高分子保冷材料的研究进展

郑大远[1]，张希猛[2]，冯春秋[3]，边睿男[4]

（1.河南科技大学车辆与交通工程学院，河南 洛阳 471003；2.中船双瑞（洛阳）特种装备股份有限公司，河南 洛阳 471000；3.河南柴油机重工有限责任公司，河南 洛阳 471003；4.大港油田集团有限责任公司工业服务中心，天津 300280）

摘　要：高分子保冷材料作为阻断热量传递、维持低温环境的关键材料，在食品、医疗、建筑、能源储运、航空航天等领域具有重要的应用价值。文章系统阐述高分子保冷材料的核心保冷机理，重点介绍高分子保冷材料的主要类型、性能特点及应用场合，着重分析高分子保冷材料的关键性能评价指标，如导热系数、密度、机械强度、防火性能等。最后，文章总结当前高分子保冷材料面临的技术挑战，对其未来发展方向进行展望。

关键词：高分子保冷材料；保冷机理；导热阻碍；对流抑制

中图分类号：TQ32　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005-3360（2026）08-0184-06

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.032

Research Progress of Polymer Cold Insulation Materials

ZHENG Dayuan[1], ZHANG Ximeng[2], FENG Chunqiu[3], BIAN Ruinan[4]

(1. College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. CSSC Sunrui (Luoyang) Special Equipment Co. , Ltd. , Luoyang 471000, China; 3. Henan Diesel Engine Industry Co. , Ltd. , Luoyang 471003, China; 4. Industrial Service Center, Dagang Oilfield Group Co. , Ltd. , Tianjin 300280, China)

Abstract: As key materials for blocking heat transfer and maintaining low-temperature environments, polymer cold insulation materials hold significant application value in fields such as food, healthcare, construction, energy storage and transportation, and aerospace. The article systematically elucidated core cold insulation mechanisms of polymer cold insulation materials, with a focus on introducing their main types, property characteristics, and application scenarios. The article placed particular emphasis on analyzing the key property evaluation indicators of polymer cold insulation materials, including thermal conductivity, density, mechanical strength, and fire resistance. Finally, the article summarized the current technical challenges faced by polymer cold insulation materials and provided an outlook on their future development directions.

Keywords: Polymer cold insulation material; Cold insulation mechanism; Thermal resistance; Convection suppression

在现代工业和日常生活中，从食品医药、冷链物流到能源建筑、航空航天等领域的低温工艺，维持低温环境的需求无处不在，这就依赖于高效的保冷技术。高分子保冷材料是实现保冷效果的核心材料，其性能直接关系到系统能耗、产品质量和生产安全。在食品和医药行业，冷链运输和储存是保障产品质量与安全的关键环节[1-3]。新鲜食品、疫苗及各类生物制品均需要在严格的低温环境下储存和运输，以确保其品质和活性[4-5]。而高分子保冷材料能够有效减缓低温环境中的温升速率，确保低温环境的稳定，从而降低损耗，保障食品安全和医疗需求。在能源和建筑领域，采用高效的高分子保冷材料对管道、冷库、墙体等进行保冷可以大幅降低系统能耗[6]，实现节能减排的目标。特别是液化天然气(LNG)的储存和运输中，保冷材料的性能至关重要。合适的保冷材料不仅能够减少LNG的蒸发损耗，提高能源利用率，还能降低安全风险，保障能源供应的稳定性。此外，在航空航天、超导技术等深低温工程中[7-9]，构建安全可靠的热流屏障也需要对低温管道和设备提供高效合理的绝热保护，高性能保冷材料不可或缺[10]。近年来，随着各行业对低温环境要求的日益提高以及材料科学和纳米技术的不断进步，高分子保冷材料正朝着更高

收稿日期 Submitted date 2025-09-16；修回日期 Revised date 2025-10-20；录用日期 Accepted date 2025-11-14

基金项目：中国博士后科学基金项目（2023M741040）；河南省科技攻关项目（242102220004）

联系人，zhengdayuan@haust.edu.cn

引用本文：郑大远，张希猛，冯春秋，等. 高分子保冷材料的研究进展[J]. 塑料科技，2026，54(8)：184－189.

Citation：ZHENG D Y, ZHANG X M, FENG C Q, et al. Research progress of polymer cold insulation materials[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 184-189.

性能、更轻量化、更智能化和更环保的方向发展。本文介绍高分子保冷材料的保冷机理，揭示材料内部绝热机制，综述典型高分子保冷材料的性能研究成果，并对其应用前景进行展望。

1 高分子保冷材料保冷机制

保冷的本质是抑制热量的传递，而热量传递主要通过导热、对流和热辐射3种方式实现[11]。高分子保冷材料的设计核心正是围绕这3条路径展开的多机制协同调控。

1.1 导热阻碍

导热是物质内部或接触物体间通过分子、原子或电子的振动和运动而进行的能量传递。就热传导的阻碍作用而言，高分子材料通常为热的不良导体。高分子材料内晶格点阵的振动会传递热能，量子化的晶格振动能称为声子，因此高分子内的导热过程就可以看作是声子传递的过程。然而，高分子存在严重的声子散射问题。声子与声子间的散射，声子与界面、缺陷、杂质等间的散射，是形成热阻的重要原因。同时，高分子的结晶度比无机材料低得多，结晶完善度不好，内部晶区与非晶区混杂，使高分子内部本身存在许多界面、缺陷等，其声子散射比无机材料更为严重，所以高分子的热导率一般较低。此外，为了进一步降低高分子材料的导热系数(λ)，常常会添加一些低导热的填料。这些填料分散在高分子基体中，可增加声子散射的概率，从而进一步降低材料的热导率。例如，在聚氨酯(PU)泡沫中添加玻璃纤维、空心玻璃微珠等填料，能够有效地阻碍热传导，提高保冷性能[12]。玻璃纤维具有较高的强度和较低的λ，在PU泡沫中可以形成骨架结构，不仅能够增强材料的力学性能，还能增加热传递的路径，降低热导率；空心玻璃微珠则利用其内部的空心结构，进一步降低材料的λ，起到良好的隔热保冷作用。

1.2 对流阻碍

对流是流体中由于温度差而引起的密度(ρ)差值驱动宏观运动所带来的热量传递。高分子保冷材料通常具有闭孔结构，以PU泡沫和橡塑海绵为例，它们内部充满了大量微小且相互独立的闭孔气泡。当外界热量试图通过对流进入材料内部时，由于闭孔结构的阻挡，气体无法自由流动而形成有效的对流通道，从而有效抑制热对流。高分子保冷材料还可通过发泡等特殊工艺控制气泡大小和分布，进而增加气泡壁对热对流的阻碍作用，提高保冷效果[13]。

1.3 热辐射阻碍

热辐射是由于物体具有温度，以电磁波形式发射能量的过程。即使在真空中，辐射传热依然存在。为了抑制辐射传热，高分子保冷材料会添加具有反射性能的红外遮光剂，如二氧化钛、炭黑、铝粉、云母粉等，将热量反射回去，降低材料对热辐射的吸收率。此外，某些高分子材料本身的分子结构对特定波长的热辐射具有较强的吸收和散射能力，从而在一定程度上抑制了热辐射的传播[14]。

2 高分子保冷材料分类与性能特点

目前工程中使用的高分子保冷材料可以根据材质、形态、温度范围、ρ、用途等进行分类。按照材质可以分为传统泡沫类、气凝胶复合类、生物基高分子类等。按照形态分为多孔型、纤维型、粉末型、薄片型、反射型。按照保冷温度分为常冷(0~25 ℃)、普冷(-20~0 ℃)、中冷(-60~-20 ℃)、深冷(-196~-60 ℃)、超冷(≤-196 ℃)等范围。按照ρ分为重质(95~180 kg/m^3)、轻质(60~95 kg/m^3)、超轻(<60 kg/m^3)。

2.1 传统泡沫类高分子保冷材料

传统泡沫类材料主要以石油化工产品为原料，通过高分子基体发泡形成多孔结构(以闭孔为主)，利用孔隙内部封闭的静止空气的低λ [0.026 W/(m·K)]实现保冷功能，也称多孔材料[15]。代表性泡沫类高分子保冷材料有PU泡沫、聚苯乙烯(PS)泡沫、聚乙烯(PE)泡沫、聚异氰脲酸酯(PIR)泡沫等。此类材料具有成本低廉、加工性能优良、防水性良好等优势，是目前应用最为广泛的保冷材料。然而，此类材料也存在耐温性差、易老化、可燃等局限性。

近年来，以橡塑泡沫为代表的柔性保冷材料已在国内外低温工程中逐渐取代硬质保冷材料，这种材料节能环保、施工便利、后期维护费用极低[16-17]。

2.2 气凝胶复合类高分子保冷材料

气凝胶复合类高分子保冷材料是近年来出现的新型高性能保冷材料，以二氧化硅气凝胶(SA)、炭气凝胶(CA)等超低导热气凝胶为核心填料，与PU、聚酰亚胺(PI)、芳纶等高分子基体复合形成“气凝胶-高分子”协同结构，兼具气凝胶的低热导性与高分子的力学稳定性。常温下λ可低至0.012~0.020 W/(m·K)[18-21]。气凝胶复合类高分子保冷材料主要分为气凝胶/泡沫复合、气凝胶/纤维复合两大类型。气凝胶/泡沫复合材质以传统高分子泡沫为基体，通过物理填充或原位聚合将气凝胶颗粒嵌入泡沫孔隙中，解决气凝胶自身脆性大、易粉化的缺陷。气凝胶/纤维复合材质以高分子纤维为骨架，如芳纶纤维(AF)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)纤维、PI纤维，通过溶胶-凝胶法将气凝胶前驱体负载于纤维表面或内部，形成“纤维支撑-气凝胶保冷”三维结构，其核心优势是柔性与可加工性，可制成织物、薄膜等形态。然而，气凝胶复合类高分子保冷材料仍面临成本较高、制备工艺复杂等问题，制约其规模化工程应用[22-23]。

2.3 生物基高分子保冷材料

生物基高分子保冷材料以淀粉、纤维素、甲壳素、植物油脂等可再生生物质资源为原料，通过化学改性或共混改性制备而成。其核心优势在于可降解性与环保性，能够有效解决传统石油基高分子材料带来的“白色污染”问题。目前，该类材料主要包括淀粉基、纤维素基、生物基PU三大类型[24]。

淀粉基保冷材料以玉米淀粉、马铃薯淀粉等为基体，通过添加增塑剂(如甘油、乙二醇)改善脆性，再经发泡处理形成多孔结构，部分可与聚乳酸(PLA)、聚乙烯醇(PVA)共混提升性能[25]。纤维素基保冷材料以木纤维、竹纤维、棉

花纤维等植物纤维素或细菌纤维素为原料，通过溶解再生、发泡成型工艺制备得到，可保留纤维素的天然多孔结构，从而兼具保冷性与生物相容性[26]。生物基PU保冷材料以植物油脂多元醇、淀粉多元醇、纤维素多元醇等生物基多元醇替代传统石油基多元醇，与异氰酸酯反应制备，保留PU的优异保冷性能，同时实现部分生物降解[27-28]。然而，目前生物基高分子保冷材料仍面临生产成本高、力学性能差等短板。

2.4 其他新型保冷材料

2.4.1 真空高分子保冷材料

真空高分子保冷材料主要由多孔芯材(如PU泡沫)、吸气剂和阻隔膜复合料[29-30]构成。厚度极薄，经过减压抽真空(真空度<1 Pa)，从而消除气体分子的对流传热和导热。其λ可低至0.002~0.004 W/(m·K)，是传统材料的5~10倍。但目前面临边角热桥效应、怕刺穿、成本高等困境。当前研究重点集中在降低真空度与提升密封性两个方面[31-33]。

2.4.2 相变复合高分子保冷材料

相变材料在相变过程(如固-液相变)中能够吸收或释放大量潜热，而自身温度基本保持不变[34]。将其与多孔基质复合，可制成相变保冷材料，用于冷链运输箱等需要保持恒温的场合。相变材料通过潜热储能缓冲温度波动，从而延长保冷时间。然而，其自身隔热性能有限，通常需要与传统保冷材料复合使用。例如，采用冰与有机相变材料(PCM)的组合作为冷库剂，兼具潜热值高、成本低廉、控温精确、使用安全等优势[35]。

3 高分子保冷材料的性能要求

国内保冷材料选用时主要参照GB 50264—2013[36]、SH/T 3010—2013[37]、GB/T 8175—2008[38]和GB/T 4272—2024[39]等标准，4个标准均对保冷材料的λ、ρ、水蒸气透过系数(WVP)和吸水率(WA)、抗压强度(CS)、极限氧指数(LOI)、使用温度(t)及线膨胀系数(CLTE)等进行详细规定。表1为常见保冷材料类型、性能及用途[36-46]。

表1 常见高分子保冷材料分类、性能及用途

Tab.1 Classification, property and application of common polymer cold insulation materials

名称	主要成分	ρ/(kg·m^{-3})	t/℃	λ (25 ℃)/[W·(m·K)$^{-1}$]	WA/%	CS/MPa	LOI	WVP/[(g·cm)·(Pa·s·cm^2)$^{-1}$]	用途
硬质聚氨酯泡沫塑料(PUR)	氨酯/异氰酸酯聚合物	45~55	-80~100	≤0.023	≤4.0	≥0.20	≥30%	≤6.5×10^{-9}	液态氨(LNH_3)、液态二氧化碳(LCO_2)、空分装置
PIR	异氰酸酯类共聚物	40~50	-196~150	≤0.029	≤2.0	≥0.22	≥30%	≤5.8×10^{-9}	LNG、LCO、液态乙烯、液氩、空分装置
PS泡沫塑料	PS树脂或其共聚物	30~60	-65~70	≤0.030	≤1.5	≥0.15	B2级	≤3.5×10^{-9}	LNH_3，LCO_2、空分装置
酚醛泡沫及其制品	苯酚和甲醛缩聚物	60~120	-100~130	≤0.040	≤7.5	≥0.10	≥38%	≤8.5×10^{-9}	
丁腈橡胶发泡制品	丁腈橡胶	40~60	-100~105	≤0.034		≥0.16 (-40 ℃)			各种低温工程
二烯烃弹性体发泡制品	二烯烃聚合物	60~70	-196~125	≤0.038 (0 ℃)		≥0.37 (-100 ℃)			各种低温工程
柔性泡沫橡塑制品	天然或合成橡胶和有机高分子材料共混体	40~60	-40~105	≤0.036	≤10.0		I类≥32% II类≥26%	≤1.3×10^{-10}	制冷工程
气凝胶复合类	二氧化硅、PU等复合	25~50	-200~200	≤0.025	≤1.0	≥0.20	A2级		工业、建筑
生物基高分子类	金属铝、锡、银	20~40	-30~60	~0.040		~0.15			冷库、包装工程
真空高分子类	纤维、粉末、泡沫等芯材，阻气隔膜	160~200	-40~70	≤0.012		≥0.08			建筑、工业

3.1 高分子保冷材料对λ的要求

λ是反映材料绝热性能优劣的主要热物性参数。材料的λ是指在稳态传热条件下1 m厚的材料，两侧表面温差为1 K(℃)，在单位时间内通过单位面积传递的热量。它与材料的内部结构、温度、含水率等物理因素密切相关。保冷材料的λ一般随温度、含水率、ρ的增大而增大。非晶体结构、ρ较低的材料，λ较小；材料的含水率、温度较低时，λ较小。GB 50264—2013和GB/T 8175—2008均规定，用于保冷的泡沫塑料及其制品在平均温度为25 ℃时，λ不应大于0.044 W/(m·K)。泡沫橡塑制品在平均温度为0 ℃时的λ不应大于0.036 W/(m·K)。而GB/T 4272—2024规定用于保冷的材料在平均温度为25 ℃时的λ不应大于0.05 W/(m·K)，SH/T 3010—2013和GB/T 4272—2024保持一致。

通过对材料结构、组成及制备工艺的优化，可以有效降低传统泡沫材料的λ。SHIN等[47]将石墨烯纳米片分散体通过原位聚合，制备硬质PU泡沫纳米复合材料，λ低至0.021 W/(m·K)。这是由于石墨烯纳米片在发泡过程中提供稳定的成核位点，可有效抑制气泡聚并，减小平均泡孔尺寸，提高闭孔率，从而制得热导率较低的石墨烯纳米片改性PU泡沫。CARRIÇO等[48]使用物理发泡剂(环戊烷和正戊烷)，以蓖麻油和粗甘油为原料合成硬质PU泡沫塑料，孔径更小，λ在0.012 8~0.020 7 W/(m·K)之间。目前，掺入纳米黏土、碳纳米纤维和碳纳米管等各种纳米填料作为成核剂[49-50]，已经成为改善传统泡沫材料的隔热性能的重要手段。

3.2 高分子保冷材料对ρ的要求

ρ是指保冷材料在规定温度为25 ℃、相对湿度为50%的环境中单位体积的质量，它与材料固相和气相孔隙结构有关。保冷材料的ρ过大或过小均会导致λ的增大，只有在最佳ρ下才能具有较小的λ和较好的保冷效果。在工程应用中，为降低成本和减少保冷材料产生的附加质量，应优先选用ρ较低的保冷材料。GB 50264—2013、GB/T 8175—2008和GB/T 4272—2024均规定，用于保冷的泡沫塑料制品的ρ不应大于60.00 kg/m^3，泡沫橡塑制品的ρ不应大于95.00 kg/m^3。SH/T 3010—2013规定，保冷材料的ρ不应大于200.00 kg/m^3。

目前，气凝胶复合类高分子保冷材料的ρ可以低至1.00 kg/m^{3}左右。FAN等[51]通过冷冻干燥法合成SiO_2纳米颗粒交联的轻质超绝热PI复合气凝胶，其λ低至0.0218 W/(m·K)，ρ仅为0.07 kg/m^3。AI等[52]以海藻酸钠交联为基础，通过原位自组装二维共价有机骨架和石墨烯，成功合成复合气凝胶材料，ρ仅为0.05 kg/m^3。

3.3 高分子保冷材料对WVP和WA的要求

材料吸附水分后，材料内的空气间隙减少，而常温下水的λ是空气的24倍，水在凝结时会破坏材料内部孔隙结构，使材料的λ大大提高。保冷材料的水蒸气阻隔性使用WVP和水蒸气透过量来评价。若材料的水蒸气阻隔性不佳，进入保冷结构的水分将不断向管道壁积聚，使保冷材料受潮、积水或冻结，进而降低保冷效果并发生冻结膨胀，导致保冷结构破裂。GB 50264—2013和SH/T 3010—2013规定，PIR泡沫制品不应大于4.0%，WVP不应大于5.8×10^{-9} g/(Pa·m·s)；PU泡沫制品不应大于5.0%，WVP不应大于6.5×10^{-9}g/(Pa·m·s)；柔性泡沫橡塑不应大于0.2%，WVP不应大于1.3×10^{-10} g/(Pa·m·s)。WA对保冷材料的ρ、λ、机械强度均有显著影响。GB/T 8175—2008和GB/T 4272—2024规定，泡沫塑料及其制品WA不应大于4%，泡沫橡塑制品不应大于10%。

生物基保冷材料的WVP与传统的羊毛基绝热材料及天然纤维绝热材料相当[53]。张玉会等[54]采用溶胶-凝胶法和常压干燥制备了纤维毡/SiO_2气凝胶复合绝热材料，吸湿率在1%左右且受环境湿度变化影响很小。

3.4 高分子保冷材料对CS的要求

绝热材料的CS与加工工艺及材料气孔率密切相关。当材料气孔率大、裂纹多时，CS也低，在运输、施工过程中易发生损坏。因此需要根据实际条件要求，选择具有一定机械强度的材料。GB 50264—2013规定，PIR泡沫制品的CS不应小于0.22 MPa，PU泡沫制品的CS不应小于0.20 MPa。SH/T 3010—2013规定，PU泡沫制品的CS不应小于0.20 MPa，PIR泡沫制品的CS不应小于0.22 MPa。GB/T 8175—2008和GB/T 4272—2024规定，泡沫塑料硬质成型制品的CS不应小于0.15 MPa。

目前，通过微观结构调控与优化可以显著提升高分子保冷材料的抗压强度。SADDIQUE等[55]采用化学气相沉积(CVD)技术利用纤维素纳米晶体制备硬质PU泡沫。结果表明：改性后材料的λ降至0.043 W/(m·K)，低于标准硬质PU泡沫的0.049 W/(m·K)；同时，CS提升至2.00 MPa，优于标准硬质PU泡沫的1.25 MPa。LI等[56]通过添加疏水SiO_2纳米颗粒，作为PI气凝胶刚性分子的骨架增强剂和传热抑制剂，制备出具有较高压缩和拉伸模量的复合气凝胶(压缩模量为37.75 MPa，拉伸模量为237.10 MPa)。

3.5 高分子保冷材料对LOI的要求

材料的防火性能是材料耐火极限和燃烧性能的综合表征。耐火极限用时间表示，是指对任一材料按时间-温度标准曲线进行耐火试验，从受到火的作用时起，到失去支持能力或完整性被破坏或失去隔火作用时为止的这段时间。燃烧性能是指材料燃烧或遇火时所发生的一切物理和化学变化。GB 8624—2012规定了A1、A2、B、C、D、E、F七级分类。有机类保温材料中仅酚醛泡沫复合保温板能达到复合A1级防火性能。

保冷材料与火相接触，不应引起火势蔓延。GB 50264—2013对此做出规定：被绝热设备或管道表面温度≤100 ℃时，应选择不低于GB 8624—2012中规定的C级材料；当选择GB 8624—2012中规定的B级和C级材料时，LOI应不小于30%。SH/T 3010—2013和GB/T 8175—2008规定，

阻燃型保冷材料的LOI不应小于30%。

生物基气凝胶具有优异的内在阻燃性，有望成为新型可持续阻燃保冷材料。CUI等[57]采用冻融和冻干工艺直接制备可生物降解的磷酸化壳聚糖气凝胶绝热材料，该材料具有优异的阻燃性能，LOI提高到80%以上。JADHAV等[58]使用硼酸处理，提高了由回收大麻纤维和二氧化硅干凝胶衍生的阻燃纤维素干凝胶绝缘纳米复合材料的阻燃性，该生物基绝热材料在燃烧10 min内仅失重30%。

3.6 高分子保冷材料对温度范围的要求

保冷材料在使用过程中对温度范围有特定要求，才能保证在此范围内的性能稳定。正常工况下，保冷材料的温度应在其对应标准推荐温度范围内。为了避免极端工况下出现过度收缩、脆化及疏松的情况，保冷材料的选取应考虑吹扫及除霜时的偶尔加热和极端最高、最低温度。GB 50264—2013和GB/T 8175—2008规定，保冷材料应提供最低和最高安全温度。GB/T 4272—2024规定，绝热材料应注明安全使用温度范围。SH/T 3010—2013规定，保冷材料应具有安全使用温度数据。

3.7 高分子保冷材料对CLTE的要求

设备及管道材质为金属材料，保冷材料一般为非金属材料。在温度发生变化时，两种材料尺寸均会出现伸缩变化，因此应尽可能选用线性收缩系数与管材线性收缩系数相近的绝热材料。GB/T 8175—2008规定，保冷材料应提供CLTE或线收缩率，而GB 50264—2013仅限于使用硬质绝热材料时提供。SH/T 3010—2013规定，必要时应提供线膨胀率或收缩率。

3.8 其他要求

GB 50264—2013规定，保冷材料应提供腐蚀性及耐蚀性、抗折强度、化学稳定性、热稳定性等指标，而GB/T 8175—2008和SH/T 3010—2013强调，必要时设计人员应该提供这些数据。GB/T 4272—2024规定，保冷材料应具有良好的化学稳定性，对设备和管道无腐蚀作用，当遭受火灾时，不会有大量逸散有害气体。

4 结论

伴随着材料科学的持续发展，高分子保冷材料的研究也取得了长足进步，但仍面临诸多挑战，主要包括：(1)保冷材料的性能与成本难以实现有效平衡。以气凝胶复合材料为代表的高性能保冷材料虽然有优异的保冷性能，但成本高昂，严重制约了规模化应用。(2)保冷材料的耐久性与可靠性仍然是保冷材料发展的重要指标。如真空高分子保冷材料的真空寿命以及有机材料的阻燃性能、长期尺寸稳定性和老化问题仍有待解决。

展望未来，高分子保冷材料将朝着多功能化、智能化、绿色化和成本效益最优化的方向综合发展，具体体现在以下几个方面：(1)纳米复合材料技术：利用纳米技术精细调控材料微观结构，制备超低λ的纳米多孔高分子复合材料。(2)智能高分子保冷材料：从“超级隔热”到“智能隔热”，开发智能响应型材料，如相变气凝胶(PCMA)、热致变色材料，其隔热性能可随环境温度自动调节，实现自适应保温。(3)结构功能一体化：发展兼具承重、保冷、防火、隔声、电磁屏蔽等多功能于一体的高分子复合材料。(4)仿生结构设计：借鉴北极熊毛发、企鹅羽毛等生物的多尺度绝热结构，设计制备具有梯度孔隙、各向异性的仿生高分子保冷材料。(5)绿色制造与循环利用：开发低成本生物基原料和绿色发泡剂，推动生物基PU、天然纤维保冷材料等环保材料的发展，建立完善的回收再利用体系。

参考文献

[1] 马炜袁, 仲翌京, 李旺, 等. 食品用软木基包装材料的阻湿和保冷性能研究[J]. 包装工程, 2024, 45(23): 47-53.
[2] 徐笑锋, 章学来, MUNYALO J M, 等. 十水硫酸钠相变蓄冷保温箱保冷特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 308-314.
[3] 李婷, 潘欣, 应铁进. 食品相变蓄冷剂的配方优化及应用[J]. 中国食品学报, 2011, 11(4): 115-122.
[4] 刘秀娟, 贺可太, 冯爱兰. 蓄冷箱在疫苗运输中的应用研究[J]. 物流技术, 2008, 27(6): 116-118.
[5] 汤云峰, 李长玉, 肖颖, 等. 某疫苗储运箱结构设计及瞬态热流分析[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(1): 93-98.
[6] 周雪松, 周翔, 袁永莉, 等. 一体式柔性保冷管保冷层厚度研究[J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(11): 74-77.
[7] 袁中立, 闫伦江. LNG低温储罐的设计及建造技术[J]. 石油工程建设, 2007, 33(5): 19-22
[8] 郑庆路, 郭林. LNG深冷管道复合保冷结构的创新与实践[J]. 化工装备技术, 2024, 45(4): 46-49.
[9] 毕延芳, 王金荣, 邱宁, 等. 合肥超导托卡马克装置首次致冷[J]. 低温工程, 1995(1): 1-6.
[10] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
[11] 王宏军. 高分子材料在保温、保冷领域的研究[J]. 橡塑资源利用, 2024(1): 23-26.
[12] FU Y T, QIU C, NI L, et al. Cell structure control and performance of rigid polyurethane foam with lightweight, good mechanical, thermal insulation and sound insulation[J]. Construction and Building Materials, 2024, 447: 138068.
[13] FAN Z Z, WANG B, ZHAO Y S, et al. Design of thermal conductive porous elastomer via supercritical CO_2 foaming-assisted BN alignment [J]. Composites Science and Technology, 2025, 270: 111275.
[14] CAI S H, DENG X P, BEIYUAN J, et al. Review of synthetic polymer-based thermal insulation materials in construction and building[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 97: 110846.
[15] 高国新, 郑元锁, 孙捷, 等. 有机纤维/EPDM绝热材料性能研究[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(6): 544-547.
[16] RAJENDIRAN M, VELLAICHAMY P, SUBRAMANIAN V G, et al. Experimental and comparative analysis between nitrile rubber foam insulated and vacuum insulated fiber reinforced plastic tank used in a low temperature sensible heat storage system for building space cooling applications[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2024, 43 (6): e14482.
[17] ZHAO Y X, DIECKMANN E, CHEESEMAN C. Low-temperature thermal insulation materials with high impact resistance made from feather-fibres[J]. Materials Letters: X, 2020, 6: 100039.
[18] FESMIRE J E. Aerogel insulation systems for space launch applications [J]. Cryogenics, 2006, 46(2/3): 111-117.

[19] ZHUO T T, XIN B J, CHEN Z M, et al. Enhanced thermal insulation properties of PI nanofiber membranes achieved by doping with SiO_2 nanoparticles[J]. European Polymer Journal, 2021, 153: 110489.
[20] ZHAO J C, WANG G L, WANG C D, et al. Ultra-lightweight, super thermal-insulation and strong PP/CNT microcellular foams[J]. Composites Science and Technology, 2020, 191: 108084.
[21] BAETENS R, JELLE B P, GUSTAVSEN A. Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(4): 761-769.
[22] TENPIERIK M J, HASSELAAR E. Reflective multi-foil insulations for buildings: A review[J]. Energy and Buildings, 2013, 56: 233-243.
[23] BERARDI U, SPRENGARD C. An overview of and introduction to current researches on super insulating materials for high-performance buildings[J]. Energy and Buildings, 2020, 214: 109890.
[24] DELAVARDE A, SAVIN G, DERKENNE P, et al. Sustainable polyurethanes: Toward new cutting-edge opportunities[J]. Progress in Polymer Science, 2024, 151: 101805.
[25] LIU J W, HE J, XUE R, et al. Biodegradation and up-cycling of polyurethanes: Progress, challenges, and prospects[J]. Biotechnology Advances, 2021, 48: 107730.
[26] ZHAN W, TANG L L, KONG Q H, et al. Review: Sustainable engineering of bio-aerogels in thermal insulation applications[J]. Journal of Materials Science, 2025, 60(37): 16684-16715.
[27] RECUPIDO F, LAMA G C, AMMENDOLA M, et al. Rigid composite bio-based polyurethane foams: From synthesis to LCA analysis[J]. Polymer, 2023, 267: 125674.
[28] GE H P, LIU G L, LIU F J. Review on the application of biomass-based aerogels in the field of thermal insulation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 299: 140230.
[29] FRICKE J, HEINEMANN U, EBERT H P. Vacuum insulation panels: From research to market[J]. Vacuum, 2008, 82(7): 680-690.
[30] KAN A K, ZHENG N, ZHU W B, et al. Innovation and development of vacuum insulation panels in China: A state-of-the-art review[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 48: 103937.
[31] BOŽIČEK D, PETERKOVÁ J, ZACH J, et al. Vacuum insulation panels: An overview of research literature with an emphasis on environmental and economic studies for building applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 113849.
[32] 赵伟刚, 张倩倩, 蓝钰玲, 等. 真空绝热板芯材的研究进展与展望[J]. 化工进展, 2024, 43(7): 3910-3922.
[33] 王伟龙, 陈兴涛, 左长安, 等. 超低能耗建筑的真空绝热板复合高性能有机保温板系统构造设计研究[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(10): 132-134.
[34] 金云飞, 武卫东, 伏舜宇, 等. 低温冷链物流用相变材料的优化及应用[J]. 制冷学报, 2021, 42(6): 106-113.
[35] TAN S H, ZHANG X L. Numerical study on temperature control of double-layer phase-change material cold storage box[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 85: 111031.
[36] 中国工程建设标准化协会化工分会. 工业设备及管道绝热工程设计规范: GB 50264—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
[37] 中国石油化工集团公司. 石油化工设备和管道绝热工程设计规范: SH/T 3010—2013[S]. 北京: 中国石化出版社, 2013.
[38] 全国能源基础与管理标准化技术委员会. 设备及管道绝热设计导则: GB/T 8175—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
[39] 全国能源基础与管理标准化技术委员会. 设备及管道绝热技术通则: GB/T 4272—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
[40] 全国塑料制品标准化技术委员会. 建筑绝热用硬质聚氨酯泡沫塑料: GB/T 21558—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
[41] 全国绝热材料标准化技术委员会. 绝热用聚异氰脲酸酯制品: GB/T 25997—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
[42] European Committee for Standardization. Thermal insulation products for building equipment and industrial installations: Factory made flexible elastomeric foam (FEF) products: Specification: BS EN14304—2015[S/OL]. https://www.intertek.com/building/standards/en-14304/.
[43] 全国绝热材料标准化技术委员会. 柔性泡沫橡塑绝热制品: GB/T 17794—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
[44] 全国绝热材料标准化技术委员会. 纳米孔气凝胶复合绝热制品: GB/T 34336—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
[45] 全国绝热材料标准化技术委员会. 真空绝热板: GB/T 37608—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
[46] 全国消防标准化技术委员会防火材料分技术委员会. 建筑材料及制品燃烧性能分级: GB 8624—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
[47] SHIN S R, LEE D S. Nanocomposites of rigid polyurethane foam and graphene nanoplates obtained by exfoliation of natural graphite in polymeric 4, 4′-diphenylmethane diisocyanate[J]. Nanomaterials, 2022, 12(4): 685.
[48] CARRIÇO C S, FRAGA T, CARVALHO V E, et al. Polyurethane foams for thermal insulation uses produced from castor oil and crude glycerol biopolyols[J]. Molecules, 2017, 22(7): 1091.
[49] ONDER E, SARIER N. Thermomechanical behavior of polyurethane nanocomposite foams containing organoclay particles modified with bio-based fatty acid[J]. Thermochimica Acta, 2024, 733: 179693.
[50] KAUSAR A, AHMAD I, ZHAO T K, et al. Nanocomposite foams of polyurethane with carbon nanoparticles: Design and competence towards shape memory, electromagnetic interference (EMI) shielding, and biomedical fields[J]. Crystals, 2023, 13(8): 1189.
[51] FAN W, ZHANG X, ZHANG Y, et al. Lightweight, strong, and super-thermal insulating polyimide composite aerogels under high temperature[J]. Composites Science and Technology, 2019, 173: 47-52.
[52] AI S Y, XU Y N, ZHOU H, et al. Superelastic and ultralight covalent organic framework composite aerogels modified with different functional groups for ultrafast adsorbing organic pollutants in water[J]. Chinese Chemical Letters, 2025, 36(10): 110761.
[53] FEDORIK F, ZACH J, LEHTO M, et al. Hygrothermal properties of advanced bio-based insulation materials[J]. Energy and Buildings, 2021, 253: 111528.
[54] 张玉会, 刘燕妮, 杨建明, 等. SiO_2气凝胶复合保温材料的热湿性能研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(3): 67-71.
[55] SADDIQUE A, HAN K R, KIM T, et al. Enhancing thermal and mechanical properties of rigid polyurethane foam with eco-friendly silane-modified cellulose nanocrystals[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 704: 135443.
[56] LI D D, YE Q B, ZHAO D, et al. Lightweight and strong toughness of polyimide/SiO_2 composite aerogels with super-high working temperature for high-performance thermal insulation and flame-resistant application[J]. Journal of Materials Science, 2024, 59(32): 15283-15297.
[57] CUI H L, WU N J, MA X B, et al. Superior intrinsic flame-retardant phosphorylated chitosan aerogel as fully sustainable thermal insulation bio-based material[J]. Polymer Degradation and Stability, 2023, 207: 110213.
[58] JADHAV P S, SARKAR A, ZHU L, et al. Flame retardant biogenic building insulation materials from hemp fiber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141(12): e55137.