



辐射冷却材料的结构调控及其在建筑领域应用的研究进展

黎子琦 祝智军 吴晓鸿 陈大柱

Research progress on structural control of radiative cooling materials and its application in buildings

LI Ziqi, ZHU Zhijun, WU Xiaohong, CHEN Dazhu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240507.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

相变微胶囊光热转换机制及性能增强研究进展

Research progress in photothermal conversion mechanism and performance enhancement of the microencapsulated phase change materials

复合材料学报. 2024, 41(2): 592–608 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230802.004>

基于红外辐射调控的个人热管理材料研究进展

Research progress of personal thermal management materials based on infrared radiation regulation

复合材料学报. 2023, 40(5): 2480–2494 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220809.003>

建筑用生物质基纤维素保温气凝胶研究进展

Research progress of biomass-based cellulose insulation aerogel for building

复合材料学报. 2024, 41(1): 108–120 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230802.003>

MXene/聚合物复合材料的合成及其应用研究进展

Research progress in synthesis and application of MXene/polymer composites

复合材料学报. 2022, 39(4): 1457–1468 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210830.002>

冷却空气流向对CFRP制孔刀具磨损及孔质量的影响

Influence of cooling air direction on tool wear and hole quality in CFRP drilling

复合材料学报. 2019, 36(2): 410–417 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180327.002>

芳纶纤维增强树脂复合材料液氮冷却钻孔试验

Experiment of liquid nitrogen cooling drilling test of aramid fiber-reinforced polymer composites

复合材料学报. 2020, 37(1): 89–95 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190318.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240507.004

辐射冷却材料的结构调控及其在建筑领域应用的研究进展



分享本文

黎子琦^{1,2}, 祝智军², 吴晓鸿², 陈大柱^{*2}

(1. 深圳大学土木与交通工程学院, 深圳 518060; 2. 深圳大学材料学院, 深圳 518055)

摘要: 伴随着化石能源的大量消耗, 人类生存环境受到严重威胁。其中, 建筑能耗在能源总消耗中所占比例持续攀升, 有效管理建筑物热量传递的被动式冷却技术成为备受关注的研究热点。辐射制冷技术可以反射太阳光并通过“大气窗口”将热量辐射到外太空使物体表面自发冷却, 因其不消耗任何能源就可以实现辐射降温而受到了国内外研究者的广泛关注。近年来, 辐射冷却技术在建筑领域的应用快速发展, 面临的主要问题是制备工艺复杂、生产成本较高和易受外界环境影响等。本文从辐射冷却原理出发, 对最近几年辐射冷却材料在建筑领域的相关研究进行了归纳和总结, 重点介绍了辐射冷却材料的制备技术及影响辐射冷却性能的主要因素, 并进一步按照主动式建筑节能和被动式建筑节能分类, 详细阐述了辐射冷却材料在建筑领域的应用情况, 最后对其存在的问题及未来的研方向进行了总结和展望, 指出未来的研究应着眼于探索工艺简单、可大批量制备的辐射冷却材料, 开发低成本且多功能集成的应用产品, 并建立具体的标准和法规。

关键词: 辐射冷却; 建筑节能; 被动冷却; 多孔聚合物; 太阳能

中图分类号: TB332; P422.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2024)11-5783-17

Research progress on structural control of radiative cooling materials and its application in buildings

LI Ziqi^{1,2}, ZHU Zhijun², WU Xiaohong², CHEN Dazhu^{*2}

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Along with the large consumption of fossil energy, the human living environment is seriously threatened. Among them, the proportion of building energy consumption in the total energy consumption continues to rise, and the passive cooling technology that effectively manages the heat transfer of buildings has become a focus of attention. Radiative cooling technology can reflect sunlight and radiate heat to outer space through the "atmospheric window" to spontaneously cool the surface of objects. Because it can realize radiative cooling without consuming any energy, it has been widely concerned by researchers at home and abroad. In recent years, the application of radiative cooling technology in the field of construction has developed rapidly. The main problems are complex preparation process, high production cost and easy to be affected by external environment. Based on the principle of radiative cooling, this paper summarizes the relevant researches of radiative cooling materials in buildings in recent years, focuses on the preparation process of radiative cooling materials and the main factors affecting the performance of radiative cooling materials, and further elaborates the application of radiative cooling materials in buildings according to the classification of energy saving of active buildings and energy saving of passive buildings. Finally, the existing problems and the future research direction are summarized and prospected. It is pointed out

收稿日期: 2023-01-31; 修回日期: 2024-04-16; 录用日期: 2024-04-24; 网络首发时间: 2024-05-08 13:40:10

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240507.004>

基金项目: 广东省自然科学基金 (2023A1515012274); 深圳市基础研究重点项目 (JCYJ20220818100003006)

Natural Science Foundation of Guangdong Province (2023A1515012274); Key Project of Shenzhen Basic Research (JCYJ20220818100003006)

通信作者: 陈大柱, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高分子复合材料 E-mail: dzchen@szu.edu.cn

引用格式: 黎子琦, 祝智军, 吴晓鸿, 等. 辐射冷却材料的结构调控及其在建筑领域应用的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(11): 5783-5799.

LI Ziqi, ZHU Zhijun, WU Xiaohong, et al. Research progress on structural control of radiative cooling materials and its application in buildings[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(11): 5783-5799(in Chinese).

that future research should focus on exploring the simple process of radiation cooling materials that can be prepared in large quantities, developing low-cost and multi-functional integrated application products, and establishing specific standards and regulations.

Keywords: radiative cooling; building energy saving; passive cooling; porous polymer; solar energy

建筑物作为多种功能的遮蔽物，为居住者提供身体舒适和生活便利。为了保持舒适度，空调是必不可少的设备，特别是热带气候地区，建筑物通过围护结构(窗户、屋顶和墙壁等)吸收太阳(热)辐射，材料、厚度、体积等特性都会影响空间制冷功率。为了满足室内环境的舒适度，不可避免加大了空调系统的能量消耗。气候潮湿、复杂拥挤的建筑物在空间冷却上消耗了能源，导致大量的碳排放^[1]。空间制冷不断增加的碳排放加剧了全球变暖的现象，传统的制冷方式(如蒸汽压缩式制冷、吸收式制冷等)都会消耗大量的能源，并且会产生温室气体、臭氧空洞等环境问题。尤其是在炎热的夏日，加剧了人们对人工制冷的依赖，为了实现可持续低碳发展，有效管理建筑物热量传递的辐射冷却技术成为了现在研究的热点。

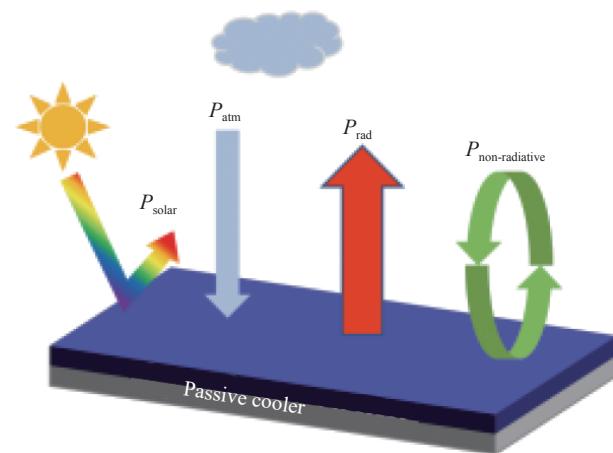
1 辐射冷却原理概述

根据热力学第二定律，热量总是会自发地从高温物体表面传递到低温物体表面，而且这个过程是不可逆的。外太空环境温度非常低，那里的温度只有3 K，远低于地球上任何物体的温度。辐射冷却就是借助地球表面和外太空的温差将自身的热量以热辐射的形式传递到外太空。太阳的表面温度约为5 800 K，其温度接近黑体的温度^[2]。太阳辐射通过大气层后，由于大气中的许多气体(如氮气(N₂)、氧气(O₂)、水蒸气(H₂O)等)会对太阳辐射能量产生影响，其辐射强度虽然会减弱，但是大多数热辐射材料仍然在太阳光谱波段(0.3~2.5 μm)将吸收的太阳光转换为热能，使物体表面温度升高。在地球表面接收太阳光辐射后，物体反射的能量主要集中在2.5~50 μm波段，并且大部分会被大气吸收。但是在“大气窗口”(8~13 μm)的范围内，地球上任何物体都可以不经过大气的吸收直接通过热辐射向寒冷的外太空辐射能量，以此实现自身的降温^[3]。

辐射冷却技术可以看作是由地球、太阳和外太空之间的能量交换。根据能量守恒， P_{net} 是物体的净辐射冷却功率； P_{rad} 是物体辐射功率； P_{atm} 是周围空气对辐射冷却材料进行辐射的辐射功率； P_{solar} 是来自太阳的辐射功率； $P_{\text{non-radiative}}$ 是物体

的非辐射热传导功率，如图1所示。

$$P_{\text{net}} = P_{\text{rad}} - P_{\text{atm}} - P_{\text{solar}} - P_{\text{non-radiative}}$$



P_{solar} —Solar power absorbed by the object; P_{atm} —Back atmospheric radiation absorbed by the cooler; P_{rad} —Thermal emission radiated from the cooler; $P_{\text{non-radiative}}$ —Non-radiative heat conduction power of the object

图1 辐射冷却材料的能量流动

Fig. 1 Energy flow diagram of the passive cooler

基于制冷功率 P_{net} 的计算公式，在不考虑非辐射热传导的情况下，物体的辐射功率越大，物体吸收的大气辐射功率和吸收的太阳辐射功率越小，其净冷却功率就越大。因此，为了最大限度地提高辐射冷却性能，需要明确辐射冷却材料的辐射功率 P_{rad} ，以确保其在0.3~2.5 μm波段中具有接近0的太阳辐射吸收率 P_{solar} 和大气辐射吸收率 P_{atm} ，应尽可能减少外界热量对辐射冷却材料的能量输入，如热传导、热辐射和对流传热。总之，辐射冷却技术需要精确的光谱管理，允许物体表面在太阳光谱波段(0.3~2.5 μm)内具有低吸收率，以最大限度地减少太阳吸热，同时在“大气窗口”(8~13 μm)具有高发射率，将热量辐射到寒冷的外太空。

2 影响辐射冷却性能的主要因素

2.1 辐射冷却材料的选择

聚合物辐射冷却材料因其在太阳辐射波段(0.3~2.5 μm)的高反射率和大气窗口(8~13 μm)的高发射率而备受关注^[4]。聚合物涂层可以在任意基材上使用，具有操作便利和可批量生产的优点，

从而实现大规模建筑领域商业化的应用。其中，如聚偏氟乙烯(PVDF)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)^[5-7]具有固有的红外吸收性，在大气窗口有很强的发射率，如图2(a)所示。这些聚合物都具有C—F、C—O或C—Si

等官能团，其不同的弯曲振动模式产生的红外吸收和发射与大气窗口重叠，因而拥有高红外发射率。此外，人们发现聚氟乙烯(PVF)^[8]、聚氯乙烯(PVC)^[9]、聚甲基戊烯(TPX)^[10]和聚四氟乙烯(PTFE)^[11]等塑料也是很好的辐射冷却材料，见图2(b)。

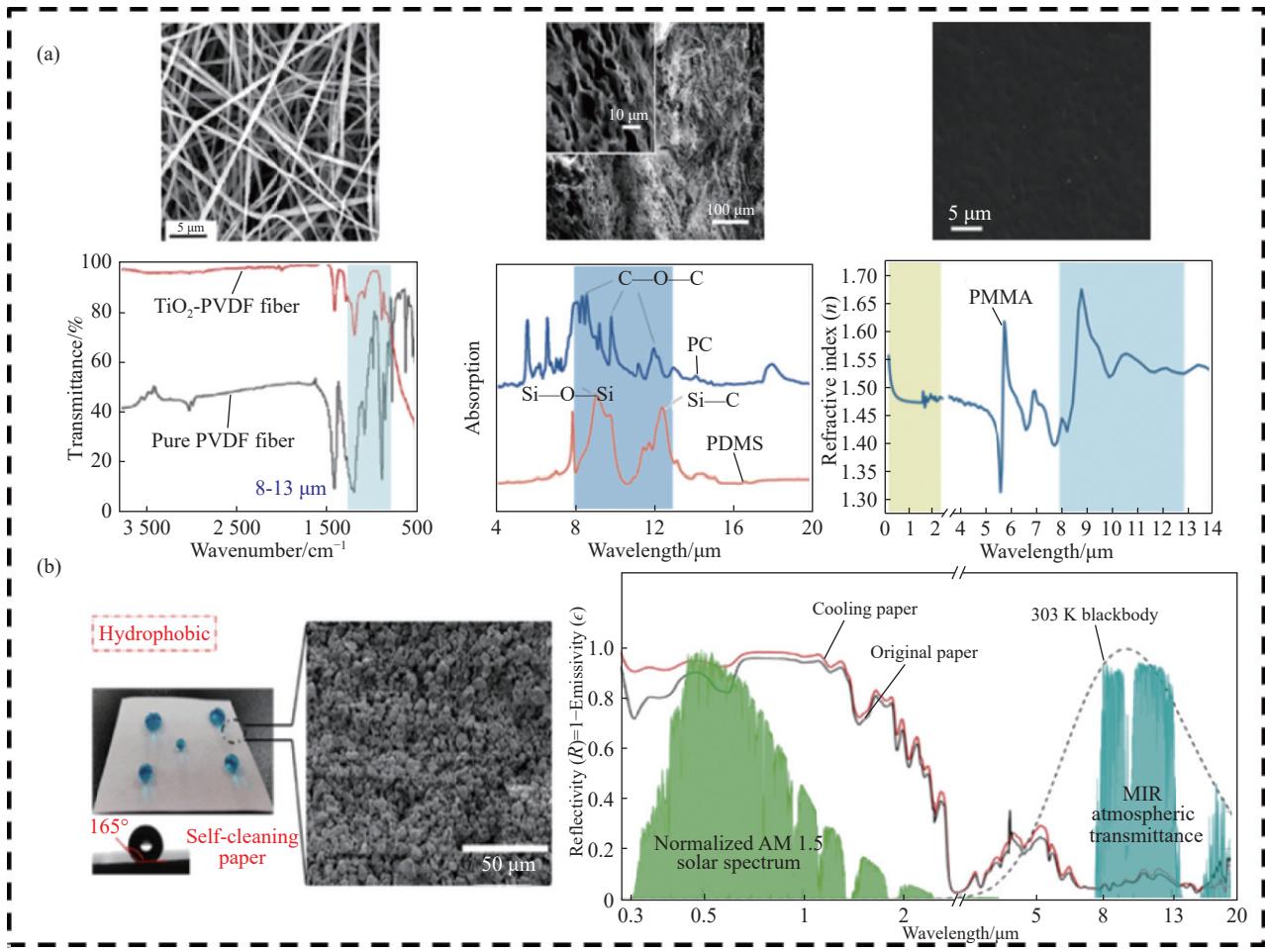


图2 (a) 聚偏氟乙烯(PVDF)的SEM图像和PVDF、 TiO_2 -PVDF的红外光谱曲线^[5]；聚二甲基硅氧烷(PDMS)的SEM图像和吸收率^[6]；聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的SEM图像和反射率^[7]；(b) 聚四氟乙烯(PTFE)涂层纸复合材料的表面润湿状态、微观结构和光谱表征图^[11]

Fig. 2 (a) SEM images of polyvinylidene fluoride (PVDF) and infrared spectral curves of PVDF, TiO_2 -PVDF^[5]; SEM image and absorptivity of polydimethylsiloxane (PDMS)^[6]; SEM image and reflectance of polymethyl methacrylate (PMMA)^[7]; (b) Surface-wetting states, microstructures and infrared spectral curves of polytetrafluoroethylene (PTFE)-coated paper composites^[11]

在早期，大多数辐射冷却材料都包含抑制光照吸收的金属基板，利用平面的高太阳反射性金属(如Al或Ag)作为反射器^[12-14]。然而，金属基板通常价格昂贵，易受腐蚀或污染，这阻碍了它们的大规模生产和长期户外使用。为了解决这些问题，一些氧化物和氮化物受到了广泛的关注，如二氧化硅(SiO_2)^[15]、二氧化钛(TiO_2)^[16]、氧化铝(Al_2O_3)^[17]和氮化硅(Si_3N_4)^[18]等均可作为辐射冷却材料。

SiO_2 在大气窗口有强烈的振动吸收峰，在该

波段具有较高的红外发射率，同时因其优异的化学稳定性、耐受性及微纳米颗粒的结构形态，成为常用的辐射冷却材料之一。Zhai等^[14]将 SiO_2 微球嵌入聚甲基戊烯(TPX)中，制备了一种随机粒子结构超材料，在大气窗口可以获得大于93%的红外发射率。Xiang等^[19]制备了一种三维多孔醋酸纤维素/ SiO_2 的薄膜，其厚度约为40 μm。对比发现，未沉积 SiO_2 一侧薄膜的平均红外发射率(~83%)明显低于沉积 SiO_2 的一侧(~95%)。

二氧化钛 (TiO_2) 具有高折射率、高红外发射率和低太阳吸收率等优点。Chen 等^[20]在多孔纤维素薄膜中引入 TiO_2 纳米粒子，将太阳反射率提高到 97%，在太阳直射下可以实现约 10℃ 的降温。Chen 等^[21]将聚偏氟乙烯-六氟丙烯 (P(VDF-HFP))/ TiO_2 复合材料作为彩色涂料的底层，由于 TiO_2 颗粒基于米氏散射原理可以强烈地反射太阳光，彩色涂层与商用油漆相比可以降低 3~15.6℃ 的环境温度。

氧化铝 (Al_2O_3) 和氮化硅 (Si_3N_4) 具有出色的机械、热学和电学性能，Sun 等^[22]通过静电纺丝法制备了高性能遮阳和辐射冷却的复合柔性薄膜，纳米纤维的直径分布在 300~1 200 nm 范围内， Al_2O_3 纳米颗粒包裹在纳米纤维中。纳米纤维可以强烈地散射太阳光，从而实现高太阳光反射率。当厚度为 300 μm 、 Al_2O_3 纳米颗粒含量为 8wt% 时，该材料在 1.1~2.5 μm 波长范围内表现出约 95% 的太阳反射率，在大气窗口内表现出约 98% 的超高红外发射率。Ma 等^[18]模拟了含有 SiO_2/Si_3N_4 复合材料的 7 层辐射冷却器，连续的屋顶测量和综合计算共同证明了辐射冷却器的出色性能，在 900 W/m^2 的阳光下实测温降为 8℃，模拟冷却功率为 87 W/m^2 。

2.2 辐射冷却材料的结构

2.2.1 多层膜结构

构建多层结构是指对材料的结构进行设计和优化，不同种类的材料在大气窗口的声子极化共

振效应相互协同作用，提供给多层结构的高发射率和高反射率以增强辐射冷却性能。多层膜结构的设计方法有许多种，如高低不同的折射率交替设计产生复合反射系数，从而实现宽反射带和高反射率。亦可以设计具有周期性重复特点的多层薄膜结构，以此形成布拉格反射器，在不同波段内实现高反射。梯度膜则是通过优化膜层的折射率和厚度，使其在特定波长范围内会具有较高的反射率。

通常，多层辐射冷却器由许多交替层和底部的金属膜组成。多层交替叠加的材料负责增加太阳光谱中的反射率和大气窗口中的热发射率，因其优异的发射光谱可调性，受到了较广泛的研究。2014 年，Raman 等^[23]最先使用由 7 种厚度不同的 HfO_2 和 SiO_2 薄膜交替叠加在银片上组合而成的辐射冷却多层结构，如图 3(a) 所示。该材料在太阳直射下，可以实现 4.9℃ 的降温。2020 年，Mabchour 等^[24]在此基础上进行了优化，由于在太阳光谱波段 (0.3~2.5 μm) 中 Ta_2O_5 的吸收几乎可以忽略不计，因此选择用 Ta_2O_5 代替 HfO_2 ，此多层结构可以获得约 95% 的太阳反射率和约 85% 的红外发射率。Chae 等^[13]以 Al_2O_3 、 Si_3N_4 和 SiO_2 为发射层，利用真空沉积技术负载于具有高反射率的 Ag 表面，可实现 5.2% 的低太阳吸收率和在大气窗口约 87% 的高发射率，通过无机材料保证了其在不同条件下的持久稳定性，如图 3(b) 所示。 Al_2O_3 、 Si_3N_4 和 SiO_2 是稳定的化学惰性材料，上面三层全部由

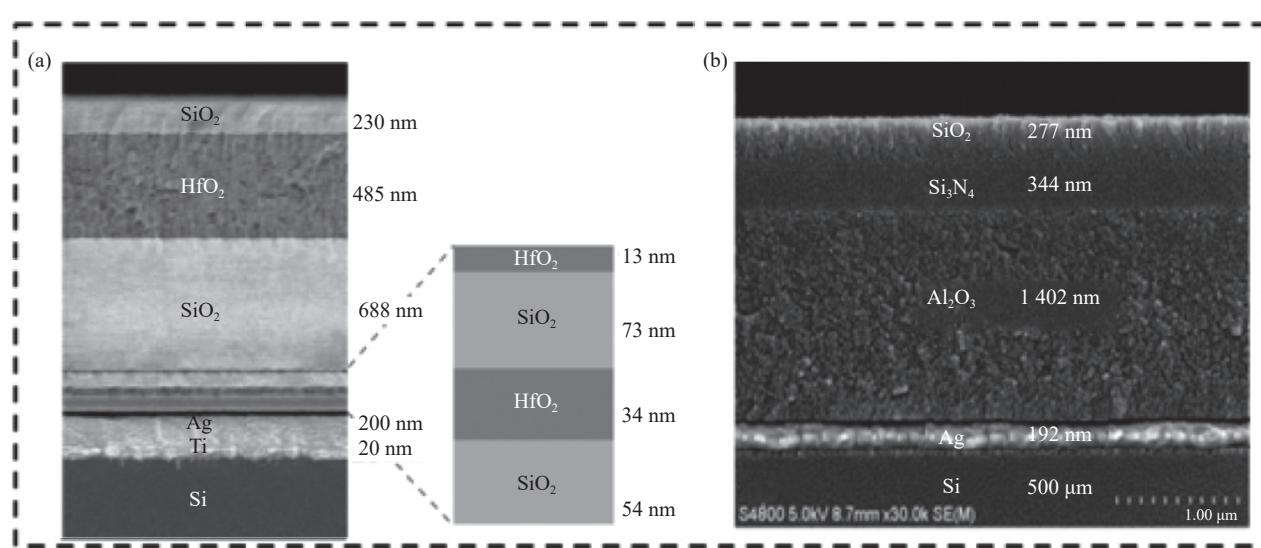


图 3 Raman 等^[23](a) 和 Chae 等^[13](b) 制备的多层结构辐射冷却材料

Fig. 3 Multilayered radiation-cooled materials prepared by Raman et al.^[23] (a) and Chae et al.^[13] (b)

无机材料组成，底层的金属 Ag 层用于反射入射的太阳辐射。这使该无机辐射冷却材料在太阳光谱区具有低吸收性和在大气窗口的高发射率。

使用多层结构或聚合物的辐射冷却器可以被定制为在红外范围内具有强太阳反射和高选择性发射。然而，它们需要复杂的制造步骤，如高精度光刻或沉积技术，这限制了这些冷却设备的大规模应用。

2.2.2 随机分布的粒子结构

除了上述选择具有高红外发射率、高反射率和低太阳吸收率的材料外，有学者提出可以利用随机分布介质来实现辐射冷却性能。虽然纳米光子方法可以实现设计的光谱发射率，但严格的制造要求可能会限制低成本辐射冷却材料的大规模应用。对于节约成本和可大批量生产的辐射冷却材料，随机分布的粒子结构被认为是可实现绿色可持续发展的方法。

当电磁波遇到与波长相当或更大的散射体时，就会产生米氏散射，导致光在物体表面或内部发生散射。当大量散射体存在的情况下，就会发生强烈的米氏散射，导致材料内部漫射或后向散射，从而反射很大一部分入射光获得高反射率。当光在空气中传播遇到粒子或特定物体时，它会与该物体的原子或分子相互作用，在不同的方向上被偏转或散射。随机掺杂的纳米粒子会导致太阳光发生米氏散射，并通过共振效应在大气窗口中实现高发射率。随机分布的粒子结构就是利用这一规律增加太阳反射率和红外发射率，实现有效的辐射冷却性能。这类方法旨在利用尺寸和材料参数的影响来最大化纳米颗粒的散射效率。

Zhai 等^[14] 制备了一种 SiO₂ 微球随机分布在聚甲基戊烯 (TPX) 中的基质材料，辐射冷却材料的背面为一层薄薄的银膜，随机分布的 SiO₂ 微球与红外光强烈相互作用，使材料在整个大气窗口中具有极强的发射性 (图 4(a))。该材料可以反射 96% 的太阳辐射，其在大气窗口的发射率为 93%，冷却功率为 93 W/m²。Ag 膜可以漫反射大部分入射太阳辐射，而包裹 SiO₂ 微球的 TPX 混合材料吸收了所有入射的红外辐射，致使该材料具有高红外发射性。Cheng 等^[25] 提出利用仿生褶皱结构结合优化粒子分布来实现太阳波段和大气窗口的高效光学特性调节的想法。在此基础上，制备了一种具有人体皮肤自然皱纹仿生结构的大规模辐射

冷却涂层，该涂层由高浓度的 BaSO₄ 和 SiO₂ 颗粒随机构成 (图 4(b))。厚度为 100 μm 的涂层反射了 95% 的太阳辐射，在大气窗口的发射率为 96%。正午 (11:00~13:00) 在位于海平面的人口稠密地区记录到的平均有效冷却功率为 89.6 W/m²，亚环境温度下降最高可达 8.1℃。Das 等^[26] 利用随机分布的 MgO 和 PVDF 纳米颗粒制备了具有辐射冷却性能的涂料 (图 4(c))。在阳光折射下，可以实现平均温度下降 7℃，由于 Mie 散射，其太阳反射率达到 96.3%。同时，Mg—O 键振动和聚合物的其他拉伸键振动使其大气透射窗口热发射最高可达到 98.5%。这项技术提供了一种具有优异的冷却性能、低成本和可扩展的纳米复合涂层，可适用于铺路、瓷砖和建筑冷却等应用。

2.2.3 微观多孔结构

随着纳米制造工艺的发展和技术的成熟，精确地控制几何排列和尺寸大小的设计为辐射冷却技术开辟了更广泛的应用场景。有定制光谱特性的多维光子排列多孔结构已经被用于辐射冷却技术，包括光栅、纳米棒、方形和空气孔等。这些微观多孔结构主要是由于粒子嵌入矩阵制成的辐射冷却装置，利用散射现象。选择性地反射入射的辐射。受到这种可能性的启发，研究人员开发了一种基于相分离方法诱导的多孔辐射冷却材料，材料蒸发后形成微孔和纳米孔。Huang 等^[27] 报道了一种非常规的棒状粒子 (RLP) 的制备方法，其纹理表面嵌入随机纳米孔，用于制造高效的辐射冷却涂层，如图 5(a) 所示。在涂层中，以介孔 SiO₂ 为模版并与这些随机分布的纳米孔协同作用，可以有效地反向散射阳光并提高热发射率。由于含有 RLP 的结构颗粒涂层 (SPC) 具有超高的太阳反射率 (97%) 和长波热发射率 (95%)，在接近 1 000 W/m² 的太阳强度下，夜间和白天的亚环境平均温度分别下降 5.7℃ 和 4.3℃。Cai 等^[28] 从天然珊瑚获得灵感，制备一种尺寸和厚度可控的非对称珊瑚状的多孔羟基磷灰石纳米棒/醋酸纤维素/热塑性聚氨酯薄膜 (CA/TPU-HAP NRs film)，见图 5(c)。通过简单的聚合物共混法，成功地将弹性体 TPU 引入 CA/TPU 聚合物交联网络中。CA 分子链与 TPU 之间的交联使薄膜的断裂伸长率从 86.5% 提高到 236.2%，弹性模量从 177 MPa 降低到 28 MPa，材料的柔韧性和机械抗力得到增强。精确构造的不对称结构和珊瑚状 HAP-NRs 使薄膜

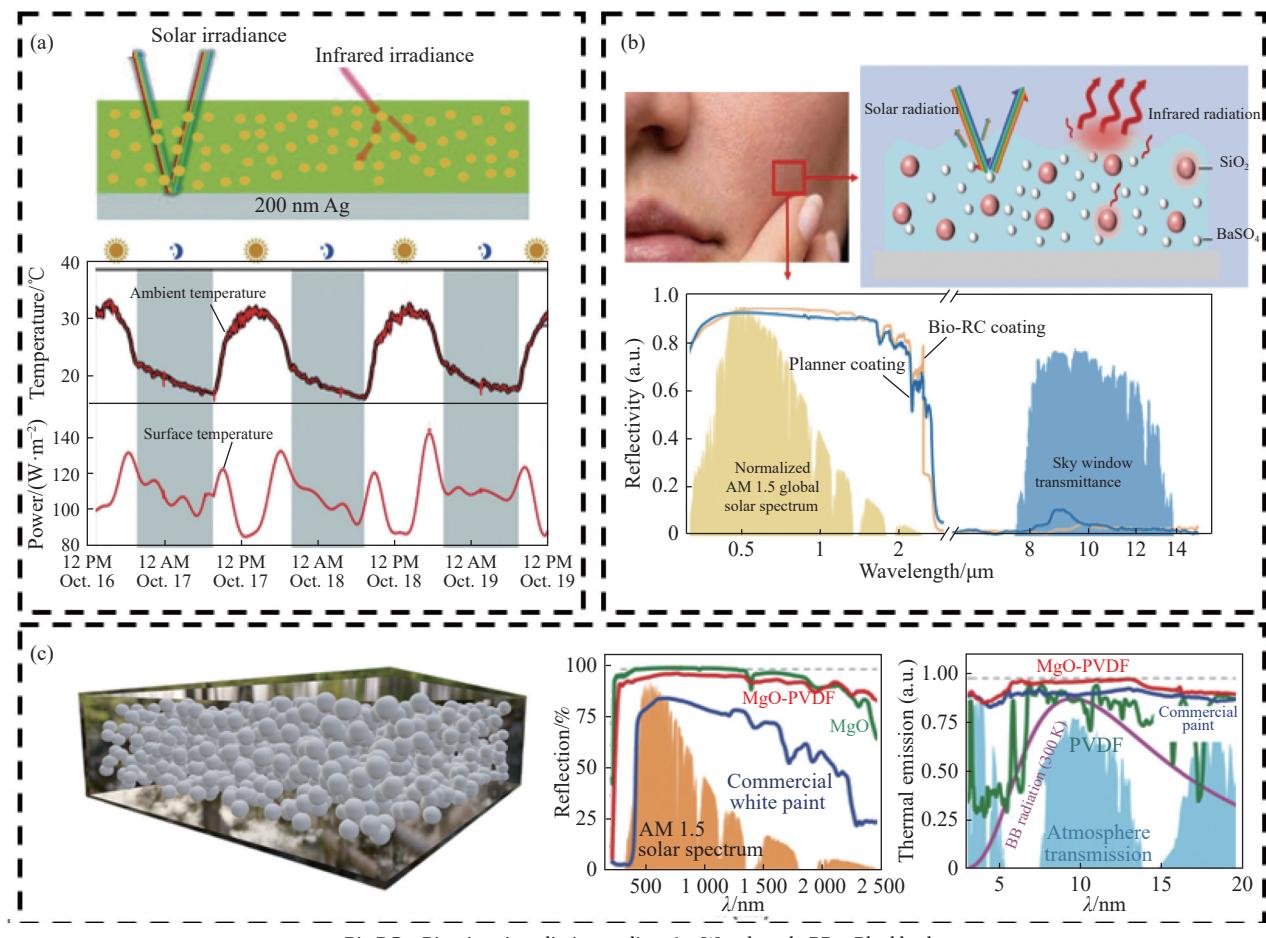


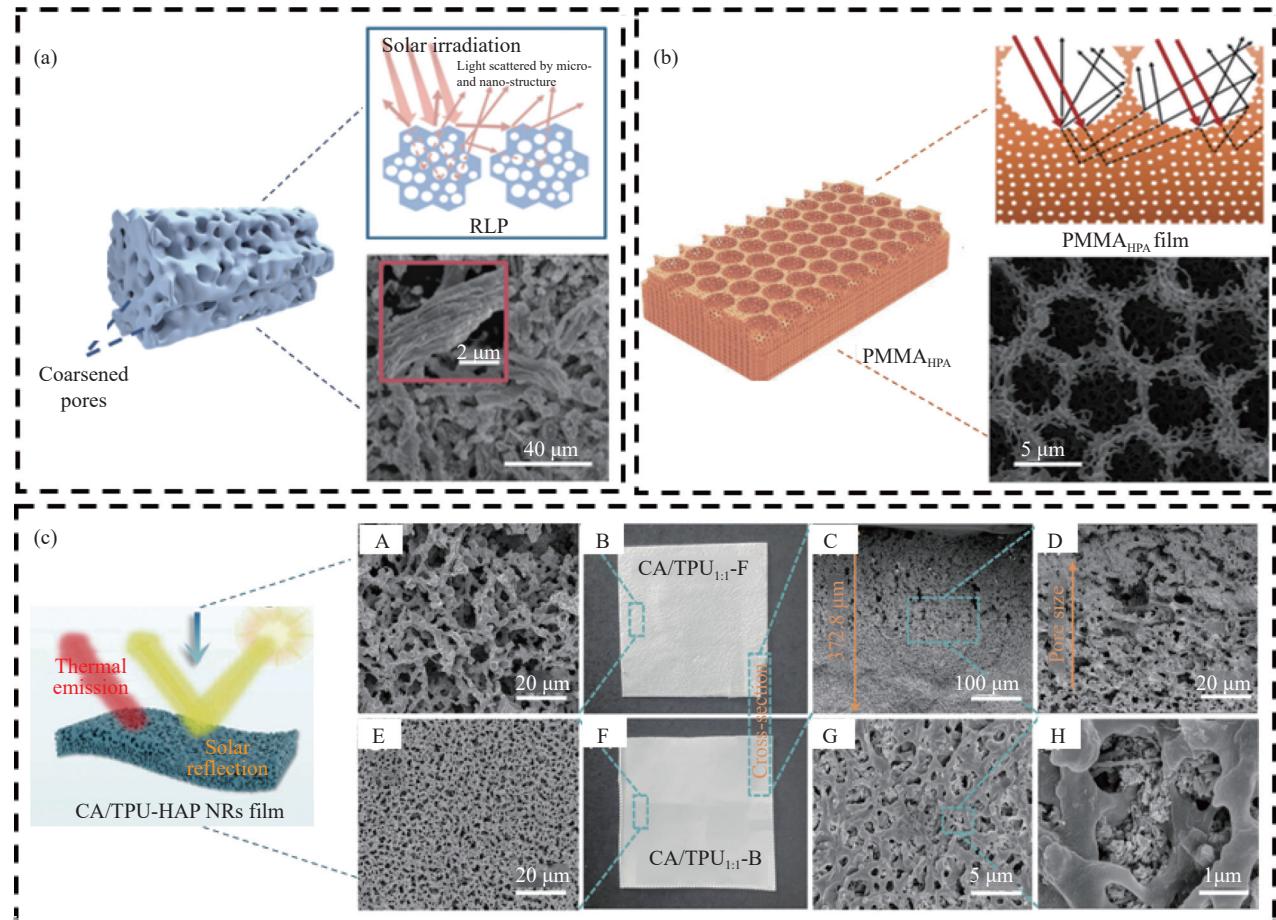
图4 随机分布的粒子结构: (a) SiO₂ 微球随机分布在聚甲基戊烯 (TPX) 上以银为背衬的超材料结构示意图^[14]; (b) 人体皮肤自然褶皱仿生结构涂层^[25]; (c) 具有随机分布的 MgO/PVDF 纳米颗粒辐射冷却涂料^[26]

Fig. 4 Randomly distributed particle structure: (a) Schematic diagram of the metamaterial structure of SiO₂ microspheres randomly distributed on polymethylpentene (TPX) with silver as the substrate^[14]; (b) Human skin natural fold bionic structure coating^[25]; (c) Radiative cooling coatings with randomly distributed MgO/PVDF nanoparticles^[26]

具有 97.26% 的太阳反射率和 97.22% 的红外发射率。结果表明, 薄膜具有出色的室外冷却能力, 在超过 1 550 W/m² 的太阳辐射下可以实现环境温度下降 9.2°C。同时, 在汽车和建筑物的实际应用中, 薄膜的温度分别下降了 16.7°C 和 5.1°C。Wang 等^[7]则通过模板法在聚合物薄膜 PMMA_HPA 表面设计微纳米多孔阵列, 并引入大量随机分布的孔洞(图 5(b)), 该聚合物薄膜主要由 PMMA 和纳米 SiO₂ 组成。在大气窗口具有高发射率的 PMMA、SiO₂ 和薄膜上密集且丰富的多级孔洞使其在太阳光谱范围内获得高达 95% 的反射率和 98% 的红外发射率, 在夜间可以实现降温约 8.2°C。即使是在炎热潮湿的气候下, 该薄膜依然可以实现约 5.5°C 的日间降温冷却, 实现了在受外界环境干扰下的高效辐射冷却性能。

相对于通过材料本身的特性, 通过改变辐射冷却材料微观结构来提升辐射冷却效率更便利, 基于纳米颗粒的辐射冷却材料往往通过改变结构可以获得更高的辐射冷却性能, 通过不同方式制造孔洞来实现多孔辐射冷却材料的构筑, 充分发挥米氏散射效应以提高太阳的反射率及增强材料在大气窗口的发射率, 并且多孔材料制作成本更低廉, 易于大批量生产制造, 因此极具应用潜力。

综上所述, 从通过单一的材料来实现辐射冷却到探索复杂多样的材料结构, 辐射冷却正逐步从理论研究走向实际应用。具有固有的红外吸收率和在大气窗口有很强发射率的聚合物、氧化物及氮化物为辐射制冷奠定了基础。微纳米加工技术的进步为辐射冷却材料在结构设计上提供了更



CA/TPU-HAP NRs film—Cellulose acetate/thermoplastic polyurethane-hydroxyapatite nanorods film; CA/TPU_{1:1}-F—Front side of the cellulose acetate/thermoplastic polyurethane 1:1 passive radiative cooling biofilm; CA/TPU_{1:1}-B—Back side of the cellulose acetate/thermoplastic polyurethane 1:1 passive radiative cooling biofilm

图 5 (a) 非常规结构棒状粒子 (RLP) 示意图^[27]; (b) 分层多孔阵列 PMMA 薄膜 (PMMA_{HPA}) 薄膜微纳多孔阵列示意图^[7]; (c) 非对称珊瑚状多孔薄膜的 SEM 图像^[28]

Fig. 5 (a) Schematic diagram of rod-like particles (RLP) with unconventional structure^[27]; (b) Schematic diagram of hierarchically porous array PMMA film (PMMA_{HPA}) film with a hierarchically porous array^[7]; (c) SEM images of asymmetric coral-like porous films^[28]

多选择。随机分布的多孔结构及微观可控的多孔结构技术则为辐射冷却材料在建筑领域的应用提供了经济有效的方法，使辐射冷却材料的大规模制备成为可能，极大地拓展了辐射冷却的潜在应用范围。

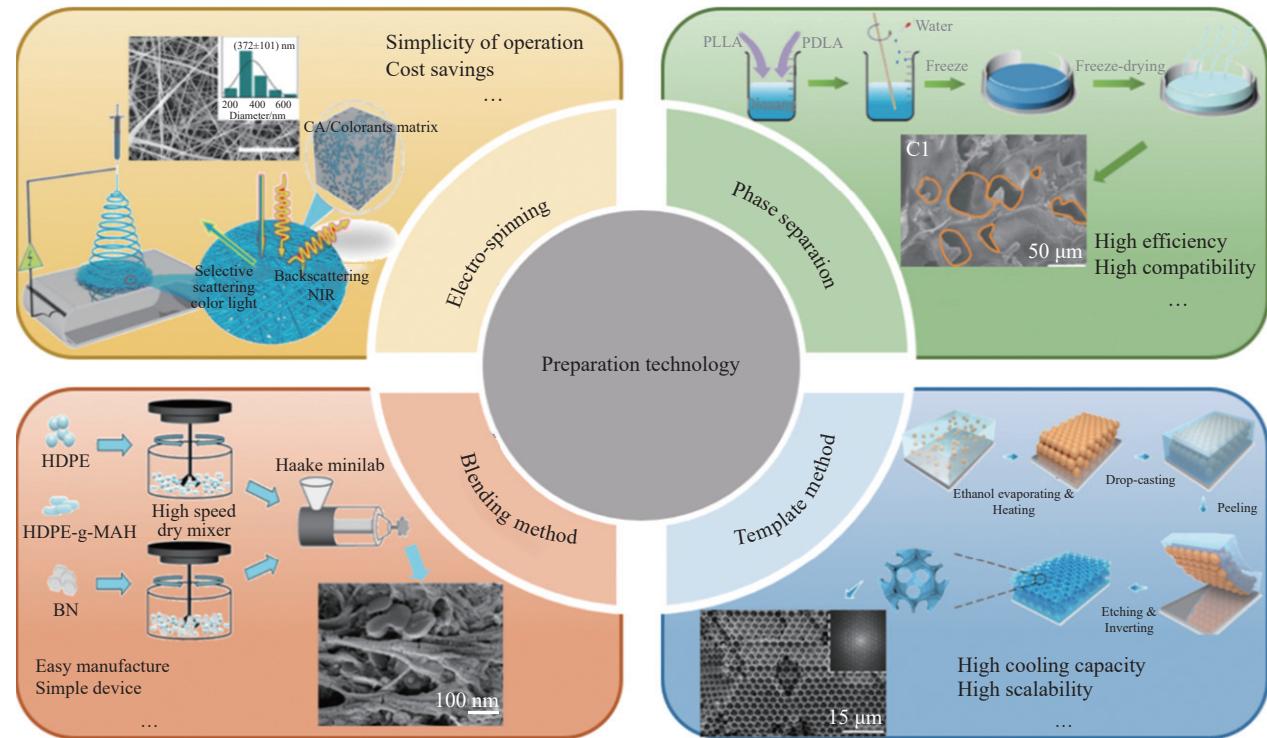
3 辐射冷却材料的制备技术

制备工艺是影响辐射冷却材料的关键因素，常用的制备技术包括静电纺丝法、共混法、相分离法和模板法等，如图 6 所示。

3.1 静电纺丝法

静电纺丝是指聚合物溶液在强电场的作用下，针头上的滴液会拉伸成圆锥形，并从圆锥尖端延展形成纤维^[29]。Kong 等^[30]通过静电纺丝法制备了一种多尺度微纳结构的 PVDF 辐射薄膜，其中氧

化锆 (ZrO_2) 颗粒通过 PDMS 粘合在 PVDF 纤维的表面。这种 PVDF 复合薄膜在可见光波段表现出相对较高的太阳反射率 (>0.95) 和优异的大气窗口发射率 (>0.96)，与模拟皮肤和环境温度相比，在约 1000 W/m^2 的阳光直接照射下温度分别降低了 21.8°C 和 10.4°C 。同时，PDMS 的多级结构与疏水性相结合，使其具有疏水角为 155° 、滑动角约为 5° 的超疏水性，从而赋予薄膜优异的自清洁能力。Jeon 等^[31]利用 PDMS、玻璃泡 (GBu) 和 BaSO_4 制备了一种辐射冷却复合薄膜。将聚丙烯腈 (PAN) 纳米纤维在制备的薄膜上进行静电纺丝。结果表明：样品在 280 nm 到 2500 nm 之间，含有 PAN 层的 GBu 薄膜和 BaSO_4 薄膜的太阳反射率分别为 80.58% 和 88.35% ，高于未添加 PAN 层薄膜的太阳反射率 (69.96% 和 78.68%)，PAN 纳米纤维层增加



CA—Cellulose acetate; PLLA—Poly-L-lactic acid; PDLA—Poly(D-lactide); HDPE—High density polyethylene; BN—Boron nitride; HDPE-g-MAH—High density polyethylene-g-MAH

图 6 辐射冷却材料的常用制备技术^[33, 36, 44, 47]

Fig. 6 Common preparation technologies for radiation-cooled materials^[33, 36, 44, 47]

了样品的太阳反射率。Xiang 等^[32]利用天然蚕丝通过静电纺丝法制备了一种可生物降解的蚕丝蛋白(SF)辐射冷却纤维膜。天然蚕丝不仅有独特的结构和成分，同时还具有较高的太阳反射率和红外发射率及优异的生物降解性。制备的蚕丝蛋白纤维膜可实现 96% 的平均太阳反射率和 97% 的红外发射率。这种优异的光学性能使纤维膜在室外环境太阳强度为 800 W/m^2 下也能产生 6°C 的平均环境冷却温度，可以应用于建筑节能、冷链运输及车内温度控制等方面。Li 等^[33]使用纳米纤维(NF)和醋酸纤维素(CA)通过原液染色静电纺丝技术制备了柔性彩色辐射冷却薄膜。该薄膜在 $8\text{--}13 \mu\text{m}$ 的范围内具有 95% 的红外发射率和 99% 的超高近红外发射率，并且可以选择性地吸收可见光以显示所需的颜色。这种优异的特性使黄色薄膜在太阳强度为 700 W/m^2 下可以实现 3.2°C 的冷却温度及 40 W/m^2 的冷却功率。彩色辐射冷却薄膜的灵活性及可变形性使其适合各种实际应用的热管理，如建筑物的冷却罩、车内温度管理和户外帐篷等。Tsai 等^[34]采用静电纺丝法结合氟硅烷在纤维表面改性制备了超疏水二氧化硅超纤维

(sh-SMF)。由于超纤维表面多次散射，可以获得极高的平均反射率($\sim 97\%$)和接近 0 的吸收率及在大气窗口具有较高的平均发射率($\sim 90\%$)。在太阳辐射为 790 W/m^2 的情况下，实现了 6°C (夜间 4°C)的环境冷却温度和 112 W/m^2 (夜间 87 W/m^2)的最大冷却功率。此外，覆盖 sh-SMF 的建筑模型和车辆模型在阳光照射下分别下降了 12.7°C 和 17°C 。值得注意的是，陶瓷 sh-SMF 可以承受超过 1200°C 的高温，这能有效延长居民在火灾情况下从建筑物的撤离时间。另外，其超疏水表面(接触角为 155°)表现出良好的自清洁和防霉性能。因此，具有优异的超疏水、阻燃和辐射冷却性能的陶瓷超纤维为未来节能和可持续发展的建筑应用开辟了一条新道路。

静电纺丝法具有操作简单、设备简易、效率高和成本低等优点，但静电纺丝法同时存在一些缺点。静电纺丝纤维粗细不均，电场分布的不均匀会导致纤维直径分布不均，使纤维的性能也不尽相同；设备易受环境影响，环境的温度和湿度等因素都会影响纤维的形成；同时，静电纺丝的工艺参数也会对纤维的形成造成影响，需要仔细调控。

3.2 共混法

静电纺丝法虽然可以实现材料的大面积制备，但是其对工艺参数及设备要求严格，需要在特定的电压、环境温度和湿度等条件合适的环境下进行操作。共混法就不需要特定的条件，直接将两种或多种聚合物混合在一起，制备出具有高发射率和高反射率的辐射冷却材料。

Li 等^[35]采用简单的机械搅拌共混制备了可大规模应用的多级形态涂层，在生产过程中没有产生溶剂或有毒气体，显示出其在建筑领域应用的巨大潜力。 SiO_2 和 TiO_2 纳米颗粒可以高效地反射紫外-可见光 (UV-VIS)，而具有宽尺寸分布的微孔能够抑制可见光和近红外 (NIR) 范围内的光。同时，PDMS 包含 Si—C、Si—O—C 和 Si—O—Si 等基团，它们吸收大气窗口内的热辐射。由于多个米氏共振协同作用，复合涂层产生了可以覆盖整个紫外-可见光区域的多个散射峰，使其显示出 94% 的太阳反射率和 95.1% 的大气窗口发射率。Zhang 等^[36]采用熔融共混法制备了高密度聚乙烯/氮化硼 (HDPE/BN) 高导热复合材料。BN 对太阳光有较强的散射作用，在中红外波段有一个特征红外吸收峰，使复合材料在大气窗口具有大于 86% 的太阳光反射率和大于 93% 的红外发射率。在阳光直射下，其冷却能力为 4~6°C，与传统聚合物相比，它将基材加热器的温度降低了约 10°C，使其适用于实际电子设备或建筑辐射冷却应用。Gong 等^[37]将以 P(VDF-HFP) 和聚四氟乙烯 (PFA) 为主要成分的混合聚合物乳液作为基体，玻璃微珠作为功能添加剂，通过简单的机械共混，制备出一种新型具有辐射冷却功能环保水性涂料，同时没有任何挥发性有机化合物 (VOCs) 产生。结果表明：冷却涂料的平均红外发射率为 92%，太阳反射率为 94%。在没有遮阳或高湿条件下，可实现环境冷却的温度高达 6°C。这种新型辐射冷却涂料在不同气候区域的建筑屋顶上具有很好的应用潜力。与此同时，Jiang 等^[38]通过简单的液相共混法，制备一种 PVDF 颗粒与 PDMS 粘结剂组成的 PVDF/PDMS 复合涂料。该涂料获得了太阳反射率为 90.6%，红外发射率为 98.1%，接触角为 158.2°，滚转角为 7.9°。PVDF/PDMS 涂层在太阳直接照射下的辐射冷却温度为 4.93°C。该复合涂料不仅赋予建筑外墙超疏水性和辐射冷却功能，可以实现建筑节能，还可以显著降低人工清洗成本，从而保证建筑外墙辐射冷却功能的效率和耐

久性。

3.3 相分离法

相分离法是指二元或多元混合物会在一定的条件下分离为不同的相。共混法虽然对于辐射冷却材料来说，具有操作简单、易大面积制备等优点，但是提升辐射冷却材料的反射率和发射率主要依靠聚合物本身的性质，混合过程中可能产生不均匀分布的现象，导致材料的性能不稳定。但是，相分离法可以非常便利地实现微纳米孔径，利用微纳多孔结构可以调控太阳光的反射能力，并有效地降低材料的导热性能，有助于减少非辐射传热。同时，相分离法具有分离效率高、可以在短时间完成分离过程的优点^[39]。

Li 等^[40]以低成本、化学性质稳定的 PVDF 为原料，采用简单相分离法制备了具有日间辐射制冷功能的多孔 PVDF 薄膜。该薄膜获得了 95.6% 的太阳反射率和 99.1% 的大气窗口发射率，从而实现了高性能的辐射冷却性能且无需金属反射层。在阳光直射下，冷却功率为 69.43 W/m²，环境冷却温度为 4.2°C。Mandal 等^[41]提出了一种具有优异辐射冷却性能的分层多孔聚偏氟乙烯-六氟丙烯 [P(VDF-HFP)_{HP}] 涂层制备技术。将 P(VDF-HFP) 溶解于丙酮中，借助相分离，溶剂蒸发后形成的微纳米孔洞增强了 P(VDF-HFP) 涂层的红外特性。该涂层具有高太阳反射率 (0.96±0.03) 和高红外发射率 (0.97±0.02)。在太阳强度分别为 890 W/m² 和 750 W/m² 的情况下，环境温度可以下降 6°C，冷却功率达 96 W/m²。在此基础上，Li 等^[42]选取 P(VDF-HFP) 为原料，丙酮 (ACE) 和二甲基甲酰胺 (DMF) 为混合溶剂，通过调控相分离度，优化 P(VDF-HFP) 的多孔结构，最后得到了 PVDF-HFP 薄膜。相分离的程度取决于聚合物和混合溶剂的溶解度参数，可以通过调节 ACE 和 DMF 的体积比来改变。当 DMF 的体积比增加到 50% 时，优化后 PVDF-HFP 薄膜的太阳反射率和中红外发射率分别达到了 97.7% 和 96.7%。Wang 等^[43]发明一种在三元溶液 (P(VDF-HFP)/丙酮/水) 中进行喷雾相分离的方法。在喷雾过程中，浇铸液被高速气流雾化成小液滴，每个液滴分别进行溶剂蒸发相分离，且每个小液滴具有相似的蒸发速率，以此得到理想的孔隙结构。制备出厚度为 313 μm 的薄膜，具有 97.2% 的平均太阳反射率和 93.5% 的平均红外发射率，在平均太阳强度 1 250 W/m² 的条件下，可实现高达 14.9°C 的冷却温度，正午

辐射冷却功率约为 100 W/m^2 。Liu 等^[44] 将聚左旋乳酸 (PLLA) 和聚 D-丙交酯 (PDLA) 混合，然后与立体复合晶体相结合，制备出一种具有低导热系数 (37 W/(m\cdot K))、高压缩强度 (0.1 MPa)、可降解的超疏水 (接触角为 152°) 立体复合聚乳酸气凝胶。只需要通过简单的水辅助热诱导相分离法就可以制备气凝胶，其具有较高的太阳反射率 (89%) 和较强的红外发射率 (93%)，白天温度下降 3.5°C ，夜间温度可下降 5.8°C ，这种气凝胶为辐射冷却在建筑领域的应用开辟了一条环境可持续发展和建筑节能的途径。

3.4 模板法

模板法就是将具有纳米结构、形状容易控制的物质作为模板，通过物理或化学的方法将材料沉积到模板的孔中或表面而后移除模板，得到具有规范的形貌和尺寸的过程。提高材料的辐射冷却功能，除了材料本身的太阳反射率和发射率，纳米结构的形貌也非常重要。随着微纳米技术的发展，微纳米表面结构对辐射冷却功能的影响也越来越受到研究者的注意^[41]。Zhang 等^[45] 通过模

板法制备了一种有序多孔聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 薄膜。PMMA 薄膜由有序排列且具有相同高度和孔径的三维微纳孔组成，它具有突出的太阳反射率 (94%)、长波红外热发射率 (95%) 和低导热系数 ($0.044 \text{ W/(m\cdot K)}$)。在平均太阳辐照强度为 829 W/m^2 的情况下，有序多孔 PMMA 薄膜可以在正午时分实现高达 10.6°C 的环境温度下降，并且有望实现白天最大冷却功率为 75.6 W/m^2 。

Zhao 等^[46] 以微孔玻璃框架作为模板与具有相对较高反射率的氧化铝颗粒相结合 (图 7(a))，可以强烈散射阳光并防止多孔结构在制造过程中致密化。这种微孔玻璃涂层即使在白天或夜间 80% 的高湿度条件下也可以实现降温 3.5°C 或 4°C 。即使暴露在水、紫外线辐射、环境污垢和高温等恶劣条件下，这种辐射冷却玻璃涂层也能保持高太阳反射率 (图 7(b))。Zhang 等^[47] 利用氯化钠作为模板制备了一种多孔聚二甲基硅氧烷 (P-PDMS) 薄膜。PDMS 与氯化钠以 $1:1$ 的质量比混合，搅拌均匀后浇筑于基材中，在 80°C 烘箱中固化 2 h 后，将薄膜浸泡在去离子水 24 h 直到氯化钠完全

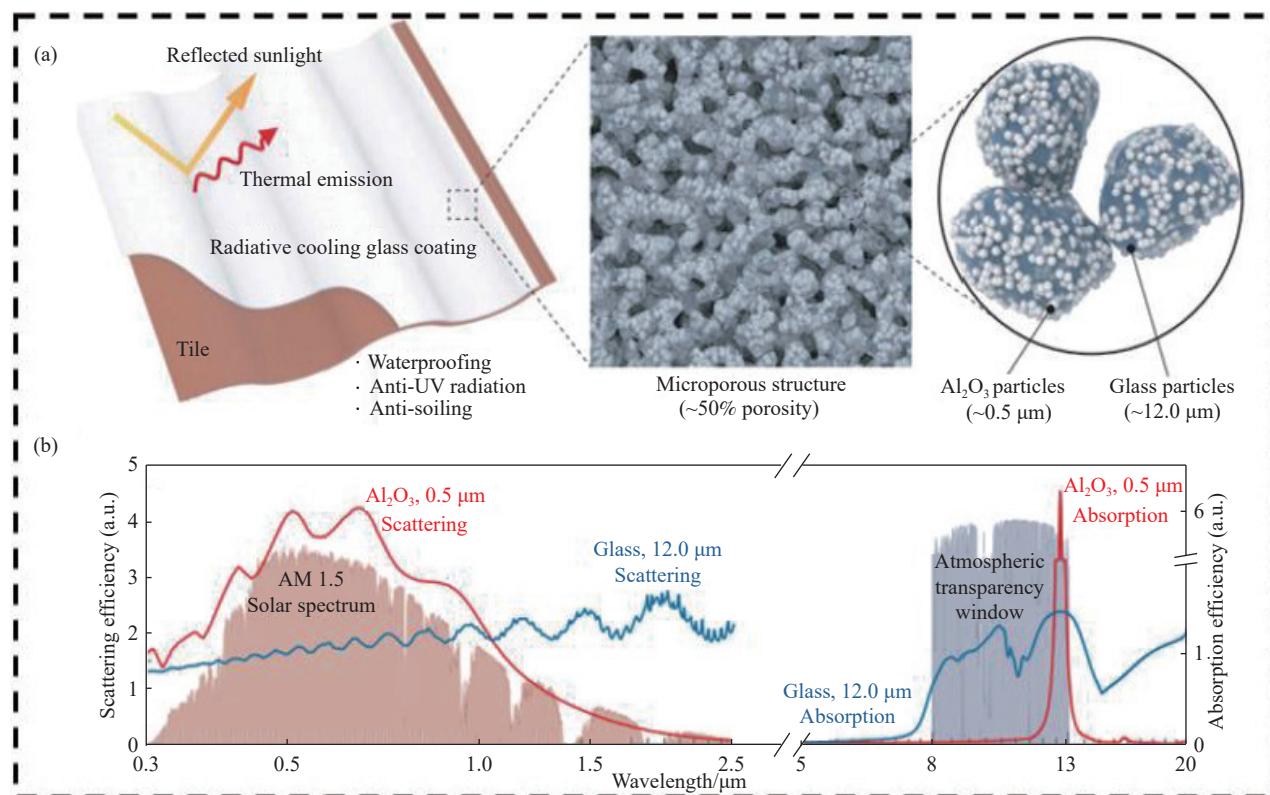


图 7 用于日间被动辐射供冷的环境稳定微孔玻璃涂层^[46]: (a) 陶瓷屋面瓦辐射冷却玻璃涂层原理图; (b) 玻璃和 Al_2O_3 粒子的散射和吸收效率随波长的变化规律

Fig. 7 An environmentally stable glass coating for daytime passive radiative cooling^[46]: (a) Schematic of the radiative cooling glass coating on a ceramic roofing tile; (b) Scattering and absorption efficiencies as a function of wavelength for glass and Al_2O_3 particles calculated on the basis

溶解, 最后获得多孔 PDMS 薄膜。使用成本低廉和资源丰富的氯化钠作为原料, 不仅可以节约成本并且污染小。该薄膜具有平均太阳反射率 73.3%、红外发射率 99.7% 和高疏水性(接触角为 132.92°), 在密闭空气条件下可以实现 18.7°C 的环境温度降温。Wu 等^[48]模仿撒哈拉沙漠银蚁复杂的毛发结构, 制备出一种表面为金字塔形的 PDMS 薄膜, 贴在玻璃瓶表面使其在炎热的白天也能降低约 5.6°C。同时, Wang 等^[49]受到白金龟甲壳虫鳞片的启发, 制备出一种以双连续乳液凝胶(Bijels)为模板, 具有无序杆状聚合物结构的辐射冷却涂层。当厚度为 130 μm 时, 涂层就可以实现 97% 的太阳反射率和 93% 的红外发射率, 在阳光直射下可以降低约 5.6°C。

3.5 其他制备方法

除了上述 4 种常用的制备方法外, 还可以通过选择高发射的材料, 采用等离子刻蚀、电子束光刻、真空蒸镀等方法制备, 但是这几种方法都具有制备技术成本高昂、制备效率低和难以实现大规模商业化生产等缺点。近年来, 可实现大面积制备柔性薄膜的卷对卷技术受到了广泛的关注。Liu 等^[50]展示了一种快速、低成本、无模板的卷对卷方法, 制备出嵌入 Al₂O₃ 和 TiO₂ 纳米粒子的尖峰微结构光子纳米复合涂层。该工作将 TiO₂ 和 Al₂O₃ 纳米粒子与 PDMS 混合以增强太阳反射率, 引入低成本的 Al₂O₃ 纳米颗粒并设置 Al₂O₃/PDMS 和 TiO₂/PDMS 双层结构, 以充分抑制 TiO₂ 的紫外吸收。同时, 在涂层的上表面制造尖峰微结构来提高红外发射率。该涂层具有 96.0% 的太阳反射率和 97.0% 的红外发射率, 在芝加哥面对阳光直射时(平均太阳强度为 699 W/m²)的辐射冷却功率为 39.1 W/m²。Jeon 等^[51]则利用卷对卷技术制备了一种可扩展、可定制和高隔热的陶瓷辐射冷却器。该复合材料由氧化铝(Al₂O₃)和硼硅酸盐(BS)玻璃组成, 在烧制过程中 BS 玻璃融化并渗透到氧化铝层中, 由此将两种材料牢固地互相锁住, 从而有效防止收缩。此外, 烧结后的 Al₂O₃/BS 层具有竖向有效隔热和横向散热的功能。除了高隔热性能外, Al₂O₃/BS 层之间的孔隙引起多次米氏散射, 明显增加了太阳反射率和红外发射率(分别约为 96% 和 92%)。基于陶瓷辐射冷却器的多孔结构和不收缩特性可以生产出具有出色冷却性能的透气窗帘、窗户或面板, 成为建筑领域商业化的潜在解决方案。

4 辐射冷却材料在建筑领域的应用

4.1 主动式建筑节能

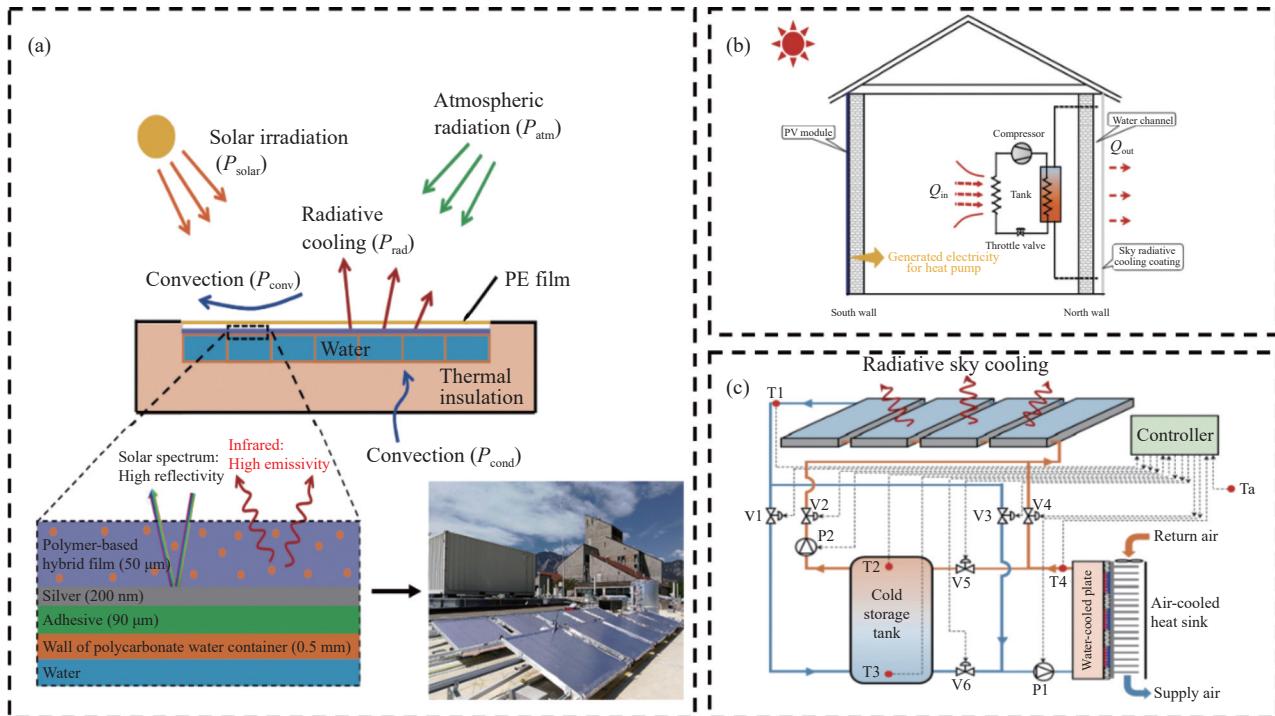
主动式节能指的是通过设备、技术手段等主动干预来实现节能。Zhao 等^[52]使用水作为传热流体来冷却建筑物, 开发了一种辐射冷却收集(RadiCold)模块(图 8(a))。该模块实现了在平均太阳辐照度为 952 W/m²、体积流量为 26.5 L/(h·m²)的情况下, 在夜间可提供 1 296 W 的最大冷却功率, 在中午 12 点至 2 点可提供 607 W 的平均冷却功率。在固定条件下对水可以实现降温 10.6°C 的效果。

Wang 等^[53]研究水循环与辐射冷却系统的节能潜力, 当被动冷却器无法达到设定的冷却温度时, 冷却水系统就会启动。多余的冷却能量会给储热罐储能。冷却能量通过水循环辐射地板传递到室内, 其中水管道嵌入在水泥层中。根据数据模拟显示, 在美国 4 个地区可以实现节能 45%~68%。Zhang 等^[54]在建筑立面设计了将光伏和辐射冷却相结合的辐射冷却系统(PV-RSC), 如图 8(b)所示。实验结果显示 PV-RSC 系统的平均电功率和制冷功率分别为 7.7 W 和 130~220 W, 对建筑夏季的制冷有积极的影响。

除了光伏系统与辐射冷却相结合, 热电与辐射冷却相结合也是一种很有潜力的制冷方式。众所周知, 热电冷却的能量转换效率低, 为了获得更高的效率, 与其他技术相结合是研究的发展趋势。Zhao 等^[55]设计了一种新型的辐射冷却辅助热电冷却(RSC-TEC)系统(图 8(c))。在美国洛杉矶的一栋两层住宅建筑进行了实验, RSC-TEC 系统提供一种可大规模在建筑物上使用的热电冷却技术。

4.2 被动式建筑节能

被动式节能则是通过建筑结构、建筑材料、采光和通风等方式实现节能。比如, 在建筑设计中采用隔热材料, 可以有效降低室内温度, 减少空调的使用时间。主动式节能需要人们通过设备或技术手段对能源进行主动干预, 通过单一的设备或者控制系统很难在建筑物中全方面地应用辐射冷却系统, 同时需要人员运行与后续的设备维护。被动式节能相对于主动式节能来说更灵活, 被动式节能不仅可以降低建筑设计和建造过程的成本, 符合现下绿色环保和可持续发展的要求, 同时其效果相对较稳定, 只与建筑结构或建筑材料有关。



P_{conv} —Convective thermal power; P_{cond} —Conducted thermal power; PE—Polyethylene; PV—Photovoltaic; Q_{in} —Quantity of heat; V1-V6—Controlled valves; P1-P2—Controlled pumps; T1-T4—Thermocouples; Q_{out} —Heat output

图 8 (a) 辐射冷却收集 (RadiCold) 模块示意图^[52]; (b) 光伏结合辐射冷却系统 (PV-RSC)^[54]; (c) 新型辐射冷却辅助热电 (RSC-TEC) 系统^[55]

Fig. 8 (a) Schematic diagram of the radiation cooling collection (RadiCold) module^[52]; (b) Photovoltaic combined with radiation cooling system (PV-RSC)^[54]; (c) Radiation cooling assisted thermoelectric (RSC-TEC) system^[55]

4.2.1 建筑涂料

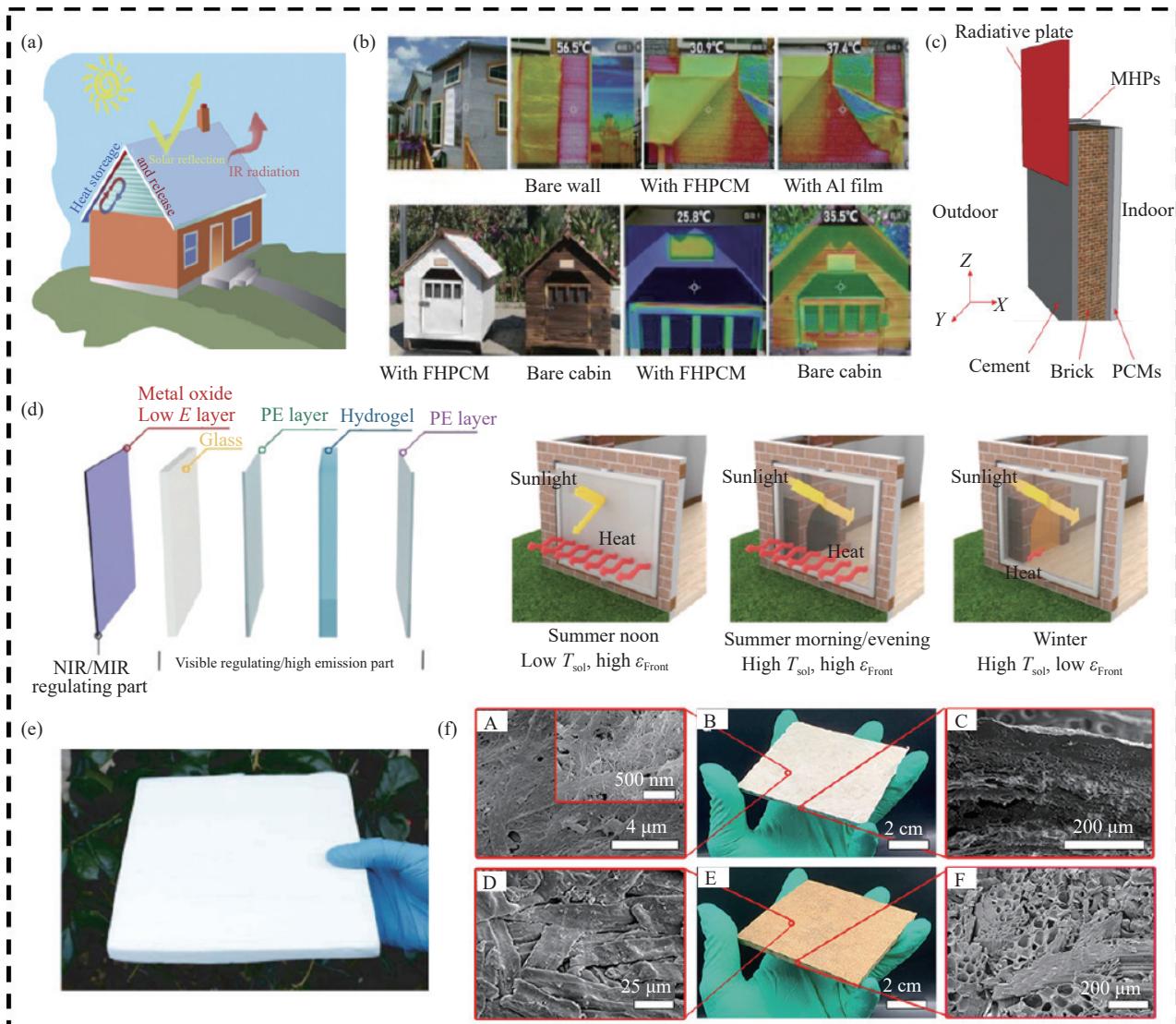
油漆形式的微粒具有易与建筑物的屋顶集成和成本低廉等优点，在建筑冷却应用中越来越受到关注^[56]，如图 9(a) 和图 9(b) 所示。Jiang 等^[38]新开发一种具有自清洁和超疏水功能的辐射冷却 PVDF/PDMS 复合涂层。该涂层采用一步刷涂法，其太阳反射率为 90.6%，红外发射率为 98.1%。在实际应用中，涂层往往都增加厚度来实现高效率的辐射冷却性能，这就会造成成本的浪费。为了解决辐射冷却性能与涂层厚度之间的矛盾，Dong 等^[57]提出在辐射冷却 (PDRC) 涂层引入掩盖层的新思路，带掩盖层的双层 PDRC 涂层在较低厚度 (200 μm) 下可获得较高的太阳反射率 (94.0%) 和红外发射率 (93.0%)。除了多层复合涂层的想法，也有引用特殊结构来增强辐射冷却性能。例如，Wu 等^[58]提出了一类具有可再生超疏水性的日间辐射冷却装甲结构涂层，涂层主要是由中空玻璃微球 (HGM) 和丙烯酸树脂 (FHA) 组成，典型的 HGM-FHA 涂层显示出 93% 的太阳反射率和 94% 的中红外发射率，可以有效地降低到环境温度以下 5°C。更重要的是，它们通过磨损可再次形成

超疏水表面，并重新获得自洁性能。当涂层磨损后，表面的 HGM 暴露出带有大量疏水片段的凹腔，从而产生粗糙的表面，保证高效率的超疏水功能。该涂料可以通过简单的喷涂工艺制备，并显示出对各种表面的良好附着力和优异的环境稳定性，可以期待其在不同户外环境中的直接应用。

4.2.2 建筑围护结构

辐射冷却材料大多只能用于建筑物表面，建筑物的主体部分依旧使用传统材料，这很大程度上限制了建筑物的整体冷却效率。因此，用于建筑围护结构的 PDRC 材料必须足够耐用、成本低廉和具有可扩展性，同时具有高效的冷却功率。建筑维护结构主要包括窗户、屋顶及建筑外墙等。

Zhong 等^[59]设计了一种由中空微纤维组成的隔热冷却器 (TIC)，作为建筑围护结构可以同时实现被动日间辐射冷却和隔热的性能，减少环境热增益。TIC 具有高效的太阳反射率 (94%) 和红外发射率 (94%)，在 900 W/m² 的阳光下产生约 9°C 的温度下降。值得注意的是，TIC 的导热系数低于空气的导热系数，可以防止热量在夏季从外部环境流向室内空间，具有节约建筑冷却能源的潜能。



FHPCM—Flexible hierarchically porous complex membrane; PCMs—Phase change materials; MHPs—Micro-channel heat pipes; ϵ —Emissivity; NIR/MIR—Near infrared/Mid infrared; T_{sol} —Solar transmittance; ϵ_{Front} —Infrared emissivity

图 9 辐射冷却材料在建筑领域的应用: (a) 原理示意图^[56]; (b) 外墙及屋顶涂料^[43]; (c) 墙体^[60]; (d) 智能窗户^[62]; (e) 冷却木材^[63]; (f) 冷却纤维素板材和纯木板材的 SEM 图像^[64]

Fig. 9 Application of radiative cooling materials in architecture: (a) Principle diagram^[56]; (b) Coating of exterior wall and roof^[43]; (c) Wall^[60]; (d) Intelligent window^[62]; (e) Cooling wood^[63]; (f) SEM images of the cooling lignocellulosic bulk and the pure wood fiber bulk^[64]

Shen 等^[60]为了减少建筑物围护结构的冷却负荷, 提出一种新颖的墙体(辐射冷却相变材料 RC-PCM), 如图 9(c) 所示。墙体由相变材料(PCM)、微通道热管(MHP)和辐射冷却系统(RC)组成。基于以上, 建立了 RC-PCM 壁的数学模型, 与现场测试结果非常吻合。测试结果显示, RC-PCM 壁的冷却负荷比相同厚度的砖墙低约 25%。Tang 等^[61]在现有辐射制冷材料的基础上, 提出辐射制冷玻璃复合结构, 建立了辐射制冷室内热环境评价模型。分析得出, 辐射冷却玻璃(RCG)白天室内温度比普通玻璃低 26.43°C 。Wang 等^[62]提出了一种

可切换的智能窗户, 见图 9(d)。这种窗户具有可切换的红外发射率 ϵ_{Front} (95%~100%)、高太阳辐射透过率 ΔT_{sol} (51%) 和较高的透光率 T_{lum} (72%), 以适应不同季节的热性能要求和节能要求。

4.2.3 其他建筑材料

Li 等^[63]通过脱木质素得到了性能优异、高强度的自降温木材, 内部多级纤维孔道和杂乱无序的孔洞使其具有较高的红外发射率, 在日间实现了 4°C 和夜晚 9°C 的降温效果(图 9(e))。通过对木材的节能效果进行模拟计算, 这种自降温木材可

以节省 20%~60% 的能源。Chen 等^[64] 将脱木质素的生物质纤维素和 SiO₂ 微球组装到 3D 网络主体中, 通过热压工艺获得一种混合结构材料(图 9(f))。生物质纤维素和 SiO₂ 形成整体结构, 使该材料能够全天 24 h 持续降温, 在白天和晚上分别可以实现 6°C 和 8°C 的降温。具有优异的机械强度和韧性, 其机械强度是纯木纤维材料的 8.7 倍, 还具有出色的阻燃性和户外抗菌性能, 为建筑领域的应用提供了更多的选择。Nie 等^[65] 制备一种添加玻璃气泡的混凝土涂层。玻璃气泡体积浓度从 0% 到 70% 会导致混凝土涂层太阳反射率从 6% 增大到 92%, 而红外发射率保持在 85% 以上。室外测量表明, 混凝土表面的涂层可以降低温度高达 25°C 且净冷却功率大于 78 W/m²。Zhu 等^[66] 提出一种双面热管理的策略, 通过在屋顶的外部和内部贴附具有独特波长选择性的可见透明薄膜, 当设定温度为 26°C 时, 外层可见透明薄膜可以节电 63% 的功率, 有利于辐射冷却材料建筑节能方面的应用。

5 总结与展望

传统的制冷系统虽然能够实现降温, 但其所使用的制冷剂和电力会加剧温室效应和能源消耗。被动日间辐射冷却是一种新型的绿色降温方式, 可以在不消耗能源的情况下实现降温。本文对近年来文献报道的辐射冷却材料进行了总结, 并系统论述影响冷却性能的主要因素: 聚合物材料、多层膜结构、随机粒子结构及特定多孔结构, 然后对主要制备技术进行了客观比较。最后, 阐述了辐射冷却材料在建筑领域的应用, 包括主动建筑节能和被动建筑节能。总的来说, 各式各样的辐射冷却材料或结构已经被提出, 它们的冷却性能已经在测试中得到了验证, 并且部分研究成果已经投入到实际使用中。然而, 对于现阶段建筑领域应用的商业化仍然面临诸多挑战:

(1) 从实验室到工厂大批量材料生产的转移存在难点。目前微纳米结构需要在实验室中使用价格昂贵且耗时的方法来制备, 如纳米光刻法和电子束蚀刻法等, 这使辐射冷却材料在建筑领域的大规模应用推广变得困难。此外, 复杂的三维结构制造技术仍然缺乏, 这限制了辐射冷却性能的进一步提升;

(2) 如何将辐射冷却技术与现有基础设施相结

合是商业化应用的另一个挑战。辐射冷却材料在使用中需要可以快捷地结合到建筑物、冷却系统或其他环境中。与不同环境的兼容性是建筑领域实际应用的关键要素。对于普通客户来说, 高冷却性能和简易安装就可以使用的产品还是缺乏, 如散装的建筑材料、贴纸或车膜等, 这些都是人们日常需要的产品;

(3) 成本依然是任何辐射冷却技术的核心问题。用最少的材料将太阳反射率和红外发射率最大化是辐射冷却技术追求的目标之一, 较高的材料成本则是辐射冷却材料在建筑领域应用的潜在障碍;

(4) 外界环境对于辐射冷却性能有着致命的影响。外界污染和破坏对所有辐射冷却材料都是一个巨大的挑战, 机械磨损或冲击会破坏辐射冷却材料的多孔结构, 导致太阳反射率和红外发射率下降, 很大程度上削弱了冷却效率;

(5) 单一冷却功能的辐射冷却材料往往无法满足现实生活的各种需求, 有必要开发集多功能于一体的辐射冷却材料, 其在建筑领域有着广阔前景, 如辐射制冷与相变调温、超疏水、耐高温和耐腐蚀等功能集成, 可以满足人们不同的需求。

针对上述问题, 辐射冷却材料在建筑领域的商业化应用可以从以下几个方面深入研究。首先, 有必要探索工艺简单且可大面积制备的生产技术, 优化制造技术及简化生产过程, 只有克服这些关键障碍, 才能使这项技术实现全方位商业化应用。其次, 进一步提高辐射冷却性能。将辐射冷却技术与其他类型的冷却技术(如蒸发冷却、液体冷却)结合, 形成综合冷却系统, 以提高整体的制冷效率和适应性。可以考虑改变材料的辐射特性来动态调节热辐射, 从而适应不同的环境条件和冷却需求, 通过材料的相变、电化学改变或其他智能响应机制来实现。此外, 建立辐射冷却性能材料在建筑领域的具体标准和法规。辐射制冷技术未来将朝着低成本、可大规模制备、高性能、长使用寿命及生态友好方向发展。

参考文献:

- [1] YU X, CHEN C. Coupling spectral-dependent radiative cooling with building energy simulation[J]. *Building and Environment*, 2021, 197: 107841.
- [2] GENTLE A R, SMITH G B. A subambient open roof surface under the mid-summer sun[J]. *Advanced Science*, 2015,

- 2(9): 1500119.
- [3] ZHANG Q, WANG S, WANG X, et al. Recent progress in daytime radiative cooling: Advanced material designs and applications[J]. *Small Methods*, 2022, 6(4): 2101379.
- [4] LIN K T, HAN J, LI K, et al. Radiative cooling: Fundamental physics, atmospheric influences, materials and structural engineering, applications and beyond[J]. *Nano Energy*, 2021, 80: 105517.
- [5] LI N, WEI L, YOU M, et al. Hierarchically structural TiO₂-PVDF fiber film with particle-enhanced spectral performance for radiative sky cooling[J]. *Solar Energy*, 2023, 259: 41-48.
- [6] WANG Y, WANG T, LIANG J, et al. Controllable-morphology polymer blend photonic metafoam for radiative cooling[J]. *Materials Horizons*, 2023, 10(11): 5060-5070.
- [7] WANG T, WU Y, SHI L, et al. A structural polymer for highly efficient all-day passive radiative cooling [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 365.
- [8] LIU J, MA W, DENG X, et al. Superhydrophobic nanoparticle mixture coating for highly efficient all-day radiative cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 228: 120490.
- [9] FENG J, ZHAI Q, ZHU Q. Research on improving heat dissipation of monocrystalline silicon solar cells based O-N radiation cooling[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(9): 12160-12172.
- [10] FENG J, GAO K, JIANG Y, et al. Optimization of random silica-polymethylpentene (TPX) radiative coolers towards substantial cooling capacity[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 234: 111419.
- [11] TIAN Y, SHAO H, LIU X, et al. Superhydrophobic and recyclable cellulose-fiber-based composites for high-efficiency passive radiative cooling[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(19): 22521-22530.
- [12] CHEN Z, ZHUL, RAMAN A, et al. Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24 h day-night cycle[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 13729.
- [13] CHAE D, KIM M, JUNG P H, et al. Spectrally selective inorganic-based multilayer emitter for daytime radiative cooling[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(7): 8073-8081.
- [14] ZHAI Y, MA Y, DAVID S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2017, 355(6329): 1062-1066.
- [15] CHEN C, JIA X, LI X, et al. Scalable wet-spinning of wearable chitosan-silica textile for all-day radiative cooling[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475: 146307.
- [16] FAN W, GAO Q, XIANG J, et al. Synergistic effect of silica aerogel and titanium dioxide in porous polyurethane composite coating with enhanced passive radiative cooling performance[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 183: 107763.
- [17] LEE D, GO M, SON S, et al. Sub-ambient daytime radiative cooling by silica-coated porous anodic aluminum oxide[J]. *Nano Energy*, 2021, 79: 105426.
- [18] MA H, YAO K, DOU S, et al. Multilayered SiO₂/Si₃N₄ photonic emitter to achieve high-performance all-day radiative cooling[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 212: 110584.
- [19] XIANG B, ZHANG R, LUO Y, et al. 3D porous polymer film with designed pore architecture and auto-deposited SiO₂ for highly efficient passive radiative cooling[J]. *Nano Energy*, 2021, 81: 105600.
- [20] CHEN X, HE M, FENG S, et al. Cellulose-based porous polymer film with auto-deposited TiO₂ as spectrally selective materials for passive daytime radiative cooling[J]. *Optical Materials*, 2021, 120: 111431.
- [21] CHEN Y, MANDAL J, LI W, et al. Colored and paintable bilayer coatings with high solar-infrared reflectance for efficient cooling[J]. *Science Advances*, 2020, 6(17): eaaz5413.
- [22] SUN L, LIU Z, HUANG H, et al. Flexible Al₂O₃/polymethyl methacrylate composite nanofibers for high-performance sun shading and radiative cooling[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 37: 106903.
- [23] RAMAN A P, ANOMA M A, ZHU L, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight[J]. *Nature*, 2014, 515(7528): 540-544.
- [24] MABCHOUR G, BENLATTAR M, SAADOUNI K, et al. Daytime radiative cooling purposes with selective multilayer design based on Ta₂O₅[J]. *Optik*, 2020, 214: 164811.
- [25] CHENG Z, HAN H, WANG F, et al. Efficient radiative cooling coating with biomimetic human skin wrinkle structure[J]. *Nano Energy*, 2021, 89: 106377.
- [26] DAS P, RUDRA S, MAURYA K C, et al. Ultra-emissive MgO-PVDF polymer nanocomposite paint for passive daytime radiative cooling[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(24): 2301174.
- [27] HUANG J, FAN D, LI Q. Structural rod-like particles for highly efficient radiative cooling[J]. *Materials Today Energy*, 2022, 25: 100955.
- [28] CAI H, FENG S, FENG M, et al. Coral-inspired asymmetrically porous radiative cooling biofilm with thermo-plastic polyurethane enhanced mechanical tolerance as building energy-saving envelope[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(12): 10053-10064.
- [29] MISHRA R K, MISHRA P, VERMA K, et al. Electrospinning

- production of nanofibrous membranes[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2018, 17(2): 767-800.
- [30] KONG L, SUN P, LIU J, et al. Superhydrophobic and mechanical properties enhanced the electrospinning film with a multiscale micro-nano structure for high-efficiency radiation cooling[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(13): 7886-7895.
- [31] JEON H, NA J H, KIM Y S, et al. Electrospinning-assisted radiative cooling composite films[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 255: 112316.
- [32] XIANG B, XU P, CHANG Y, et al. Biodegradable radiative cooling membrane based on electrospun silk fibroin fiber[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2023, 34(5): 1716-1722.
- [33] LI X, XU H, YANG Y, et al. Selective spectral absorption of nanofibers for color-preserving daytime radiative cooling[J]. *Materials Horizons*, 2023, 10(7): 2487-2495.
- [34] TSAI M T, CHANG S W, CHEN Y J, et al. Scalable, flame-resistant, superhydrophobic ceramic metafibers for sustainable all-day radiative cooling[J]. *Nano Today*, 2023, 48: 101745.
- [35] LI S, DU G, PAN M, et al. Scalable and sustainable hierarchical-morphology coatings for passive daytime radiative cooling[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2024, 7(1): 15.
- [36] ZHANG W, WANG Y, SUN H, et al. Thermal conductive high-density polyethylene/boron nitride composites with high solar reflectivity for radiative cooling[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2023, 6(5): 163.
- [37] GONG Q, LU L, CHEN J, et al. A novel aqueous scalable eco-friendly paint for passive daytime radiative cooling in sub-tropical climates[J]. *Solar Energy*, 2023, 255: 236-242.
- [38] JIANG T, FAN W, WANG F. Long-lasting self-cleaning daytime radiative cooling paint for building[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 666: 131296.
- [39] CAI X, WANG Y, LUO Y, et al. Rationally tuning phase separation in polymeric membranes toward optimized all-day passive radiative coolers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(23): 27222-27232.
- [40] LI B, CAO B, SONG R, et al. Low-cost and scalable sub-ambient radiative cooling porous films[J]. *Journal of Photonics for Energy*, 2023, 13(1): 015501.
- [41] MANDAL J, FU Y, OVERVIG A C, et al. Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2018, 362(6412): 315-319.
- [42] LI L, LIU G, ZHANG Q, et al. Porous structure of polymer films optimized by rationally tuning phase separation for passive all-day radiative cooling[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(5): 6504-6512.
- [43] WANG J, SUN J, GUO T, et al. High-strength flexible membrane with rational pore architecture as a selective radiator for high-efficiency daytime radiative cooling[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 7(1): 2100528.
- [44] LIU X, ZHANG M, HOU Y, et al. Hierarchically superhydrophobic stereo-complex poly(lactic acid) aerogel for daytime radiative cooling[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(46): 2207414.
- [45] ZHANG Y, WANG T, MEI X, et al. Ordered porous polymer films for highly efficient passive daytime radiative cooling[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(9): 3124-3132.
- [46] ZHAO X, LI T, XIE H, et al. A solution-processed radiative cooling glass[J]. *Science*, 2023, 382(6671): 684-691.
- [47] ZHANG J, YANG X, XU R, et al. An environmentally friendly porous PDMS film via a template method based for passive daytime radiative cooling[J]. *Materials Letters*, 2024, 357: 135686.
- [48] WU W, LIN S, WEI M, et al. Flexible passive radiative cooling inspired by Saharan silver ants[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 210: 110512.
- [49] WANG T, XIAO Y, KING J L, et al. Bioinspired switchable passive daytime radiative cooling coatings[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(41): 48716-48724.
- [50] LIU S, SUI C, HARBINSON M, et al. A scalable microstructure photonic coating fabricated by roll-to-roll “defects” for daytime subambient passive radiative cooling[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(17): 7767-7774.
- [51] JEON S K, KIM J T, KIM M S, et al. Scalable, patternable glass-infiltrated ceramic radiative coolers for energy-saving architectural applications[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(27): 2302701.
- [52] ZHAO D, AILI A, ZHAI Y, et al. Subambient cooling of water: Toward real-world applications of daytime radiative cooling[J]. *Joule*, 2019, 3(1): 111-123.
- [53] WANG W, FERNANDEZ N, KATIPAMULA S, et al. Performance assessment of a photonic radiative cooling system for office buildings[J]. *Renewable Energy*, 2018, 118: 265-277.
- [54] ZHANG C, CHEN L, ZHOU Z, et al. Cooling performance of all-orientated building facades integrated with photovoltaic-sky radiative cooling system in summer[J]. *Renewable Energy*, 2023, 217: 119193.
- [55] ZHAO D, YIN X, XU J, et al. Radiative sky cooling-assisted thermoelectric cooling system for building applications[J]. *Energy*, 2020, 190: 116322.
- [56] QIN M, XIONG F, AFTAB W, et al. Phase-change materials reinforced intelligent paint for efficient daytime radiative

- cooling[J]. *iScience*, 2022, 25(7): 104584.
- [57] DONG Y, ZOU Y, LI X, et al. Introducing masking layer for daytime radiative cooling coating to realize high optical performance, thin thickness, and excellent durability in long-term outdoor application[J]. *Applied Energy*, 2023, 344: 121273.
- [58] WU Q, CUI Y, XIA G, et al. Passive daytime radiative cooling coatings with renewable self-cleaning functions[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2024, 35(2): 108687.
- [59] ZHONG H, LI Y, ZHANG P, et al. Hierarchically hollow microfibers as a scalable and effective thermal insulating cooler for buildings[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(6): 10076-10083.
- [60] SHEN D, YU C, WANG W. Investigation on the thermal performance of the novel phase change materials wall with radiative cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 176: 115479.
- [61] TANG Y, TAO Q, CHEN Y, et al. Building envelopes with radiative cooling materials: A model for indoor thermal environment assessment based on climate adaptation[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 74: 106869.
- [62] WANG S, ZHOU Y, JIANG T, et al. Thermochromic smart windows with highly regulated radiative cooling and solar transmission[J]. *Nano Energy*, 2021, 89: 106440.
- [63] LI T, ZHAI Y, HE S, et al. A radiative cooling structural material[J]. *Science*, 2019, 364(6442): 760-763.
- [64] CHEN Y, DANG B, FU J, et al. Cellulose-based hybrid structural material for radiative cooling[J]. *Nano Letters*, 2020, 21(1): 397-404.
- [65] NIE X, YOO Y, HEWAKURUPPU H, et al. Cool white polymer coatings based on glass bubbles for buildings[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 6661.
- [66] ZHU Y, LUO H, YANG C, et al. Color-preserving passive radiative cooling for an actively temperature-regulated enclosure[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1) : 122.