

稀土荧光粉光致发光辐射制冷材料研究进展

房毓龙, 刘艳花*

兰州交通大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年4月6日; 录用日期: 2026年5月6日; 发布日期: 2026年5月15日

摘要

当前, 受全球变暖及城市热岛效应的影响, 人类赖以生存的地球正在受到日益严重的热浪冲击, 迫切需要一种节能环保的手段以维持人体热舒适, 由此, 被动辐射冷却技术应运而生。传统辐射制冷材料多为白色外观, 难以实现高效冷却与美学需求的兼顾, 而稀土荧光粉的光致发光效果能够很好地达成二者间的平衡, 解决审美需要与制冷性能相悖这一问题。本文综述了当前集成稀土荧光粉的光致发光辐射制冷材料的研究进展, 并对未来光致发光辐射制冷领域的研究方向作出了展望。

关键词

辐射制冷, 稀土荧光粉, 光致发光, 下转换

Research Progress on Photoluminescence Radiative Cooling Materials Based on Rare-Earth Phosphors

Yulong Fang, Yanhua Liu*

School of Materials Science and Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: April 6, 2026; accepted: May 6, 2026; published: May 15, 2026

Abstract

Currently, under the influence of global warming and the urban heat island effect, the Earth on which humanity depends is experiencing increasingly severe heatwaves. There is an urgent need for energy-efficient and environmentally friendly approaches to maintain human thermal comfort, which has led to the emergence of passive radiative cooling technology. Conventional radiative cooling materials typically exhibit a white appearance, making it difficult to achieve both high cooling efficiency and

*通讯作者。

aesthetic appeal. However, the photoluminescence effect of rare-earth phosphors can effectively balance these two requirements, resolving the conflict between aesthetic needs and cooling performance. This review summarizes the current research progress on photoluminescence radiative cooling materials integrated with rare-earth phosphors and provides perspectives on future directions in the field of photoluminescence radiative cooling.

Keywords

Radiative Cooling, Rare-Earth Phosphors, Photoluminescence, Down-Conversion

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

维持人体 $36.0^{\circ}\text{C}\sim 37.3^{\circ}\text{C}$ 的稳定体温对正常代谢和健康至关重要, 热舒适性(即对热环境的心理满意度)直接影响工作效率与生命安全[1]-[3]。当前, 用于制冷的能耗持续攀升, 截至 2024 年上半年, 冷却能耗约占全球总能耗的 20% [4]。此外, 与制冷相关的温室气体排放已超过 10%。预计到 2050 年, 全球制冷需求将增长 10 倍, 制冷剂直接排放量将相当于同年 CO_2 当量的 45% [5]。目前, 传统暖通空调系统仍是主流调温手段, 其能耗占一次能源总使用量的 15%以上[2], 且制冷剂会破坏臭氧层[6], 加剧温室效应与热岛效应[7]。因此, 亟需发展节能环保的新型热管理策略, 以可持续方式满足人体热舒适需求[2] [8]。辐射冷却由于具有被动、高效、零能耗等优点, 已成为节能和热管理应用领域的研究热点[9]。这项技术的基本原理可以分为两部分, 其一是高效地反射 $0.3\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段的太阳光, 在炎热的夏季尽可能地减少来自外界的热量输入; 其二是在 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ 的大气窗口源源不断地向外发射长波红外辐射, 在该波段下大气对热辐射高度透明, 因此, 通过提高该特定波长范围内物体的发射率, 可将大量热辐射单向输出到温度约 3 K 的寒冷外太空[10], 从而显著增强物体的辐射散热[7] [9]。结合上述两点, 该项技术可以在无需外部能量提供的情况下有效地将物体表面温度冷却到环境温度以下[7]。

根据被动辐射制冷技术的这一原理, 要实现日间亚环境冷却效果, 就需要实现 $0.3\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段极低的吸收率以及 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ 红外波段的高发射率[11]。因此, 为使太阳反射率达到最大化, 辐射冷却材料大都呈现白色外观。尽管对于辐射冷却材料的研究已经通过反射太阳光照取得了重大进展, 但其白色外观既无法满足视觉舒适度, 也无法满足审美需求, 甚至可能造成光污染[12], 严重限制其在实际场景中的进一步应用。基于这一问题, 研究人员对彩色辐射冷却材料开展了相关研究[13]。其中, 颜色可以通过色素色和结构色两种方式产生[12]。色素色来自在可见光谱中的选择性吸收, 然而, 大多数有色色素在大量吸收可见光后会将其转化为非辐射热能, 进而影响冷却效果[14]。由此, 通过添加传统彩色颜料难以实现着色与冷却性能的平衡。结构色是由固定尺寸的微纳米结构对入射光的干涉、衍射和散射而产生, 能够通过改变不同角度的光谱反射来产生色彩, 从而减少光吸收, 冷却效果优于色素色。但是结构色需要依赖复杂的光子结构和纳米制造工艺, 制备周期长、成本效益低, 难以适用于大规模生产[11] [15]。此外, 无论色素色还是结构色的引入均会不可避免地将吸收的可见光转化为热, 难以兼顾美学需求与制冷效果之间的平衡。为切实解决色彩化需要与制冷性能相悖这一问题, 研究人员提出了一种荧光辅助的方法, 通过集成荧光材料来实现着色。

与传统的非荧光颜料相比, 荧光材料在吸收光子后能够重新发射出波长更长的光子, 从而使材料显

示彩色。同时, 荧光材料的光致发光转换能够进一步提高太阳反射率, 从而实现荧光增强的辐射冷却效果。此外, 荧光材料与聚合物基体材料兼容, 故不需要额外的复杂制备工艺, 成本效益较高。稀土荧光粉光致发光辐射制冷材料能够很好地实现“显色而不升温”的目的, 可以实现美学需求与制冷性能二者之间的平衡。

2. 稀土荧光粉光致发光辐射制冷原理

光致发光辐射制冷材料具有多重能量转换机制, 最主要的能量转换机制在于光子能量的下转换。太阳光谱覆盖从 300 nm 到 2500 nm 的宽波段, 对应光子能量在 4.2 eV 至 0.5 eV。其中, 紫外波段(300~400 nm)光子能量高、穿透性强, 若被材料吸收将转化为热量, 是辐射制冷性能损耗的重要来源。传统高反射材料虽能反射大部分太阳辐射, 但对紫外光子的反射效率有限, 且反射本身并未改变光子的能量状态[16]。下转换光致发光辐射制冷机理见图 1。

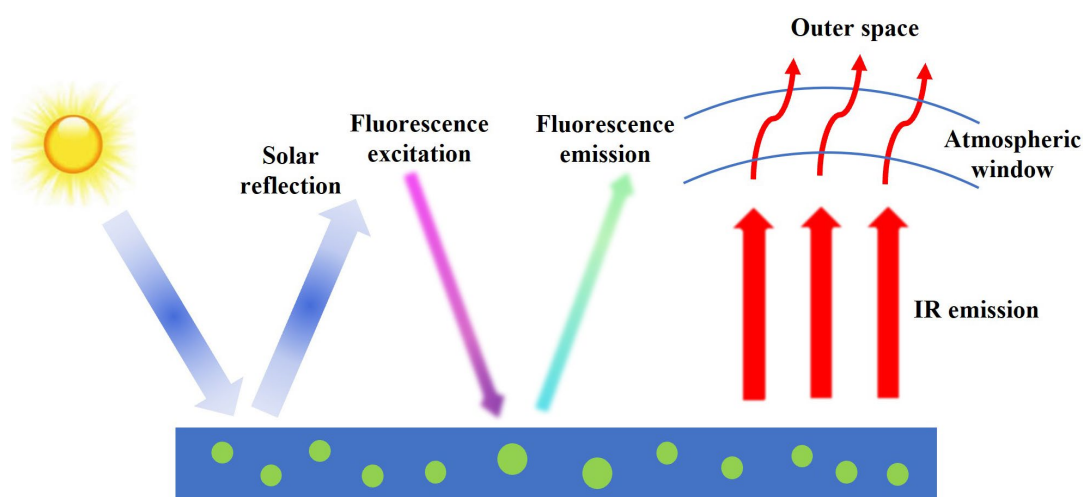


Figure 1. Schematic diagram of the radiative cooling mechanism based on down-conversion photoluminescence
图 1. 下转换光致发光辐射制冷机理示意图

光子能量下转换即通过吸收高能紫外光子, 将其转换为低能可见光光子并重新发射的过程。这一过程将原本可能转化为热能的紫外辐射, 转变为可被再次反射出地球-大气系统的可见光辐射。这一吸收高能光子后发射低能光子的过程又称之为斯托克斯发光, 该过程中的能量损失即为斯托克斯位移, 斯托克斯位移可以用吸收光子与发射光子的波数差来进行量化, 差值越大, 意味着下转换发光过程中能量损失越多, 这部分能量通常以热(声子)的形式耗散到材料中。因此, 对于光致发光辐射制冷而言, 要求下转换材料的发射波长与激发波长尽可能地接近(即斯托克斯位移尽可能小), 减少能量损失, 以最大限度抑制热能耗散, 实现更优的冷却效果。除下转换发光之外, 光子能量上转换在光致发光辐射制冷领域可能更具实质性的研究意义。与下转换恰恰相反, 上转换发光是指材料吸收两个或两个以上低能量光子(通常是近红外光), 经过一系列能量传递或光子叠加过程, 发射出一个高能量光子(如可见光或紫外光)的非线性光学现象。其核心特征是发射波长小于激发波长, 遵循反斯托克斯发光原理。从物理机制看, 下转换过程伴随斯托克斯位移, 部分能量以热形式耗散。反斯托克斯过程则通过声子吸收从晶格提取热量, 实现净制冷。然而, 太阳全光谱中紫外波段约占 7%, 近红外波段约占 43%, 而剩余的 50%则覆盖了整个可见光谱范围, 且近红外波段所含有的热量远高于紫外波段。因此, 上转换发光对于材料辐射制冷能力的提升理应具有更加显著的作用。

光致发光辐射制冷的另一关键能量转换机制在于抑制非辐射跃迁。半导体材料吸收光子后, 激发态电子可通过两种途径返回基态: 辐射跃迁(发射光子)或非辐射跃迁(将能量转化为晶格振动, 即热能)。在传统辐射制冷材料中, 吸收的紫外光子若无法有效反射, 将大概率通过非辐射跃迁途径耗散能量, 直接导致材料升温, 与制冷目标背道而驰。光致发光材料的设计目标是通过提高光致发光量子产率, 使辐射跃迁路径占据主导地位。在辐射制冷过程中, 光致发光利用这种光能到光能转化的辐射跃迁替代了大多数光能到热能转变的非辐射跃迁, 抑制了大量的热生成, 从而提升材料整体的制冷性能。光致发光量子产率(Photoluminescence Quantum Yield, PLQY)是衡量光致发光能量转换效率的一大重要指标。PLQY 定义为辐射跃迁光子数与吸收光子数之比, 决定了吸收能量中以光子形式重新发射的比例。这意味着量子产率越高, 非辐射跃迁在总能量转换过程中占比越低, 产生的热量越少, 辐射制冷性能越强。

由于稀土荧光粉的光致发光作用能够很好地抑制大多数光到热的转化, 而且在几乎不影响辐射制冷材料冷却能力的前提下赋予其美学功能, 因此, 混合稀土荧光粉的光致发光辐射制冷材料具有重要的实际意义和研究价值。目前, 对于该领域的研究主要集中在荧光粉的种类改变以及材料的结构调控等方面, 包括单层结构、双层结构及其他结构等。

3. 稀土荧光粉光致发光辐射制冷材料的结构

3.1. 单层结构

对于稀土荧光粉掺杂的光致发光辐射制冷材料而言, 单层结构最为常见。其主要优点是制备工艺简便, 且单层结构的辐射制冷材料柔性较好。

Tan 等人设计了一种掺杂 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 稀土荧光粉的柔性多功能复合薄膜, 实现了高太阳反射率和红外发射率[17]。在日间平均太阳辐照度为 827.74 W/m^2 的晴朗天气下, 能够实现约 11°C 的亚环境冷却, 并且通过保持 $0.5^\circ\text{C}\sim 1.5^\circ\text{C}$ 的最小温差很好地解决了夜间过冷的问题。所掺杂的稀土荧光粉不仅在白天有效地与 TiO_2 纳米颗粒竞争紫外线吸收, 在夜间还能够展现出显著的发光, 起到颜色警示的效果。该团队还提出了一种基于在太阳波段具有高反射率的 TiO_2 、参与紫外竞争吸收的稀土荧光粉 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$ (BAM) 以及具有热能存储的相变微胶囊(PCM)的设计[18], 以实现智能温度自适应荧光相变辐射冷却器(F-PCRC), 通过荧光体介导的辐射冷却、相变触发的能量存储和释放机制的协同耦合来实现智能热调节, 确保炎热白天和寒冷夜晚的舒适度。在炎热环境下, 该 F-PCRC 结合了有效的辐射冷却能力和微胶囊激活的热能存储, 在平均太阳辐照度为 803.6 W/m^2 的情况下, 使模型建筑的平均亚环境冷却温度达 4.8°C 。而在寒冷环境下, 涂层中的热致相变微胶囊释放储存的热能, 实现 1.9°C 的温升。通过这种双模式热调节, 该冷却器在应用于建筑物屋顶时显示出全年节能和减少碳排放的巨大潜力, 基于 EnergyPlus 的模拟证实, 每栋建筑物每年可节省 29291.7 至 69880.6 kWh 的电力。F-PCRC 涂层有望为建筑和电子产品的节能热管理提供可持续的解决方案, 并有可能显著减少碳排放和运营能耗。单层结构的稀土荧光粉光致发光辐射制冷材料示意图见图 2。



Figure 2. Schematic diagram of single-layer radiative cooling materials based on rare-earth phosphor photoluminescence
图 2. 单层结构稀土荧光粉光致发光辐射制冷材料示意图

Fu 等人受珊瑚生物光适应机制的启发, 提出了一种基于光致发光的美学复合材料作为新型的城市皮

肤[16][19], 利用稀土掺杂荧光粉增强的光转换与基于光散射的白度解耦的协同作用来提供冷色, 且与城市建筑更好地兼容。该材料的总体太阳反射率在 90.2%~93.2%, 但在荧光粉的发射波段, 该复合材料表现出超过 100% 的有效太阳反射率, 峰值反射率高达 141%, 与环境空气相比实现 2.2°C~3.7°C 的温降, 相较于非光致发光材料温差达 6.1°C~7.9°C。这项研究为建筑节能、个人热管理纺织品等领域的美学彩色辐射制冷提供了又一可行的解决方案, 推动被动辐射制冷技术的实际应用迈向多样化。Hu 等人提出了一种基于稀土荧光粉的光子工程多孔聚合物薄膜[20], 除光致发光作用外, 稀土荧光粉的加入同样能够增强光散射。在光致发光与多孔结构的协同作用下, 该薄膜实现了高达 94.5% 的反射率和 95.6% 的发射率。在平均太阳辐照度为 746 W/m² 的户外测试中, 所制备的聚合物薄膜实现了 10.5°C 的有效温降。由于该薄膜出色的冷却能力, 其在降温节能领域具有广阔的应用前景。为进一步提升日间辐射冷却性能, 该团队开发了一种基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)、TiO₂ 纳米颗粒和 Sr₂MgSi₂O₇:Eu²⁺, Dy³⁺ 稀土荧光粉作填料的多功能稀土荧光粉薄膜[21], 并引入玻璃微球(GM)作为附加填料, 集粒子散射、荧光发射和宽带辐射功能于一体。该薄膜的太阳反射率达 93%, 中红外范围内平均发射率为 94%, 平均太阳辐射为 644 W/m² 的室外测试结果表明, 薄膜的亚环境冷却温度为 8.3°C。同时, 由于宽带辐射使薄膜很好地吸收夜间大气中的长波辐射, 夜间测试中薄膜的平均温降仅为 0.3°C, 有效缓解了夜间过冷情况。该复合薄膜在辐射制冷技术发展展现出巨大的应用潜力。

3.2. 双层结构

与单层结构不同, 双层结构的辐射制冷材料中不同组分位于不同结构层, 因此双层结构设计能够将不同组分所执行的功能分开, 使得光散射、红外热辐射以及着色等多种功能从原本在同一结构层的相互作用转变为各自独立的状态, 从而实现功能解耦。功能解耦这一设计理念可以很好地解决传统辐射制冷材料中高太阳反射率与色彩呈现难以兼顾的矛盾, 将光谱调控功能与美学功能分离至不同的结构层。解耦后, 辐射制冷材料的某一特定性能可以被独立优化而不影响其他性能。由此, 这种解耦设计能够实现材料制冷性能与美观设计的协同优化。

在双层结构中, 多以嵌入 TiO₂、SiO₂ 以及 BaSO₄ 等无机纳米填料的多孔结构作为底层, 提供大量的光散射, 实现高太阳反射率。而顶层则多选用 PDMS、PVDF 以及 PVDF-HFP 等在大气透明窗口具备固有高发射率的聚合物[22]-[27], 同时集成稀土荧光粉, 实现优良的红外热辐射以及光致发光显色的双重作用。双层结构的稀土荧光粉光致发光辐射制冷材料示意图如图 3。

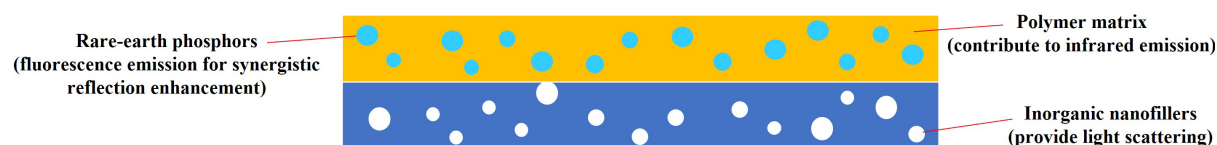


Figure 3. Schematic diagram of bilayer radiative cooling materials based on rare-earth phosphor photoluminescence

图 3. 双层结构稀土荧光粉光致发光辐射制冷材料示意图

Ma 等人提出并制备了一种浅蓝色辐射冷却涂层, 该涂层由具有 98% 以上高太阳反射率的 ZrO₂ 白色底层和由 SrO·Al₂O₃:Eu 蓝色荧光粉组成的超薄顶层构成[11]。所制备的双层涂层具有鲜艳的浅蓝色外观以及 94% 的高效太阳反射率, 在太阳辐照度超过 800 W/m²、平均湿度 30% 的环境条件下, 可实现亚环境温度 3°C~4.4°C 的冷却效果。此外, 该团队还分别采用 Sr₂Si₃N₈:Eu²⁺、Y₃Al₅O₁₂:Ce³⁺ 和 (Ba, Sr)SiO₄:Eu²⁺ 三种荧光粉作为顶层, 制备了三种彩色双层辐射冷却涂层[14]。为缓解着色与太阳反射率之间的矛盾, 同时在顶层引入 SiO₂ 微球, 利用其基于米氏共振的多重散射来增强荧光粉的光致发光性能, 从而协同提高顶

层的有效太阳反射率。三种涂层均可实现亚环境温度冷却, 温降达 1.5℃。上述几种不同结构和材料体系的综合性能对比见表 1。

Table 1. Comprehensive performance comparison of different rare-earth phosphor-based photoluminescent radiative cooling material systems

表 1. 不同稀土荧光粉光致发光辐射制冷材料体系综合性能对比

材料体系	结构	荧光色	反射率	发射率	温降	测试条件	文献来源
PDMS + TiO ₂ + REP	单层	绿	90.3%	95.5%	11℃	平均辐照 827.7 W/m ²	[17]
TiO ₂ + BAM + PCM	单层	蓝	91.3%	94.1%	4.8℃	平均辐照 803.6 W/m ²	[18]
PDMS + SiO ₂ + REP	单层	绿	91.7%	95.0%	3.7℃	平均辐照 705.0 W/m ²	[16] [19]
PVDF-HFP + ZrO ₂ /SiO ₂ + REP	单层	红	94.5%	95.6%	10.5℃	平均辐照 746.0 W/m ²	[20]
PDMS + TiO ₂ + REP	单层	蓝	93.0%	94.0%	8.3℃	平均辐照 644.0 W/m ²	[21]
ZrO ₂ 底层 + REP 顶层	双层	浅蓝	94.0%	/	4.4℃	平均辐照 800.0 W/m ²	[11]
TiO ₂ 底层 + SiO ₂ /REP 顶层	双层	红/黄/绿	94.8%	/	1.5℃	香港户外现场测试	[14]

4. 稀土荧光粉光致发光辐射制冷材料存在的问题

尽管稀土荧光粉光致发光辐射制冷技术在实现色彩美学与被动冷却功能协同方面取得了重要进展, 但在实际应用中仍面临若干关键问题。目前该领域中存在的主要问题可归纳为“重吸收效应”与“近红外反射不足”两大方面。

4.1. 重吸收效应制约荧光转换效率

稀土荧光粉光致发光辐射制冷的核心机制在于通过荧光效应将高能光子转换为低能光子, 从而优化光谱能量分布。然而, 这一能量转换过程普遍面临重吸收效应的严重制约。重吸收效应是指荧光粉发射的荧光光子在被反射或逸出材料之前, 被邻近的荧光粉颗粒或基质材料再次吸收的现象。这一效应直接导致两个负面结果: 其一, 荧光光子的多次吸收-发射循环会增加非辐射弛豫的概率, 将部分光子能量转化为热量, 削弱辐射冷却效果; 其二, 重吸收效应降低了荧光的外量子效率, 使材料实际表现出的发光强度远低于其本身的发光能力。

4.2. 近红外波段反射不足制约全光谱管理

太阳光谱能量分布中, 近红外波段(780 nm~2500 nm)约占太阳总辐射能量的 50%, 是日间辐射制冷必须重点管理的波段。传统辐射制冷材料(如多孔聚合物、无机颗粒复合涂层)主要通过米氏散射实现对近红外光的反射, 其反射效率强烈依赖于散射体的尺寸与分布。因此, 当前稀土荧光粉光致发光辐射制冷材料面临的另一突出问题, 在于对太阳光谱中近红外波段的反射与利用能力不足, 难以实现全光谱的精细管理。

5. 展望

光致发光辐射制冷材料旨在解决美学需求与制冷效能间的矛盾, 由此研究人员开展了一系列基于稀土荧光粉的辐射制冷材料研究, 在光致发光显色的同时实现被动制冷性能, 这对辐射制冷材料的发展具有里程碑式意义。然而, 目前的研究中所使用的荧光粉多为下转换发光机制, 将太阳光谱中的紫外波段

转化为可见光重新发射。实际上紫外波段在太阳光谱中仅占 7%，因此，下转换稀土荧光粉难以实现对太阳光谱的充分利用。此外，由于近红外波段在太阳光谱中占比更大且具有更高的热量，集成此种荧光粉的辐射制冷材料普遍存在对近红外波段反射不足的问题。因此，若希望进一步提升光致发光辐射制冷材料的制冷能力，未来需要对能够将近红外光转化为可见光的上转换发光机制进行研究，并开发各种上转换光致发光辐射制冷材料，这对实现太阳光谱的更有效利用以及达到更优的制冷效能具有重要的价值和意义。

参考文献

- [1] Farooq, A.S. and Zhang, P. (2021) Fundamentals, Materials and Strategies for Personal Thermal Management by Next-Generation Textiles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **142**, Article ID: 106249. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106249>
- [2] Xue, S., Huang, G., Chen, Q., Wang, X., Fan, J. and Shou, D. (2024) Personal Thermal Management by Radiative Cooling and Heating. *Nano-Micro Letters*, **16**, Article No. 153. <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01360-1>
- [3] Hu, X.J., Li, T.T., Shou, B.B., Li, L., Ren, H. and Lou, C. (2024) Novel Personal Cooling Textiles Revolutionizing Human Thermal Management: Principles, Designs and Applications. *Chemical Engineering Journal*, **499**, Article ID: 155729. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155729>
- [4] Jin, C., Pei, G. and Zhao, B. (2024) Development and Progress of Radiative Cooling Materials. *Clean Energy Science and Technology*, **2**, Article No. 144. <https://doi.org/10.18686/cest.v2i1.144>
- [5] Liu, J., Tang, H., Jiang, C., Wu, S., Ye, L., Zhao, D., et al. (2022) Micro-Nano Porous Structure for Efficient Daytime Radiative Sky Cooling. *Advanced Functional Materials*, **32**, Article ID: 2206962. <https://doi.org/10.1002/adfm.202206962>
- [6] Guo, N., Shi, C., Warren, N., Sprague-Klein, E.A., Sheldon, B.W., Yan, H., et al. (2024) Challenges and Opportunities for Passive Thermoregulation. *Advanced Energy Materials*, **14**, Article ID: 2401776. <https://doi.org/10.1002/aenm.202401776>
- [7] Song, J., Shen, Q., Shao, H. and Deng, X. (2023) Anti-Environmental Aging Passive Daytime Radiative Cooling. *Advanced Science*, **11**, Article ID: 2305664. <https://doi.org/10.1002/advs.202305664>
- [8] Feng, K., Wu, Y., Pei, X. and Zhou, F. (2024) Passive Daytime Radiative Cooling: From Mechanism to Materials and Applications. *Materials Today Energy*, **43**, Article ID: 101575. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2024.101575>
- [9] Xie, B., Liu, Y., Xi, W. and Hu, R. (2023) Colored Radiative Cooling: Progress and Prospects. *Materials Today Energy*, **34**, Article ID: 101302. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2023.101302>
- [10] Zhao, X., Li, J., Dong, K. and Wu, J. (2024) Switchable and Tunable Radiative Cooling: Mechanisms, Applications, and Perspectives. *ACS Nano*, **18**, 18118-18128. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c05929>
- [11] Ma, X., Fu, Y., Yang, N., Hu, X., Dai, J., Fei, B., et al. (2024) Fluorescence-Enhanced Light-Blue Bilayer Radiative Cooling Coatings. *Journal of Materials Chemistry A*, **12**, 20921-20926. <https://doi.org/10.1039/d4ta03045a>
- [12] Wang, H., Xue, C., Ma, C., Jin, X., Huang, M., Wu, Y., et al. (2024) Durable and Scalable Superhydrophobic Colored Composite Coating for Subambient Daytime Radiative Cooling. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **12**, 1681-1693. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c07329>
- [13] Xin, Y., Li, C., Gao, W. and Chen, Y. (2025) Emerging Colored and Transparent Radiative Cooling: Fundamentals, Progress, and Challenges. *Materials Today*, **83**, 355-381. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2024.12.012>
- [14] Ma, X., Fu, Y., Liu, D., Yang, N., Dai, J. and Lei, D. (2024) Fluorescence-Enabled Colored Bilayer Subambient Radiative Cooling Coatings. *Advanced Optical Materials*, **12**, Article ID: 2303296. <https://doi.org/10.1002/adom.202303296>
- [15] Cai, W., Wang, J., Wang, W., Li, S., Rahman, M.Z., Tawiah, B., et al. (2024) Colored Radiative Cooling and Flame-retardant Polyurethane-Based Coatings: Selective Absorption/Reflection in Solar Waveband. *Small*, **20**, Article ID: 2402349. <https://doi.org/10.1002/smll.202402349>
- [16] Fu, Y., Ma, X., Zhang, X., Li, Z., Wang, C., Lin, K., et al. (2025) Photoluminescent Radiative Cooling for Aesthetic and Urban Comfort. *Nature Sustainability*, **8**, 1328-1339. <https://doi.org/10.1038/s41893-025-01657-y>
- [17] Tan, R., Hu, W., Yao, X., Lin, N., Xue, P., Xu, S., et al. (2024) Flexible and Multifunctional Composite Films Based on Rare Earth Phosphors as Broadband Thermal Emitters for High-Performance Passive Radiative Cooling. *Journal of Materials Chemistry C*, **12**, 2629-2638. <https://doi.org/10.1039/d3tc04367c>
- [18] Tan, R., Liu, Y., Ma, Y., Shang, M., Xue, P., Lin, X., et al. (2026) A Fluorescence-Phase-Change Synergistic Radiative Cooler for Adaptive Thermal Management and Energy Savings. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **14**, 3118-

3128. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c12549>
- [19] Fu, Y. and Tso, C.Y. (2025) Coloured Composites Harness Photoluminescence for Radiative Cooling. *Nature Sustainability*, **8**, 1252-1253.
- [20] Hu, Q., Tan, R., Qin, F., Wang, J., Zhang, Z., Xue, P., *et al.* (2026) Advanced Luminescent Metamaterials with Porous Structures and Rare Earth Phosphors for Efficient Passive Daytime Radiative Cooling and Energy Saving. *Materials Today Energy*, **56**, Article ID: 102187. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2025.102187>
- [21] Hu, Q., Tan, R., Zhong, P., Han, K., Li, Y., Xue, P., *et al.* (2025) Multifunctional Broadband Emitters Based on Rare Earth Phosphors for All-Weather and Efficient Radiative Cooling and Energy Saving. *Journal of Materials Chemistry A*, **13**, 8549-8558. <https://doi.org/10.1039/d4ta08945f>
- [22] Zhou, Y., Lu, C. and Xiong, R. (2025) Hierarchical Nanocellulose Photonic Design for Synergistic Colored Radiative Cooling. *ACS Nano*, **19**, 5029-5039. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c00330>
- [23] Xie, L., Wang, X., Liang, S., Zou, X., Sun, S., Zhou, Y., *et al.* (2024) "Change According to the Situation"—Color-Accommodative Nature-Skin-Derived Thermochromic Membrane for Active All-Season Thermal Management. *Advanced Functional Materials*, **34**, Article ID: 2405582. <https://doi.org/10.1002/adfm.202405582>
- [24] Wu, P., Gu, J., Liu, X., Ren, Y., Mi, X., Zhan, W., *et al.* (2024) A Robust Core-Shell Nanofabric with Personal Protection, Health Monitoring and Physical Comfort for Smart Sportswear. *Advanced Materials*, **36**, Article ID: 2411131. <https://doi.org/10.1002/adma.202411131>
- [25] Ye, Q., Chen, X., Yan, H. and Chen, M. (2025) Thermal Conductive Radiative Cooling Film for Local Heat Dissipation. *Materials Today Physics*, **50**, Article ID: 101626. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2024.101626>
- [26] Li, W., Zhan, H., Huang, N., Ying, Y., Yu, J., Zheng, J., *et al.* (2023) Scalable and Flexible Multi-Layer Prismatic Photonic Metamaterial Film for Efficient Daytime Radiative Cooling. *Small Methods*, **8**, Article ID: 2301258. <https://doi.org/10.1002/smt.202301258>
- [27] Mandal, J., Fu, Y., Overvig, A.C., Jia, M., Sun, K., Shi, N.N., *et al.* (2018) Hierarchically Porous Polymer Coatings for Highly Efficient Passive Daytime Radiative Cooling. *Science*, **362**, 315-319. <https://doi.org/10.1126/science.aat9513>