

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201804057



被动蒸发与架空遮阳不同组合 对屋面隔热降温的影响

王波, 冉茂宇

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了探究被动蒸发与架空遮阳综合作用对屋面隔热降温的影响,基于蓄水多孔质蒸发冷却,提出架空蒸发遮阳与实铺遮阳蒸发两种屋面隔热方式;然后,通过搭建混凝土屋面实验小室,在厦门典型夏季气候条件下,测试两种隔热方式对屋面上下表面温度及水分蒸发量的影响.结果表明:相对于裸露的混凝土屋面,两种隔热方式都有较好的降温效果,但是相互之间差别不明显;实铺遮阳蒸发方式比架空蒸发遮阳方式在白天耗水量明显减少,在夜间略有增加,但总体表现为耗水量明显减少,具有更好的持续降温效果;架空蒸发遮阳多孔质水分蒸发速度主要与太阳辐射有关,而实铺遮阳蒸发多孔质水分蒸发速度则与多种因素有关,如空气湿度、风速、遮阳板热辐射等.

关键词: 隔热降温;多孔质;架空蒸发遮阳;实铺遮阳蒸发;被动蒸发冷却

中图分类号: TU 111.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)05-0689-07

Effect of Different Combinations of Passive Evaporation and Venti-Shading on Thermal Protection and Temperature Reduction of Roof

WANG Bo, RAN Maoyu

(College of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to investigate the integrated effect of passive evaporation and venti-shading on the thermal protection and temperature reduction of roof, two thermal protection methods of venti-shading with evaporation and evaporation with venti-shading were proposed based on porous medium evaporative cooling. Several small test chambers with concrete roof were set up to test the effects of these two methods on the temperature reduction of roof. The surface temperatures of roof and evaporated water volumes of porous medium were measured in Xiamen typical summer climate conditions. The results show that: comparing with bare concrete roof, the two methods with porous medium evaporation can obviously reduce the surface temperatures of roof, but the difference between them is not obvious. Comparing to the method of venti-shading with evaporation, the method of evaporation with venti-shading consumes much less water evaporation volume during the daylight, and little more evaporation volume at night. The overall performance is that the water consumption is significantly reduced in the method of evaporation with venti-shading, which has a better continuous cooling effect. In the method of venti-shading with evaporation, the water evaporation rate of porous medium is mainly

收稿日期: 2017-03-29

通信作者: 冉茂宇(1967-),男,教授,博士,主要从事建筑热工与建筑节能的研究. E-mail:373664489@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678254);华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1611305007)

related to solar radiation; in the method of evaporation with venti-shading, the water evaporation rate is also related to other factors, such as ambient temperature and humidity, wind speed, sun visor heat radiation and so on.

Keywords: thermal protection and temperature reduction; porous medium; venti-shading with evaporation; evaporation with venti-shading; passive evaporative cooling

对于有屋顶房间,通过屋面得热占总得热的40%~60%^[1-2],是房间南墙得热的2.78倍^[3].对屋顶进行隔热能改善室内热环境^[4].为了提高夏季屋面的防热能力,国内外人员相继对屋面架空遮阳进行了实测和理论研究^[5-10].研究表明,架空高度维持在10 cm较为合适,大于此值后,防热效果提高不再明显^[11].通风遮阳的混凝土屋面仍然会使下方室内人体有烘烤感,难以满足人体热舒适要求^[12].而对遮阳构件表面涂白或贴铝箔,能改善架空遮阳防热效果,但这些措施很容易失效,如高反射涂料第一年后反射率会降低15%^[13].被动蒸发冷却被认为是最有效的降温技术^[14].20世纪70年代后,屋顶喷淋^[15-16]、屋顶水池^[17]、屋顶绿化^[18-22]、多孔质蒸发^[23-24]等被动蒸发冷却技术被研究,并且都能起到很好的降温效果.然而屋顶水池对屋面防水构造及承重要求高^[25],屋顶喷淋降温效果虽优于屋顶水池,但是水资源浪费严重^[26].对屋顶水池和喷淋进行通风遮阳,可提高它们的防热降温能力^[27-28].在屋顶水池中种植漂浮植物或使用润湿漂浮物,可达到最佳的防热降温效果^[24,29].屋顶植被具有蒸发与遮阳共同作用,其降温效果明显,但是其维护复杂,对屋顶构造也有特殊要求.研究发现,多孔蒸发具有可吸收保留雨水,维护管理方便、屋面构造要求低等优点^[30-31].Manzan等^[32]指出,维持架空遮阳屋面通风层下表的润湿蒸发,既可减少水分蒸发,又可提高防热降温效果.刘才丰等^[33]将吸湿多孔质铺设在传统通风屋面架空层下表面,实测表明,这种在遮阳下的多孔质蒸发在夏热冬冷地区有良好的降温作用.综上,将架空遮阳与被动蒸发相结合可极大改善屋面的防热降温能力.将多孔质蒸发与架空遮阳相结合,使屋面在提高防热降温效果的同时,尽量提高水资源利用效率,仍然是值得深入探讨的重要问题.本文基于含水多孔质蒸发冷却,提出屋面被动蒸发与架空遮阳不同组合的两种防热方式;然后,通过搭建混凝土屋面实验小室,对比测试这两种防热方式对屋面上、下表面温度及水分蒸发量的影响.

1 被动蒸发与架空遮阳的不同组合

利用含水多孔质对屋面进行防热降温的两种方式,如图1所示.将含水多孔质本身作为遮阳构件进行架空通风遮阳,称为架空蒸发遮阳,如图1(a)所示.多孔质本身作为遮阳构件,因水分蒸发会降低自身温度,相对于传统架空遮阳屋面,减少了遮阳构件对屋面的热辐射.将含水多孔质实铺在屋面上进行架空遮阳蒸发,称为实铺遮阳蒸发,如图1(b)所示.遮阳板因受太阳直接辐射,温度相对较高,故向下热辐射强,但多孔质未受到太阳直接辐射,所以,被动蒸发对屋面进行直接降温且用水量少.

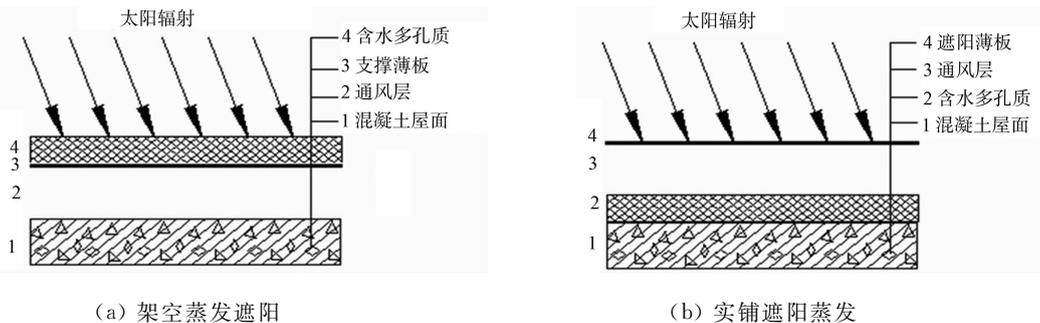


图1 两种多孔质隔热降温方式

Fig. 1 Two methods of roof thermal protection with porous mediums

2 实验装置及组成

实验装置由混凝土屋面实验小室、含水多孔质及遮阳/支撑薄板组成.混凝土屋面实验小室搭建在华侨大学厦门校区的4层实验大楼屋顶平台上(图2),此处通风顺畅,日照不受遮挡.

搭建混凝土屋面实验小室时, 先将外框尺寸(长×宽×高)为 600 mm×600 mm×600 mm 的无底木箱(板厚 20 mm)在平台上错开布置, 并在木箱内表贴 30 mm 厚的保温泡沫板, 再在木箱内四角处贴固为 110 mm×110 mm×490 mm 的支撑柱, 其上部为泡沫, 下部为木块, 高分别为 190 mm 和 300 mm. 然后, 将养护好的预制混凝土块(500 mm×500 mm×110 mm)置于支撑柱上, 形成的混凝土屋面实验小室, 如图 2 所示. 为了减少来自侧向的传热对实验的影响, 在木箱四周采用 200 mm 厚的泡沫隔热, 共搭建 5 个实验小室, 选择其中错开的 3 个作对比测试, 分别编号为 1[#], 2[#], 3[#]. 其中, 1[#] 不做任何隔热处理, 保持为裸露混凝土屋面; 2[#] 用于架空蒸发遮阳测试; 3[#] 用于实铺遮阳蒸发测试.



图 2 混凝土屋面实验小室布置
Fig. 2 Concrete roof experimental chamber arrangement

塑料发泡制成的吸水海绵, 干密度为 25 kg·m⁻³, 浸泡吸水后, 干基的饱和含水量为 29.164 kg·kg⁻¹, 具有很强的保水能力. 遮阳/支撑薄板采用 0.1 mm 厚的镀锌铁皮. 对于架空蒸发遮阳方式, 先用泡沫板(600 mm×50 mm×100 mm)在混凝土屋面两侧将支撑薄板架空, 再在支撑薄板上铺设塑料膜, 后放置含水多孔质(600 mm×600 mm×40 mm). 对于实铺遮阳蒸发方式, 先在混凝土屋面上铺设塑料膜, 后放置同样尺寸的含水多孔质, 再在多孔质四角用泡沫块(600 mm×50 mm×100 mm)支撑遮阳薄板. 两种防热方式中, 通风层高度均保持在 100 mm, 含水多孔质侧缘均用塑料膜包覆以避免侧向水分蒸发和流失.

3 测试内容与方法

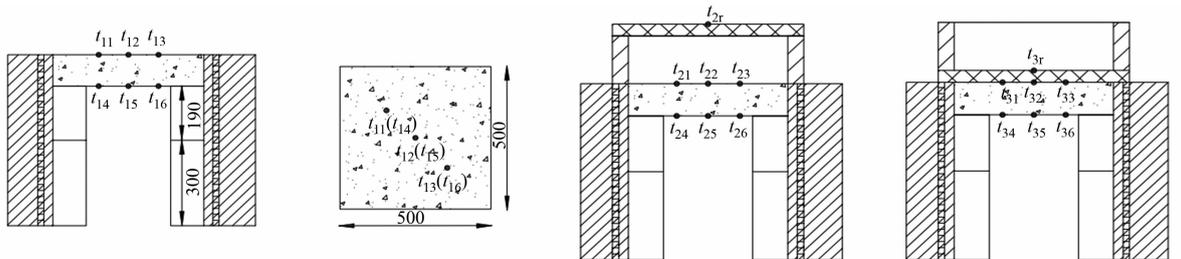
测试内容和对应仪器的测试范围及精度, 如表 1 所示. 其中, 室外气候参数和混凝土屋面上、下表面温度测试每隔 10 min 记录 1 次, 而多孔质上表面温度和水分蒸发量测试时间间隔为 60 min.

表 1 测试参数及对应仪器量程和精度

Tab. 1 Test parameters and corresponding instrument range and accuracy

测试参数	仪器(型号)	测试范围	测试精度
室外空气温度/℃	Weather Station (PH-1 型)	-40~80	±0.1
室外风速/m·s ⁻¹	Weather Station (PH-1 型)	0~70	±0.3
室外相对湿度/%	Weather Station (PH-1 型)	0~100	±2%
室外水平太阳辐射/W·m ⁻²	Weather Station (PH-1 型)	0~2 000	<5
混凝土上、下表面温度/℃	热电偶(T 型)	-50~150	±0.2
多孔质上表面温度/℃	红外测温仪(OPTRIS MS 型)	-32~420	±0.2
水分蒸发量/kg·kg ⁻¹	电子称(ACS-JS 型)	0.02~15.00	±1

气象站测点布置在装置附近, 如图 2 所示. 热电偶测点的布置, 如图 3 所示, 多孔质上表面温度测点为多孔质表面的点位置(图 3(c), (d)). 图 3(c), (d)中: t_{2r} , t_{3r} 分别代表实验装置 2[#], 3[#] 的多孔质上表面温度; 水分蒸发量测试以多孔质 1/4 为试样(300 mm×300 mm×40 mm)进行称质量.



(a) 裸露屋面测点剖面 (b) 裸露屋面测点平面 (c) 架空蒸发遮阳测点剖面 (d) 实铺遮阳蒸发测点剖面

图 3 测点布置图(单位:mm)

Fig. 3 Thermocouple measuring point arrangement (unit: mm)

实验测试选择厦门典型高温气候, 进行连续两天测试. 所有测试仪器在实验开始时同时开启. 测试

时间为2017年8月11日9:00至8月13日7:10.期间,8月11日22:57至8月12日7:17停电,热电偶温度数据缺失.水分蒸发量测试只在白天进行,时间为8月11日9:00—18:00和8月12日7:00—18:00.

4 测试结果与分析

测试期间,室外空气温度(t_{out})和相对湿度(φ)的变化,如图4所示.由图4可知:连续测试两天的室外相对湿度最大值为87%,平均值为73%;白天的室外空气温度最高值达到35.9℃,夜间最低值为28.8℃,平均值为31.6℃,表现为典型高温高湿.测试期间,室外水平太阳辐射(I)和风速(v)的变化,如图5所示.由图5可知:测试期间风速波动很大,总体上表现为白天风速较大、夜间风速较小;水平太阳辐射白天最高值达1107.0 $W \cdot m^{-2}$,平均值为435.37 $W \cdot m^{-2}$.气候参数测试表明:实测期间,气候可代表南方炎热地区典型气候,测试结果可供夏季屋面隔热降温设计参考.

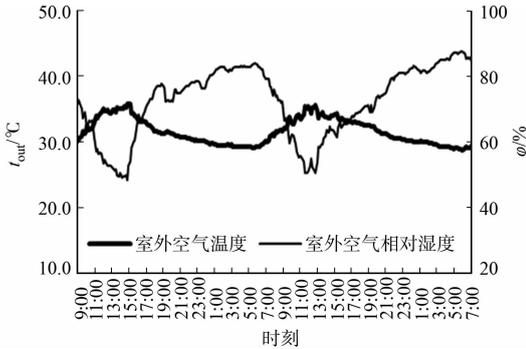


图4 室外空气温度和相对湿度随时间变化

Fig. 4 Ambient temperature and relative humidity variation with time

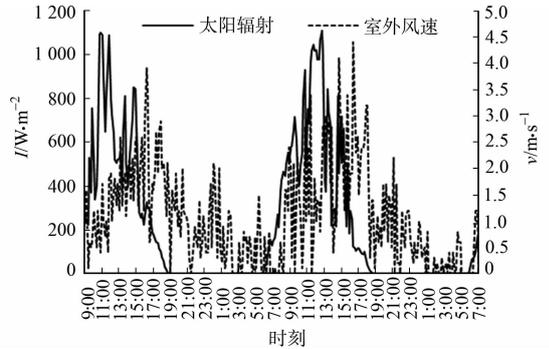


图5 室外水平太阳辐射及风速随时间变化

Fig. 5 Horizontal solar radiation and wind speed variation with time

两种隔热方式下,多孔质上表面温度(t)的测试结果对比,如图6所示.第1天测试时段为9:00—18:00,第2天测试时段为7:00—18:00.由图6可知:在白天,架空蒸发遮阳方式的多孔质上表面温度总是高于实铺遮阳蒸发方式对应值;随着太阳辐射增加,两者温差增加;实铺遮阳蒸发方式多孔质上表面温度始终比空气温度低,最高值不超过35℃,而架空蒸发遮阳方式多孔质上表面温度最高值达到41℃.原因在于架空蒸发遮阳多孔质白天直接受太阳照射,其表层水分很快蒸发,表面温度随太阳辐射增大而升高.在日出前或日落后,架空蒸发遮阳多孔质上表面温度会略低于实铺遮阳蒸发对应值,这是因为天空辐射冷却造成.

两种隔热方式下,屋面与裸露屋面上、下表面温度变化的对比,如图7所示.由图7(a)可知:相对于裸露混凝土屋面,两种隔热方式在白天都大大降低了屋面的上表面温度.由图7(b)可知:无论是有太阳辐射还是无太阳辐射时,实铺遮阳蒸发混凝土下表面温度均低于架空蒸发遮阳对应的时刻值.

3种隔热方式测得的屋面上、下表面温度的平均值和波幅值,如表2所示.由表2可知:相对于裸露混凝土屋面,架空蒸发遮阳方式的温度平均值和波幅值分别下降了3.7,8.1℃,实铺遮阳蒸发方式的温度平均值和波幅值分别下降了4.1,7.8℃,隔热降温效果显著.对比两种隔热方式的屋面上表温度时发现:在有太阳辐射时,两者差别不大;但在没有太阳辐射的情况下(自日落后到第二天日出前),实铺遮阳蒸发方式对屋面上表温度的降低效果比架空蒸发遮阳方式好.

由表2还可知:相对于裸露混凝土屋面,架空蒸发遮阳方式温度平均值和波幅值分别下降了4.4,3.7℃;实铺遮阳蒸发方式的温度平均值和波幅值分别下降了4.8,4.7℃.因此,从屋面上、下表面温度

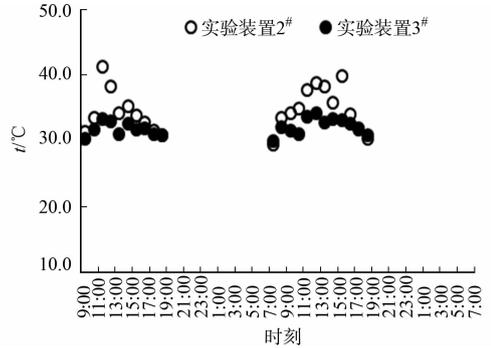
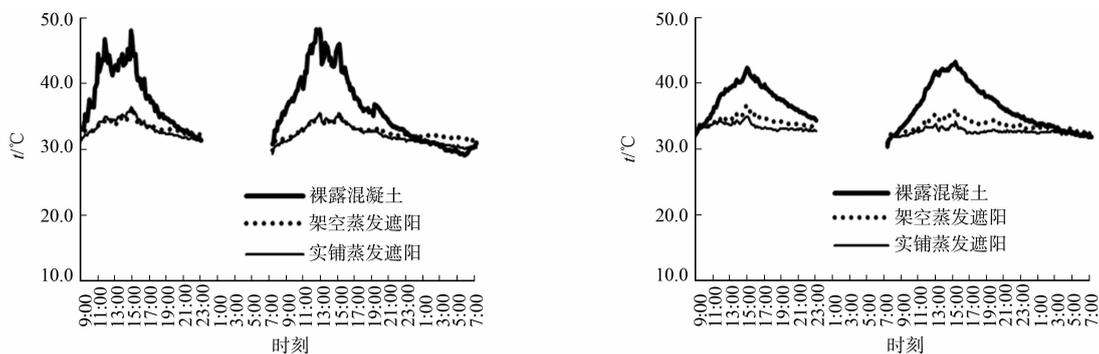


图6 含水多孔质上表面温度对比

Fig. 6 Comparison of temperature on porous upper surface

对比可知, 实铺遮阳蒸发的防热降温效果稍优于架空蒸发遮阳, 两种防热降温方式差异不是很显著。



(a) 上表面

(b) 下表面

图 7 两种防热方式的混凝土上、下表面温度对比

Fig. 7 Comparison of upper and lower surface temperature of concrete with two thermal protection methods

表 2 混凝土屋面有无防热方式的表面温度对比

Tab. 2 Comparisons of surface temperatures on concrete roof with and without thermal protection

测试工况	上表面				下表面			
	温度 平均值/°C	平均值 降低/°C	温度 波幅值/°C	波幅值 降低/°C	温度 平均值/°C	平均值 降低/°C	温度 波幅值/°C	波幅值 降低/°C
裸露屋面	36.7	0	11.6	0	36.7	0	6.7	0
架空蒸发遮阳	33.0	3.7	3.5	8.1	32.3	4.4	3.0	3.7
实铺遮阳蒸发	32.6	4.1	3.8	7.8	31.9	4.8	2.0	4.7

两种防热方式中, 多孔质干基含水量(w)和每小时蒸发量(E)的变化, 如图 8 所示。图 8 中, 2[#], 3[#] 分别代表实验装置 2, 3。

由图 8 可知: 随着时间的推移, 两种防热方式的多孔质干基含水量不断下降, 且白天下降快, 夜间下降慢。在两个白天的测试中, 当采用架空蒸发遮阳方式时, 多孔质干基的含水量分别下降了 4.219, 3.754 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 当采用实铺遮阳方式时, 多孔质干基含水量分别下降了 3.504, 2.486 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此, 两个白天中, 实铺遮阳蒸发方式比架空蒸发遮阳方式的多孔质干基含水量分别少蒸发了 0.715, 1.268 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在夜间, 架空蒸发遮阳的多孔质干基蒸发量为 0.466 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而实铺遮阳蒸发量为 0.621 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 后者比前者多蒸发了 0.155 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

以上数据表明, 在白天, 实铺遮阳蒸发比架空蒸发遮阳耗水量明显减少; 而在夜间, 实铺遮阳蒸发比架空蒸发遮阳耗水量稍有增加。原因在于: 在白天, 架空蒸发遮阳的含水多孔质受到太阳辐射直接加热, 其水分蒸发速度比有遮阳板的实铺遮阳蒸发的含水多孔质蒸发速度快(图 8 中的柱状); 在夜间时, 实铺遮阳多孔质含水量高于架空蒸发遮阳多孔质的含水量, 在相同的空气流速和空气温湿度下, 其蒸发速度也就高于架空蒸发遮阳多孔质蒸发速度, 因此, 在夜间实铺遮阳蒸发多孔质耗水量比架空蒸发遮阳耗水量稍多。尽管白天和夜间两种防热方式的多孔质水分蒸发的速度快慢不同, 但总体表现为实铺遮阳蒸发比架空蒸发遮阳耗水量明显减少。在第 1 天 9:00 至第 2 天 9:00 的 24 h 内, 架空蒸发遮阳的蒸发量为 5.068 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 实铺遮阳蒸发的蒸发量为 4.409 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 后者比前者节省了 0.659 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

一般情况下, 含水多孔质的蒸发与周围空气温度、湿度、风速、太阳辐射等气候参数有关。对于无遮阳下含水多孔质的蒸发, 含水多孔质受到太阳直接辐射, 在太阳辐射相当大的情况下, 其他气候参数对多孔质水分蒸发量的影响可以忽略不计, 其蒸发量随着太阳辐射的增大而增大。由图 8 中的实心柱状图

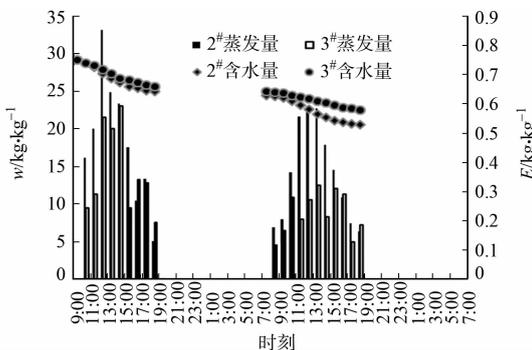


图 8 两种防热方式下多孔质含水量与蒸发量变化

Fig. 8 Watery content and evaporation of porous mediums with two thermal protection methods

也可以看出,架空蒸发遮阳方式下,多孔质蒸发量波动与太阳辐射波动类似,证明其蒸发量主要与太阳辐射量有关;而对于有遮阳下含水多孔质的蒸发,由于有遮阳板阻挡太阳辐射,含水多孔质受到的热辐射大大减少,除此之外,还受到多孔质上部遮阳板下部的空气温度、风速的影响.因此,在实铺遮阳蒸发方式下,多孔质水分蒸发量会出现波动不规则(图8中空柱状图).这说明影响实铺遮阳蒸发蒸发速度的主要因素不再是太阳辐射,而是空气温湿度、风速、遮阳板热辐射等多种因素共同作用的结果.

5 结论

利用含水多孔质搭建了两种屋面隔热方式,并对其降温效果及水分蒸发情况进行了实测和比较,主要有以下3个结论.

1) 相对于裸露屋面,无论是将含水多孔质直接架空蒸发遮阳,还是将其实铺遮阳蒸发,均能有效提高屋面隔热降温效果,使屋面上表面温度平均值下降 4°C 以上,波幅值下降 8°C 左右.

2) 相对于架空蒸发遮阳,含水多孔质实铺遮阳蒸发在白天水分蒸发明显减少,而在夜间略有增加,总体表现为耗水量明显减少.因此,利用含水多孔质进行屋面隔热降温时,宜采用实铺遮阳蒸发方式.

3) 架空蒸发遮阳多孔质蒸发量主要与太阳辐射有关,而铺遮阳蒸发方式水分蒸发量受多种因素共同影响(如空气温湿度、风速、遮阳板热辐射).

参考文献:

- [1] SOUBDHAN T, FEUILLARD T, BADE F. Experimental evaluation of insulation material in roofing system under tropical climate[J]. *Solar Energy*, 2005, 79(3): 311-320. DOI:10.1016/j.solener.2004.10.009.
- [2] BIWOLE P H, WOLOSZYN M, POMPEO C. Heat transfers in a double-skin roof ventilated by natural convection in summer time[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(8): 1487-1497. DOI:10.1016/j.enbuild.2008.02.004.
- [3] 项铮, 储依. 几种屋顶绿化形式的隔热及节能效果研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011(增刊1): 42-44.
- [4] 薛佳薇, 冉茂宇, 吴扬. 泉州洋楼民居的夏季热环境测试与分析[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(2): 201-206. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2012.02.0201.
- [5] 张万强. 不同构造屋面的隔热性能比较[J]. *住宅科技*, 1984(7): 15-17.
- [6] 汪帆, 杨若菡. 改进架空屋面隔热效果的理论与实践[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 1994, 15(3): 309-312. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.1994.03.0309.
- [7] CIAMPI M, LECCESE F, TUONI G. Energy analysis of ventilated and micro-ventilated roofs[J]. *Solar Energy*, 2005, 79(2): 183-192. DOI:10.1016/j.solener.2004.08.014.
- [8] DIMOUDI A, LYKOUDIS S, ANDROUTSOPOULOS A. Thermal performance of an innovative roof component[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(14): 2257-2271. DOI:10.1016/j.renene.2005.10.012.
- [9] ALVARADO J L, MARTINEZ E. Passive cooling of cement-based roofs in tropical climates[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(3): 358-364. DOI:10.1016/j.enbuild.2007.03.003.
- [10] ALVARADO J L, JR W T, JOHNSON M D. Passive cooling systems for cement-based roofs[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(9): 1869-1875. DOI:10.1016/j.buildenv.2008.12.012.
- [11] LI Dong, ZHENG Yumeng, LIU Changyu, *et al.* Numerical analysis on thermal performance of naturally ventilated roofs with different influencing parameters[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2016, 22: 86-93. DOI:10.1016/j.scs.2016.02.004.
- [12] 郭兵. 种植屋面与通风屋面实测结果的对比分析[J]. *节能技术*, 2013, 32(4): 45-47. DOI:10.3969/j.issn.1004-7948.2013.04.010.
- [13] BRETZ S E, AKBARI H. Long-term performance of high-albedo roof coatings[J]. *Energy and Buildings*, 1997, 25(2): 159-167. DOI:10.1016/S0378-7788(96)01005-5.
- [14] DUAN Zhiyin, ZHAN Changhong, ZHANG Xingxing, *et al.* Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(9): 6823-6850. DOI:10.1016/j.rser.2012.07.007.
- [15] JAIN S P, RAO K R. Experimental study on the effect of roof spray cooling on unconditioned and conditioned buildings[J]. *Building Science*, 1974, 9(1): 9-16. DOI:10.1016/0007-3628(74)90035-8.

- [16] KONDEPUDI SN. A simplified analytical method to evaluate the effects of roof spray evaporative cooling[J]. *Energy Conversion and Management*, 1993, 34(1): 7-16. DOI:10. 1016/0196-8904(93)90003-S.
- [17] TIWARI G N, KUMAR A, SODHA M S. A review: Cooling by water evaporation over roof[J]. *Energy Conversion and Management*, 1982, 22(2): 143-153. DOI:10. 1016/0196-8904(82)90036-X.
- [18] HARAZONO Y, IKEDA H. The effect on an indoor thermal environment with simple hydroponic cultivation on rooftops[J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2010, 46(1): 9-17. DOI:10. 2480/agrmet. 46. 9.
- [19] 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. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-3924. 2006. 01. 013.
- [20] FANG C F. Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(6): 1048-1052. DOI:10. 1016/j. enbuild. 2007. 06. 007.
- [21] FENG Chi, MENG Qinglin, ZHANG Yufeng. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(6): 959-965. DOI:10. 1016/j. enbuild. 2009. 12. 014.
- [22] GETTER K L, ROWE D B, ANDRESEN J A, *et al.* Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U. S. climate[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(12): 3548-3557. DOI:10. 1016/j. enbuild. 2011. 09. 018.
- [23] 孟庆林. 建筑屋面利用含湿多孔材料被动蒸发降温技术研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 1997, 19(6): 35-40. DOI:10. 11835/j. issn. 1674-4764. 1997. 06. 006.
- [24] 唐鸣放, 孟庆林. 屋面多孔材料层在干湿状态下的隔热性能[J]. *建筑技术*, 2000, 31(10): 679. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-4726. 2000. 10. 006.
- [25] NAHAR N M, SHARMA P, PUROHIT M M. Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions[J]. *Building and Environment*, 2003, 38(1): 109-116. DOI:10. 1016/S0360-1323(02)00029-X.
- [26] 陈启高. 陈启高建筑物理学术论文选集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 175-203.
- [27] LI Yongxin, LI Baoming, WANG Chaoyuan, *et al.* Effects of shading and roof sprinkling in Venlo-type greenhouse in summer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(5): 127-130.
- [28] SHARIFI A, YAMAGATA Y. Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review[J]. *Applied Energy*, 2015, 160: 336-357. DOI:10. 1016/j. apenergy. 2015. 09. 061.
- [29] TANG Runsheng, ETZION Y, ERELL E. Experimental studies on a novel roof pond configuration for the cooling of buildings[J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(10): 1513-1522. DOI:10. 1016/S0960-1481(03)00002-8.
- [30] MENG Qinglin, HU Wenbin. Roof cooling effect with humid porous medium[J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(1): 1-9. DOI:10. 1016/j. enbuild. 2003. 11. 004.
- [31] WANPHEN S, NAGANO K. Experimental study of the performance of porous materials to moderate the roof surface temperature by its evaporative cooling effect[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(2): 338-351. DOI:10. 1016/j. buildenv. 2008. 03. 012.
- [32] MANZAN M, SARO O. Numerical analysis of heat and mass transfer in a passive building component cooled by water evaporation[J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(4): 369-375. DOI:10. 1016/S0378-7788(01)00119-0.
- [33] 刘才丰, 冯雅, 陈启高. 屋面蒸发隔热及应用措施[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2001, 24(3): 41-44. DOI:10. 11835/j. issn. 1000-582X. 2001. 03. 012.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)