

文章编号:1000-582X(2009)09-0992-05

屋顶容器式轻型绿化热工性能分析

唐鸣放¹, 郑开丽², 严永红¹, 柯思征²

(1. 重庆大学 教育部“山地城镇建设与新技术”重点实验室, 重庆 400030;

2. 厦门中卉生物工程有限公司, 福建 厦门 361005)

摘要:通过 2008 年夏季在厦门进行的室内空调环境下屋顶有、无容器式绿化的热工参数对比测试, 得到主要结果: 采用容器式轻型绿化的屋顶, 内表面温度与室内空气温度相差在 1.5 °C 左右, 热流在 5 W/m² 左右, 附加当量热阻大于 1.0 m² · K/W。当容器式轻型绿化应用于夏热冬暖地区的建筑节能工程时, 可达到屋顶节能要求。

关键词:屋顶绿化; 节能; 容器式轻型绿化; 热工性能

中图分类号: TU111

文献标志码: A

Study on thermal performance of vessel type green roof

TANG Ming-fang¹, ZHENG Kai-li¹, YAN Yong-hong¹, KE Si-zheng²

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area,

Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Xiamen Zhonghui Ltd. Co., Xiamen 361005, Fujian, P. R. China)

Abstract: The thermal parameter measurements was carried out for vessel type green roof and bare roof in the air-conditioned indoor environment in summer 2008 in Xiamen, China. The results show that temperature difference between internal surface of green roof and indoor air is about 1.5 °C, and the heat flow from green roof is about 5.0 W/m², the additional equivalent thermal resistance of vessel type green is larger than 1.0 m² · K/W.

Key words: green roof; energy efficiency; vessel type green; thermal performance

为适应城市大量轻荷载建筑屋顶生态化需求, 屋顶绿化出现了轻型化技术产品。这类轻型绿化普遍采用景天科耐旱植物和轻薄种植基质, 在南方湿热地区利用丰富的天然降雨资源就能自生自繁, 具有荷载轻、造价低、管理简便, 基本无须浇水、施肥、修剪、除草等优点^[1-3]。因此这类屋顶绿化就像一般的建筑隔热材料, 一旦建成就具有持续的生态隔热效果, 适用于几乎所有的平屋顶。

目前适应市场化开发的有一次成坪技术和容器式模块技术^[4-6], 其中容器式轻型绿化技术是一种绿

化集成技术, 普遍采用 PVC 塑料制成集排水、渗透、隔离等功能为一体的定型容器模块, 内盛轻薄基质, 种植景天科植物, 在苗圃养护成型后移动到屋顶进行拼接, 完成屋顶整体绿化。这种技术具有屋顶现场施工方便、快捷、清洁等优点, 并且与屋顶结构独立、自成一体, 不会对屋顶防水产生不利影响。因此这种轻型绿化技术产品特别适用于南方城市既有建筑屋顶生态化节能改造。当这些轻型绿化技术应用于建筑节能工程时, 其节能效率评价成为需要解决的问题。

收稿日期: 2009-04-08

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ01A02-02-05, 2006BAJ04B05-1, 2006BAJ02A09)

作者简介: 唐鸣放(1957-), 女, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事建筑节能与热环境方向的研究, (Tel)023-65120704; (E-mail)tmf@cqu.edu.cn.

近年来,国内外在屋顶绿化隔热方面的研究,多数是针对具体的绿化工程实例,通过现场热工测量,评价隔热效果^[7-10],或用测量参数建立数学模型评估节能效率^[11-15]。这些研究都是针对具体的绿化形式,所依据的测量参数来自实际建筑室内环境非控制状态,不具可比性。下面针对容器式轻型绿化形式,在室内环境空调控制状态下进行实际气候下的节能测试和分析,为节能工程应用提供依据。

1 实验内容和方法

容器模块的结构可以有多种设计,实验中采用的塑料容器外型尺寸为 $0.5\text{ m}\times 0.4\text{ m}\times 0.1\text{ m}$,构造见图1所示。容器盒的底部为十字形排水槽,带有小孔的透水板安装固定在排水槽上,并在透水板上铺过滤棉,然后放入基质、种植植物。下雨时,雨水被种植基质吸收,多余雨水由过滤棉渗入到透水板,通过透水板上的小孔流入排水槽,保护植物根系不受雨水浸泡,同时也避免基质养分流失。模块拼接时,排水槽由副件固定连接,形成整个屋面排水网,可快速排走暴雨,不会产生雨水滞留导致屋顶渗漏。绿化模块照片见图2所示。

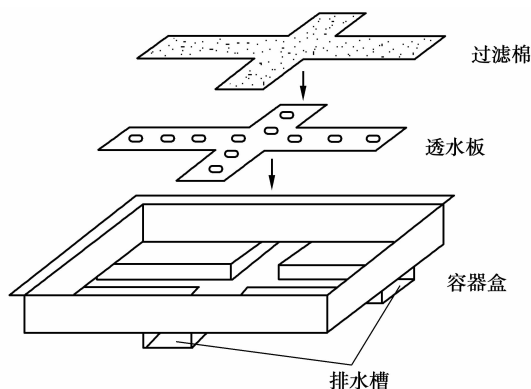


图1 容器构造



图2 容器式绿化模块

实验在夏热冬暖地区典型城市厦门进行。在厦门中卉生物工程有限公司内一排平房中,选择中间

相邻两间房间及其屋顶为实验对象,每间房间面积为 $2\text{ m}\times 3.8\text{ m}$,平面见图2。屋顶构造为钢筋混凝土屋面板和防水保护层,厚度为 120 mm 。房间西向外墙为砖墙,厚度为 130 mm ,外墙上装有塑料门窗,房间东向外墙与后面的挡土墙有封闭空气间层。两房间都安装了壁挂式空调和独立电表。1#房间空调参数:额定功率 910 W ,制冷功率 $2\ 500\text{ W}$;2#房间空调参数:额定功率 890 W ,制冷功率 $2\ 600\text{ W}$ 。实验时两房间屋顶,一个放置容器式景天科绿化,另一个为裸屋面作为对比。

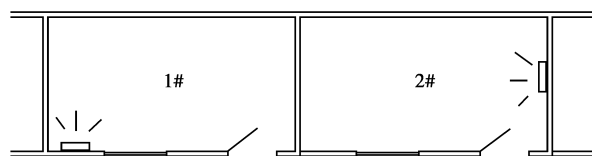


图2 测试房间平面

由于两房间的空调器不同,因此测量中采用将容器式绿化分别放置在两屋顶的方法。根据夏季天气有晴雨天气的特点,选取两个连晴天段分别布置两屋顶的状态,即在一个连晴天段1#房间屋顶放置容器式绿化、2#房间屋顶为裸屋顶,在另一个连晴天段1#房间屋顶为裸屋顶、2#房间屋顶放置容器式绿化。考虑到绿化隔热与基质的湿状态有关,因此实验选取的两个连晴天段都是以大雨天气后开始的,此时容器中基质的含湿状态达到饱和,容器绿化的起始状态相同。

测量内容为室内、外空气温度,屋顶内、外表面温度,屋顶内表面热流密度。测量仪器为Agilent数据采集仪34970A,热电偶,热流片。室外空气温度测点布置在屋顶上方 1 m 高的空气中,感应头用反射罩遮挡太阳辐射;室内空气温度测点布置在房间平面中间 1.2 m 高的位置;屋顶表面测点布置在屋顶表面中间位置。测量时间为:2008年7月25日-9月1日。

测试期间两实验房间的温度由空调控制在舒适范围,设置温度为 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测量数据自动采集间隔为 30 min 。如遇下雨降温,关闭空调,开窗通风。雨过天晴,关闭门窗,开启空调,每天记录空调电表读数。

2 实验结果及分析

2.1 热工参数

测量期间有3次大雨天气,第2次大雨天气为 $8.5\sim 8.6$,在第2次大雨后屋顶状态进行了对换,即把2#房间屋顶上的容器绿化移到了1#房间的屋

顶上。因此以第 2 次大雨天气为界将实验分成了 2 段,第 1 段为 7.25~8.7,晴天数相对少些;第 2 段为 8.9~8.31,晴天数相对多些。在 2 段实验中,各取 1 段代表性连晴天的测量数据进行热工分析。

在第 1 段实验代表性天气中,室外平均气温为 28.1℃,1#房间的屋顶无绿化,因此 1#房间屋顶内表面温度和热流都比有绿化的 2#房间屋顶大得多,见图 3、4。两屋顶测量参数的平均值见表 1。

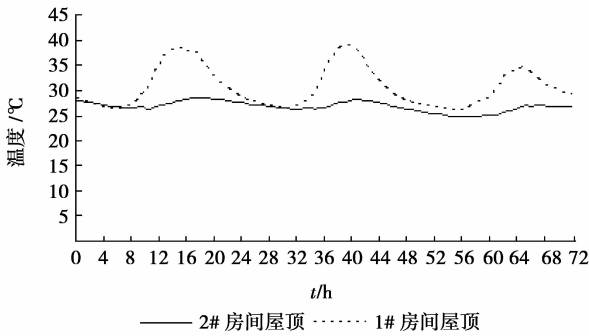


图 3 屋顶内表面温度(第 1 段实验)

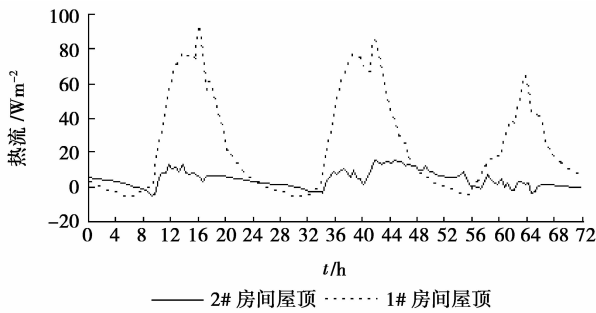


图 4 屋顶内表面热流(第 1 段实验)

表 1 测量参数平均值(第 1 段实验)

房间	室内气温/℃	内表面温度/℃	外表面温度/℃	内表面热流/(Wm ⁻² K ⁻¹)
1#	26.8	30.6	32.6	23.0
2#	25.5	26.9	27.7	4.3

在第 2 段实验代表性天气中,室外平均气温为 29.2℃,1#房间的屋顶有绿化,因此 1#房间屋顶内表面温度和热流都比无绿化的 2#房间屋顶小得多,见图 5、6。两屋顶测量参数的平均值见表 2。

表 2 测量参数平均值(第 2 段实验)

房间	室内气温/℃	内表面温度/℃	外表面温度/℃	内表面热流/(Wm ⁻² K ⁻¹)
1#	25.6	27.2	27.8	4.6
2#	23.2	31.3	33.5	34.2

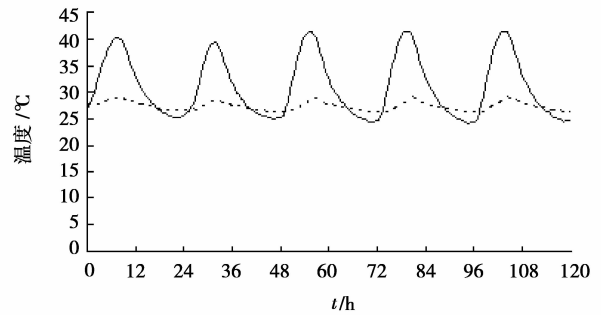


图 5 屋顶内表面温度(第 2 段实验)

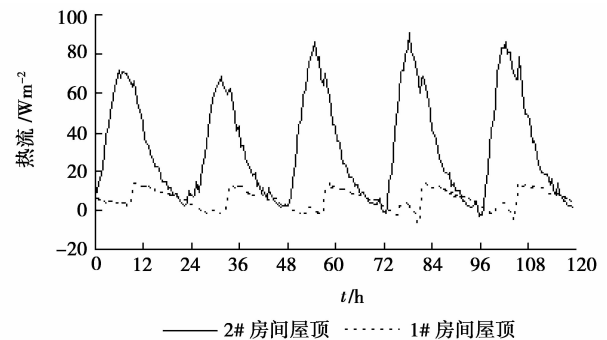


图 6 屋顶内表面热流(第 2 段实验)

从上面图表可以看出,屋顶有、无绿化对屋顶隔热的两个重要的热工参数,即屋顶内表面温度和热流影响很大。图中显示,在室内空气温度保持比较平稳的情况下,有绿化屋顶内表面温度和热流变化很小,而无绿化屋顶则随气候变化很大。由表 1、2 所列数据进行如下分析:

从同一时间段两屋顶比较来看,在第 1 段实验中,有绿化屋顶的房间平均温度比无绿化屋顶的房间平均温度低 1.3℃,说明有绿化屋顶内外温差大于无绿化屋顶,但有绿化屋顶的平均热流却只有无绿化屋顶的 1/5,说明绿化的隔热效率达到了 80%;在第 2 段实验中,有绿化屋顶的室内空气平均温度比无绿化屋顶高 2.4℃,但有绿化屋顶的内表面平均温度却比无绿化屋顶低 4.1℃,说明绿化对改善热工性能差的屋顶的室内热环境效果非常显著。

从同一屋顶在有、无绿化两段时间比较来看,1#房间的屋顶,在有绿化时的室内外温差大于无绿化时,但有绿化时屋顶的平均热流却只有无绿化时的 1/5;2#房间的屋顶,在有绿化时的室内温度高于无绿化时,但有绿化时屋顶内表面平均温度却比无绿化时低 4.4℃。因此实验结果表明,对于没有隔热层的钢筋混凝土屋顶,在室内空调环境下,放置绿化后内表面平均温度降低 4℃以上,屋顶隔热效率达到 80%。

2.2 空调耗电量

在两段实验中,记录了两房间每日空调用电量。在第1段实验的连续4 d(8.2~8.6)中,2#房间(屋顶有绿化)比1#房间(屋顶无绿化)少用电3.2 kWh;在第2段实验的连晴23 d(8.9~9.1)中,1#房间(屋顶有绿化)比2#房间(屋顶无绿化)少用电31.7 kWh。由于2#房间室内气温比1#房间低1℃左右,而两房间的空调能效比相近,因此可以估计屋顶绿化后在使用空调期间平均每日房间节电1 kWh左右。

3 屋顶绿化当量热阻

由于屋顶内表面温度和热流是测量期间室外气候和室内温度作用的反映,因此只能在有对比的情况下才能显出屋顶绿化的热工性能,离开对比时,通常采用当量热阻来评价。

在建筑节能工程中,围护结构的作用是阻隔热量传递,在稳定传热条件下,热阻的大小为围护结构两侧温差除以热流,在周期传热条件下,温度和热流测量数据取平均值计算。这样就把测量数据中的气候影响剥离出来,反映出热工性能。一般围护结构热阻采用围护结构两侧表面温度差除以热流的方法计算^[16],即

$$R = \frac{\overline{t_{se}} - \overline{t_{si}}}{\overline{q}}, \quad (1)$$

式中: R 为围护结构热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; $\overline{t_{se}}$ 为围护结构外表面平均温度, $^{\circ}\text{C}$; $\overline{t_{si}}$ 为围护结构内表面平均温度, $^{\circ}\text{C}$; \overline{q} 为围护结构内表面平均热流, W/m^2 。

对于屋顶绿化,采用上面式(1)计算当量热阻时,难以确定外表面温度。人们通常取绿化植物下面的土层表面温度作为计算的外表面温度^[8],这其实是忽略了绿化植物的作用,用这种方法计算出来的热阻低估了屋顶绿化的隔热能力。当量热阻的意义应该是把屋顶绿化的隔热效果与同气候环境下的保温隔热屋顶相等,然后取保温隔热屋顶的热阻作为绿化屋顶的热阻。因此在计算公式(1)中,室外参数采用室外综合温度比较合理,这时计算出来的热阻包括了外表面换热阻,将其扣除即为屋顶绿化当量热阻。即采用下式计算

$$R = \frac{\overline{t_{se}} - \overline{t_{si}}}{\overline{q}} - R_e, \quad (2)$$

式中: $\overline{t_{se}}$ 为室外综合温度, $^{\circ}\text{C}$; R_e 为外表面换热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$,一般屋顶取 $0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

虽然室外综合温度与屋顶表面材料有关,但在计算当量热阻时,应该认为有绿化屋顶和一般保温

隔热屋顶是在同样的室外环境下,应该采用同样的室外计算参数,这样才能真正把绿化的表面特性、冠层和土层的综合作用当量到热阻中。因此室外参数应该按一般屋顶热工计算取值。在实验中,无绿化屋面的室外综合温度略高于外表面温度,取裸屋面温度代替室外综合温度进行绿化屋顶当量热阻计算。

按照上面讨论的方法,计算出1#房间屋顶在有、无绿化时的热阻分别为 1.32 和 $0.09 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$,2#房间屋顶在有、无绿化时的热阻分别为 1.28 和 $0.06 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。对于实验中的钢筋混凝土屋顶,取其导热系数为 $1.74 \text{ m} \cdot \text{K}/\text{W}$,可计算出屋顶热阻为 $0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$,与实验测量得到的结果接近。由此可以估计出容器绿化放在屋顶上的作用相当于增加了热阻 $1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 左右。

实验中的屋顶为没有隔热层的钢筋混凝土屋顶,热工性能很差,放置容器式绿化后有高达80%的隔热效率。当屋顶结构的保温隔热性能提高后,使用容器式绿化的隔热效率会降低,但在同样的室内、外环境下,屋顶内表面温度和热流不会高于实验中得到的数值,即内表面温度与室内空气温度相差在 1.5°C 左右,热流在 $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 左右。

4 结 论

在厦门夏季气候条件下,屋顶放置容器式绿化后,内表面温度比室内空气温度高 1.5°C 左右,从屋顶进入室内的热流可控制在 $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 左右。

当容器式绿化应用于夏热冬暖地区的建筑节能工程时,附加当量热阻可取为 $1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。因此在既有民用建筑节能改造中,使用容器式绿化就能达到屋顶节能要求。

参考文献:

- [1] 赵定国. 平顶屋面绿化的好材料:佛甲草初考[J]. 上海农业学报,2001,17(4):58-59.
ZHAO DING-GUO. A good plant suitable for roof greening: preliminary investigation sedum lineare[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2001,17(4):58-59.
- [2] 赵玉婷,胡永红,张启翔. 屋顶绿化植物选择研究进展[J]. 山东林业科技,2004(2):27-29.
ZHAO YU-TING, HU YONG-HONG, ZHANG QI-XIANG. Development of research on selection of green roof plants [J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2004(2):27-29.
- [3] 赵定国. 屋顶绿化及轻型平屋顶绿化技术[J]. 中国建筑防水,2004(4):17-19.

- ZHAO DING-GUO. Roof greening and light weight flat roof greening technology [J]. *China Building Waterproofing*, 2004(4):17-19.
- [4] 张杰,胡永红,李海英,等. 一次成型轻型屋顶绿化技术[J]. *西北林学院学报*, 2007, 22(1):194-196.
- ZHANG JIE, HU YONG-HONG, LI HAI-YING, et al. Compounded technique of lightweight roof greening[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(1): 194-196.
- [5] 严永红,邓宏,唐鸣放. 回应西部湿热气候的模块式生态屋面[J]. *新建筑*, 2007(5):34-36.
- YAN YONG-HONG, DEN HONG, TANG MING-FANG. Research on modular eco-roof system responds to hot and humid weather of west China [J]. *New Architecture*, 2007(5):34-36.
- [6] 严永红,高蕾,方文. 绿屋面发展的新思路:节水模块式生态屋面系统[J]. *重庆建筑*, 2008(9):1-4.
- YAN YONG-HONG, GAO LEI, FANG WEN. New thought of green roof: the water-saving module type eco-roof system[J]. *Chongqing Architecture*, 2008(9): 1-4.
- [7] WONG N H, CHEN Y, ONG C L, et al. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment [J]. *Building and Environment*, 2003, 38(2):261-270.
- [8] WONG N H, CHEONG D K W, YAN H, et al. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore [J]. *Energy and Building*, 2003, 35(4): 353-364.
- [9] WONG N H, TAN P Y, CHEN Y. Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(1):25-54.
- [10] TANG M, YANG Z. Thermal characteristics of green roof in natural climate [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2007, 14(6):39-42.
- [11] THEODOSIOU T G. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique [J]. *Energy and Building*, 2003, 35(9): 909-917.
- [12] KUMAR R, KAUSHIK S C. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings [J]. *Building and Environment*, 2005, 40(11):1505-1511.
- [13] LAZZARIN R M, CASTELLOTTI F, BUSATO F. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof [J]. *Energy and Building*, 2005, 37(12): 1260-1267.
- [14] SANTAMOURIS M, PAVLOU C, DOUKAS P, et al. Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece [J]. *Energy*, 2007, 32(9):1781-1788.
- [15] 赵定国,薛伟成. 轻型屋顶绿化的降温效果[J]. *上海农业学报*, 2006(1):1-5.
- ZHAO DING-GUO, XUE WEI-CHENG. Effect of greening on light roofing on lowering temperature [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2006(1):1-5.
- [16] 中国建筑科学研究院. JGJ132-2001 采暖居住建筑节能检验标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.

(编辑 赵 静)