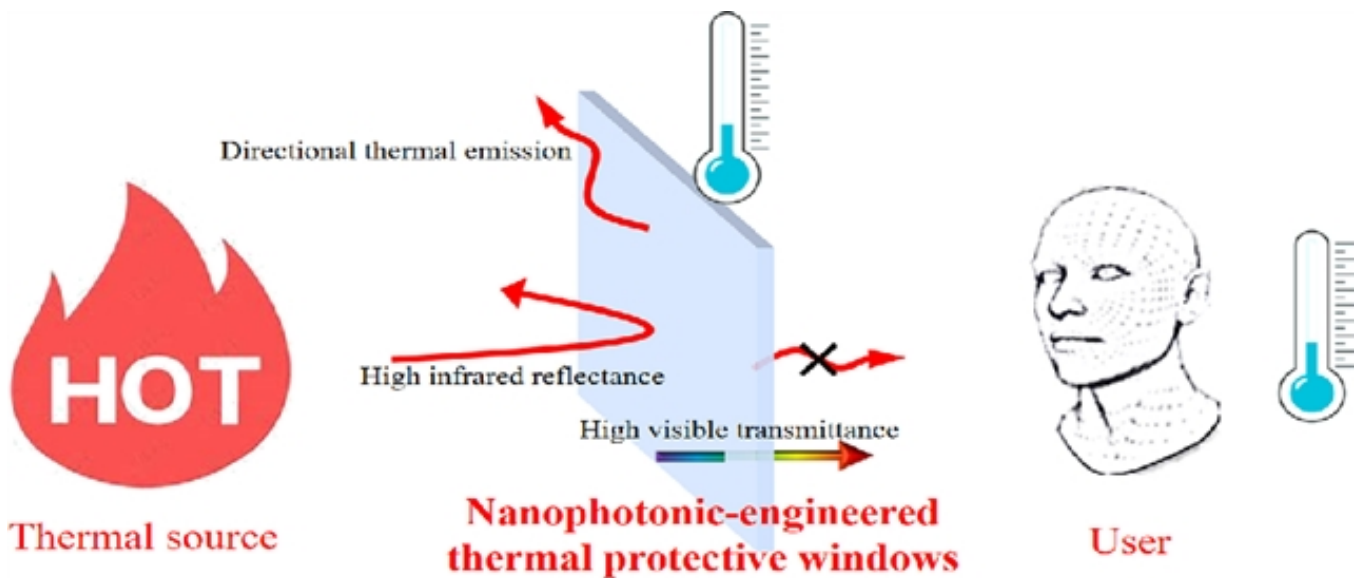


# 基于双面纳米光学薄膜的定向辐射制冷型热防护窗

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36429.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！



## 导读

近期，浙江大学李强教授和西湖大学仇旻教授团队在Light: Advanced Manufacturing发表了题为Photonic control of thermal radiation for protective windows的研究论文。

针对火灾和钢铁冶炼等高温场景中现有热防护窗缺乏热辐射调控能力的问题，该研究提出一种基于双面纳米光学薄膜的定向辐射制冷型热防护窗策略，通过将宽带定向热辐射器和低辐射率（Low-E）薄膜结合到商用聚碳酸酯（PC）热防护窗两侧，利用纳米光子膜系结构设计出可见透明的全长波红外定向热辐射器，进而结合商用PC窗制备出具有宽带定向辐射制冷功能的热防护窗。与商用热防护窗相比，这种定向辐射制冷型热防护窗能提供更优异的热防护性能和人体热舒适度，且具备可见高透明、耐高温、耐刮擦和抗冲击等性能，可更好地为消防和炼钢等高温环境中的特种工作者提供热防护与热舒适，有望在热辐射调控和高温热防护领域带来新的应用。

在火灾、炼钢厂等高温场景中，高温熔炉或火源会持续产生大量热辐射，不仅会导致周围仪器设备因温度过高而损坏，还会对工作者的身体健康造成伤害——可能引发中暑、脱水和热衰竭等热应激反应，严重时甚至导致热射病和死亡。同时，高温工作现场往往存在大量火花、飞屑、粉尘及坠落物体等，这些都会伤害人的眼睛、面部和颈部。因此，面对高温热源时，人体的热防护和热舒适极为重要，尤其在消防救援和工人生产作业过程中，提供热防护窗以保障消防员和工人的生命安全具有重要的现实意义和应用价值。

目前的热防护窗主要采用导热系数低的透明隔热材料，如聚碳酸酯（PC）、聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）和二氧化硅等，但这些材料通常具有红外高吸收和高辐射特性。如图1所示，一方面，热防护窗朝向高温热源的一侧会不断吸收来自热源的大量辐射能量，导致自身温度急剧升高，甚至达到几；另一方面，其面向用户或设备的一侧会持续向用户或仪器设备辐射热量，造成人体热损伤或仪器失灵等现象。因此，现有热防护窗在为用户提供有效热防护和个人热舒适方面存在明显不足。此外，PC和PMMA等透明材料耐刮擦性能较差，而利用二氧化硅等玻璃材料设计的低辐射率玻璃抗冲击性能较差，这些劣势限制了它们在消防、钢铁冶炼等复杂特种作业中的应用。因此，提供一种兼具优异热防护、热舒适性能且能适应复杂高温工作环境的先进高效热防护窗设计方法，变得至关重要且迫在眉睫。

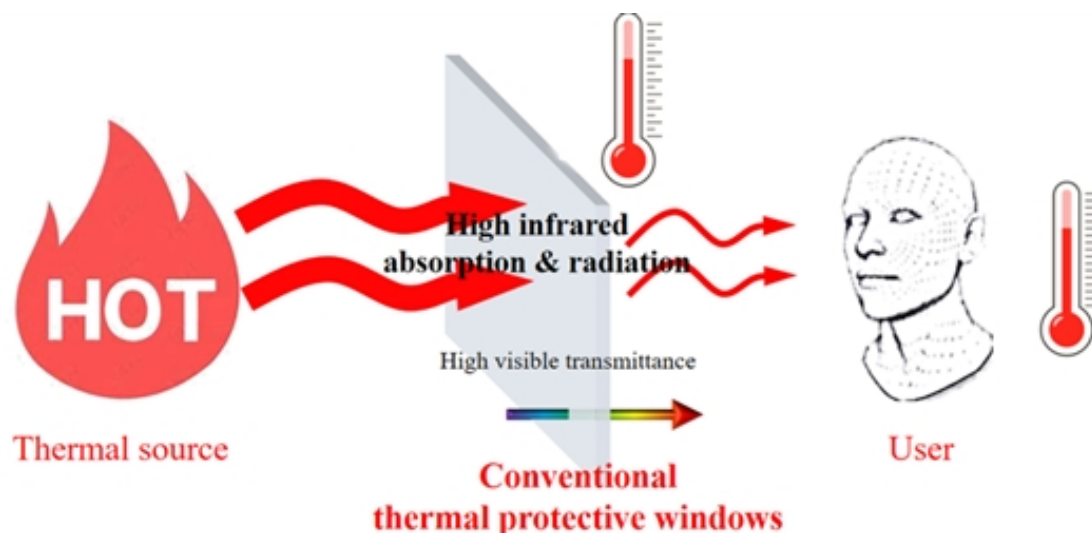


图1：传统的热防护窗的热交换过程示意图

该研究团队将可见透明的宽带定向热辐射器和Low-E薄膜与商用PC窗相结合，设计出基于双面纳米光学薄膜的定向辐射制冷型热防护窗，其结构示意图如图2所示。热防护窗的背面是可见透明（透过率大于0.8）的Low-E薄膜材料，主要由镀氧化铟锡（ITO）的PET薄膜构成。由于ITO具有高红外电导率，这种Low-E薄膜在3-14  $\mu\text{m}$ 红外波段表现出低辐射率（对应高红外反射率），因此能反射来自热源的大量热辐射，防止热防护窗吸热升温。

热防护窗的正面是可见透明（透过率大于0.8）的宽带定向热辐射器。针对以往定向热辐射器可见不透明的问题，研究团队利用兼具可见透明和红外高反射的ITO薄膜取代金属衬底，提出基于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnS}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Low-E}$ 多层膜系结构的可见透明宽带定向热辐射器。与利用多种近零介电常数（ENZ）材料实现的宽带定向热辐射相比，这种设计仅需单一ENZ材料就能实现宽带定向热辐射，极大降低了成本并简化了器件制备过程；同时，它还突破了单一ENZ只能实现窄带定向热辐射的限制，为后续研究定向热辐射的带宽调控提供了更多材料可控自由度。

该定向辐射制冷型热防护窗在整个可见光波段具有高透过率，其中紫线表示其正面在3-14  $\mu\text{m}$  红外波段具有高法向反射率，可反射来自高温热源的热辐射；红色实线表示正面在8-14  $\mu\text{m}$  红外大气窗口波段具有朝特定方向 ( $\theta_e$ ) 的高定向辐射率，能实现被动定向辐射制冷；红色虚线表示背面在3-14  $\mu\text{m}$  红外波段具有低法向辐射率，可抑制自身对用户的热辐射。因此，这种基于双面纳米光学薄膜且具有宽带定向辐射制冷功能的热防护窗设计策略，能在高温工作场景下为用户提供良好的热防护和人体热舒适性能。

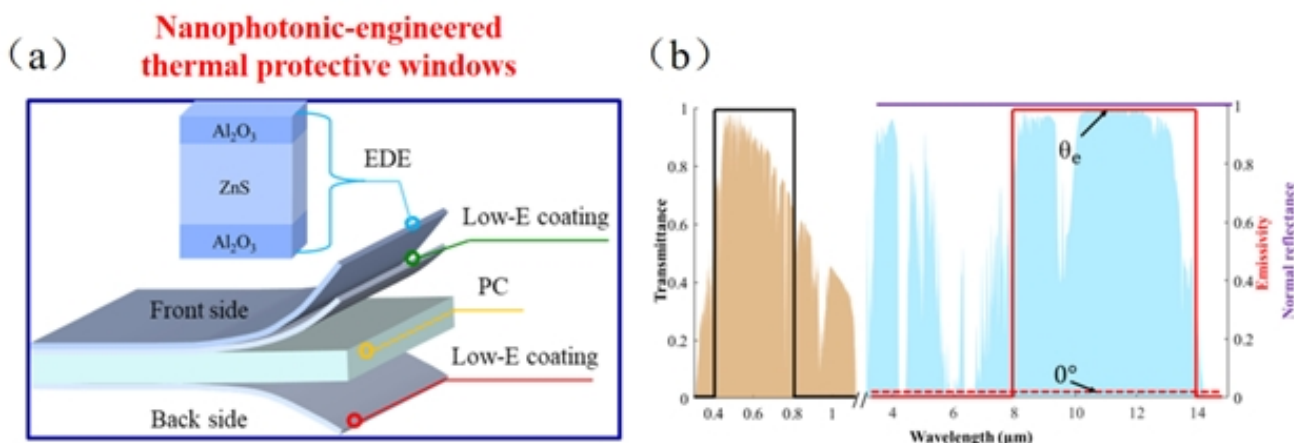


图2：基于双面纳米光学薄膜的定向辐射制冷型热防护窗。（a）结构示意图。（b）理想光学特性

## 总结与展望

该研究提出并制备的基于双面纳米光学薄膜的宽带定向辐射制冷型热防护窗，为复杂高温高危工作环境中的用户提供了优异的热防护和个人热舒适性能。这种热防护窗还具有可见高透明、耐高温、耐刮擦和抗冲击等性能，能更好地为消防和炼钢等复杂高温工作环境中的特种工作者提供热防护与热舒适。该研究将促进定向热辐射器在宽光谱范围内的高辐射和热传递研究，同时，这种将热传递限制在特定波长范围和特定方向内的能力，对推动纳米光子结构热辐射器在实际生活中的应用具有重要现实意义。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2025.034>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。

作者：李强等 来源：《光：先进制造》

更多科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

---

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://iikx.com)转发