

太阳能被动辐射冷却系统模拟分析研究

张雪寒, 马瑞华

攀枝花学院土木与建筑工程学院, 四川 攀枝花

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2025年12月2日; 发布日期: 2025年12月17日

摘要

当下全球能源危机与环境问题日益严峻, 太阳能被动辐射冷却技术凭借其不消耗能源、零碳排放及高效节能的显著优势备受关注。本研究使用软件COMSOL Multiphysics 6.3进行仿真模拟, 构建多物理场耦合模型, 探究不同基底材料、辐射材料、薄膜厚度等因素对冷却薄膜性能的影响。研究表明: 辐射材料均为二氧化硅时, 冷却薄膜基底材料为银时降温 3.7°C , 基底材料为铝时降温 2.5°C , 银作为基底材料降温效果更好; 以氮化硅作为辐射制冷功能材料时, 其冷却效果略优于二氧化硅, 不过该类材料的制冷性能并未实现显著的性能突破; 基底材料为铝板, 辐射材料二氧化硅的厚度为 $0.05\mu\text{m}$ 时降温 2.3°C , 二氧化硅厚度增加到 $0.15\mu\text{m}$ 时降温 3.4°C , 降温效果为原来的1.48倍。

关键词

被动辐射冷却, 多物理场模拟, 冷却性能

Simulation and Analysis of a Solar Passive Radiative Cooling System

Xuehan Zhang, Ruihua Ma

School of Civil and Architectural Engineering, Panzhihua University, Panzhihua Sichuan

Received: November 11, 2025; accepted: December 2, 2025; published: December 17, 2025

Abstract

Given the increasingly severe global energy crisis and environmental issues, solar passive radiative cooling technology has attracted considerable attention due to its remarkable advantages of no energy consumption, zero carbon emissions, and high energy efficiency. In this study, COMSOL Multiphysics 6.3 was employed for simulation; a multi-physics coupling model was constructed to investigate the effects of different factors including substrate materials, radiative materials and film thicknesses on the cooling performance of the radiative cooling film, and the results indicate that

when silica (SiO_2) is used as the radiative material, the cooling film achieves a temperature reduction of 3.7°C with silver (Ag) as the substrate and 2.5°C with aluminum (Al) as the substrate, proving that silver has better cooling effectiveness as a substrate material, silicon nitride (Si_3N_4) as a radiative cooling material shows slightly better performance than silicon, without achieving any notable breakthrough in cooling efficiency, and for the film with an aluminum plate substrate and a silica radiative layer, a temperature reduction of 2.3°C is obtained when the silica thickness is $0.05\text{ }\mu\text{m}$, and the temperature reduction increases to 3.4°C when the silica thickness is increased to $0.15\text{ }\mu\text{m}$, which means the cooling effect is 1.48 times that of the thinner film.

Keywords

Passive Radiative Cooling, Multi-Physics Simulation, Cooling Performance

Copyright © 2025 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

在当前全球能源紧张和环境问题加剧的背景下,探索高效并且清洁的节能技术已成为达到“双碳”目标的重要途径之一[1]。随着世界人口的不断增加、城市化进程的快速推进和工业化程度的深入,全球对能源的需求显著上升。过度使用能源导致了許多全球性的环境问题,包括污染、生态系统损害以及气候变暖[2]-[5]。世界范围内能源消耗增长加速了对开发可再生资源的渴望和要求。在当前全球面临能源危机、全球变暖以及新能源发展受阻的背景下,能够做到不消耗能源和调节环境的被动制冷技术受到广泛关注[6][7]。据研究展望,2050年以后冷却需求带来的能耗将在建筑总能耗中占据主导地位,且会大幅超过供暖所产生的能耗[8]。以空调为代表的传统建筑制冷手段能耗问题突出:在发达国家及部分发展中国家,建筑能耗占总能耗的30%~40%,而空调、供暖等暖通系统能源消耗约占建筑运行总能耗的50%[9]。在国家提倡“双碳”的政策背景下,制冷行业践行节能降耗举措加快推进成为了必然发展趋势。

2. 天空辐射冷却理论分析

热辐射是热量传递的三种基本方式之一,指物体通过自身内部微观粒子的热运动,以电磁波形式向外界发射能量,且无需任何介质即可传播的热量传递过程。只要物体温度高于绝对零度就会持续产生热辐射[10]。太阳是一个表面温度约为6000 K的高温热源,具有很高的辐射能量。宇宙中温度仅为3 K,这使它成为地球散热的理想接收环境。地球上的物体与外太空进行辐射换热,本质是热量自发地从高温向低温进行热量传递的过程,无需消耗额外能源,且不会产生碳排放,因此辐射传热技术是一种低碳环保的制冷技术[11][12]。日间时段太阳辐射照度可达 1000 W/m^2 左右,若未能有效控制太阳辐射的吸收,大量太阳热量会直接抵消薄膜向天空的辐射散热效果,甚至导致薄膜表面温度高于环境温度,完全丧失冷却功能。因此,在辐射冷却薄膜的设计与性能优化过程中,必须将太阳辐射的影响作为核心考量因素[13][14]。

材料的光谱特性是决定太阳辐射吸收与反射效果的核心关键,不同材料因分子结构、微观形貌及化学组成的差异,对太阳光谱的响应特性截然不同,具体表现为吸收率与反射率的显著差异[15]。由此不难看出,辐射冷却薄膜的材料选择是决定其日间辐射冷却性能优劣的核心因素,材料本身的光学特性制约着冷却效果的实现与提升。科学且合理的材料选择是实现高效日间辐射冷却的前提与保障。同时,科学合理的材料选型不仅是实现有效降温的前提,更是提升系统净冷却功率、拓展技术工程化应用场景的关

键, 对辐射冷却技术的实用化发展具有不可替代的重要作用。

3. 模型建立

为评估辐射冷却薄膜的实际冷却效能, 使用软件 COMSOL Multiphysics 6.3 进行仿真模拟, 在软件中选择“表面对表面辐射”模块构建物理场。构建简易的混凝土建筑物模型, 尺寸为 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$, 辐射薄膜覆盖于建筑物屋顶, 建筑主体侧面及底面设为热绝缘边界。定义外太空辐射冷源温度 3 K 、有效天空温度 255 K 、 $8\sim 13\text{ }\mu\text{m}$ 波段大气发射率 0.85 。全局选用自由四面体网格, 薄膜按每波长 6 个网格点的标准局部加密, 设置最小单元尺寸 60 nm ; 建筑主体与屋顶区域最大单元尺寸放宽至 0.3 m 以控制网格总量。本研究冷却薄膜基底分别选用银层和铝层, 银的太阳反射率为 0.95 , 铝的太阳反射率为 0.90 [16]。针对本文的研究, 对模型做出如下简化和假设:

- (1) 太阳辐射强度设为 1000 W/m^2 。
- (2) 忽略空气流动和热传导, 只关注薄层与外部之间的辐射热交换以及薄层内部的导热情况。
- (3) 仅考虑太阳辐射、外太空辐射与大气逆辐射的耦合作用, 不考虑其他热源或冷源的影响。
- (4) 温度变化根据环境温度/太阳辐照强度的“昼夜周期性变化模型”计算, 有如下公式:

$$T(t) = T_{\text{avg}} + dT \cos\left(\frac{2\pi(t-14)}{24}\right) \quad (1)$$

式中: $T(t)$ 为任意时刻的瞬时温度; T_{avg} 为 24 小时平均温度; dT 为温度的波动幅度; t 为时间变量; $\frac{2\pi}{24}$ 为角频率。

4. 模拟结果与分析

4.1. 基底材料类型的影响

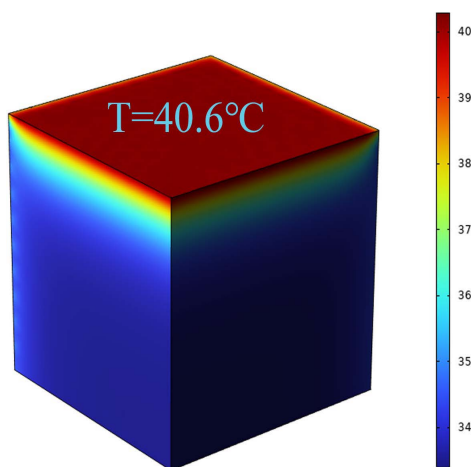


Figure 1. Without radiation film coverage
图 1. 无辐射薄膜覆盖

被动辐射冷却薄膜采用“上部辐射散热层 + 下部太阳反射层”的分层结构: 上部辐射层的核心功能是在红外大气窗口($8\sim 13\text{ }\mu\text{m}$)具备高辐射率, 将薄膜内的热量以红外辐射形式高效传递至外太空; 下部反射层需选用太阳光谱反射率高的金属材料, 核心作用是反射太阳辐射, 降低薄膜的太阳吸收率, 减少热输入, 实现低吸热高散热的冷却效果。冷却薄膜基底分别采用银层和铝层, 厚度为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 上部均为 0.2

μm 二氧化硅薄膜层。通过式(1)计算 14 h 空气温度为 33°C 。从图 1 可以看出 14 h 未使用辐射薄膜时建筑物屋顶温度为 40.6°C ，图 2 表示使用铝作为基底材料时建筑物屋顶温度为 30.5°C ，使用辐射冷却薄膜后屋顶温度下降了 10.1°C 。混凝土的表现颜色为灰色，其太阳吸收率约为 0.65 [17]，意味着大部分太阳辐射能会被表面吸收，并转化为热能传递至混凝土内部，所以屋顶温度高于空气温度，使用了辐射薄膜后具有较好的冷却效果。测量 14 h 不同基底材料冷却薄膜的温度并计算与空气的温差，从图 3 可以看出基底为银层时温差为 3.7°C ，基底为铝层时温差为 2.5°C ，银基底比铝基底的降温效果更好。

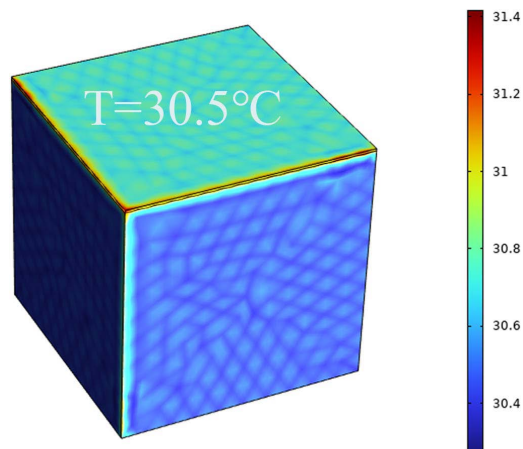


Figure 2. With radiative cooling film coverage
图 2. 有辐射薄膜覆盖

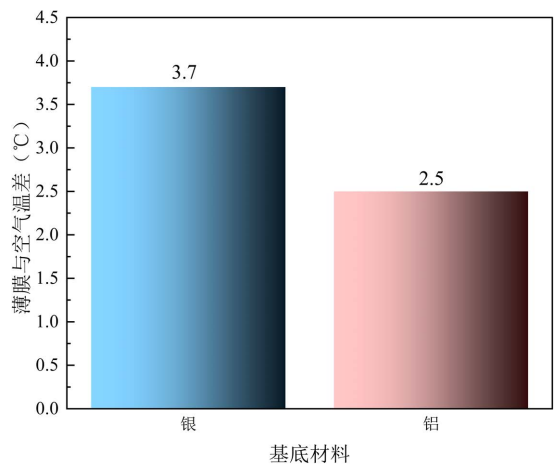


Figure 3. Temperature difference between thin films with different substrates and air
图 3. 不同基底薄膜与空气温差

4.2. 不同结构材料的影响

冷却薄膜基底分别采用银层和铝层，厚度为 $10\ \mu\text{m}$ ，氮化硅作为辐射材料，厚度为 $0.2\ \mu\text{m}$ 。测量 14 h 冷却薄膜温度并计算与空气的温差。从图 4 可以看出基底为银层时温差为 3.8°C ，基底为铝层时温差为 3.2°C 。相较于二氧化硅作为辐射材料，基底为银层时温差增大 0.1°C ，基底为铝层时温差增大 0.7°C ，以氮化硅作为辐射制冷功能材料时，其冷却效果略优于二氧化硅，不过该材料的制冷性能并未实现显著的性能突破。

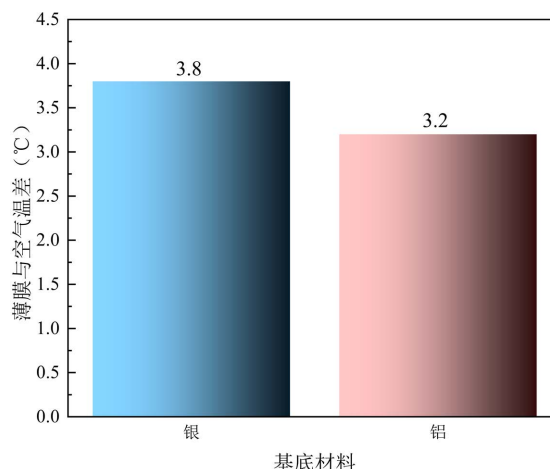


Figure 4. Temperature difference between thin films with different structures and air
图 4. 不同结构薄膜与空气温差

4.3. 基层材料厚度的影响

基底材料都为铝板, 厚度为 $10\ \mu\text{m}$, 辐射材料分别选择厚度为 $0.05\ \mu\text{m}$ 和 $0.15\ \mu\text{m}$ 的二氧化硅薄膜。测量 14 h 冷却薄膜的温度并计算与空气的温差。从图 5 可以看出二氧化硅薄膜厚度为 $0.05\ \mu\text{m}$ 温差为 2.3°C , 二氧化硅薄膜厚度为 $0.15\ \mu\text{m}$ 温差为 3.4°C , 冷却降温效果为原来的 1.48 倍。

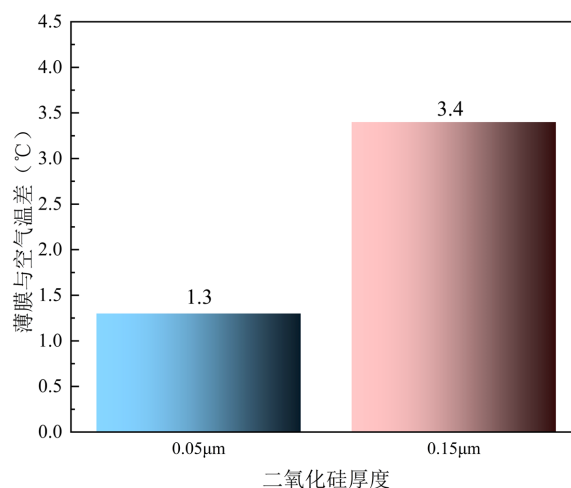


Figure 5. Temperature difference between thin films with different thicknesses and air
图 5. 不同厚度薄膜与空气温差

5. 结论

- 1) 冷却薄膜基底分别选用银层和铝层, 上部均为 $0.2\ \mu\text{m}$ 二氧化硅薄膜层时, 银层基底降温 3.7°C , 铝层基底降温 2.5°C , 银作为冷却薄膜的基底降温效果更好。
- 2) 以氮化硅作为辐射制冷功能材料时, 其冷却效果略优于二氧化硅, 不过该材料的制冷性能并未实现显著的性能突破。
- 3) 基底材料均为铝板, 辐射材料二氧化硅的厚度从 $0.05\ \mu\text{m}$ 增加到 $0.15\ \mu\text{m}$ 时冷却效果变为原来的 1.48 倍。

基金项目

- 1) 工业固态废弃物土木工程综合开发利用四川省高校重点实验室项目(SC_FQWLY-2023Z01)。
- 2) 攀枝花学院科研项目(2024PYZK07)。

参考文献

- [1] 种峻楷, 胡广超, 高建明, 等. 面向未来“双碳”形势下低阶煤高值化利用研究进展与思考[J]. 工程科学学报, 2025, 47(4): 884-896.
- [2] Singh, G.K. (2013) Solar Power Generation by PV (Photovoltaic) Technology: A Review. *Energy*, **53**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.057>
- [3] Lewis, N.S. (2016) Research Opportunities to Advance Solar Energy Utilization. *Science*, **351**, 353-362. <https://doi.org/10.1126/science.aad1920>
- [4] Haschke, J., Seif, J.P., Riesen, Y., Tomasi, A., Cattin, J., Tous, L., *et al.* (2017) The Impact of Silicon Solar Cell Architecture and Cell Interconnection on Energy Yield in Hot & Sunny Climates. *Energy & Environmental Science*, **10**, 1196-1206. <https://doi.org/10.1039/c7ee00286f>
- [5] Lewis, N.S. (2007) Toward Cost-Effective Solar Energy Use. *Science*, **315**, 798-801. <https://doi.org/10.1126/science.1137014>
- [6] 赵思名, 郭震宇, 黄娅, 等. 面向建筑节能的新型光热调控技术: 主动电致变色与被动辐射制冷[J]. 材料导报, 2025, 39(1): 16-33.
- [7] 罗杰任, 黄翔, 金洋帆, 等. 建筑物被动蒸发冷却技术研究进展和趋势[J]. 制冷与空调, 2020, 20(2): 10-14.
- [8] Ayuketah, Y., Gyamfi, S., Diawuo, F.A. and Dagoumas, A.S. (2023) Assessment of Low-Carbon Energy Transitions Policies for the Energy Demand Sector of Cameroon. *Energy for Sustainable Development*, **72**, 252-264. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.014>
- [9] 宜小芳. 公共建筑中暖通空调系统能效提升策略分析[J]. 建材发展导向, 2024, 22(11): 44-46.
- [10] 翟强, 邱昌煜, 熊滕, 等. 天空辐射制冷在建筑节能应用中的研究进展[J]. 新能源进展, 2025, 13(5): 543-554.
- [11] Ling, H., Wu, J., Su, F., Tian, Y. and Liu, Y.J. (2021) Automatic Light-Adjusting Electrochromic Device Powered by Perovskite Solar Cell. *Nature Communications*, **12**, Article No. 1010. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21086-7>
- [12] Rodriguez L, Rousseau O, Volz S, *et al.* (2018) Radiative Heat Transfer. *ACS Photonics*, **5**, 3896-3915. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.8b01031>
- [13] 李晶晶, 杜雷雷, 李仁宏. PET/MgCO₃/PEG 日间被动辐射制冷膜的制备与性能[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2025, 53(2): 157-165.
- [14] 万中伊欣, 刘东青, 余金山. 日间辐射制冷材料研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(3): 220-228.
- [15] 陈曦, 董金明, 王亚涛, 等. 聚甲醛纤维复合气凝胶的制备及其辐射冷却性能研究[J]. 中国塑料, 2025, 39(9): 26-37.
- [16] Grosjean, A., Soum-Glaude, A. and Thomas, L. (2021) Replacing Silver by Aluminum in Solar Mirrors by Improving Solar Reflectance with Dielectric Top Layers. *Sustainable Materials and Technologies*, **29**, e00307. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00307>
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范: GB 50176-2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.