

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201803036



夏热冬暖地区开窗通风与墙体遮阳 对集装箱房室内热环境的影响

王玉琳¹, 冉茂宇¹, 池佩富²

(1. 华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建天利高新材料有限公司, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了考察我国夏热冬暖地区集装箱建筑室内热环境状况,提出相应的改善措施,通过搭建足尺集装箱房,在厦门夏季典型气候条件下,对比测试集装箱房开窗通风及东西向墙体薄板遮阳对其室内热环境的影响.结果表明:集装箱房采用开窗通风,可显著降低室内温度;采用外墙遮阳,可稍缓解夏季集装箱房室内高温,但效果并不理想;两种降温方式均能在一定程度上降低室内预测平均投票数(PMV)值,但不能使室内达到热舒适范围,夏季开启空调仍然非常必要.

关键词: 集装箱房; 遮阳; 通风; 室内热环境; 夏季

中图分类号: TU 111; TU 834.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)04-0556-06

Influence of Window Open Ventilation and Wall Shading on Indoor Thermal Environment of Container Room in Hot Summer and Warm Winter Areas

WANG Yulin¹, RAN Maoyu¹, CHI Peifu²

(1. College of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Tianli Performance Materials Limited Company, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to investigate the indoor thermal environment of container room in hot summer and warm winter areas, and to find the improvement measures, a full size container room was constructed, under the typical summer climate of Xiamen, the indoor thermal environment of container room with ventilation and east-west wall shading was tested. The results show that the temperature of container room can be significantly reduced by natural ventilation; the heat of the container room in summer can be slightly relieved with the external wall shading, but the effects are quite limited. Both cooling methods can reduce the indoor predicted mean vote (PMV) value to a certain extent, but the indoor thermal condition is uncomfortable, and air-conditioning is still necessary in summer.

Keywords: container room; shading; ventilation; indoor thermal environments; summer

集装箱建筑是一种轻钢围护结构建筑,因其标准化、结构安全稳定、搭建快速、拆卸方便、经济环保且利于港口废弃集装箱回收利用等优点,近年来在我国得到了大力推广与应用.然而,集装箱建筑外壁由薄钢板制成,厚度只有 3 mm,故热阻和热惰性都很小,保温与隔热性能极差,室内热环境通常夏热冬

收稿日期: 2018-03-26
通信作者: 冉茂宇(1962-),男,教授,博士,主要从事建筑热工与建筑节能的研究. E-mail:373664489@qq.com.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678254); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1611305009)

冷. 在我国夏热冬暖地区, 夏季太阳辐射强烈, 气温高, 室外综合热作用很大, 导致集装箱建筑夏季室内热环境尤为酷热, 空调能耗严重. 因此, 如何改善夏热冬暖地区集装箱建筑夏季的室内热环境并降低其空调能耗, 是值得研究的重要课题. 为了改善轻钢围护结构建筑的室内热环境, 减小采暖空调能耗, 前人进行了大量研究^[1-9]. 在国外, 关于集装箱的文献大多集中在建筑与结构设计及集装箱生命周期等方面, 而在改善集装箱室内热环境方面的研究则相对较少^[10-12]. 对于集装箱等轻钢围护结构建筑室内热环境的研究多数基于理论分析或数值计算, 针对室内热环境的改善措施的实测研究还相对较少. 本文通过对夏热冬暖地区的集装箱实验房进行研究, 测试集装箱实验房在自然通风^[13-14] 和外墙遮阳^[15-16] 情况下的室内热环境, 探究夏季夏热冬暖地区通风散热和外墙遮阳对集装箱建筑降温的影响效果.

1 测试装置及测试内容

在厦门某高校实验楼屋顶上搭建 3 个相同的足尺集装箱房, 如图 1 所示. 集装箱房长×宽×高为 3.3 m×3.0 m×3.0 m. 为了让房间通风良好, 门与窗户设计成对开, 门为碳钢材料, 宽×高为 0.9 m×2.0 m, 窗户为单层玻璃铝合金推拉窗, 宽×高为 1.5 m×1.2 m, 窗台高 0.9 m. 集装箱房的箱体选用厚×宽为 140 mm×3 mm 的 C 型钢为骨架, 底部采用宽×厚为 120 mm×3 mm 的 C 型钢加强, 侧面为 1.2 mm 厚的压型钢板, 顶部为 1.5 mm 厚的压型钢板; 地板采用钢龙骨焊接, 铺设 2 mm 厚的钢板. 底部四角配有万向轮, 可根据需要调节房间的位置和朝向.



图 1 集装箱房现场图

Fig. 1 Container room in situ

为考察集装箱房夏季室内热环境, 需要测试室内空气干球温度、相对湿度、室内风速及内墙面黑球温度. 通过室内气象参数测试, 设置相应的人体活动量和衣着, 计算室内热环境的热舒适指标, 即预测平均投票数 (PMV), 把握室内热环境状况. 为了揭示室外气象参数对集装箱房室内热环境的影响, 需要同时测试室外空气干球温度、相对湿度、室外风速及水平太阳辐射照度.

2 测试仪器及测点布置

室外气象参数测试采用 PH-1 型移动气象站 (辽宁省锦州阳光气象科技有限公司) 自动记录, 其布置在同一屋顶距离集装箱房 15 m 处, 如图 2 所示.

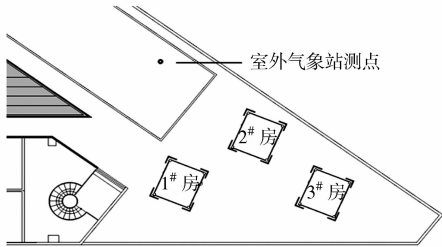


图 2 屋顶集装箱房及气象参数测点布置

Fig. 2 Distribution of container room and outdoor parameter measuring points

室内空气干球温度和相对湿度测试采用 AZ8829 型温湿度自记仪 (深圳市衡欣科技股份有限公司), 其布置在房间中心, 挂在三脚架上离地高 1.5 m 处. 室内风速测试采用 Testo480 型热敏式风速仪 (上海市德图仪器国际贸易有限公司), 探头离地高 1.5 m. 壁面黑球温度测试采用 JTR04 型黑球温度计 (北京市世纪建通环境技术有限公司), 布置在房间中心离地高 1.5 m 处.

表 1 各测试仪器精度及范围

Tab. 1 Accuracy and range of test instruments

各测试仪器精度及范围, 如表 1 所示. 表 1 中: $\theta_{1,a}$ 为室内空气干球温度; F_1 为室内空气相对湿度; $\theta_{1,g}$ 为室内黑球温度; v_1 为室内风速; $\theta_{2,a}$ 为室外空气干球温度; F_2 为室外空气相对湿度; v_2 为室外风速; E_2 为室外水平太阳辐射照度.

测试参数	仪器型号名称	测试范围	仪器精度
$\theta_{1,a}/^{\circ}\text{C}$	AZ8829 型温湿度自记仪	-50~80	± 0.6
$F_1/\%$	AZ8829 型温湿度自记仪	0~100	± 3.0
$\theta_{1,g}/^{\circ}\text{C}$	JTR04 型黑球温度计	5~120	± 0.5
$v_1/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Testo480 型热敏式风仪	0~20	± 0.3
$\theta_{2,a}/^{\circ}\text{C}$	PH-1 型移动气象站	-40~80	± 0.1
$F_2/\%$	PH-1 型移动气象站	0~100	± 0.1
$v_2/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	PH-1 型移动气象站	0~70	± 0.3
$E_2/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	PH-1 型移动气象站	0~2 000	$< 5\%$

3 测试工况及测试方法

为了考察和对比集装箱房在夏季室内的热环境状况, 制定的测试工况, 如表 2 所示. 表 2 中: 工况 1 考察 3 个集装箱房在不开门窗情况下, 室内热环境是否出现差异; 工况 2 考察 3 个集装箱房门窗开启通风情况下, 室内热环境是否出现差异;

工况 3 考察集装箱房单壁面(东面)遮阳及开窗通风对室内热环境的影响;工况 4 考察集装箱房双壁面(东西面)遮阳对室内热环境的影响. 集装箱房壁面遮阳的做法如下:首先,将挤塑聚苯板(xps)泡沫切成长 \times 宽 \times 高为 50 mm \times 50 mm \times 50 mm 的垫块,粘固在外壁上;然后,将厚 3 mm 的聚氯乙烯(pvc)发泡板作为遮阳板钉固粘结在垫块上,形成 50 mm 空气夹层. 垫块的导热系数为 0.028 W \cdot (m \cdot °C) $^{-1}$,其向壁面导热很小.

每个测试工况,集装箱房窗户均调为南向,互相错开摆放,确保测试期间集装箱房外围通风良好,从日出到日落互不遮挡阳光. 测试期间,房间内无人和任何散热或蓄热设备,各仪器同步记录设置为每隔 10 min 记录一次数据. 测试时间选在 2017 年 8 月 13 日—8 月 23 日,根据气候状况,每个工况连续测试最少 1 d,最多 3 d,选择其中气温高、太阳辐射较大的天气进行分析.

表 2 测试工况与测试目的
Tab.2 Test conditions and test purpose

工况	测试时间	1# 房状态	2# 房状态	3# 房状态
1	2017 年 8 月 15 日	门窗关闭,窗户朝南	门窗关闭,窗户朝南	门窗关闭,窗户朝南
2	2017 年 8 月 17 日	门窗开启,窗户朝南	门窗开启,窗户朝南	门窗开启,窗户朝南
3	2017 年 8 月 18 日	门窗关闭,窗户朝南	门窗开启,窗户朝南	门窗关闭,窗户朝南,东壁面遮阳
4	2017 年 8 月 20 日	门窗关闭,窗户朝南	—	门窗关闭,窗户朝南,东壁面和西壁面遮阳

4 测试结果与分析

4.1 室外气象参数的测试与分析

测试期间室外空气干球温度与相对湿度,以及室外风速与水平太阳辐射照度,如图 3,4 所示.

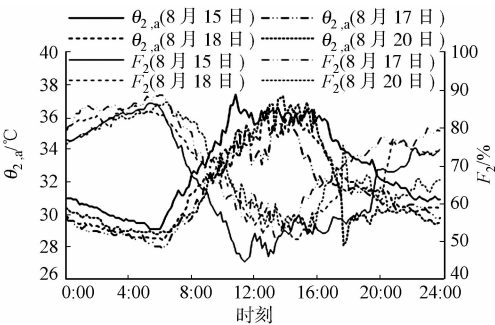


图 3 测试期间室外空气干球温度及相对湿度
Fig.3 Outdoor air dry-bulb temperature and relative humidity during test

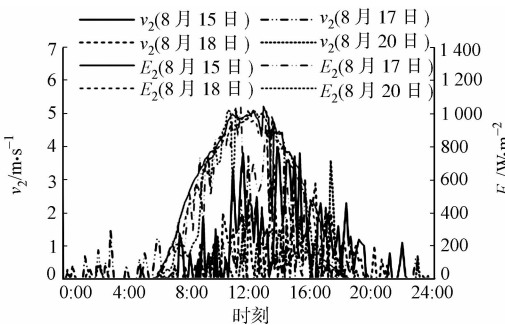


图 4 测试期间室外风速及水平太阳辐射照度
Fig.4 Outdoor air velocity and horizontal solar irradiance during test

将室外气象参数进行统计,各测试工况对应的室外气象参数情况,如表 3 所示.表 3 中: $\theta_{2,a,max}$ 为室外空气干球温度最高值; $\theta_{2,a,avg}$ 为室外空气干球温度平均值; $\theta_{2,a,min}$ 为室外空气干球温度最低值; $E_{2,max}$ 为水平太阳辐射照度最大值; $E_{2,avg}$ 为水平太阳辐射照度平均值; $v_{2,max}$ 为室外风速最大值; $v_{2,avg}$ 为室外风速平均值.

表 3 各测试工况对应的室外气象参数
Tab.3 Outdoor meteorologic parameters corresponding to each test condition

室外气象参数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
$\theta_{2,a,max} / ^\circ\text{C}$	37.4	36.0	36.3	37.3
$\theta_{2,a,avg} / ^\circ\text{C}$	34.8	31.2	31.6	31.5
$\theta_{2,a,min} / ^\circ\text{C}$	29.1	27.9	31.6	30.5
$E_{2,max} / \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	1 047.0	1 038.0	974.0	1 032.0
$E_{2,avg} / \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	303.6	229.8	277.2	265.9
$v_{2,max} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	4.0	4.2	3.5	3.6
$v_{2,avg} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.70	0.43	0.44	0.30

4.2 实验房对比测试的有效性验证与分析

工况 1,工况 2 的室内气象参数测试结果,如图 5 所示.图 5 中: θ_1 为室内温度.由图 5 可知:在相同气候条件下,3 个实验房无论在关窗不通风,还是在开窗通风的条件下,室内气温参数的变化及大小都近乎相同,差别甚小,可以用作后续对比实验测试研究.此外,虽然工况 1 和工况 2 测试的两天室外气象

参数变化及数值不尽相同,但可粗略看出开窗通风可以改善集装箱房的室内热环境.

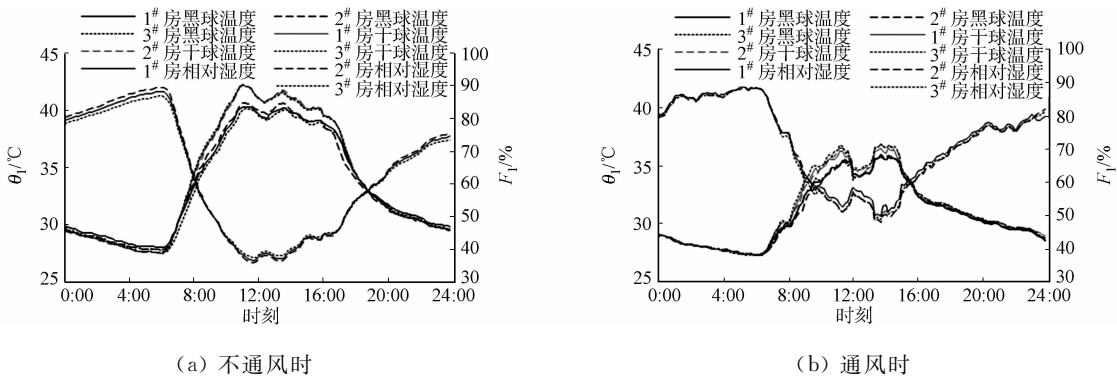


图 5 室内空气干球温度、相对湿度及黑球温度
Fig. 5 Indoor air dry-bulb temperature, relative humidity and black ball temperature

4.3 实验房有无开窗通风的对比测试与分析

在工况 3 测试期间,1[#] 实验房关闭门窗不通风,2[#] 实验房开启门窗通风,其对比测试的结果,如图 6(a)所示. 设置人体新陈代谢率为 $65\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,着衣量为 0.5 clo,室内不通风时风速为 $0.15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,计算通风与不通风的室内预测平均投票数(PMV)值,结果如图 6(b)所示.

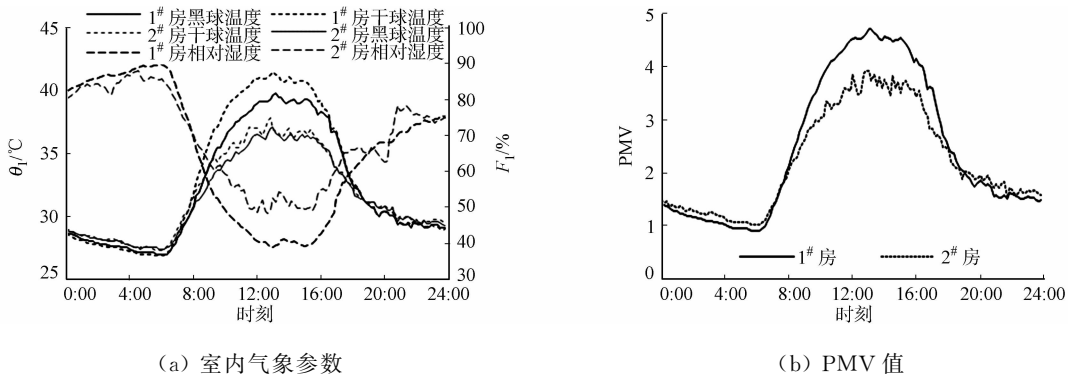


图 6 实验房有无开窗通风条件下室内气象参数及 PMV 值对比
Fig. 6 Comparison of indoor parameters and PMV value in test rooms with and without ventilation

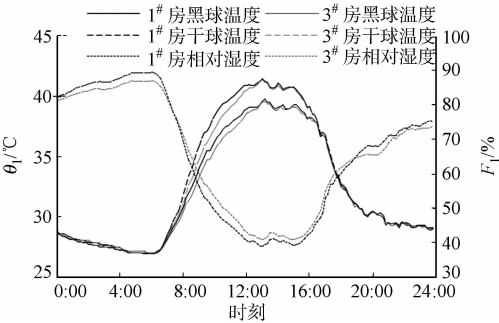
由图 6 可知:自 10:50 起,开窗通风房间内的黑球温度和空气干球温度的升温速度开始缓于无通风房间;自 10:00—15:30 两房间的干球温度温差稳定在 4°C 左右,最大时刻温差达 4.6°C ,黑球温度温差稳定在 2.7°C 左右,最大温差为 3.2°C ;无通风房间在 10:30—16:00 时,PMV 值始终大于 4.0,最高可达 4.7,室内极为炎热不舒适,此时段内开窗通风房间内的 PMV 值均不超过 4.0,平均 PMV 值为 3.6. 开窗通风房间相较于无通风房间,日间平均干球温度降低 2.7°C ,黑球温度降低 1.9°C ,PMV 值降低 0.6;夜间平均干球温度升高 0.5°C ,黑球温度升高 0.4°C ,PMV 值升高 0.1. 集装箱房通过采用开窗通风的方式,在日间可显著降低室内空气干球温度和壁面黑球温度,最大降低值分别为 4.6°C , 3.2°C .

由此可知:无自然通风的房间,白天在太阳辐射作用下外壁温度高,热量从外传向室内,使室内气温及内壁黑球温度高,室内非常酷热;而开窗通风可以带走室内热量积蓄,并降低围护结构内表面温度. 由于夏热冬暖地区夏季高温高湿,自然通风仅能改善室内酷热的热环境,不能使室内达到舒适的热环境.

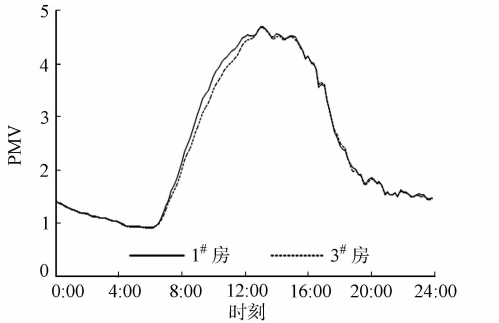
4.4 实验房有无遮阳的对比测试与分析

在工况 3 测试期间,1[#] 实验房无通风,无遮阳,3[#] 实验房无通风,东壁面单侧遮阳,其室内气象参数及 PMV 值的对比测试结果,如图 7 所示.

由图 7 可知:自 6:30 起,单侧遮阳房间内空气干球温度升温速度稍缓于无遮阳房间,温差最大值为 1.2°C ,出现在 9:10;之后温差逐渐减小,12:30 以后,温差基本稳定在 0.1°C 左右,16:30 后基本不再出现温差;在 8:00—18:30 时,室内空气干球温度明显高于室外空气干球温度,最大温差为 6.6°C ,出现在 11:50;采用东侧单侧遮阳,室内空气温度最高可降低 0.4°C ,黑球温度最高可降低 0.3°C ,PMV 值降低最大值为 0.3;东侧单侧遮阳对集装箱房的降温作用体现在上午时段,空气干球温度平均降低 0.8°C ,



(a) 室内气象参数



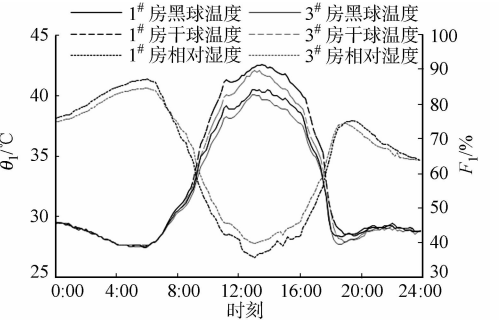
(b) PMV 值

图 7 实验房单侧遮阳与不遮阳室内气象参数及 PMV 值对比

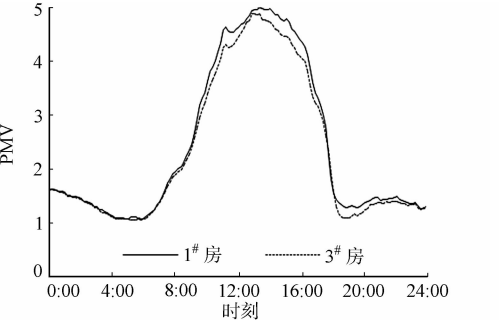
Fig. 7 Comparison of indoor parameters and PMV value in test rooms with one side shading and without shading

黑球温度平均降低 0.6℃;整个昼间时段(7:00—19:00)黑球温度平均降低 0.3℃,干球温度平均降低 0.4℃;在下午及夜晚,采用东侧单侧遮阳对集装箱室内温度几乎无影响。

在工况 4 测试期间,1# 实验房无通风,无遮阳,3# 实验房无通风,东西壁面双侧遮阳,其室内气象参数及 PMV 值的对比测试结果,如图 8 所示。



(a) 室内气象参数



(b) PMV 值

图 8 实验房双侧遮阳与无遮阳室内气象参数及 PMV 值对比

Fig. 8 Comparison of indoor parameters and PMV value in test rooms with two sides shading and without shading

由图 8 可知:自 7:10 起,遮阳实验房内空气升温速度稍缓于参照实验房,随后遮阳房间的温度持续低于无遮阳房间,平均温差为 0.8℃;在 16:30 时,温差出现最大值 1.8℃;在 17:40 时,室外环境温度骤升 3.1℃,两房间温差为 0℃,而后遮阳房间温度逐渐再度低于无遮阳房间;在 18:30 时,再度达到最大温差 1.8℃;随后两房间温差逐渐减小,直至 22:10 以后,基本不再出现温差;在 7:40—18:00,室内空气干球温度明显高于室外温度,最大温差为 7.5℃,出现在 11:10;采用双侧遮阳,室内空气干球温度最高可降低 1.76℃,黑球温度最高可降低 1℃,PMV 值降低最大值为 0.3;双侧遮阳对集装箱降温的作用明显体现在昼间太阳辐射较强的时间,空气干球温度平均降低 0.8℃,黑球温度平均降低 0.8℃,PMV 值平均降低 0.2。

由上述对比实测可知:集装箱双侧遮阳比单侧遮阳降温效果好,东西向双侧遮阳可实现全天一定程度温降,而单侧遮阳只能实现半天一定程度温降.由于实验仅在东西侧外墙做遮阳处理,屋面及南侧外墙仍受到较强的太阳辐射的直接作用,南墙和屋面较高的表面温度通过导热、换热,以及长波辐射的形式传递至室内,给室内带来大量的热负荷;在门窗关闭状态下,室内热量积蓄,难以散去,导致东西侧外墙遮阳的情况下室内仍然非常酷热。

5 结论

1) 在夏热冬暖地区,夏季集装箱房采用开窗通风,可比不通风时房间室内空气干球温度降低 3℃左右,最高可降低 4.6℃.降温后,集装箱房白天室内 PMV 值在 3.0 左右,仍然十分酷热,有必要采取

其他降温措施.

2) 采用外墙单侧遮阳或双侧遮阳,可稍缓解夏季集装箱房室内高温,但降温效果并不显著. 双侧遮阳时,室内平均气温降低 0.8°C ,最高降低 1.8°C . 降温后,集装箱房白天室内 PMV 值高达 3.4 左右,不能满足人体的舒适性要求,也需结合其他降温方法方能使室内热环境达到舒适.

3) 从被动式建筑的角度出发,改善集装箱房室内热环境还可在以下几个方面进行探讨:屋面通风式遮阳、屋面水池、屋面绿化、表面铺设多孔材料或刷隔热涂料等.

参考文献:

- [1] 张玉津. 集装箱式活动房围护结构的保温设计[J]. 集装箱化, 2008, 19(8): 27-29. DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-5339. 2008. 08. 008.
- [2] 阚安康, 韩厚德, 纪珏. 活动房热舒适性的影响因素及评价指标[C]// 第九届海峡两岸制冷空调技术交流会. 上海: [出版者不详], 2009: 54-58.
- [3] 梁志滔, 张小英. 自然通风条件下轻钢活动板房热环境计算研究[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(9): 44-48. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-702X. 2009. 09. 013.
- [4] 张玉津, 吉秀峰, 王文达. 严寒地区集装箱式活动房的热工性能[J]. 集装箱化, 2009, 20(4): 21-24. DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-5339. 2009. 04. 008.
- [5] 夏晨晨. 集装箱建筑及其性能研究初探[D]. 南京: 东南大学, 2013.
- [6] 夏珩. 轻型建筑围护系统的热物理设计: 新芽轻钢复合建造系统的项目案例[J]. 建筑学报, 2014(1): 106-111. DOI: 10. 3969/j. issn. 0529-1399. 2014. 01. 018.
- [7] 余术刚, 姚珊珊. 轻钢活动房屋热工性能分析[J]. 河南建材, 2015(4): 52-53. DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-9772. 2015. 04. 029.
- [8] 王克桓. 墙体垂直绿化对集装箱改造房热环境的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [9] 魏志远. 集装箱建筑内保温及箱体连接做法初探[J]. 城市建筑, 2016(35): 194-195. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-0232. 2016. 35. 180.
- [10] BRANDT K A. Plugging in: Reinterpreting the traditional housing archetype within a community using shipping containers[D]. Greensboro: University of North Carolina at Greensboro, 2011.
- [11] DUMAS A, TRANCOSI M, MADONIA M, *et al*. Zero emission temporary habitation: Analysis of a passive container housing system acclimatized by geothermal water[C]// ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Huston: [s. n.], 2012: 1701-1717. DOI: 10. 1115/IMECE2012-87666.
- [12] ELRAYIES G M. Thermal performance assessment of shipping container architecture in hot and humid climates [J]. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 2017, 7(4): 1114-1126. DOI: 10. 18517/ijaseit. 7. 4. 2235.
- [13] 冉茂宇, 刘晓迅, 胡深, 等. 厦门住宅夏季室内自然通风热环境实测与评价[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 438-442. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2011. 04. 0438.
- [14] 胡达明. 福建省夏热冬暖地区建筑夏季自然通风的分析及探讨[J]. 福建建设科技, 2008(3): 96-98.
- [15] 付衡, 龚延风, 余效恩, 等. 夏热冬冷地区外墙遮阳对建筑热环境与空调能耗的影响[J]. 建筑技术, 2012, 43(1): 67-70. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-4726. 2012. 01. 020.
- [16] 冯林东. 适宜夏热冬暖地区的建筑遮阳技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)