

文章编号: 1671-6612 (2024) 04-537-06

辐射制冷涂料对住人集装箱热环境及能耗的影响

胡钉源¹ 王晓亮^{1,2} 李姝靓^{1,2} 阳莉^{1,2} 麦贤敏¹

(1. 西南民族大学建筑学院 成都 610225;

2. 西南民族大学中国-葡萄牙文化遗产保护科学“一带一路”联合实验室成都基地 成都 610225)

【摘要】 近年来集装箱凭借其移动性强、运输便捷、模块化建造速度快、成本低等优势在建筑领域广泛应用,而大多数集装箱由于构造简单,其围护结构的热工性能较差。将辐射制冷涂料应用于小型住人集装箱,并开展热工性能实验研究,结果表明辐射制冷涂料在夏季可使屋顶温度最大降低6.0℃,调节室内热环境;同时,为探索辐射制冷涂料在不同热工分区的适用性,选取典型城市,开展集装箱能耗特性仿真模拟,发现辐射制冷涂料更适用于以制冷为主的夏热冬暖区和夏热冬冷区,全年分别节能9.69kWh/m²和1.44kWh/m²。

【关键词】 辐射制冷涂料;住人集装箱;热环境;建筑能耗
中图分类号 TU83 文献标志码 A

Effects of Radiative Cooling Coatings on

Thermal Environment and Energy Consumption of Residential Containers

Hu Dingyuan¹ Wang Xiaoliang^{1,2} Li Shuliang^{1,2} Yang Li^{1,2} Mai Xianmin¹

(1. School of Architecture, Southwest Minzu University, Chengdu, 610225;

2. China-Portugal Joint Laboratory Chengdu base of Cultural Heritage Conservation Science supported by the Belt and Road Initiative, Southwest Minzu University, Chengdu, 610225)

【Abstract】 In recent years, containers have been widely used in the construction field with their advantages of strong mobility, convenient transportation, fast modular construction and low cost, while most containers have poor thermal performance of their enclosures due to their simple structure. In this paper, radiative cooling coatings are applied to small residential containers, and thermal performance experiments are carried out. The results show that radiative cooling coatings can reduce roof temperature up to 6.0℃ in summer, and regulate indoor thermal environment in summer. At the same time, in order to explore the applicability of radiative cooling coatings in different thermal zones, typical cities were selected to carry out simulation of container load characteristics, and it was found that radiative cooling coatings were more suitable for hot summer and warm winter areas and hot summer and cold winter areas where refrigeration energy consumption was the main focus, with an annual energy saving of 9.69kWh/m² and 1.44kWh/m², respectively.

【Keywords】 Radiative cooling coating; Living container; Thermal environment; Building energy consumption

0 引言

集装箱作为工业时代的产物,广泛运用于运输

业,但是在后工业时代,其在建筑上的应用也逐渐增多起来。在上世纪八十年代,菲利普·克拉克提

基金项目:国家自然科学基金项目(52008358);高原建筑生态适应性四川省青年科技创新研究团队项目(2022JDTD008)

作者简介:胡钉源(1997-),男,硕士研究生,E-mail:1303842262@qq.com

通讯作者:麦贤敏(1980-),女,博士,教授,E-mail:maixianmin@foxmail.com

收稿日期:2023-11-30

出在一个建筑工地上用集装箱来构建住房,这是首次提出将集装箱应用于建筑的概念^[1]。国内集装箱建筑应用最早是作为工地板房使用,在2008年汶川大地震之后,作为避难建筑的集装箱改造开始出现,集装箱的标准化、模块化、集成化为灾后重建提供了诸多便利^[2]。渐渐地,集装箱的优点在国内建筑领域得到越来越广泛的关注和应用。比如,集装箱凭借其可移动性、运输便捷、建造快、成本低、场地要求低、模块化等优势在商业建筑(咖啡厅和快闪店、书店等)、小型办公建筑、景观构筑物、小型住宅上迅速发展^[3-5]。

从建筑能耗看,围护结构的热损失造成的能耗约占建筑运行总能耗的50%以上^[6]。大部分集装箱建筑的围护结构主要由内外单层铁皮和保温材料等组成,热工性能较差,最近有些学者对集装箱围护结构保温隔热进行了研究。如Nan等^[7]研究了三种集装箱外活墙系统,发现外活墙系统在冬季分别能提升室内温度0.4℃、1.7℃和1℃,对冬季保温性能有较大改善。李瑞等^[8]对加装不同保温材料的冬奥集装箱室内热环境进行了模拟分析,发现多方面因素考虑下岩棉更适合作为保温材料,当岩棉厚度为150mm时,室内温度约为19.6℃,能够满足冬季热工要求。郭娟利等^[9]将相变复合墙体引入集装箱,发现当采用厚度为30mm、相变点为29℃的相变复合墙体时,能够在夏季白天有效提升室内的热舒适度。

近年来,由于不可再生资源的消耗,新型节能环保材料不断涌现^[10]。辐射制冷材料由于其高太阳反射率和红外发射率,在建筑辐射降温和建筑制冷节能方面得到广泛关注。杨贵荣教授^[11]在《Science》发表了一种辐射制冷的超材料,最大能实现150W/m²的制冷效果,引起了学术界的广泛关注。Fang等^[12]针对普通瓦屋顶与辐射制冷超材料屋顶的模型室进行了实验研究,发现两种屋顶的表面温度和室内温度最大温差分别为11.2℃和28.6℃。Nie等^[13]研究了一种聚合物辐射制冷涂料,模拟结果显示普通建筑每年可节约能源2-12MJ/m²。Tang等^[14]研发的涂料其冷却性能明显高于商用涂料,室内温度最高降低了5.5℃,通过模拟该涂料在不同地区的性能,发现冷却性能随环境温度升高而增强。通过梳理国内外的研究发现,目前针对辐射制冷的研究,主要集中在涂层研制、模型试验室研究

和仿真模拟研究等方面,缺乏对实践应用的研究。

基于上述分析,本文以小型住人集装箱为研究对象,在成都搭建涂装辐射制冷材料的实验房,开展集装箱围护结构及建筑热环境实验研究,探索辐射制冷涂料对集装箱热环境的影响,同时采用建筑热过程模拟的方法,研究辐射制冷涂料在不同热工分区的适用性。

1 辐射制冷原理

根据传热学理论,一切温度高于绝对零度的物体都会向外发射热辐射^[15]。辐射制冷是一种利用物体与其周围环境之间的热辐射来降低物体温度的制冷方式。物体通过辐射将热能转移给周围的低温环境,从而使自身温度降低。天空是一种天然且持久的冷源,因此天空辐射制冷是一种常见的免费建筑制冷途径,其具体原理如图1所示,外太空宇宙的温度约为3K,接近绝对零度,被认为是最理想的散热体,而地球表面的温度大约为300K,因此地球表面的物体可以通过与外太空之间的温差,发射长波辐射(2.5~25μm),穿过大气层进行辐射传热,从而降低自身的温度,实现辐射制冷。而大气层的特性与辐射波长有着密切关系,主要对8-13μm的电磁波具有很高的透射性,这个8-13μm的窗口被称为大气透射窗口。因此,要想实现辐射制冷,就需要保证辐射制冷体尽可能地在大气透射窗口的长波段具有较高的发射率。同时,太阳作为绝对温度约为5800K的黑体,辐射的能量主要集中在短波波段(0.15~4μm),为降低辐射制冷体对太阳辐射的吸收,应尽可能在短波波段具有较高的反射率。因此实现辐射制冷的关键就是使得辐射制冷材料拥有两种优异的光学特性。

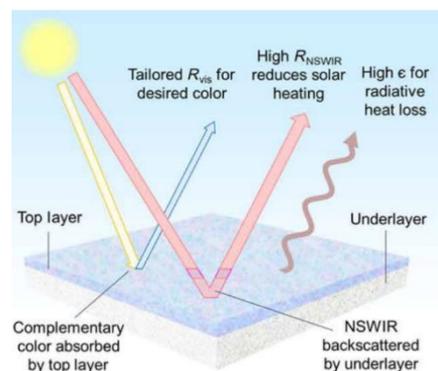


图1 辐射制冷原理图^[16]

Fig.1 Schematic diagram of radiation cooling^[16]

2 研究对象及方法

为研究辐射制冷涂料对集装箱热环境的影响, 在四川省成都市某实验楼顶搭建 3.0m×3.0m×2.8m 的实验房, 如图 2 所示, 并将发射率为 0.95, 反射率为 0.86 的辐射制冷涂料均匀涂刷在集装箱屋顶外表面。为了解辐射制冷降温的效果, 在屋顶外表面涂刷辐射制冷涂料前后分别对集装箱内外空气温度、集装箱屋顶外表面温度和内表面温度等进行测量, 对比分析辐射制冷涂料的实际降温效果。实验房墙体和屋面均采用 1mm 铁皮+100mm 岩棉板+1mm 铁皮的构造, 仅在南向开设窗户, 窗户为普通单玻窗, 窗墙比为 0.13, 实验测试时间为 2023 年 7 月-8 月。



图 2 集装箱实验房

Fig.2 Container test room

2.1 辐射制冷性能实验

2.1.1 辐射制冷涂料涂装

为开展辐射制冷性能实验测试, 本实验将在屋顶涂刷辐射制冷涂料, 涂装的工艺流程分四步, 具体步骤如下: 首先预处理基层, 清理屋顶表面的灰尘和杂物, 确保平滑无划痕; 然后涂刷第一层, 使用辐射制冷涂料迅速均匀地涂刷, 避免漏涂和流挂; 其次, 等待第一层涂料干燥后, 进行第二道涂刷; 最后修整打磨, 检查屋顶平整度, 对不平整部分进行轻微打磨。



图 3 涂刷过程

Fig.3 The process of painting

2.1.2 降温性能实验测试

为获得辐射制冷涂料的降温效果, 分别采用 Vemsee 环境监测站和 Testo176 热电偶等仪器对集装箱室外空气温度、湿度、风速, 室内空气温度, 屋顶内外表面温度等进行实验测试, 测试前通过恒温水池对热电偶的测温精度进行了校准, 测温范围为 -50℃~+50℃, 精度为 ±0.1℃。其中气象站 (见图 4) 放置于室外通风良好的空旷区域, 主要用于监测室外温度、相对湿度和风速; 热电偶主要用于测量围护结构表面温度和室内空气温度 (见图 5), 室内空气温度采用多点测量取平均的方式获得, 屋顶内外表面的温度测点均位于表面的几何中心。



图 4 室外环境监测气象站

Fig.4 Outdoor environment monitoring weather station



图 5 测温用热电偶

Fig.5 Thermocouple for temperature measurement

2.2 建筑热负荷仿真模型及验证

为研究前文所述的辐射制冷材料在不同热工分区的应用效果, 本文基于 TRNSYS 仿真计算平台, 以图 2 所示的实验房为例, 建立集装箱全年热负荷动态仿真计算模型, 分别选取夏热冬冷地区 (成都)、夏热冬暖地区 (广州)、温和地区 (昆明)、寒冷地区 (西安)、严寒地区 (哈尔滨) 五

大热工分区的典型城市，开展建筑全年能耗性能研究，探索辐射制冷涂料在不同气候区的适用性。

为确保仿真计算结果的可靠性，以实验测试结果作为参照进行仿真模型的准确性验证。图 6 给出了 2023 年 7 月 28 日室内温度测试结果和模拟结果的对比情况。可以看出，实测室内温度和模拟室内温度的变化趋势基本一致，二者之间的温差均不超过 1.2℃，表明仿真计算模型具有较高的准确度和可靠性。

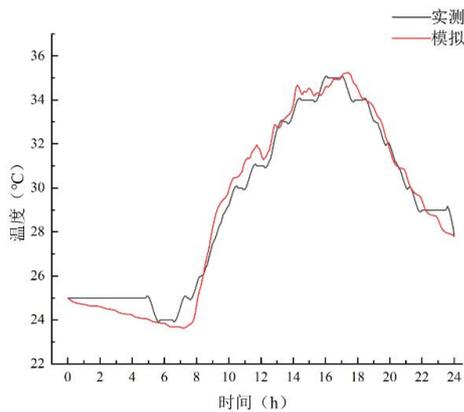


图 6 仿真计算模型准确性验证

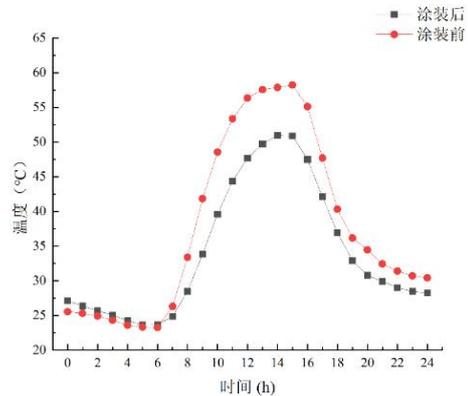
Fig.6 Accuracy validation of simulation calculation model

3 结果分析

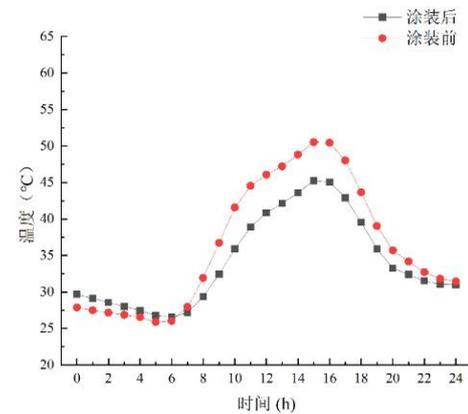
3.1 实测辐射降温结果

由于实验期间每日室外天气条件有所差异，为比较辐射制冷涂料的降温效果，选取涂装前后室外条件相近的两个典型日进行对比分析。其中，涂装前选取 2023 年 7 月 8 日作为典型日，当日室外平均风速为 0.57m/s，室外平均温度为 32.2℃，室外平均湿度为 53.94%；涂装后选取 2023 年 7 月 30 日作为典型日，当日室外平均风速为 0.58 m/s，室外平均温度为 32.07℃，室外平均湿度为 56.92%。

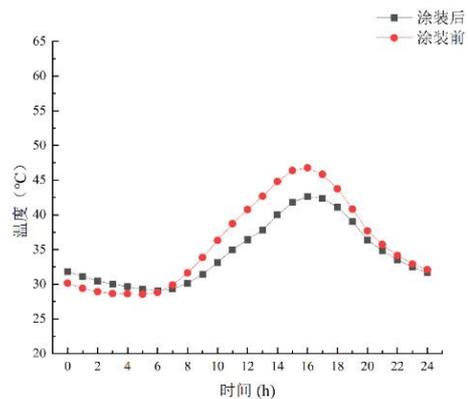
图 7 给出涂装前后典型日屋顶外表面、屋顶内表面和室内空气三处的温度对比情况。可以看出，在典型日白天，涂装后屋顶外表面的温度明显低于涂装前屋顶外表面的温度，最大温差可达 9.4℃；对于屋顶内表面，涂装后的温度也低于涂装前的温度，最大温差约为 6.0℃；同样在涂装辐射制冷涂料后白天室内温度也显著降低，最大降低温度为 5.6℃，由此可见辐射制冷涂料对于建筑围护结构及室内环境具有明显的降温作用。



(a) 屋顶外表面



(b) 屋顶内表面



(c) 室内空气温度

图 7 典型日涂装前后各温度对比结果

Fig.7 Comparison of temperature before and after painting on typical day

3.2 不同热工分区辐射制冷涂料对集装箱采暖和制冷能耗的影响

为分析辐射制冷涂料在不同气候区对集装箱全年采暖和制冷能耗的影响，分别统计全年累计制冷能耗、全年累计采暖能耗，并对辐射制冷作用下的集装箱能耗变化情况进行对比分析，研究辐射制

冷涂料的气候适应性。

3.2.1 全年累计制冷能耗

图 8 列出不同气候区典型城市的全年累计制冷能耗统计结果。从制冷能耗看, 各个热工分区的全年制冷能耗均呈现不同程度地降低, 表明辐射降温涂料能够有效降低全年制冷能耗。从制冷能耗变化幅度来看, 以广州为代表的夏热冬暖区全年制冷能耗降低量最为显著, 达到 12.0kWh/m², 其次是西安(寒冷地区)、成都(夏热冬冷地区)和哈尔滨(严寒地区), 这三个地区的制冷能耗降低量分别为 8.2kWh/m²、7.5kWh/m²和 7.2kWh/m²; 以昆明为代表的温和地区, 制冷能耗降低量最低, 约为 5.2kWh/m²。但从制冷能耗降低率看, 昆明地区的制冷能耗降低率最高, 可达 46.4%; 其次是哈尔滨, 约为 18.1%; 成都和西安大致相当, 约为 10.6%; 广州的降低率约为 7.3%。

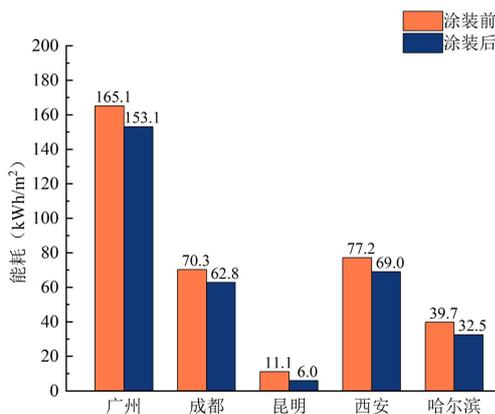


图 8 不同热工分区典型城市全年累计制冷能耗

Fig.8 Comparison of the annual cumulative energy consumption before and after painting in typical cities for different thermal zones

3.2.2 全年累计采暖能耗

图 9 为不同气候区典型城市的全年累计采暖能耗统计结果。从采暖能耗看, 各个热工分区的全年采暖能耗均呈现不同程度地升高, 可见辐射制冷涂料对于全年采暖能耗有不利影响。从采暖能耗变化幅度来看, 以哈尔滨为代表的严寒地区全年采暖能耗增加量最为显著, 达到 16.0kWh/m², 其次是西安、昆明和成都, 这些地区的采暖能耗增加量分别为 10.3kWh/m²、8.5kWh/m²和 6.0kWh/m²; 以广州为代表的夏热冬暖区, 采暖能耗增加量最低, 约为 2.4kWh/m²。但从采暖能耗增加率看, 昆明和广州地区的采暖能耗增加率较高, 分别为 7.5%和

6.9%; 成都、西安和哈尔滨的采暖能耗增加量较低, 分别为 2.6%、2.4%和 1.5%。

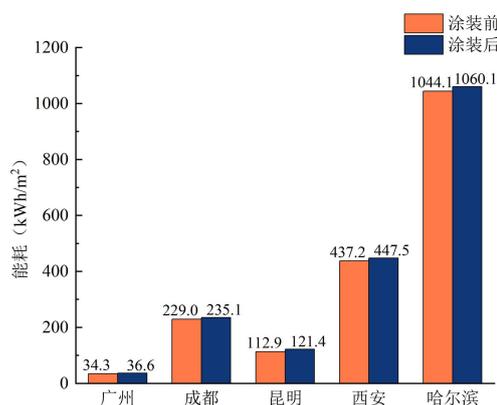


图 9 不同热工分区典型城市全年累计采暖能耗

Fig.9 Comparison of the annual cumulative heating energy consumption before and after painting in typical cities for different thermal zones

3.2.3 全年能耗综合性能评价

从前文分析可知, 尽管涂装辐射制冷涂料后, 集装箱的全年制冷能耗整体有所降低, 但采暖能耗却呈现不同程度的增加。为综合评价辐射制冷涂料对建筑全年能耗的影响, 本文引入“净能耗增益”的概念, 即将涂装前后制冷能耗的降低量减去涂装前后采暖能耗的增加量作为全年整体能耗改变情况进行评价。净能耗增益为正值, 表明辐射制冷涂料可降低全年整体能耗, 正值数据越大, 表明对全年整体能耗的降低作用越显著; 反之, 当净能耗增益为负值时, 将增加全年整体能耗, 不利于建筑节能。

通过统计得到不同热工分区涂装辐射制冷涂料后净能耗增益情况, 如表 1 所示。由表 1 可知, 集装箱在广州(夏热冬暖地区)的净能耗增益可达 9.6kWh/m², 其次是成都(夏热冬冷地区), 净能耗增益为 1.5kWh/m²。而西安(寒冷地区)、昆明(温和地区)的净能耗增益均出现负数。从结果可以看出, 辐射降温涂料最适合在以广州为代表的夏热冬暖地区使用, 其次是夏热冬冷地区; 而在西安、昆明和哈尔滨, 使用辐射制冷涂料后净能耗增益为负数, 显然辐射制冷涂料不适合在寒冷地区和严寒地区使用。由此可见, 辐射制冷涂料更适用于以制冷为主的夏热冬暖地区和夏热冬冷地区, 在温和地区由于气候多样, 可根据实际情况酌情使用。

表 1 各个热工分区净能耗增益情况

Table 1 Net energy consumption gain for each Thermal zone

	全年制冷能耗降 低量 (kWh/m ²)	全年采暖能耗增 加量 (kWh/m ²)	净能耗增益 (kWh/m ²)
广州	12.0	2.4	9.6
成都	7.5	6.0	1.5
昆明	5.2	8.5	-3.3
西安	8.2	10.3	-2.1
哈尔滨	7.2	16.0	-8.8

4 结语

本文以住人集装箱为研究对象,采用实验测试和动态模拟的方式,对涂装辐射制冷涂料的实验房开展降温效果研究,结果表明:

(1) 在夏季白天辐射制冷涂料最大可使屋顶温度和室内空气温度分别降低 6.0℃和 5.6℃;

(2) 选取全国五大热工分区典型城市,通过集装箱建筑能耗仿真模拟,开展辐射制冷涂料适应性探索,发现辐射制冷涂料更适用于以制冷为主的夏热冬暖区和夏热冬冷区,在温和地区可根据实际情况酌情使用,不建议在严寒地区和寒冷地区使用。

参考文献:

[1] 艾丹·哈特·齐梦涵(译).移动的建筑——摩登集装箱[M].桂林:广西师范大学出版社,2016:4-5.
 [2] 许扬帆.建筑集装化[J].IT 经理世界,2008,(18):54-57.
 [3] 邵菲菲.当代艺术视野下的集装箱建筑实验[D].南京:南京艺术学院,2022.
 [4] 马守恒,郭晓玉,张宇晴.模块建筑之“集装箱住宅”研究[J].建筑与文化,2018,(9):115-116.
 [5] 吴梦颖.商业空间中集装箱建筑的消费符号研究[J].建筑与文化,2023,(5):46-48.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.被动式超低能耗绿色建筑技术导则(试行)(居住建筑)[A].建科 (2015) 179 号,2015.
 [7] Nan X, Yan H, Wu R, et al. Assessing the thermal performance of living wall systems in wet and cold climates during the winter[J]. Energy and Buildings, 2020,208:109680.
 [8] 李瑞,王聪聪,杨晖,等.冬奥集装箱房室内热环境多物理场耦合模拟及分析[J].暖通空调,2022,52(6):30-37.
 [9] 郭娟利,杨心悦,刘刚,等.相变材料在集装箱建筑夏季隔热中的性能研究[J].重庆大学学报,2021,44(5):9-17.
 [10] 孙尚瑜,许树学,刘海波,等.新型材料在制冷空调中应用的研究进展[J].制冷与空调,2023,37(4):526-534.
 [11] Zhai Y, Ma Y, David S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. Science, 2017, 355(6329):1062-1066.
 [12] Fang H, Zhao D, Yuan J, et al. Performance evaluation of a metamaterial-based new cool roof using improved Roof Thermal Transfer Value model[J]. Applied Energy, 2019,248:589-599.
 [13] Nie X, Yoo Y, Hewakuruppu H, et al. Cool white polymer coatings based on glass bubbles for buildings[J]. Scientific reports, 2020,10(1):6661.
 [14] Tang H, Li S, Zhang Y, et al. Radiative cooling performance and life-cycle assessment of a scalable MgO paint for building applications[J]. Journal of Cleaner Production, 2022,380:135035.
 [15] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2019.
 [16] Mandal J, Chen Y, Li W, et al. Colored and paintable bilayer coatings with high solar-infrared reflectance for efficient cooling[J]. Science Advances, 2020,6(17).