

屋顶绿化节能热工评价

唐鸣放, 郑澍奎, 杨真静

(重庆大学 教育部山地城镇建设与新技术重点实验室, 重庆 400045)

摘要:研究了屋顶绿化的节能热工评价方法,通过室内环境为空调控制和自然室温2种状态下的屋顶绿化节能热工对比测试,得到主要结果:在夏季空调期间,绿化屋顶热流减少70%左右,附加当量热阻为 $1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{k}/\text{w}$;自然室温环境下绿化屋顶热流方向与对比屋顶相反,绿化屋顶的冷却效率为111%。

关键词:屋顶绿化;节能;当量热阻

中图分类号:TU111.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)02-0087-04

Thermal Performance and Energy Analysis of Green Roof

TANG Ming-fang, ZHENG Shu-kui, YANG Zhen-jing

(Key Laboratory of New Technology for Construction of cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Energy consumption and thermal parameters of green roof and bare roof were measured in the air-conditioned and nature indoor environment in summer. It was found that the heat flow of green roof was reduced about 70%, and additional equivalent thermal resistance of green roof was about $1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ in the air-conditioned, cooling efficiency of green roof was about 111% in the nature condition.

Key words: green roof; energy efficiency; equivalent thermal resistance

屋顶绿化是适应南方地区湿热气候条件的生态节能措施,与常规的建筑节能措施相比,屋顶绿化不仅具有室内隔热降温的作用,还具有改善城市生态环境、缓解热岛效应等综合功能。此外,绿化材料的生产不消耗能源,并且可以重复和循环使用,绿化垃圾容易自然降解,因此屋顶绿化还具有全寿命周期节能环保的优点,是值得大力推广的地方节能技术。而近年来开发的轻型屋顶绿化技术^[1-3],种植荷载轻,管理粗放,应用范围更加广泛。

目前关于屋顶绿化隔热降温的评价研究主要采用实验测量方法。由于绿化植物与气候的关系密切,通常采用实际气候下的现场实验,并且室内环境多为自然状态(非空调控制)^[4-10]。也有在热气候风

洞实验室环境下进行模型实验的研究^[11-12]。在工程应用中,缺少以屋顶绿化实际节能效果测量为依据的节能评价和设计参考。以2007年夏季在上海进行的屋顶绿化节能热工实验为依据进行了分析和评价。

1 实验概况^[13]

实验中采用的轻型绿化为一种块状绿化产品,主要由种植盘、基质和植物组成。种植盘用粉煤灰和水泥混合压制成型,具有排水和保肥的作用。在种植盘内放置基质材料后,总厚度约为100 mm,湿重量达到 $100 \text{ kg}/\text{m}^2$,适用于一般荷载的屋顶。种植佛甲草后可直接放置在屋顶上,图1为这种绿化

收稿日期:2009-12-24

基金项目:国家自然科学基金项目(50978261);国家科技支撑计划课题(2006BAJ01A02-02-05)。

作者简介:唐鸣放(1957-),女,博士,教授,博士生导师,主要从事建筑节能与热环境研究,(E-mail)tmf@cqu.edu.cn。

在屋顶上的应用。

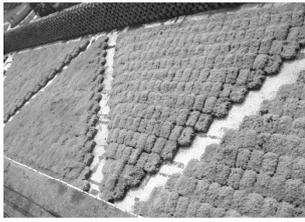


图 1 测试的屋顶绿化产品

实验在上海某绿化基地进行。实验屋顶的房间为相邻对比实验房(见图 2),每间面积约 20 m²,安装有同样型号的壁挂式空调和独立电表。屋顶构造为钢筋混凝土空心板加防水保护层,墙体为双面抹灰砖墙。实验时间为 2007 年 7—8 月,其中分为开启空调和关闭空调两段实验。测量内容为气候参数、热工参数和空调用电量。

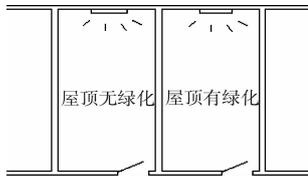


图 2 实验房及屋顶布置

2 实验结果分析

2.1 空调耗电量指标

在为期 1 个月的空调开启实验期间,室外气温日变化范围见图 3,2 房间的室内温度由空控制控制在 25℃左右,但每天绿化屋顶的房间都比对比屋顶的房间用电量少(见图 4)。1 个月期间,有、无绿化屋顶的房间所消耗的空调电量分别为 310.7 kWh 和 370.2 kWh,说明绿化屋顶减少了房间空调耗电量的 16%,平均每天节省电量约 2 kWh,单位面积屋顶绿化每天节省电量约 0.1 kWh 左右。

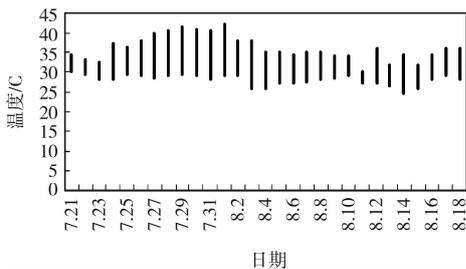


图 3 测试期间室外气温变化范围

2.2 节电量与气候相关性分析

比较图 3 和图 4,屋顶绿化节电量的大小与气候有很大关系。取 10 d(2007.8.7—2007.8.18)的节电量与气候参数进行相关性分析,得到屋顶绿化

节电量与太阳辐射强度的相关系数为 0.81(见图 5),与室外气温的相关系数为 0.70(见图 6),说明天气越热,屋顶绿化的节能效果越好。

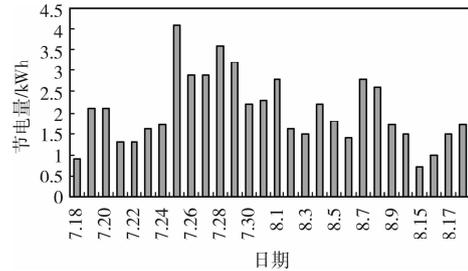


图 4 屋顶绿化每天节电量

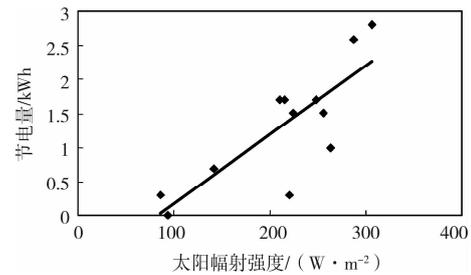


图 5 屋顶绿化节电量与太阳辐射的相关性

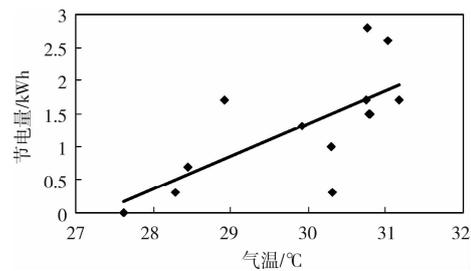


图 6 屋顶绿化节电量与气温的相关性

2.3 隔热效果分析

屋顶绿化隔热效果分为开启空调和关闭空调 2 种室内环境状况,分别取 2 段实验中连晴 4 d 的测量数据进行分析。

1) 室内空调状态

图 7 和图 8 为开启空调期间屋顶内表面温度和热流的逐时变化对比,表 1 为测量数据平均值。可见在室内环境空控制下,两房间温度比较接近,但两屋顶内表面温度和热流,不论是平均值还是波动幅度,差别都比较大。就平均值来说,对比屋顶内表面温度与室内气温相差 3.9℃,而绿化屋顶内表面温度与室内气温相差 1℃;在绿化屋顶室内温度比对比屋顶室内温度稍低的情况下,绿化屋顶内表面热流比对比屋顶减少了 73%。说明屋顶绿化能显著改善室内热环境、大幅减少能耗。

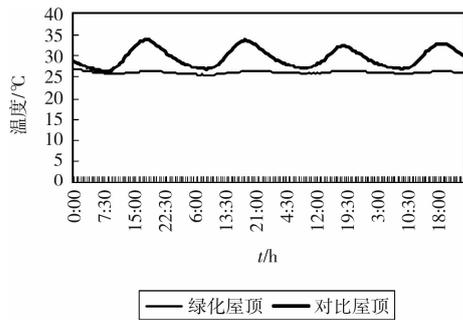


图 7 空调状态屋顶内表面温度

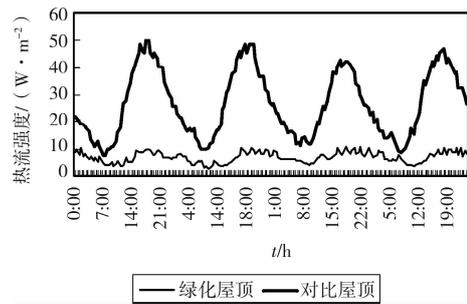


图 8 空调状态屋顶进入室内的热流

表 1 测量数据平均值(室内空调状态)

测量参数	室外空气温度/ °C	太阳辐射强度/ (W·m ⁻²)	室内空气温度/ °C	屋顶内表面温度/ °C	屋顶内表面热流/ (W·m ⁻²)	屋顶热流减少率/%
绿化屋顶	30.8	258.1	25.0	26.0	6.9	73
对比屋顶			25.4	29.3	26.2	

2) 室内自然状态

关闭空调,室内为自然状态,房间空气温度由围护结构各部分传热形成的热平衡温度。图 9 为自然状态 2 房间室内空气温度的逐时变化,屋顶内表面温度的变化与空气温度相似,图 10 为屋顶内表面热流的变化,表 2 为测量数据平均值。可见在自然状态,绿化屋顶的房间空气温度和内表面温度对比屋顶平均低 3.2°C 和 3.8°C,并且热流为负值,即绿化屋顶还要吸收由外墙传进室内的热量,冷却房间。

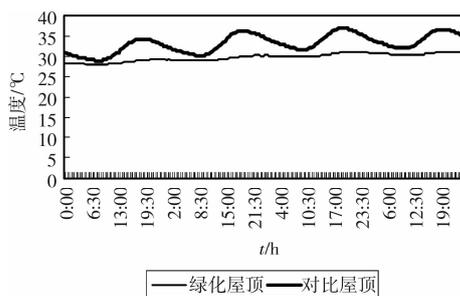


图 9 自然状态室内空气温度

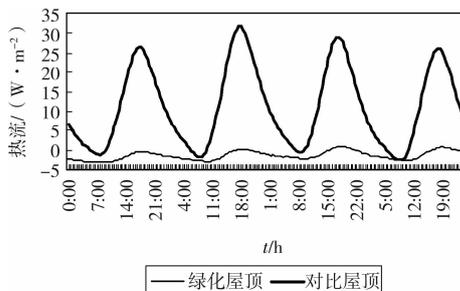


图 10 自然状态屋顶内表面热流

表 2 测量数据平均值(室内自然状态)

测量参数	室外空气温度/ °C	太阳辐射强度/ (W·m ⁻²)	室内空气温度/ °C	屋顶内表面温度/ °C	屋顶内表面热流/ (W·m ⁻²)
绿化屋顶	31.0	256.7	29.8	29.0	-1.3
对比屋顶			33.0	33.7	11.4

3 当量热阻计算

屋顶绿化的节能热工性能普遍采用当量热阻来评价。屋顶绿化的当量热阻就是与其等效的保温隔热屋顶热阻,因此采用测量数据计算时一般参照围护结构热阻现场测量方法。在现场测量评价中,围护结构热阻通常采用围护结构两侧表面温度差除以热流的方法计算^[14],即

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

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

采用上面(1)式计算绿化屋顶当量热阻时,内表面温度和热流可取测量值,外表面温度如何取值有待探讨。一些研究报道取绿化植物下面的土层表面温度作为计算的外表面温度^[15],这其实是忽略了绿化植物的作用,低估了屋顶绿化的隔热能力。当量热阻应该是把绿化屋顶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当量热阻,因此应该取保温隔热屋顶外表面温度来计算。由于实际测量是采取的对比实验,对比屋顶的热阻提高了即为保温隔热屋顶,因此保温隔热屋顶外表面温度可近似取无绿化的对比屋顶外表面温度测量数据,这样取值的合理性在于屋顶保温后外表面温度会稍有提高,热阻计算中取稍低的外表面温度值会使计算结果更可靠。

采用上述空调期间连晴 4 d 的测量数据计算,得到无绿化的对比屋顶热阻为 $0.2 m^2 \cdot K/W$,绿化屋顶当量热阻为 $1.2 m^2 \cdot K/W$,因此包括植物和土层

在内的绿化层的当量热阻为 $1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

4 屋顶绿化隔热评价讨论

采用保温隔热屋顶的热阻来评价绿化屋顶的热工性能是一种便于工程应用的简化方法,有一定的适用范围。保温隔热屋顶和绿化屋顶的热机理不同,两者在性能上有本质区别。

对于保温隔热屋顶,室内空调状态和室内自然状态的差别在于屋顶下面的温度不同,导致屋顶上下两侧的温差不同,不管哪种室内状态,室外综合温度总是高于室内空气温度。根据建筑材料和构件的传热理论,保温隔热屋顶的传热方向总是从室外传向室内,传热大小与屋顶上下两侧温差成正比。屋顶热工性能与室内状态无关,即不管室内是自然状态还是空调状态,用(1)式计算的热阻是相同的。

然而对于绿化屋顶,情况却不一样。在室内空调状态,可以找出一个保温隔热屋顶,使其隔热效果与绿化屋顶相同,这时保温隔热屋顶的热阻便是绿化屋顶的当量热阻;在室内自然状态,从上面的实验结果分析可看出,尽管室外综合温度高于室内空气温度,但绿化屋顶内表面的传热方向却是从室内传向屋顶,而不是从室外传向室内。这是任何保温隔热屋顶所无法做到的,这种现象用建筑材料和构件的保温隔热理论无法解释。这说明在不同的室内状态下,绿化屋顶的当量热工性能是不同的,室内自然状态和室内空调状态不能采用同一参数评价。

5 结语

1) 屋顶绿化是一种高效节能措施,应用在未采取保温隔热措施的屋顶上,绿化的节能效果相当于附加了 40mm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料或 200mm 厚的加气混凝土,基本上能够满足夏季屋顶节能要求。

2) 屋顶绿化的特性表现为在室内空调状态时为隔热,在室内自然状态时为吸热。屋顶绿化的隔热特性采用当量热阻评价时,其值可用(1)式计算,其中外表面温度取对比屋顶外表面温度测量值。

参考文献:

[1] 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.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] RENATO M. Lazzarin, Francesco Castellotti, Filippo Busato. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof[J]. Energy and Building, 2005 (37): 1260-1267.
- [5] 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, 22(1): 53-55.
- [6] 唐鸣放, 杨真静, 郑开丽. 屋顶绿化隔热等效热阻[J]. 重庆大学学报, 2007(5): 1-3.
- [7] 唐鸣放, 杨真静, 李莉. 自然状态草地式屋顶绿化隔热特性分析[J]. 暖通空调, 2007(3): 1-4.
- [8] 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: 1781-1788.
- [9] WONG NYUK HIEN, Tan Puay Yok, Chen Yu. Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate [J]. Building and Environment, 2007, 42: 25-54.
- [10] TANG MING-FANG, YANG ZHEN-JING, Thermal Characteristics of green roof in natural climate [J]. Journal of central south university of technology, 2007, 14: 39-42.
- [11] ONMURA S, MATSUMOTO M, Hokoi S. Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens [J]. Energy and Building, 2001, 33: 653-666.
- [12] 孟庆林, 张玉, 张磊. 热气候风洞内测定种植屋面当量热阻. [J]暖通空调, 2006(10): 111-113.
- [13] 赵定国, 薛伟成. 轻型屋顶绿化的节电效果[J]. 上海农业学报, 2008, 24(1): 99-101.
- [14] Thermal insulation-Building elements-In-site measurement of thermal resistance and thermal transmittance[S]. ISO 9896:1994(E).
- [15] WONG N H, CHEONG D K W, YAN H J, et al. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore [J]. Energy and Building, 2003, 35: 353-364.

(编辑 胡玲)