

应用于志愿者服务站的被动辐射制冷涂层降温性能研究

朱龙潜^{1*}, 贺伟¹, 梁智轩²

¹广州市香港科大霍英东研究院建筑物能源研究中心, 广东 广州

²广州亚熵科技有限公司研发部, 广东 广州

收稿日期: 2025年11月26日; 录用日期: 2025年12月29日; 发布日期: 2026年1月5日

摘要

城市志愿服务站主要分布在社区、赛事场馆和酒店周边、重要交通枢纽、商业网点、旅游景点、文化广场等人流集中区域。随着全球气候变暖, 气温上升, 服务站面临高温、炎热现实挑战, 室内空调耗电量也随着气温的上升而上涨, 而部分不具备空调的站点内的志愿者的办公环境愈发严峻, 热舒适度大幅度下降。被动辐射制冷技术是一种新兴的绿色零碳制冷技术, 反射绝大部分太阳光并通过中红外线辐射实现被动式制冷的效果, 无需耗电即可以大幅度降低表面温度, 对城市志愿服务站的降温防晒、节能减排有着积极的作用。经实验测试, 涂敷了被动辐射制冷涂层的服务站比未处理的服务站外表面温度平均降低了16℃以上。

关键词

志愿服务站, 被动辐射制冷技术, 降温性能

Study on the Cooling Performance of Passive Radiative Cooling Coating Applied to Volunteer Service Stations

Longqian Zhu^{1*}, Wei He¹, Zhixuan Liang²

¹Building Energy Research Center, Guangzhou HKUST Fok Ying Tung Research Institute, Guangzhou Guangdong

²Research and Development Department, Guangzhou Yashang Technology Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: November 26, 2025; accepted: December 29, 2025; published: January 5, 2026

*通讯作者。

文章引用: 朱龙潜, 贺伟, 梁智轩. 应用于志愿者服务站的被动辐射制冷涂层降温性能研究[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(1): 138-144. DOI: 10.12677/jsta.2026.141014

Abstract

Urban volunteer service stations are primarily located in areas with high foot traffic, such as communities, sports venues, hotel districts, key transportation hubs, commercial facilities, tourist attractions, and cultural squares. With global warming leading to rising temperatures, these service stations face challenges from heat and high temperatures. The energy consumption of indoor air conditioning also increases as temperatures rise, while volunteers in stations without air conditioning endure increasingly harsh working conditions, with significantly reduced thermal comfort. Passive radiative cooling technology is an emerging green, zero-carbon cooling solution that reflects most sunlight and achieves passive cooling through mid-infrared radiation, effectively lowering surface temperatures without electricity consumption. This technology plays a positive role in cooling, sun protection, energy conservation, and emission reduction for urban volunteer service stations. Experimental tests show that stations coated with passive radiative cooling coating materials exhibit an average surface temperature reduction of over 16°C compared to uncoated stations.

Keywords

Volunteer Service Station, Passive Radiative Coating Technology, Cooling Performance

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

随着全球气候的持续变化，地球表面平均温度逐年升高、经济的发展和人们生活品质的提高，建筑制冷与降温的需求日益增长，建筑能耗在能源消耗中所占的比例越来越大[1][2]。在建筑内，制冷设备耗电占建筑能耗的30%以上，并有逐步上升的趋势[3][4]。

志愿服务站是城市志愿服务阵地和展示窗口，是志愿者的基地和枢纽，一般布置于在竞赛场馆和酒店周边、重要交通枢纽、商业网点、旅游景点、文化广场等人流集中的户外区域[5]。志愿服务站是一种典型的模块化建筑，主体框架主要由金属板材组成，在户外暴晒导致服务站空调耗电量高、碳排放高。部分服务站制冷设备耗电占服务站总耗电的60%以上。用电困难区域的服务站缺少降温手段，更是面临着站内温度高、闷热等问题。

被动辐射制冷技术是一种新兴的绿色零碳制冷技术，通过微纳米级仿生结构，形成类似撒哈拉银蚁角质层的功能涂层，反射绝大部分太阳光并通过中红外线辐射实现被动式制冷的效果，无需耗电即可以大幅度降低表面温度。被动辐射制冷涂层应用于志愿服务站的建设，有望实现降低城市志愿服务站室内温度、降低用电耗能，优化志愿者服务环境效果。

被动辐射制冷涂料一般呈现为白色，追求太阳光反射率最大化，实现制冷效果最大化[6]-[8]。志愿服务站的外观一般体现着当地文化特征、契合当下重大事件(例如：大型体育赛事等)，均有特殊设计。纯白色涂料难以满足志愿服务站外观设计需求。本项目拟为第十五届广州全运会志愿者服务站进行表面涂层改造，外观设计以棕黄色为主。因此，本项目拟使用聚偏二氟乙烯-六氟丙烯(P(VdF-HFP))作为基材，使用氧化铋对被动辐射制冷涂料进行调色，使其符合颜色符合志愿服务站外观设计需求，提高其应用可行性[9][10]。

2. 实验详解

在本文中,根据广州第十五届全运会的志愿者服务站外观设计,对被动辐射制冷涂料调色至棕黄色,并实际应用于志愿者服务站表面的改造升级,实测了调色后的被动辐射制冷涂料在志愿者服务站表面的降温效果。

2.1. 被动辐射制冷原理

被动辐射制冷技术是一种新兴的被动式制冷方式,以涂层的形式添加在物体表面,可以使物体表面反射绝大多数太阳光,同时能将热量以中红外线的方式通过辐射到外太空。制冷过程不需要耗能,是一种零碳排放的制冷方式。

2.2. 被动辐射制冷涂料的制备

在实验室中,棕黄色被动辐射制冷涂料制备流程如下:

- 1) 将 P(VdF-HFP)粉末和 N-甲基吡咯烷酮(NMP)溶液以质量比 1:11 的比例放入容器, 使用磁力搅拌器搅拌 60 分钟;
- 2) 将与 P(VdF-HFP)粉末同等质量的去离子水添加到混合物中, 使用磁力搅拌器搅拌 180 分钟;
- 3) 将溶液倒在金属基底上, 并使用涂膜器进行制膜;
- 4) 将基底浸入 4℃水中, 通过水浴溶解 NMP;
- 5) 将基底置于烤箱中以 70℃干燥 12 小时, 可得到高效的辐射制冷涂层;
- 6) 以 100:10:1 的比例混合聚二甲基硅氧烷(PDMS)、固化剂、氧化铋粉末, 使用磁力搅拌器搅拌 60 分钟, 可得棕黄色光致发光涂料;
- 7) 将棕黄色涂料敷至辐射制冷薄膜上, 在烤箱中 120℃干燥 0.5 小时, 可得到棕黄色辐射制冷涂层。

针对试制的涂层, 使用了紫外可见分光光度计测量涂层的太阳光反射光谱, 并使用傅里叶变换红外光谱仪测量其中红外发射光谱, 测量结果如表 1 所示。

Table 1. Solar reflectance and mid-infrared emissivity

表 1. 太阳光反射率及中红外线发射率

项目	设备型号	检测结果
太阳光反射率	UV3600 Plus	95.0%
中红外线发射率	Nicolet IS50	95.2%

2.3. 志愿者服务站表面涂敷施工

在志愿者服务站表面涂敷时,以涂膜器进行制膜效率较低,可将溶液以喷枪均匀喷涂在服务站表面。与此同时,施工现场不具备水浴及高温烘干条件,可直接将涂料暴露在环境中静置 2 天,完成涂料的干燥及固化,最终同样可得到棕黄色辐射制冷涂层。现场施工如图 1 所示。

经本项目调色的被动辐射制冷涂料颜色与志愿者服务站外观原漆颜色相近。如图 2 所示,实际喷涂后,与原漆几乎无色差,能完全契合志愿者服务站外观设计要求。

2.4. 站点表面降温性能测试

因被动辐射制冷技术的制冷原理,降温性能测试站点选在户外附近较少遮挡物的志愿者服务站,并选择光照充足的日期进行测试,测试时间段从 9:00 直至 18:00。

如图3所示,本项目采用DS18B20热敏电阻温度传感器,该传感器可测量温度范围为-40℃~125℃,测量精度为±0.3℃,所采集数据可通过无线传输至电脑端。该传感器测量范围及精度均符合本项目所需。



Figure 1. On-site construction of passive radiative cooling coating
图 1. 被动辐射制冷涂层现场施工



Figure 2. Comparison of passive radiative cooling coating and original paint color
图 2. 被动辐射制冷涂层与原漆颜色对比



Figure 3. Temperature sensor
图 3. 温度传感器

如图 4 所示, 传感器分别贴在未改造的站点表面及经过降温涂料改造的站点表面, 实时监测站点表面温度。

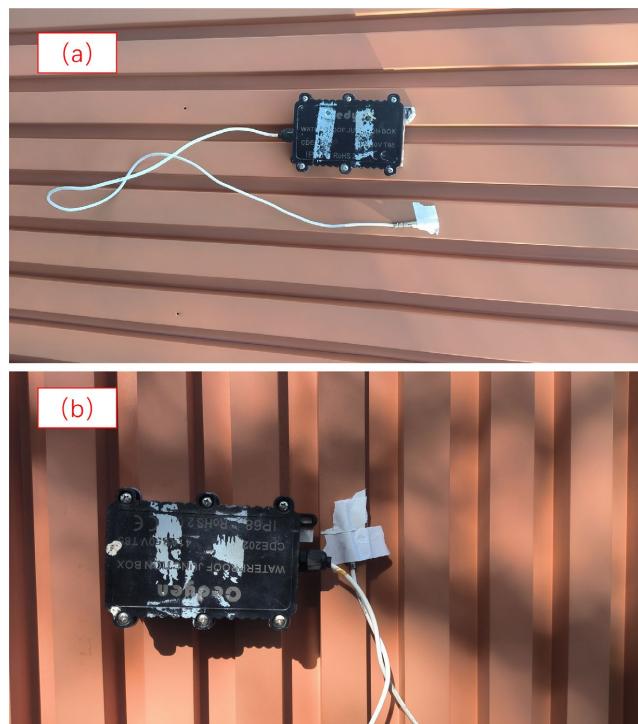


Figure 4. Site surface sensors on the (a) coated and (b) uncoated service stations
图 4. (a) 涂敷了涂层及(b) 未涂敷涂层的站点表面传感器

3. 实验结果及分析

测试时, 光照强度曲线如图 5 所示。测试选择在 10 月初, 从 9:00 开始, 直至 18:00 结束测试。考虑到部分时间有云朵遮挡阳光, 光照强度波动为正常现象。在测试期间, 当地气温为 28°C~34°C、湿度为 43%、1 级东北风。

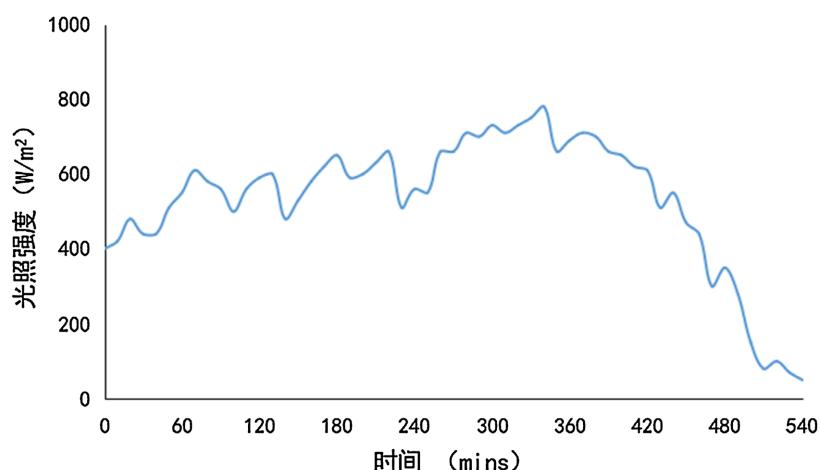


Figure 5. Solar intensity
图 5. 光照强度

站点表面温度曲线如图 6 所示。具有被动辐射制冷涂层的服务站点表面温度比未处理的站点表面温度平均低 16.3℃左右，最高温差可达 30℃。在测试时间段内，具有被动辐射制冷涂层的服务站点表面平均温度为 34.3℃，未处理的站点表面平均温度为 50.6℃。

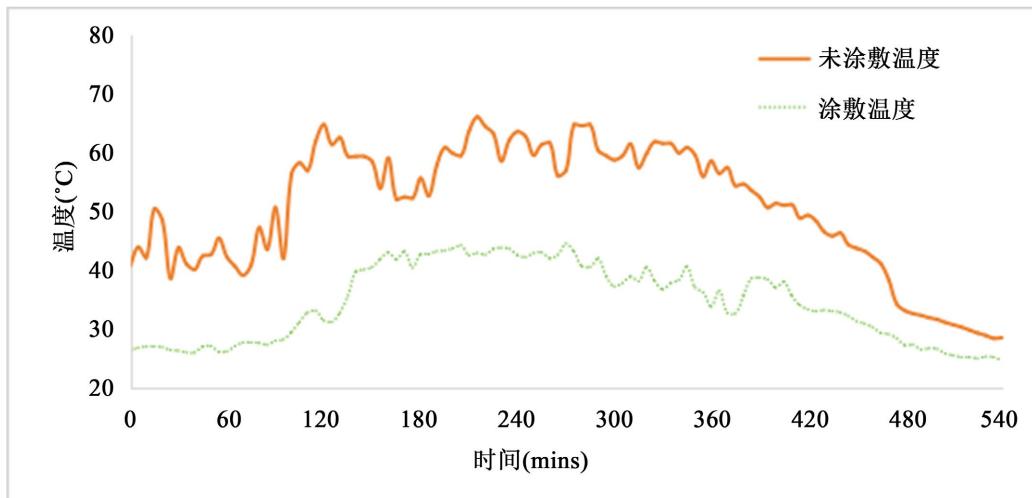


Figure 6. Comparison of the surface temperature between the coated and uncoated service stations
图 6. 涂敷了涂层及未涂敷涂层的站点表面温度对比

经测试，具有被动辐射制冷涂层的服务站点表面温度比未处理的站点表面温度平均低 2.1℃左右。在测试时间段内，具有被动辐射制冷涂层的服务站点内部平均温度约为 27.1℃，未处理的站点内部平均温度为 29.2℃，温差约为 2.1℃。据国家电网有限公司报告数据，每 1℃的温差，可节省室内空调耗电量 7% [11]。由此可见，被动辐射制冷涂层总共可节省站内压缩式空调约 15% 的耗电量。

4. 结论及讨论

在本文中，根据广州十五运会志愿者服务站外观设计要求，研发了棕黄色的被动辐射制冷涂料，并实际应用于志愿者服务站的表面升级改造。被动辐射制冷涂料与原漆颜色相近，符合外观设计要求。

在实际制备过程中，调色的被动辐射制冷涂料制备更为繁琐，耗时较长、成本较高。在实际施工喷涂过程中，需要多一道工序，约比白色被动辐射制冷涂料的施工耗时多 12 个小时。制备及施工工艺仍有待改进。

在实际测试中，具有被动辐射制冷涂层的服务站点表面温度比未处理的站点表面温度平均低 16.3℃左右，最高温差接近 30℃。由此可见，经过调色的被动辐射制冷涂层仍具有较好的降温能力，具有较强的应用潜力。

基金项目

广州市科技计划项目(2025B01W0004)。

参考文献

- [1] Abu Hamdeh, N.H. and Al-Muhtaseb, M.A. (2010) Optimization of Solar Adsorption Refrigeration System Using Experimental and Statistical Techniques. *Energy Conversion and Management*, **51**, 1610-1615. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.048>
- [2] Liang, J., Wu, J., Guo, J., Li, H., Zhou, X., Liang, S., et al. (2022) Radiative Cooling for Passive Thermal Management Towards Sustainable Carbon Neutrality. *National Science Review*, **10**, nwac208. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwac208>

- [3] IEA (2020) Is Cooling the Future of Heating? IEA.
- [4] Electrical & Mechanical Services Department (2013) Hong Kong Energy End-Use Data 2013. Electrical & Mechanical Services Department.
- [5] 陈鲲, 雷田. 跨界思维在城市家具设计中的运用——以 2011 深圳大运会志愿服务站设计为例[J]. 艺术与设计(理论), 2014(3): 123-125.
- [6] Chae, D., Kim, M., Jung, P., Son, S., Seo, J., Liu, Y., et al. (2020) Spectrally Selective Inorganic-Based Multilayer Emitter for Daytime Radiative Cooling. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 8073-8081. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b16742>
- [7] Wang, T., Wu, Y., Shi, L., Hu, X., Chen, M. and Wu, L. (2021) A Structural Polymer for Highly Efficient All-Day Passive Radiative Cooling. *Nature Communications*, **12**, Article No. 365. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20646-7>
- [8] 刘金如, 曹子豪, 闫秀燕, 等. 彩色被动辐射制冷多孔薄膜的制备及其性能[J]. 毛纺科技, 2025, 53(3): 10-16.
- [9] 片思杰, 夏林骁, 田哲源, 等. 辐射制冷技术的物理基础与研究进展[J]. 量子电子学报, 2023, 40(1): 1-21.
- [10] Min, S., Jeon, S., Yun, K. and Shin, J. (2022) All-Color Sub-Ambient Radiative Cooling Based on Photoluminescence. *ACS Photonics*, **9**, 1196-1205. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.1c01648>
- [11] 空调调高一度, 节电百分之七[R]. 贵州: 贵州能源局, 2020.