

文章编号:1000-582X(2007)05-0001-03

屋顶绿化隔热等效热阻

唐鸣放^{a,b}, 杨真静^{a,b}, 郑开丽^{a,b}

(重庆大学 a. 建筑城规学院; b. 教育部山地城镇建设与新技术重点实验室, 重庆 400030)

摘要:针对自然气候作用下的草地式屋顶绿化形式,提出采用屋顶绿化隔热效果实测与屋顶热传导计算分析相结合的方法确定绿化层等效热阻,并在重庆选择通风屋顶有绿化层和无绿化层的实例进行了连续5个月的夏季隔热效果现场实测,结果表明:气温越高、太阳辐射越强,屋顶绿化层的隔热效果越好。实测数据的理论分析得到屋顶绿化层的等效热阻为 $0.56 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

关键词:屋顶绿化;热阻;内表面温度

中图分类号: TU111

文献标志码: A

屋顶绿化是一种值得大力提倡的生态节能技术措施,尽管屋顶绿化的建设已经规范化^[1],但其热工性能问题仍然没有解决。目前屋顶绿化隔热研究主要集中在实际效果测量评价和以实测为基础的理论模型研究方面^[2-6],通常采用评价常规隔热材料的指标热阻来等效评价屋顶绿化的隔热性能^[7],如何确定等效热阻是问题的关键。屋顶绿化的隔热机理与常规保温隔热材料有本质区别,屋顶绿化层在实际气候的作用下并不是一种单纯的传热过程,而是传热、传湿、相变耦合过程,其隔热效果不仅是以气温和太阳辐射为代表的热气候作用的结果,而且还是以降雨为代表的湿气候作用的结果,因此不能简单的象常规保温隔热材料那样以几天的测量数据来确定。下面以实际测量为例,讨论屋顶绿化的等效热阻确定方法。

1 研究方法

屋顶绿化在实际气候下的隔热机理极其复杂,有植物的遮阳和蒸发、土层的热湿传递及其与植物和气候的复杂关系,难以建立相应的数学模型计算模拟,而不考虑水分蒸发的屋顶材料层传热计算方法已经很成熟,因此采用屋顶绿化实测与屋顶热传导计算分析相结合的方法研究屋顶绿化的等效热阻是可行的。

图1为实测屋顶模型,屋顶内表面自然通风,屋顶外表面布置有绿化和无绿化两部分。无绿化的屋顶隔水、隔湿,实际气候对它的作用可以忽略降雨和湿的影响,其内表面温度 θ_0 可以看成是单纯的传热结果;有绿化的屋顶土层吸水、吸湿、蒸发,在实际气候作用下

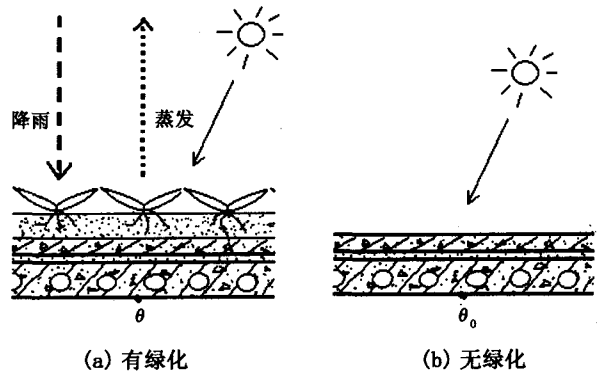


图1 实测屋顶模型

其内表面温度 θ 是复杂的传热、传湿综合结果。同时测量有绿化和无绿化屋顶内表面温度,其温差 $\Delta\theta = \theta_0 - \theta$ 反映了土层和植物在实际气候作用下共同的隔热效果。这种隔热效果可以等效于在屋顶上设置隔水、隔湿的隔热材料层,即图2所示的计算屋顶模型,通过传热计算得到内表面温差 $\Delta\theta' = \theta_0' - \theta'$ 。让 $\Delta\theta$ 与 $\Delta\theta'$ 在一个气候周期内的平均值相等,便认为在屋顶上放绿化和放一般隔热材料等效,那么隔热材料的热阻便是绿化的等效热阻。

实测屋顶选择重庆某住宅通风双层屋顶,自然通风层厚 600 mm,可以近似假设通风层温度与室外气温相等,因此实测屋顶可以简化为图1所示模型,屋顶面积 100 m^2 左右,其中 50% 覆土植草绿化,土层厚 100 mm,无人工浇水管理。测量有、无绿化屋面内表面温度 θ 和 θ_0 以及相关气候参数,数据自动采集间隔

收稿日期:2007-01-12。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50478066);重庆市建委科研项目(2006-32)。

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研究(Tel)023-65120704;

(E-mail) tmf@cqu.edu.cn。

为1 h,测量时间为2005年5月1日—9月30日,覆盖了一个夏季气候周期。

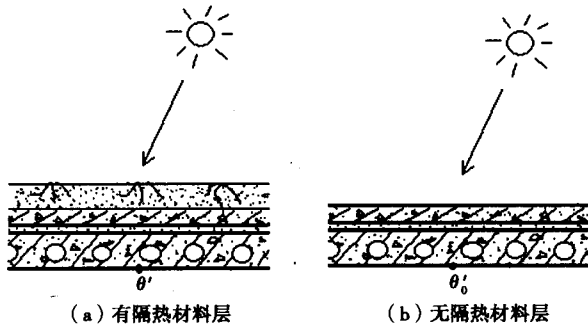


图2 计算屋顶模型

2 模型计算

图2所示屋顶的传热数学模型可以简写为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (1)$$

边界条件为:

$$\text{外表面 } \lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = -\alpha_e (\theta - \theta_{sa}), \quad (2)$$

$$\text{内表面 } \lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = -\alpha_i (\theta - \theta_a), \quad (3)$$

式中: θ 为屋顶材料层温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, h ; a 为材料导热系数, m^2/h ; x 为屋顶材料层厚度坐标, m ; λ 为材料导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; n 为表面法向; α_i, α_e 分别为内、外表面换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; θ_{sa} 为室外综合温度, $^{\circ}\text{C}$; θ_a 为室内空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

对于无土层的屋面,计算参数取值见表1。

表1 计算参数

材料名称	厚度/mm	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比热/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
钢筋混凝土空心板	120	1.05	2 250	0.92
水泥砂浆找平	20	0.93	1 800	1.05
钢筋混凝土土层	40	1.51	2 300	0.92
外表面	太阳辐射吸收系数0.9,表面换热系数23 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$			
内表面	表面换热系数8.7 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$			

以实测期间的气候参数为边界条件,采用反应系数法计算得到内表面温度计算值 θ_0' 与实测值 θ_0 的相关系数为0.97,日平均值 $\bar{\theta}_0'$ 与 $\bar{\theta}_0$ 的相关系数为0.98,相关性见图3,说明屋面内表面温度计算值与实测值有较好的线性关系,若以两者的平均值回归,则有

$$\bar{\theta}_0' = 1.06 \bar{\theta}_0 - 0.33. \quad (4)$$

可见,屋顶计算模型是合理的。

在屋顶上加隔热材料,在同样的气候但不考虑湿气候影响的条件下计算屋顶内表面温度 θ' 。隔热材料就取实测的绿化屋顶上面的土层,厚度为100 mm,测

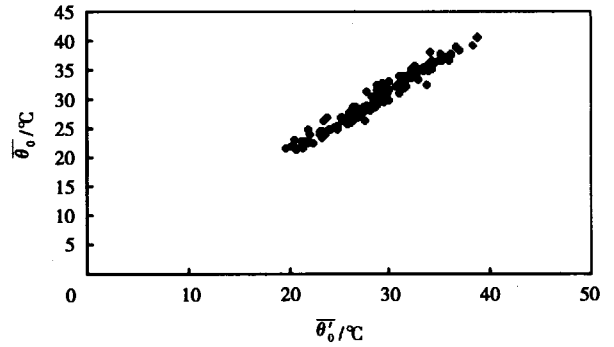


图3 屋面内表面温度计算与实测平均值相关性

量土层样品在干、湿、半干3种状态的密度、导热系数、含湿量列入表2。分别以土层3种状态的热物性参数带入模型计算。其中土层的比热随含湿量有变化,但比热主要影响热惰性,当考虑长期平均效果时,热惰性的影响基本消失,土层比热差别的影响可忽略,因此土层的比热都取 $1.05 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。计算得到土层在3种隔热状态下的屋顶内表面温度。

表2 土层热物性参数

状态	容重/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	含湿量/ $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
全干	1 370	0	0.22
全湿	1 816	0.26	0.94
半干	1 700	0.13	0.55

3 结果分析

以6、7、8、9四个月屋顶内表面温差 $\Delta\theta$ 与 $\Delta\theta'$ 的平均值来进行分析。3种不同隔热状态土层的屋顶内表面温差 $\Delta\theta'$ 以及有绿化的屋顶内表面温差 $\Delta\theta$ 的日平均值分布见图4,对应的气候参数平均值分布见

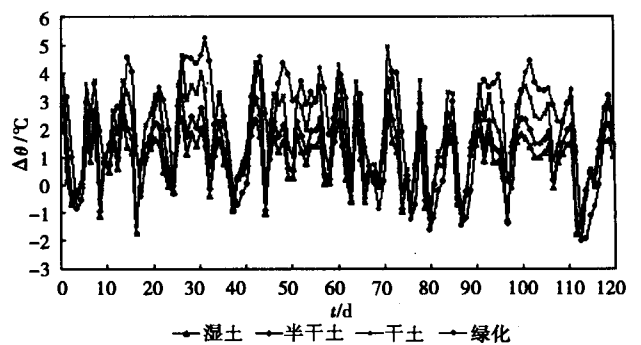


图4 屋顶内表面温差

图5。可以看出在太阳辐射强、气温高的天气,内表面平均温差为正,其值越大,表示屋顶上的绿化层或土层的附加隔热性越好;当其为负值时,一定为降温降雨天气,屋顶上的绿化层或土层在内表面释放热量,此时房间自然通风是最好的降温措施。将各月平均值汇总到表3,可以看出气温越高、太阳辐射越强,屋顶上的附加隔热效果越好。4个月平均的结果是绿化层的附加

隔热效果好于干土。

表3 各月气候参数和内表面温度平均值

月	气温 /℃	太阳辐射照度 /($W \cdot m^{-2}$)	屋顶内表面平均温差/℃			
			绿化	干土	半干土	湿土
6	27.3	139.9	2.26	2.03	1.32	0.93
7	29.9	164.8	2.73	2.24	1.43	1.01
8	26.2	108.2	1.07	1.40	0.88	0.61
9	26.8	129.4	2.09	1.77	1.13	0.79
平均	27.5	135.6	2.04	1.86	1.19	0.84

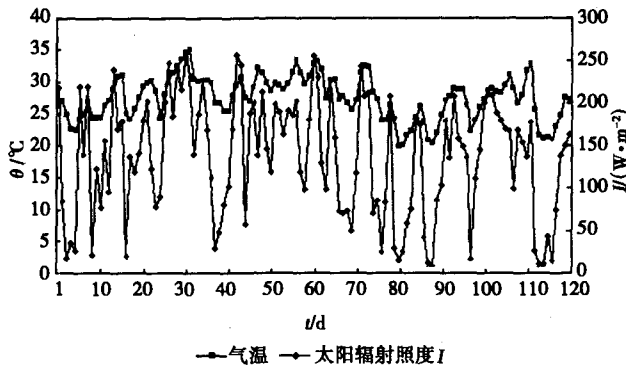


图5 平均气候参数

4 等效热阻

为了得到屋顶绿化层的等效热阻,以土层作为等效隔热材料模型,将有土层的屋顶内表面平均温差 $\Delta\theta$ 与土层材料的导热系数 λ 相关联,得到图6,采用函数拟合,得到如下公式:

$$\lambda = 0.06065 + 0.87935e^{-\frac{\Delta\theta - 0.84}{0.59716}} \quad (5)$$

取式(5)中屋顶内表面温差 $\Delta\theta$ 为表3中绿化屋顶内表面平均温差 2.04℃,计算得到等效材料导热系数 $\lambda = 0.18 W/(m \cdot K)$,于是屋顶绿化层的等效热阻 $R = 0.56 m^2 \cdot K/W$ 。有了绿化层的等效热阻,便可以评价屋顶绿化层的隔热性能,并可在同气候地区将这种绿化层移植到其它屋顶上进行隔热设计。

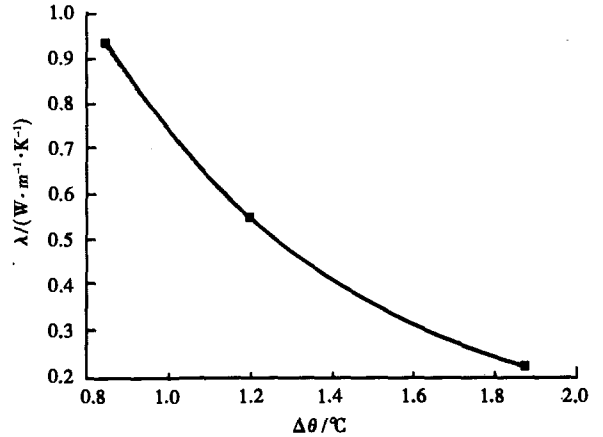


图6 屋顶内表面温差与土层导热系数关系

5 结论

1)屋顶绿化层的隔热性能可以采用等效方法进行评价,以屋顶绿化内表面温度实测对比与屋顶热传导计算分析相结合的方法可以确定等效热阻。

2)通过在重庆气候条件下进行的草地式屋顶绿化隔热实测与计算分析,得到这种屋顶绿化的隔热等效热阻为 $R = 0.56 m^2 \cdot K/W$,从而为屋顶绿化的隔热应用提供了设计参数。

参考文献:

- [1] 四川省地方标准. DB51/5010-94 蓄水覆土种植屋面工程技术规范[S]. 成都:四川省建设委员会,1994.
- [2] 冯雅,陈启高. 种植屋面热过程的研究[J]. 太阳能学报, 1999,20(3):311-315.
- [3] 白雪莲. 种植屋面能量传输和热环境的研究[D]. 重庆:重庆大学建筑城规学院,2000.
- [4] THEODOSIOU T G. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique[J]. Energy and Buildings, 2003, 35: 909-917.
- [5] KUMAR R, KAUSHIK S C. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings[J]. Building and Environment, 2005, 40: 1505-1511.
- [6] 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, 48(1): 1-5.
- [7] 中华人民共和国行业标准. JGJ75-2003 夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.

Thermal R-values of Green Roof

TANG Ming-fang^{a,b}, YANG Zhen-jin^{a,b}, ZHENG Kai-li^{a,b}

(a. Faculty of Architecture and Urban Planning; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In the integrated measures of building energy efficiency, soil efficiency and improve the eco-environment of city, green roof get extensive attention and vigorous advocate in recent years. Despite various green roof technology improving, how to determine the basic parameter for thermal performance design is remain unresolved. A method of combine field measurement during whole summer is proposed with thermal transfer calculation to determine thermal R-values of grass-green roof in the natural climate. Five months field-test at ventilation roof with green and without green was made in Chongqing in the summer. The results show that the higher the air temperature and the stronger the solar radiation, the better the heat insulation effect of green-roof. According to the analysis of field-test data the equivalent thermal resistance of green layer is $0.56 m^2 \cdot K/W$.

Key words: green roof; thermal R-values; internal surface temperature

(编辑 李胜春)