

# 屋顶绿化传热临界温度

唐鸣放, 杨真静, 郑澍奎

(重庆大学建筑城规学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:**根据实验研究结果,分析了屋顶绿化在被动式室内热环境状态下的热流特点。研究表明,不能采用等效热工参数评价其隔热性能。采用屋顶绿化实验方法,证明了屋顶绿化在室内人体可接受的热环境范围内存在着不向室内传热的临界温度状态。通过屋顶内表面热流与室内外温差的相关性分析,得出屋顶绿化的传热临界温度低于室外平均气温 $1.5^{\circ}\text{C}$ 。

**关键词:**屋顶绿化;室内温度;节能

**中图分类号:**TU111.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)02-0100-05

## Indoor Temperature of Green Roof in Heat Transfer Critical State

Tang Mingfang, Yang Zhenjing, Zheng Shukui

(College of Architecture and Urban Planning; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:**Based on the existing experiment, the heat flux characteristics of green roof in passive indoor thermal environment and thermal parameter suitable for evaluation of the thermal performance of green roof were analyzed. It is found that there is indoor critical temperature in acceptable indoor thermal environment range for green roof, in which there is no heat transfer from roof. Through the correlation analysis of internal surface heat flux of roof and the temperature difference between indoor and outdoor, it is shown that the indoor critical temperature is  $1.5^{\circ}\text{C}$  lower than air temperature outside for green roof.

**Key words:**green roof; indoor temperature; energy efficiency

近年来,屋顶绿化在许多国家得到了普及和发展,屋顶绿化的生态节能功能受到广泛重视,人们普遍认为屋顶绿化是解决城市能源和生态环境问题的一种有效措施。在建筑上种植绿化植物,改善了建筑的热功能,通过植物对阳光、空气、雨水等生物气候资源的利用,减少了建筑空调能耗,缓解了城市热岛效应,改善了城市生态环境,屋顶绿化具有节能减排的综合效益。

目前屋顶绿化节能研究大致分为:隔热降温效果的测量和评价<sup>[1-5]</sup>、热工性能参数<sup>[6-9]</sup>、隔热机理以及热湿传递理论<sup>[10-14]</sup>等。在这些研究中,可以直

接应用于建筑节能工程的是屋顶绿化的热工性能参数,通常采用实验的方法把屋顶绿化的隔热性能等同于保温材料层。但在一些自然室温的实验中,出现了绿化屋顶与裸屋顶的内表面热流方向相反的现象<sup>[15-16]</sup>,说明在这种情况下屋顶绿化的隔热性能不能等同于保温材料层。这是因为按照热传导原理,裸屋顶与保温屋顶在同样的实验条件下内表面热流方向应该是相同的。因此屋顶绿化在非空调室温下的隔热性能需要重新考虑,这对于提高室内舒适性、减少空调使用时间具有节能意义。笔者通过实验研究,分析屋顶绿化的热流方向与室内温度的关系,提

收稿日期:2012-06-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978261)

作者简介:唐鸣放(1957-),女,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。

出新的隔热特征参数。

## 1 临界状态及其存在性

在中国南方地区各种建筑隔热降温措施中,屋顶绿化具有地方气候适应性和节能生态性。南方地区夏季太阳辐射强,高温天气多,但同时降雨也十分丰富,湿热气候创造了绿化植物繁荣茂盛的生长条件。绿化植物是气候的产物,同时也是气候的生产物,采用绿化措施对建筑围护结构进行降温隔热实际上是一种气候手段。采用气候手段解决气候带给建筑的热问题是一种和谐的生态过程。

气候作用于绿化所产生的正面影响与气候作用于建筑所产生的负面影响构成相互作用的双方,其结果是存在一种传热平衡状态。在一些屋顶绿化隔热降温实验研究中证明了这种平衡状态的存在。早在20世纪80年代,四川省建筑科学研究所等单位在成都对植被屋面夏季热工参数进行了比较全面的测量,除了得到植被屋面隔热效果特别显著的结论外,还发现植被屋顶内表面平均热流是从室内传向屋顶,与对比的裸屋顶情况相反。后来在重庆进行的被动式屋顶绿化实验中发现了同样的现象<sup>[15]</sup>。另外,在日本进行的被动式建筑屋顶绿化实验中也有同样的报道<sup>[16]</sup>,在近年来新加坡进行的一项实验中报道了植被屋顶内表面平均热流为0的情况<sup>[1]</sup>。而在一些室内为空调环境的实验中,植被屋顶内表面平均热流是从屋顶传向室内,与对比的裸屋顶情况相同<sup>[17]</sup>。虽然对屋顶绿化实验的报道不少,但是能够测量热流的情况却很少,因此这种现象并未被关注。这些实验说明:在夏季晴天气候条件下,对于空调房间,室内温度较低,绿化屋顶向室内传热,热流为正;对于被动式房间,室内温度较高,绿化屋顶吸收室内热量,热流为负。因此可以推测:在室外气候条件不变的情况下,当室内温度由较低状态向较高状态变化时,绿化屋顶内表面热流将会由正值变化为负值,在这种状态变化过程中,应该存在一种临界状态,使内表面热流为0,此为传热平衡状态,临界状态的室内温度可称为传热临界温度。从已有的各种实验中可以估计,屋顶绿化的传热临界温度应该在自然室温与空调室温之间,在此状态,屋顶不向室内传热。

## 2 实验设置与测量数据分析

通过对已有实验结果的分析,推测了屋顶绿化传热临界温度的存在,但却不能给出明确的数值,因为这些实验是各自进行的,没有哪个实验同时完成

了不同室内温度的绿化屋顶内表面热流的测量。因此,为了得到屋顶绿化的传热临界温度,需要根据实验目的设置新的实验。仍然采用绿化屋顶与裸屋顶的热工对比实验方法,通过采用空调与非空调状态不同室温的屋顶热工参数测量,分析热流与室内温度的关系。

### 2.1 实验设置

实验在上海某绿化基地进行。实验屋顶的房间为相邻对比房,每间面积约20 m<sup>2</sup>,安装有同样型号的壁挂式空控制室内温度。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。屋顶上的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。种植盘内放置基质材料后,总厚度约为100 mm,湿重量达到100 kg/m<sup>2</sup>。种植的绿化植物为佛甲草,生长茂密。实验时间为2007-08-07—2007-08-31,共25 d,其中前面12 d房间开启空调,设置温度25℃;后面13 d关闭空调,房间自然室温。测量内容为气候参数、室内温度、屋顶内表面温度、热流等热工参数。

### 2.2 测量数据及分析

测量期间的气候参数变化如图1所示。可以看出,连续25 d中大部分天气为晴天,平均气温为30℃左右,最高气温为39℃。在房间开启和关闭空调的2段测量期间气候条件相近,测量结果可以进行比较。

图2为绿化屋顶与裸屋顶的房间空气温度变化对比。在房间开启空调期间,室内温度比较接近,除了有一天停电关机导致温度较高外,其余天气的室内温度都为25℃左右,并且变化很小。在房间关闭空调期间,室内温度是由各部分围护结构传热作用综合形成的自然室温。可以看出,绿化屋顶的自然室温比裸屋顶低得多,并且每天的温度变化也小得多,充分显示了屋顶绿化对室内热环境的正面影响。

图3为绿化屋顶与裸屋顶的内表面热流变化情况。在房间开启空调期间,绿化屋顶与裸屋顶都向室内传热,热流方向一致,但热流大小差别很大。绿化屋顶的热流数值小、变化也小,裸屋顶的热流数值大、变化更大,说明屋顶绿化大量减少了空调房间的屋顶传热量,节能效果显著。在房间关闭空调期间,绿化屋顶的热流变为负值,说明屋顶吸收室内的热量,它们来自墙体传入室内的热量。裸屋顶的热流每天有极少数时间为负值,大多数时间为正值,而且峰值高,说明屋顶向室内传热多,导致室内温度迅速升高。

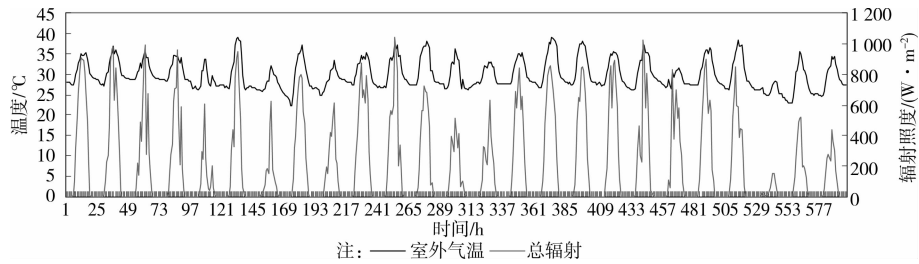


图 1 气候参数

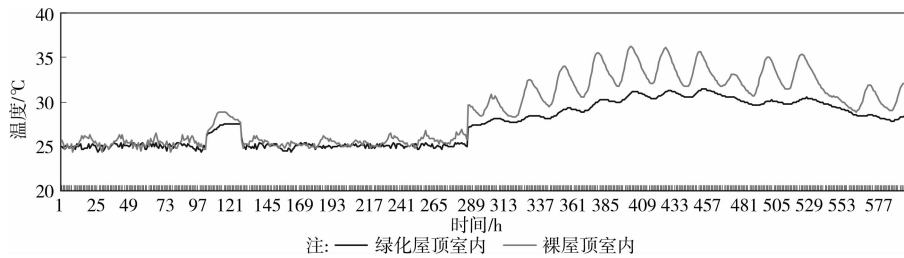


图 2 室内温度

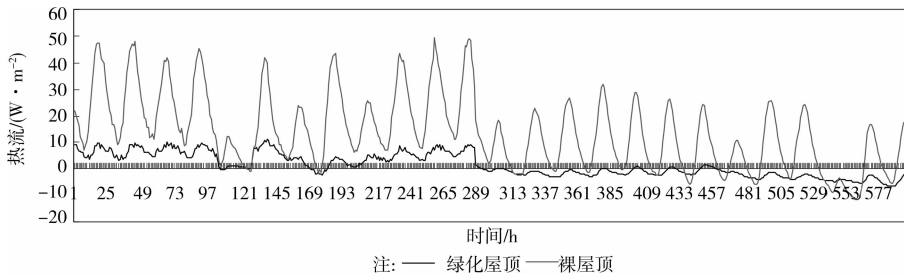


图 3 屋顶内表面热流

在房间开启和关闭空调的 2 段测量期间,分别取连晴 4 d 的测量数据进行平均,汇总得到表 1 和表 2。可以看出,2 段连晴天的气候条件很接近,裸屋顶在 2 种不同的室内温度情况下,热流大小不同、方向一致,即使自然室温高于室外气温,传热方向仍然是从室外传向室内,这是因为裸屋顶的室外综合温度高于室内温度。但绿化屋顶在 2 种不同的室内温度情况下,热流方向相反,即使自然室温低于室外气温,传热方向也不是从室外传向室内,而是从室内传向屋顶。这与保温材料传热有本质区别。

表 1 开启空调期间测量数据平均值

测量对象	室外空气 温度/°C	太阳辐射强度/ (W·m <sup>-2</sup> )	室内空气 温度/°C	屋顶内表面热流/ (W·m <sup>-2</sup> )
绿化屋顶	30.8	258.1	25.0	6.9
对比屋顶	30.8	258.1	25.4	26.2

表 2 关闭空调期间测量数据平均值

测量对象	室外空气 温度/°C	太阳辐射强度/ (W·m <sup>-2</sup> )	室内空气 温度/°C	屋顶内表面热流/ (W·m <sup>-2</sup> )
绿化屋顶	31.0	256.7	29.8	-1.3
对比屋顶	31.0	256.7	33.0	11.4

### 3 临界温度与气温的关系

实验证明了屋顶绿化传热临界温度的存在,但是要想通过实验方法调整室内温度刚好达到热流为 0 的临界状态是非常困难的,因为室外气候不能控制,难以保证室内温度调整在各种状态都有相近的室外气候条件。笔者将对实验数据统计分析。

建筑上的传热现象都是由于室内、外温差引起的,因此传热大小必然会与室内、外温差有关系。但屋顶传热具有热惰性,屋顶内表面热流与室内、外温差的变化不同步。如果考虑气候条件具有周期性,则采用实验数据的日平均值进行相关分析可以减小热惰性的影响。

将 25 d 测量期间的屋顶内表面热流、室外气温与室内温度的温差进行日平均值相关系数计算,得到热流与温差的相关系数:绿化屋顶为 0.89,裸屋顶为 0.93。2 种屋顶的热流与温差的相关性见图 4 和图 5。

采用线性回归得出 2 种屋顶的温差与热流的关系如下:

$$\Delta t_g = 0.605q_g + 1.495 \quad (1)$$

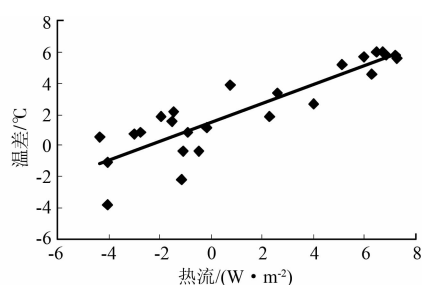


图4 绿化屋顶热流与温差的关系

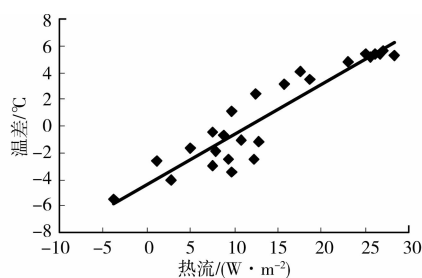


图5 裸屋顶热流与温差的关系

$$\Delta t = 0.375q - 4.416 \quad (2)$$

式中:  $\Delta t_g$  为室外气温与绿化屋顶的室内温度之差,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta t$  为室外气温与裸屋顶的室内温度之差,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q_g$  为绿化屋顶内表面热流强度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $q$  为裸屋顶内表面热流强度,  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

在式(1)、(2)中,取热流为0可以得出温差:绿化屋顶为  $1.5^{\circ}\text{C}$ ,裸屋顶为  $-4.4^{\circ}\text{C}$ 。由此得出2种屋顶内表面不传热的室内临界温度与室外气温的关系为:

$$t_{i,g} = t_e - 1.5 \quad (3)$$

$$t_i = t_e + 4.4 \quad (4)$$

式中:  $t_{i,g}$  为绿化屋顶的传热临界温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_i$  为裸屋顶的传热临界温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_e$  为室外气温,  $^{\circ}\text{C}$ 。

由式(3)、(4)可见,绿化屋顶的传热临界温度比室外气温低  $1.5^{\circ}\text{C}$ ,裸屋顶的传热临界温度比室外气温高  $4.4^{\circ}\text{C}$ 。如果以测量期间的室外平均气温  $30^{\circ}\text{C}$  计算,绿化屋顶的传热临界温度为  $28.5^{\circ}\text{C}$ ,裸屋顶的传热临界温度为  $34.4^{\circ}\text{C}$ 。由此可以得出,在不使用空调的情况下,绿化屋顶的室内温度达到了人体适应性舒适水平,裸屋顶的室内环境不可居住。

## 4 讨论

屋顶绿化的传热临界温度也是一种隔热特征参数。在室内温度低于传热临界温度的情况下,屋顶绿化的隔热性能可以采用等效热工参数进行评价,而在室内温度高于传热临界温度的情况下,不能采用等效热工参数进行评价。这也说明了在一些被动

式室内热环境状态下屋顶绿化不能采用等效热工参数进行评价的原因。

屋顶绿化的传热临界温度对建筑节能设计具有新的意义。以这种传热临界温度设计的建筑热环境可以达到人体适应性舒适水平,并且在节能建筑设计中不计屋顶传热,体形系数中的建筑外表面可以不计屋顶面积。这对于屋顶面积较大的建筑的节能设计尤其有利。

## 5 结语

采用上海夏季气候条件下的佛甲草屋顶绿化实验方法,证明了屋顶绿化在室内人体可接受的热环境范围内存在着不向室内传热的临界温度状态。通过屋顶内表面热流与室内外温差的相关性分析,得出屋顶绿化的传热临界温度比室外平均气温低  $1.5^{\circ}\text{C}$ ,而未采用保温隔热措施的裸屋顶的传热临界温度比室外平均气温高  $4.4^{\circ}\text{C}$ 。

## 参考文献:

- [1] Nyuk Hien W, Puay Yok T, Yu C. Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate [J]. Building and Environment, 2007, 42: 25-54.
- [2] 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 D G, Xue W C. Effect of light roof greening on saving electric power consumption [J]. Acta Agriculture Shanghai, 2008, 24(1), 99-101.
- [3] Lazzarin R M, Castellotti F, Busato F. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof [J]. Energy and Building, 2005, 37: 1260-1267.
- [4] Tang M F, Yang Z J. Thermal characteristics of green roof in natural climate [J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14: 39-42.
- [5] Fang C F. Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops [J]. Energy and Buildings, 2008, 40: 1048-1052.
- [6] 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, 36(10): 111-113.  
Meng Q L, Zhang Y, Zhang L. Measurement of equivalent thermal resistance of planted roof in hot-climate wind tunnel [J]. Journal of HV&AC, 2006, 36(10): 111-113.
- [7] 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, 30(5): 1-3.  
Tang M F, Yang Z J, Zheng K L. Thermal R-values of green roof [J]. Journal of Chongqing University, 2007, 30(5): 1-3.

- [8] 唐鸣放, 郑澍奎, 杨真静. 屋顶绿化节能热工评价[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(2): 90-93.  
Tang M F, Zheng S K, Yang Z J. Thermal performance and energy analysis of green roof [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(2): 90-93.
- [9] 冯驰, 张宇峰, 孟庆林. 植被屋顶热工性能研究现状[J]. 华中建筑, 2010(2): 91-94.  
Feng C, Zhang Y F, Meng Q L. Current research on the thermal properties on green roofs [J]. Huazhong Architecture, 2010(2): 91-94.
- [10] Ayata T, Tabares-Velasco P C, Srebric J. An investigation of sensible heat fluxes at a green roof in a laboratory setup [J]. Building and Environment, 2011, 46: 1851-1861.
- [11] 冯驰, 张宇峰, 孟庆林. 屋顶植被冠层能量方程的理论修正方法[J]. 建筑科学, 2009, 25(10): 85-88.  
Feng C, Zhang Y F, Meng Q L. Correction method on energy equation of foliage layer for roof plants [J]. Building Science, 2009, 25(10): 85-88.
- [12] Alexandri E, Jones P. Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment; Comparison with experimental results [J]. Building and Environment, 2007, 42: 2835-2849.
- [13] Sailor D J. A green roof model for building energy simulation programs [J]. Energy and Buildings, 2008, 40: 1466-1478.
- [14] Feng C, Meng Q L, Zhang Y F. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs [J]. Energy and Buildings, 2010, 42: 959-965.
- [15] 白雪莲. 种植屋面能量传输和热环境的研究[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 2000.
- [16] Takakura T, Kitade S, Goto E. Cooling Effect of greenery cover over a building [J]. Energy and Building, 2000, 31: 1-6.
- [17] 唐鸣放, 郑开丽, 严永红, 等. 屋顶容器式轻型绿化热工性能分析[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(9): 992-996.  
Tang M F, Zheng K L, Yan Y H, et al. Study on thermal performance of vessel type green roof [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(9): 992-996.

(编辑 胡英奎)