

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202010022



# 泡沫玻璃颜色及孔隙结构对 屋面蒸发降温的影响

徐杭<sup>1,2</sup>, 冉茂宇<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 厦门市生态建筑营造重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为了探究泡沫玻璃颜色及孔隙结构对屋面蒸发降温的影响,首先,对比不同颜色和孔隙结构的泡沫玻璃、红色饰面磁砖和灰色加气混凝土在不同波长下的太阳辐射吸收率;然后,测试不同材料块的饱和含水量,并将其贴于绝热块上,模拟其在夏季气候条件下的水平屋面被动蒸发降温效果、水分蒸发量、贴面和外表面温度.结果表明:白色、深灰色、黑色泡沫玻璃的太阳辐射吸收率依次为 0.32,0.71,0.94;通孔泡沫玻璃的体积保水量是闭孔泡沫玻璃的 2.5~3.0 倍,采用通孔泡沫玻璃可以极大提高材料的保水量;白色通孔泡沫玻璃不仅可以减少太阳辐射量的吸收,并且饱和含水量较大,可延长蒸发降温持续时间,是适合用于屋面被动蒸发的多孔材料.

**关键词:** 多孔材料; 泡沫玻璃; 孔隙结构; 太阳辐射吸收量; 建筑屋面; 蒸发降温

**中图分类号:** TU 551.324

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2021)04-0465-09

## Influence of Color and Pore Structure of Foam Glass on Evaporation and Cooling of Roof

XU Hang<sup>1,2</sup>, RAN Maoyu<sup>1,2</sup>

(1. School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Key Laboratory of Ecological Building Construction, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to research the influence of color and pore structure of foam glass on evaporation and cooling of roof, the absorption rates of different wavelengths of solar radiation on foam glass with different color and pore structure, red facing tiles and gray aerated concrete were compared. The saturated water content of different material blocks was tested, and they were attached to the insulation block to simulate the passive evaporative cooling effect, water evaporation, veneer and appearance temperature of the horizontal roof under summer weather condition. The results show that: solar radiation absorption rates of white, dark gray, and black foam glass are 0.32, 0.71 and 0.94 in sequence; the volume water retention of through-cell foam glass is 2.5~3.0 times as large as that of closed-cell foam glass, the through-hole foam glass can greatly increase water retention capacity of the material. White through-hole foam glass can not only reduce the absorption of solar radiation, but also extend the duration of evaporation and cooling due to greater saturated water content, which can be used as porous material suitable for roof passive evaporation.

**Keywords:** porous material; foam glass; pore structure; solar radiation absorption; building roof; evaporation cooling

屋面是炎热地区建筑隔热的重要部位.研究表明,对于有屋面的房间,通过屋面得热占房间总得热

收稿日期: 2020-10-16

通信作者: 冉茂宇(1967-),男,教授,博士,主要从事建筑技术科学的研究. 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项目(18014085035)

的 40%~60%<sup>[1-2]</sup>,是南墙得热的 2.78 倍<sup>[3]</sup>,对屋面进行隔热处理可有效改善室内热环境<sup>[4]</sup>. 太阳辐射当量温度反映了围护结构外表面吸收太阳辐射热使室外热作用提高的程度,而屋面受太阳照射时间最久、强度最大,因此,降低屋面的太阳辐射热吸收是屋面隔热的有效途径<sup>[5]</sup>.

为了减少屋面的太阳辐射吸收量,国内外研究人员相继对屋面材料的太阳辐射吸收率进行了实测和研究<sup>[6-10]</sup>. Akbari 等<sup>[11]</sup>在加利福尼亚州的 1 所住宅测试低吸收率涂料对屋面的节能作用,屋面吸收率从 0.82 降至 0.27 后,平均每天节省了 2.2 kW·h 的电能,预计空调季可节省 264.0 kW·h 的电能. Suehrcke<sup>[12]</sup>利用方程推导出在澳大利亚北部浅色屋面比深色屋面获得的热量低约 30%. 庄超群<sup>[13]</sup>在福建省厦门市某宿舍建筑屋顶分别涂黑色、白色和黄色涂料,测试发现在夏季典型日,白色和黄色热反射屋顶的房间空调节电率分别为 28.2%和 23.7%,且可减少房间尖峰负荷,延迟用电尖峰时段. Chen 等<sup>[14]</sup>利用流体动力学(CFD)模拟,发现城市 10 m 以上高度的建筑采用高反射率的材料可有效缓解城市热岛效应.

建筑屋面覆盖一层浅色热反射涂料虽然能够阻隔大部分的太阳辐射热,但涂料的耐热性较差,容易老化,且在雨水冲刷和灰尘蓄积条件下其反射率会减小<sup>[15]</sup>. 因此,各国学者又相继研究了在屋面使用含水多孔质被动蒸发降温的效果. 浦野良美等<sup>[16]</sup>首先测试白色发泡砂浆贴附透气岩棉硅酸钙对试验房壁体的蒸发降温效果,表明日间室内温度相比无蒸发降温隔热结构温度可降低 2~4 ℃,在空调能耗方面节能 24%左右. Run 等<sup>[17]</sup>在美国实测多孔织物贴附泡沫浸飘于屋顶水池对屋面的蒸发降温效果. Nahaar 等<sup>[18]</sup>在印度干旱地区测试麻袋浸水蒸发对屋面的降温效果,研究表明建筑外表多孔织物浸润蒸发具有最好的降温功效. 2009 年, Wanphen 等<sup>[19]</sup>在日本对比实测卵石、硅砂、火山灰和硅质页岩对屋面蒸发降温的影响,发现大颗硅质页岩含水蒸发对屋面降温效果较好,相比混凝土砂浆屋面,可使外表温度降低 8.63 ℃. 孟庆林<sup>[20]</sup>测试砂层含水蒸发对屋面的降温功效. 文献[21-30]对加气混凝土、多孔饰面砖等的含水蒸发进行深入研究,研究表明 30 mm 厚度砂层含水蒸发可降低屋面内、外表面温度,最大分别可降低 5,25 ℃,有效降温时间为 3 d<sup>[20]</sup>. 加气混凝土用于屋面被动蒸发推荐的厚度因气候不同而各异,在高温低湿条件下,100 mm 厚度可减少屋面热流最大达 20 W·m<sup>-2</sup>;在中温、中湿条件下,50 mm 厚度适用性更强<sup>[21]</sup>. 多孔砖因孔隙结构不同而吸水 and 保水特性各异,保水率为 16.4%的多孔砖吸放湿能力较好,将其作为广东省广州市夏季典型气象日的蒸发降温较为合适<sup>[22]</sup>. 刘才丰等<sup>[31]</sup>对比实测 30 mm 厚砂层和加气混凝土在重庆地区的含水蒸发对刚性屋面降温的影响,与文献[20]研究结论类似,砂层和加气混凝土含水蒸发可降低内表面温度,最大分别降低 4.6,4.1 ℃. 由于聚氨酯泡沫具有极大的吸水保水性能<sup>[32]</sup>,王波等<sup>[33]</sup>利用模型箱对比测试了聚氨酯泡沫实铺和架空含水蒸发对厦门市屋面的降温影响,指出材料实铺在屋面更能发挥其降温效果,同时极大减少水分蒸发量.

国内外学者在降低屋面太阳辐射吸收率和多孔材料用于建筑外表含水蒸发的降温两方面都进行不少研究,结果表明,低吸收高反射率的屋面可以极大减小屋面综合温度,含水多孔材料蒸发对建筑降温和节能作用相当明显,但目前的研究尚未综合考虑材料含水蒸发和对太阳辐射吸收的共同作用的影响. 泡沫玻璃是一种新型无机多孔材料,依孔隙结构不同可以分为闭孔和开孔两类,具有质量轻、孔隙率大、耐酸抗碱、耐气候性强、干燥后导热系数小等诸多优点,从其性能上看是比较适合用于建筑外表被动蒸发降温的材料;另外,泡沫玻璃还可根据使用要求进行颜色选择,这为综合考察材料的太阳辐射吸收率和含水被动式蒸发共同降温提供了条件. 本文通过测试不同颜色泡沫玻璃的太阳辐射吸收率、不同孔隙结构泡沫玻璃的饱和含水量,明确泡沫玻璃用于屋面被动蒸发降温的机制和优劣.

1 材料太阳辐射吸收率的测试与计算

1.1 材料太阳辐射吸收率的测试

选取的 5 种多孔材料试样,如图 1 所示. 图 1 中:从左至右依次为红色饰面磁砖、灰色加气混凝土、闭孔黑色、通孔深灰和闭孔白色泡沫玻璃. 红色饰面磁砖是建

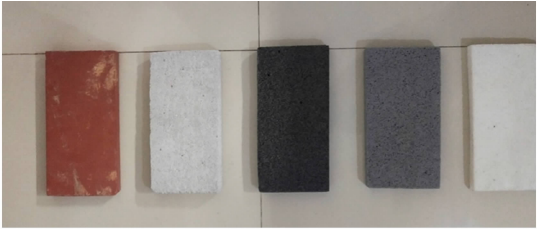


图 1 5 种多孔材料试样  
Fig.1 5 porous material samples

筑中常用的一种建筑外饰面材料;灰色加气混凝土主要用于墙体保温隔热,是现有蒸发降温研究中关注较多的材料.5 种多孔材料在干燥状态下的试样尺寸(长×宽×高)及其干物性参数,如表 1 所示.表 1 中: $\rho_0$  为干密度; $\eta$  为孔隙率; $f_c$  为抗压强度; $\lambda$  为导热系数; $c$  为比热.尺寸、干密度由自测得到,孔隙率、抗压强度、导热系数、比热来自厂家检测报告.

表 1 多孔材料试样尺寸及其干物性参数  
Tab.1 Porous material samples' sizes and dry physical properties

试样	尺寸/ mm×mm×mm	$\rho_0$ /kg·m <sup>-3</sup>	$\eta$ /%	$f_c$ /MPa	$\frac{\lambda}{W \cdot (m \cdot K)^{-1}}$	$\frac{c}{kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}}$
红色饰面磁砖	200×98×20	1 908.16	10.9	12.0	0.760	0.80
灰色加气混凝土	195×95×22	687.03	70.0	6.0	0.220	1.05
黑色泡沫玻璃	200×98×20	160.00	60.0	0.8	0.058	0.84
深灰色泡沫玻璃	192×100×21	223.21	80.0	1.1	0.080	0.84
白色泡沫玻璃	198×100×22	227.27	47.0	1.1	0.064	0.84

为了获得不同材料对太阳辐射的吸收率,将 5 种多孔材料切成 50 mm×50 mm×20 mm 的方块,采用分度值为 1 nm 和测试范围为 280~2 500 nm 的 LAMBDA1050 型紫外-可见光-近红外分光光度计测定各种材料在短波段的吸收率,测试结果如图 2 所示.图 2 中: $\rho$  为吸收率; $q$  为太阳的单色辐射强度.由图 2 可知:在 5 种材料中,黑色泡沫玻璃在整个短波范围内吸收率都较大,白色泡沫玻璃的吸收率在多数波段上最小,其他 3 种材料的吸收率介于白色和黑色泡沫玻璃之间;红色饰面磁砖和深灰色泡沫玻璃的吸收率随波长的增加呈不规则逐渐减小,而白色泡沫玻璃和灰色加气混凝土的吸收率在紫外波段迅速降低后变化较为平缓,且稍有上升;白色泡沫玻璃、灰色加气混凝土和深灰色泡沫玻璃的吸收率在波长 2 000 nm 附近出现了一个峰值.

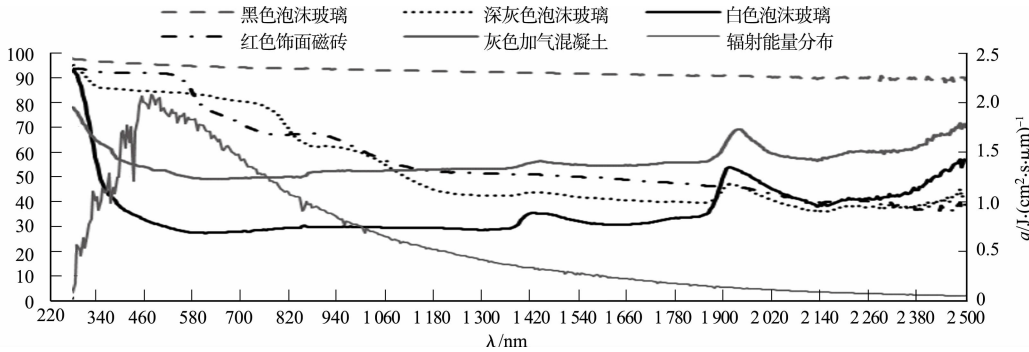


图 2 太阳辐射能量分布及各材料光谱吸收率  
Fig.2 Solar radiation energy distribution and spectral absorption rate of each material

1.2 材料太阳辐射吸收率的计算

由于所测材料的吸收率随波长的变化而变化,反映不出材料对太阳辐射整体能量的吸收情况,且太阳的单色辐射能力随波长变化也不同(图 2).因此,有必要计算材料对太阳辐射的吸收率.太阳辐射在 280~25 00 nm 范围内的能量占比为 96% 以上<sup>[34]</sup>,根据该波长范围内的能量分布,不同波段范围的太阳辐射吸收率为

$$\rho^{(a,b)} = \frac{\int_b^a \rho(\lambda) \cdot q(\lambda) d\lambda}{\int_b^a q(\lambda) d\lambda} \tag{1}$$

式(1)中: $\rho^{(a,b)}$  为  $a \sim b$  波段的太阳辐射吸收率,%; $\lambda$  为波长,nm; $q(\lambda)$  为波长为  $\lambda$  时的太阳单色辐射强度, $J \cdot (cm^2 \cdot s \cdot \mu m)^{-1}$ .

由式(1)可得不同波段下多孔材料的太阳辐射吸收率,如表 2 所示.

由表 2 可知:在 380~780 nm 可见光区域,5 种多孔材料的吸收率大小排序为  $\rho(\text{白色泡沫玻璃}) < \rho(\text{灰色加气混凝土}) < \rho(\text{红色饰面磁砖}) \approx \rho(\text{深灰色泡沫玻璃}) < \rho(\text{黑色泡沫玻璃})$ ,红色饰面磁砖的颜色虽然偏暗,但由于表面相对平滑,因此其吸收率与深灰色泡沫玻璃相近;在 780~2 500 nm 近红外区

域,吸收率大小排序为 $\rho$ (白色泡沫玻璃) $<\rho$ (灰色加气混凝土) $<\rho$ (深灰色泡沫玻璃) $<\rho$ (红色饰面磁砖) $<\rho$ (黑色泡沫玻璃);在 280~2 500 nm 全波段,材料对太阳辐射的吸收能力排序为 $\rho$ (白色泡沫玻璃) $<\rho$ (灰色加气混凝土) $<\rho$ (深灰色泡沫玻璃) $\approx\rho$ (红色饰面磁砖) $<\rho$ (黑色泡沫玻璃)。

表 2 不同波段下多孔材料的太阳辐射吸收率

试样	$\rho$			
	$\lambda=280\sim380\text{ nm}$	$\lambda=380\sim780\text{ nm}$	$\lambda=780\sim2\,500\text{ nm}$	$\lambda=280\sim2\,500\text{ nm}$
红色饰面磁砖	0.93	0.83	0.58	0.73
灰色加气混凝土	0.66	0.51	0.53	0.53
黑色泡沫玻璃	0.97	0.95	0.93	0.94
深灰色泡沫玻璃	0.88	0.83	0.54	0.71
白色泡沫玻璃	0.59	0.30	0.30	0.32

2 材料干基保水量及体积保水量测算

多孔材料含水蒸发降温的效果与其蓄水能力有关,蓄水能力大的材料蒸发降温的时间会延长;反之,则会很快变干.因此,有必要对 5 种材料的保水能力进行测试.

先将各材料块置于烘干箱中,在 $(110\pm5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干,连续间隔 1 h、称重 3 次,将不变的质量作为材料干质量;然后,在室温  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,用自来水持续浸泡 48 h,水深超过材料上表面 50 cm,浸泡后取出材料,在室内水平静置 10 min,表面水分充分蒸发后称饱和湿质量;重复上述步骤,测试 3 次,分别取干质量和饱和湿质量平均值进行保水量计算.用饱和湿质量减去干质量可得材料的饱和含水量,用饱和含水量除以干质量可得单位干质量的保水量,用饱和含水量除以材料体积可得单位体积的保水量.

各材料的干基保水量( $\delta$ )及体积保水量( $\rho_v$ )测试结果,如表 3 所示.表 3 中: $m_d$  为干质量; $m_w$  为湿质量.由表 3 可知:干基保水量大小依次为 $\delta$ (深灰色泡沫玻璃) $>\delta$ (黑色泡沫玻璃) $>\delta$ (灰色加气混凝土) $>\delta$ (白色泡沫玻璃) $>\delta$ (红色饰面磁砖),深灰色泡沫玻璃干基保水量最大为 1.544,分别是黑色泡沫玻璃的 2 倍,是灰加气混凝土和白色泡沫玻璃的 3 倍,是饰面磁砖的 23 倍左右;但体积保水量大小依次为 $\rho_v$ (灰色加气混凝土) $>\rho_v$ (深灰色泡沫玻璃) $>\rho_v$ (黑色泡沫玻璃) $>\rho_v$ (红色饰面磁砖) $>\rho_v$ (白色泡沫玻璃),其中,深灰泡沫玻璃略低于灰色加气混凝土,两者体积含水量基本相当,远大于其他 3 种材料的体积保水量,对比 3 种泡沫玻璃的体积含水量,深灰泡沫玻璃的保水量最大,原因在于其为内部含有大量连通孔的开孔泡沫玻璃.

表 3 各材料干基保水量与体积保水量测试结果

试样	$m_d/\text{g}$	$m_w/\text{g}$	$\delta$	$\rho_v/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
红色饰面磁砖	748	796	0.064	122.45
灰色加气混凝土	277	423	0.527	358.24
黑色泡沫玻璃	68	121	0.779	135.20
深灰色泡沫玻璃	90	229	1.544	344.74
白色泡沫玻璃	99	150	0.515	117.08

3 屋面被动蒸发降温效果实测模拟

3.1 模拟方法

首先,制作材料块试件,材料块试件用厚 2 mm、长 350 mm、宽 200 mm 木板作底板,用宽 50 mm 泡沫围合成开口空腔,以保证材料块侧向绝热.材料块试件的布置,如图 3 所示.图 3 中:用整块塑料薄膜压贴到空腔内表面,以保证材料块底部和侧壁绝湿.然后,制作泡沫绝热块并布置测温热电偶.用泡沫切割机将大块泡沫切割成小块泡沫,并叠加,粘合成  $1\,200\text{ mm}$ (长) $\times300\text{ mm}$ (宽) $\times400\text{ mm}$ (高)的泡沫绝热块,在其顶面放置材料块试件的中心处布置 T 型热电偶探头.最后,将泡沫绝热块置于厦门市某建



筑屋顶的通风良好及日照不受遮挡处,将材料块试件底部涂上导热硅胶,平放在泡沫绝热块顶面上,再将饱和含水材料块嵌入到空腔中,实验模拟水平屋面被动蒸发降温效果.

测试内容主要包括室外气候参数(水平太阳辐射强度、空气温度、相对湿度和风速大小)、材料块试件逐时水分蒸发量、底部界面温度和上表面温度. PH-1 气象站布置在测试现场附近,测温范围为  $-40\sim80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精度为  $\pm0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;相对湿度范围为  $0\sim100\%$ ,精度为  $\pm2\%$ ;风速测试范围为  $0\sim70\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,精度为  $\pm0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;太阳辐射测试范围为  $0\sim2\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,精度小于  $5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . 实测期间,每隔  $10\text{ min}$  记录 1 次数据. 用范围为  $0\sim10\text{ kg}$  和精度为  $0.001\text{ kg}$  ACS-JS 型电子称每隔  $1\text{ h}$  连续 3 次称材料块试件的逐时水分蒸发量,并取其平均值. 用 JTRG-II 型温度巡检仪和 T 型热电偶每隔  $10\text{ min}$  记录 1 次底部界面温度,测温范围为  $-200\sim300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精度为  $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 材料试件上表面温度采用 OPTRISMS 型红外热像仪每隔  $1\text{ h}$  测试 1 次,测温范围为  $-32\sim420\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精度为  $\pm0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 测试时间为 2020-07-04 至 2020-07-06,天气晴朗.

3.2 实验模拟测试结果与分析

室外空气温度和相对湿度随时间的变化,如图 4 所示. 图 4 中: $t_{\text{out}}$  为室外空气温度; $\varphi$  为相对湿度. 室外水平辐射强度瞬时值及风速随时间的变化,如图 5 所示. 图 5 中: $I$  为水平太阳辐射强度; $V$  为风速大小. 由图 4,5 可知:室外平均气温为  $31.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均相对湿度为  $69.8\%$ ,平均风速为  $1.30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,白天水平太阳辐射强度平均值为  $526.50\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,这是厦门夏季典型气候特征.



图 3 材料块试件的布置  
Fig. 3 Material block layout

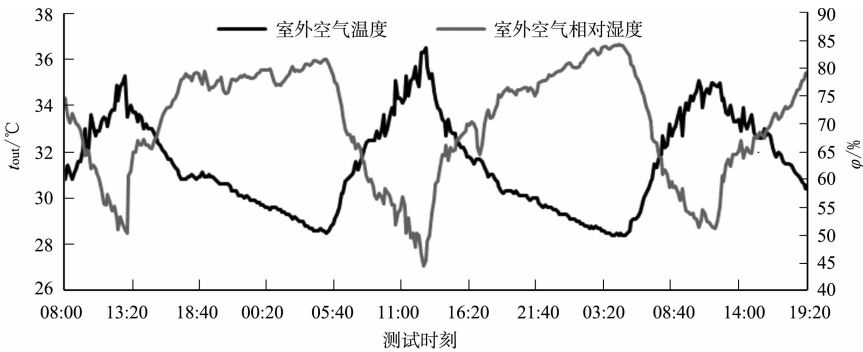


图 4 室外空气温度和相对湿度随时间的变化

Fig. 4 Outdoor air temperature and relative humidity variation with time

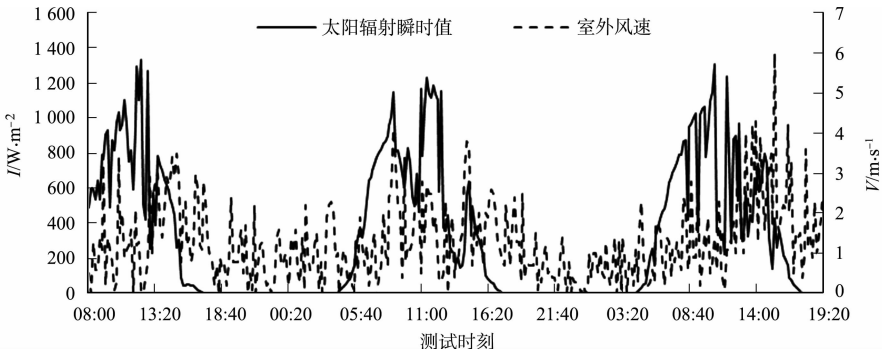


图 5 室外水平辐射强度及风速随着时间的变化

Fig. 5 Outdoor horizontal radiation intensity and wind speed variation with time

材料单位面积逐时蒸发量,如图 6 所示. 图 6 中: $W_b$  为逐时蒸发量. 由图 6 可知:各材料单位面积逐时水分蒸发量在首日最大,其后逐日递减;材料在白天太阳辐射下蒸发量大,而在夜间蒸发量极低;与白天逐时太阳辐射强度对比(图 5),白天太阳辐射强度大时,水平向材料水分蒸发量也大,说明太阳辐射强度是影响水分蒸发的主要因素;深灰色泡沫玻璃在第 1 小时的蒸发量最大,但从第 2 小时以后,灰色

加气混凝土的逐时蒸发量最大,可达  $0.918\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ . 根据表 3 材料含水量测试结果,灰色加气混凝土和深灰色泡沫玻璃初始体积保水量较大,单位时间水分蒸发量也大,说明用初始体积保水量指标评判材料维持蒸发降温时间较为合理.

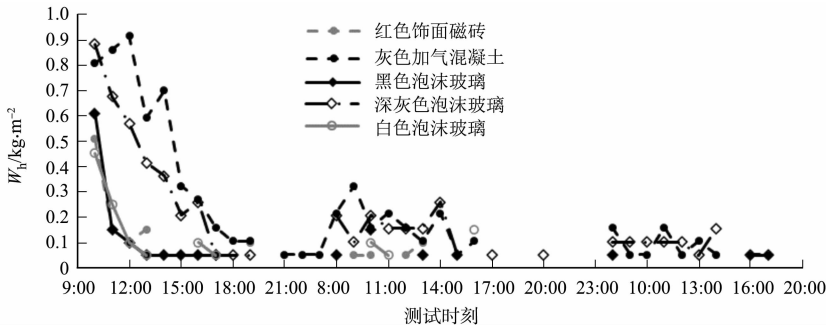


图 6 材料单位面积逐时蒸发量

Fig. 6 Hour evaporation per unit area of material

各材料单位面积日蒸发量,如图 7 所示. 图 7 中:  $W_d$  为日蒸发量. 由图 7 可知:深灰色泡沫玻璃和灰色加气混凝土因初始体积保水量大,日蒸发量也大,维持水分蒸发降温的时间也较长;在 3 种泡沫玻璃中,深灰色泡沫玻璃持续蒸发降温时间较长,而黑色和白色泡沫玻璃维持水分蒸发降温时间较短,这是因为黑色和白色泡沫玻璃体积含水量较少,白色泡沫玻璃比黑色泡沫玻璃维持水分蒸发降温的时间稍长,这是因为白色泡沫玻璃太阳辐射吸收率小;红色饰面磁砖的初始体积保水量虽然与白色泡沫玻璃相当,但因其太阳辐射量吸收大,最易被晒干,实测期间的红色饰面磁砖的保水时间约为 10 h,灰色加气混凝土和深灰色泡沫玻璃均大于 60 h,黑色和白色泡沫玻璃均约为 8 h,红色饰面砖虽然初始体积保水量小,但由于表面水分快速蒸发后,密实的结构阻止了内部水分快速蒸发,水分缓慢持续地减少,反而比黑色和白色泡沫玻璃有更长的保水时间.

因此,多孔材料水分蒸发量不仅与其体积保水量有关,还与其表面太阳辐射吸收率有关,选用体积保水量大和浅色外表的多孔材料有利于促进蒸发降温效果和延长蒸发降温时间.

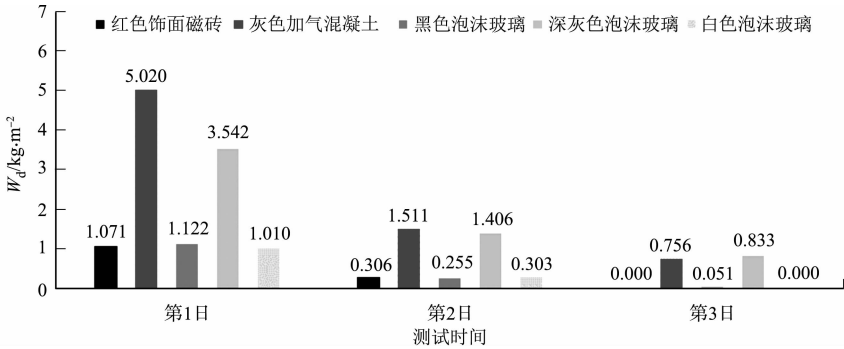


图 7 各材料单位面积日蒸发量

Fig. 7 Day evaporation per unit area of each material

水平向各材料贴附界面温度( $t_0$ )随时间的变化,如图 8 所示. 由图 8 可知:各材料块底面温度在夜间稳定下降且差别不大,都低于环境气温,而在白天波动剧烈,主要受到太阳辐射强度瞬时波动的影响.

对比同一材料在 3 个白天的测试结果,发现界面温度随测试天数的增加而增加,这种增加趋势在前期表现较大而在后期表现较小,这主要是由于材料中含水量随蒸发天数的增加而逐日减少,蒸发降温能力逐渐下降. 对比不同材料在 3 个白天的界面温度大小,第 1 个蒸发日差别明显,  $t_0$ (黑色泡沫玻璃)  $>$   $t_0$ (红色饰面磁砖)  $>$   $t_0$ (白色泡沫玻璃)  $>$   $t_0$ (深灰色泡沫玻璃)  $>$   $t_0$ (灰色加气混凝土),而在第 2,3 个蒸发日,这种差别有所变动,出现白色泡沫玻璃在第 2 个蒸发日低于灰色泡沫玻璃和在第 3 个蒸发日下午低于灰色加气混凝土的现象,原因在于白泡沫玻璃在蒸发 8 h 后就近于干燥,其低导热系数和太阳辐射吸收率起到的降温作用高于深灰色泡沫玻璃和灰色加气混凝土在相应时段依靠蒸发起到的降温作用.

在实测期间,由于正午接受太阳辐射强度最大,各材料块试件底面温度在中午达到高峰. 在第 1 个

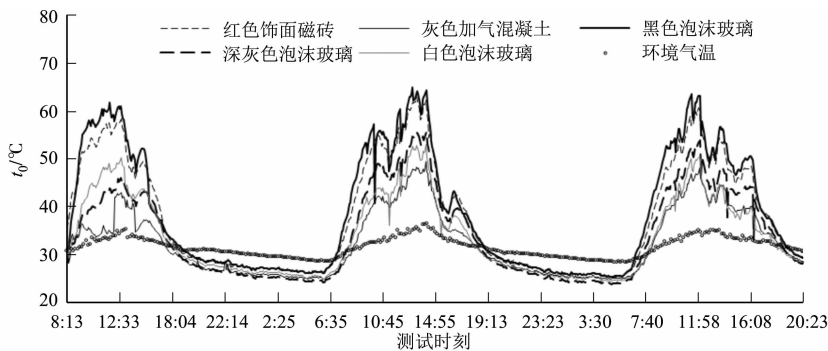


图 8 水平向各材料贴附界面温度随时间的变化

Fig. 8 Temperature of the horizontally attached interface of each material variation with time

蒸发日,底面温度峰值依次为黑色泡沫玻璃 61.8 °C、红色饰面砖 57.7 °C、白色泡沫玻璃 50.3 °C、深灰色泡沫玻璃 46.1 °C 和灰色加气混凝土 43.0 °C。在第 2 个蒸发日下午,白色泡沫玻璃试件底面温度开始低于灰色加气混凝土,最多低 0.5 °C,但在第 3 个蒸发日上午再次高于灰色加气混凝土,而在第 3 个蒸发日下午又明显低于灰色加气混凝土。深灰色泡沫玻璃试件底面温度在第 1 个蒸发日仅高于灰色加气混凝土,比白色泡沫玻璃试件低,最多可降 5.6 °C,但在第 2 个蒸发日的 7:30 又开始高于白色泡沫玻璃,最大达 6.4 °C。此时,深灰色泡沫玻璃吸收太阳辐射升温作用逐渐增强,这说明干燥的白色泡沫玻璃隔热降温效果甚至优于深灰色泡沫玻璃含湿蒸发的降温效果。

从降温持续时间看,黑色泡沫玻璃蒸发量小且吸收辐射量大,试件底面温度持续高,降温持续时间很短;白泡沫玻璃虽然持续蒸发降温时间仅为 8 h,但依靠辐射吸收率低和干燥时导热系数低的特性,到蒸发后期仍可保持与灰色加气混凝土相当的较低温度,降温效果较好;深灰色泡沫玻璃因蒸发量大降温效果好,但在太阳辐射强度类同的情况下,第 2 个蒸发日温度比第 1 个蒸发日高,水分减少到一定程度后,降温效果减弱,在第 3 个蒸发日温度甚至高于灰色加气混凝土和白色泡沫玻璃。因此,在材料近于干燥的情况下,材料的降温效果取决于太阳辐射吸收率,即白色泡沫玻璃的隔热降温效果最好,而红色饰面磁砖与黑色泡沫玻璃隔热降温效果最差。

用 OPTRISMS 型红外热像仪检测,第 2 个蒸发日 14:00 的材料块试件的表面温度分布,如图 9 所示。利用 AnalyzIR 软件统计各时刻材料外表面中心温度,材料块试件外表面中心温度( $t_s$ )随时间变化,如图 10 所示。

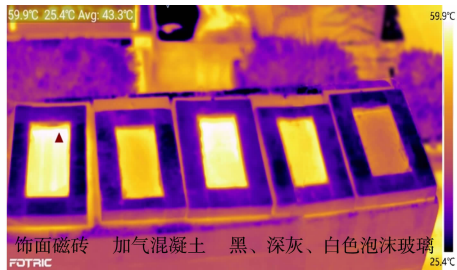


图 9 第 2 个蒸发日 14:00 的材料块试件的表面温度分布

Fig. 9 Surface temperature distribution of material block specimen at 14:00 on 2nd evaporation day

由图 10 可知:黑色泡沫玻璃因吸收太阳辐射量最多,在白天大部分时刻外表温度最高,红色饰面磁砖次之;灰色加气混凝土在第 1 个蒸发日由于蒸发量大而降温,表面温度最低,

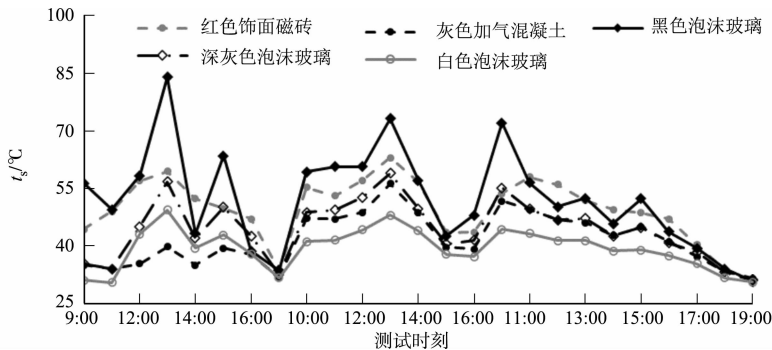


图 10 材料块试件外表面中心温度随时间的变化

Fig. 10 Temperature of outer surface center of material block variation with time

在第 2,3 个蒸发日,其外表温度比白色泡沫玻璃高;白色泡沫玻璃外表面平均温度为 39.4℃,比灰色加气混凝土低了 0.2℃,这是因为灰色加气混凝土含水量因蒸发逐渐减少,外表水分蒸发缓慢或接近干燥状态后,对太阳辐射的吸收量大于白色泡沫玻璃;对于 3 种颜色的泡沫玻璃,在各朝向均表现出白色泡沫玻璃外表面温度最低、黑色泡沫玻璃外表面温度最高的规律,在水平向第 1 个蒸发日的 13:00 极差值可达到 34.6℃,进一步证明了材料外表低太阳辐射吸收率(即浅色或白色)对被动蒸发降温效果有利.因此,在实际应用中需注意颜色对多孔材料蒸发降温效果的影响.

4 结 论

通过实测不同颜色和孔隙结构的泡沫玻璃、红色饰面磁砖、灰色加气混凝土的太阳辐射吸收率、体积保水量,对比分析材料块试件水平放置时的逐时水分蒸发量、外表面温度及底部界面温度,得出了如下 4 个主要结论.

- 1) 3 种颜色泡沫玻璃的太阳辐射吸收率分别为白色 0.32、深灰色 0.71、黑色 0.94.
- 2) 测试获得了闭孔和通孔泡沫玻璃的干基保水量和体积保水量,表明闭孔泡沫玻璃的干基保水量和体积保水量分别在 0.515~0.779 和 117.08~135.20 kg·m<sup>-3</sup>;通孔泡沫玻璃的干基保水量和体积保水量分别为 1.544 和 344.74 kg·m<sup>-3</sup>左右,通孔泡沫玻璃和灰色加气混凝土的体积保水量相当,是闭孔泡沫玻璃和红色饰面磁砖的 2.5~3.0 倍.
- 3) 多孔材料的蒸发降温效果和维持蒸发降温的时间与材料体积保水量成正相关,材料体积保水量越大,蒸发降温效果越好,维持蒸发降温的时间越长,表明将体积保水量作为衡量多孔材料含水蒸发降温的指标之一是合适的.
- 4) 多孔材料的太阳辐射吸收率对被动蒸发降温有较大影响,浅色或白色的材料对太阳辐射吸收较少,可降低水分蒸发量,维持更长的蒸发降温时间.因此,选择通孔白色泡沫玻璃不仅有较高的体积保水量和较长的蒸发降温时间,而且干燥后具有较好的隔热降温性能,能充分发挥其被动蒸发和隔热降温优势.

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,2011,33(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] 柳孝图. 建筑物理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[6] GRIGGSE I,SHARP T R,MACDONALD J M. Guide for estimating differences in building heating and cooling energy due to changes in solar reflectance of a low-sloped roof[R]. Washington D C:[s. n.],1989:2-57.

[7] PARKER D,SHERWIN J,SONNE J,et al. Demonstration of cooling savings of light colored roof surfacing in Florida commercial buildings: Our savior's school[R]. Florida:[s. n.],1996:4-23.

[8] SIMPSON J R,MCPHERSON E G. The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona[J]. Energy and Buildings,1997,25(2):127-137. DOI:10.1016/S0378-7788(96)01002-X.

[9] 徐江民. 热反射屋面与种植屋面节能对比研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.

[10] 谭康豪,覃英宏,苏益声,等. 城市模型反射率测量方法与运用[J]. 土木建筑与环境工程,2016,38(2):111-117. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.02.015.

[11] AKBARI H,BRETZ S,DA N M K. Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs[J]. Energy and Buildings,1997,25(2):117-126. DOI:10.1016/s0378-7788(96)01001-8.

[12] SUEHRCKE H. Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate[J]. Energy and Buildings,2008,40(12):2224-2235. DOI:10.1016/j.enbuild.2008.06.015.



- [13] 庄超群. 热反射屋面自然老化性能与节能实效研究:以厦门宿舍建筑为例[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [14] CHEN Ruoning, YOU Xueyi. Reduction of urban heat island and associated greenhouse gas emissions[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2020, 25(4): 689-711. DOI:10.1007/s11027-019-09886-1.
- [15] 高亚锋, 郭睿, 徐江民, 等. 高反射涂料自然老化后的隔热性能[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(6): 129-134. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.018.
- [16] 良美浦野, 渡边俊行, 林徹夫, 等. 外保温墙体蒸发冷却对其性能的影响研究[C]//日本建筑学会计画系论文报告集. 东京:[s. n.], 1986:19-29.
- [17] RUN S T, 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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]. *土木与环境工程学报:中英文*, 1997, 19(6): 35-41. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.1997.06.006.
- [21] 许伊那, 李宁, 孟庆林. 不同厚度多孔砖在被动蒸发冷却技术中的适应性研究[J]. *新型建筑材料*, 2011(7): 30-33, 37.
- [22] 许伊那. 多孔材料饰面建筑构件的被动蒸发冷却研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.
- [23] 许伊那, 张磊, 孟庆林. 多孔贴面墙体构件在热湿气候风洞中的被动蒸发冷却效果研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2013, 39(4): 355-358. DOI:10.3969/j.issn.1008-1933.2013.04.087.
- [24] 张磊, 冯燕珊, 孟庆林, 等. 建筑多孔饰面砖蒸发降温的风洞实验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(9): 113-119. DOI:10.3969/j.issn.1674-2974.2014.09.018.
- [25] 张磊, 刘习康, 孟庆林, 等. 多孔饰面砖墙体蒸发降温效果试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(6): 1036-1042, 1048. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2014.06.017.
- [26] 潘振皓, 孟庆林, 李琼. 多孔建筑材料含盐被动蒸发降温研究综述[J]. *建筑科学*, 2016, 32(10): 105-112. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2016.10.18.
- [27] 李丽, 周孝清, 赵立华, 等. 广州地区降雨对墙体传热影响的实验研究[J]. *暖通空调*, 2016, 46(12): 132-137.
- [28] 张玉, 张磊, 孟庆林, 等. 建筑多孔材料太阳能蒸发冷却性能动态实验研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(4): 1130-1137.
- [29] 汪俊松, 孟庆林, 张玉, 等. 透水砖吸水及保水性能研究[J]. *建筑科学*, 2017, 33(10): 45-52. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2017.10.08.
- [30] 潘振皓, 孟庆林, 李琼. 多孔烧结陶片在盐溶液中的吸水特性[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(6): 117-122. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.016.
- [31] 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:10.3969/j.issn.1000-582X.2001.03.012.
- [32] 高云天, 冉茂宇, 池佩富. 应用于屋面蒸发降温的多孔质材料重复吸水性能实验[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(6): 741-747. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201903057
- [33] 王波, 冉茂宇. 被动蒸发与架空遮阳不同组合对屋面隔热降温的影响[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(5): 689-695. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201804057.
- [34] 冯驰, 孟庆林, 李宁, 等. 佛甲草辐射特性的研究[J]. *建筑科学*, 2010, 26(4): 65-68. DOI:10.3969/j.issn.1002-8528.2010.04.013.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)