

Energy Efficiency on Green Roof

Mingfang Tang, Ke Wang, Lin Jiang

Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Chongqing, Chongqing, China

tmf@cqu.edu.cn

Abstract: Green roof technology and its application were described. Energy efficiency of green roof was measured by experimental methods in summer. The results shown that the green on roof could effectively save air-condition electric energy consumptions about $0.1 \text{ kWh/d}\cdot\text{m}^2$, and reduced heat flow about 70%. In addition, energy saving systems engineering of green roof were discussed.

Keywords: green roof ; energy efficiency ; thermal environment

屋顶绿化“种”能效

唐鸣放, 王科, 蒋琳

重庆大学建筑城规学院, 重庆, 中国, 400044

tmf@cqu.edu.cn

摘要: 本文介绍了屋顶绿化技术及其应用情况, 采用实验方法测量了屋顶绿化的节能效率, 得出夏季空调时绿化屋顶比未绿化的屋顶平均每天节电 0.1 kWh/m^2 左右, 传热量减少 70% 以上。此外还讨论了屋顶绿化改善城市热环境、全寿命周期节能材料、气候利用等节能系统工程。

关键词: 屋顶绿化; 建筑节能; 热环境

1 引言

能源和环境是当今世界面临的重大问题, 解决能源问题的途径不外乎是开源和节流, 开源即是开发新的能源, 节流即是在能源使用末端采取节能措施, 提高能源效率。为了应对能源需求日益增长和保护环境的双重挑战, 以种植方式作为开源节流的各项措施受到世界关注。20 世纪 70 年代以来, 一些发达国家兴起了“种”能源的热潮, 美国、巴西以及欧洲等国家或地区以种植玉米、甘蔗、油菜等能源作物为原料制取酒精、燃料油等液体生物燃料, 打开了新的替代性能源窗口^[1]。在节能方面, 近年来屋顶绿化在许多国家得到了普及和发展, 在建筑上种植绿化植物不仅改善了城市生态环境, 同时还减少了夏季空调能耗, 说明屋顶绿化可以“长”出节能效果。

对于改善夏季室内热环境而言, 空调能耗主要用于吸收建筑围护结构传热量, 而屋顶绿化的作用则是减少屋顶传热量, 两者对屋顶来说是异曲同工, 但成本却大不相同。空调所消耗的是高品位的电能, 而绿

化所消耗的是阳光、空气、雨水等生物气候资源, 它们可再生、可持续。因此在建筑上“种”能效大有可为。

2 屋顶绿化技术及其应用

按照屋顶绿化规范的定义, 屋顶绿化是在高出地面以上, 周边不与自然土层相连接的各类建筑物、构筑物等的顶部以及天台、露台上的绿化, 也包括在建筑上种植的垂直绿化等形式。因此屋顶绿化包括了在建筑上种植的所有绿化形式。

屋顶绿化的构造要满足植物生长需要, 要解决好排水、防水等要求。构造层由上至下分别为绿化植物层、种植基质层、隔离过滤层、排(蓄)水层、防水层、屋顶结构层等(图 1)。

屋顶绿化形式多样, 大致可以分为花园式屋顶绿化和简单式屋顶绿化两大类, 其中花园式屋顶绿化的土层厚、荷载大, 植物丰富, 生态效益和景观效果好; 简单式屋顶绿化适用于荷载较轻的屋顶, 通过种植耐旱草坪、地被、灌木或可匍匐的攀援植物等进行屋顶覆盖绿化, 达到显著的滞尘和控温效果。

资助信息: 国家自然科学基金项目(50978261)资助

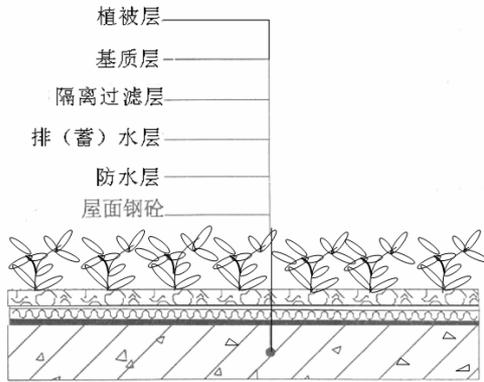


Figure 1. Construction of green roof
图 1. 种植层构造

在南方许多地区,近 20 年来修建的民用建筑大多可以进行上述两类屋顶绿化。许多住宅的顶层因为可以建设屋顶花园而成为房地产的卖点,居民自建的屋顶绿化形式多种多样、丰富多彩,成为城市立体空间绿化的重要部分。

对于上个世纪 70、80 年代建成的既有住宅,屋顶荷载轻,大多没有上人通道,按照相关规范要求是不适宜建设屋顶绿化。针对这类建筑屋顶,近年来国内外开展了相关技术研究^[2-3],取得了实用效果。植物方面主要选用景天科耐旱植物,它们大都具有根系浅,耐候性强的特征,可以在降雨丰富的南方湿热地区薄土层上自然生存。目前轻型屋顶绿化技术已在上海、广州等南方城市应用。

因此,对于各种新建和既有民用建筑来说,基本上都能够根据承载能力找到其相适宜的屋顶绿化形式,基本上不存在技术障碍。

3 屋顶绿化节能试验

3.1 试验内容与方法

试验对象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。在种植盘内放置基质材料后,总厚度约为 100mm,湿重量达到 100kg/m²,适用于一般荷载的屋顶。种植景天科植物佛甲草后可直接放置在屋顶上^[4]。

试验采用对比方法在上海进行。两间相邻房间及其屋顶作为对比实验对象,除了一个屋顶放置了绿化、另一个为裸屋顶以外,两对比房间的空间大小、围护结构、室内空调设备完全相同。

测量主要内容为室外气候参数、屋顶表面温度、屋顶进入室内的热流和房间空调耗电量。测量间为:

2007. 7. 18~8. 18。

3.2 试验结果及分析

3.2.1 空调节电量

在为期一个月的空调耗电量测试期间,室外气候处于最热月天气,每天有绿化屋顶的房间的空调耗电量总是低于无绿化屋顶的房间,两者之差即为绿化屋顶的节电量,图 2 为绿化屋顶每天的节电量情况。一个月期间有、无绿化屋顶的房间所消耗的空调电量分别为 310.7 kWh 和 370.2kWh,绿化屋顶共节省电量近 60 kWh,平均每天节省电量约 2 kWh,单位面积屋顶绿化在夏季空调期间平均每天节电 0.1 kWh 左右。

按此推算,100m²的顶层房间,对未采取保温隔热措施的屋顶进行绿化后,夏季空调期间每月可减少房间空调用电量 300 kWh 左右。

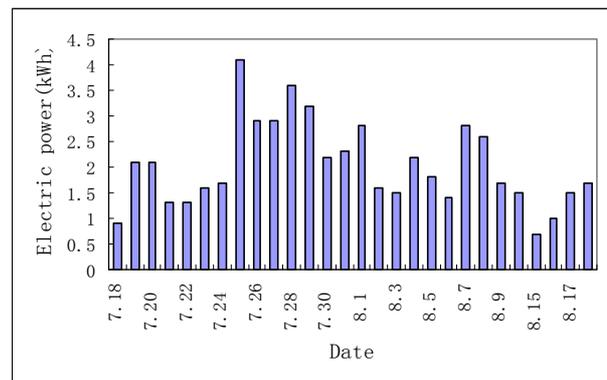


Figure 2. Aaving electricity of green roof per day
图 2. 屋顶绿化每天节电量

3.2.2 隔热分析和讨论

选择测量期间连晴 4 天的数据分析屋顶绿化的隔热效果。图 3、图 4 为屋顶内表面温度和热流的变化。在同样的室外气候和同样的室内空调控制下,两房间的室内温度和屋顶内表面各参数都有不同程度的差别,表 1 为测量数据平均值。下面从室内热环境和节能两方面来讨论。

从室内热环境来说,室内温度和屋顶内表面温度是两个重要参数。尽管两房间温度设置相同,但绿化屋顶的房间温度更稳定,温度波幅为 1.1℃,而对比屋顶的房间温度波幅为 2.2℃,两者相差一倍。从屋顶内表面温度对比来看,屋顶绿化的优势非常明显。绿化屋顶内表面温度平均值为 26.0℃,而对比屋顶内表面温度平均值为 29.3℃,两者相差 3.3℃;绿化屋顶内表面温度波幅仅为 0.9℃,而对比屋顶内表面温度波幅为 6.5℃,两者相差 7 倍。因此屋顶绿化对于

空调房间的舒适性有较大的提高。

从节能来说，屋顶传热密度大小直接影响空调能耗。从屋顶内表面热流对比可以看出，不论是平均值还是波动幅度，差别都很大。两个屋顶的热流平均值分别为 6.9W/m^2 和 26.6W/m^2 ，两者相差 73%；两个屋顶的热流波幅分别为 6.9W/m^2 和 37.9W/m^2 ，绿化屋顶热流波动不及对比屋顶的 1/5。这说明屋顶绿化不仅减少了空调用电量，还降低了用电负荷，对削减夏季用电高峰有重要意义。

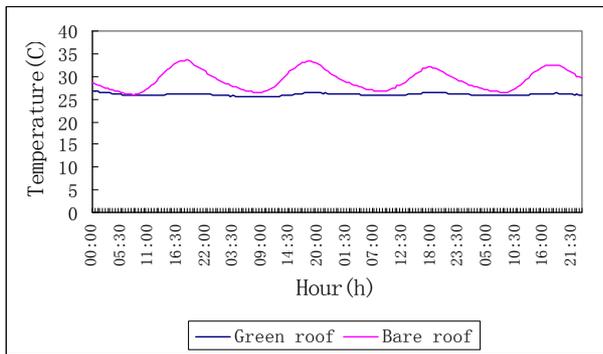


Figure 3. Internal surface temperature on roof
图 3. 屋顶内表面温度

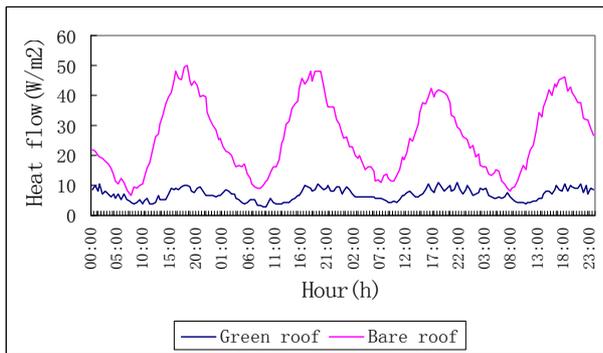


Figure 4. The heat flux from the roof
图 4. 屋顶进入室内的热流

Table 1. Average measuring data
表 1. 测量数据平均值

测量屋顶	室外气温 (°C)	室内气温 (°C)	屋顶内表面温度 (°C)	屋顶内表面热流 (W/m ²)	热流减少率 (%)
绿化屋顶	30.8	25.0	26.0	6.9	73
对比屋顶		25.4	29.3	26.2	

4 屋顶绿化节能系统工程

4.1 降低环境温度

屋顶绿化带来的节能效益不仅体现在改善屋顶下面房间的热环境、直接减少房间空调用电量，而且还体现在降低屋顶外表面温度，减少城市硬化表面对空气增温的强度，从而降低城市热岛效应，减少城市建筑空调用电量。据估计，夏季空调期间室外温度升高 1°C ，空调能耗将增大 5%~10%。因此降低环境温度也是屋顶绿化节能的贡献。

屋顶绿化的降温效果与绿化植物的种类、密集覆盖程度有关。实验测量表明，一般草地覆盖式屋顶绿化最高可降低屋面温度 $15\sim 20^\circ\text{C}$ ，如图 5 中屋顶有、无绿化部分红外热像图所示^[5]。

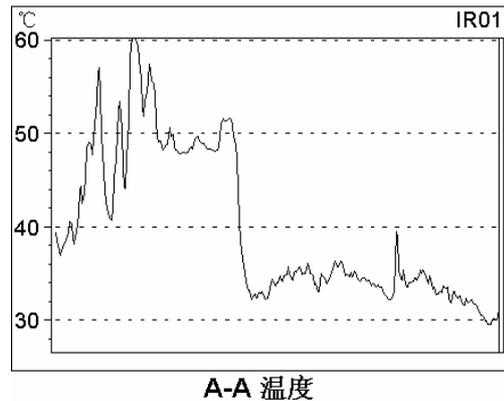
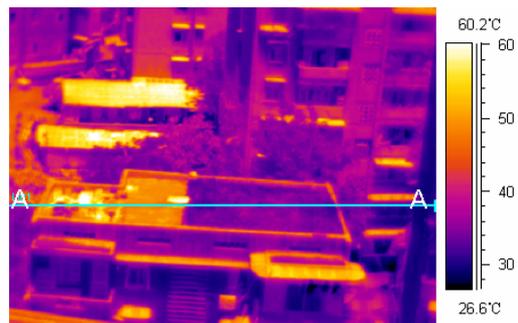


Figure 5. Comparison of outside surface temperature
图 5. 屋顶外表面温度比较

屋顶绿化的降温效果来源于绿化植物对太阳辐射的热反应机理。据研究报告，太阳辐射投射到植被表面后，约有 20% 被反射，80% 被吸收。由于植被叶面朝向天空，反射到天空的比率较大。在被吸收的热量中，通过一系列复杂的物理化学生物反应后，很少部分储存起来，大部分转移出去，其中很大部分通过蒸腾作用转变为水分的汽化潜热，即植被与环境的热交换中，潜热交换占绝大部分，显热交换占少部分。潜热交换的结果是增加空气湿度，显热交换的结果是提

高空空气温度。绿化植物对环境增湿不增温。

4.2 全寿命周期节能材料

屋顶绿化能减少房间空调用电量是因为绿化层增强了屋顶隔热的功能,即提高了屋顶夏季的热工性能,其作用相当于在屋顶结构中增加了保温隔热材料。

在上面介绍的试验中,若采用保温隔热措施达到屋顶绿化同样的隔热效果,需要增加热阻 $1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 左右^[6],相当于增加 40mm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料或 200mm 厚的加气混凝土。

在屋顶上设置绿化和保温材料都能达到同样的节能效果,但从全寿命周期节能减排来说,绿化的能效更高。任何保温材料的生产都需要消耗能源和资源,同时也会产生污染,而绿化种植材料不消耗能源,并且可以重复和循环使用,还可以消化城市垃圾等废弃物,发展循环经济,实现全寿命周期节能环保。

4.3 利用气候资源节能

人们消耗能源改善室内环境是因为气候的问题,气候带来了建筑能耗的问题,同时也提供了节能的生态途径。夏季气候具有“弹性”,既有高温时候也有舒适时候。夏季存在昼夜温差,利用夜间低温空气通风降温、冷却房间,可使室内最高温度比室外低 $3\sim 5^\circ\text{C}$,平均温度低 1°C 左右^[7]。在建筑围护结构中采用相变材料蓄存夜间冷量,白天释放到室内,可使房间白天温度降低 3°C 左右^[8]。夏季还存在晴雨相间天气,雨天不仅提供了冷却建筑的低温空气,降雨还提供了晴天建筑表面被动蒸发冷却的基本条件。我国南方地区降雨丰富,年降雨量在 1000mm 以上,大部分集中在 5~9 月,这为开展城市屋顶绿化提供了优越的气候条件。

屋顶绿化节能在夏季,但对气候的利用在全年。春季,阳光充足、雨水丰富、气候温和,滋润绿化植物快速生长,达到茂盛状态;夏季,茂密的植物为屋顶遮阳隔热,达到节能的效果;秋、冬季,植物休养生息。因此在气候作用下屋顶绿化是一项动态的节能系统工程。

5 结语

目前建筑节能正在快速推进,与此相应的节能技术措施更加多样化,有普遍适应世界各地冬季和夏季

节能要求的高效保温技术,也有只适应湿热地区夏季节能的地方技术,它们各有特色。在众多的节能技术措施中,屋顶绿化能够通过气候的利用“生长”出节能效果,附加生态价值。因此在节能设计中应该提倡生态优先的原则,发展利用自然能源节能降耗的技术措施。

致 谢

本文在上海完成的屋顶绿化节能实验得到了上海市农业科学院生态环境保护研究所赵定国高级农艺师、上海世源屋顶绿化有限公司薛伟成高级工程师等的大力帮助,在此表示衷心感谢。

References (参考文献)

- [1] Zhou Haixia; Yuan Lihong Exploitation and utilization on energy plant. Sciencepaper Online. 2008(3). P179-183
周海霞,袁丽红. 能源植物的开发与利用. 中国科技论文在线 2008(3). P179-183
- [2] Zhao Yuting, Hu Yonghong, Zhang Qixiang. Development of research on selection of green roof plants. Shandong Forestry Science and Technology. 2004,151(2). P27-29
赵玉婷,胡永红,张启翔,屋顶绿化植物选择研究进展,山东林业科技,2004(2). P27-29
- [3] Zhao Dingguo. Roof greening and light weight flat roof greening technology, China Building Waterproofing. 2004(4). P17-19
赵定国,屋顶绿化及轻型平屋顶绿化技术,中国建筑防水,2004(4). P17-19
- [4] Zhao Dingguo, Xue Weicheng. Effect of light roof greening on saving electric power consumption. Acta agriculture ShangHai. 2008; 24(1): P99-101
赵定国,薛伟成,轻型屋顶绿化的节电效果. 上海农业学报,2008, 24(1), P99-101
- [5] Tang Mingfang, Wang Do, Zheng Kaili. Green and Thermal Environment of Maintain City. Journal of Chongqing Jianzhu University, Vol.28, No.2, 2006. P1-3
唐鸣放,王东,郑开丽. 山地城市绿化与热环境. 重庆建筑大学学报,2006(2), P1-3
- [6] Tang Mingfang, Zheng Shukui, Yang Zhenjing. Thermal performance and energy analysis of green roof, Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering. Vol.32, No.2, 2010, P90-93
唐鸣放,郑澍奎,杨真静,屋顶绿化节能热工评价,土木建筑与环境工程,2010(2). P90-93
- [7] Fu Xiangzhao. Buildings Technique of Energy Efficiency in Hot Summer and Cold Winter Zones. China Building Industrial Press, 2002. P247-252
付详钊, 夏热冬冷地区建筑节能技术, 中国建筑工业出版社, 2002. P247-252
- [8] Kang Yangbin, Jiang Yi, Zhang Yinping. Experiment of night ventilation with PCM packed bed storage system. Journal of heating ventilating and air conditioning, 2003(2), P24-26
康艳兵,江亿,张寅平,夜间通风相变储能堆积床系统降温效果实验研究,暖通空调,2003(2), P24-26