

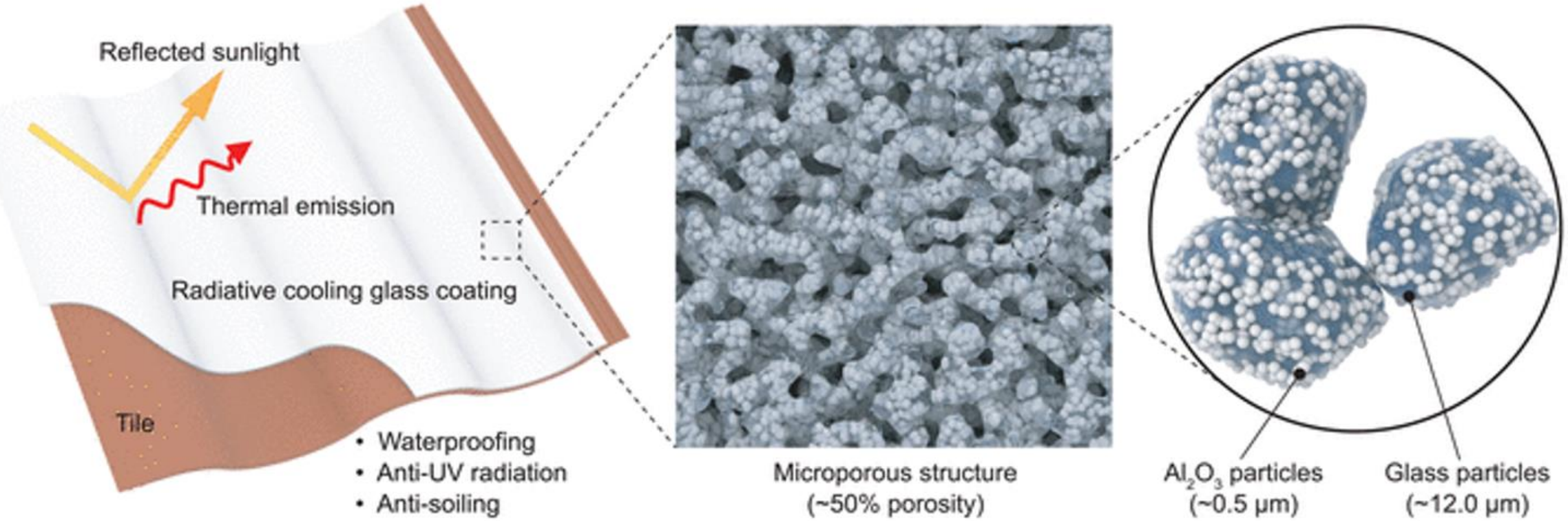
一种多功能辐射制冷材料

辐射制冷 背景介绍

全球每年约10%的用电量用于建筑空调制冷，预计到2050年制冷需求将增加两倍，因此需要采取不同的方法来减轻电网压力并应对全球变暖。**被动式日间辐射制冷材料**通过反射阳光并向寒冷的宇宙($\sim 3\text{K}$)发射长波红外(LWIR)辐射，可以将建筑物冷却所需的能量减少高达60%。此外，被动辐射制冷技术还可应用于太阳能电池、发电厂冷凝器、个人热舒适的高性能纺织品、露水收集和减缓冰川融化等多个领域。

然而，被动辐射制冷技术的发展仍存在以下问题：

- 1、开发基于多层无机薄膜的纳米光子结构成本昂贵难以大规模应用
- 2、基于有机聚合物的材料受到环境稳定性的限制
- 3、微米/纳米级陶瓷存在机械强度差等问题



最近，马里兰大学胡良兵等人开发了一种**随机光子复合材料(randomized photonic composite)**，该材料由**微孔玻璃框架和氧化铝颗粒**组成，其中微孔玻璃框架具有选择性长波红外发射以及相对较高的太阳反射率，氧化铝颗粒具有强烈散射阳光且可防止制造过程中多孔结构的致密化。即使在高温湿度条件（高达80%）下，这种微孔玻璃涂层也能在中午和夜间分别使温度下降约 3.5°C 和 4°C 。即使暴露在水、紫外线辐射、污垢和高温等恶劣条件下，这种辐射制冷玻璃涂层也能保持高太阳光反射率。

理论计算 制备工艺

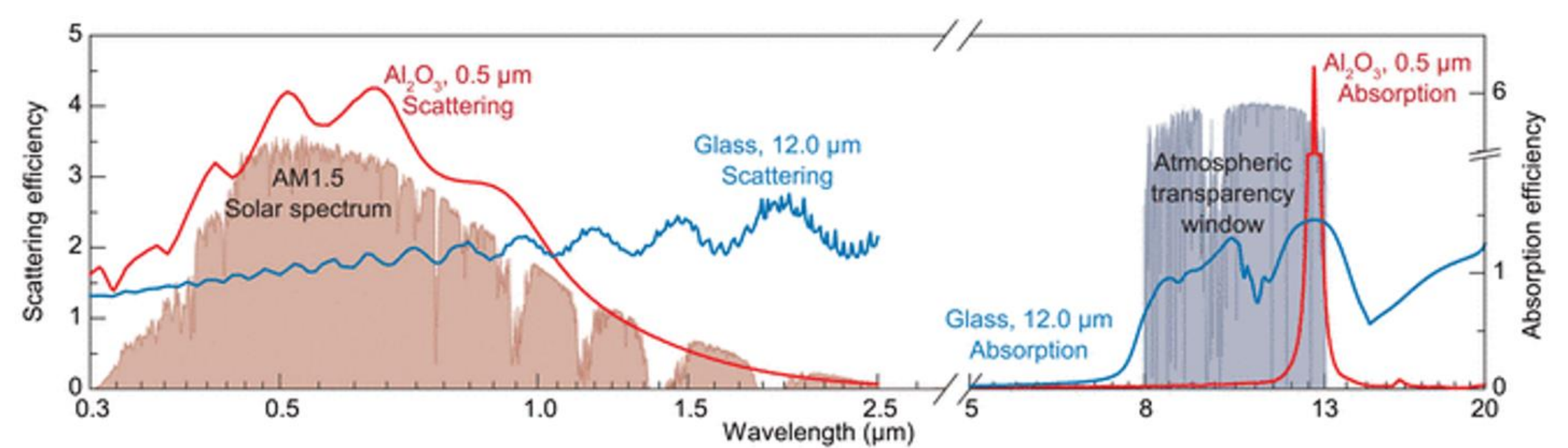
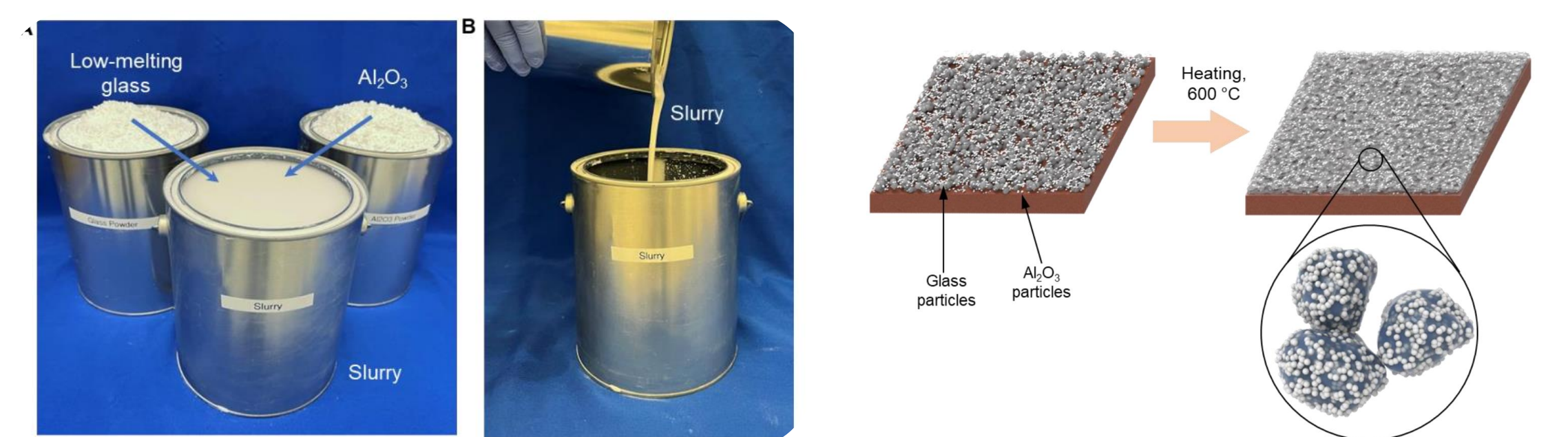


图 利用Lorenz-Mie理论从理论上确定了玻璃和 Al_2O_3 颗粒的最佳尺寸，使用Tidy3D软件进行全波模拟进一步验证预测

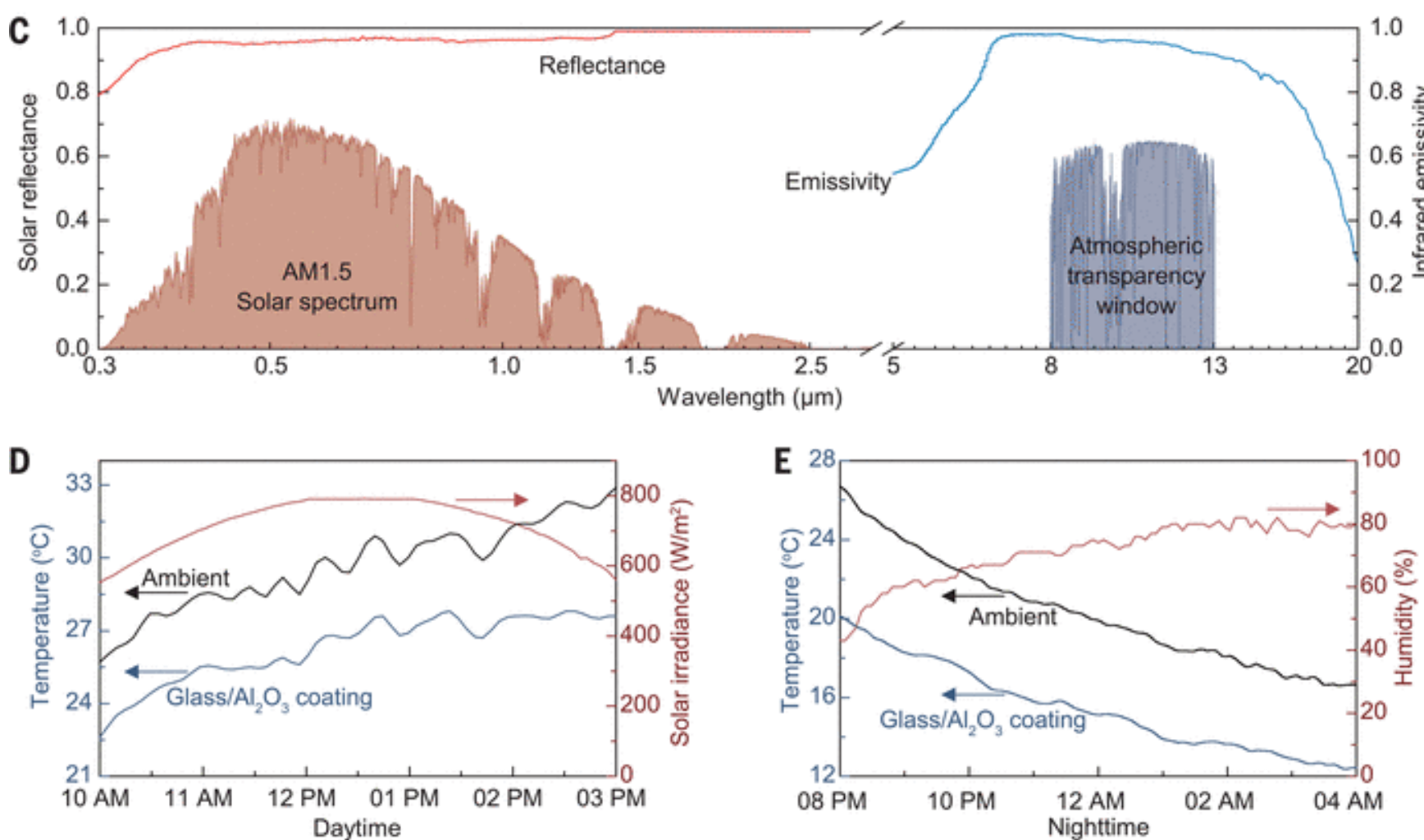


制备：低熔点玻璃颗粒和 Al_2O_3 颗粒以不同的质量比（如 1:1）球磨混合。然后将混合颗粒分散在乙醇中，制备成均匀的浆料，用于刷涂、空气喷涂或刀片涂层。在瓷砖上涂抹厚度约为 $550\text{ }\mu\text{m}$ 的浆料后，在通风橱中风干约 3 分钟，使乙醇完全蒸发。最后，在马弗炉（加热速度约为 $40^{\circ}\text{C}/\text{分钟}$ ）中以 600°C 加热 <1 分钟

性能测试

光学性能测试和室外测试

涂层在大气透明窗口中表现出0.96的高太阳反射率和高发射率，使其能够最大限度地减少太阳加热



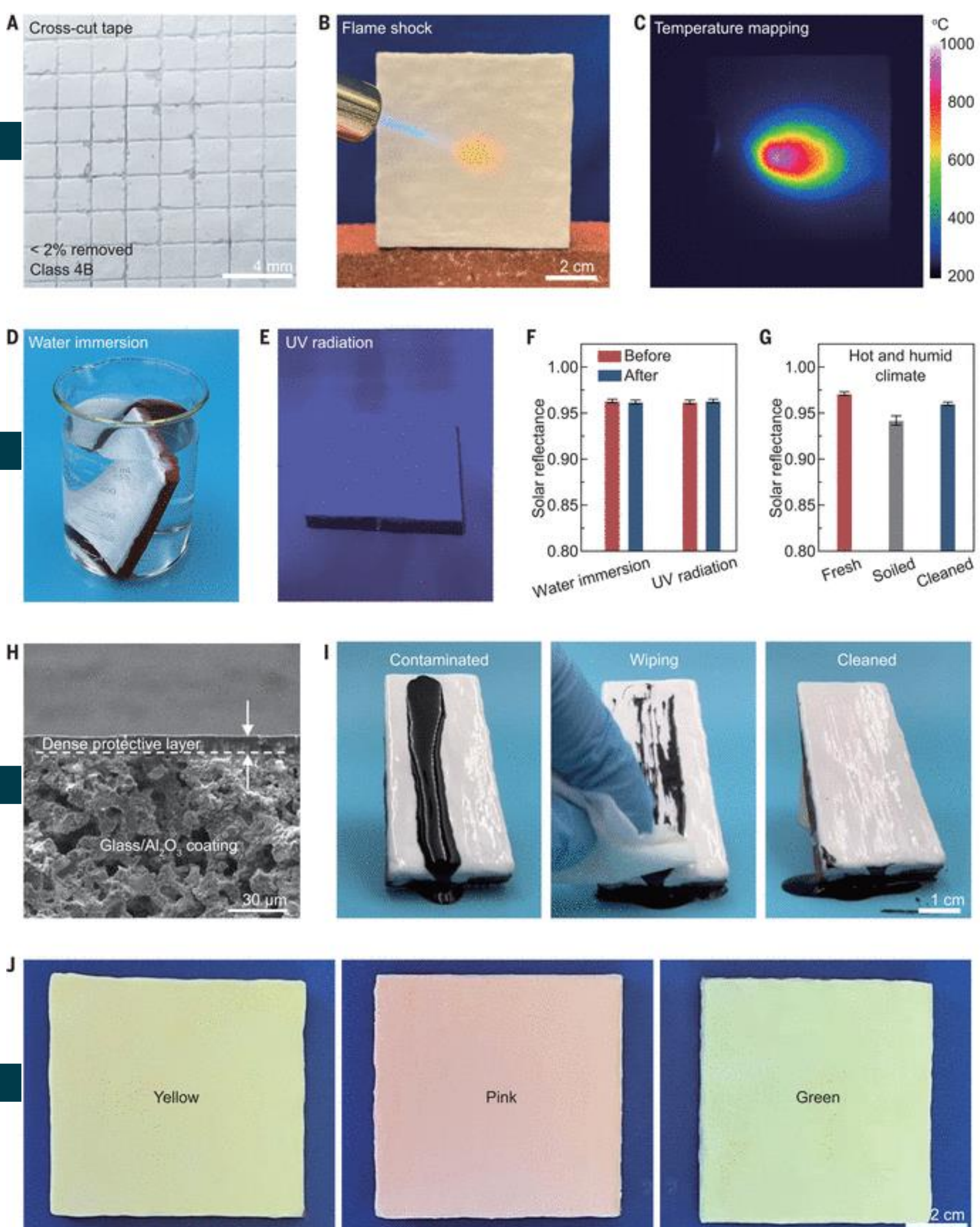
环境稳定性测试

剥离强度测试和热测试

暴露在水中和紫外线中

抗尘测试

不同颜色性能测试

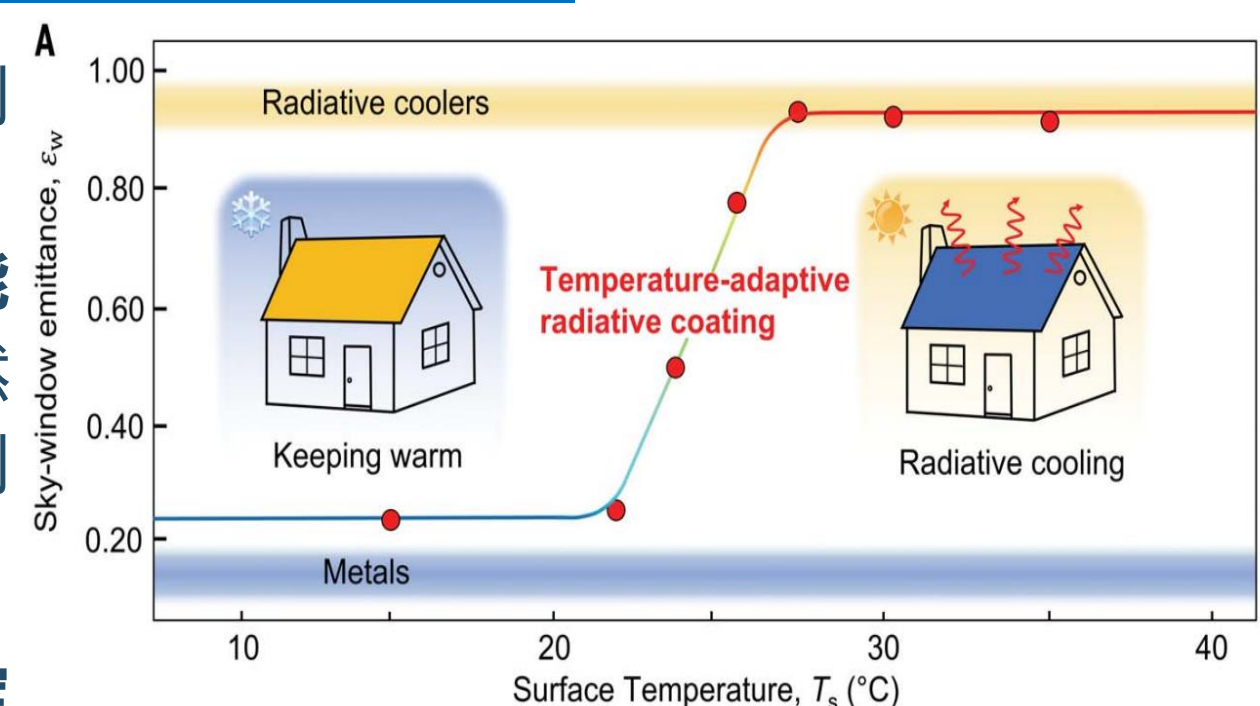


设计原则 产业畅想

实际上，这篇文章已经阐释了辐射制冷材料的设计原则，如**多功能复合、低成本和易生产、计算模拟得出可能的最佳粒径**等。但是大规模应用仍然存在一定的问题（如无法解决“过制冷”问题，在阴天、夜晚效率较低）

面对“过制冷”问题，加州大学吴军桥等人开发了一种**自适应的辐射制冷材料**，在温度较低时抑制辐射制冷。结合最新的研究，我们想象设计这样一种材料：

具有多层复合结构的自适应辐射制冷材料



降低温度（最重要）

低成本和易生产

多功能和自适应

计算模拟简化材料设计

绿色合成和环境友好

这种材料由多层结构组成，每层都有特定的功能，通过复合我们可以实现多功能集成，适用于多变的气候，维护成本低。

□ **最外层是多功能涂层**，用于实现辐射制冷的“自适应”，解决过制冷问题。例如，钨掺杂的二氧化钛，在温度较低时，对红外线是“透明”的，起到保温的效果；当温度较高时，吸收红外线，起到制冷的效果。

□ **中间层由特殊设计的聚合物组成**，能够在环境温度变化时调整其红外辐射率，以优化冷却效果。对于聚合物，我们可以尝试寻找一种**环境响应型材料**：这种材料能够根据环境湿度和温度变化调整自身的光谱特性。例如，在温度升高时，材料表面的纳米结构发生变化，以增加红外辐射，从而提高冷却效率。

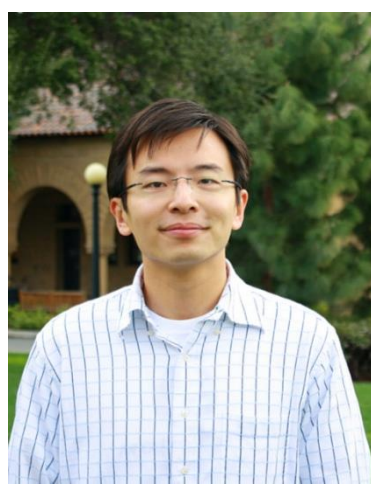
□ **最内层是一种强度高、耐久性好的支撑材料**，保证整体结构的稳定性，增加机械强度。

参考文献

1. *Science*. 2023;382(6671):684-91.
2. *Science*. 2021;374(6574):1504-9.
3. *Nature Sustainability*. 2023;6(11):1446-54.
4. *Nature*. 2014;515(7528):540-4.
5. *Nat Commun*. 2023;14(1):6129.
6. *Joule*. 2023;7(11):2552-67.



Liangbing Hu



Jia Zhu