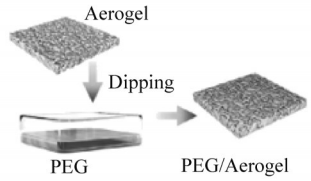
有机-无机杂化隔热材料是近年来备受关注的新型高性能材料。它通过将有机和无机成分巧妙结合，充分发挥各自的优点，在隔热效果、力学性能和耐久性方面表现出色。无机成分如二氧化硅气凝胶，具有极低的热导率和良好的耐火性，但存在机械脆性的问题；而有机材料则提供了较好的韧性，但通常会面临易燃和高温不稳定的问题。通过有机-无机杂化，能够有效克服这些缺点，使得材料在高温环境下仍然保持较强的稳定性，同时提高了韧性和抗压能力[1]。

在有机-无机杂化气凝胶体系中，平衡力学性能与多模式热传导抑制仍是核心挑战。Yang等[20]针对传统气凝胶纳米孔无序分布导致气态传热增强的问题，利用间位芳纶分子间动态氢键重构机制[图7(a)]，在溶胶-凝胶相变中形成封闭纳米孔；进一步引入氟化空心玻璃微球精确调控孔尺寸至克努森效应临界阈值，将气态热导率降至21.6 mW/(m·K)，突破静止空气导热极限。Hu等[61]通过构建蜜柚皮/蜂窝复合仿生多孔结构，在ANF骨架上原位生长聚甲基倍半硅氧烷（PMSQ），制备了具有多级热传导抑制功能的ANFP杂化气凝胶[图7(f)]，热导率低至64.6 mW/(m·K)。

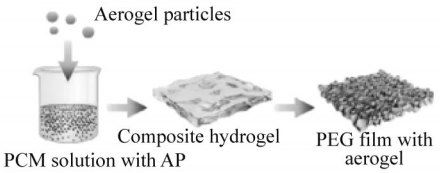
针对孔隙率与力学稳定性的固有矛盾，Li等[19]创新性地采用3D打印技术实现PI/SiO_2复合体系的定向组装，构建了氢键网络调控机制，使热导率低至7.41 mW/(m·K)。Wang等[62]通过将二氧化硅气凝胶颗粒（SAPs）分散于聚乙烯醇-聚乙二醇基质中构建复合相变材料（PCM）[图7(b)~(d)]。实验表明，当SAPs含量达到12%（质量分数）时，材料热导率降至73.0 mW/(m·K)，较纯PCM降低190%，80℃条



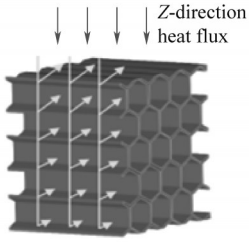
(a) 仿生间芳纶气凝胶膜的制备过程示意图[20]

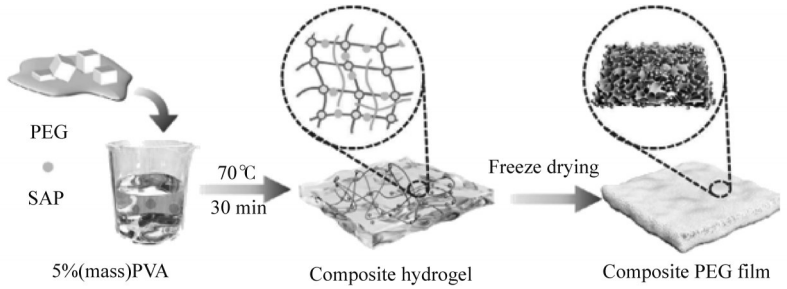


(b) 气凝胶基PCM的制备工艺，将PCM填充在气凝胶的孔隙中[62]

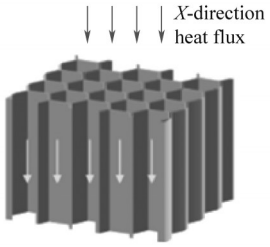


(c) 气凝胶功能化PCM的制备工艺，其中气凝胶分散在PCM基质中[62]

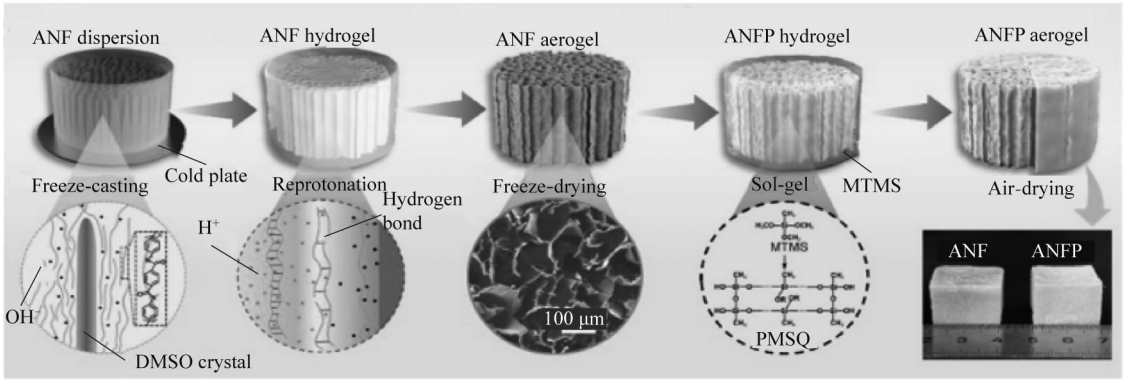




(d) 气凝胶功能化复合PCM膜的制备工艺示意图[62]



(e) PACAs沿*X*方向和*Z*方向的传热模型[63]



(f) ANFP气凝胶的制备与表征[61]

图7 有机-无机杂化隔热材料的制备工艺以及传热机理分析

Fig.7 The preparation process of organic-inorganic hybrid thermal insulation materials and the analysis of heat transfer mechanisms

件下的热延迟时间延长147%，实现了28℃的显著温降。

在解决材料热-力协同优化问题的基础上，如何进一步提升极端环境下的多模式传热抑制效率成为新的研究焦点。针对高温环境下界面热阻的快速衰减问题，Kang等[64]在羧甲基纤维素钠(CMC)气凝胶中构建了CMC/Co@NC-4异质界面，使热导率降至18.3 mW/(m·K)，同时维持600℃下的结构稳定性。针对极端温度场下各向同性结构适应性局限，Wang等[63]通过侧向冷冻法制备了PI/Al_2O_3复合

气凝胶(PACAs),其蜂窝状孔道沿Z轴方向有序排列,有效阻断了轴向热流传递[图7(e)]。这些进展表明,多组分声子散射与异质界面调控的协同作用,为宽温域高效隔热提供了新范式。

此外,研究者还通过材料的表面改性和功能化进一步提升隔热性能。Liu等[65]将Ag-GO气凝胶与三聚氰胺泡沫结合,利用其光热转换能力和疏水性,提升了材料在界面蒸发中的隔热性能。Ma等[66]则通过微流体纺丝技术制备了多壁中空聚氨酯纤维,利用其独特的中空结构容纳更多静止空气,从而实现隔热性能的提升。这些研究表明,表面改性和功能化可以显著提升材料的隔热性能和环境适应性。

综合上述研究,图7展示了多种有机-无机杂化隔热材料的制备工艺与传热机理,包括溶胶-凝胶法、冷冻干燥、热压成型等关键步骤,通过微观结构设计、无机填料引入以及表面改性等手段实现多模式热传导抑制的策略,使材料在隔热性能上表现出显著优势。然而,已有研究尚未充分探讨这些材料在极端环境下的长期稳定性,以及如何进一步降低生产成本以实现大规模应用。未来的研究需要在这些方面进行深入探索,以推动有机高分子-无机物杂化气凝胶和泡沫在隔热领域的广泛应用。

3 隔热材料的应用

隔热材料作为高效热管理的关键介质,其应用场景已从传统建筑领域拓展至航空航天、新能源、个人防护等多元化场景。近年来,基于气凝胶、泡沫的创新设计,显著提升了隔热材料在极端环境下的热稳定性、机械强度及功能适应性。

3.1 建筑

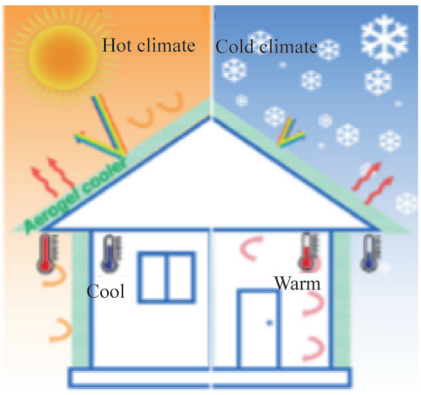
如图8(a)所示,建筑领域对隔热材料的需求集中在辐射冷却与热传导抑制的协同优化上。Jiang等[67]开发的$HSiO_2$/C@C复合气凝胶纤维通过92.6%的太阳反射率与96.1%的红外发射率,实现建筑表面温度调控,其树环结构赋予材料62.0 mW/(m·K)的低热导率,有效阻隔热量传递。类似地,Li等[68]将SiO_2气凝胶微球嵌入聚偏氟乙烯-六氟丙烯(PVDF-HFP)纳米纤维膜中[图8(b)],使材料在885.56 W/m^{2}辐照下实现11.2℃的昼间冷却,其介孔结构将热对流与热传导损失降至最低。Liu等[53]进一步通过高阶纤维素基气凝胶冷却器,整合光谱的选择性与热绝缘特性,在中国气候区应用中实现年节能23.1 kWh/m^2,其分层多孔结构可适配不同气候带的节能需求。这类材料通过结构-功能一体化设计,突破了传统隔热材料的光热管理瓶颈,但规模化生产中的微结构控制与成本平衡仍是挑战。

3.2 航天器热保护及电池热管理

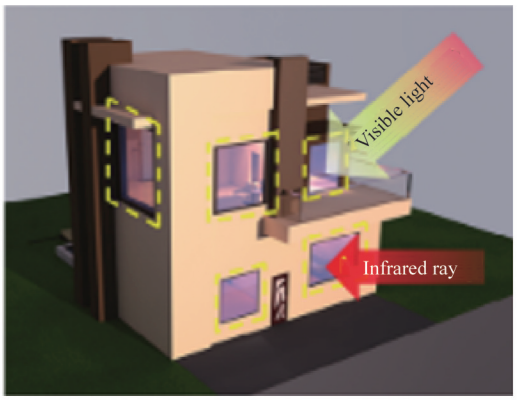
在电动汽车电池的潜在应用中,电池热管理对材料宽温域适应性及结构可定制性提出了更高的要求[图8(c)]。针对航天器再入大气层时面临的1600℃以上瞬态高温,Zhu等[69]开发的硅化纳米复合气凝胶通过凝胶约束冷冻铸造技术,构建出具有拓扑弹性的细胞骨架结构,其热导率在1000℃下稳定于21.3 mW/(m·K),在航天器进入大气层时,材料在隔热层保护内部设备和人员免受极高温度和压力的影响。类似地,Zhou等[36]开发的碳纳米纤维气凝胶在-196~1000℃范围内保持19.9 mW/(m·K)的热导率,其分层互穿结构可承受航天器极端热-机械载荷。Yu等[70]通过3D打印制备的PI/SAP复合气凝胶在-50~1300℃范围内展现出稳定隔热性能,其2 mm保护壳可使锂电池在-20℃环境下维持13℃的工作温度。Xue等[71]开发的冷冻辅助直写成型技术实现了PI气凝胶微观-宏观结构协同调控,使锂电池在-30℃时放电容量提升约20%。在电动汽车领域,Chen等[72]研发的陶瓷化有机硅泡沫通过梯度多孔结构,可在1300℃下为电池模块提供30 min热失控防护,其柔性和弹性特性显著优于传统防火材料。此类材料虽在极端热防护中表现优异,但复杂工艺导致的制造成本仍是其商业化推广的主要障碍。Zhou等[73]通过表面反应合成的SiO_2-ZrO_2气凝胶突破比强度极限,在200℃冲击下仍能保护电池系统稳定运行。这些材料虽在极端工况中表现卓越,但纳米结构调控与大规模制备之间的技术鸿沟仍需跨越。

3.3 可穿戴个人防护衣物

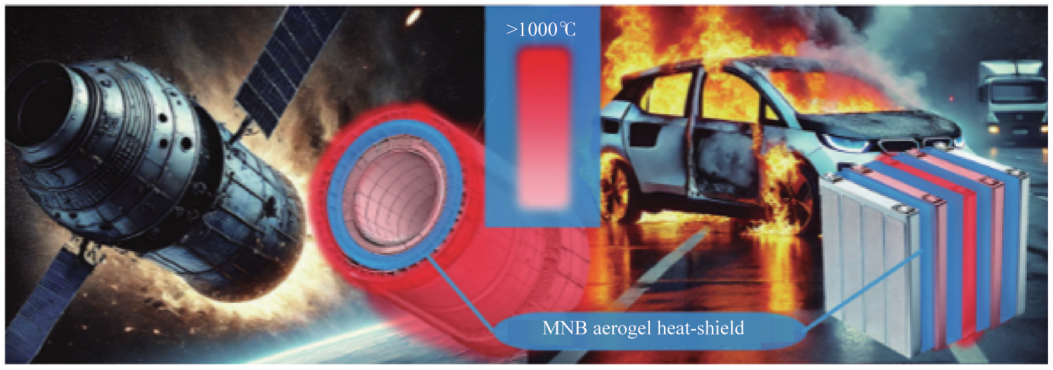
可穿戴隔热材料的突破在于力学性能与热性能的协同提升[图8(d)、(e)]。Wang等[74]通过双模板法制备的聚氨酯@纤维素纳米纤维(PU@CNF)气凝胶以24.0 mW/(m·K)的热导率实现超薄保暖,9 mm厚度的材料等效于40 mm鹅绒的保温效果,其富勒烯圆顶结构赋予材料超弹性与自清洁功能。Yu等[75]开发的海岛熔纺气凝胶毡通过波纹层状结构实现25%拉伸应变与10000次抗疲劳循环,其透气防水特性在应急救援服中展现出应用潜力。Zhang等[59]



(a) 以气凝胶为外围护结构的建筑物工作机理示意图[37]



(b) 透明气凝胶作为建筑物隔热窗的示意图[68]



(c) MNB气凝胶在航天器和电动汽车电池中的潜在应用场景[42]



Firefighter uniform

(d) 在消防服中的潜在应用[60]



Thermoregulating wearable triboelectric sensor

(e) 夏季阳光下对人体健康和运动康复的解决方案及潜在应用[52]

图 8　隔热材料在建筑、航天、电池、防护衣物等领域的多功能应用研究

Fig.8　Research on the multifunctional applications of thermal insulation materials in the fields of construction, aerospace, batteries, and protective clothing

的仿珍珠层气凝胶通过无机-有机多尺度杂化，在 1.6 t 碾压载荷下仍维持结构完整性，为太空服隔热层提供新选择。Hu 等[76]的仿生透明气凝胶兼具 89% 的透光率与 15℃的 CPU 降温效果，为可穿戴电子设备提供柔性热管理方案。这些进展标志着个人热管理向功能集成化发展，但材料长期穿戴的舒适性验证与耐久性测试仍需完善。

现有研究表明，隔热材料正朝着多功能集成、宽温域适应、结构可设计等方向发展。然而，材料性能优化与成本控制的矛盾、复杂环境下的长期稳定性验证、跨尺度制造工艺的标准化等问题仍未完全解决。未来研究需加强多物理场耦合机制解析，发展低环境负荷的绿色制备技术，并通过数字孪生等技术实现材料性能的精准预测与设计。

4 结 语

近年来，随着全球能源危机的加剧以及对环境保护的高度重视，隔热材料的研究与开发取得了显著进展，尤其在气凝胶、泡沫以及杂化材料的开发和应用方面。通过优化材料的微观结构、孔隙率、孔径分布以及成分设计，隔热材料的性能得到了显著提升。多尺度结构设计、仿生结构的引入以及可持续材料的应用成了隔热材料发展的关键路径。这些策略不仅有效降低了材料的热导率，还增强了其在极端环境下的机械稳定性和热稳定性。例如，陶瓷气凝胶通过多尺度结构优化实现了在2000℃高温下的优异隔热性能，而有机-无机杂化材料则通过协同优化平衡了隔热效果与力学性能。

尽管隔热材料的研究取得了诸多突破，但仍面临一些挑战：(1)材料在极端环境下的长期稳定性尚未得到充分验证，尤其是在反复热冲击和机械应力作用下的性能变化仍需深入研究；(2)复杂环境下的综合性能优化，如在湿热循环、紫外线老化等条件下的耐久性，仍需进一步探索；(3)现有研究多集中于实验室尺度的性能优化，而规模化生产中的微结构控制与成本平衡仍是亟待解决的问题。

隔热材料未来的发展方向和可拓展研究包括以下几个方面。

(1)多物理场耦合机制的解析：通过深入研究热、力、电磁等多物理场的耦合机制，进一步优化材料的综合性能，开发出适用于更复杂工况的隔热材料。

(2)绿色制备技术的发展：随着可持续发展理念的深入，开发低环境负荷的绿色制备技术将成为未来研究的重点。例如，利用生物质资源开发高性能隔热材料，不仅可以降低碳排放，还能实现资源的高效利用。

(3)数字化设计与制造：借助数字孪生等先进技术，实现隔热材料性能的精准预测与设计。通过模拟材料在不同工况下的性能表现，优化材料的微观结构和制备工艺，从而提高研发效率并降低成本。

(4)多功能集成：隔热材料正朝着多功能集成的方向发展，如结合辐射冷却、热管理、防火阻燃等功能，以满足建筑、航空航天、新能源等领域对隔热材料的多样化需求。

参考文献

[1] Feng J B, Ma Z W, Wu J P, et al. Fire-safe aerogels and foams for thermal insulation: from materials to properties[J]. Advanced Materials, 2025, **37**(3): 2411856.

[2] 章婷, 赵春林, 乐弦, 等. 气凝胶研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2018, **39**(1): 1-39.
Zhang T, Zhao C L, Le X, et al. Research progress of aerogels[J]. Advanced Ceramics, 2018, **39**(1): 1-39.

[3] 李德富, 杨炜平, 刘小旭. 多层隔热材料传热特性研究现状及展望[J]. 航天器环境工程, 2013, **30**(3): 302-309.
Li D F, Yang W P, Liu X X. Heat transfer characteristics of multilayer insulation materials[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, **30**(3): 302-309.

[4] 柳凤琦, 王鲁凯, 门静, 等. 气凝胶隔热材料制备及航天热防护应用研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2022, **52**(2): 26-47.
Liu F Q, Wang L K, Men J, et al. Progress on the preparation of aerogel thermal insulations and their applications in aerospace thermal protection system[J]. Aerospace Materials & Technology, 2022, **52**(2): 26-47.

[5] 施伟, 谭毅, 曹作暄. 隔热材料研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2012, **26**(S1): 344-347.
Shi W, Tan Y, Cao Z X. Research status and development trend of thermal insulating materials[J]. Materials Reports, 2012, **26**(S1): 344-347.

[6] 门静, 王鲁凯, 冯军宗, 等. 炭气凝胶隔热材料研究进展[J]. 材料工程, 2024, **52**(6): 78-91.
Men J, Wang L K, Feng J Z, et al. Research progress in carbon aerogels for thermal insulations[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, **52**(6): 78-91.

[7] Zhang Y, Wu Y Y, Liu Z J, et al. Preparation and properties of waterborne polyurethane/nanocellulose/sepiolite composite aerogel for sound absorption and heat insulation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, **298**: 140015.

[8] Wu H, Ren X H, Hu W X, et al. Permittivity controllable CNTs/PI composite aerogels with oriented microchannels for advanced microwave absorption and thermal isolation[J]. Carbon, 2025, **233**: 119883.

[9] Zhou Q Q, Hong W J, Sheng K X, et al. Direct ink writing 3D printed graphene oxide nanocomposite aerogel for intelligent fire-warning and exceptional fire-shielding[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **499**: 156325.

[10] Wang H C, Cao L Y, Liu Y, et al. Preparation of sustainable kapok fiber/chitosan composite aerogels with amphiphilic and mechanical properties for thermal insulation and packaging applications[J]. Fibers and Polymers, 2024, **25**(6): 2081-2091.

[11] Zhang M R, Jeong S, Cho W, et al. Green co-solvent-assisted one-pot synthesis of high-performance flexible lignin polyurethane foam[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **499**: 156142.

[12] Deng T, Li Y F, Jiang C W, et al. A facile and green preparation of aluminum silicate fiber reinforced silica aerogel composites for thermal insulation[J]. Journal of Porous Materials, 2025, **32**: 1237-1251.

[13] Guo Y, Duan Y P, Gu S D, et al. Carbon nanocoils-assisted

formation of tunable pore graphene aerogels for lightweight broadband microwave absorption, thermal insulation, and antifreeze devices[J]. Small, 2025, **21**(10): 2412270.

[14] Cho J, Jang E, Kim J, et al. Development of boron nitride hydroxide/aluminum oxide/epoxy resin spheres and graphene oxide-loaded L-ascorbic acid aerogel for enhanced thermal conductivity and insulation *via* hot-pressing[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2025, **36**(2): e70120.

[15] Wang J H, Liu L P, Dong W L, et al. Ultra-high radial elastic aerogel fibers for thermal insulation textile[J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(13): 2417873.

[16] Sha R Y, Wang B Z, Dai J X, et al. Novel ultralight carbon foam reinforced carbon aerogel composites with low volume shrinkage and excellent thermal insulation performance[J]. Carbon, 2025, **232**: 119826.

[17] Tariq I, Hu J H, Chen W J, et al. Summer and winter performance evaluation of double layered PTFE dome with aerogel-glass wool thermal insulation—field experiments and numerical simulation [J]. Energy and Buildings, 2024, **319**: 114538.

[18] Wang Y Y, Pang N, Yin X Q, et al. Rapid preparation of stretchable, compressible and flexible nanofiber foams by one-step expansion for thermal insulation and adsorption of sound and oil[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **506**: 159916.

[19] Li M M, Wu T T, Zhao Z Y, et al. Multiscale manufacturing of recyclable polyimide composite aerogels[J]. Advanced Materials, 2025, **37**(5): 2411599.

[20] Yang R, Yu K X, Yu X, et al. Penguin feather-inspired flexible aerogel composite films featuring ultra-low thermal conductivity and dielectric constant[J]. Materials Horizons, 2025, **12**(8): 2629-2640.

[21] Niu Z Q, Qu F J, Chen F, et al. Multifunctional integrated organic-inorganic-metal hybrid aerogel for excellent thermal insulation and electromagnetic shielding performance[J]. Nano-Micro Letters, 2024, **16**(1): 200.

[22] Wang Z Y, Li Z C, Li B, et al. Functional carbon springs enabled dynamic tunable microwave absorption and thermal insulation[J]. Advanced Materials, 2024, **36**(49): 2412605.

[23] Zhang W, Liang G Q, Wang S, et al. Loofah-inspired ultralight and superelastic micro/nanofibrous aerogels for highly efficient thermal insulation[J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(2): 2412424.

[24] Yu N, Wang T, Xu C X, et al. *In-situ* packing self-intumescent aerogel particles in rigid polyurethane foam towards thermal insulation, flame retardance and smoke suppression[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **503**: 158514.

[25] Cai S H, Deng X P, Beiyuan J Z, et al. Review of synthetic polymer-based thermal insulation materials in construction and building[J]. Journal of Building Engineering, 2024, **97**: 110846.

[26] Zhang P, Zhao S, Li K F, et al. Large-scale production of elastic SiC/SiO_2 nanofibrous composite aerogels with a labyrinth structure for high-temperature insulation, fire prevention, and noise absorption[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **505**: 159166.

[27] Xie Z Q, Jiang Y G, Feng J Z, et al. Thermally insulating fiber-reinforced SiO_2-TiO_2 aerogel composites *via* a novel hydrothermal-assisted drying process[J]. Ceramics International, 2025, **51**(11): 14834-14841.

[28] Wen Z H, Tang Z Y, Liu Y W, et al. Ultrastrong and high thermal insulating porous high-entropy ceramics up to 2000℃ [J]. Advanced Materials, 2024, **36**(14): 2311870.

[29] Zhang X, Huang W B, Yu J Y, et al. Nacre-mimetic multi-mechanical synergistic ceramic aerogels with interfacial bridging and stress delocalization[J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(10): 2416857.

[30] Yu P H, Gao Y, Zhang G D, et al. 3D self-supportive structures of micro/nanofiber assemblies constructed *in situ* in air turbulent flow fields for thermal protection at extreme conditions[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **511**: 161536.

[31] Li L F, Yin Y G, Mi C Y, et al. Phase stability, flexibility and thermal insulation of $DyTaO_4$ fibers[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **505**: 159590.

[32] Miao J H, Song X L, Xu J X, et al. Ultralight, elastic, thermally insulating, and high-temperature resistant Al_2O_3-SiO_2-B_2O_3 nanofibrous aerogels prepared *via* the direct foaming method[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, **17**(8): 12402-12414.

[33] Dang S X, Guo J R, Deng Y P, et al. Highly-buckled nanofibrous ceramic aerogels with ultra-large stretchability and tensile-insensitive thermal insulation[J]. Advanced Materials, 2025, **37**(4): 2415159.

[34] Zhang X, Yu J Y, Si Y. Programmable shape-morphing enables ceramic meta-aerogel highly stretchable for thermal protection[J]. Advanced Materials, 2025, **37**(3): 2412962.

[35] Zhang Z, Liu C, Li N, et al. Highly oriented $SiC@SiO_2$ ceramic fiber aerogels with good anisotropy of the thermal conductivity and high-temperature resistance[J]. Advanced Science, 2025, **12**(17): 2416740.

[36] Zhou J T, Wu E J, Hu Y H, et al. Structurally resilient carbon nanofiber aerogels from aramid nanofibers for thermal insulation under extreme conditions[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **505**: 159507.

[37] Wu F S, Hu P Y, Hu F Y, et al. Multifunctional MXene/C aerogels for enhanced microwave absorption and thermal insulation[J]. Nano-Micro Letters, 2023, **15**(1): 194.

[38] Ma Y J, Hu Y H, Wang Y, et al. Seasonal thermal management and fire-resistant aramid nanofiber/MXene-NH_2 aerogel for enhanced safety and year-round energy saving[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, **7**(20): 23485-23493.

[39] Tian Y C, Chen Y X, Wang S, et al. Energy-harvesting carbon aerogel nanofiber metafabric for high-efficiency thermoregulation [J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(4): 2414229.

[40] Gai L X, Zhao H H, Li X A, et al. Shell engineering afforded dielectric polarization prevails and impedance amelioration toward electromagnetic wave absorption enhancement in nested-network carbon architecture[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **501**: 157556.

[41] Cheng Y J, Cheng H L, Gao J, et al. Air-drying for rapid manufacture of flexible aramid nanofiber aerogel fibers with robust mechanical properties and thermal insulation in harsh environments[J]. Small, 2025, **21**(7): 2409408.

[42] Luo W, Wang T, Gou X, et al. *In situ* assembly of nanostructured polyelectrolyte coatings by aqueous phase separation toward outstanding thermal insulation and fire resistance[J]. ACS Materials Letters, 2024, **6**(12): 5418-5428.

[43] Chen J, Hou X B, Chen Z L, et al. Double-crosslinked organic-inorganic hybrid polyimide aerogel composites with ultra-robust toughness for foldable mechanical-thermal-coupled protection[J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(23): 2420717.

[44] Wang X D, Wang Y J, Zhang Z, et al. Strong and ultrahigh temperature-resistant metal oxide nanobelt aerogels[J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(5): 2414592.

[45] Yang C G, Xu Y K, Liu H Y, et al. Multiscale porous heat insulation polypropylene foam with high infrared absorption performance[J]. Langmuir, 2025, **41**(8): 5546-5556.

[46] Hu L K, Luo L, Zhang F H, et al. Self-Sensing shape memory boron phenolic-formaldehyde aerogels with tunable heat insulation for smart thermal protection systems[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **505**: 159558.

[47] Song L M, Wu Y Z, Xue J L, et al. A high-temperature resistant phosphate-phenolic composite foam with low density, high strength, flame retardant and thermal insulating properties[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, **297**: 112294.

[48] Zhang X, Wang Z Q, Ding S, et al. Improved thermal insulation, mechanical properties, energy absorption and flame retardancy of bio-based rigid polyurethane foam modified with calcium hydroxystannate[J]. Construction and Building Materials, 2024, **456**: 139251.

[49] Shi T, Jing J W, Qian Z Q, et al. Sandwich-structured fluorinated polyimide aerogel/paraffin phase-change composites simultaneously enables gradient thermal protection and electromagnetic wave transmission[J]. Advanced Science, 2025, **12**(5): 2411758.

[50] Fu X T, Si L M, Zhang Z X, et al. Gradient all-nanostructured aerogel fibers for enhanced thermal insulation and mechanical properties[J]. Nature Communications, 2025, **16**(1): 2357.

[51] Chen Z L, Hou X B, Chen J, et al. Two-step phase-separated ANF/polyimide aerogel fibers with tunable *in situ* core-sheath structure for wearable heat-insulated fabrics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, **192**: 108801.

[52] Huang Z Y, Tong A X, Xing T H, et al. Regenerated cellulose/lignin composite aerogel with unique toast-like structure and their potential applications in thermal camouflage[J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(6): 2414696.

[53] Liu Y M, Bu X H, Feng M X, et al. Spectrally selective and thermally insulating hybrid nanofiber aerogel coolers for building energy conservation[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, **680**: 345-354.

[54] Zhong S J, Lu B H, Wang D C, et al. Passive isothermal flexible sensor enabled by smart thermal-regulating aerogels[J]. Advanced Materials, 2025, **37**(8): 2415386.

[55] Wicklein B, Kocjan A, Salazar-Alvarez G, et al. Thermally insulating and fire-retardant lightweight anisotropic foams based on nanocellulose and graphene oxide[J]. Nature Nanotechnology, 2015, **10**(3): 277-283.

[56] Gao C Q, Gou D M, Huang G, et al. Spiderweb-structured aerogels with high-efficiency microwave absorption and multifunctionality[J]. Nano Energy, 2025, **138**: 110863.

[57] Le D T, Carbonnier B, Hamadi S, et al. Toward the development of graphene/chitosan biocomposite aerogels with enhanced mechanical and thermal insulation performance[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024, **6**(21): 13132-13146.

[58] Liu Z Y, Liu T, Dong H P, et al. Diatom-inspired nanoscale heterogeneous assembly strategy for constructing thermal insulating wood-based aerogels with exceptional strength, resilience, degradability, and flame retardancy[J]. ACS Nano, 2025, **19**(7): 6826-6839.

[59] Zhang J Y, Zheng J J, Gao M Y, et al. Nacre-mimetic nanocomposite aerogels with exceptional mechanical performance for thermal superinsulation at extreme conditions[J]. Advanced Materials, 2023, **35**(29): 2300813.

[60] Men J, He C B, Wang L K, et al. Synthesis of structure controllable carbon aerogel with low drying shrinkage and scalable size as high-temperature thermal insulator[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **503**: 157989.

[61] Hu Z H, Wang S, Wu J P, et al. Robust multi-scale bionic ANF/PMSQ aerogel featuring impact protection, thermal insulation and anti-icing functions[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, **297**: 112304.

[62] Wang G L, Liu L, Hu X Y, et al. Aerogel-functionalized phase change materials toward lightweight and robust thermal management[J]. Small Methods, 2025, **9**(8): 2500127.

[63] Wang L Y, Li W J, Wang C, et al. "Cocktail-like" double-layered polyimide/alumina composite aerogels *via* side-direction freezing method as designable high-temperature thermal insulations[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **500**: 157052.

[64] Kang Y F, Tang J L, Song M, et al. Electrostatic encapsulation of cobalt ions into crystalline framework derived polymer aerogel: ultra-light, pressure resistant, hydrophobic, photothermal conversion, heat insulation and infrared stealth[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2024, **42**(7): 946-957.

[65] Liu X, Zhu Q Z, Qian Y P, et al. Enhanced photothermal interface evaporation *via* coupling of Ag-GO aerogel with thermal insulation substrate[J]. Separation and Purification Technology, 2025, **360**: 131080.

[66] Ma Y L, Xing D M, Tian M W, et al. Multiwalled hollow polyurethane and graphene oxide/polyurethane fibers in Janus textiles for thermal management and sensors[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, **7**(19): 22884-22894.

[67] Jiang S, Jiang S Q, Yan J T, et al. Large-scale continuous production of cellulose/hollow SiO_2 composite aerogel fibers for outdoor all-day radiation cooling[J]. Nano Energy, 2025, **136**: 110688.

[68] Li Y H, Zhang X, Zhang T, et al. Radiative cooling materials prepared by SiO_2 aerogel microspheres@PVDF-HFP nanofilm for building cooling and thermal insulation[J]. Ceramics International, 2024, **50**(22): 48031-48040.

[69] Zhu T Y, Wang D B, Wang Y S, et al. Gelation-constrained freeze-casting fabrication of ultra-homogeneous nanocomposite aerogels with superelasticity and harsh environment tolerance[J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(12): 2503693.

[70] Yu D Y, Xue T T, Ma Z C, et al. 3D printed polyimide/silica composite aerogels for customizable thermal insulation from −50℃ to 1300℃[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2024, **42**(7): 936-945.

[71] Xue T T, Yuan S J, Yang Y, et al. Freezing-assisted direct ink writing of customized polyimide aerogels with controllable micro-

and macro- structures for thermal insulation[J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(13): 2417734.

[72] Chen Z Y, Wu Y Y, Liu S C, et al. Pottery-inspired flexible fire-shielding ceramifiable silicone foams for exceptional long-term thermal protection[J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(3): 2413362.

[73] Zhou T P, He L B, Zhen Y, et al. Superstrong lightweight aerogel with supercontinuous layer by surface reaction[J]. Advanced Materials, 2025, **37**(10): 2418083.

[74] Wang G, Feng J B, Zhou Z Z, et al. Low-cost hyperelastic fuller-dome-structured nanocellulose aerogels by dual templates for personal thermal management[J]. Advanced Materials, 2024, **37**(22): 2414896.

[75] Yu Y, Xu C J, Hu Z X, et al. Industrial scale sea-island melt-spun continuous ultrafine fibers for highly comfortable insulated aerogel felt clothing[J]. Advanced Materials, 2024, **36**(52): 2414731.

[76] Hu Z Y, Zhang X Y, Sun Q, et al. Biomimetic transparent layered tough aerogels for thermal superinsulation and triboelectric nanogenerator[J]. Small, 2024, **20**(24): 2307602.