

基于辐射制冷技术的冷链保温箱隔热性能测试与能耗分析

刘广海¹, 李庆庭¹, 谢如鹤¹, 陈欢¹, 廖晶², 钟肖英^{3*}

(1. 广州大学管理学院, 广州 510006; 2. 帕多瓦大学管理工程学院, 帕多瓦 35131; 3. 广州南方学院商学院, 广州 510970)

摘要: 针对冷链运输装备运行过程中高能耗的问题, 引入辐射制冷技术, 减少装备得热量, 达到降低运输能耗, 节能减排的目的。该研究以冷链保温箱为研究对象, 将所研制辐射制冷涂料应用于冷链保温箱外表面并展开隔热性能测试。试验表明, 涂覆辐射制冷涂料后, 保温箱外表面平均温度较未加辐射制冷涂料下降 0.7~6.9 °C, 峰值温度最高降低了 17.3 °C, 降幅达 28.5%; 内表面平均温度下降 3.6~5.5 °C, 峰值温度最高下降了 7.7 °C, 降幅达 15.0%; 箱内空气平均温度下降 4.0 °C。同时, 箱内温度均匀性得到改善, 温度极差降幅为 30.2%~30.7%, 温度方差降幅为 26.3%~29.9%。在试验基础上, 研究构建保温箱传热模型, 分析涂覆辐射制冷涂料的节能减排效益。与普通冷链保温箱相比, 涂覆辐射制冷涂料后, 1.5 m³ 容积的冷链保温箱全年漏热量减少 44.3 kW·h, 最高减少碳排放量 51.8 kg (以 CO₂ 计); 此外, 通过对保温材料厚度、涂料类别分析可知, 辐射制冷涂料在运用于保温层较薄的保温箱时, 效果更佳, 且在改善保温箱隔热性能同时可增大保温箱的有效容积; 从节能降耗的角度出发, 建议冷藏运输装备外表面涂装采用具有高反射比的浅色涂料。研究可为冷链运输装备节能运用提供新思路, 对有隔热要求的粮库、冷库、油罐等农业设施亦具有参考意义。

关键词: 冷藏; 运输; 冷链; 辐射制冷; 隔热性能; 温度场; 节能

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.035

中图分类号: U272.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-11-0318-08

刘广海, 李庆庭, 谢如鹤, 等. 基于辐射制冷技术的冷链保温箱隔热性能测试与能耗分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 318-325. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.035 http://www.tcsae.org

Liu Guanghai, Li Qingting, Xie Ruhe, et al. Thermal insulation performance test and energy consumption of the cold chain incubator with radiative cooling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(11): 318-325. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.035 http://www.tcsae.org

0 引言

随着居民消费能力不断提升, 冷链物流需求日趋旺盛。2021 年, 包括中央一号文件在内的数十项国家政策文件涉及冷链物流, 生鲜易腐食品冷链流通需求总量达到了 3 亿 t, 同比增长 14%^[1-2]。与此同时, 运输与配送已成为食品冷链最为薄弱的环节之一, 规范的冷链输配环节需维持恒定的低温环境, 能耗成本高。部分企业使用普通货车代替控温运输装备进行输配, 导致中国生鲜农产品腐损率高达 15%~30%, 每年经济损失超千亿元, 直接影响了农产品流通以及食品行业的持续健康发展^[3-4]。2021 年 12 月 12 日, 国家颁布《“十四五”冷链物流发展规划》明确提出: 提高冷链物流设施节能水平推动冷链运输设施设备升级^[5]。如何降低冷链输配能耗已成为促进行业规范发展的重要途径^[6]。针对上述问题, 目前国际主流研究多从提升输配装备围护结构隔热性能、改进制冷系统等角度入手。在隔热性能提升方面, 除了改进传

统聚苯乙烯、挤塑聚苯乙烯、聚氨酯等隔热材料外, 研制更低传热系数的新材料备受关注: 吕恩利等^[7]以真空隔热板为基材搭建蓄冷保温箱控温试验平台, 研究表明, 真空绝热板厚度每增加 10 mm, 围护结构传热速率可下降 9%~25%; 杜柯等^[8]使用稳态法测试了气凝胶蜂窝板的导热系数, 认为其导热系数较挤塑聚苯乙烯塑料板最高可降低 28%; Yang 等^[9]通过气凝胶绝热板与传统保温隔热材料的试验对比, 发现气凝胶绝热板的温度衰减倍数提高 40%, 热延迟时间提升 1 倍。除了单一材料的改进, 利用不同材料的组合特性形成复合夹芯保温层也是目前的研究热点, Principi 等^[10]在传统绝缘夹层板中加入相变材料形成新型围护结构, 车内峰值负荷最高下降了 9%, 最高可削减能耗 16%; 李细霞等^[11]设计了一种三层复合结构的冷藏车车厢, 漏热速率最高下降了 6.79 W/m², 在降低车厢质量的同时增强了保温效果。在制冷系统性能提升方面, 蓄冷输配装备由于具备运用成本低、灵活性强和低碳环保等特点越来越受到关注, 徐笑锋等^[12]结合真空绝热保温技术和蓄冷技术设计了一款蓄冷保温箱, 在装载条件下可有效控温 9.6 h 以上; Tong 等^[13]开发新型 12 m 蓄冷集装箱, 可降低能耗 87%, 减少碳排放 79%; 刘广海等^[14]将标准托盘与蓄冷技术相结合, 设计了适用于食品全程冷链的专用蓄冷托盘, 实现了车厢内部温度绝对不均匀度系数最高下降 63%, 车辆重心较顶置式蓄冷车最高下降 47%。

收稿日期: 2022-01-04 修订日期: 2022-05-24

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (No.2019B020225001), 广东省农产品保鲜物流共性关键技术研发创新团队项目 (No.2021KJ145), 广州市教育局高校科研项目 (202032872)

作者简介: 刘广海, 副教授, 研究方向为冷链物流装备设计与运用。

Email: broadsea@gzhu.edu.cn

*通信作者: 钟肖英, 副教授, 研究方向为冷链物流。

Email: 737871597@qq.com

前述技术有效改善了冷链输配装备隔热、气密性能,减少对流换热和空气渗透,促进了冷链技术的运用和冷链输配装备性能的提升。近 5 年来,中国冷藏车数量以年均 20% 以上的速度增长,预计 2021 年超过 32 万辆^[2,15]。但另一方面,由于材料技术的限制,短期之内在上述领域寻求装备节能进一步快速、重大突破较为困难。易腐食品运输和配送过程中,除食品本身可能存在的热负荷外,冷链输配装备外界热负荷主要来源于围护结构对流换热、太阳辐射和空气渗透。因此本文从冷链输配装备的传热机理出发,通过减少辐射得热,寻求降低运输能耗的新策略。

1 隔热性能测试与分析

辐射制冷是指物体利用向外界辐射能量的方式降低温度的方法,如图 1 所示,由于理想的辐射制冷材料在辐射窗口波段具有较高的红外发射率,在其他波段具有高反射率,则可利用地球和宇宙间的温差,降低自身得热量并实现被动制冷^[16-19]。作为一门新兴节能技术,随着新型材料技术的突破,近年来日益受到关注^[20-21]。Aaswath 等^[22]通过在银衬底沉积纳米光子晶体,实现了低于环境温度的辐射制冷技术;随着二氧化钛纳米粒子、层级多孔聚合物等材料的创新,近年来辐射制冷技术不断取得突破^[23-24];辐射制冷技术开始逐渐应用于建筑、交通、服装等行业^[25-28];Liu 等^[29]研究了在低纬度地区将辐射制冷涂料应用于建筑的节能效果,结果表明使用辐射制冷涂料可有效降低夏季空调使用时间,在制冷季节可以节能 42.4%;Peng 等^[30]将辐射制冷技术应用于一栋典型的中层公寓楼,结果表明可以降低其暖通空调 9.87% 的能耗,并预估了该技术可降低 11.4 亿 t 的 CO₂ 排放量。目前常用的辐射制冷材料有薄膜类、涂层类、织物类和块状类^[21],其中涂层类材料由于制备方式简便,可通过刷涂、浸涂和喷涂等方式涂覆于多种物体表面,可以很好地应用于冷链输配装备的节能改进。

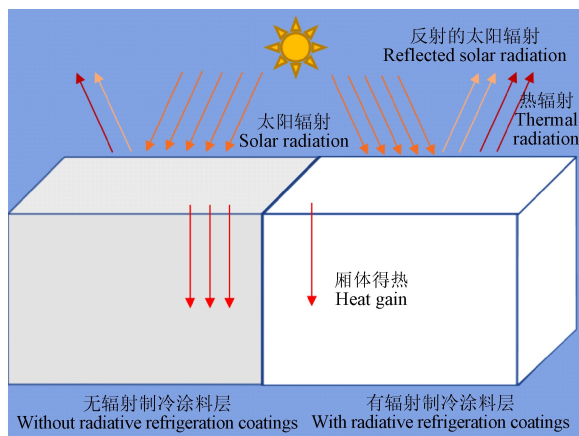


图 1 辐射制冷热量流动图

Fig.1 Heat flows surround the radiative cooler

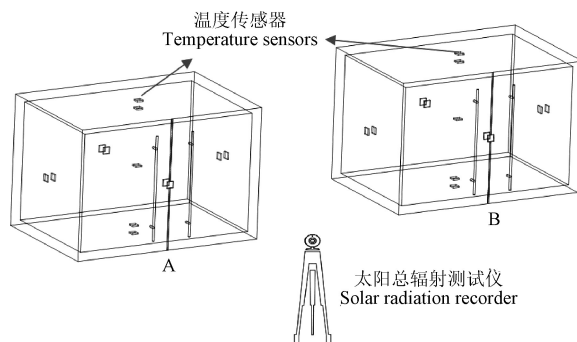
1.1 试验对象与材料

本文使用研究团队与某公司联合研制的一款基于辐射制冷技术的双组分金属外表面辐射制冷涂料（睿霖

RC-S-501, 涂层表面的太阳热辐射全波段反射率 ≥ 0.88 ^[31], 而常规涂料的反射率一般在 60% 以下), 并应用于冷链保温箱, 期望通过涂覆涂料, 降低保温箱的得热量。并搭建冷链保温箱热性能试验平台, 测试隔热性能, 评估节能减排潜力。本文辐射制冷涂料为白色均匀液体, 涂料的耐冲击性、附着力、耐酸碱性、耐人工老化性等指标均符合国家相关标准, 适合涂覆于保温箱表面。在材料方面, 涂料由甲、乙组分构成, 质量比为(8~16):1, 甲组分主要为金属氧化颗粒粉料、羟基丙烯酸树脂、醋酸丁酯等; 乙组分主要为聚异氰酸酯、缩二脲等。

为考察辐射制冷材料的实际隔热效果, 研究以城市配送常见的冷链保温箱为对象进行对比试验。冷链保温箱长宽高分别为 1 500 mm×1 000 mm×1 000 mm, 与配送用电动三轮车装货平台大小匹配, 并以卡扣固定。冷链保温箱围护结构保温材料为高密度硬质聚氨酯泡沫(Poly Urethane, PU), 导热系数为 0.02 W/(m·°C), 厚度 40 mm; 内外表层为玻璃纤维增强复合材料(Fiberglass Reinforced Plastics, FRP), 内外厚度均为 5 mm, 导热系数为 0.47 W/(m·°C)。

试验装置布置如图 2 所示, A 箱为对照箱, B 箱为辐射制冷实验箱, 差异仅为外表面是否使用辐射制冷材料作涂覆处理(厚度 0.5 mm)。2 箱采用箱门正对南向的方式放置, 底面架空离地 20 cm, 实测参数包括温度(环境温度、保温箱内外表面温度、箱内空气温度)和太阳辐射强度。其中, 内外表面温度测量点位于箱体表面的中心点, 箱内空气温度测量点位于箱内几何中心点, 箱外环境温度测量点距楼顶屋面 1.5 m, 通风且无太阳直射。



注: A 为对照箱, B 为试验箱, 下同。

Note: A is the control box and B is the experimental box. The same below.

图 2 试验装置布置图

Fig.2 Schematic diagram of the test devices

温度传感器为江苏精创电气股份有限公司生产的 RC-5+ 型, 量程为 $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 设定为每 5 min 采集 1 次数据; 太阳总辐射测试仪为北京华控兴业科技发展有限公司生产的 HSTL-FSDJY 型, 量程为 $0\sim 1\,500\text{ W/m}^2$, 精度为 $\pm 0.5\text{ W/m}^2$, 设定为每 5 min 采集 1 次数据。

1.2 试验环境

试验在广州某大学实验楼顶以用现场检测方法进行, 时间为 2021 年 8 月初的 6:00—18:00, 共计 3 d, 试

验期间天气晴朗少云, 太阳辐射强度峰值达到 $1\,078\text{ W/m}^2$, 环境温度最高为 $34.9\text{ }^\circ\text{C}$, 属于华南地区夏季典型天气, 太阳辐射强度和环境温度变化曲线如图 3 所示。

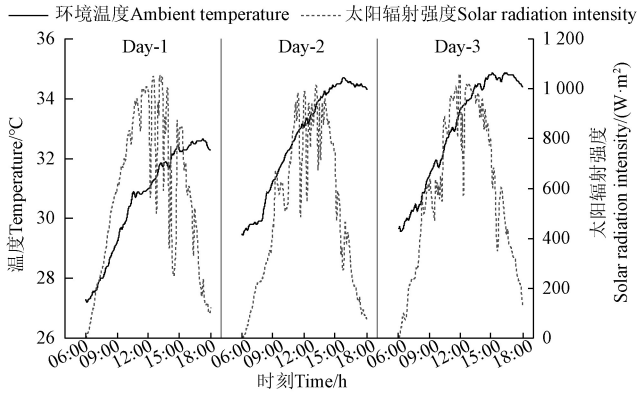


图 3 试验期间外界环境

Fig.3 External environment during the test

1.3 温度场均匀性评价

为评估辐射制冷涂料对辐射热的削减效果及对箱体内部温度分布的影响, 引入极差 R 和方差 δ 对温度数据进行统计分析。极差和方差越小, 则辐射热的削减效果和箱体内部温度场的分布均匀性越好。

$$R_j = t_{j\max} - t_{j\min} \quad (1)$$

式中 R_j 为试验第 j 天的温度极差, $^\circ\text{C}$; $t_{j\max}$ 、 $t_{j\min}$ 分别为试验第 j 天的温度的最大值和最小值, $^\circ\text{C}$ 。

$$\delta_j = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{ij} - \bar{t}_j)^2}{n} \quad (2)$$

式中 δ_j 为试验第 j 天的温度方差, t_{ij} 为试验第 j 天第 i 温度测点的温度记录值, $^\circ\text{C}$; \bar{t}_j 为试验第 j 天箱体内部的平均温度, $^\circ\text{C}$; n 为试验总天数, $n=3$ 。

1.4 能耗与减排潜力分析

当保温箱用于实际控温运输时, 由于内外温差大, 需要使用机械制冷系统或蓄冷装置消除外界传入的热量, 不可避免地需要消耗能源。为评估辐射制冷技术的节能效果, 以下将对保温箱的全年围护结构传热量进行分析。如式 (3) 所示, 冷链保温配送箱围护结构某一时刻的漏热量为

$$Q = \sum_{i=1}^6 K F_i (T_{w,i} - T_c) \quad (3)$$

式中 Q 为漏热量, W ; K 为冷链保温箱传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; F_i 为保温箱第 i 表面的传热面积, m^2 ; $T_{w,i}$ 为保温箱第 i 外表面的综合温度, $^\circ\text{C}$; T_c 为保温箱内空气温度, $^\circ\text{C}$ 。

$$K = 1 / [(1/A_w) + (\sum \partial_a / \lambda_a) + (1/A_n)] \quad (4)$$

式中 A_w 、 A_n 分别为保温箱外表面、内表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; ∂_a 为第 a 层材料厚度, m ; λ_a 为第 a 层材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

$$F_i = \sqrt{F_{w,i} \cdot F_{n,i}} \quad (5)$$

式中 $F_{w,i}$ 、 $F_{n,i}$ 分别为保温箱第 i 外表面、内表面积, m^2 。

$$T_{w,i} = T_w + \alpha I_i / A_w \quad (6)$$

式中 T_w 为环境空气温度, $^\circ\text{C}$; α 为保温箱外表面的太阳辐射吸收率 ($\alpha_A=0.40$, $\alpha_B=0.12$); I_i 为保温箱第 i 外表面太阳辐射强度, W/m^2 (侧壁面为顶面的 40%, 地面近似为 0)。

若制冷系统通过电力为保温箱提供冷源, 则应用辐射制冷技术, 单个冷链保温箱减少碳排放量计算见式 (7)。

$$\Delta E = \Delta Q \beta \quad (7)$$

式中 ΔE 为碳减排量, kg (以 CO_2 计); ΔQ 为节约的能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$; β 为国家电网电力生产的碳排放因子, $0.583\,9\text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})^{[32]}$ 。

2 试验结果与分析

2.1 保温箱外表面温度分析

各外表面温度变化情况如图 4 和表 1 所示。就单一保温箱而言, 外表面因朝向不同, 所接受的太阳辐射量差异明显, 温度变化呈现各向异性。以 A 对照箱为例, 上表面处于水平位置, 太阳高度角大, 日间照射时间长, 试验期间的温度波动范围最大、峰值最高。试验期间, 日温度波动在 $22.4 \sim 66.8\text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 表面最高温度、平均温度为 66.8 、 $46.6\text{ }^\circ\text{C}$, 分别超过环境空气温度 33.5 、 $16.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于太阳光照射无法直射保温箱下表面, 在散射和反射的影响下, 表面温度波动较为平缓, 与环境温度相比, 表面最高温度、平均温度的差值仅为 5.1 、 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。保温箱侧壁受朝向的限制, 温度峰值、峰值出现时间有明显差异, 按东南西北朝向的顺序, 表面最高温度 $T_{Aw\max,i}$ 分别为 60.7 、 48.5 、 59.5 、 $47.1\text{ }^\circ\text{C}$; 东南西北向表面最高温度出现的时刻分别为 $08:15$ 、 $12:55$ 、 $15:40$ 、 $14:15$ 。值得注意的是, 由于太阳东升西降的规律, 对东西朝向壁面辐射量、温度值有较为明显的影响, 东西朝向壁面接受的太阳辐射量不同, 且在时间分布上呈现较大差异, 东向壁面接受的太阳辐射量集中于上午时间段, 其 $8:00 - 10:00$ 期间度时数为 $159.1\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}$, 约占试验期间总度时数的 29.1% ; 而西向壁面接受的太阳辐射量集中于下午时间段, 其 $14:00 - 16:00$ 期间度时数为 $151.6\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}$, 约占总度时数的 29.0% 。

对比 A、B 两箱统计数据, 辐射制冷技术在降低保温箱外表面峰值、温度波动范围等方面效果较为明显 (如图 5a 所示), 各外表面温度最高可降低 $1.9 \sim 17.3\text{ }^\circ\text{C}$, 最大降幅为 28.5% 。按上下东南西北面的顺序, 运用辐射制冷技术后, B 箱外表面最高温度 $T_{Bw\max,i}$ 分别为 54.0 、 37.8 、 43.4 、 42.1 、 48.5 、 $41.8\text{ }^\circ\text{C}$, 相较于 A 箱下降了 $4.8\% \sim 28.5\%$; A 箱平均温度为 $40.3\text{ }^\circ\text{C}$, B 箱对应的值降为 $36.3\text{ }^\circ\text{C}$, 同比下降 10.0% ; 如图 5b 所示, 平均温度 $T_{Aw\text{mean},i}$ 、 $T_{Bw\text{mean},i}$ 与环境空气温度的差值方面, B 箱各外表面 (上下东南西北) 平均温度与环境空气温度的差值分别为 7.6 、 0.8 、 4.8 、 3.5 、 5.1 、 $3.1\text{ }^\circ\text{C}$, 较 A 箱下降了 $0.7 \sim 6.9\text{ }^\circ\text{C}$, 降幅达 $45.6\% \sim 56.1\%$ 。

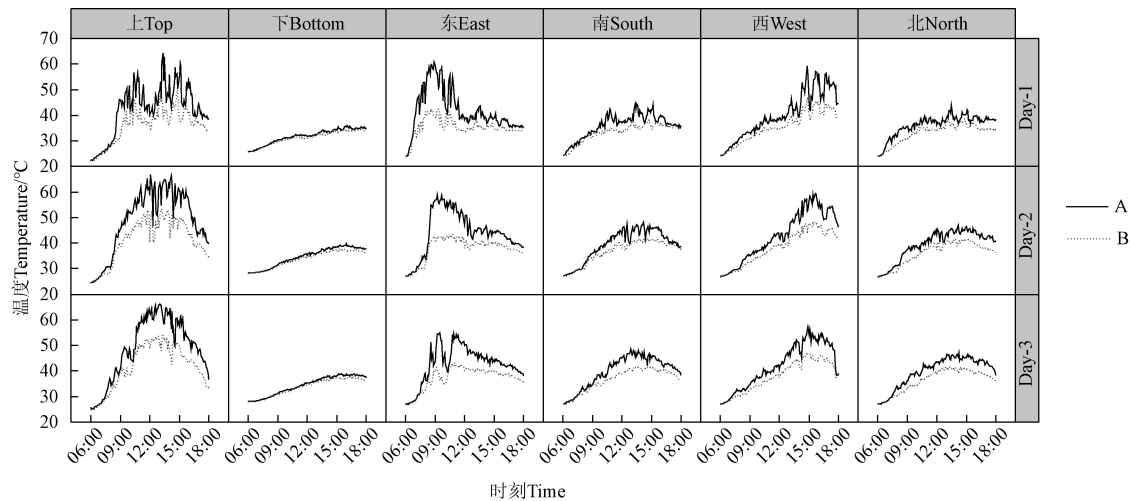


图 4 涂覆辐射制冷涂料对保温箱外表面温度的影响

Fig.4 Effects of the application of radiative cooling coating on the temperature of the outside surface of the incubator

表 1 保温箱外表面温度统计

Table 1 Statistics of the outside surfaces temperature of the incubator

指标 Index	°C					
	上 Top	下 Bottom	东 East	南 South	西 West	北 North
A 箱最高温度 Maximum temperature of the incubator A	66.8	39.7	60.7	48.5	59.5	47.1
B 箱最高温度 Maximum temperature of the incubator B	54.0	37.8	43.4	42.1	48.5	41.8
A、B 最高温度差 Maximum temperature difference between A and B	12.8	1.9	17.3	6.4	11.0	5.3
A 箱平均温度 Average temperature of the incubator A	46.6	33.6	43.0	38.4	41.7	38.5
B 箱平均温度 Average temperature of the incubator B	39.7	32.9	36.9	35.6	37.2	35.2
A、B 平均温度差 Average temperature difference between A and B	6.9	0.7	6.1	2.9	4.5	3.4

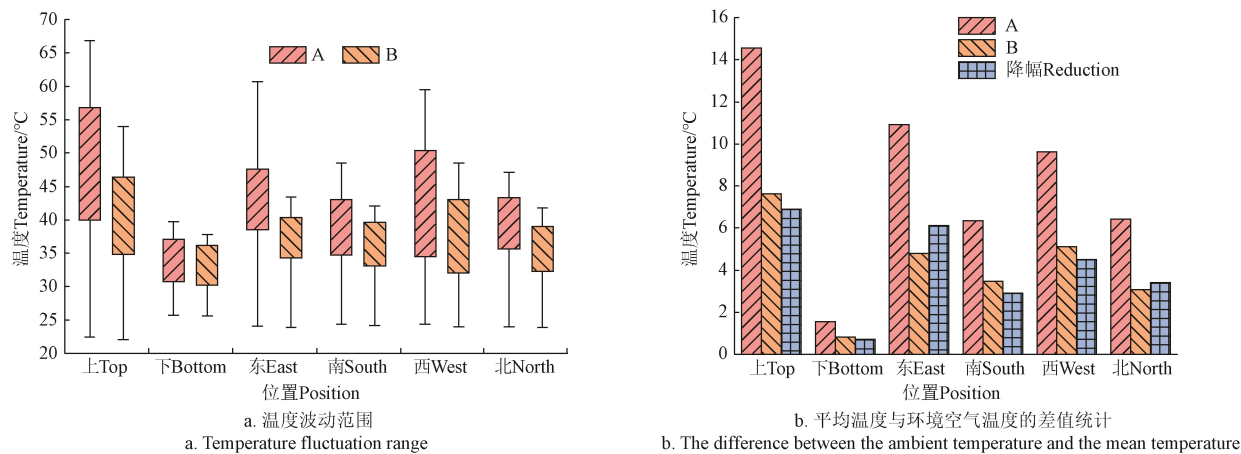


图 5 保温箱外表面温度变化

Fig.5 Temperature variation of the incubator outside surfaces

2.2 保温箱内部温度分析

保温箱内部温度变化情况如图 6 和表 2 所示。由于保温箱围护结构的隔热作用，箱体内部的温度波动相较于外表面较为平缓。

在内表面最高温度方面，仍以 A 箱为例，试验期间，A 箱内表面最高温度出现在顶面，温度值为 51.5℃，较外表面最高温度下降 15.3℃，降幅为 22.9%。从 A、B 两箱对比来看，如表 2 和图 7 所示，涂覆辐射制冷涂料后，B 箱吸收的太阳辐射量下降，太阳辐射得热量降低，因此传入 B 箱内部的热量随之下降，B 箱内表面最高温度降至 43.8℃，各内表面最高温度相较于 A 箱降低 5.9～

7.7℃，最大降幅为 15.0%。在平均温度方面，如表 2 所示，涂覆辐射制冷涂料后，B 箱各内表面平均温度相较于 A 箱下降了 3.6～5.5℃，降幅为 9.2%～13.1%；由各内表面平均温度计算其算数平均数得到内表面总平均温度，A、B 两箱分别为 40.5、35.9℃，B 箱较 A 箱降幅为 11.2%；A 箱箱体中心平均空气温度为 40.2℃，B 箱对应的值为 36.2℃，降低了 4.0℃，降幅为 10.0%。

辐射制冷技术在降低保温箱内表面峰值、温度波动范围等方面效果较为明显。为进一步评估辐射制冷涂料对于箱内温度场的影响，引入极差与方差分析。如表 3 所示，试验期间，A 箱的温度极差 R 分别为 23.1、24.5

和 24.3 ℃，而涂覆辐射制冷涂料的 B 箱的温度极差 R 对应下降至 16.0, 17.1 和 16.9 ℃，降幅为 30.2%~30.7%。

A 箱的温度方差 δ 分别为 5.7、7.7 和 7.5，B 箱对应的温度方差 δ 为 4.2、5.4 和 5.4，降幅为 26.3%~29.9%。

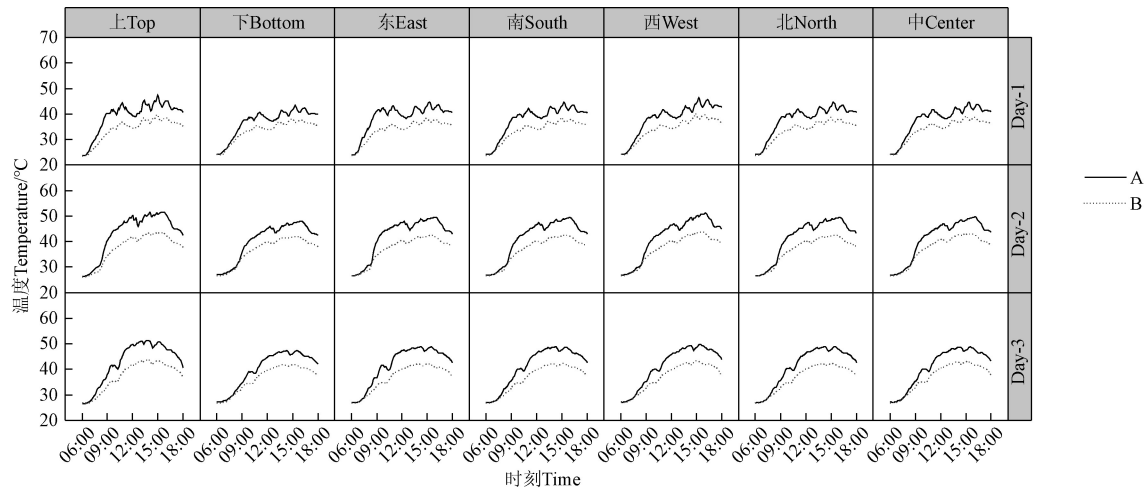


图 6 涂覆辐射制冷涂料对保温箱内部温度的影响

Fig.6 Effects of the application of radiative cooling coating on the internal temperature of the incubator

表 2 保温箱内部温度统计

Table 2 Statistics of the inside temperature of the incubator		℃					
指标	Index	上	下	东	南	西	北
		Top	Bottom	East	South	West	North
A 箱内部最高温度	Maximum inside temperature of the incubator A	51.5	48.0	49.5	49.4	51.1	49.4
B 箱内部最高温度	Maximum inside temperature of the incubator B	43.8	42.1	42.4	42.6	43.8	42.6
A、B 内部最高温度差	Maximum inside temperature difference between A and B	7.7	5.9	7.1	6.8	7.3	6.8
A 箱内部平均温度	Average inside temperature of the incubator A	41.9	39.2	40.9	40.2	40.6	40.3
B 箱内部平均温度	Average inside temperature of the incubator B	36.4	35.6	35.9	35.7	36.2	35.8
A、B 内部平均温度差	Average inside temperature difference between A and B	5.5	3.6	5.0	4.5	4.4	4.5

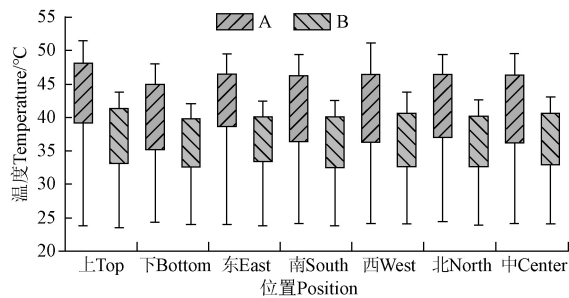


图 7 保温箱内部温度波动范围

Fig.7 Temperature fluctuation range of the incubator inside

表 3 保温箱内部温度极差和方差统计表

Table 3 The range and variance of the inside temperature of the incubator		最高温度	最低温度	温度极差	方差
时间	组别	Maximum temperature	Minimum temperature	Temperature range $R/^\circ\text{C}$	Variance of temperature δ
Time	Group	$/^\circ\text{C}$	$/^\circ\text{C}$		
Day 1	A	47.5	24.4	23.1	5.7
	B	40.1	24.1	16.0	4.2
Day 2	A	51.5	27.0	24.5	7.7
	B	43.8	26.7	17.1	5.4
Day 3	A	51.4	27.1	24.3	7.5
	B	43.8	26.9	16.9	5.4

综上，涂覆辐射制冷涂料后，保温箱的隔热性能得到明显改善。各内表面温度有不同程度的下降，温度峰值下降范围为 5.9~7.7 ℃，降幅为 12.3%~15.0%，平均温度下降了 3.6~5.5 ℃，降幅为 9.2%~13.1%。与此同时，保温箱内部温度场也得到改善，内部空气平均温度由 40.2 ℃下降至 36.2 ℃，温度场极差下降 30.2%~30.7%，方差下降 26.3%~29.9%，有助于运输与配送过程的节能。

3 能耗与减排效果分析

3.1 节能潜力分析

为更加系统地对辐射制冷涂料应用于保温箱（容积 1.5 m³）的节能潜力进行评价，研究以广州地区为例，根据前文方法对保温箱全年运行能耗进行分析。在数据方面，广州全年逐月太阳辐射、环境空气温度如图 8 所示（数据来源于 NASA 公开的 MERRA-2 气象数据集），其中 7 月份的平均太阳辐射和平均温度均为最大值，分别达到 31.5 ℃和 5 725.3 W/m²，箱体传热系数 K 为 0.55 W/(m²·℃)，假设冷链保温箱使用时间段为 6:00—18:00，设箱内温度 T_c 为 0 ℃时，A、B 箱全年的逐日总漏热量如图 9 所示，可以看出 7 月份 A、B 箱的漏热量均为最大值，与广州平均气温和平均太阳辐射相符，A 箱的总漏热量为 494.5 kW·h，其中太阳辐射漏热量占

12.8%，使用辐射制冷技术后，B 箱对应值分别降为 450.2 kW·h、4.2%，全年总漏热量降低了 44.3 kW·h，降幅为 9.0%，太阳辐射漏热量降低 70.0%，有效削减太阳辐射对于箱体热负荷的影响。若制冷系统通过电力为保温箱提供冷源，设制冷效率分别为 0.5、1.0 和 1.5，则应用辐射制冷技术，单个冷链保温箱全年可节省能耗 29.6~88.7 kW·h。由式（7）可知，全年可以减少碳排放量达 17.3~51.8 kg。

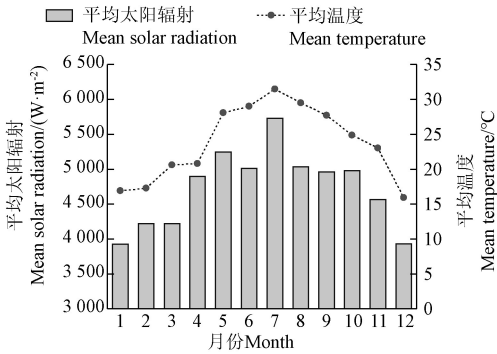


图 8 广州逐月平均温度和太阳辐射

Fig.8 The monthly mean temperature and solar radiation in Guangzhou

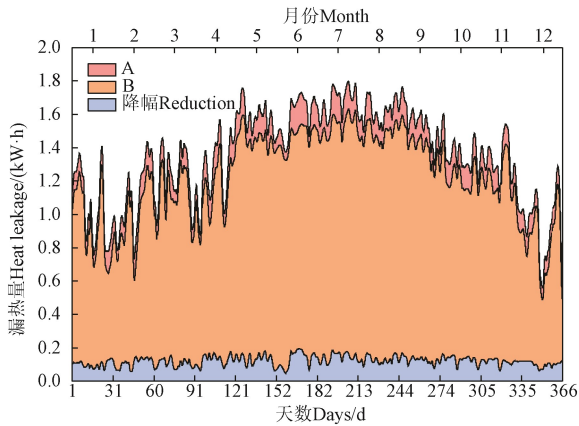


图 9 涂覆辐射制冷涂料对保温箱逐日总漏热量的影响

Fig.9 Effects of coated radiant cooling coatings on the daily total heat leakage of the incubator

3.2 保温厚度影响分析

保温材料厚度直接影响保温箱的隔热性能，目前保温运输装备围护结构厚度通常为 40~100 mm 之间。如图 10 所示，当围护结构厚度从 40~100 mm，A、B 箱的全年总漏热量分别从 637.4、580.2 kW·h 降低至 233.17、212.3 kW·h，全年总漏热量削减值从 57.2 kW·h 下降至 20.9 kW·h，且随着围护结构厚度的增加，全年总漏热量降幅呈加速下降趋势，这是由于随着保温厚度的增加，箱体的隔热性能逐渐增强，太阳辐射对于箱体的热负荷影响程度下降。因此，辐射制冷涂料在运用于保温层较薄的保温箱时，效果更佳，且在改善保温箱隔热性能同时可增大保温箱的有效容积。

3.3 不同涂料影响分析

目前，由于冷链运输企业缺乏对热负荷构成的整体

认知，导致了在实际应用中，用户重视围护结构传热而忽视辐射的影响，如为了达到宣传效果，企业在车厢外表面喷涂彩色广告宣传画、出于企业文化宣传采用深色甚至黑色涂料进行涂刷等，导致太阳辐射热负荷和运行能耗增加。

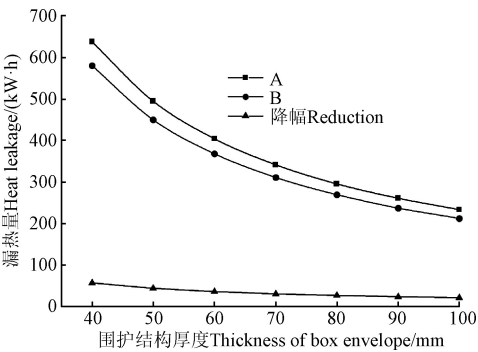


图 10 不同围护结构厚度对保温箱年总辐射漏热量的影响

Fig.10 Effects of different thickness of box envelope on total annual radiant heat leakage of the incubator

为此，本文除 A、B 试验组外，引入某款市场常用涂料 C，以及高性能辐射隔热材料 D 开展对比分析，相关参数和总漏热量如表 4 所示。

表 4 保温箱涂料参数和总漏热量

Table 4 Coating parameters and total heat leakage of the incubator

组别 Group	涂料颜色 Coating colour	太阳光反射比 Total solar reflectance /%	参考文献 Reference	总漏热量 Total heat leakage/(kW·h)
A	白色 White	60	[14]	494.5
B	白色 White	88	[31]	450.2
C	咖啡色 Coffee	24	[33]	550.9
D	白色 White	96	[34]	437.5

C 箱由于涂刷了深色涂料，太阳辐射吸收系数大，反射率小，隔热效果差，总漏热量达到了 550.9 kW·h，分别较 A 箱、B 箱升高了 56.4、100.8 kW·h，上升幅度为 11.4%和 22.4%；而 D 箱所用材料的太阳光反射比达 96%，隔热效果最好，总漏热量降低为 435.9 kW·h，分别较 A 箱、B 箱降低了 57.0、12.7 kW·h，下降幅度为 11.5%和 2.8%，但 D 箱材料由电子束蒸发法制备的银涂层与随机化的玻璃-聚合物组成，所用材料制备工艺较为复杂，成本较高。由此可见，从节能降耗的角度出发，浅色涂料的隔热效果较好；在具备条件的情况下，采用高反射比的涂料效果更为显著。

4 结 论

本文以冷链保温箱为对象，引入辐射制冷技术，分析其对冷链运输装备隔热性能的影响和冷藏运输过程中的节能降耗潜力。结论如下：

1) 应用辐射制冷技术后，保温箱各朝向外表面温度较未加辐射制冷涂料处理组均有降低，其中平均温度降低 0.7~6.9 °C，温度峰值削减 1.9~17.3 °C；保温箱内部平均温度下降 3.6~5.5 °C，温度峰值降低 5.9~7.7 °C。

2) 辐射制冷技术可有效改善保温箱内部温度均匀性。试验期间,普通保温箱内部温度极差为 23.1~24.5 °C,应用辐射制冷涂料后降为 16.0~17.1 °C,降幅为 30.2%~30.7%;温度方差降幅为 26.3%~29.9%;

3) 在节能减排方面,应用辐射制冷技术后,太阳辐射漏热量降低 70.0%,有效降低保温箱外表面得热量。对于本文所述 1.5 m³ 容积的小型冷链保温箱,全年总漏热量降低 44.3 kW·h,降幅为 9.0%,年均节能 29.6~88.7 kW·h,降低碳排放量约 17.3~51.8 kg。

4) 保温材料的厚度影响着保温箱的隔热性能,当围护结构厚度从 40~100 mm 时,A、B 箱的全年总漏热量相应降至 233.17、212.3 kW·h,总漏热量降幅随着围护结构厚度的增加而逐渐下降。

5) 涂料的颜色直接影响其光学性能,使用具有高太阳光吸收比的咖啡色涂料处理保温箱后,年总漏热量较本文所用的白色辐射制冷涂料高 22.4%。从节能降耗的角度出发,建议冷藏运输装备外表面涂装采用具有高反射比的浅色涂料。

本次试验仅对辐射制冷技术应用于保温箱的隔热性能改善进行分析。研究对有隔热要求的冷库、粮库、油罐等农业设施亦具有参考意义。后期,将针对辐射制冷技术应用于冷藏车、冷库等冷链基础设施设备的节能效果进行研究,并对其经济性问题展开进一步探讨,综合评估辐射制冷技术应用于冷链装备的可行性。

参考文献

- [1] 中国物流与采购联合会. 中国冷链物流发展报告(2021)[M]. 北京: 中国财富出版社, 2021.
- [2] 中物联冷链委. 冷链物流迈入十四五高质量发展新阶段[EB/OL]. (2021-12-17). [2021-12-18]. <http://www.chinawuliu.com.cn/lhhzq/202112/17/566742.shtml>
- [3] Zhao H, Liu S, Tian C, et al. An overview of current status of cold chain in China[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 88: 483-495.
- [4] 田长青. 中国战略性新兴产业研究与发展·冷链物流[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [5] 中华人民共和国国务院. 国务院办公厅关于印发“十四五”冷链物流发展规划的通知[EB/OL]. (2021-11-26). [2022-01-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-12/12/content_5660244.htm.
- [6] Gao E, Cui Q, Jing H, et al. A review of application status and replacement progress of refrigerants in the Chinese cold chain industry[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 128: 104-117.
- [7] 吕恩利, 沈昊, 刘妍华, 等. 蓄冷保温箱真空隔热蓄冷控温传热模型与验证[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(4): 300-306.
- [8] 杜柯, 翁旭嘉, 李煜丹, 等. 气凝胶蜂窝板保温材料的制备及性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2019, 46(6): 83-86, 95.
- [9] Du Ke, Weng Xujia, Li Yudan, et al. Experimental study on preparation and properties of aerogel honeycomb insulation material[J]. *New building materials*, 2019, 46(6): 83-86, 95. (in Chinese with English abstract)
- [10] Principi P, Fioretti R, Copertaro B. Energy saving opportunities in the refrigerated transport sector through Phase Change Materials (PCMs) application[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 923(1): 012043.
- [11] 李细霞, 吕东霖, 李长玉. 冷藏车车厢结构优化设计及关键参数分析[J]. *中国工程机械学报*, 2018, 16(4): 316-320.
- [12] Li Xixia, Lyu Donglin, Li Changyu. Structure optimization and key parameters analysis of a refrigerated truck carriage[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2018, 16(4): 316-320. (in Chinese with English abstract)
- [13] 徐笑锋, 章学来, Munyalo J M, 等. 十水硫酸钠相变蓄冷保温箱保冷特性的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 308-314.
- [14] Xu Xiaofeng, Zhang Xuelai, Munyalo J M, et al. Experimental study on cold retention characteristics of cold storage incubator using Na₂SO₄·10H₂O as PCMs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(22): 308-314. (in Chinese with English abstract)
- [15] Tong S, Nie B, Li Z, et al. A phase change material (PCM) based passively cooled container for integrated road-rail cold chain transportation-An experimental study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 195: 117204.
- [16] 刘广海, 马平川, 李庆庭, 等. 冷链专用蓄冷托盘设计与控温运输性能测试[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(16): 295-302.
- [17] Liu Guanghai, Ma Pingchuan, Li Qingting, et al. Design of special cold chain pallet and its temperature-controlled transport performance test[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(16): 295-302. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘广海, 吴俊章, Foster A, 等. GU-PCM2 型控温式相变蓄冷冷藏车设计与空载性能试验[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 288-295.
- [19] Liu Guanghai, Wu Junzhang, Foster A, et al. Design and no-load performance test of GU-PCM2 temperature controlled phase change storage refrigerator[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(6): 288-295. (in Chinese with English abstract)
- [20] Lin K, Han J, Li K, et al. Radiative cooling: Fundamental physics, atmospheric influences, materials and structural engineering, applications and beyond[J]. *Nano Energy*, 2021, 80: 105517.
- [21] Zhao D, Aili A, Zhai Y, et al. Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications[J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6(2): 021306.
- [22] Zhao B, Hu M, Ao X. Performance evaluation of daytime radiative cooling under different clear sky conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 155: 660-666.
- [23] Yu X, Chan J, Chen C. Review of radiative cooling materials: Performance evaluation and design approaches[J]. *Nano Energy*, 2021, 88: 106259.
- [24] Tang K, Dong K, Li J, et al. Temperature-adaptive radiative coating for all-season household thermal regulation[J]. *Science*, 2021, 374(6574): 1504-1509.
- [25] Wang S, Jiang T, Meng Y, et al. Scalable thermochromic smart windows with passive radiative cooling regulation[J]. *Science*, 2021, 374(6574): 1501-1504.
- [26] Aaswath A P, Abou A M, Zhu L, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight[J]. *Nature*, 2014, 515(7528): 540-544.
- [27] Xue X, Qiu M, Li Y, et al. Creating an eco-friendly building coating with smart subambient radiative cooling[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(42): 1906751.
- [28] Zeng S, Pian S, Su M, et al. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2021, 373(6555): 692-696.

- [25] 张观山, 李天华, 侯加林. 考虑动态吸收率的玻璃温室覆盖层温度预测模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 201-211.
Zhang Guanshan, Li Tianhua, Hou Jialin, et al. Model for predicting the temperature of glass greenhouse cover considering dynamic absorptivity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 201-211. (in Chinese with English abstract)
- [26] 费键丽, 杨剑, 吕银燕, 等. 辐射制冷对汽车热舒适性和能耗影响研究[J]. 节能技术, 2021, 39(3): 274-280.
Fei Jianli, Yang Jian, Lü Yinyan, et al. Research on the influence of radiative sky cooling on cabin thermal comfort and air-conditioning system energy consumption[J]. Energy Conservation Technology, 2021, 39(3): 274-280. (in Chinese with English abstract)
- [27] Smith G, Gentle A. Radiative cooling: Energy savings from the sky[J]. Nature Energy, 2017, 2(9): 1-2.
- [28] 徐鑫, 李洁, 姜曙光, 等. 新疆农村被动式太阳房夏季不同降温控制模式的降温效果[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 198-204.
Xu Xin, Li Jie, Jiang Shuguang, et al. Cooling effect of passive solar house with different cooling control modes during summer in rural areas of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(14): 198-204. (in Chinese with English abstract)
- [29] Liu J, Zhou Z, Zhang D, et al. Research on the performance of radiative cooling and solar heating coupling module to direct control indoor temperature[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 205: 112395.
- [30] Peng Y, Fan L, Jin W, et al. Coloured low-emissivity films for building envelopes for year-round energy savings[J]. Nature Sustainability, 2022, 5(4): 339-347.
- [31] 中国国检测试控股集团股份有限公司. 国家建筑材料测试中心检测报告 WT2020B01C01420[R]. 北京: 2020.
- [32] 中华人民共和国生态环境部. 关于公开征求《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施(2021年修订版)》(征求意见稿)意见的通知[EB/OL]. (2021-12-02). [2022-01-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202112/t20211202_962776.html
- [33] 陈东平, 余恒鹏, 曾洵, 等. 建筑反射隔热涂料隔热机理及性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2018, 44(1): 114-118.
Chen Dongping, Yu Hengpeng, Zeng Xun, et al. Experimental study on performance and insulation mechanism of architectural reflective thermal insulation coating[J]. Sichuan Building Science, 2018, 44(1): 114-118. (in Chinese with English abstract)
- [34] 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.

Thermal insulation performance test and energy consumption of the cold chain incubator with radiative cooling

Liu Guanghai¹, Li Qingting¹, Xie Ruhe¹, Chen Huan¹, Liao Jing², Zhong Xiaoying^{3*}

(1. School of Management, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Department of Engineering and Management, University of Padova, Padova 35131, Italy; 3. School of Business, Nanfang College Guangzhou, Guangzhou 510970, China)

Abstract: Refrigerated transport equipment is increasing rapidly with the development of the cold chain in China. High energy consumption of refrigerated trucks can often occur correspondingly in recent years. In most cases, the envelope material of the transport equipment can be improved to reduce energy consumption. Alternatively, the heat transfer mechanism can be widely expected to significantly promote the energy efficiency of refrigerated equipment in a short term. Particularly, the heat load of cold chain transportation can originate mainly from the air-convection heat exchange and the solar radiation heat. In this study, the radiative cooling coating was developed and applied to the external surface of the cold chain incubator. The paint material was also characterized by the white homogeneous liquid with a relatively high resistance to impact, adhesion, acid, alkali, and artificial aging. A series of tests were then carried out to evaluate the performance of radiative cooling coatings on the thermal insulation of the cold chain incubator. The test results show that the solar radiation heat gain of the incubator decreased significantly using radiation cooling coating. Specifically, the average temperature of the outside surface of the insulation box decreased by 0.7-6.9 °C with an average decrease rate of 10.0% than before. The maximum decrease rate of the peak temperature was 17.3 °C, decreasing over 28.5%. The average temperature of the inner surface also decreased by 3.6-5.5 °C. The peak temperature of the inside surface decreased by 15.0% and the average temperature of the inside surface decreased by 11.2%. The average temperature of the central air inside the box decreased by 10.0%. At the same time, the uniform distribution of the temperature field inside the insulated box greatly contributed to the cooling performance of the final quality of the food. The temperature range decreased by 30.2%-30.7% using the radiative cooling coating, where the variance of the temperature field decreased by 26.3%-29.9%, indicating the uniform temperature field of the internal box. Energy consumption analysis showed that the cold chain incubator with the radiation cooling coatings was reduced the annual heat leakage by 44.3 kW·h, and the carbon emissions by 17.3-51.8 kg., compared with the original. Specifically, there was a total reduced heat leakage of 212.3 kW·h from the incubator coated with the radiation cooling paint, when the thickness of the box envelope increased from 40 to 100 mm. The total heat leakage rate decreased gradually with the increase of coating thickness. Additionally, the color of the coating was an important indicator of the optical properties of the paint. An excellent insulation property was achieved in the insulated boxes with the white radiant cooling paint, where the total annual heat leakage decreased by 22.4%, compared with the dark coffee-colored paints with high solar absorption ratios. The finding can provide new ideas for the energy-saving application of cold chain transportation equipment, particularly for agricultural facilities with the heat insulation requirements, such as grain, cold storage, and oil tanks.

Keywords: refrigeration; transportation; cold chain; radiative cooling; thermal insulation; temperature field; energy-saving