

# 高反射率铝板屋顶冷却方式研究

谢雨欣, 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: 2024年8月6日; 录用日期: 2024年8月26日; 发布日期: 2024年9月11日

## 摘要

随着全球气候变暖和城市化进程的加速, 城市热岛效应日益显著, 建筑物的屋顶作为建筑中重要的热交换界面, 其冷却性能直接影响到建筑内部的舒适度和能源消耗。本文介绍了高反射率铝板屋顶的基本原理, 即利用铝板的高反射率特性, 将大部分太阳辐射反射回大气中, 减少屋顶吸收的太阳辐射能量。探讨高反射率铝板作为屋顶材料在冷却性能方面的表现。本研究表明高反射率铝板屋顶是一种有效的冷却方式, 能够显著降低建筑物屋顶温度, 提高室内舒适度, 并减少空调能耗。通过分析说明其在实际应用中的有效性。

## 关键词

屋顶, 冷却, 高反射率铝板

# Research on Cooling Methods for High Reflectivity Aluminum Roofs

Yuxin Xie, Ruihua Ma

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

Received: Aug. 6<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 26<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 11<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

With the global warming and accelerating urbanization, the urban heat island effect is becoming more and more obvious. As an important heat exchange interface in buildings, the roof's cooling performance directly affects the comfort level and energy consumption in buildings. This paper introduces the basic principle of high reflectance aluminum roof, which utilizes the high reflectance property of aluminum to reflect most of the solar radiation back into the atmosphere, reducing the amount of solar radiation absorbed by the roof. The paper discusses the cooling performance of high reflectance aluminum roof as a roof material. The study shows that high reflectance aluminum

roof is an effective cooling method that can significantly reduce the roof temperature of buildings and improve indoor comfort, and reduce air conditioning energy consumption. The paper analyzes and explains its effectiveness in practical applications.

## Keywords

Roof, Cooling, High Reflectivity Aluminum Plate

Copyright © 2024 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

随着全球城市化进程逐步上升,城市的热岛现象也愈发严重,这使得天气变得酷热难耐,也影响了人们的正常生活。“城市热岛”的概念早在19世纪Lake Howard已提出[1]。近几十年有大量针对人类活动与城市热岛效应之间相互作用的研究,并且这些研究通过对热岛效应形成因素的分析,结合实际提出了很多具有针对性的缓解措施[2]-[5],包括增加水体面积、强化城市绿化、调整土地利用格局、减少人为排放和改进建筑材料等。而屋顶在建筑物表面积的占比较大,在城区面积比重占比也很大,美国城市的屋顶占城市区域的面积为20%~25%,全世界城市屋顶的面积接近 $3.8 \times 10^{11} \text{ m}^2$  [6]。已有的研究数据表明,在美国、欧洲等国家,冷却屋顶对屋顶温度有着非常显著的降低效果,对缓解高温有一定的作用,可能对未来的气候变化有一定的影响,且能缓解一部分城市的能源需求。所以可以从屋顶冷却入手解决城市热岛现象,改善人们的生活。

目前,从Campra等[7]对西班牙阿尔梅里亚地区气温多年的观测结果来看,大量使用高反射率屋顶有明显降低该地区气温的趋势。郭良辰等[8]利用耦合了城市单层冠层方案(Urban Canopy Model, UCM)的天气预报模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF),以南京为例,模拟不同高反射率和不同比例绿色屋顶的安装对城市高温的缓解效应。结果表明,反射率为0.8的高反射率屋顶和100%的绿色屋顶有相似的降温效果,白天平均降温 $0.5^\circ\text{C}$ ,夜间平均降温 $0.1^\circ\text{C}$ ~ $0.2^\circ\text{C}$ ,一天最大降温 $0.9^\circ\text{C}$ 。何晓凤等[9]利用单层冠层模式TEB对南京典型居民区进行离线模拟,结果表明改变建筑物反射率对城市气候改善有重大影响。Rawat等[10]总结了不同气候区不同类型表面涂料的屋面冷热性能,结果发现,不同气候区高反射屋顶的平均节能率为15.0%~35.7%。Cao等[11]对广州地区的模拟结果表明,使用高反射率屋顶,普通的夏季日能降温 $0.8^\circ\text{C}$ 左右,如果是高温热浪天气,冷却的效果能达到 $1.2^\circ\text{C}$ 。高反射率屋顶在高温热浪天气下的降温增湿效果明显优于普通夏日,且未来城市面积将进一步扩大,冷却屋顶方案仍有很大的降温空间[12]。

铝板作为一种常见的建筑材料,因其良好的导热性和耐腐蚀性,在屋顶冷却领域具有广泛的应用前景。本文将探讨高反射率铝板作为屋顶材料对屋顶冷却效果的影响。

## 2. 屋顶冷却方式

冷却屋顶主要通过以下几种方式实现:反射太阳辐射、增加屋顶隔热性能、利用蒸发冷却效应等。这些方法可以有效降低屋顶温度,减少热量向室内的传递,降低室内空调负荷,节省能源。已有的数值研究充分表明,对于美国、欧洲等国家,应用冷却屋顶后,屋顶温度有非常显著的降低[13],对缓解高温热浪有一定的作用[14][15],并可能对未来的气候变化有一定程度的影响,同时也对于城市能源需求有一

定程度的缓解。

## 2.1. 蒸发冷却型屋顶

蒸发冷却型屋顶利用水的蒸发潜热来降低屋顶温度。这种方法通常在屋顶上设置一层多孔材料(如陶粒、加气混凝土等), 并定期喷水保持湿润。当水蒸发时, 会吸收大量的热量, 从而降低屋顶温度。

## 2.2. 太阳能屋顶

隔热型冷却屋顶通过在屋顶结构中加入隔热层(如泡沫塑料、岩棉等), 减少热量向室内的传导。例如 Salamanca [16]模拟了 2009 年 7 月 10~19 日在美国菲尼克斯和亚利桑那州部署的太阳能屋顶, 结果显示 2 m 气温降低了 0.8℃, 并且减少了 13%~14% 电力能源需求。相较高反照率屋顶, 太阳能屋顶虽然反射率低, 但可以通过转化太阳能来减少建筑能源消耗, 且寿命较长, 适合长期安装[17], 适用于新建建筑或屋顶改造项目。

## 2.3. 反射型冷却屋顶

反射型冷却屋顶通过在屋顶表面涂覆高反射率的涂料、使用高反射率材料或铺设反射膜, 将大部分太阳辐射热反射回大气中, 从而减少屋顶对热量的吸收。反射型冷却屋顶在夏热冬暖地区和夏热冬冷地区具有广泛的应用前景。这些地区经济发达、人口密集、建筑面积巨大, 且夏季用电紧张[17]。晴好天气条件下, 高反照率屋顶对于热岛具有明显的缓解效应[18], 推广反射型冷却屋顶有助于缓解电力紧张问题, 带来可观的经济效益、社会效益和环保效益。

然而, 需要注意的是, 目前我国在反射型冷却屋顶系统的认识和研究相对较少, 应用也相对较少。因此, 在双碳目标的引领下, 国家应在标准制定、立法等政策方面予以重视, 推动反射型冷却屋顶的广泛应用。

反射型冷却屋顶是一种有效的节能减排措施, 具有广泛的应用前景和显著的效益。随着技术的不断进步和政策的推动, 反射型冷却屋顶将在未来得到更广泛的应用和推广。

## 3. 高反射率铝板作为冷却屋顶材料的优点

铝板作为一种常见的建筑材料, 因其良好的导热性和耐腐蚀性, 在屋顶冷却领域具有广泛的应用前景。高反射率铝板是指表面经过特殊处理, 能够高效反射光线的铝制板材。其反射率的高低与铝板表面的光泽度、光滑程度、颜色以及入射光的波长、入射角等因素有关。一般来说, 高反射率铝板的反射率可达到 85% 以上, 甚至部分特殊处理的镜面铝板反射率可达到 95% 以上。

### 3.1. 高效反射太阳辐射

辐射是城市热量得失的主要组成部分, 而反射率的互补部分体现的是城市表面吸收的太阳辐射量, 因此反射率是热环境的重要影响因素[19]。红外线是热辐射的主要形式之一, 通过反射红外线, 能够减少建筑物表面吸收的红外热量, 进一步降低建筑物表面的温度。反射率主要是通过改变城市地表的辐射平衡来影响表面温度, 高反射率铝板具有极高的太阳光反射率, 能够有效反射掉大部分照射在屋顶上的太阳辐射, 当太阳光线照射到铝板表面时, 大部分光线被反射回大气中, 减少了建筑物表面吸收的热量[20]。这意味着在阳光直射下, 大部分太阳辐射能被直接反射回大气中, 而非被屋顶吸收转化为热能。这种高效的反射机制显著降低了屋顶的得热量, 从而减缓了室内温度的上升速度。

### 3.2. 减少热量吸收

除了高效反射外, 高反射率铝板还具有较低的热吸收性能, 即表面不容易吸收大量热量, 具有良好

的导热性和散热性。这意味着即使有部分太阳辐射被屋顶吸收, 铝板也能迅速将热量散发到空气中, 避免热量在屋顶表面积聚。这种高效的散热机制进一步降低了屋顶温度, 减少了热量向室内的传导。

### 3.3. 对周围环境温度的影响

铝板通过其高反射率和散热性能, 能够显著降低周围环境的温度。这种高效的反射机制显著降低了屋顶的得热量, 从而减缓了室内温度的上升速度。在建筑领域, 采用高反射率铝板作为屋顶、墙面等建筑构件的材料, 可以显著降低建筑物周围的热岛效应, 改善城市微气候。反射率主要是通过改变城市地表的辐射平衡来影响表面温度, 反射率对空气温度的影响小于地表温度, 同时反射率对于夜间热岛的形成存在滞后性。在白天, 城市表面获得太阳辐射后, 首先加热地表, 随后地表加热周围的空气, 从而使地表和空气温度有所升高, 对白天热岛的形成产生重要影响[19]。一些高反射率铝板采用多层结构设计, 中间填充隔热材料(如聚氨酯发泡材料), 形成一个有效的隔热层。这个隔热层能够进一步阻挡热量的传导, 减少室内与室外之间的热量交换。这不仅有助于提高居民的生活舒适度, 还能够减少能源消耗和碳排放, 推动绿色建筑和可持续发展。

### 3.4. 节能环保

高反射率铝板的应用有助于减少建筑物的制冷能耗, 从而降低温室气体排放, 对缓解全球气候变暖具有积极意义。由于高反射率铝板能够显著降低屋顶温度, 因此可以减少室内空调系统的负荷, 节省能源消耗。Touchaei 等[21] [22]使用 WRF 模式对蒙特利尔(气候寒冷地区)的研究指出, 增加城市反照率可节省夏季制冷能耗 18 kWh/100 m<sup>2</sup>。Kolokotroni 等[23]使用 EnergyPlus 对赤道附近三个国家的单栋建筑模拟表明, 冷屋顶可节约 190 kWh/m<sup>2</sup>/年的冷却负荷。这对于降低建筑运行成本、减少碳排放具有重要意义。铝是可循环的金属材料, 高反射率铝板在使用过程中具有较长的使用寿命。当需要更换时, 铝板可以回收再利用, 其生产和回收过程对环境的影响相对较小, 减少了对自然资源的消耗和废弃物的产生, 符合绿色建筑和可持续发展的理念。

### 3.5. 其他优点

高反射率铝板材料轻便, 可以减轻楼顶的荷载。同时, 铝材具有优良的耐腐蚀性能, 能够在恶劣环境下保持长久的使用寿命。高反射率铝板的安装和维护相对简便, 可以缩短施工周期, 降低施工成本。高反射率铝板表面光滑亮丽, 具有现代感和科技感。其独特的金属质感和颜色选择能够提升建筑物的整体视觉效果, 使屋顶成为建筑外观的一部分, 而非简单的功能构件。这种美观性在提升建筑价值的同时, 也满足了人们对居住环境美学的追求。

## 4. 总结

综上所述, 高反射率铝板作为屋顶材料, 凭借其优异的反射性能、良好的散热性能、耐久性与维护性、环境友好与节能减排以及独特的视觉效果与美观性等多重优势, 成为现代绿色建筑中不可或缺的重要组成部分。它不仅能够显著降低屋顶温度, 减少建筑物的制冷能耗, 提高室内舒适度, 还能够改善城市热环境, 促进节能减排和可持续发展。相较于绿色植被屋顶需要定期维护, 成本较高[24], 反照率屋顶较易于实现。

但是高反射率铝板作为冷却屋顶也有其本身不能忽视的局限性。由于空气热岛在夜间最为显著, 但白天才出现有太阳辐射, 因此, 反射率对夜间空气热岛的影响是较为间接的, 存在一定的滞后性[19]。使用何种冷却材料去增加城市表面反照率一直以来也都是缓解城市热岛效应的重要研究问题, 而目前中国开展研究高反照率冷却屋顶材料热辐射性能的研究以及对更新的具有优秀降温效果的环保材料研究尚



少[25]。所以使用高反射率铝板作为冷却屋顶还需较多的研究验证其可行性。此外, 冷却屋顶对于能耗以及相应对经济产生的影响也有待研究。

因此, 在未来的建筑设计和改造中, 高反射率铝板屋顶有着巨大的潜力, 同时也有许多需要探索发现并解决的问题, 随着科技的不断进步和人们对绿色建筑认识的深入, 高反射率铝板屋顶的性能和优势也将得到进一步的挖掘和提升。而高反射率铝板屋顶也有望得到更广泛的应用和推广。

## 基金项目

四川省大学生创新创业项目资助(No. 2024cxcy182)。

## 参考文献

- [1] Howard, L. (2012) *The Climate of London*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139226905>
- [2] 徐洪, 杨世莉. 城市热岛效应与生态系统的关系及减缓措施[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(6): 790-798.
- [3] 孙清廉. 城市热岛效应的危害及对策[J]. 家庭医学, 2002(5): 47.
- [4] Baniassadi, A., Sailor, D.J., Crank, P.J. and Ban-Weiss, G.A. (2018) Direct and Indirect Effects of High-Albedo Roofs on Energy Consumption and Thermal Comfort of Residential Buildings. *Energy and Buildings*, **178**, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.048>
- [5] Rizwan, A.M., Dennis, L.Y.C. and Liu, C. (2008) A Review on the Generation, Determination and Mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, **20**, 120-128. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(08)60019-4)
- [6] Akbari, H. and Rose, L.S. (2008) Urban Surfaces and Heat Island Mitigation Potentials. *Journal of the Human-Environment System*, **11**, 85-101. <https://doi.org/10.1618/jhes.11.85>
- [7] Campra, P., Garcia, M., Canton, Y. and Palacios-Orueta, A. (2008) Surface Temperature Cooling Trends and Negative Radiative Forcing Due to Land Use Change toward Greenhouse Farming in Southeastern Spain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **113**, D18109. <https://doi.org/10.1029/2008jd009912>
- [8] 郭良辰, 王咏薇, 张艳晴. 冷却屋顶对南京夏季高温天气的缓解作用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(21): 16-23.
- [9] 何晓凤, 蒋维楣, 周荣卫. 一种单层城市冠层模式的建立及数值试验研究[J]. 大气科学, 2009, 33(5): 981-993.
- [10] Rawat, M. and Singh, R.N. (2022) A Study on the Comparative Review of Cool Roof Thermal Performance in Various Regions. *Energy and Built Environment*, **3**, 327-347. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.03.001>
- [11] Cao, M., Rosado, P., Lin, Z., Levinson, R. and Millstein, D. (2015) Cool Roofs in Guangzhou, China: Outdoor Air Temperature Reductions during Heat Waves and Typical Summer Conditions. *Environmental Science & Technology*, **49**, 14672-14679. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04886>
- [12] 张弥, 马红云, 林卉娇, 等. 不同类型冷却屋顶方案对城市群热环境的缓解效果[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 45-57.
- [13] Oleson, K.W., Bonan, G.B. and Feddema, J. (2010) Effects of White Roofs on Urban Temperature in a Global Climate Model. *Geophysical Research Letters*, **37**, L03701. <https://doi.org/10.1029/2009gl042194>
- [14] Akbari, H. (2003) Measured Energy Savings from the Application of Reflective Roofs in Two Small Non-Residential Buildings. *Energy*, **28**, 953-967. [https://doi.org/10.1016/s0360-5442\(03\)00032-x](https://doi.org/10.1016/s0360-5442(03)00032-x)
- [15] Lu, L., Liu, Z., Yang, C., Xiao, X. and Bi, D. (2013) Pollution Problems in the Production Process of Solar Cells. *SCI-ENTIA SINICA Chimica*, **43**, 687-703. <https://doi.org/10.1360/032013-79>
- [16] Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Moustauoui, M. and Martilli, A. (2016) Citywide Impacts of Cool Roof and Rooftop Solar Photovoltaic Deployment on Near-Surface Air Temperature and Cooling Energy Demand. *Boundary-Layer Meteorology*, **161**, 203-221. <https://doi.org/10.1007/s10546-016-0160-y>
- [17] Hu, A., Levis, S., Meehl, G.A., Han, W., Washington, W.M., Oleson, K.W., *et al.* (2015) Impact of Solar Panels on Global Climate. *Nature Climate Change*, **6**, 290-294. <https://doi.org/10.1038/nclimate2843>
- [18] 何剑锋. 冷屋面系统与建筑节能[J]. 建设科技, 2016(Z1): 153-154.
- [19] 潘沿晓. 城市形态对热环境的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [20] Takebayashi, H. and Moriyama, M. (2007) Surface Heat Budget on Green Roof and High Reflection Roof for Mitigation of Urban Heat Island. *Building and Environment*, **42**, 2971-2979. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.017>

- 
- [21] Touchaei, A.G., Hosseini, M. and Akbari, H. (2016) Energy Savings Potentials of Commercial Buildings by Urban Heat Island Reduction Strategies in Montreal (Canada). *Energy and Buildings*, **110**, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.018>
- [22] Touchaei, A.G. and Akbari, H. (2015) Evaluation of the Seasonal Effect of Increasing Albedo on Urban Climate and Energy Consumption of Buildings in Montreal. *Urban Climate*, **14**, 278-289. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.007>
- [23] Kolokotroni, M., Shittu, E., Santos, T., Ramowski, L., Mollard, A., Rowe, K., *et al.* (2018) Cool Roofs: High Tech Low Cost Solution for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Low Rise Low Income Houses in High Solar Radiation Countries. *Energy and Buildings*, **176**, 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.005>
- [24] Sun, T., Grimmond, C.S.B. and Ni, G. (2016) How Do Green Roofs Mitigate Urban Thermal Stress under Heat Waves? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **121**, 5320-5335. <https://doi.org/10.1002/2016jd024873>
- [25] 金玉芝, 王咏薇, 程迪. 不同冷却屋顶对城市街区热环境的影响模拟[J]. 气候与环境研究, 2021, 26(1): 91-105.