

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.02.017



# 室内气温对绿化屋顶当量热阻的影响

杨真静, 熊珂, 唐鸣放

(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:** 绿化屋顶在节能设计中以附加当量热阻增大屋顶总热阻值, 有效减少由屋顶进入室内的热量, 降低室内空气温度。但根据已有的实验研究, 绿化屋顶隔热特性与室内气温是耦合关系, 随室内气温的变化, 绿化屋顶会呈现出不同的隔热特性。用实验测试与数值模拟相结合的方法, 分析在不同室内气温下绿化屋顶、参照屋顶与等效保温屋顶内表面温度与热流的变化。结果表明: 室内气温会显著改变绿化屋顶的隔热性能, 其当量热阻为与室内温度正相关的变量。在被动式建筑中, 绿化屋顶更能充分发挥隔热功效, 且具有不向室内传热的特性。

**关键词:** 绿化屋顶; 当量热阻; 数值模拟

**中图分类号:** TU 111.19   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1674-4764(2015)02-0109-06

## Influence of indoor temperature on equivalent thermal resistance of green roof

Yang Zhenjing, Xiong Ke, Tang Mingfang

(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:** Green roof contributes to high total thermal resistance of roof serving as additional equivalent thermal resistance, which effectively reduces the heat gain from roof and lowers the indoor air temperature. However, current studies showed that the relationship of indoor temperature and thermal performance was coupling and the performance of the green roof are different with the change of the indoor temperature. Surface temperature and heat flux changes of green roof, reference roof and equivalent insulating roof were analyzed respectively when the indoor temperature changed using both experiment and numerical simulation. The results showed that the indoor temperature had significant impact on the insulation performance of green roof and the equivalent thermal resistance had positive correlation with the indoor temperature. The insulation performance of green roof reduces heat gain in passive building. Key words: green roof; equivalent thermal resistance; numerical simulation.

**Key words:** green roof; equivalent thermal resistance; numerical simulation

**收稿日期:** 2014-08-03

**基金项目:** 重庆市科委前沿与应用基础研究(cstc2014jcyjA90024); 中央高校基本科研业务费(106112014CDJZR190008)

**作者简介:** 杨真静(1975-), 女, 博士, 副教授, 主要从事建筑节能、绿色建筑研究, (E-mail) young30331@163.com.

**Received:** 2014-08-03

**Foundation item:** Frontier and Application Fundamental Science of the Chongqing Science & Technology Commission(No. cstc2014jcyjA90024); Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (No. 106112014CDJZR190008)

**Author brief:** Yang Zhenjing(1975-), PhD, associate professor, main research interests: building energy efficiency and green building, (E-mail) young30331@163.com.

绿化屋顶作为被动建筑隔热降耗的生态手段, 现已广泛应用到建筑中。目前对绿化屋顶最主要也最常用的热工评价指标为当量热阻, 即把绿化屋顶的隔热功效等效为一般隔热材料进行热工计算<sup>[1-2]</sup>。当量热阻即是绿化屋顶除种植部分外的建筑构件, 在其上附加隔热层成为参照屋顶, 在一个完整气候周期内, 当绿化屋顶与参照屋顶的内表面平均温度相同, 则参照屋顶的热阻就为绿化屋顶中绿化部分的当量热阻<sup>[3]</sup>。在《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》和《重庆市居住建筑节能标准》中就明确绿化屋顶以附加当量热阻  $0.5(\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$  进入建筑节能计算。在已有的文献中, 对绿化屋顶当量热阻的研究不多, 大多是在人工控制室温下得到的, 如孟庆林等<sup>[4]</sup>控制和调节热气候风洞内的环境参数, 得到风洞内平均风速取广州夏季室外平均风速  $1.5 \sim 1.8 \text{ m/s}$  时, 佛甲草绿化屋顶当量热阻值为  $0.41 \sim 0.63 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ , 与标准<sup>[5-6]</sup>中的当量热阻值相当。Wong<sup>[7]</sup>分别计算了草皮、灌木、和乔木 3 种植物的当量热阻, 得到 3 种植物的当量热阻分别为  $0.36$ 、 $1.61$  和  $0.57(\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$ 。但在一些自然室温的实验中, 室内温度较高, 出现了绿化屋顶由室内流向室外的逆向热流<sup>[8-11]</sup>, 显然在这种状态下, 其隔热性能就不等同于一般保温材料, 不能用当量热阻来评价。综合相关文献分析得出, 随着室温的变化, 绿化屋顶会展示出不同的隔热特性, 因此, 绿化屋顶的隔热性能与屋顶下室温的关系还需进一步研究。笔者用实验测试、热传导理论分析和数值模拟相结合的方法, 分析绿化屋顶与等效保温屋顶内表面温度与热流的变化, 综合剖析绿化屋顶当量热阻与室内温度的关系。

表 1 测试仪器的型号及参数

Table 1 Specification and parameters of testing instruments

仪器名称	型号	测试范围	测试精度
Agilent 数据采集仪	34970A	温度: $-210 \sim 1\ 820 \text{ }^\circ\text{C}$ 电压: $0 \sim 10\text{V}$	$0.003\ 5\% \text{ 读数} + 0.000\ 5\% \text{ 量程}$ $0.06\% \text{ 读数} + 0.04\% \text{ 量程}$
太阳辐射仪	DFY4-1	$0 \sim 1\ 500 \text{ W}/\text{m}^2$	$\pm 0.5 \text{ W}/\text{m}^2$
热流板	WYP	$\pm 500 \text{ W}/\text{m}^2$	$\pm 3\% \text{ 读数}$
热电偶	T 型	$-200 \sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$

为设置不同的室内温度, 测试分为两种工况。工况 1 为空调运行工况, 设置室内空调温度为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , 测量时间为 8 月 7 日—8 月 17 日, 共 10 d; 工况 2 为非空调工况, 自然状态下室温, 测试时间为 8 月 19 日—8 月 28 日。

## 1 实验测试

### 1.1 实验设置

实验在上海一单层 4 开间建筑屋顶上进行, 建筑为南北向, 选择中间的两个房间作为绿化屋顶房间和参照房间对比实验, 两房间大小、围护结构做法均相同, 为更好地比较屋顶构造不同给室内热环境带来的影响, 减少外部干扰, 房间均关闭门窗, 不考虑自然通风, 且房间功能为库房, 没有室内热源。

绿化屋顶采用加气混凝土种植槽种植景天科佛甲草, 屋顶构造和测试点位置如图 1。绿化屋顶房间沿剖面从上至下共有 5 个测试点, 参照房间 3 个测试点, 每个测试点设置两个感应器, 室外气温测点布置在屋顶上方  $1 \text{ m}$  高空气中; 室内空气温度测点布置在房间平面中间  $1.5 \text{ m}$  高的位置; 屋顶内、外表面测点布置在房间屋顶表面中间位置。

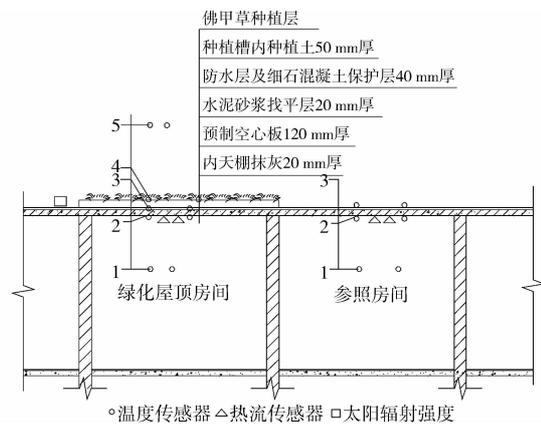


图 1 屋顶构造及测试布点图

Fig. 1 Construction and measuring points of the roof

测量参数为太阳辐射强度、室内外空气温度、屋顶内外表面温度、屋顶内表面热流, 数据每  $0.5 \text{ h}$  记录一次, 测试仪器的型号及参数见表 1。

### 1.2 结果分析

实验阶段室外气温及太阳辐射见图 2。

图 2 中前 10 d 为工况 1, 在该时段内, 室外气温晴天居多, 日平均气温  $29.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , 最高气温  $41.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , 工况 2 时段处于 8 月下旬, 是全年最热的一段时间,

室外气温较上月工况 1 期间温度要高,平均气温 30.3 °C,最高温出现在 23 日,为 39.8 °C。

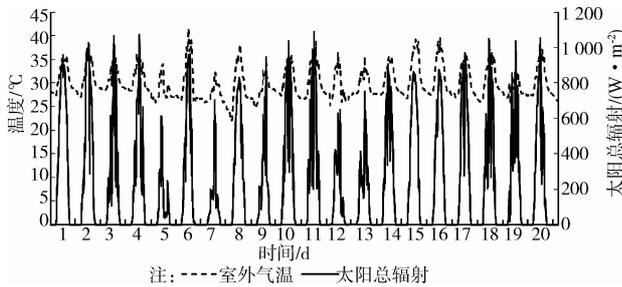


图2 室外气候参数

Fig. 2 Main outdoor weather data

表2 不同室内温度下绿化屋顶和参照屋顶室内热工参数测量值

Table 2 Indoor thermal parameters of green roof and conference roof in different indoor temperature

工况	平均太阳辐射强度/(W·m <sup>-2</sup> )	平均室外气温/°C	室外气温日振幅平均值/°C	室内平均气温/°C		屋顶内表面平均热流/(W·m <sup>-2</sup> )	
				绿化房间	参照房间	绿化房间	参照房间
工况 1	258.1	30.8	11.4	25.0	25.4	6.9	26.2
工况 2	256.7	30.9	10.8	29.8	33.0	-1.3	11.4

注:屋顶内表面平均热流正值表明热流方向由室外进入室内,负值表明热流由室内进入室外。

不同室内温度下绿化屋顶和参照屋顶室内热工参数测量结果见表 2。从表中可见,2 种工况下,绿化系统都有效减少了由屋顶进入室内的热量,在空调工况(工况 1),绿化屋顶减少了 74% 进入室内的热量,显然证实绿化屋顶能有效减少空调的运行时间,大幅减少空调能耗<sup>[12-13]</sup>。在自然室温(工况 2)下,绿化屋顶有效降低室内温度 3.2 °C。

实验也表明,室内气温与绿化屋顶的隔热效果相互耦合,在绿化屋顶有效降低室温的同时,室温也改变绿化屋顶的隔热性能,在工况 1,绿化屋顶内表面热流与参照屋顶具有相同的传热方向,而当室内温度上升,内表面热流的传递方向发生了变化,改由室内传向室外,帮助室内散热,减小热流 111%。这显然不符合热传导理论,采用任何保温材料屋顶都不可能出现逆向的热流方向。因此,在该状态下,就不能用当量热阻来评定其隔热效果,下面用工况 1 下测量值来进行当量热阻的分析。

1.2.2 绿化屋顶当量热阻的计算 绿化屋顶的总热阻由两部分组成,一部分是屋顶建筑构件的热阻,另一部分为绿化系统的附加热阻,见式(1)。

$$R = R_0 + R_E \quad (1)$$

式中: $R$  为屋顶总热阻,  $m^2 \cdot K/W$ ;  $R_0$  为屋顶建筑构件热阻值,  $m^2 \cdot K/W$ ;  $R_E$  为绿化系统的当量热阻值,  $m^2 \cdot K/W$ 。

1.2.1 不同室内温度下的隔热效果 为便于对比,通过测试的数据分析,从 2 种工况下各选取了 4 d,8 月 7 日—8 月 10 日和 8 月 21 日—8 月 24 日 2 个时间段,这 2 时段天气晴朗,室外气温变化非常接近,最大太阳辐射也基本相当(见表 2)。因此,可以看成是这 2 时间段基本在相同的室外气候条件下,差别仅在于有无空凋控制室温,导致室内温度的不同。在后续的模拟研究也是将这 4 d 平均成 1 d 作为作为典型日气象数据进入数值模拟。

屋面为预制空心板屋面,构造简单,通过无绿化屋顶的测量值,屋顶构件热阻为

$$R_0 = \frac{\overline{t_{se}} - \overline{t_{si}}}{\overline{q}} \quad (2)$$

式中: $\overline{t_{se}}$  为选取的 4 d 时段内屋顶外表面平均温度, °C;  $\overline{t_{si}}$  为选取的 4 d 时段内参照屋顶内表面平均温度, °C;  $\overline{q}$  为无绿化屋顶内表面热流平均值,  $W/m^2$ 。

因工况 1 下,室内温度由空凋控制,较为稳定,屋顶内表面温度变化直接受屋顶得热的影响,因此,选定工况 1 下测量值,用式(2)计算得到屋顶热阻为  $0.20 m^2 \cdot K/W$ 。从屋面构造做法及热物性参数来看(见表 3),这与实际屋面构造计算得到热阻大致相当。这也说明了对无绿化屋顶,将周期性非稳态等效为稳态传热,用稳态传热热阻来计算屋顶在完整周期内的传热是合理的。

表3 屋面构造做法及材料热物性参数  
Table 3 Roof construction and thermal parameters of the materials

屋顶构造层次	厚度/mm	导热系数/	热阻/
		(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	(m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> )
钢筋混凝土刚性防水层	40	1.74	0.02
卷材防水层	4	0.15	0.03
水泥砂浆找平层	20	0.93	0.02
钢筋混凝土预制空心板	120	1.05	0.11
顶棚混合砂浆抹灰	20	0.81	0.03

式(2)也可以表达成以室外综合温度为室外计算参数的形式,即:

$$R_0 = \frac{\overline{t_{sa}} - \overline{t_{si}}}{\overline{q'}} - R_e \quad (3)$$

式中: $\overline{t_{sa}}$ 为室外综合温度平均值,℃; $R_e$ 为外表面换热阻,按热工设计规范,取 $R_e=0.05 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。计算得到屋顶的室外综合温度,有无绿化屋顶具有相同的室外综合温度,带入式(4),计算绿化屋顶总热阻。

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

式中: $\overline{t_{si}'}$ 为绿化屋顶内表面平均温度, $\overline{q'}$ 为绿化屋顶内表面热流平均值, $\text{W}/\text{m}^2$ ,计算绿化屋顶总热阻为 $1.33 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ,根据式(1),得到绿化系统的附加当量热阻 $R_0$ 为 $1.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。这一结果比标准<sup>[2,4]</sup>中的取值要高一倍多,但在相关的实验中也得到过相似的结果<sup>[14-15]</sup>。

上面的当量热阻值是在室温 $25^\circ\text{C}$ 左右时测量值的计算结果,由于室外气候不能控制,难以保证调整的不同室内温度都在相近的室外气候条件下,因此,采用数值模拟的方法进行分析。

## 2 数值模拟分析

能耗模拟软件 DesignBuilder 是为数不多能对绿化屋顶建筑进行数值模拟的软件,能分别对绿化屋顶各构造层次根据实际工况进行参数设置。

### 2.1 构建合理的数值模型

以实验建筑为原始模型,按照建筑的实际尺寸和相关构造,建立了几何模型(见图3)。图3中,房间3和房间4为两个有无绿化屋顶对比房间。

屋顶绿化的参数设置分为土壤和植物两部分,各参数取值如下:

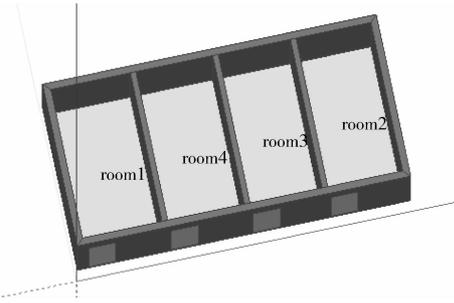


图3 建筑模型图

Fig.3 Schematic representation of building model

土壤基质	厚度:0.1 m
	导热系数: $0.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$
	比热: $1000 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{K}$
	密度: $800 \text{ kg}/\text{m}^3$
	长波吸收系数:0.9
	粗糙度:粗糙
植物	可见光吸收系数:0.7
	叶面积指数:2.0
	植物高度:0.1 m
	叶片反射系数:0.15
	发射系数:0.83
	最小气孔阻力:120
	最大含湿率:0.5
最小含湿率:0.01	
初始含湿率:0.5	

选取 IWEC 上海数据库中室外气温和太阳辐射与实验期间的典型日最为接近的一天,这样空气湿度、风速等数据和实际更为接近,将库中的室外气温和太阳辐射数据改为实验典型日的逐时数据,这样得到完整的典型日气象数据,将该数据每天重复进行一段时间的数值模拟,模拟结果见表4和表5。

表4 参照房间模拟结果和实验结果对比

Table 4 Comparison between simulation and test results of room with conference roof

工况	内表面平均温度			内表面平均热流			室内空气平均温度		
	模拟/℃	实验/℃	误差/%	模拟/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	实验/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	误差/%	模拟/℃	实验/℃	误差/%
工况1	29.3	29.3	0.0	28.1	26.2	7.3	25.5	25.4	0.4
工况2	34.1	33.7	1.2	12.2	11.4	7.0	32.4	33.0	2.0

表5 绿化屋顶房间模拟结果和实验结果对比

Table 5 Comparison between simulation and test results of room with green roof

工况	内表面平均温度			内表面平均热流			室内平均空气温度		
	模拟/℃	实验/℃	误差/%	模拟/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	实验/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	误差/%	模拟/℃	实验/℃	误差/%
工况1	26.3	26.0	2.3	7.0	6.9	1.4	25.0	25.0	
工况2	29.4	29.0	1.4	-1.3	-1.3	0.0	30.3	29.8	1.7

通过模拟结果与实测结果的对比分析发现,实测值和模拟值比较吻合,这说明数值模型能基本反映两种屋顶的真实降温效果,模型合理有效,可用来做进一步模拟分析。

## 2.2 等效屋顶的等效性分析

根据前面对当量热阻的定义,附加了隔热层的屋顶则为该绿化屋顶的等效屋顶。接下来用模拟的方法对等效屋顶的等效性进行分析。

按照定义,用一般保温材料的等效屋顶在室外热气候作用下的隔热效果应该和绿化屋顶是等效的。根据前面计算得到的当量热阻值,选用节能设计中常用的保温材料膨胀聚苯板(EPS),它的材料参数为:干密度  $\rho_0 = 30 \text{ kg/m}^3$ ;导热系数  $\lambda = 0.042 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ;比热  $C = 1.38 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ;根据计算,厚度  $T = 0.047 \text{ m}$ ,铺设了该保温材料的屋顶就为绿化屋顶的等效保温屋顶。

用通过实验测试数据验证了的绿化屋顶建筑模型,与等效屋顶和绿化屋顶在同样的气候条件下进行模拟对比,将室内空调温度分别从  $25 \sim 29 \text{ }^\circ\text{C}$  设置,选取实验测试的典型日数据为外部气候参数,得参照屋顶、绿化屋顶和等效屋顶的屋顶内表面热流与室内温度的关系图(见图4)。

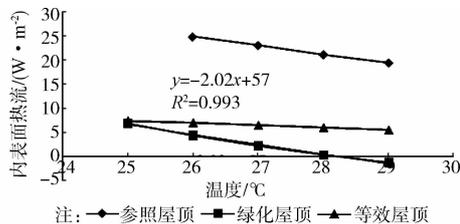


图4 3种屋顶内表面热流与室温的关系

Fig. 4 The relationship between the internal roof surface and the indoor temperature

从图4来比较3种屋顶形式,等效屋顶和绿化屋顶因较大的热阻,进入室内的热量都要远小于参照屋顶,当室内温度从  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  升高到  $29 \text{ }^\circ\text{C}$ ,3条热流曲线的走势是相同的,其热流与室温都成线性负相关,随着室内外温差的降低,热流强度都在逐渐降低,但是曲线降低趋势并不同步,绿化屋顶曲线的斜率要远大于等效屋顶,曲线下落很快,当室内温度  $29 \text{ }^\circ\text{C}$  时,其值已下降为负值。而等效屋顶斜率较小,虽和绿化屋顶同一个起点,但热流强度值下降较缓。绿化屋顶内表面热流与室温曲线的关联式为

$$\bar{q} = -2.02 \bar{t}_i + 57 \quad (5)$$

式中: $\bar{q}$ 为绿化屋顶内表面热流平均值,  $\text{W/m}^2$ ,  $\bar{t}_i$ 为绿化屋顶房间室内温度平均值,  $^\circ\text{C}$ 。由式(5)可得,

当室温为  $28.2 \text{ }^\circ\text{C}$  时,平均热流为0。

因等效屋顶是在室内空调温度  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  的实验下计算其热阻得来的,绿化屋顶与等效屋顶两条变化曲线在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时重合,表明此室内温度下,两屋顶隔热性能是等效的,但随着室内温度的升高,等效性在发生变化。显然也说明绿化屋顶在室温  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时的当量热阻不等于其他室温下的当量热阻,当量热阻与室内温度是有相关性的。

## 2.3 当量热阻随室内温度的变化规律

从表2的实验数据分析得知,随着室内温度的上升,绿化屋顶内表面热流从正变为负值,因此,完全可以推测屋顶内表面存在热流为零的状态,这在模拟中也得到了验证(见图4),在该状态,绿化屋顶不传热,成为了绝热构件,显然只有当绿化屋顶的当量热阻趋于无穷大,屋顶热流才会出现为0的情况。

通过模拟得到屋顶内表面温度变化值,根据式(4),计算得出不同室内温度下的屋顶绿化的当量热阻值,其随室内温度的变化见图5。

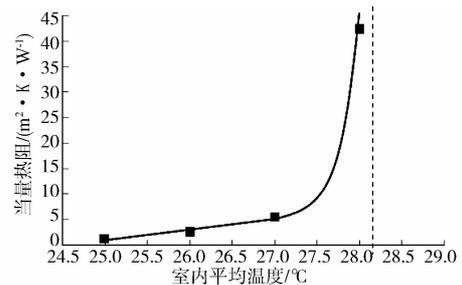


图5 屋顶绿化当量热阻与室内温度的关系

Fig. 5 The relationship between the equivalent thermal resistance and the indoor temperature

在图5中,曲线分为明显的2段,当室温低于  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  时,当量热阻与室温几乎是线性正相关关系,室内平均温度  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时,当量热阻为  $1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ;  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  时为  $5.5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ,但当室温超过  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  后,当量热阻曲线上迅速上升,在室温为  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  时当量热阻达到  $42 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 。

通过拟合,得到绿化屋顶当量热阻与室内温度的关联式为

$$R_E = 5.7859 \ln^2 \left( \frac{28.2 - \bar{t}_i}{3.2} \right) + 1.3846 \ln \left( \frac{28.2 - \bar{t}_i}{3.2} \right) + 1.5853 \quad (6)$$

式中: $R_E$ 为绿化系统的当量热阻值,  $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ ;  $\bar{t}_i$ 为绿化屋顶房间室内温度平均值,  $^\circ\text{C}$ 。通过式(6)可得当室内温度趋近  $28.2 \text{ }^\circ\text{C}$  时,绿化屋顶当量热阻趋近于无穷大,屋顶内表面热流接近为0,屋顶出现绝热状态。

## 2.4 讨论

绿化屋顶通过减少由屋顶进入室内的热量,显著降低室内温度,但室内温度的变化又反作用于绿化屋顶,会让传热方向发生变化,二者相互耦合。从前面的分析可知,主动式建筑中,在人体适应性舒适范围中室内温度的设定将会直接影响到绿化屋顶是否向室内传热。

在图 4 中可以看到,当量热阻曲线在室温较高时上升非常显著,越接近不传热的临界状态时热阻越大,室温相对较低时热阻增长不明显,而 25~27℃是空调房间常设定的室内温度值,显然,较低的室内温度没有充分发挥绿化屋顶全部的热阻功效,而对于被动式建筑,建筑室温稍高于空调房间但在人体适应性舒适范围内,更能充分发挥绿化屋顶的隔热功效。

另外,当量热阻随室内温度而显著变化表明绿化屋顶的隔热效果是动态变化的,而目前评价绿化屋顶热工性能用一固定的当量热阻值显然就不能真实反映绿化屋顶隔热特性。在图 3 中,室内平均温度超过 28.2℃时,传热方向发生了逆转,这种状态显然就不能用当量热阻来评价,这也说明用当量热阻来评价绿化屋顶热特性是有适用范围的,只有在该范围内,谈论当量热阻才有意义,其适用范围还有待于进一步研究。

## 3 结论

1)验证了绿化屋顶在被动式建筑中存在不向室内传热的状态,这一特性与一般保温屋顶不同,是绿化屋顶所特有的特性。

2)绿化屋顶的当量热阻值为一变量,用固定的当量热阻值没有充分评价绿化屋顶的隔热功效。绿化屋顶的当量热阻与室内温度正相关。

3)在被动式建筑人体适应性舒适室温范围内,绿化屋顶更能充分发挥隔热功效。

### 参考文献:

[1] 杨真静,唐鸣放,郑澍奎. 粗放型屋顶绿化隔热效果分析[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(4):124-128.  
Yang Z J, Tang M F, Zheng S K. Analysis on thermal insulation characteristics of extensive green roofs [J]. Journal of Civil, Architecture & Environmental Engineering, 2012,34(4):124-128. (in Chinese)

[2] 孙挺,倪广恒,唐莉华,等. 绿化屋顶热效应的观测试验[J]. 清华大学学报:自然科学版,2012,52(2):160-163.  
Sun T, Ni G H, Tang L H, et al. Experimental study of the thermal performance of a green roof [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012, 52

(2):160-163. (in Chinese)

[3] 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):91-95.  
Feng C, Zhang Y F, Meng Q L. Current research on the thermal properties on green roofs [J]. Huazhong Architecture, 2010(2):91-95. (in Chinese)

[4] 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. (in Chinese)

[5] JGJ 75—2012 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,2012.

[6] DBJ 50-071-2010 居住建筑节能 65%设计标准[S]. 重庆:重庆城乡建设委员会,2010.

[7] 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 Buildings, 2003, 35: 353-364.

[8] 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: 25-54.

[9] Takakura T, Kitade S, Goto E. Cooling effect of greenery cover over a building [J]. Energy and Buildings, 2000, 31: 1-6.

[10] Lin Y J, Lin H T. Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries [J]. Building and Environment, 2011, 46: 345-355.

[11] Lazzarin R M, Castellotti F, Busato F. Experimental measurements and numerical modeling of a green roof [J]. Energy and Buildings, 2005, 37: 1260-1267.

[12] Sittipong P, Pichai N. The energy consumption performance of roof lawn gardens in Thailand [J]. Renewable Energy, 2012, 40: 98-103.

[13] Jaffal I, Ouldoukhitine S E, Belarbi R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance [J]. Renewable Energy, 2012, 43: 157-164.

[14] 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):87-90.  
Tang M F, Zheng S K, Yang Z J. Thermal performance and energy analysis of green roof [J]. Journal of Civil, Architecture & Environmental Engineering, 2010, 32 (2): 90-93. (in Chinese)

[15] Kotsiris G, Androutsopoulos A, Polychroni E, et al. Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs [J]. Energy and Buildings, 2012, 45: 240-249.