高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

综述 / Review DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26302

聚合物基辐射冷却材料:从高性能光学设计到多功能集成

林 楚 毛泽鹏*

(南京工业大学材料科学与工程学院 南京 211816)

摘 要 聚合物基被动日间辐射冷却材料可通过聚合物本征红外发射、多尺度孔结构散射和无机功能填料复合，实现太阳光谱高反射与8~13 μm大气窗口高发射，并具有结构可调、柔性好和适于规模制备等优势。早期研究主要关注材料光谱性能的提升，但优异的初始光学性能并不能保证长期户外可靠性，污染沉积、紫外老化、机械磨损和季节性过冷仍制约其应用。近年来，关注重点逐步由光谱性能优化转向环境稳定性，并进一步延伸至动态热管理和特定场景的器件验证。本文沿这一递进脉络，综述材料的光谱调控机制、环境防护策略、动态热管理及多功能集成进展。针对长期可靠性评价不足、规模制备一致性欠佳、动态响应范围有限和多功能协同机制不清等问题，提出后续研究方向，为聚合物基辐射冷却材料由实验室样片走向长期服役和器件应用提供参考。

关键词 被动日间辐射冷却；光谱选择性调控；环境稳定性；多功能集成；动态热管理

Polymer-based Radiative Cooling Materials: From High-performance Optical Design to Multifunctional Integration

Chu Lin, Ze-peng Mao*

(*College of Materials Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816*)

Abstract Polymer-based passive daytime radiative cooling materials can achieve high solar reflectance and high emissivity within the 8–13 μm atmospheric window through the intrinsic infrared emission of polymers, scattering by multiscale porous structures, and incorporation of inorganic functional fillers. Their structures are readily tunable, while their flexibility and processability support scalable manufacturing. Early studies focused mainly on improving spectral performance. However, excellent initial optical properties do not ensure long-term outdoor reliability, as fouling, ultraviolet aging, mechanical abrasion, and seasonal overcooling continue to limit practical use. Research attention has therefore shifted from spectral optimization to environmental stability and, more recently, to dynamic thermal management and application-specific device validation. Accordingly, this review examines spectral control mechanisms, strategies for improving environmental durability, dynamic thermal management, and multifunctional integration. It also identifies gaps in long-term reliability assessment, inconsistent performance in scaled manufacturing, limited dynamic response ranges, and poorly understood coupling among functions, with the aim of supporting the transition from laboratory specimens to durable operation and device applications.

Keywords Passive daytime radiative cooling; Spectral selective regulation; Environmental stability; Multifunctional integration; Dynamic thermal management

引用: 林楚, 毛泽鹏. 聚合物基辐射冷却材料：从高性能光学设计到多功能集成. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26302

Citation: Lin, C.; Mao, Z. P. Polymer-based radiative cooling materials: from high-performance optical design to multifunctional integration. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26302

2026-06-22 收稿, 2026-08-03 录用

基金项目: 国家自然科学基金(基金号 22205106); 江苏省自然科学基金青年项目(基金号 BK20220362); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

* 通信联系人: 毛泽鹏, E-mail: maozepeng@njtech.edu.cn

随着全球气候变暖、极端高温事件频发以及建筑制冷需求持续增长，传统机械制冷带来的高能耗与碳排放问题日益突出[1~5]。在此背景下，被动日间辐射冷却(passive daytime radiative cooling, PDRC)因无需外部能量输入、具有低碳降温潜力，成为建筑节能与热管理领域的重要研究方向[6~9]。其基本原理是在太阳光谱范围内，即0.3~2.5 μm，实现高反射率以降低太阳热增益，同时在8~13 μm大气窗口波段实现高红外发射率，以增强物体向外太空的辐射散热能力，从而在日间条件下实现亚环境降温[10~14]。

近年来，光子晶体[15~19]、多层介质膜[20~22]、超材料结构[23,24]、无机颗粒复合涂层[25~28]及多孔聚合物[3,29~32]等材料体系已被广泛用于PDRC设计，并在太阳反射率和红外发射率调控方面取得了显著进展。其中，光子结构和多层介质膜通常具有较高的光谱选择性和设计精度，但其制备工艺复杂、成本较高，大面积应用仍面临一定限制[33,34]。相比之下，聚合物基辐射冷却材料具有组分可设计、结构易调控、柔性好、加工方式多样和适合大面积制备等优势，因此在建筑涂层、可穿戴织物、柔性器件和能源资源系统等场景中展现出更强的工程化应用潜力。

现有综述分别梳理了PDRC的基本原理与材料体系[10,35,36]、聚合物结构及制备方法[11,33,34]，并对可调、彩色和柔性辐射冷却材料进行了专题总结[12~14]。本文进一步关注这些研究环节之间的衔接，以光谱能量匹配、复杂环境可靠性、动态热管理和场景化器件验证组织全文。在光谱层面，太阳光子能量与聚合物带隙及消光行为的关系被用于解释本征吸收和多尺度散射如何共同影响太阳反射率。服役性能的讨论同时考虑表面浸润、力学耐久和耐候性，避免仅依据初始光谱数据评价材料。对于建筑围护、可穿戴织物、光伏、大气取水和湿气发电等原型器件，本文比较其光、热和物质传递条件，并明确区分材料性能、原型器件验证与工程应用。长期户外评价、标准化测试和规模化制备等问题也由这些场景中的实际约束引出。因此，本文不同于现有的综述以材料分类为主而是侧重于梳理聚合物材料由光谱设计走向器件验证时所面临的性能转化问题。

1 聚合物基辐射冷却材料的光学性能调控

1.1 太阳光谱的高反射调控

实现日间辐射冷却的首要条件，是尽可能降低材料在太阳光谱范围内，即0.3~2.5 μm的吸收，从而减少太阳热增益[35]。在实际评价中，材料对太阳辐射的整体反射能力通常采用太阳光谱加权平均反射率$\overline{R}_{\mathrm{solar}}$表征，其计算公式为[37]

$$\overline{R}_{\mathrm{solar}}=\frac{\int R(\lambda)\,I_{\mathrm{AM1.5}}(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda}{\int I_{\mathrm{AM1.5}}(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda} \tag{1}$$

式中，$R(\lambda)$为材料在波长λ处的光谱反射率，$I_{\mathrm{AM1.5}}(\lambda)$为标准AM1.5太阳光谱辐照度。该加权平均值能够直接反映材料在实际太阳辐照条件下降低太阳热增益的能力。

从能量尺度看，0.3~2.5 μm太阳辐射对应的光子能量由约4.13 eV降至0.50 eV，其中400~780 nm可见光的光子能量为3.10~1.59 eV。聚乙烯、聚丙烯、PMMA、含氟聚合物和PDMS等饱和非共轭聚合物的电子跃迁主要发生在紫外区，光学带隙通常高于可见光子能量，因而纯净材料在可见光区的本征吸收较弱，消光系数较低。进入近红外区后，C—H、O—H等化学键的振动泛频仍可能形成吸收带。聚合物中的共轭链段、发色团、氧化产生的羰基、杂质及缺陷态也会引入低能级跃迁，使吸收向可见光区延伸，增加太阳辐射吸收和热增益[36~39]。足够宽的带隙是抑制可见光电子跃迁吸收的基础，但仅凭带隙不能判断材料的整体太阳吸收性能，实际评价还需考虑全太阳波段的消光系数和膜层厚度。

从能量守恒角度看，材料在任一波长下的反射率$R(\lambda)$、吸收率$A(\lambda)$和透过率$T(\lambda)$满足[36]：

$$R(\lambda)+A(\lambda)+T(\lambda)=1 \tag{2}$$

对于不透明涂层、薄膜或织物体系，$T(\lambda)\approx 0$，因此有[36]：

$$R(\lambda)=1-A(\lambda) \tag{3}$$

在可见光波段，减弱聚合物吸收的本质是使光子能量低于允许电子跃迁阈值，并降低可见区消光系数k。材料设计上应优先选择饱和、非共轭、少发色团且高纯度的聚合物，避免共轭结构、着色杂质、过渡金属离子及紫外氧化产生的吸收中心；填料则宜选择$BaSO_4$、Al_2O_3、SiO_2等宽带隙介电材料。完成“低本征吸收”后，再利用孔隙/填料与基体的折射率差和与波长相当的多尺度结构增强Mie散射，使入射光以反射方式离开材料。需要强调的是，散射本身不消除吸收；当k较大时，多重散射增加光程反而可能放大寄生吸收，因此低k与强散射必须协同设计[38,39]。

上述提及的宽带隙介电材料，因其带隙能量高于太阳光子能量，在太阳波段通常表现出较低吸收[38]。同时，这类材料与聚合物基体之间的折射率差异，有利于形成有效散射界面，从而进一步增强太阳光反

射。对于平整表面，垂直入射下的光谱反射率R可通过菲涅耳公式计算[39]：

$$R=\left(\frac{n_1-n_2}{n_1+n_2}\right)^2 \tag{4}$$

其中，n_1和n_2分别为入射介质和材料的折射率。该公式表明，界面两侧折射率差异越大，单界面反射越强。然而，实际复合材料含有大量填料、孔隙和纤维界面，其太阳反射主要来自多重散射，其等效光学性质可通过有效介质理论进行近似描述。例如，Maxwell–Garnett有效介质理论可写为[40]：

$$\frac{n_{\mathrm{eff}}^2-n_m^2}{n_{\mathrm{eff}}^2+2n_m^2}=f_i\frac{n_i^2-n_m^2}{n_i^2+2n_m^2} \tag{5}$$

其中，n_{m}为基体折射率，n_{i}为分散相折射率，f_{i}为体积分数，n_{eff}为复合材料整体的有效折射率。该模型给出组成与等效折射率的关系，但颗粒尺寸、孔径、膜厚和分散状态仍需结合Mie理论及辐射传输模型分析。

在多孔、颗粒填充或纤维状聚合物材料中，Mie散射是实现宽带太阳反射的重要机制。当散射单元的尺寸与太阳光波长，即约0.3~2.5 μm，相当时，入射光可被有效散射。对于单个球形颗粒，其散射效率因子Q_{sca}可由Mie理论描述[39]：

$$Q_{\mathrm{sca}}=\frac{2}{x^2}\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)\left(|a_n|^2+|b_n|^2\right) \tag{6}$$

其中，a_n和b_n为尺寸参数x以及颗粒和基质相对折射率有关的Mie散射系数。尺寸参数x可表示为[37,39]：

$$x=\frac{2\pi r}{\lambda} \tag{7}$$

其中，r为颗粒或孔隙半径，λ为入射光波长。当x处于合适范围时，颗粒、孔隙或纤维可在太阳光谱范围内产生强散射。体系的散射系数可进一步表示为[39,41]：

$$\mu_{\mathrm{s}}=NC_{\mathrm{sca}}=NQ_{\mathrm{sca}}\pi r^2 \tag{8}$$

其中，N为散射体数密度，C_{sca}为单个散射体的散射截面，Q_{sca}为散射效率因子。由此可见，提高散射体数密度、优化散射体尺寸分布以及增大散射体与基体之间的折射率差异，均有助于缩短光在材料内部的传输平均自由程，从而增强多重弹性散射并形成高效漫反射。该策略尤其适用于聚合物涂层、薄膜和纺织品等大面积、低成本制备体系。

多层介质膜是早期PDRC器件实现光谱选择性调控的主要结构之一。Raman等[42]于2014年制备了由银反射层和七层HfO_2/SiO_2介质膜组成的辐射冷却器，并在屋顶环境中对其冷却性能进行了测试。图1(a)~图1(c)分别为该器件的户外测试装置、三维构型及剖面结构，图1(d)为辐射冷却器的多层结构示意图。其中，银反射层主要用于降低太阳辐射吸收，HfO_2/SiO_2光子结构则用于增强8~13 μm大气窗口内的热发射。该器件的太阳反射率约为97%，并在环境温度下实现了40.1 $W\cdot m^{-2}$的净冷却功率。

除精密光子结构外，颗粒散射也可获得较高的太阳反射率。Li等[41]于2021年制备的$BaSO_4$纳米颗粒薄膜利用颗粒尺寸分布及其与聚合物基体之间的折射率差增强宽波段散射，太阳反射率达到97.6%，户外平均冷却功率为117 $W\cdot m^{-2}$。

多孔聚合物提供了另一种结构较为简洁的设计方案。2018年，Mandal等[37]报道了一种具有分级孔结构的P(VDF-HFP)涂层。图1(e)为该涂层的表面及截面形貌，可见其内部含有不同尺度的孔隙。由于P(VDF-HFP)在太阳波段的本征吸收较低，分级孔结构能够进一步增强宽带散射；同时，其分子链振动可在中红外波段产生较强的热发射。图1(f)为该涂层的光谱反射率和发射率曲线。该涂层的太阳反射率达到96%，并在环境温度下获得了96 $W\cdot m^{-2}$的冷却功率。与多层介质膜相比，多孔P(VDF-HFP)涂层不需要精确控制各层厚度，也减少了对真空沉积设备的依赖。无机颗粒薄膜则介于两者之间，其光谱性能更多取决于颗粒尺寸、折射率差和分散状态。3种方案均能获得较高的太阳反射率，但对结构精度、制备设备和材料组成的要求并不相同。

在结构光学调控方面，多尺度散射结构进一步拓展了聚合物基材料的设计空间。Du等[43]将氧化镁(MgO)嵌入多孔醋酸纤维素基体中，利用孔隙和MgO颗粒的多重Mie散射，使纺织品太阳反射率达到94.6%，理论白天净冷却功率可达117.8 $W\cdot m^{-2}$。Felicelli等[44]开发的超白六方氮化硼(h-BN)丙烯酸涂料利用h-BN较高折射率和纳米片状形貌增强后向散射，使涂层在较小厚度下即可实现97.9%的太阳反射率。进一步地，Zhao等[45]提出三重尺度结构设计，将微米级聚合物颗粒、亚微米级颗粒间隙和纳米级表面孔隙相结合，使材料能够在不同太阳波长范围内产生有效散射，从而实现98%的太阳反射率。与上述漫散射体系不同，Zhu等[46]采用物理气相沉积与旋涂工艺构筑多层薄膜发射体，通过光子结构设计获得接近理想的太阳反射性能，并在约880 $W\cdot m^{-2}$太阳辐照下实现约12.6 °C的亚环境冷却。

聚合物材料的高太阳反射依赖低本征吸收和宽带散射。宽带隙介质或金属反射层降低光学损耗，多尺度孔隙、颗粒、纤维及层间界面则增强散射。前者

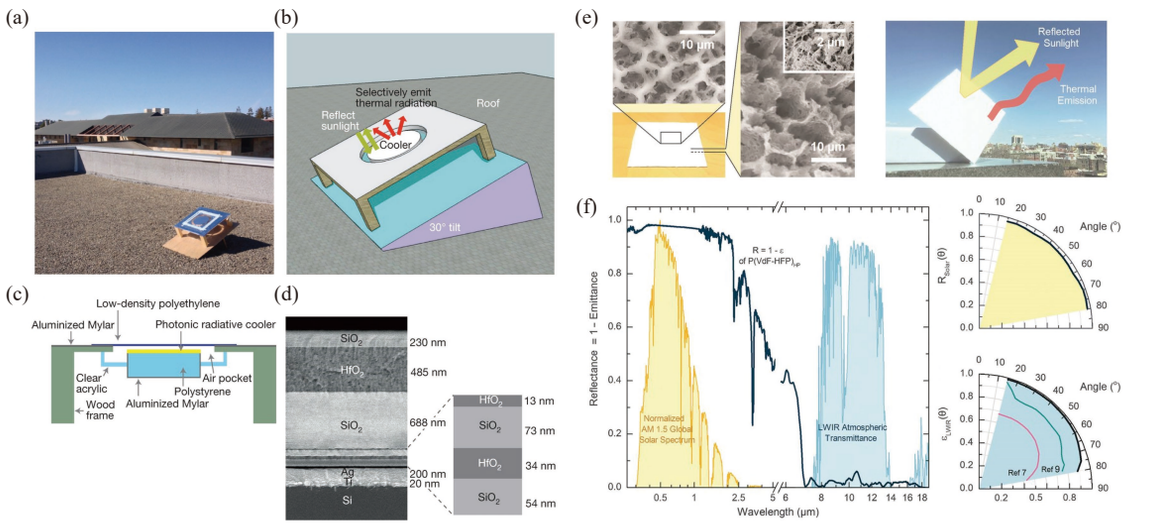

图 1 典型被动日间辐射冷却器的结构与光谱性能：(a)多层光子冷却器的屋顶户外测试装置；(b)倾斜30°的测试装置三维结构；(c)测试装置剖面；(d)由HfO_2/SiO_2介质层和Ag反射层组成的七层光子冷却器[42] (2014 Springer Nature版权许可)；(e)分级多孔P(VDF-HFP)涂层的表面与截面形貌及辐射冷却原理；(f)多孔P(VDF-HFP)涂层的光谱反射率和发射率[37] (2018 American Association for the Advancement of Science版权许可)

Fig. 1 Structural design and spectral performance of a typical passive daytime radiative cooler: (a) Rooftop outdoor test setup for a multilayer photonic cooler; (b) Three-dimensional structure of the test setup tilted at 30°; (c) Cross-section of the test setup; (d) Seven-layer photonic cooler comprising HfO_2/SiO_2 dielectric layers and an Ag reflector (Reprinted with permission from Ref. [42]; Copyright (2014) Springer Nature); (e) Surface and cross-sectional morphologies of a graded porous P(VDF-HFP) coating and its radiative cooling mechanism; (f) Spectral reflectance and emissivity of the porous P(VDF-HFP) coating (Reprinted with permission from Ref. [37]; Copyright (2018) American Association for the Advancement of Science)

需考虑氧化、成本和柔性适配性，后者还受散射体尺寸、膜厚、分散状态及污染影响。因此，增加孔隙或填料并不必然提高反射率，仍需协调消光系数、折射率差和散射尺度。

1.2 中红外波段的高发射率调控

中红外发射决定材料能否通过8~13 μm大气窗口向外太空有效散热[47]。因此，PDRC材料不仅需要在太阳波段降低吸收，还需要在大气窗口波段增强自身热辐射能力。PDRC材料跨太阳光谱与中红外波段的理想光谱曲线如图2所示。

当辐射冷却器暴露于日间天空下时，其热平衡过程同时受到自身热辐射、大气逆辐射、太阳辐射吸收以及非辐射换热的影响。若以单位面积净冷却功率密度表示，这种辐射冷却器的净冷却功率P_{cool}可由下式给出[42]：

$$P_{cool}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} - P_{cond+conv} \quad (9)$$

其中，$P_{rad}(T)$为材料自身向外发射的热辐射功率密度，$P_{atm}(T_{amb})$为材料吸收的大气热辐射功率密度，P_{sun}为材料吸收的太阳辐射功率密度，$P_{cond+conv}$为传导和对流引起的非辐射换热功率密度。只有当$P_{rad}(T)$大于其他热输入项之和时，材料才能获得净冷却效果。

材料自身的热辐射功率密度可表示为[37]

$$P_{rad}(T) = A\int d\Omega\cos\theta\int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T,\lambda)\,\varepsilon(\lambda,\theta) \quad (10)$$

其中，A表示辐射表面的面积，Ω表示半球空间角，θ为辐射方向与表面法线之间的夹角，$I_{BB}(T,\lambda)$为温度T下的黑体光谱辐射强度，$\varepsilon(\lambda,\theta)$为材料在波长$\lambda$和方向$\theta$下的光谱方向发射率。黑体光谱辐射强度由普朗克定律给出[48]：

$$I_{BB}(T,\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)}-1} \quad (11)$$

其中，h、c和k_B分别为普朗克常数(约6.626×10^{-34} J·s)、真空中的光速(约3×10^8 m·s^{-1})和玻尔兹曼常数(约1.381×10^{-23} J·K^{-1})。由式(10)和式(11)可知，材料的热辐射能力不仅取决于温度，还与其光谱发射率和方向发射特性密切相关。

材料吸收的大气逆辐射功率密度可表示为[42]：

$$P_{atm}(T_{amb}) = A\int d\Omega\cos\theta\int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T_{amb},\lambda)\,\varepsilon(\lambda,\theta)\,\varepsilon_{atm}(\lambda,\theta) \quad (12)$$

其中，$\varepsilon_{atm}(\lambda,\theta)$为大气在波长$\lambda$和方向$\theta$下的光谱方向发射率，$T_{amb}$为环境空气温度。由于大气在8~13 μm波段具有较高透过率，该波段内的大气逆辐射相对较弱，因此材料在该窗口内增强热发射有利于实现净辐射散热。

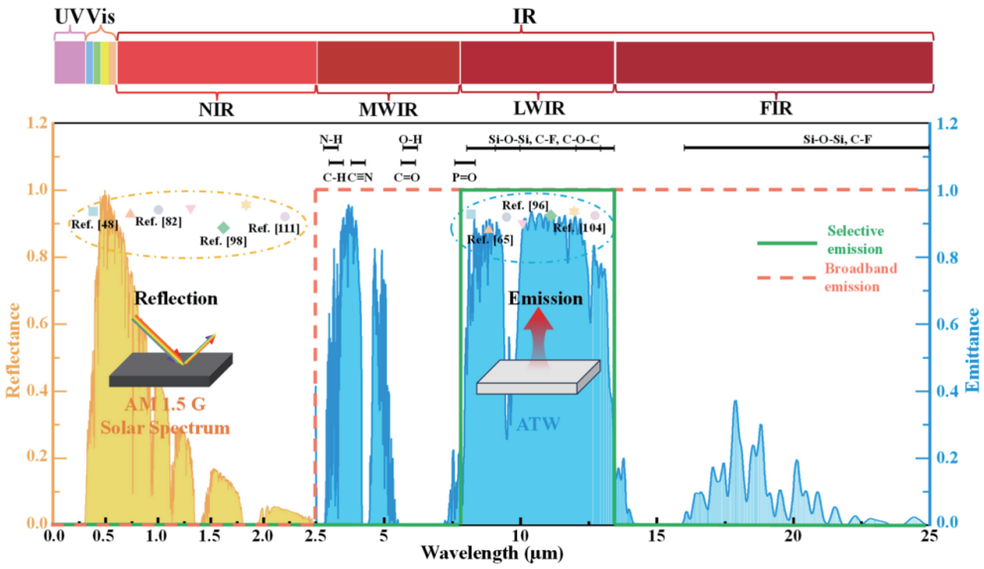

图 2 PDRC材料的理想光谱设计原则[11] (2025 Springer Nature版权许可)

Fig. 2 Ideal spectral-design principles for PDRC materials (Reprinted with permission from Ref. [11]; Copyright (2025) Springer Nature)

材料吸收的太阳辐射功率密度可写为[48]

$$P_{\mathrm{sun}} = A\int_{0}^{\infty} \mathrm{d}\lambda\, \varepsilon(\lambda,\theta_{\mathrm{sun}})\, I_{\mathrm{AM1.5}}(\lambda) \tag{13}$$

其中，$\varepsilon(\lambda,\theta_{\mathrm{sun}})$为物体在太阳入射方向$\theta_{\mathrm{sun}}$下的光谱方向吸收率。对于不透明材料，太阳波段的低吸收通常对应高反射，因此降低P_{sun}和提高R_{solar}是一致的。传导和对流引起的非辐射换热项可表示为[42,48]

$$P_{\mathrm{cond+conv}} = h_{\mathrm{c}}(T_{\mathrm{amb}} - T) \tag{14}$$

其中，$h_{\mathrm{c}} = h_{\mathrm{cond}} + h_{\mathrm{conv}}$为综合传导与对流换热系数。当材料温度低于环境温度时，非辐射换热通常表现为环境向材料输入热量；因此，在实际户外测试中，风速、空气湿度、安装方式和隔热条件都会影响测得的冷却效果。

根据基尔霍夫定律，在热平衡条件下，材料的光谱发射率等于其光谱吸收率，即[48]：

$$\varepsilon(\lambda,\theta) = \alpha(\lambda,\theta) \tag{15}$$

因此，增强材料在8~13 μm大气窗口内的红外吸收，本质上即可增强其在该波段的热发射。对于理想选择性辐射冷却器，应尽可能提高大气窗口内平均发射率，同时降低非窗口波段与大气之间的无效热交换。窗口内平均发射率可定义为[10]：

$$\bar{\varepsilon}_{\mathrm{win}} = \frac{\int_{8}^{13} \varepsilon(\lambda) I_{\mathrm{BB}}(\lambda, T_{\mathrm{s}})\, \mathrm{d}\lambda}{\int_{8}^{13} I_{\mathrm{BB}}(\lambda, T_{\mathrm{s}})\, \mathrm{d}\lambda} \tag{16}$$

窗口外平均发射率可表示为[49]

$$\bar{\varepsilon}_{\mathrm{out}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{8} \varepsilon(\lambda) I_{\mathrm{BB}}(T,\lambda)\, \mathrm{d}\lambda + \int_{13}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) I_{\mathrm{BB}}(T,\lambda)\, \mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{8} I_{\mathrm{BB}}(T,\lambda)\, \mathrm{d}\lambda + \int_{13}^{\lambda_2} I_{\mathrm{BB}}(T,\lambda)\, \mathrm{d}\lambda} \tag{17}$$

其中，λ_1和λ_2为实际红外光谱评价范围的上下限。对于理想选择性发射体系，理想情况是$\bar{\varepsilon}_{\mathrm{win}}$应尽可能趋近于1，而$\bar{\varepsilon}_{\mathrm{out}}$应尽可能降低，从而最大化$P_{\mathrm{cool}}$。

中红外高发射主要来源于聚合物分子振动和极性无机介质的声子极化共振。聚合物中的C－O－C、C－F和Si－O－Si等红外活性键在大气窗口附近具有特征吸收，因此PDMS、P(VDF-HFP)和PMMA通常表现出较高的红外发射率。SiO_2、SiC等极性介质则通过晶格振动与红外电磁场耦合，在Reststrahlen波段形成吸收或发射峰。将其引入聚合物基体，可弥补部分波段的发射不足，并提高光谱调控能力。此外，多孔结构和多相界面能够延长光程、增加有效吸收并调节局域电磁场，进而影响中红外发射。因此，中红外光谱设计应统筹聚合物分子振动、无机颗粒声子共振与多相结构效应。

基于上述机制，研究者发展了多种兼具太阳反射和红外发射能力的复合体系。Zhou等[50]利用糖模板法制备多孔PDMS海绵，多孔结构增强太阳光散射，而PDMS分子中的Si－O－Si振动吸收赋予材料约96%的红外发射率。Jiang等[51]制备的PDMS/聚偏氟乙烯(PVDF)复合涂层则利用聚合物基体的本征红外发射特性，并引入不同尺寸的聚四氟乙烯颗粒，在增强太阳散射的同时进一步提高大气窗口发射率，最

终实现98.9%的平均发射率。Ren等[52]通过Pickering乳液模板和冷冻干燥策略构筑纤维素纳米纤维(CNF)基复合气凝胶，其中CNF和PDMS提供本征红外吸收，SiO_2纳米颗粒则通过晶格共振增强大气窗口发射，使复合气凝胶红外发射率达到98.5%。Wang等[53]以5 μm和200 nm SiO_2颗粒为双尺度牺牲模板，经PMMA溶液滴涂、挥发成膜、剥离和刻蚀，制得兼具规则微米孔与随机纳米孔的层级多孔薄膜。图3(a)是该薄膜的制备过程。图3(b)和3(c)分别是PMMA_HPA薄膜的光谱反射率和发射率，其太阳光谱平均反射率约为95%，长波红外发射率约为98%。图3(d)和3(e)是PMMA的折射率和消光系数，其太阳波段消光系数较低，而中红外区存在多个振动吸收峰。图3(f)是PMMA_HPA薄膜的红外吸收光谱，其中C－H、C＝O和C－O－C等化学键的振动有利于提高8~13 μm大气窗口内的热发射。图3(g)是光在层级孔结构中多次反射和散射的示意图，表明多尺度孔隙可增强太阳光散射。该设计通过孔隙散射和分子振动分别调控太阳与中红外波段，无需精密多层膜即可兼顾高太阳反射和红外发射。

由此可见，聚合物链段的振动吸收决定了材料的基本红外发射特征，无机填料的声子共振和多相

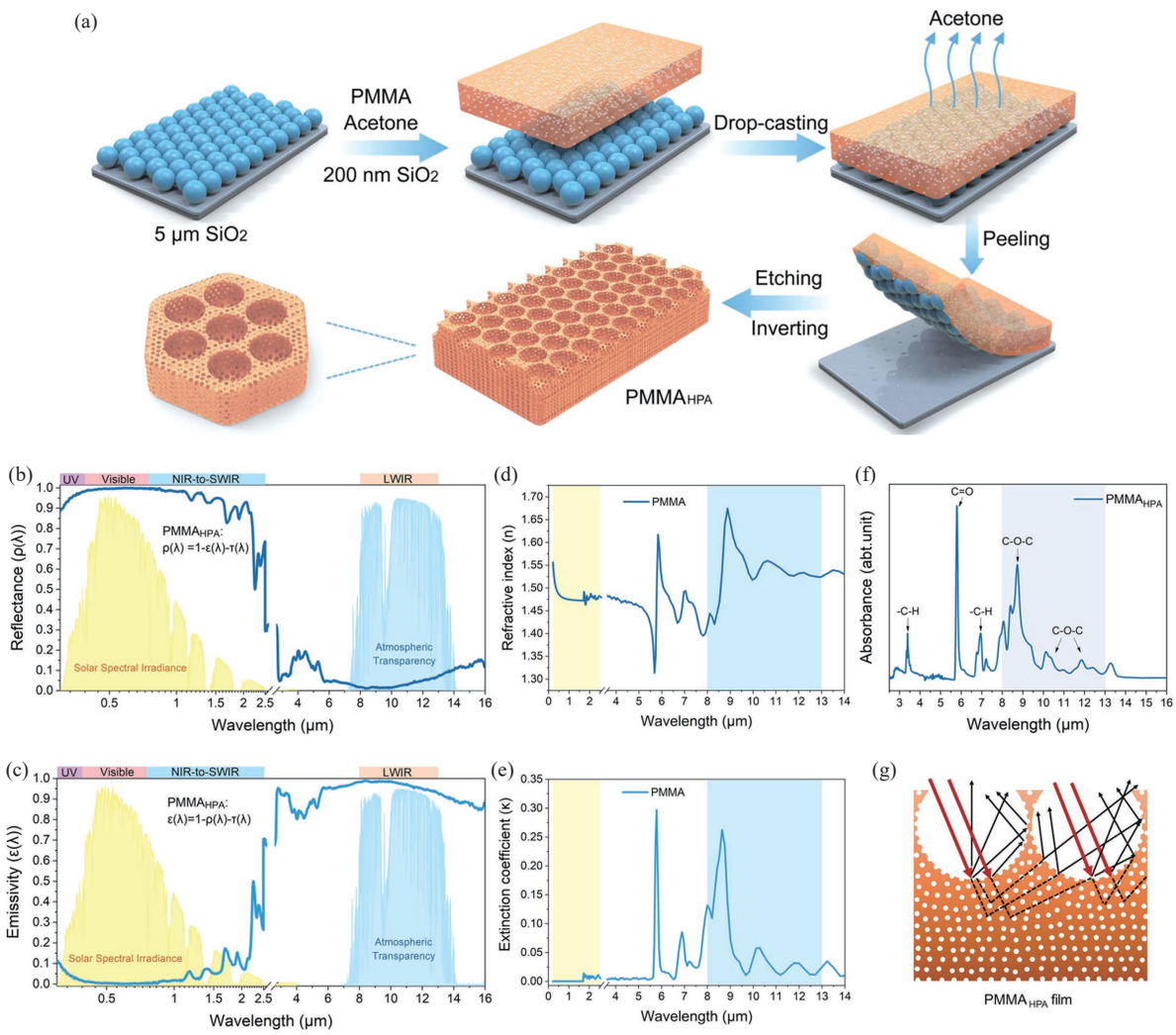

图 3 层级多孔PMMA薄膜的制备、光谱性能及辐射调控机制: (a)以微米和纳米SiO_2颗粒为模板的制备过程; (b, c) PMMA_HPA薄膜的光谱反射率和发射率; (d, e) PMMA的折射率和消光系数; (f) PMMA_HPA薄膜的红外吸收光谱及主要化学键振动吸收峰; (g)层级孔结构中的多重反射与散射[53] (2021 Springer Nature版权许可)

Fig. 3 Preparation, spectral properties, and radiative regulation mechanisms of hierarchically porous PMMA films: (a) Fabrication using micron- and nanometre-sized SiO_2 particles as templates; (b, c) Spectral reflectance and emissivity of the PMMA_HPA film; (d, e) Refractive index and extinction coefficient of PMMA; (f) Infrared absorption spectrum of the PMMA_HPA film and its principal bond-vibration absorption peaks; (g) Multiple reflections and scattering within the hierarchical pore structure (Reprinted with permission from Ref. [53]; Copyright (2021) Springer Nature)

界面则会改变发射峰的位置、强度及带宽。具体的光谱设计取决于使用场景。建筑涂层一般可利用宽带高发射强化散热，而可穿戴材料和低温应用更关注8~13 μm大气窗口内的选择性发射及其动态调节。仅报告窗口发射率不足以判断实际冷却效果，非窗口辐射会增加与环境之间的无效热交换，材料厚度和热导率影响内部热量向表面的传递，环境湿度还会改变大气窗口的透过率。因此，这些因素应与红外发射光谱一并评价。

2 复杂环境下的稳定性强化策略

近10年来，聚合物辐射冷却材料的材料遴选与结构设计日趋成熟，光谱性能和冷却功率持续提高，但实验室获得的高反射率和高发射率并不能保证长期户外稳定性。灰尘沉积和水膜覆盖会改变材料的太阳光谱响应与红外发射，紫外老化、机械磨损、湿热循环及热疲劳则可能造成微纳结构损伤、涂层开裂脱落或孔结构坍塌。因此，该领域的研究重点正由理想光谱优化转向复杂环境下的长期服役可靠性。

2.1 表面浸润性设计

受荷叶效应启发，研究者常将微纳分级粗糙结构与低表面能组分相结合，使辐射冷却材料获得水接触角大于150°、滚动角小于10°的超疏水表面。水滴滚落可带走灰尘并抑制连续水膜形成，从而减轻污染沉积和水膜覆盖对太阳反射及红外发射的影响。因此，浸润性调控是提高材料户外光谱稳定性的有效途径。

在具体实现路径上，早期超疏水辐射冷却涂层多采用在聚合物多孔基体中引入无机散射颗粒的策略，并通过溶剂交换、相分离或模板法同步构建内部散射孔道和表面粗糙形貌。例如，Wang等[54]采用溶剂交换法，在三元乙丙橡胶(EPDM)基体中构筑微米级多孔结构并富集疏水SiO_2颗粒，制得兼具辐射冷却和超疏水自清洁功能的复合薄膜。该薄膜太阳反射率达96%，大气窗口平均发射率达95%，水接触角达到162°，滚动角仅为1.2°。为简化制备流程，Zhou等[55]以氟化乙烯丙烯共聚物(FEP)为成膜基体、改性Al_2O_3颗粒为功能填料，通过喷涂结合相分离的一步成型策略制备复合涂层。Al_2O_3颗粒和FEP微孔结构的协同作用赋予涂层96%的太阳反射率和96.3%的大气窗口发射率，表面微纳粗糙结构使其水接触角达到159.3°，并在直射阳光下实现4.9 °C的亚环境温降和81.2 $W·m^{-2}$的冷却功率。两者相比，后者更强调工艺简化和喷涂适配性，对实际大面积应用更具参考价值。

在此基础上，研究者进一步通过表面微结构与功能组分的协同设计，赋予超疏水辐射冷却材料更丰富的功能。Zhou等[56]采用模板成型方法制备分层图案化纳米多孔复合材料，以纳米多孔聚合物为基体并嵌入氧化锌(ZnO)等功能填料，表面构筑微米级柱状阵列。在强太阳辐照下，该材料可使人体和建筑模型分别实现7.8和4.4 °C的温降，微米图案结构则赋予其158°的水接触角。Hu等[57]通过相转化法将沸石咪唑酯骨架-8(ZIF-8)颗粒引入PVDF-PMMA基体，构筑具有珊瑚状分级多孔结构的辐射冷却复合薄膜。该薄膜太阳反射率达到92.6%，中红外发射率达到99.1%，同时具有157.5°的水接触角和2°的滚动角。Wang等[58]将光谱调控与表面防护集成于荧光三层聚合物涂层，用于亚环境彩色辐射冷却。图4(a)是涂层结构及光谱调控机制，其中$BaSO_4$纳米颗粒增强可见光和近红外散射，荧光粉及光子结构通过光谱转换与Purcell增强效应调节可见光发射，聚合物基体则提供中红外热辐射，使涂层在呈现红、黄、绿等颜色时仍保持较高的等效太阳反射率和红外发射率。图4(b)~4(d)分别是涂层的水接触角、防污行为和表面层级结构。硅烷化SiO_2颗粒形成的粗糙表面具有157°水接触角，可抑制污染液滴铺展。图4(e)和4(f)分别是砂纸磨损和水流冲击过程中的浸润性变化。经过100次砂纸磨损后，尽管滑动角升高，涂层仍保持较高的水接触角；经300 s水流冲击后，其润湿状态基本稳定。图4(g)是该涂层与商业彩色涂层的综合性能比较。该研究表明，彩色辐射冷却涂层需统筹太阳散射、荧光转换、中红外发射和表面耐久性，但其长期可靠性仍需通过紫外老化、湿热循环及真实污染环境测试验证。

综合上述研究，超疏水处理可以减少灰尘沉积和连续水膜对光谱性能的干扰，其耐久性取决于表面化学组分与微纳粗糙结构能否长期保持。紫外照射可能引起低表面能组分分解，机械磨损和水流冲击则会破坏表面形貌，使接触角下降或滑动角升高。初始接触角只能反映材料制备后的润湿状态，难以说明其在长期服役中的自清洁能力。较为完整的评价应记录紫外老化、磨损循环和酸碱处理后接触角、滑动角及自清洁效率的变化，并通过真实户外暴露检验实验室加速测试结果。

2.2 力学耐久性与耐候性强化

超疏水表面的构筑为抵御颗粒污染和液态水侵蚀提供了有效途径，但实际户外服役还要求材料能

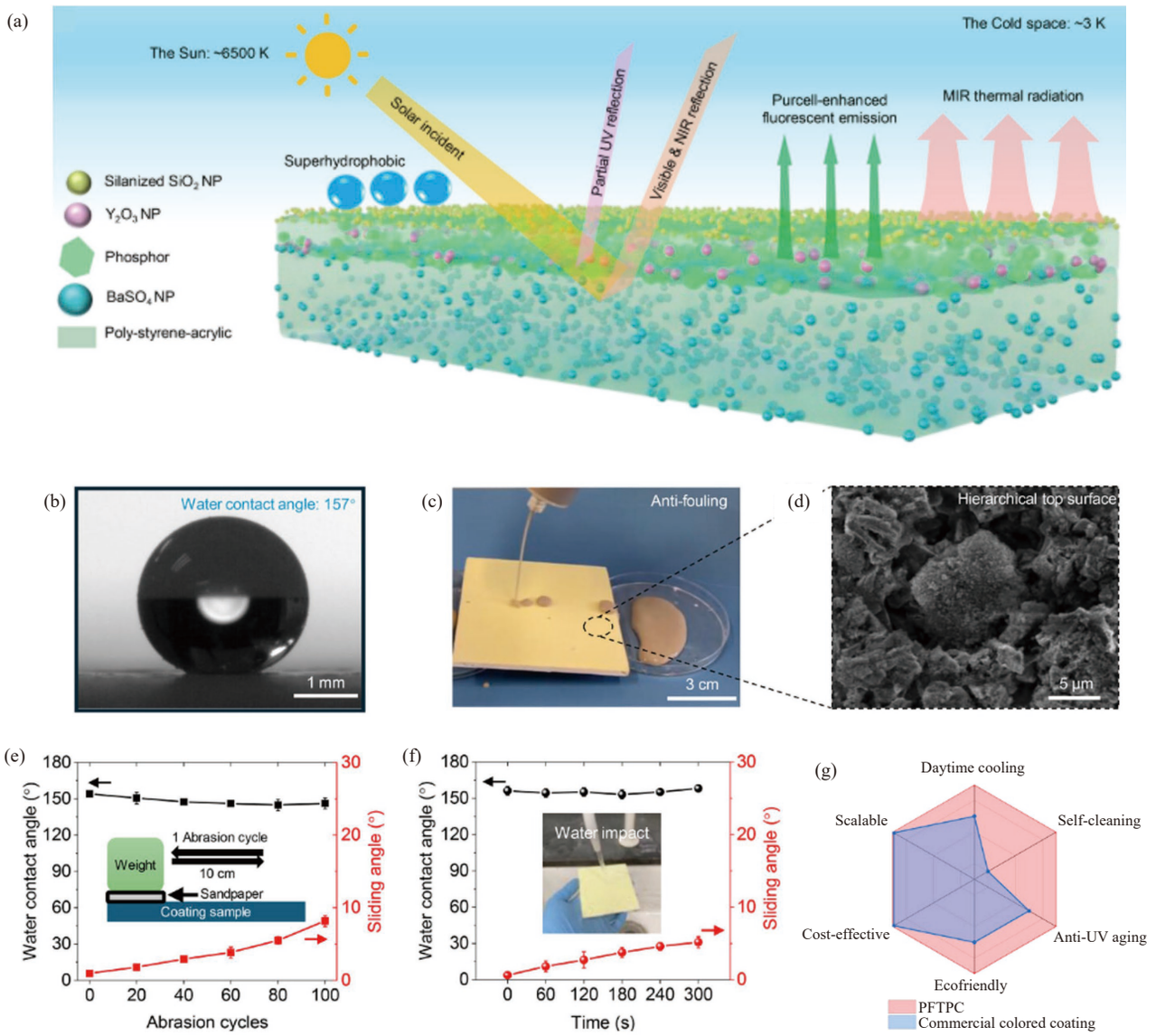

图 4 光子工程化荧光三层聚合物涂层的结构、光热调控机制及表面耐久性：(a)涂层组成及太阳反射、荧光发射和中红外热辐射机制；(b)表面水接触角；(c)防污性能；(d)超疏水表面的层级微纳结构；(e, f)砂纸磨损和持续水流冲击过程中水接触角与滑动角的变化；(g)与商业彩色涂层的综合性能比较[58] (2025 Wiley-VCH版权许可)

Fig. 4 Structure, photothermal regulation mechanisms, and surface durability of a photonically engineered fluorescent three-layer polymer coating: (a) Coating composition and mechanisms of solar reflection, fluorescence emission, and mid-infrared thermal radiation; (b) Surface water contact angle; (c) Antifouling performance; (d) Hierarchical micro- and nanostructure of the superhydrophobic surface; (e, f) Changes in water contact and sliding angles during sandpaper abrasion and continuous water jet impact; (g) Overall performance compared with a commercial coloured coating (Reprinted with permission from Ref. [58]; Copyright (2025) Wiley-VCH)

够承受力学和气候因素的长期作用。力学耐久性主要涉及涂层附着力、抗刮擦、抗弯折、抗拉伸和抗疲劳性能；耐候性则包括抗紫外老化、耐湿热循环、耐酸碱腐蚀和抗热疲劳等方面。因此，在表面自清洁之外，如何保持材料微纳结构、化学组成和光谱性能在长期服役中的稳定，是辐射冷却材料工程化应用的关键问题。

Meng等[59]以甲基丙烯酸甲酯为单体、乙二醇二甲基丙烯酸酯(EDMA)为交联剂，通过一步热聚合制备了由相互连接的纳米球状单元组成的多孔聚合物涂层。该涂层太阳反射率达97.6%、红外发射率达98.3%，在820 W m^{-2}太阳辐照下可实现8.4 °C的亚环境温降。EDMA交联剂构建的高度交联网络赋予涂层优异的力学稳定性，而纳米球状粗糙结构使其具有165°水接触角与2.4°滑动角的超疏水自清洁特性。更重要的是，该涂层在紫外老化与酸碱腐蚀后仍能

维持冷却性能，并可研磨成粉末后以涂料形式大面积喷涂施工。

与通过化学交联提升耐久性的策略不同，Wang等[60]从自然界柳枝的分级构造中获得启示，提出结构仿生的协同增强方案。该研究通过同轴静电纺丝与溶胶–凝胶水热生长，制备了以聚丙烯腈(PAN)为芯层、3-氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)改性聚氨酯(APU)为壳层、原位水解SiO_2为表皮层的三轴PAN@APU-SiO_2纳米纤维膜。该膜太阳反射率达到91.23%、中红外发射率为92.2%，净冷却功率89.99 $W·m^{-2}$，并可实现7.8 °C亚环境温降。PAN芯层与APU壳层的协同赋予纤维膜优异的抗疲劳特性，300次拉伸循环后仍保持一定拉伸强度。表皮层疏水SiO_2原位构筑的微纳粗糙结构则赋予其超疏水自清洁功能。

与合成聚合物基仿生策略相呼应，Jiang等[61]受穿山甲鳞片多级层状结构启发，以羧甲基化纤维素纸为基体，通过原位生长多孔核壳ZnO@ZIF-8颗粒，开发了仿生纤维素基辐射冷却复合纸。ZnO@ZIF-8与纤维素网络之间的紧密结合构筑了稳定的分级孔结构，使材料同时具有98.2%的太阳反射率和96.5%的热发射率，并在阳光直射下实现15.4 °C的亚环境温降。纤维素网络与ZnO@ZIF-8的原位锚固赋予材料16.8 MPa的拉伸强度，同时兼具超疏水、抗紫外及生物可降解等多重功能。类似地，Kong等[62]通过静电纺丝制备了ZrO_2/PDMS/PVDF复合纤维膜(ZrPF)。PDMS将ZrO_2颗粒锚定于PVDF纤维表面，形成多尺度粗糙结构。图5(a、b)分别是ZrPF膜与对照样品的光谱反射率和发射率，以及折射率和消光系数，表明该膜具有较高的太阳反射率和中红外发射率。图5(c)和5(d)分别是不同纤维膜的应力-应变曲线及拉伸性能比较。受益于PDMS对纤维网络的界面黏结，ZrPF膜的拉伸强度和断裂应变较原始PVDF膜分别提高约9.5和4.4倍。图5(e)~5(h)分别是水接触角、大面积自支撑薄膜、不同弯曲状态下的柔性和水汽透过性能。该膜的水接触角达到153.3°，滑动角约为5°，并具有良好的柔性和透湿性。该研究表明，多尺度纤维结构、无机颗粒散射和聚合物界面黏结的协同设计，可同时改善辐射冷却膜的光学性能、力学稳定性和表面防污能力。

从强化路径看，耐久性提升需要同时考虑材料内部结构和外界老化作用。交联可提高聚合物网络的内聚强度，界面增强有助于减少填料脱落和层间剥离，纤维或仿生结构则可分散局部应力。对于紫外照射和腐蚀环境，还需通过稳定剂、紫外吸收组分或耐腐蚀材料延缓化学结构劣化。现有研究在辐照剂量、磨损方式、温湿度条件和循环次数等方面差异较大，光谱保持率难以横向比较。较为统一的评价方法应明确老化条件，并报告测试前后的太阳反射率、红外发射率及结构变化。将这些衰减数据与户外暴露时间、失效阈值和环境参数结合，才能进一步判断材料结构损伤与实际服役寿命之间的关系。

3 动态热管理与场景化验证

高太阳反射率、高红外发射率和环境稳定性是辐射冷却材料户外应用的基础，但不同场景的热管理需求会随时间和环境变化。建筑围护结构需兼顾夏季冷却与冬季、夜间保温，个人热管理还涉及汗液蒸发、空气对流和织物舒适性，光伏、电池、淡水收集及湿气发电系统则强调材料与器件之间的光热传递。因此，该领域正由静态冷却性能优化转向面向具体场景的动态调控与系统集成。

3.1 建筑节能中的自适应热管理

建筑围护结构是辐射冷却材料最具应用潜力的场景之一。然而，传统静态辐射冷却材料在夏季有助于降低建筑冷负荷，但在冬季、夜间或寒冷地区可能造成额外热损失。因此，建筑应用不仅要求材料具有高太阳反射率和高红外发射率，还需要其能够根据环境温度、太阳辐照或季节变化实现冷却/保温状态切换。

针对传统静态辐射冷却材料在寒冷季节可能导致热损失的问题，近年来研究者开始发展具有冷却/加热双模式切换能力的自适应辐射冷却材料。Zhou等[63]报道了一种可大面积喷涂的双模式热管理涂层。该涂层以羧基化竹纤维素纳米纤维(C-CNFs)为基底，通过原位矿化形成无定形碳酸钙(ACC)微异质结构，并引入热致变色微粒(TMP)，构筑C-CNFs/ACC/TMP复合体系。如图6(b)所示，在高温状态下，涂层呈白色，表现出约92%的太阳反射率和93%的长波红外发射率；在低温状态下，热致变色单元改变材料的太阳吸收行为，从而增强吸热能力。实验结果表明，该涂层在冷环境下比白色样品高2.5 °C，在热环境下则低8.7 °C。该工作的意义在于将“夏季拒热”和“冬季吸热”整合到同一涂层体系中，并通过喷涂工艺提升了其在建筑外墙、屋顶和帐篷等大面积场景中的应用潜力。

对于玻璃屋顶、采光墙和温室等透明建筑构件而言，辐射冷却材料还需兼顾透光、眩光控制、隐私

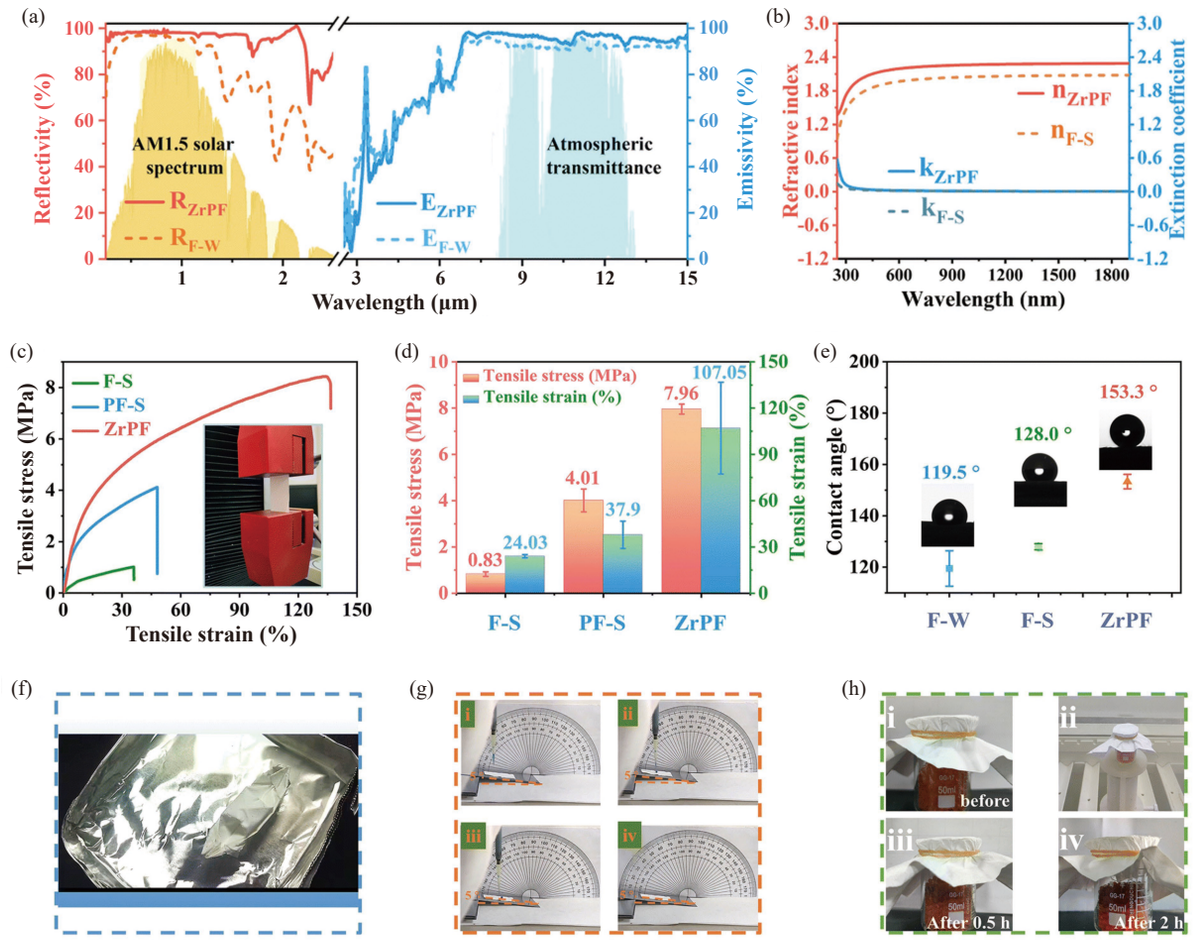

图 5 ZrPF静电纺丝复合膜的光学与力学性能、表面浸润性及应用适配性：(a, b) ZrPF薄膜与对照样品的光谱反射率、发射率、折射率和消光系数；(c, d)不同静电纺丝膜的应力–应变曲线、拉伸强度和断裂应变；(e)水接触角；(f)大面积自支撑薄膜实物；(g)不同弯曲状态下的柔性；(h)水蒸气透过性能[62] (2024 The Royal Society of Chemistry版权许可)

Fig. 5 Optical and mechanical properties, surface wettability, and application suitability of ZrPF electrospun composite films: (a, b) Spectral reflectance, emissivity, refractive index, and extinction coefficient of ZrPF films and controls; (c, d) Stress-strain curves, tensile strength, and strain at break of the electrospun films; (e) Water contact angles; (f) Photograph of a large-area self-supporting film; (g) Flexibility under different bending conditions; (h) Water vapour permeability (Reprinted with permission from Ref. [62]; Copyright (2024) The Royal Society of Chemistry)

保护和表面自清洁。Huang等[64]于2024年报道了一种聚合物基微光子多功能超材料，其表面由微米级方锥结构组成。如图6(a)所示，该结构一方面通过多次反射与散射实现太阳光漫射，可将73%的入射阳光转化为漫射光，同时保持约95%的可见光透过率；另一方面，材料在8~13 μm波段具有约98%的高发射率，在环境温度下的理论冷却功率约为97 $W \cdot m^{-2}$，并在潮湿环境中实现了约6 °C的亚环境温降。此外，微锥结构类似荷叶表面微结构，使材料水接触角达到152°，表现出良好的自清洁潜力。该研究说明，建筑应用中的辐射冷却材料不应仅追求“不透光白色屋顶涂层”，还可以发展为兼具采光、漫射、降温和自清洁功能的透明/半透明围护材料。

建筑原型中的动态辐射冷却通常采用两种调控方式。太阳吸收率或反射率的切换直接改变建筑表面的日间得热，中红外发射率的变化则调节其与外部环境之间的辐射换热。只有当响应温度与当地气候及建筑热负荷相匹配时，自适应材料才可能兼顾夏季降温与寒冷季节的保温需求。原型测试还需关注反复切换后的光谱和热性能是否稳定。进一步用于建筑表面时，材料的颜色与外观、制造成本，以及大面积施工后的膜层均匀性和响应一致性也会影响实际应用效果。

3.2 可穿戴织物的人体热舒适调控

与建筑围护结构不同，可穿戴辐射冷却材料直接作用于人体皮肤表面，其热管理过程涉及人体辐射散热、汗液蒸发、空气对流以及织物传导等多种机制。因此，面向人体热舒适的辐射冷却织物不仅需要

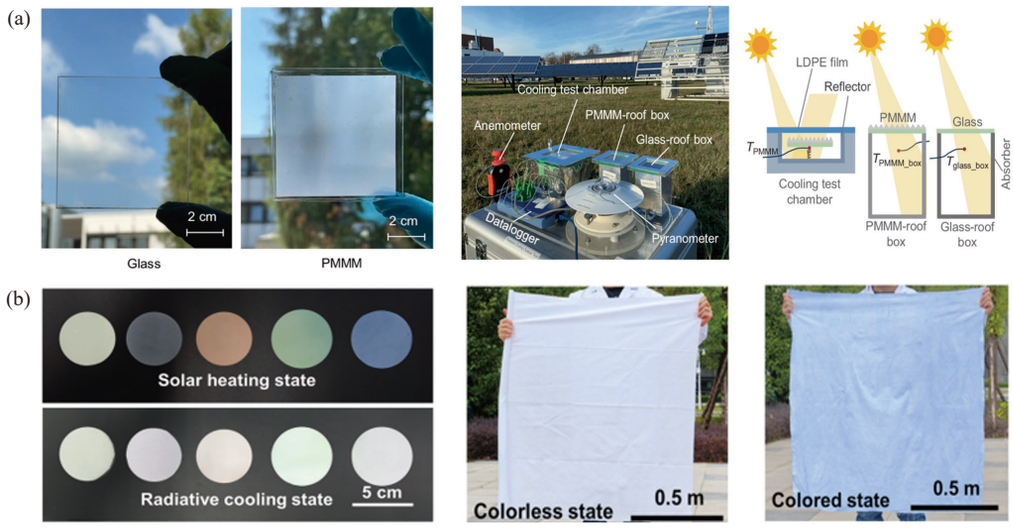

图 6 建筑用透明与温度响应型热管理材料及其性能展示：(a)玻璃、微结构PMMA薄膜及户外冷却测试平台[64] (2024 Springer Nature版权许可)；(b) CCTM涂层和织物在温度转变前后的颜色变化[63] (2025 Springer Nature版权许可)

Fig. 6 Transparent and temperature-responsive thermal management materials for architectural applications and a demonstration of their properties: (a) Glass, microstructured PMMA film and an outdoor cooling test platform (Reprinted with permission from Ref. [64]; Copyright 2024 Springer Nature); (b) Colour changes in CCTM coatings and fabrics before and after the temperature transition (Reprinted with permission from Refs. [63]; Copyright (2025) Springer Nature)

具备高太阳反射率或良好的中红外调控能力，还必须满足柔软、透气、透湿、耐洗和可穿戴等服用性能要求。如何在光谱性能与纺织品舒适性之间取得平衡，是该方向区别于建筑涂层和器件散热材料的核心问题。

在可穿戴辐射冷却材料中，如何同时适应户外太阳辐照和室内人体散热环境是一个关键问题。Wu等[65]报道的聚甲醛(POM)纳米织物提供了一种代表性设计思路。该织物通过光谱选择性设计，在8~13 μm大气窗口内具有选择性发射能力，其他中红外波段具有一定透过性，同时可反射0.3~2.5 μm太阳光。因此，该织物在户外可通过太阳反射降低外部热输入，在室内或阴天条件下则有利于人体热辐射向外传递。实验表明，该POM织物在晴天、阴天和室内条件下均可实现人体辐射冷却，相比典型织物可获得0.5~8.8 °C的降温效果，并表现出较好的可穿戴性。在此基础上，Yu等[66]通过静电纺丝和超声水刻蚀制备了PVDF-PVP织物，在微米纤维表面构筑纳米级半贯通孔，并形成微米级纤维间孔隙，如图7(a)所示。该多尺度结构赋予织物94%的太阳反射率、81%的大气窗口发射率和25%的中红外透过率，使其室外和室内净冷却功率分别达到60和26 $W·m^{-2}$。与PDMS薄膜相比，该织物在室外和室内人体模拟测试中分别实现5.5和1.4 °C的降温，如图7(b)所示，同时表现出一定的疏水性、耐洗性、耐磨性、透湿性和透气性。这两项研究表明，面向全天候个人热管理的织物应协同调控太阳反射、大气窗口发射和非窗口中红外透射，并在此基础上兼顾穿着舒适性与实际服役耐久性。

进一步地，辐射冷却织物正向“冷却—加热—感知”一体化方向发展。Choi等[67]于2024年报道了一种集成传感功能的热自适应智能织物。该织物通过同轴挤出连续制备芯–鞘结构纤维，其中金属芯层提供焦耳加热与电容传感功能，多孔聚乙烯复合鞘层则承担辐射冷却功能。鞘层中的孔隙尺寸与太阳光波长相当，可通过Mie散射增强太阳反射，其中嵌入的SiO_2颗粒则增强8~13 μm波段的选择性热发射。该织物在户外可实现比普通织物低6~10 °C的被动辐射冷却，同时保留较好的机械强度、透气性和耐洗性。由于纤维交织处形成电容传感单元，材料还可检测压力和出汗状态，并结合焦耳加热实现主动热反馈。该工作说明，可穿戴辐射冷却材料未来不应只作为“凉感面料”，而应与柔性电子、人体状态感知和主动热反馈系统结合，发展为智能个人热管理平台。

值得注意的是，在真实穿着环境中汗液会显著改变织物表面的光谱特性。汗液本身具有宽带红外发射特征，可能削弱选择性辐射冷却织物在大气窗口与非大气窗口之间的发射率差异。针对这一问题，Gu等[68]报道了一种具有定向排汗能力的选择性辐射冷却织物。该织物在聚乙烯醇缩丁醛纤维中引入

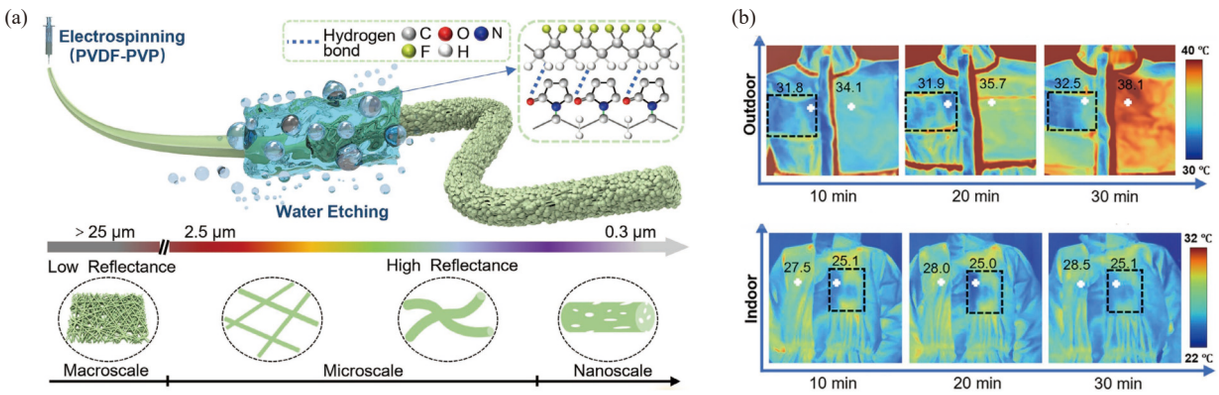

图 7 冷却织物的设计、制备与实际辐射冷却性能: (a)全尺寸结构冷却织物的设计; (b)贴在防护服上的FP-12-6的室内和室外冷却红外图像[66] (2025 Springer Nature版权许可)

Fig. 7 Design, fabrication and actual radiative cooling performance of the cooling fabric: (a) Design of the full-scale structural cooling fabric; (b) Indoor and outdoor infrared images of the FP-12-6 attached to protective clothing (Reprinted with permission from Ref. [66]; Copyright (2025) Springer Nature)

20 wt%氮化硅颗粒，并通过嵌入圆锥微结构促进汗液快速传输与脱附，从而保持外侧辐射表面的干燥状态。该织物在干态下具有83.8%的大气窗口发射率、43.3%的非大气窗口发射率和92.8%的太阳反射率；出汗后仍能保持光谱选择性。户外测试显示，其温度分别比宽带发射织物和棉织物低2.8 °C和7.3 °C。该研究指出，可穿戴辐射冷却材料的评价不能停留在干态光谱性能，还应考虑在真实人体出汗条件下的性能保持。

3.3 辐射冷却在能源与资源中的增效

除建筑和人体热管理外，辐射冷却还可与光伏、电子器件散热、大气取水和湿气发电系统耦合。当前相关研究主要为小型原型器件验证，重点考察辐射冷却层与能量转换或传质过程的耦合，而非已经完成许可和工程鉴定的规模化应用。以辐射冷却辅助湿气发电为例，其器件构型与输出方式如图8所示。

光伏系统中的辐射冷却设计与建筑屋顶涂层存在本质差异。建筑涂层通常希望最大限度反射太阳光，而光伏电池必须吸收太阳光以产生电能。因此，光伏辐射冷却需要兼顾太阳光透射和中红外散热，实现光热解耦。Jia等[70]报道了一种透射型日间辐射冷却系统，并将其与太阳能电池构成串联结构。该系统通过透射型设计使太阳光能够到达下方光伏电池，同时利用上层辐射冷却结构向外太空释放热量，从而在同一空间足迹内实现辐射冷却和光伏发电的协同。该装置在晴天条件下实现了最高约40 $W \cdot m^{-2}$的冷却功率密度和 103.33 $W \cdot m^{-2}$ 的光伏功率密度，太阳能电池转换效率为11.42%，接近裸电池的12.92%。该研究表明，光伏场景中的辐射冷却不能照搬“高反射白色涂层”思路，而应发展高太阳透过、低光伏寄生吸收和高中红外发射相结合的透明或半透明热管理结构。

在水资源获取方面，辐射冷却材料的作用并不仅是降低表面温度，而是通过降低冷凝温度、延长冷凝时间并改善水滴脱附行为来提高集水效率。2024年，Xu等[71]报道了一种集太阳能解吸与辐射冷却冷凝于一体的全天候大气取水系统。该系统利用自然太阳光提供水分解吸所需热量，同时利用透射型辐射冷却膜降低日间冷凝温度，并在夜间继续提供额外冷凝产水。该装置的水产率最高可达3654 $g \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$，说明辐射冷却可与太阳能吸附/解吸过程协同，而不是只在夜间作为被动露水收集手段。

辐射冷却还可以与湿气发电等新型能源转换系统耦合。Guo等[69]于2024年构建了由多孔P(VDF-HFP)辐射冷却层和PVA-PA-LiCl离子水凝胶组成的自持续湿气发电器件。图8(a)和8(b)分别是吸湿诱导的离子解离与迁移过程，以及润湿过程中的表面电位变化。吸湿后，水凝胶中的H^+解离并沿湿度梯度定向迁移，从而形成持续电位差。图8(c)~图8(e)是不同封装条件下器件的持续电流输出，表明水分吸附、迁移和蒸发共同影响发电性能。面积为1 cm^2的单个器件可输出约0.88 V电压和306 μA电流，最大功率密度约为51 $\mu W \cdot cm^{-2}$。图8(f)是多个器件串联和并联时的电压与电流输出，串联可提高电压，并联则可增大电流。图8(g)和图8(h)是器件驱动变色玻璃和电子墨水屏的实物展示。P(VDF-HFP)层通过调节昼夜温度及吸湿–蒸发动力学维持水和离子的持续传输，表明辐射冷却材料还可用于热量与质量传递的调控。

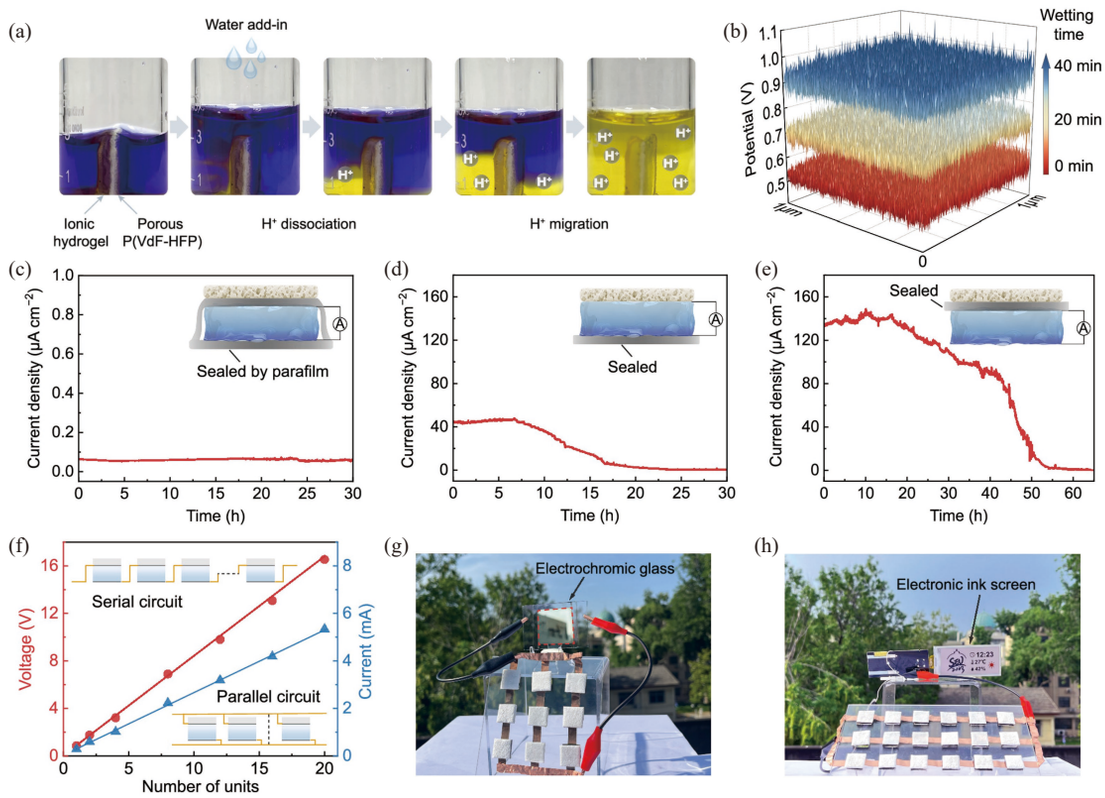

图 8 辐射冷却辅助湿气发电器件的工作机制与输出性能：(a)吸湿诱导的离子解离与迁移；(b)润湿过程中的表面电位变化；(c~e)不同封装条件下的持续电流；(f)多个器件串联和并联时的电压与电流；(g, h)驱动变色玻璃和电子墨水屏的实物展示[69] (2024 Springer Nature版权许可)

Fig. 8 Operating mechanism and output performance of a radiative cooling-assisted hygroscopic power-generating device: (a) Moisture-induced ion dissociation and migration; (b) Surface potential changes during wetting; (c–e) Sustained current under different encapsulation conditions; (f) Voltage and current from multiple devices connected in series and parallel; (g, h) Demonstrations of color-changing glass and an electronic ink display powered by the devices (Reprinted with permission from Ref. [69]; Copyright (2024) Springer Nature)

4 总结与展望

聚合物基PDRC材料的研究已由太阳反射和中红外发射等静态光谱优化，拓展至环境稳定性、动态调控和多功能集成。聚合物的组成与结构易于调节，并可通过涂布、纺丝等工艺实现柔性和大面积加工。然而，多数研究仍停留在材料样片或小型原型验证阶段，尚未经历工程准入、标准认证及长期运行考核。因此，评价技术成熟度时应明确区分3个层级：材料层面的光谱与冷却性能、器件层面的功能与运行验证，以及实际场景中的施工适配性和长期服役效果，避免根据短期样片或原型数据高估其工程应用水平。

未来，聚合物基辐射冷却材料的发展可重点关注以下几个方向。

(1)建立面向长期服役的耐久性评价体系。除初始反射率、发射率和短时温降外，还应报告户外暴露或加速老化后的光谱性能、冷却功率及自清洁能力保持率。测试条件应覆盖灰尘沉积、紫外照射、湿热循环、机械磨损、冲刷、冻融和酸碱腐蚀，并明确聚合物老化、孔结构坍塌及界面失效与性能衰减之间的关系。

(2)发展低成本、可规模化且性能一致的制备技术。精密光子结构虽然具有较好的光谱性能，但制造成本和工艺要求较高。多孔聚合物涂层、复合涂料、纤维膜和织物更容易与喷涂、刮涂、静电纺丝及相分离等工艺结合。材料评价不应局限于实验室峰值性能，还需综合考虑成本、生产效率、批次一致性、施工适配性和服役耐久性。

(3)面向应用场景开展光谱与结构协同设计。建筑屋顶、透明窗体、可穿戴织物、光伏器件和大气取水系统具有不同的光热与传质需求，难以采用统一的高反射、高发射设计。应根据具体场景协调太阳反射或透射、中红外发射、颜色、透气透湿、力学柔性及界面传热等性能，并验证多功能集成对冷却性能

和系统效率的影响。

(4)发展全年自适应热管理材料。静态辐射冷却在寒冷季节或夜间可能造成过冷，应构建能够在冷却与保温状态间可逆切换的响应体系，并提高其调控幅度、响应范围和循环稳定性，以满足建筑节能、个人热管理及分布式能源系统的全年运行需求。

参 考 文 献

1 Niu, J.; Zhou, W. L.; Bai, J. T.; Wang, S. X.; Ma, X. H.; Li, S. J.; Fan, Y. Z. A multi-scale particles doped ETFE based self-cleaning coating for passive daytime radiative cooling. *Mater. Today Commun.*, **2024**, 39, 108918.

2 Cheng, Q. L.; Tang, C.; Kim, B. W.; Xu, Y.; Yu, N. F.; Mandal, J.; Yin, H. M.; Yang, Y. Cost-effective bilayer radiative cooling paint *via* a porous P(VDF-HFP) top layer. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(46), 2506405.

3 Son, S.; Liu, Y. T.; Chae, D.; Lee, H. Cross-linked porous polymeric coating without a metal-reflective layer for sub-ambient radiative cooling. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2020**, 12(52), 57832−57839.

4 Song, J. N.; Zhang, W. L.; Sun, Z. N.; Pan, M. Y.; Tian, F.; Li, X. H.; Ye, M.; Deng, X. Durable radiative cooling against environmental aging. *Nat. Commun.*, **2022**, 13(1), 4805.

5 王浩宇, 周涵. 可见光透明辐射冷却材料研究进展. 化工进展, **2025**, 44(11), 6439−6448.

6 Lin, C.; Wang, K. S.; Shi, Y. Q.; Li, T. Z.; Liu, Z. Y.; Mao, Z. P. Synergistic hierarchical porosity and TiO_2 scattering in liquid-induced phase separation fabricated coatings for radiative cooling and enhanced stability and durability. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2026**, 296, 114061.

7 Zhong, S. J.; Yi, L. M.; Zhang, J. W.; Xu, T. Q.; Xu, L.; Zhang, X.; Zuo, T.; Cai, Y. Self-cleaning and spectrally selective coating on cotton fabric for passive daytime radiative cooling. *Chem. Eng. J.*, **2021**, 407, 127104.

8 Nie, H. J.; Huang, L. B.; Xu, X. N.; Li, Z. Q.; Chen, D. Z.; Zhu, J. S.; Wang, H.; Yang, C. L. High performance radiative cooling coating with dense surface structure *via* closed-cell microstructures and uniformly dispersed scatterers. *Small*, **2025**, 21(37), 2507594.

9 张跃宏, 赵宁, 杨晨. 室内外应用场景下辐射冷却材料:机制、进展与展望. 精细化工, **2026**. DOI: 10.13550/j.jxhg.20250790.

10 Hossain, M. M.; Gu, M. Radiative cooling: principles, progress, and potentials. *Adv. Sci.*, **2016**, 3(7), 1500360.

11 Chen, J. R.; Xue, Y.; Wang, C. H.; Li, J. G.; Chen, Y. F. Recent advances in polymer-based materials by structure and fabrication for efficient passive daytime radiative cooling. *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, **2025**, 8(5), 371.

12 Yang, S.; Tang, S. Z.; Yuan, X. Y.; Zou, X. B.; Zeng, H.; Song, Y. J.; Hu, M. X.; Liu, M.; Li, B. Advances in tunable radiative cooling materials: design, mechanisms, and applications. *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, 36(4), e11552.

13 Wang, T.; Liu, Y.; Dong, Y.; Yin, X. B.; Lei, D. Y.; Dai, J. G. Colored radiative cooling: from photonic approaches to fluorescent colors and beyond. *Adv. Mater.*, **2025**, 37(15), 2414300.

14 赵卓, 张健, 侯爱军, 梁大鑫, 张刚. 柔性辐射冷却材料设计与应用进展. 中国科学(物理学、力学、天文学), **2026**, 56(6), 71−77.

15 Li, J. L.; Jiang, Y.; Liu, J.; Wu, L. S.; Xu, N.; Zhang, Z. Y.; Zhao, D. Y.; Li, G.; Wang, P.; Li, W.; Zhu, B.; Zhang, Y. G.; Zhu, J. A photosynthetically active radiative cooling film. *Nat. Sustain.*, **2024**, 7(6), 786−795.

16 Zhao, J. T.; Nan, F.; Zhou, L.; Huang, H. Y.; Zhou, G. H.; Zhu, Y. F.; Ou, Q. D. Free-standing, colored, polymer film with composite opal photonic crystal structure for efficient passive daytime radiative cooling. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2023**, 251, 112136.

17 Yao, K. Q.; Ma, H. C.; Huang, M.; Zhao, H. P.; Zhao, J. P.; Li, Y.; Dou, S. L.; Zhan, Y. H. Near-perfect selective photonic crystal emitter with nanoscale layers for daytime radiative cooling. *ACS Appl. Nano Mater.*, **2019**, 2(9), 5512−5519.

18 Zong, H.; Jiang, S.; Sun, Y. M.; Han, Y. Q.; Zhang, S. F.; Wu, S. L. Nested-bilayer daytime radiative cooling films featuring robust full-color performance *via* ZnS@SiO_2 photonic crystals. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 523, 168894.

19 Yang, L. L.; Wang, G.; Duan, S. X.; Zhang, J. R.; Li, C. Structurally colored photonic crystal biomimetic microstructures for daytime radiative cooling. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16(45), 62827−62837.

20 Mohammed, A.; Yesudasan, S.; Chacko, S. A multilayered photonic emitter for high-performance daytime radiative cooling. *Microsyst. Technol.*, **2021**, 27(8), 2873−2887.

21 Ma, H. C.; Yao, K. Q.; Dou, S. L.; Xiao, M.; Dai, M. G.; Wang, L.; Zhao, H. P.; Zhao, J. P.; Li, Y.; Zhan, Y. H. Multilayered SiO_2/Si_3N_4 photonic emitter to achieve high-performance all-day radiative cooling. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2020**, 212, 110584.

22 Zhang, Y. S.; Liu, B. J.; Sun, X. J.; Duan, W. B.; Yang, Y. T.; Yu, D. M.; Cai, Q. Y.; Zhang, H. T.; Peng, L.; Zhang, R. J.; Zheng, Y. X. Optimal design and preparation of high-performance multilayered thin film daytime radiative coolers. *Opt. Eng.*, **2024**, 63(9), 1−12.

23 Zhang, X. Metamaterials for perpetual cooling at large scales. *Science*, **2017**, 355(6329), 1023−1024.

24 Gong, H.; Wang, Z. Y.; Song, X. K.; Li, H. C.; Sun, K.; Zhou, X.; Fan, T. X. Zirconia submicrosphere/potassium silicate metacoating with high irradiation stability for radiative cooling. *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, **2025**, 8(1), 106.

25 Yang, Z. B.; Qi, Y. L.; Zhang, J. A novel perspective for reflective cooling composites: influence of the difference between the effective refractive index of polymeric matrix and inorganic functional particles. *Constr. Build. Mater.*, **2019**, 223, 928−938.

26 Yang, N.; Fu, Y.; Xue, X.; Lei, D. Y.; Dai, J. G. Geopolymer-based sub-ambient daytime radiative cooling coating. *EcoMat*, **2023**, 5(2), e12284.

27 Zhang, Y. B.; Tan, X. Y.; Qi, G. G.; Yang, X. B.; Hu, D.; Fyffe, P.; Chen, X. B. Effective radiative cooling with ZrO_2/PDMS reflective coating. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2021**, 229, 111129.

28 Zhu, Z. J.; Li, Z. Q.; Wu, X. H.; Liu, C.; Chen, N. H.; Zhang, Y. C.; Chen, Y.; Ouyang, X.; Bashir, A.; Chen, D. Z. High-performance radiative cooling using a SiO_2/PHBV fiber membrane with a micronano-multistage structure. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2025**, 17(23), 34625−34636.

29 Xiang, B.; Zhang, R.; Luo, Y. L.; Zhang, S.; Xu, L.; Min, H. H.; Tang, S. C.; Meng, X. K. 3D porous polymer film with designed pore architecture and auto-deposited SiO_2 for highly efficient passive radiative cooling. *Nano Energy*, **2021**, 81, 105600.

30 Feng, C. Z.; Yang, P. H.; Liu, H. D.; Mao, M. R.; Liu, Y. P.; Xue, T.; Fu, J.; Cheng, T.; Hu, X. J.; Fan, H. J.; Liu, K. Bilayer porous polymer for efficient passive building cooling. *Nano Energy*, **2021**, 85, 105971.

31 Shi, M. K.; Song, Z. F.; Ni, J. H.; Du, X. Y.; Cao, Y. X.; Yang, Y. Y.; Wang, W. J.; Wang, J. F. Dual-mode porous polymeric films with coral-like hierarchical structure for all-day radiative cooling and heating. *ACS Nano*, **2023**, 17(3), 2029−2038.

32 Hong, D.; Lee, Y. J.; Jeon, O. S.; Lee, I. S.; Lee, S. H.; Won, J. Y.; Jeon, Y. P.; La, Y. J.; Kim, S.; Park, G. S.; Yoo, Y. J.; Park, S. Y. Humidity-tolerant porous polymer coating for passive daytime radiative cooling. *Nat. Commun.*, **2024**, 15(1), 4457.

33 高璐, 鲍艳, 张文博, 马建中. 聚合物基日间辐射冷却材料的设计及应用. 高分子通报, **2023**, 36(9), 1158−1173.

34 纪澄, 王璟, 孙骏宇, 安一卓. 微纳多孔聚合物基辐射冷却材料的制备、性能调控及应用. 材料导报, **2023**, 37(24), 230−243.

35 任首龙, 陆庭中, 唐波, 高颖, 戴远哲, 吉利, 赵胜悟. 辐射冷却材料研究进展. 化工进展, **2022**, 41(4), 1982−1993.

36 Zhao, B.; Hu, M. K.; Ao, X. Z.; Chen, N.; Pei, G. Radiative cooling: a review of fundamentals, materials, applications, and prospects. *Appl. Energy*, **2019**, 236, 489−513.

37 Mandal, J.; Fu, Y. K.; Overvig, A. C.; Jia, M. X.; Sun, K. R.; Shi, N. N.; Zhou, H.; Xiao, X. H.; Yu, N. F.; Yang, Y. Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling. *Science*, **2018**, 362(6412), 315−319.

38 Liu, R.; Wang, S. C.; Zhou, Z. G.; Zhang, K. Y.; Wang, G. Y.; Chen, C. Y.; Long, Y. Materials in radiative cooling technologies. *Adv. Mater.*, **2025**, 37(2), 2401577.

39 Bohren, C. F.; Huffman, D. R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York: John Wiley & Sons, **1998**.

40 Markel, V. A. Introduction to the Maxwell Garnett approximation: tutorial. *J. Opt. Soc. Am. A*, **2016**, 33(7), 1244.

41 Li, X. Y.; Peoples, J.; Yao, P. Y.; Ruan, X. L. Ultrawhite $BaSO_4$ paints and films for remarkable daytime subambient radiative cooling. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2021**, 13(18), 21733−21739.

42 Raman, A. P.; Anoma, M. A.; Zhu, L. X.; Rephaeli, E.; Fan, S. H. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. *Nature*, **2014**, 515(7528), 540−544.

43 Du, L. L.; Zhou, Z. G.; Li, J. J.; Hu, B.; Wang, C. L.; Zheng, J. H.; Liu, W.; Li, R. H.; Chen, W. X. Highly efficient subambient all-day passive radiative cooling textiles with optically responsive MgO embedded in porous cellulose acetate polymer. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 469, 143765.

44 Felicelli, A.; Katsamba, I.; Barrios, F.; Zhang, Y.; Guo, Z. Q.; Peoples, J.; Chiu, G.; Ruan, X. L. Thin layer lightweight and ultrawhite hexagonal boron nitride nanoporous paints for daytime radiative cooling. *Cell Rep. Phys. Sci.*, **2022**, 3(10), 101058.

45 Zhao, Z. H.; Tang, C. N.; Cui, E. M.; Sun, N. N.; Zhou, J. N.; Lv, J. X.; Zhao, L.; Liu, Y. H.; Feng, S. L. Triple-scale structure-induced efficient passive radiative cooling combining robust anticondensation. *ACS Nano*, **2025**, 19(20), 19384−19393.

46 Zhu, Y. Q.; Wang, D.; Fang, C.; He, P.; Ye, Y. H. A multilayer emitter close to ideal solar reflectance for efficient daytime radiative cooling. *Polymers*, **2019**, 11(7), 1203.

47 孙晓洁, 高梦宇, 郑玉祥, 张荣君, 王松有, 李晶, 陈良尧. 辐射冷却材料的研究进展及应用. 红外与毫米波学报, **2022**, 41(1), 230−247.

48 Modest, M. F.; Mazumder, S. *Radiative Heat Transfer*, 4th ed. London: Academic Press, **2021**.

49 Bijarniya, J. P.; Sarkar, J.; Maiti, P. Review on passive daytime radiative cooling: fundamentals, recent researches, challenges and opportunities. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **2020**, 133, 110263.

50 Zhou, L.; Rada, J.; Zhang, H. F.; Song, H. M.; Mirniaharikandi, S.; Ooi, B. S.; Gan, Q. Q. Sustainable and inexpensive

polydimethylsiloxane sponges for daytime radiative cooling. *Adv. Sci. Weinh. Baden Wurttemberg Ger.*, **2021**, 8(23), e2102502.

51 Jiang, L. H.; Gong, M. T.; Sun, J. J.; Lin, Y. F.; Tu, K.; Chen, Y. T.; Xiao, T.; Li, X. Y.; Tan, X. Y. The design and performance research of PTFE/PVDF/PDMS superhydrophobic radiative cooling composite coating with high infrared emissivity. *Mater. Today Commun.*, **2024**, 38, 108406.

52 Ren, C. Y.; Wei, Z. C.; Wang, J. W.; Cai, C. Y.; Cai, B.; Wang, Z. N.; Lei, H. Bioinspired superhydrophobic cellulose-based thermal emitters with multiphase scattering structure for durable daytime radiative cooling. *Nano Energy*, **2025**, 141, 111076.

53 Wang, T.; Wu, Y.; Shi, L.; Hu, X. H.; Chen, M.; Wu, L. M. A structural polymer for highly efficient all-day passive radiative cooling. *Nat. Commun.*, **2021**, 12, 365.

54 Wang, H. D.; Xue, C. H.; Guo, X. J.; Liu, B. Y.; Ji, Z. Y.; Huang, M. C.; Jia, S. T. Superhydrophobic porous film for daytime radiative cooling. *Appl. Mater. Today*, **2021**, 24, 101100.

55 Zhou, W. L.; Ma, X. H.; Liu, M.; Niu, J.; Wang, S. X.; Li, S. J.; Wang, W.; Fan, Y. Z. Superhydrophobic composite coatings can achieve durability and efficient radiative cooling of energy-saving buildings. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16(35), 46703−46718.

56 Zhou, K.; Yan, X.; Oh, S. J.; Padilla-Rivera, G.; Kim, H. A.; Cropek, D. M.; Miljkovic, N.; Cai, L. L. Hierarchically patterned self-cleaning polymer composites for daytime radiative cooling. *Nano Lett.*, **2023**, 23(9), 3669−3677.

57 Hu, W. W.; Zhang, F. T.; Tan, X. Y.; Tu, Y. T.; Nie, S. J. Antibacterial PVDF coral-like hierarchical structure composite film fabrication for self-cleaning and radiative cooling effect. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16(15), 19828−19837.

58 Wang, T.; Liu, Y.; Xuan, Q. D.; Ma, X.; Fang, Y. B.; Dong, Y.; Lei, D. Y.; Dai, J. G. Innovative photon-engineered fluorescent tri-layer polymeric coatings for sub-ambient colored radiative cooling. *Adv. Sci.*, **2025**, 12(43), e11599.

59 Meng, X.; Chen, Z. C.; Qian, C. L.; Li, Q.; Chen, X. M. Durable and mechanically robust superhydrophobic radiative cooling coating. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 478, 147341.

60 Wang, H. J.; Guo, R. S.; Zhou, Y. L.; Li, N.; Xiong, J. A triaxial fiber radiative cooling membrane inspired by willow branches. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 515, 163450.

61 Jiang, F. Q.; Zhang, Y. C.; Wang, Z.; Zheng, T.; Liang, Y. T.; Xu, C. H.; Huang, B.; Fu, L. H.; Lin, B. F. Biomimetic pangolin-scale sustainable cellulose-based composite paper serves as a multifunctional platform for portable radiative cooling. *Carbohydr. Polym.*, **2026**, 383, 125304.

62 Kong, L. J.; Sun, P. Q.; Liu, J. C.; Lin, Y. X.; Xiao, C.; Bao, C.; Zheng, K.; Xue, M.; Zhang, X.; Liu, X. L.; Tian, X. Y. Superhydrophobic and mechanical properties enhanced the electrospinning film with a multiscale micro-nano structure for high-efficiency radiation cooling. *J. Mater. Chem. A*, **2024**, 12(13), 7886−7895.

63 Zhou, P.; Jiang, G. Y.; Wang, Y. Y.; Tian, Y. Q.; Zhang, X. X. Self-adaptive and large-area sprayable thermal management coatings for energy saving. *Nat. Commun.*, **2025**, 16, 3791.

64 Huang, G.; Yengannagari, A. R.; Matsumori, K.; Patel, P.; Datla, A.; Trindade, K.; Amarsanaa, E.; Zhao, T. H.; Köhler, U.; Busko, D.; Richards, B. S. Radiative cooling and indoor light management enabled by a transparent and self-cleaning polymer-based metamaterial. *Nat. Commun.*, **2024**, 15(1), 3798.

65 Wu, X. K.; Li, J. L.; Jiang, Q. Y.; Zhang, W. S.; Wang, B. S.; Li, R.; Zhao, S. M.; Wang, F.; Huang, Y.; Lyu, P.; Zhao, Y. L.; Zhu, J.; Zhang, R. F. An all-weather radiative human body cooling textile. *Nat. Sustain.*, **2023**, 6(11), 1446−1454.

66 Yu, H. J.; Lu, J. Q.; Yan, J.; Bai, T.; Niu, Z. X.; Ye, B.; Cheng, W. L.; Wang, D.; Huan, S. Q.; Han, G. P. Selective emission fabric for indoor and outdoor passive radiative cooling in personal thermal management. *Nano Micro Lett.*, **2025**, 17(1), 192.

67 Choi, Y. Y.; Zhou, K.; Woo, H. K.; Patel, D.; Salauddin, M.; Cai, L. L. Radiative cooling smart textiles with integrated sensing for adaptive thermoregulation. *ACS Mater. Lett.*, **2024**, 6(10), 4624−4631.

68 Gu, B.; Feng, S. J.; Zhang, Q.; Lu, R. F.; Xiahou, G.; Huang, S. Y.; Li, G.; Tang, H. J.; Zhong, W. Q.; Zhao, D. L. Preserving spectral selectivity of radiative cooling textile under sweating conditions in hot urban environments. *Nat. Commun.*, **2026**, 17, 5165.

69 Guo, C. Y.; Tang, H. J.; Wang, P. F.; Xu, Q. H.; Pan, H. D.; Zhao, X. Y.; Fan, F.; Li, T. X.; Zhao, D. L. Radiative cooling assisted self-sustaining and highly efficient moisture energy harvesting. *Nat. Commun.*, **2024**, 15, 6100.

70 Jia, S. Y.; Huang, M. J.; Jiang, X. F.; Shen, C.; Chen, S.; Meng, G. W.; Li, X. Q.; Guo, W. L. Tandem daytime radiative cooling and solar power generation. *Cell Rep. Phys. Sci.*, **2025**, 6(1), 102343.

71 Xu, J. X.; Huo, X. Y.; Yan, T. S.; Wang, P. F.; Bai, Z. Y.; Chao, J. W.; Yang, R. G.; Wang, R. Z.; Li, T. X. All-in-one hybrid atmospheric water harvesting for all-day water production by natural sunlight and radiative cooling. *Energy Environ. Sci.*, **2024**, 17(14), 4988−5001.