

绿化屋顶室内热环境研究

杨真静¹, 唐鸣放¹, 郑澍奎²

(1. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400045; 2. 西华大学 建筑与土木工程学院, 成都 610039)

摘要: 屋顶绿化作为一种生态的屋顶隔热手段已得到了广泛的认同, 以上海气候条件下轻型绿化屋顶为研究对象, 采用实测与计算分析相结合的方法, 用 PMV 指标比较室内空调状态下绿化屋顶与非绿化屋顶的室内热舒适性。结果表明, 绿化屋顶室内 PMV 平均值比无绿化屋顶低 0.2, 波动幅度仅为无绿化屋顶的 1/4, 并经计算得到绿化屋顶的等效保温屋顶, 进一步研究表明, 在较高的室内温度情况下, 绿化屋顶内表面温度将会低于等效保温屋顶。

关键词: 屋顶; 植物; 热舒适; PMV; 内表面温度

中图分类号: TU111 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)04-0080-05

Indoor Thermal Environment for Green Roof

YANG Zhen-jing¹, TANG Ming-kang¹, ZHENG Shu-kui²

(1. Faculty of Architecture and Urban Planning, ChongQing University, ChongQing 400045, P. R. China;

2. Department of Architecture and Civie Engineering, XiHua University, ChengDu 610039, P. R. China)

Abstract: Roof planting is widely recognized as a ecological thermal insulation for roof. A lightweight green roof in climatic conditions of shanghai was investigated as a case study by applying PMV index to calculate thermal comfort compared with that with traditional roof in air conditioning. It is found that the PMV value of green roof is 0.2 lower than that of traditional roof, while the fluctuating range of green roof was only 1/4 of that of traditional roof. And the equivalent thermal insulating roof of green roof was obtained by computing. Furthermore, it is shown that green roof has lower interior surface temperature than equivalent insulating roof in the condition of higher indoor temperature.

Key words: Roofs; vegetation; Thermal Comfort; PMV; Interior Surface Temperature

室内热环境一直以来就是人们对室内环境关注的焦点, 在夏季炎热地区屋顶层尤其重要^[1-3], 因为屋顶构件不同于建筑的其他构件, 其面积大, 受阳光照射时间长, 导致屋顶内表面温度持续高温, 单纯依靠空调设备对房间降温, 不仅消耗大量能源, 使本已严重的城市热岛效应愈演愈烈。

屋顶绿化作为一种生态节能措施已得到了广泛的认同, 它能有效改善城市环境, 降低屋顶内表面温度, 减少建筑能耗, 减少地表径流, 国内外在这方面也做了大量的研究^[4-10], 但大多数研究是基于建筑节能角度或是基于屋顶绿化对建筑外部热环境的改

善, 而作为建筑内部热环境指标之一的热舒适性往往被忽略了, 这对绿化屋顶室内热环境评价是不全面的, 另一方面, 现在新建建筑都进行了节能设计, 屋面因增加了保温层而热阻大增, 同样也有效降低了屋顶内表面温度, 但屋顶绿化由于其隔热机理极其复杂, 是传热、传湿、相变耦合的综合过程^[11], 与单纯传热的保温材料屋顶有较大区别, 与保温屋顶不是简单的等效热阻关系。因此, 该研究就以实测与计算分析相结合的方法来研究绿化屋顶与传统屋顶、等效保温材料屋顶在同样室外热气候下室内热环境的差异。

收稿日期: 2010-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978261)

作者简介: 杨真静(1975-), 女, 博士生, 主要从事建筑热工研究, (E-mail) young30331@163.com。

1 实验测试

该研究实测上海世源屋顶绿化有限公司屋顶,如图1,4间开间进深相同的一层建筑房间,选取位于中间的房间2、房间3进行绿化对比研究,房间3为绿化屋顶,采用加气混凝土种植槽种植景天科佛甲草,房间2、房间3墙体及屋顶构造如图2。

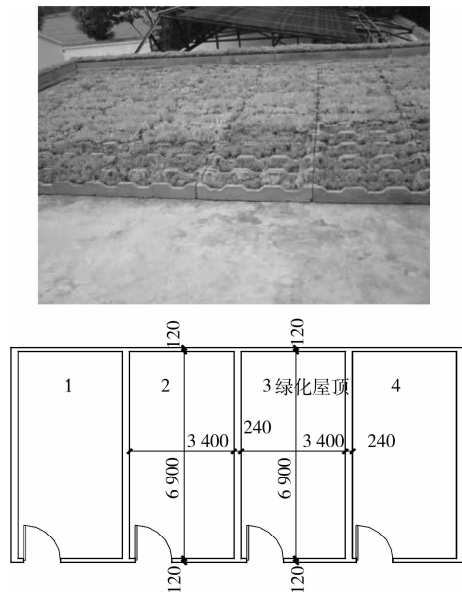
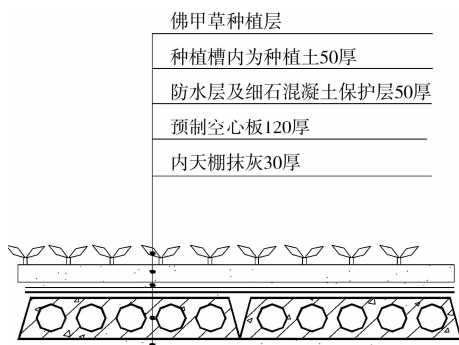
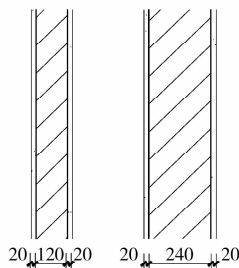


图1 实测模型平面



(a) 屋顶构造图(房间2无种植层)



(b) 房间2、房间3外纵墙(12砖墙内外各抹灰20厚)
内横墙(隔墙)(24砖墙内外各抹灰20厚)

图2 实测模型构造图

房间2和房间3均为空调房间,2个房间的空调的购置时间和型号完全相同。测量内容为室外空气

温度 t_e 、太阳辐射强度、有无绿化屋顶室内空气温度 t_a 、 t_{a0} ,有无绿化屋顶内表面温度 t_{si} 、 t_{sio} ,有无绿化屋顶热流 q 、 q_0 ,数据采集间隔时间为30 min。测量时间为2007年8月7日—8月28日,其中前面10 d 2房间开空调,室内温度设置相同;后面10 d 2房间关闭空调,室内温度为自然室温。

2 有无绿化屋顶室内热环境分析

室内热环境是由空气温度、相对湿度、气流速度和壁面平均辐射温度4种参数综合形成,以人体舒适感为标准进行评价的。人体与周围环境之间保持热平衡,是人舒适感的首要条件,人与环境之间的热平衡关系由下式表示:

$$\Delta q = q_m \pm q_c \pm q_r - q_e - q_w \quad (1)$$

式中, Δq 为人体得失热量,J; q_m 为人体新陈代谢产生的热量,J; q_c 为人体与周围空气的对流换热量,J; q_r 为人体与周围表面辐射换热量,J; q_e 为人体蒸发散热量,J; q_w 为人体做功消耗的热量,J。

$\Delta q > 0$ 时,体温上升,人感觉热; $\Delta q < 0$ 时,体温下降,人感觉冷。在夏季,要获得好的热舒适感就必须控制人体的换热量。控制室内空气温度常常作为最简单、最方便的手段,但却不完善,因人体热感觉是前述4种因素的综合,如在相同的空气温度下,壁面温度由于对人体的辐射热也会带来不适感,因此,在该实验中选取了最直接的屋顶内表面温度和综合的热舒适度来比较其室内热环境。

在开启空调的10 d测试期间,选取其中连晴4 d的测试数据来分析2个房间室内热环境的差别。

2.1 屋顶内表面温度

所选取测试的4 d时间连晴无雨,平均室外气温为30.8℃,平均太阳辐射为256.7 W/m²,植物生长良好,房间2无绿化屋顶和房间3绿化屋顶的室内平均温度分别为25.0℃和25.4℃,均控制在舒适范围,2个测试房间除屋顶之外的围护结构工况相当,则对室内热环境的影响差别主要来源于屋顶工况的不同导致屋顶内表面温度的差异,结果表明无绿化屋顶内表面温度呈较大的周期波动(图3),最高温每天均出现在下午18:00左右,最高值为33.6℃,平均值为29.3℃,已经超过了舒适范围,温度波动达7.6℃,而绿化屋顶内表面温度相对稳定,最高值为26.9℃,平均值为26℃,波动仅仅只有1.6℃,绿化屋顶将无绿化屋顶的内表面平均温度降低了3℃,波动值降低达80%。

进入2测试房间的热负荷差异来自于屋顶,2对比屋顶的热流从图4中可以看出,进入绿化屋顶室内

的热流明显低于无绿化屋顶,且没有大的峰值和低谷值,平均热流密度为 6.94 W/m^2 ,无绿化屋顶传入室内的热流密度为绿化屋顶的 3.78 倍。而室内空气温度 2 测试房间基本相同,可见无绿化房间空调耗了更多的能来消解这部分热量,也有研究表明有绿化屋顶的节电效果能达到 $0.1066 \text{ kWh}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 。^[12]

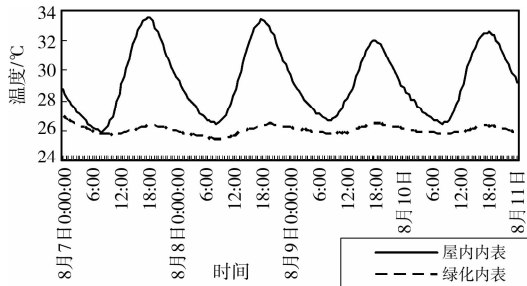


图 3 有无绿化屋顶内表面温度

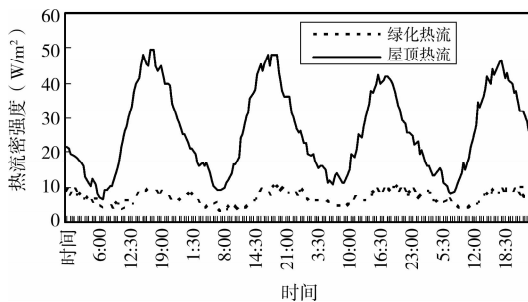


图 4 有无绿化屋顶热流

2.2 室内热舒适评价

2 个测试房间因为屋顶工况的不同,导致室内舒适性指标会有较大差异,评价室内热环境的指标很多,研究采用 Fanger 教授的热舒适方程作为计算模型,因为 PMV 指标(Predicted Mean Vote)是至今最全面的热环境评价指标,已被编入国际标准 ISO 7730^[13],中国现行的《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019-2003)也明确室内的热舒适性按 PMV 指标来确定^[14],PMV 指标综合了 4 个室内气候参数与 2 个人体参数,室内气候参数为室内空气温度、湿度、空气流速,内表面辐射温度、人体参数为人体新陈代谢率和服装热阻,计算式如下:

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \{ (M - W) - \\ & 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M - W - P_a)] - \\ & 0.42 \times [(M - W - 58.15) - 1.7 \times 10^{-5} M \\ & (5867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a)] - 0.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times \\ & [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: M 为人体新陈代谢率, W/m^2 ; W 为外做功,一般取值为 0; P_a 为水蒸汽分压力, Pa ; t_a 为室内空气温度, $^{\circ}\text{C}$; f_{cl} 为穿衣服面积与体表面积的比值; 该值

通过服装热阻计算所得; h_c 为对流放热系数, $\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, 由室内温度和服装热阻计算而得; \bar{t}_r 为平均辐射温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

采用 PMV 来评价绿化屋顶与无绿化屋顶的室内热环境时,室内空气温度取各房间的实测值,平均辐射温度取室内各表面温度的平均值。其中屋顶内表面温度取实测值,内墙和地面温度近似取为室内空气温度,外墙内表面温度根据室内空气温度和室外气候参数测量数据计算得到。公式(2)中的其它参数根据国际标准 ISO 7730(第 2 版,1994-12-15)^[13],结合试验测试取值如表 1:

表 1 计算参数

空气流速 $V_{ar}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	服装热阻 I_{cl}/clo	空气相对湿度	新陈代谢率 $M/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
取值 0.3	0.5	0.6	70

注: $1\text{clo} = 0.155 \text{ W/m}^2$, M 取值按长时间坐着工作的状态。

通过公式(2)的动态计算,得到有无绿化屋顶室内舒适性 PMV 值,绿化屋顶室内 PMV 平均值为 0.05,无绿化屋顶平均值为 0.24,从平均值来看,均在舒适范围内,但从 1 d PMV 值变化曲线(图 5)可以看出,无绿化屋顶的室内 PMV 值有较大波动,从每日中午开始,随着室外温度的升高,PMV 值逐渐走高,到 20:00 达到峰值为 0.52,之后逐步降低,最大振幅为 0.29,绿化屋顶室内 PMV 值全天比较平稳,波动范围很小,在平均值的上下波动,最大振幅为 0.07,仅为无绿化屋顶的 1/4。表明尽管两个测试房间室内空气温度比较一致,但由于无绿化屋顶的烘烤导致人体不均匀受热,人的舒适度变化也是比较明显的。

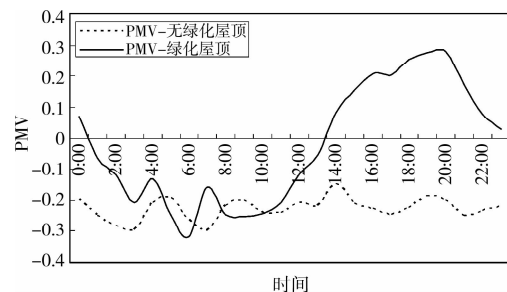


图 5 有无绿化屋面室内 PMV 曲线

3 绿化屋顶的等效屋顶模拟

3.1 等效屋顶的建立

仍以上面分析的连晴 4 d 的测量数据为依据,将屋顶的传热状态看成是周期传热。对于无绿化的屋顶,根据已测得的热流与屋顶内外表面温度,由公

式(3)得到屋顶热阻为 $0.20 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$,这与实际由图2(a)屋面构造得到热阻也大致相当。

$$R = \frac{\overline{t_{se}} - \overline{t_{si}}}{q} \quad (3)$$

式中: R 为屋顶热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; $\overline{t_{se}}$ 为屋顶外表面温度平均值, $^{\circ}\text{C}$; $\overline{t_{si}}$ 为屋顶内表面温度平均值, $^{\circ}\text{C}$; \overline{q} 为屋顶热流平均值, W/m^2 。

上面的屋顶热阻计算式(3)也可以写成以室外综合温度为室外计算参数的形式,即:

$$R = \frac{\overline{t_{sa}} - \overline{t_{si}}}{q} - R_e \quad (4)$$

式中: $\overline{t_{sa}}$ 为室外综合温度平均值, $^{\circ}\text{C}$; R_e 为外表面换热阻,按热工设计规范,取 $R_e = 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

当屋顶上增加了保温层,并使屋顶的隔热效果(即内表面温度、热流)与绿化屋顶相同时,便得到了等效屋顶。因此等效屋顶的热阻用(4)式计算时,其中的内表面温度和热流应取绿化屋顶的测量值,而室外综合温度不变,与没有增加保温层时的屋顶相同,可以利用(3)式和(4)式得出屋顶室外综合温度。

采用上面方法计算得到等效屋顶的热阻为 $1.33 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$,扣除屋顶本身部分,屋顶上增加的保温层的热阻为 $1.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

选用目前节能设计中常采用的保温材料膨胀聚苯板^[15],其材料参数为:干密度 $\rho = 30 \text{ kg}/\text{m}^3$;导热系数 $\lambda = 0.042 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;比热 $c = 1.38 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,厚度为 0.055 m ,因此绿化屋顶的等效保温材料屋顶得以建立。

3.2 屋顶内表面温度比较

仍以开启空调期间的室内温度和室外气候参数为边界条件,采用有限差分法计算得到等效屋顶的动态内表面温度计算值 t_{si}' ,选取连晴4日的日平均值进行比较,见表2。可见等效屋顶内表面温度平均值与绿化屋顶基本相当,因此在这种情况下用等效屋顶代替绿化屋顶是合理的。

表2 屋顶内表面平均温度及气候参数

天数	室外气温/ $^{\circ}\text{C}$	内表面温度/ $^{\circ}\text{C}$		
		无绿化屋顶	绿化屋顶	等效屋顶
第1 d	30.8	29.3	26.1	26.2
第2 d	31.0	29.5	25.9	26.2
第3 d	30.8	29.1	26.1	26.2
第4 d	30.8	29.2	26.0	26.1
平均	30.8	29.3	26.0	26.2

3.3 屋顶内表面温度与室内温度的关系

等效屋顶与绿化屋顶就室内热环境而言,因其

围护结构其他部位工况都相同,差别仅在于屋顶做法的不同,因此最直接的差异表现在屋顶内表面温度上。下面保持室外气候条件不变,改变室内温度来观察2种屋顶内表面温度变化的异同。

对于等效屋顶,以开启空调期间的连晴4日的室外气候参数为边界条件,通过设置不同的室内温度来分别计算内表面温度,取平均值得到等效屋顶内表面温度与室内温度的关系。对于绿化屋顶,在房间开启和关闭空调的2段测量期间室内温度不同,因此可以在2段测量期间各选取室外气候条件相近的连晴4日的室内温度和内表面温度平均值。所选取的2段测量期间的室外平均气温分别为 30.8°C 和 31.0°C ,平均太阳辐射强度分别为 $258 \text{ W}/\text{m}^2$ 和 $257 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

把2种屋顶的内表面温度与室内温度的关系用图6表示,可以看出,当室内温度在 25°C 的时候,绿化屋顶与等效屋顶内表面温度是相当的,但当室内温度升高时,绿化屋顶与等效屋顶内表面温度都开始升高,但升高得并不同步,等效屋顶内表面温度升高的速度快于绿化屋顶,因此当室内温度从 25°C 提高到 28°C 时,绿化屋顶的内表面温度就会低于等效屋顶,说明这时绿化屋顶对室内热环境的效果好于等效屋顶,这也说明等效屋顶不能完全等效于绿化屋顶,即绿化屋顶对室内热环境的效果不能完全用保温屋顶代替。

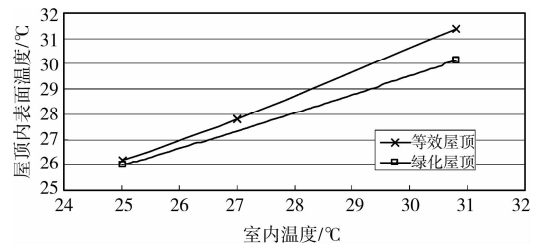


图6 不同室内温度的屋顶内表面温度变化

4 结论

1)对于建筑顶层房间,即使都采用空调控制室温使2对比房间室内空气温度基本一致,但绿化屋顶与非绿化屋顶在室内热舒适性指标上也会很大的不同,绿化屋顶室内PMV平均值比无绿化屋顶低0.2,波动幅度仅为无绿化屋顶的1/4,表明绿化屋顶室内热舒适性更好。

2)在室内温度为 25°C 时得到的绿化屋顶的等效屋顶,当室内温度高于 25°C 以后将不再与绿化屋顶等效,数据表明绿化屋顶的室内热环境效果好于等效屋顶,且随着室内温度的增加,绿化屋顶的这种

优势表现得更加明显。

参考文献:

- [1] 罗明智,李百战,徐小林. 重庆夏季教室热环境研究[J]. 重庆建筑大学学报,2005,27(1):88-91.
LUO MING-ZHI, LI BAI-ZHAN, XU XIAO-LIN. Research on classroom thermal environment during the summer in chongqing[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005,27(1):88-91.
- [2] 钟珂,周磊,杨柳. 顶层房间夏季室内热环境评价指标[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2004,36(1):51-54.
ZHONG KE, ZHOU LEI, YANG LIU. Indexes for indoor thermal environment of top-floor rooms with a symmetrical radiant field in summer[J]. J Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2004, 36(1):51-54.
- [3] 陈良,郑洁,汪红,等. 重庆夏季办公室室内环境研究[J]. 重庆建筑,2006(05):9-13.
CHEN LIANG, ZHEN JIE, WANG HONG, et al. Study on office indoor environment in chongqing [J]. Chongqing Architecture, 2006(05):9-13.
- [4] 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.
ZHAO DING-GUO, XUE WEI-CHENG. Effect of greening on light roofing on lowering temperature[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2006,22(1): 53-55.
- [5] 殷丽峰,李树华. 清华大学超低能耗示范楼绿化屋面的温度分布特征[J]. 林业科学,2007,43(8):143-147.
YIN LI-FENG, LI SHU-HUA. Temperature character of roof greening on low energy demo building of tsinghua university[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007,43(8):143-147.
- [6] RENATO M LAZZARIN, FRANCESCO CASTELLOTTI, FILIPPO BUSATO. Experimental, measurements and numerical modelling of a green roof[J]. Energy and Buildings,2005(37):1260-1267.
- [7] RAKESH KUMAR, KAUSHIK S C. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings[J]. Building and Environment, 2005(40): 1505-1511.
- [8] SANTAMOUIA M, PAVLOUA C, DOUKASA P, et al. Patargiase 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] ALAR TEEMUSK, ULO MANDER. Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing. Systems [J]. Ecological Engineering, 2010(36):91-95.
- [10] 吉文丽,李卫忠,王诚吉,等. 屋顶花园发展现状及北方屋顶绿化植物选择与种植设计[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3):180-183.
JI WEN-LI, LI WEI-ZHONG, WANG CHENG-JI, et al. A study on present situation of roof garden, plant select and planting design[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(3):180-183.
- [11] 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:自然科学版,2007,30(5):1-3.
TANG MING-FANG, YANG ZHEN-JING, ZHENG KAI-LI. Thermal r-values of green roof[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(5):1-3.
- [12] 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.
ZHAO DING-GUO, XUE WEI-CHENG. Effect of light roof greening on saving electric power consumption[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2008, 24(1): 99-101.
- [13] GB50019-2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [14] ISO7730 International Standard [S]. 1994E, Second edition(1994-12-15).
- [15] GB50176-93 民用建筑热工设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,1993.

(编辑 王秀玲)