

自然状态草地式屋顶绿化隔热特性分析^{*}

重庆大学 唐鸣放[☆] 杨真静 李 莉

摘要 在夏季自然通风状态下对重庆有绿化屋顶和无绿化屋顶内表面温度和气候参数进行了测量。通过对测量数据的统计分析,得到以下结论:屋顶绿化对降低屋顶内表面最高温度的效果非常显著,降低平均温度效果稍差,热天气有绿化屋顶内表面对空气的总平均增温量为无绿化屋顶的 1/4 左右;以天为周期,有绿化屋顶内表面对空气的增温量与太阳辐射照度的变化有较强的反向性,以一段晴雨天气为周期,这种反向性减弱,而以整个夏季的热天气为周期,这种反向性转变为很强的正向性;对于无绿化屋顶,无论热作用周期的长短,内表面对空气的增温量与太阳辐射照度的变化都呈现很强的正向性。

关键词 屋顶绿化 隔热特性 内表面温度 太阳辐射照度 降水 最高增温量 平均增温量

Thermal insulation characteristics of green roofs in natural state

By Tang Mingfang[★], Yang Zhenjing and Li Li

Abstract Measures internal surface temperatures of roofs with and without greening and climate parameters under natural climate in Chongqing summer. Analysing the field test data, obtains following results. The effect of roof greening on reducing the highest temperature on the internal surface is remarkable, the effect on reducing the mean temperature is slightly less notable, but the sum of mean temperature on the internal surface exceeding air mean temperature for green roofs is about 1/4 of that for roofs without greening during hotter days. The air temperature increase for green roofs is greatly reverse to solar irradiance during a day, the reversion is weakened during a period of days alternatively fine and rainy, and the reversion is transformed into a strong positive tropism during all hotter days of a summer. For roofs without greening, the air temperature increase is all strongly positive to solar irradiance during a random period of days.

Keywords roof greening, thermal insulation characteristic, internal surface temperature, solar irradiance, rainfall, maximum temperature increase, mean temperature increase

[★] Chongqing University, Chongqing, China

^①

0 引言

在高密度的城市空间,屋顶绿化以其节能、节地、节水、改善环境等综合效益而受到广泛关注,尤其是荷载轻,管理简便,基本无需浇水、施肥、修剪、除草等措施的轻型屋顶绿化技术近年来取得了可喜的进展^[1-3],以耐旱、耐寒、耐贫瘠等抗逆指标为

主结合景观效果的各种草地式屋顶绿化技术已经走向市场。虽然草地式屋顶绿化在以年为周期的

^{①☆} 唐鸣放,女,1957 年 9 月生,博士,教授
400045 重庆市沙北街 83 号重庆大学 B 区建筑城规学院
(023) 65120704
E-mail: tmf@cqu.edu.cn

收稿日期:2006-04-20

一次修回:2006-11-15

二次修回:2007-01-29

^{*} 国家自然科学基金资助项目(编号:50478066)

自然气候作用下具有客观存在的可重复性的隔热效果,即具有隔热材料和产品的技术性能,然而如何确定其热工性能还有待研究。尽管国内外对屋顶绿化的研究不少,既有热湿迁移数值模拟又有实验实测研究^[4-9],但研究的都是一种典型热气候状态下,即典型夏季晴天状态下的效果,这种研究模型不能完全反映自然气候作用下草地式屋顶绿化隔热特性,因为依靠自然气候生长的屋顶绿化,其内表面温度不仅是热气候作用的结果,还是降水利用的结果,晴雨不同的天气热作用可能会综合反映在屋顶内表面上。因此有必要研究屋顶绿化在自然气候作用下的隔热特性。

1 研究方法和实验概况

屋顶绿化隔热主要依靠植物遮阳和蓄存降水的蒸发降低太阳辐射得热量,从而达到降低屋顶外表面热作用的效果,因此研究屋顶绿化隔热应该针对太阳辐射热。为此,选择重庆某住宅架空通风双层屋顶作为实验对象,屋顶面积约 100 m²,其中有 50 m² 的屋面覆土长草,土层厚度约 100 mm,屋顶构造见图 1。由于屋顶通风层自然通风,通风层的空气温度可以近似于室外空气温度,因此上层屋顶上下两侧的热作用差别在于上侧有太阳辐射和降水作用而下侧没有,此时上层屋顶内表面的温度最能反映屋顶对太阳辐射的隔热作用。因此温度测点布置在有绿化和无绿化屋顶内表面(见图 1),太阳辐射照度、气温、湿度、风速、降水量等气候参数同步测量。数据采集时间间隔为 1 h,测量时间为 2005 年 4 月 30 日到 9 月 29 日。

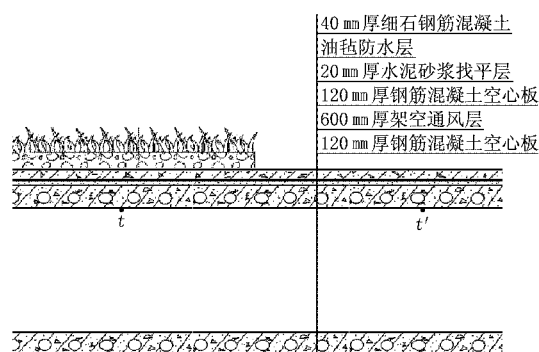


图 1 测试屋顶构造及温度测点布置

能反映屋顶隔热效果的是屋顶内表面温度与空气温度的差,即由太阳辐射热引起的屋顶内表面对空气的增温量。有绿化和无绿化屋顶内表面对空气的增温量表示如下:

$$\Delta t = t - t_a \quad (1)$$

$$\Delta t' = t' - t_a \quad (2)$$

式(1),(2)中 Δt 和 $\Delta t'$ 分别为有绿化和无绿化屋顶内表面对空气的增温量,℃; t_a 为室外空气温度,℃; t, t' 分别为有绿化和无绿化屋顶内表面温度,℃。

一天中屋顶内表面对空气的最高增温量和平均增温量表示如下:

$$\Delta t_{\max} = t_{\max} - t_{a, \max} \quad (3)$$

$$\Delta t'_{\max} = t'_{\max} - t_{a, \max} \quad (4)$$

$$\Delta \bar{t} = \bar{t} - \bar{t}_a \quad (5)$$

$$\Delta \bar{t}' = \bar{t}' - \bar{t}_a \quad (6)$$

式(3)~(6)中 $\Delta t_{\max}$ 和 $\Delta t'_{\max}$ 分别为一天中有绿化和无绿化屋顶内表面对空气的最高增温量,℃; $t_{\max}$ 和 $t'_{\max}$ 分别为一天中有绿化和无绿化屋顶内表面最高温度,℃; $t_{a, \max}$ 为一天中室外空气最高温度,℃; $\Delta \bar{t}$ 和 $\Delta \bar{t}'$ 分别为一天中有绿化和无绿化屋顶内表面对空气的平均增温量,℃; $\bar{t}$ 和 $\bar{t}'$ 分别为一天中有绿化和无绿化屋顶内表面平均温度,℃; $\bar{t}_a$ 为一天中室外空气平均温度,℃。

对于表面隔水隔汽的屋顶,其内表面对空气的最高增温量反映了屋顶热惰性的作用,即内表面对空气的最高增温量越小,屋顶对太阳辐射高峰热作用的衰减能力就越强,屋顶热惰性就越大;而平均增温量反映了屋顶热阻的作用,即屋顶在太阳辐射平均热作用下的准稳态传热隔热效果。对于表面透水透汽的绿化屋顶,尽管影响因素复杂,气候作用的最后结果仍然表现在内表面增温量的差别上。因此,分析有绿化和无绿化屋顶内表面的最高增温量、平均增温量的差别有助于确定有绿化屋顶的等效热惰性和等效热阻,将这种差别与气候参数相联系,可以分析屋顶绿化的热特性。

2 内表面增温量比较

测量期间平均气温为 26.6℃,最高气温为 38.7℃,平均太阳辐射照度为 124.8 W/m²,最大太阳辐射照度为 985 W/m²,总降水量为 478.8 mm。7 月最热,平均气温为 29.9℃。

有、无绿化屋顶内表面最高增温量在测量期间平均值分别为 -0.9℃ 和 3.3℃,平均增温量在测量期间的平均值分别为 1.4℃ 和 3.2℃。由于测量期间并非都是很热的天气,因此从屋顶隔热考虑,以最高气温大于等于 x 来划定热天气的范围,

统计测试期间室外最高气温大于等于 x 的天数,在这些天数中再统计屋顶内表面出现正增温的天数,该天数与测试期间室外最高气温大于等于 x 的天数的比值便是屋顶内表面出现正增温的天数频率,简称增温频率,这些天数中正增温量的总和简称增温总量。显然,增温频率和增温总量都反映了有、无绿化屋顶隔热的差别。表 1 显示了 x 分别取 30, 31, 32, 33, 34, 35 $^{\circ}\text{C}$ 时屋顶内表面的增温频率和增温总量。从表 1 可以看出,绿化对于降低屋顶内表面最高温度效果非常显著,降低平均温度效果稍差,但降低总量也很显著,绿化屋顶平均增温总量约为无绿化屋顶的 1/4 左右,这反映出绿化屋顶的等效热惰性大,等效热阻高。有、无绿化屋顶内表面增温总量比值如图 2, 3 所示。从图中同样可以看出,随着天气变热,绿化对于降低屋顶内表面最高温度的效果好于平均温度。

表 1 屋顶内表面增温频率和增温总量

$x/^{\circ}\text{C}$	最高增温频率/%		最高增温总量/ $^{\circ}\text{C}$		平均增温频率/%		平均增温总量/ $^{\circ}\text{C}$	
	有绿化	无绿化	有绿化	无绿化	有绿化	无绿化	有绿化	无绿化
30	11.0	100	14.0	316	83.3	100	88.4	329
31	8.2	100	6.3	276	83.6	100	71.5	295
32	7.9	100	5.5	243	87.3	100	62.8	264
33	5.4	100	3.6	217	85.7	100	50.6	235
34	2.4	100	0.3	163	83.3	100	33.3	178
35	0.9	100	0.3	123	81.3	100	18.4	134

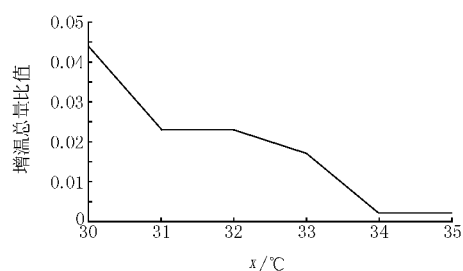


图 2 有、无绿化屋顶内表面对于最高增温量的增温总量比值

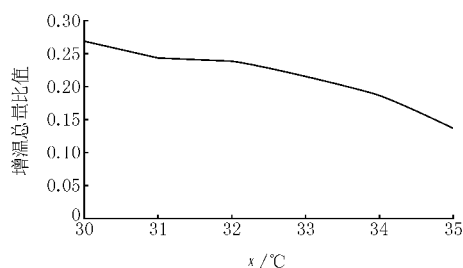


图 3 有、无绿化屋顶内表面对于平均增温量的增温总量比值

3 内表面增温量与气候的相关性

在以最高气温大于等于 30, 31, 32, 33, 34, 35 $^{\circ}\text{C}$ 划定的各种热天气范围内,有、无绿化屋顶内表面对于平均增温量的增温总量与该范围内太阳辐射照度总量有很好的相关性,见图 4, 5。从图中可以看出,有绿化情况稍差于无绿化情况,但计算显示两种情况相关系数都达到了 0.99。这表明在高温天气范围,屋顶内表面对于平均增温量的增温总量由太阳辐射照度总量决定。

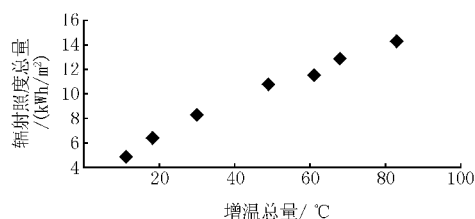


图 4 有绿化屋顶内表面对于平均增温量的增温总量与太阳辐射照度总量的相关性

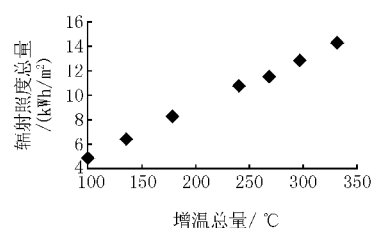


图 5 无绿化屋顶内表面对于平均增温量的增温总量与太阳辐射照度总量的相关性

然而夏季并不都是连晴天,而是由雨天分隔成多段连晴天。对于有绿化的屋顶,由于对降水的蓄存,将影响在晴天范围内表面的平均增温量。将整个夏季划分成几段,以雨天开始到紧接着的连晴天结束为一段,雨天规定为只要当天有雨便为雨天,连晴天至少应包含 2 天连续无雨。这样划分是将雨天及其后的连晴天作为一个气候段考虑。按此方法将 6 月 13 日~9 月 21 日划分成 12 段,每段的平均参数见表 2。可以看出,各时间段屋顶内表面平均增温量都不同,其原因必然与太阳辐射照度和降水量有关。计算相关系数得到,无绿化屋顶内表面平均增温量与太阳辐射照度的相关系数为 0.82,而有绿化屋顶为 -0.34,说明太阳辐射照度对无绿化屋顶内表面温度影响大;但有绿化屋顶内表面平均增温量与降水量的相关系数为 0.60,而无绿化屋顶为 -0.11,说明降水量对绿化屋顶内表面温度有较大影响。

表 2 各晴雨时间段平均参数

晴雨时间段	太阳辐射照度/ (W/m ²)	降水量/mm	有绿化屋顶内表面 平均增温量/℃	无绿化屋顶内表面 平均增温量/℃	有、无绿化平均增温量比
6月13~16日	171	0.048	0.13	3.60	0.036
6月17~23日	132	0.157	1.45	3.28	0.442
6月24日~7月4日	189	0.163	1.07	4.50	0.238
7月5~14日	150	0.133	1.87	3.76	0.497
7月15~22日	158	0.209	1.34	4.27	0.314
7月23日~8月2日	177	0.033	1.58	4.79	0.330
8月3~5日	161	0.189	2.69	4.54	0.593
8月6~13日	131	0.023	1.24	2.70	0.459
8月14~19日	84	0.547	2.58	3.22	0.801
8月20~25日	89	0.163	1.58	1.85	0.854
8月26日~9月5日	110	0.105	1.10	3.03	0.363
9月6~21日	147	0.013	1.45	4.10	0.354

下面分析一段连晴天的增温情况。6月24~25日为降雨天气,降水量较大,足以使屋面土层完全湿透,随后连晴10天无雨,6月25日~7月4日屋顶内表面逐时温度如图6所示。从图中可以看

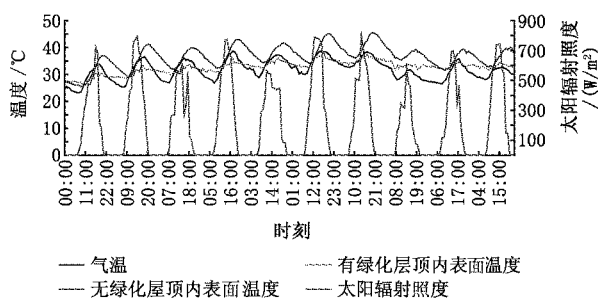


图6 连晴天屋顶内表面温度

出,雨后绿化屋顶内表面温度峰值低于气温峰值,但随连晴天数增加逐步逼近气温峰值,当气温降低时,绿化屋顶内表面反应滞后,温度反而高于气温;无绿化的屋顶内表面温度变化与气温的变化有很好的相关性,与太阳辐射照度的变化在考虑延迟后也有很好的相关性。图7,8分别显示了屋顶内表面的最高增温量和平均增温量随时间的变化。从图7可以看出,无绿化屋顶内表面最高增温量都为正值,而有绿化屋顶内表面最高增温量在雨后7天内都为负值,但随土层变干最高增温量的绝对值在

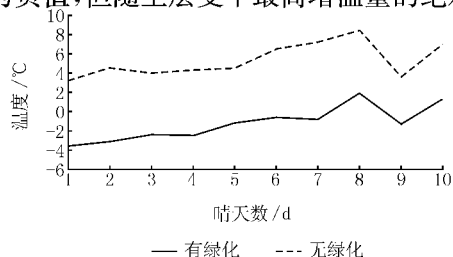


图7 屋顶内表面最高增温量

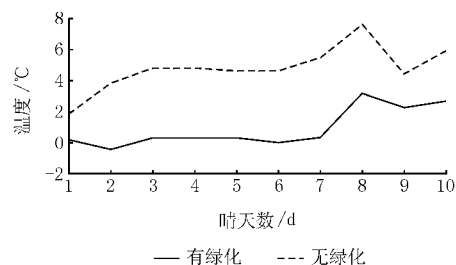


图8 屋顶内表面平均增温量

减小,7天后由于室外空气降温而转为正值。从图8可以看出,雨后无绿化屋顶内表面平均增温量迅速增大,而有绿化屋顶内表面平均增温量下降2天后才上升。因此,有绿化屋面土层的蓄水能力可以影响屋顶内表面7天的最高温度和2天的平均温度。

通过前文分析可以看出,对以天为周期的热作用,屋顶绿化后内表面热惰性大为增强,内表面对空气的增温量与太阳辐射照度的变化有较强的反向性,说明内表面温度对太阳辐射照度变化的反应远小于气温,尤其表现在雨后晴天的最初2天和气温快速下降的凉爽时间,因此具有很好的削峰填谷作用。而对以一段晴雨天气为周期的热作用,表2中有绿化屋顶内表面平均增温量与太阳辐射照度的相关系数为-0.34,说明屋顶绿化的削峰填谷作用在这一时间段内得到了平衡,因此内表面对空气的增温量与太阳辐射照度变化的反向性减弱。如果以整个夏季的热天气为周期,由图4可见内表面对空气的增温量与太阳辐射照度变化呈现很强的正向性。

4 结论

4.1 在夏季高温天气下,屋顶绿化对削减屋顶内

(下转第14页)

整个过程可用式(7)表示。

$$t = \begin{cases} -0.776\,41\tau^3 + 3.276\,4\tau^2 - 3.991\,4\tau + 1.488\,9 & \tau \leq 0.000\,58 \\ 0 & \tau > 0.000\,58 \end{cases} \quad (7)$$

这样离散的点即可以用一个统一的数学表达式表示,式(7)比式(3)更为简洁,知道一点的某一个变量,可以很容易求出另一个变量,更重要的是,式(7)更符合实际情况。经过以上分析,笔者认为,虽然真空闪蒸装置内冰晶的形成过程较复杂,但可以采用数值计算方法找出我们所关心的参数之间的关系。可以从这种思路出发,不必透彻了解所有影响因素,只要通过一定量的实验,即可得出不同情况下的经验公式,通过这些经验公式来指导实际工程。

6 结论

6.1 二元冰真空制备技术在许多方面较其他制冰方式更有优势,而且随着人们对环境问题的日益重视,其优势将更加得以体现。

6.2 二元冰真空制备技术作为一种新兴技术,对其研究还不够深入和全面,许多理论和实际问题需要解决。在理论模型无法满足工程精度要求时,可通过一定量的实验,采用数值计算软件对数据进行处理,得出不同情况下的经验公式指导工程实践。

参考文献

[1] 徐成海,张世伟,关奎之. 真空干燥[M]. 北京:化学

工业出版社,2004:438

[2] Kim B S, Shin H T, Lee Y P, et al. Study on ice slurry production by water spray[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(2):176-184

[3] Shin H T, Lee Y P, Jurng J. Spherical-shaped ice particle production by spraying water in a vacuum chamber[J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(5):439-454

[4] Chen G M, Lu G Q, Wang J F. Thermodynamic analyses of the performance of a thermal storage system with water as its working fluid [J]. Applied Energy, 1997, 57(4):263-270

[5] 张绍志,王剑锋,陈光明. 水制冷系统闪蒸器特性的理论分析[J]. 低温工程, 2000, 46(3):12-18

[6] 张绍志,王剑锋,张红线,等. 真空下二元冰晶形成过程分析[C]//中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集, 2000:344-350

[7] Isao Satoh, Kazuyoshi Fushinobu, Yu Hashimoto. Freezing of a water droplet due to evaporation-heat transfer dominating the evaporation-freezing phenomena and the effect of boiling on freezing characteristics [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(2):226-234

(上接第4页)

表面最高温度的效果非常显著,降低平均温度效果稍差,但降低总量也很显著,有绿化屋顶对空气的平均增温量的总量为无绿化屋顶的 1/4 左右。

4.2 以天为周期,有绿化屋顶内表面对空气的增温量与太阳辐射照度的变化有较强的反向性;以一段晴雨天气为周期,这种反向性减弱;而以整个夏季的热天气为周期,这种反向性转变为很强的正向性。对于无绿化的屋顶,无论所考虑的热作用周期的长短,内表面对空气的增温量与太阳辐射照度的变化都呈现很强的正向性。

参考文献

[1] 赵定国. 城市平顶屋面绿化的好材料佛甲草初考[J]. 园林, 2002(5):43-44

[2] 赵玉婷,胡永红,张启翔. 屋顶绿化植物选择研究进展[J]. 山东林业科技, 2004(2):27-29

[3] 赵定国. 屋顶绿化及轻型平屋顶绿化技术[J]. 中国建

筑防水, 2004(4):17-19

[4] 刘怡. 城市屋面绿化植被的能流反应[C]//泛亚热带地区建筑设计与技术学术会议论文集. 广州:华南理工大学出版社, 1998

[5] 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

[6] 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

[7] Kumar R, Kaushik S C. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings[J]. Building and Environment, 2005, 40(11): 1505-1511

[8] 孟庆林,张玉,张磊. 热气候风洞内测定种植屋面当量热阻[C]//第二届泛亚热带地区建筑设计与技术学术会议论文集, 2005

[9] 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