

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.02.013

## 粗放式屋顶绿化的热惰性

唐鸣放, 王东

(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:** 屋顶绿化的热工性能是进行建筑节能工程设计和评价的依据, 但目前对屋顶绿化热工性能的研究很少关注热惰性。以一种粗放式屋顶绿化在自然通风状态下连续5个月的对比测量数据为依据, 采用统计分析方法研究了屋顶绿化对气候热作用波动的衰减和延迟特性。结果表明, 绿化屋顶与裸屋顶相比, 对气候热作用波动的平均衰减倍数提高了1倍以上, 延迟时间有所减少。

**关键词:** 屋顶绿化; 内表面温度; 热惰性

**中图分类号:** TU111.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2014)02-0084-05

## Thermal Inertia of Extensive Green Roof

Tang Mingfang, Wang Dong

(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:** Thermal performance of the green roof is an important basis for energy-efficient design and evaluation. However, the current studies on the thermal performance of the green roof seldom involve thermal inertia of the green roof. Based on a long-term experiment of an extensive green roof in natural ventilation state and a five-month ongoing measured data in summer, thermal inertia of the extensive green roof was studied by statistical analysis method. The results show that thermal decay to outdoor climate effect through green roof was increased by more than 100% and delay time of thermal response to outdoor climate on internal surface of the green roof was reduced in comparison with that of the bare roof.

**Key words:** Roof green, Internal surface temperature, Thermal inertia

当今城市面临着能源需求不断增大、城市热岛效应普遍增强和生态环境恶化等问题, 因此城市可持续发展需要大力开展建筑节能、抑制建筑能耗的快速增长, 同时还要广泛开展城市生态环境建设, 增加绿地、缓解城市热岛效应。在这种情况下, 屋顶绿化作为一种有效的节能生态综合措施受到广泛重视, 这不仅促进了屋顶绿化技术的应用和发展, 也激发了人们对屋顶绿化研究的更多兴趣。在改善热环境方面, 主要有屋顶绿化对微气候的影响和降低城市热岛效果的研究<sup>[1-2]</sup>。在建筑节能方面, 主要关注屋顶绿化的隔热效果和热工性能。目前已有各种屋

顶绿化降温节能效果测量的报道<sup>[3-7]</sup>, 也有屋顶绿化隔热效果的模拟研究<sup>[8-11]</sup>。屋顶绿化的热工性能可以直接应用于建筑节能工程, 通常使用与屋顶绿化隔热效果相同的保温材料层的热阻来表达, 并以测量数据为依据确定屋顶绿化当量热阻<sup>[12-15]</sup>。但是建筑材料层的热阻是稳态传热状态的性能参数, 在周期性非稳态传热过程中只能表达平均传热状态的热工性能。在室外周期性热作用下, 建筑围护结构还具有热惰性, 表现为内表面温度波幅衰减和相位延迟。在屋顶上覆土种植绿化植物后, 屋顶整体的热惰性增大, 在许多实际测量中, 已经得出屋顶绿化的

收稿日期: 2013-07-24

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2013BAJ11B05)

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。

内表面温度波动很小,说明屋顶绿化增大了温度波幅衰减,但屋顶绿化是否增大了相位延迟、是否有当量热惰性指标等问题值得研究。笔者以一种粗放式屋顶绿化的全夏季测量数据为依据,分析反映屋顶绿化热惰性的内表面温度波的衰减和延迟特性。

## 1 研究方法

### 1.1 实验方法

屋顶绿化的热惰性是对气候周期性作用的热反应,可以从屋顶绿化的隔热效果与气候参数之间的相关性来分析。屋顶绿化主要依靠植物遮阳、蒸发以及土层热阻达到隔热效果。植物遮阳的效果与植物种类、生长状态和覆盖程度有关,植物蒸发的效果与植物的蒸发特性和土层的含水量有关,土层热阻与土质材料及其含湿量有关。这些因素中,植物的状态和土层的含水量还是处于动态变化的过程中。植物的生长状态随季节变化,春、夏、秋三季会有不同的状态,土层含水量与降雨气候有关,也与人工浇水情况有关。因此,一般的屋顶绿化的隔热效果受气候因素的影响,也受人工管理因素的影响,而粗放式屋顶绿化基本上不用人工管理,其植物的生长状态和土层的含湿量的动态变化都是以年为周期的气候作用的结果。因此,选择粗放式屋顶绿化进行全夏季热工参数测量和分析,能反映气候作用下这种屋顶绿化的热惰性。

实验对象为重庆某多层住宅楼屋顶(见图1),屋面上有一部分为自然生长多年的草地,土层厚约100 mm。屋顶结构为架空通风双屋顶(见图2),两层屋面板之间的架空层高度为600 mm,前后开有通风口,气流通畅。因此,上层屋顶的下侧空间处于自然通风状态,其内表面温度直接反映屋顶隔热的效果。在裸屋顶和草地屋顶的内表面布置温度测点(见图2),测温仪为自记温度计TR-52,仪器精度为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ,仪器固定在伸入架空层内的长木棍上,仪器探头紧帖上层屋顶的内表面。布置温度测点的屋

顶所对应的房间,分别为两户相邻住宅的厨房,其窗户开启自然通风。在附近屋顶布置气象仪,为Davis小型气象站,自动测量太阳辐射照度、气温、湿度、风速、降雨量等气候参数,其中太阳辐射照度的精度为 $\pm 5\%$ ,气温精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。数据采集间隔为1 h,测量时间从5月1日持续到9月29日,共5个月,完全覆盖了整个夏季。



图1 测试屋顶

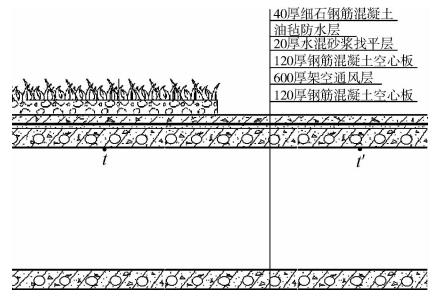


图2 屋顶构造和内表面温度测点

### 1.2 测量数据

测量期间,气温和太阳辐射照度的逐时变化见图3,在室外气候作用下,有、无草地的屋顶内表面温度的逐时变化比较见图4,按月平均的测量数据汇总见表1。从气候参数的变化来看,每月都不相同,这不仅直接影响屋顶的传热量,还影响土层的湿状态和植物状态。

气候对植物的影响是一种季节性的过程,从春季到秋季是草地植物的一个完整的生长周期,因此,下面以植物一个生长周期内的测量数据为依据,研究屋顶绿化对气候参数日变化作用的热惰性。

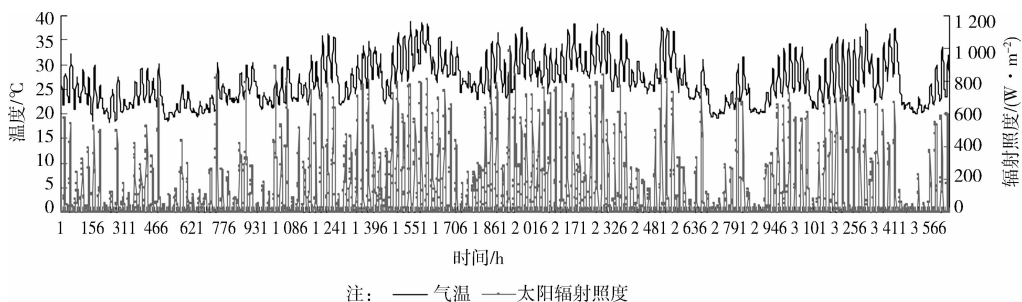


图3 气温和太阳辐射照度

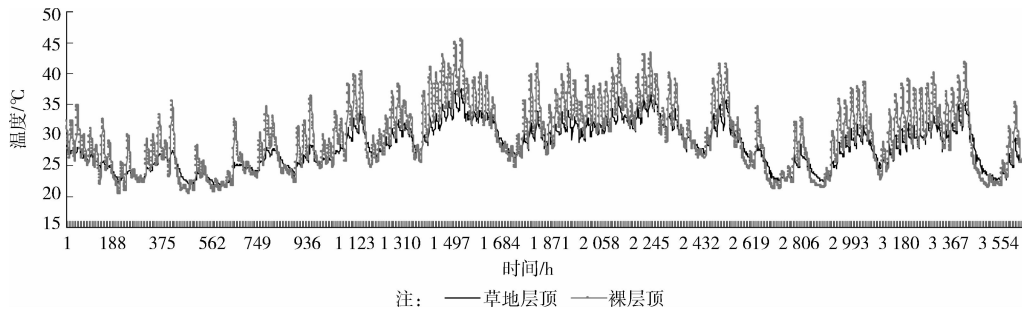


图 4 屋顶内表面温度

表 1 测量数据的月平均值

月份	气温/℃	太阳辐射照度/ (W·m <sup>-2</sup> )	相对湿度/%	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	降雨量/mm	草地屋顶内 表面温度/℃	裸屋顶内 表面温度/℃
5月	23.2	81	76	0.3	127	24.4	25.4
6月	27.3	134	70	0.4	91	28.2	30.5
7月	29.9	165	66	0.6	77	31.4	34.1
8月	26.2	108	76	0.3	150	27.9	29.0
9月	26.8	129	66	0.6	34	28.1	30.2

### 1.3 分析方法

裸屋顶具有明确的热工性能,用于作为绿化屋顶隔热的一种比较,因此屋顶绿化在实际气候下的热惰性采用对比分析法。通风屋顶内表面温度受气温影响大,难以确定屋顶对室外热作用波动的衰减和延迟,因此,采用处于相同通风环境下的绿化屋顶和裸屋顶的内表面温度波幅相比较的方法分析屋顶绿化对室外气候波动的衰减性。

夏季气候参数并不是每天都相同的周期函数,这就导致屋顶对室外热作用波动的衰减和延迟每天都可能不同。在图 4 中,两个屋顶内表面温度每天最大值的时间差不是固定值,为此对夏季长时间连续测量数据采用统计分析的方法,引入延时相关性的概念。屋顶的热惰性使得室外热作用波在内表面的反应出现延迟,如果延迟时间为  $\tau$  h,则将内表面温度曲线向前移动  $\tau$  h,就会与室外热作用波动曲线有最大的相关性。反过来,可以通过逐时向前移动内表面温度曲线,使其与室外热作用波动曲线的相关性达到最大来确定延迟时间。因此定义内表面温度对室外气候参数的延时相关系数如下:

$$R(\tau) = R_{\tau}(x, t) = \frac{\sum x(k)t(\tau+k)}{\sqrt{\sum x^2(k)} \sqrt{\sum t^2(k)}} \quad (1)$$

式中:  $R(\tau)$  为延时相关系数,  $x$  表示室外气候参数逐时值,  $t$  表示内表面温度逐时值。

按照式(1)计算延时相关系数随时间  $\tau$  的变化,找出最大延时相关系数对应的时间  $\tau$ ,即为延迟时

间。用太阳辐射照度与气温的实测数据计算延时相关系数,找出达到最大值的时间为 3 h,这与气温对于太阳辐射照度的实际延迟时间基本相符,说明这种方法确定延迟时间是合理的。此外,最大延时相关系数越大,表明气候参数的波动对内表面温度波动的影响越大;达到最大延时相关系数的时间越短,说明气候参数的波动在内表面的反应越快。

## 2 热惰性分析

### 2.1 温度波幅

根据测量数据统计得到的屋顶内表面温度的日变化幅度每天都不相同,如图 5、6 所示。裸屋顶的内表面温度变化幅度的大小与天气有关,晴天变化幅度大,阴雨天变化幅度小,基本上无月份差别。绿化屋顶的内表面温度变化幅度除了与天气有关,还与季节有关,春季变化幅度小,然后增大。这是因为春季气候温和,降雨频繁,植物生长茂盛,绿化层对太阳辐射的遮挡和蒸发效果好,因此屋顶内表面温度变化幅度小。进入夏季以后,气温升高,降雨频率低,在太阳辐射和高温作用下,土层变得干燥,大量植物干枯,遮阳效果和蒸发效果都变差,屋顶抵抗热作用的能力降低,导致内表面温度变化幅度增大。

### 2.2 衰减倍数

屋顶对室外气候热作用波动的衰减倍数为室外热作用波幅与内表面温度波幅的比值。在相同的室外气候热作用下,绿化屋顶与裸屋顶的衰减倍数的比值,即为绿化屋顶相对于裸屋顶的相对衰减倍数,其大小为裸屋顶与绿化屋顶的内表面温度波幅的比值。

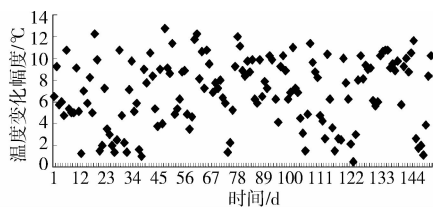


图 5 裸屋顶内表面温度变化幅度

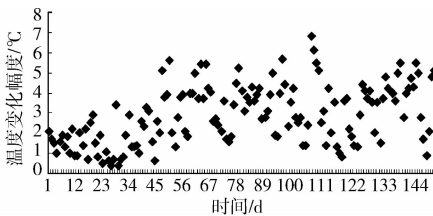


图 6 绿化屋顶内表面温度变化幅度

图 7 为测量期间绿化屋顶的相对衰减倍数,可以用随日期变化的拟合曲线表示。从 5 月 1 日开始,曲线由大逐渐变小,进入 6 月中旬以后曲线趋于平直。拟合曲线反映了这种粗放式屋顶绿化的热惰性随季节变化的特点。

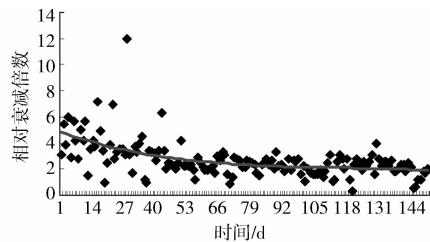


图 7 绿化屋顶的相对衰减倍数

将绿化屋顶各月的相对衰减倍数取平均值,得到图 8。可见,就夏季 3 个月来看,屋顶绿化的相对衰减倍数是 6 月大、7 月和 8 月小,最小值为 2。

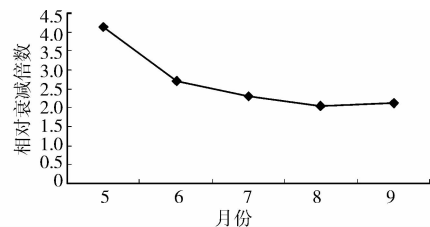


图 8 各月绿化屋顶的平均相对衰减倍数

### 2.3 延迟时间

屋顶对室外气候热作用波动的延迟时间为内表面温度最大值的时间与室外热作用波动最大值的时间之差。在相同的室外气候热作用下,绿化屋顶与裸屋顶的内表面温度最大值的时间之差,即为绿化屋顶相对于裸屋顶的相对延迟时间,其值为正(负)时,表示绿化屋顶对室外气候热作用波动的反映比

裸屋顶慢(快)。

图 9 为测量期间绿化屋顶的相对延迟时间,可以用随日期变化的拟合曲线表示。曲线从 5 月 1 日开始缓慢下降,进入 6 月中旬以后曲线趋于平直。曲线上的数值为负值,说明绿化屋顶对室外气候热作用波动的反映比裸屋顶更快。

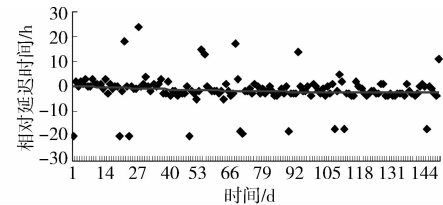


图 9 绿化屋顶的相对延迟时间

将绿化屋顶各月的相对延迟时间取平均值,得到图 10。可见,5 月份绿化屋顶的平均相对延迟时间的数值最小,其余月份的平均相对延迟时间基本相同。表明 5 月份绿化屋顶对室外气候热作用波动的延迟时间与裸屋顶相近,其余月份绿化屋顶对室外气候热作用波动的延迟时间比裸屋顶少 2 h 左右。

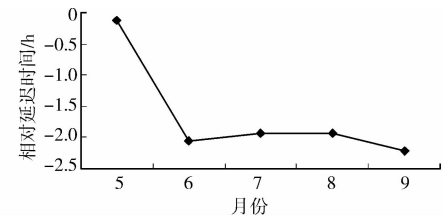


图 10 各月绿化屋顶的平均相对延迟时间

室外气候对屋顶的热作用包括气温和太阳辐射,可分别计算屋顶对气温和太阳辐射作用的延迟时间。使用气候参数和屋顶内表面温度测量数据,按照式(1)计算出屋顶对气温和太阳辐射的延时相关系数,找出达到最大值的时间  $\tau$ ,可确定延迟时间。

图 11 为屋顶对气温的延时相关系数变化曲线。从图上可以看出,在每天 24 h 的热作用周期波动下,延时相关系数也呈现 24 h 的周期波动,并且波动曲线逐渐下降,这说明第 1 天的气温变化对第 2 天屋顶内表面温度的影响减小。而且裸屋顶曲线下降比绿化屋顶更快,这也表现了绿化屋顶的蓄热性。在延时数为 24 h 内,裸屋顶的延时相关曲线波动大,最大延时相关系数为 0.96,说明裸屋顶内表面温度对当天气温逐时变化的反应强;绿化屋顶的延时相关曲线波动小,最大延时相关系数为 0.85,并且各时间的延时相关系数都在 0.7 以上,说明当天各时间的气温对绿化屋顶内表面温度都有较大影响。从图上还可以看出,两种屋顶对当天气温变化

的反应延迟是不同的,绿化屋顶的延迟时间为 2 h,裸屋顶的延迟时间为 3 h,即绿化屋顶对气温变化的反应比裸屋顶更快。

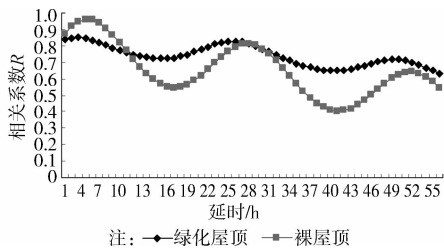


图 11 屋顶内表面温度与气温的延时相关性

图 12 为屋顶对太阳辐射照度的延时相关系数变化曲线。同样可见,裸屋顶对太阳辐射逐时变化的反应比绿化屋顶更强,而且两条曲线下降都比较慢,说明当天太阳辐射对第 2 天屋顶内表面温度还有影响。图上还看出,绿化屋顶对当天太阳辐射的延迟时间为 3 h,裸屋顶的延迟时间为 6 h,即绿化屋顶对太阳辐射变化的反应比裸屋顶更快。

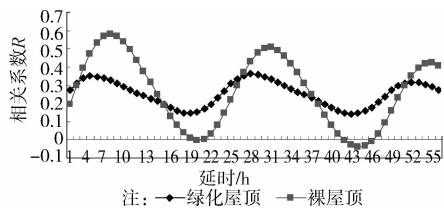


图 12 屋顶内表面温度与太阳辐射照度的延时相关性

以上针对气温和太阳辐射的作用,由测量数据统计分析得出,绿化屋顶的延迟时间比裸屋顶更短,这个结果的正确性可以用一段时间的测量数据进行验证。图 13 是连晴天的屋顶内表面温度逐时变化,可以看出,绿化屋顶内表面温度达到最大值的时间比裸屋顶更早,对此现象的科学解释有待进一步研究。

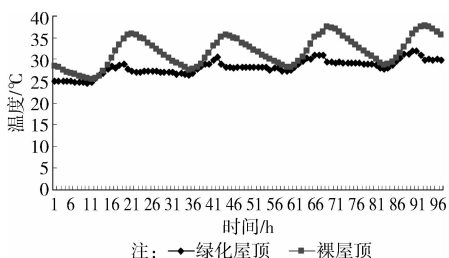


图 13 屋顶内表面温度

### 3 讨论

1)在工程应用中屋顶绿化的衰减倍数取值。根据图 5,粗放式屋顶绿化的相对衰减倍数是变化的,拟合曲线的最小值为 2。因此取屋顶绿化的相对衰

减倍数为 2,即屋顶绿化的衰减倍数为裸屋顶的衰减倍数的 2 倍,这样就可以保证屋顶绿化的隔热效果。根据屋顶构造及材料的热物性参数,可以计算出裸屋顶在夏季隔热情况下的衰减倍数为 3.6,因此屋顶绿化的衰减倍数可取为 7.2。

2)屋顶绿化的热惰性是否可用当量热惰性指标表达。如果把屋顶上覆土种植绿化植物看成屋顶上设置了保温材料层,那么按照围护结构周期传热原理,屋顶增加保温材料层后热惰性会增大,内表面温度波的衰减和延迟都会增加。但上面的实验分析得出,屋顶增加绿化层后,内表面温度波的延迟时间不是增加而是减少。这说明屋顶绿化的热惰性与保温材料层的热惰性有区别,使用当量热惰性指标不能完全表达屋顶绿化的热惰性。

### 4 结论

1)在屋顶下面空间自然通风状态下,粗放式屋顶绿化对夏季气候热作用波动的衰减倍数在 5 月最大,8 月最小,平均衰减倍数为裸屋顶的 2 倍以上。

2)屋顶覆土绿化后,对气温和太阳辐射热作用波动的反应更快,延迟时间减少;反应强度减弱,内表面温度与气候参数的最大延时相关性降低。

3)屋顶绿化的热惰性不同于保温材料层的热惰性,找不出能反映屋顶绿化的衰减性和延迟性的当量热惰性指标。

#### 参考文献:

- [1] Takebayashi H, Moriyama M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island [J]. *Building and Environment*, 2007, 42: 2971-2979.
- [2] Alexandria E, Jones P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates [J]. *Building and Environment*, 2008, 43: 480-493.
- [3] 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 D G, Xue W C. Effect of greening on light roofing on lowering temperature [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2006, 22(1): 53-55.
- [4] 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.
- [5] 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]. *Building and Environment*, 2008, 24(1): 99-101.
- [6] Fang C F. Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40: 1048-1052.

(下转第 125 页)

- membrane bioreactor processing technology [J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(1): 66-69.
- [3] Brannock M, Wang Y, Shane C. Mixing characterisation of full-scale membrane bioreactors; CFD modelling with experimental validation [J]. *Water Research*, 2010, 44(10): 3181-3191.
- [4] Wang Y, Brannock M, Shane C, et al. CFD simulations of membrane filtration zone in a submerged hollow fiber membrane bioreactor using a porous media approach [J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 363(1/2): 57-66.
- [5] Darcovich K, Dal-Cin M M, Ballèvreb S, et al. CFD-assisted thin channel membrane characterization module design [J]. *Journal of Membrane Science*, 1997, 124(2): 181-193.
- [6] Brans G, van der Sman R G M, Schro C G P H, et al. Optimization of the membrane and pore design for micro-machined membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 278(1/2): 239-250.
- [7] 员文权, 杨庆峰. 计算流体力学在反渗透膜分离过程中的应用[J]. *化工进展*, 2008, 27(9): 1357-1363.  
Yuan W Q, Yang Q F. Application of computational fluid dynamics in reverse osmosis membrane separation process [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2008, 27(9): 1357-1363.
- [8] Mercier-Bonin M, Langne C, Fonade C. Influence of a gas/liquid two-phase flow on the ultrafiltration and microfiltration performance; case of a ceramic flat sheet membrane [J]. *Journal of Membrane Science*, 2000, 180(9): 93-102.
- [9] Taha T, Cui Z F. CFD modeling of gas sparged ultrafiltration in tubular membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2002, 2(10): 13-27.
- [10] Phattaranawik J, Fane A G, Pasquier A C S, et al. Membrane bioreactor with bubble-size transformer; design and fouling control [J]. *AIChE Journal*, 2007, 53(4): 243-248.
- [11] Bodmer S, Imark C, Kneubühl M. Biogenic amines in foods; histamine and food processing [J]. *Inflammation Research*, 1999, 48(2): 296-300.
- [12] Latorre-Moratalla M L, Bover-Cid S, Aymerich T, et al. Aminogenesis control in fermented sausages manufactured with pressurized meat batter and starter culture [J]. *Meat Science*, 2007, 75(7): 460-469.
- [13] Docom G, Puech F P, Cabassud C. Air sparging with flat sheet nanofiltration a link between wall shear stress and flux enhancement [J]. *Desalination*, 2002, 14(5): 97-102.
- [14] Martinelli L, Guigui C, Line A. Characterisation of hydrodynamics induced by air injection related to membrane fouling behaviour [J]. *Desalination*, 2010, 250(2): 587-591.
- [15] Fazzolari A, Gauger N R, Brezillon J. Efficient aerodynamic shape optimization in MDO context [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2007, 20(3): 548-560.
- [16] Kroll N, Gauger N R, Brezillon J, et al. Flow simulation and shape optimization for aircraft design [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2007, 20(3): 397-411.

(编辑 郭飞)

(上接第88页)

- [7] D'Orazio M, Perna C D, Giuseppe E D. Green roof yearly performance; A case study in a highly insulated building under temperate climate [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 55: 439-451.
- [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] 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.
- [10] Sailor D J. A green roof model for building energy simulation programs [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40: 1466-1478.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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]. *HV&AC*, 2006, 36(10): 111-113.
- [14] 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 thermal properties of green roofs [J]. *Architectural Technology*, 2010(2): 91-94.
- [15] 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.

(编辑 胡英奎)