

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201903057



应用于屋面蒸发降温的多孔质材料 重复吸水性能实验

高云天¹, 冉茂宇¹, 池佩富²

(1. 华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建天利高新材料有限公司, 福建 厦门 361021)

摘要: 测试改性酚醛材料和醋酸纤维材料的重复吸水性数据,并通过改造原有的浸润吸水装置,实测改性酚醛材料和醋酸纤维材料在单面接触水源状态下的重复浸润的吸水特性曲线.根据前人的相关研究模型,计算两种材料实际的毛细吸水系数曲线并进行评价.结果表明:两种材料初次进行浸润后,吸水性能降低比例均在 25% 左右;改性酚醛材料快速吸水阶段会维持 1 min 左右,而醋酸纤维材料快速吸水阶段会维持 10 s 左右;两种材料实际应用于被动蒸发降温技术时仍需增强重复吸水性能.

关键词: 浸润装置;蒸发降温;毛细吸水系数;吸水性能;改性酚醛材料;醋酸纤维材料

中图分类号: TU 111.2; TU 551.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)06-0741-07

Experiment on Repeated Water Absorption Performance of Porous Materials Used for Roof Evaporation and Cooling

GAO Yuntian¹, RAN Maoyu¹, CHI Peifu²

(1. College of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Tenlead Advanced Material Limited Company, Xiamen 361021, China)

Abstract: The water absorption data of modified phenolic materials and acetate fibers were measured. The water absorption curves of modified phenolic aldehyde and acetate fibers were measured by modifying the original soaking water absorption. Based on the previous research models, the actual capillarity coefficient curves of the two materials were calculated and evaluated. The results show that the water absorption of the two materials decrease by about 25% after the first infiltration; the modified phenolic material will maintain the rapid water absorption stage for 1 min, while the acetate fiber material will maintain the rapid water absorption stage for 10 s; when the two materials are applied to passive evaporation cooling technology, they still need to enhance the repeated water absorption.

Keywords: infiltrating device; evaporation and cooling; capillarity coefficient; water absorption performance; modified phenolic material; acetate fiber material

屋面被动蒸发冷却是实现炎热地区建筑降温节能的有效途径.在国外, Hay 等^[1]研究屋顶水池用活动绝缘板白天遮阳夜间敞开的降温情况; Jain 等^[2]在印度对屋顶水池、屋顶喷淋、屋顶润湿的降温进行实测比较,指出屋顶润湿蒸发会引起热量从室内传向室外. Nahar 等^[3]在印度干旱地区测试了多种被

收稿日期: 2019-03-26
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(17013085002)

动式技术的降温效果,发现麻袋浸水蒸发的降温效果最好. 莆野良美^[4-7]最先提出将含水多孔材料用于屋面的被动式降温. 在国内,赵鸿佐^[8]最先研究了屋顶喷淋的降温效果. 随后,陈启高^[9]、丁小中^[10]、Tang 等^[11-12]、冉茂宇^[13]、王波等^[14]对屋顶水池降温进行了一系列深入研究;孟庆林等^[15-16]、冉茂宇等^[17]对屋面多孔质含湿蒸发降温进行了大量研究. 国内研究表明,在屋顶水池中种植浮生植物或利用漂浮板浸润蒸发是最有效的屋面被动蒸发降温方法之一. 现有的浮盖板式蓄水屋顶构造是在水池底部设置隔离层,注水后,水面上以聚苯乙烯带或其他可漂浮的材料作为骨架,骨架上放置一张兜网,再在上面铺麻袋或是浮布^[11]. 本文对蓄水屋顶上铺设可吸水材料这一类情况进行模拟,选择改性酚醛多孔材料和醋酸纤维材料作为底部浸润吸水材料,测试两者毛细吸水特性和可重复利用性,并对它们的吸水性能和毛细系数进行比较.

1 实验部分

1.1 实验材料

应用于建筑被动蒸发降温技术的材料应具有质量轻、透水性强、加工简单且造价低等特点. 改性酚醛材料和醋酸纤维材料是目前应用较为广泛的建筑材料,且具有上述优点的同时,又有较好的吸水性,在建筑被动蒸发降温技术领域具有较好的发展前景. 目前,针对这两种材料的吸水性和可重复利用性进行测试的实验不多. 因此,选用这两种材料进行测试实验.

选用的改性酚醛材料由福建天利高新材料有限公司生产,其孔隙率为 96%,干密度为 $31.02\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,如图 1 所示. 在室内温度为 $(21\pm1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下,将大块的酚醛板切割成 3 个 5 cm (宽) $\times 10\text{ cm}$ (长) $\times 4\text{ cm}$ (高)的小块,质量分别为 $6.21, 6.13, 5.48\text{ g}$ (由于材料表面纤维极易剥离,相同体积下,部分平面平整程度不同或棱角处有细小缺口,导致质量略有不同),对应编号为 A1,A2,A3.

醋酸纤维材料的孔隙率为 44.7%,干密度为 $125.79\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,如图 2 所示. 称量 3 组质量为 20 g ,长度为 10 cm 的醋酸纤维丝,对应编号为 B1,B2,B3. 以相同的方式塞入内径为 43 mm ,外径为 5 mm ,高度为 100 mm 的聚乙烯圆管内,进行 3 组实验.

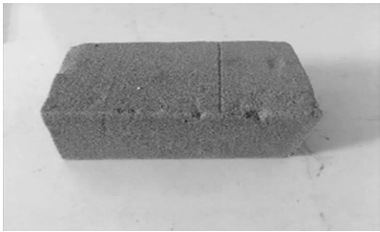


图 1 改性酚醛材料
Fig. 1 Modified phenolic material

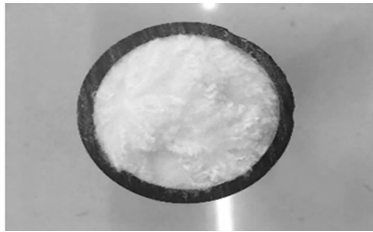


图 2 醋酸纤维材料
Fig. 2 Acetate fiber material

1.2 实验装置

对文献[18]的测试装置进行改造,实验装置如图 3 所示. 将 DJ-500 型电子天平(最大量程为 500 g ,分度值为 0.01 ,江苏省常熟市衡器厂)放置在实验台上,实验台上有槽,通过聚酯纤维吊绳将金属的材料夹悬吊起. 吊绳从玻璃管内穿过,玻璃横放于电子天平上,其目的是为了支撑起聚酯纤维吊绳,避免吊绳与电子天平、实验台相互接触,从而影响实验精度. 材料夹下面是内径尺寸为 21.8 cm (长) $\times 14.2\text{ cm}$ (宽) $\times 16.6\text{ cm}$ (高)的玻璃溢水槽. 进水管两端分别连接进水阀门和溢水槽底部,用来为水槽注水. 溢水槽周围是一个排水槽,用来接取从溢水槽里溢出的水. 将 D7000 型尼康相机设置在电子天平正前方,记录电子天平读数的变化情况,并在相机拍摄视野内部设置秒表,确保在拍摄电子天平读数时可以拍摄到秒表读数.

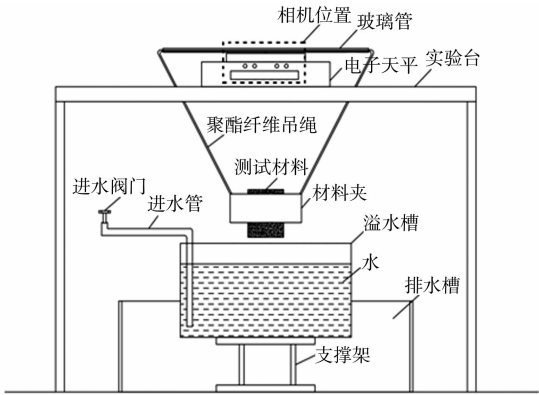


图 3 实验装置
Fig. 3 Experimental setup

1.3 测试方法

现有的测试应用于浮板式蓄水屋顶的材质吸水性能的方法, 是根据国际标准 ISO 15148:2002(E)《建筑材料和产品的温湿性能部分浸入法测定吸水系数》^[18] 制定的. 采用隔水、隔气材料对测试材料的上表面及四周进行封贴处理; 侧边封贴至距底边 3~5 mm, 上表面封贴时留一定量的排气孔, 排气孔的孔径与孔距均有一定要求. 测试材料用点支撑安置, 浸入液面以下 1~2 mm, 在吸水达到设定时长后, 取出称量^[18].

针对所要模拟的浮盖板式蓄水屋顶构造(图 4), 现有装置存在以下 3 个主要问题. 1) 封贴的材料即使留有一定量的排气孔, 也不能同实际材料一样漂浮在水面上自由排气; 封贴的材料会对排出气体的量和速度有影响, 进而影响材料的排水量和吸水速率. 2) 材料并非严格意义上的单面吸水, 装置中的液面会随着材料的吸水而不断下降; 若是吸水性较强的材料, 可能会吸水过多, 从而使材料与液面分离而停止吸水. 3) 每次称量都需要打开水槽拿出试件, 无法获得连续的吸水特性曲线.

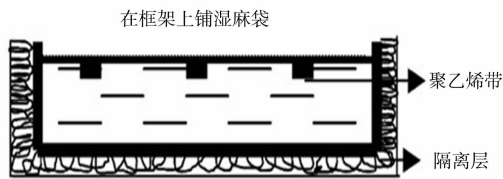


图 4 浮盖板式蓄水屋顶构造
Fig. 4 Floating coverplate type
water storage roof structure

此外, 无论是屋顶水池漂浮蒸发降温或是利用多孔质蒸发降温, 在夏季长时间暴晒下都会出现缺水现象. 在这种情况下, 多孔织物或材料会被晒干, 若要维持其蒸发降温能力, 必须进行补水. 当进行间歇补水时, 多孔织物或材料会出现多次浸润吸水现象. 多孔织物或材料浸润吸水性能随着吸水次数的变化情况, 是屋顶水池漂浮蒸发和多孔质蒸发降温需要考虑的重要问题. 因此, 探讨多孔织物或材料毛细吸水的可重复利用性, 对屋面被动蒸发降温设计及材料选择具有实际意义.

1) 对不同组改性酚醛和醋酸纤维试件分别进行实验. 首先, 分别将改性酚醛试件 A1, A2, A3 的一侧(10 cm×4 cm)朝下夹在材料夹上, 调整材料高度, 使酚醛试件底面恰好与溢水槽边沿高度相同, 并保持水平状态. 实验开始时, 开启相机开始记录. 然后, 打开进水阀门并控制水流保持不变, 水槽内液面逐渐升高. 在水灌满溢水槽的瞬间, 水与材料相互接触, 电子天平瞬间开始读数; 继续注入的水流会从槽里溢出, 因此, 当水与材料接触后, 液面不会再增高或降低. 最后, 对相机录像逐帧分析, 读取电子天平称量的时间和材料吸水的质量数据. 醋酸纤维试件 B1, B2, B3 的实验步骤与改性酚醛试件实验相同.

2) 对相同改性酚醛和醋酸纤维试件分别进行实验. 采用质量为 6.21 g(A1)的改性酚醛试件, 重复以上实验步骤 3 次. 在每次实验间隙, 将试件放在通风无阳光直射处静置 72 h, 使其质量恢复到(6.21±0.50) g 时, 再进行重复试验. 重复试验均在完全相同的室内条件下, 由同一组人员使用相同的实验仪器进行测试. 醋酸纤维试件(B2)重复实验的步骤与改性酚醛试件实验相同.

实验过程中需要注意以下 2 点. 1) 为保证材料测试面与溢水槽相切, 可先在溢水槽上部架板, 将材料放置于板上, 再调节吊绳长度. 2) 在整个测试过程中, 材料与水接触的表面会产生少量气泡, 这些气泡可能会在一定程度上影响测试数据, 但随着时间的增加, 气泡会脱离材料, 测试数据将恢复正常. 这种情况在数据上表现为吸水曲线有小幅度的波动, 这是难以避免的, 不会对数据的整体趋势产生影响.

2 实验结果与分析

2.1 评价参数

毛细吸水系数可以描述建筑材料的吸水能力. 文献[19-24]忽略空气的重力, 并视材料毛细管为均匀等宽的圆柱结构, 将材料吸水视为垂直毛细上升运动, 由 Waburn 方程推演出材料的吸水通量 Δm 与吸水时间 t 的二次方根呈线性相关, 即

$$A_w = \Delta m / \sqrt{t}. \tag{1}$$

式(1)中: A_w 是 $\Delta m-t^{1/2}$ 线性拟合的斜率, 即为毛细吸水系数.

Hoffmann 等^[25-27] 根据经验公式, 将毛细吸水系数公式修改为指数公式, 即

$$\Delta m = a(1 - \exp(-b\sqrt{t})). \tag{2}$$

式(2)中: a 为最大含水率; b 为影响吸水动力学的因素.

毛细作用的强弱与液体和多孔材料的物理性质有关. 文献[28-31]认为, 毛细系数与液体的密度、张力、接触角和多孔材料的开孔孔隙度、孔径、孔隙弯曲度有关, 即有

$$A_w = \rho \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \cdot \frac{\varepsilon}{\lambda} \sqrt{r_0} \cdot \sqrt{\frac{\cos \theta}{2}}. \tag{3}$$

式(3)中: ρ 为液体密度; γ 为液体表面张力; μ 为液体粘度; ε 为多孔材料的开孔孔隙度; r_0 为多孔材料孔径; λ 为固体的孔隙弯曲度; θ 为固液接触角, 其值受表面粗糙程度、表面材料和温度的影响, 在室温为 21 ℃ 的条件下, 水与实验所用的玻璃毛细管(苏打石灰玻璃)接触时, 接触角 θ 取 0°.

在固定的环境条件下, 液体的密度、表面张力、粘度参数可以视为常数, 用 C 代替所有常数, 可得

$$A_w = C \cdot \frac{\varepsilon}{\lambda} \sqrt{r_0}. \tag{4}$$

将式(4)代入式(1), 可得

$$\Delta m = \left[C \cdot \frac{\varepsilon}{\lambda} \sqrt{r_0} \right] \cdot \sqrt{t}. \tag{5}$$

由式(5)可知: 在建筑材料自身物理特性中, 影响其吸水的主要因素是开孔孔隙度、材料孔径和材料孔隙弯曲度.

2.2 材料的吸水性能

改性酚醛材料和醋酸纤维材料的浸水重复性能对比, 如图 5, 6 所示. 图 5, 6 中: w_A, w_B 分别为单位质量酚醛材料的吸水质量比和单位质量醋酸纤维的吸水质量比.

由图 5 可知: 改性酚醛试件在浸润开始的 5 min 内保持较高的吸水速率, 在 5 min 后吸水速率逐渐稳定. 由图 6 可知: 醋酸纤维试件在浸润开始的 1 min 内保持较高的吸水速率, 在 1 min 后吸水速率逐渐稳定. 改性酚醛试件虽然有着比醋酸纤维更高的孔隙率, 但其毛细吸水系数并不比醋酸纤维试件高, 这是因为醋酸纤维内部孔隙弯曲度远比酚醛试件复杂. 对不同酚醛板试件的吸水曲线进行分析可知, 由于改性酚醛试件内外部各个部位的孔隙率几乎相同, 所以, 试件 A1, A3 的测试曲线几乎重合, 这也说明了同种材料的毛细吸水系数变化情况相同.

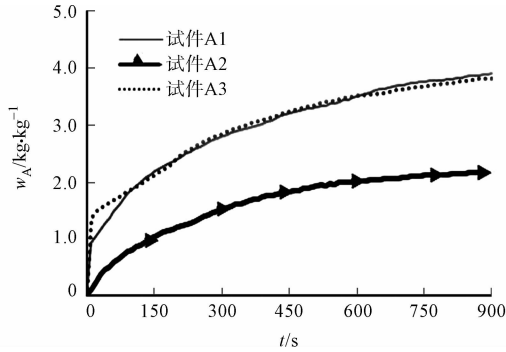


图 5 改性酚醛材料的浸水重复性能对比
Fig. 5 Comparison of repeated water absorption performance of modified phenolic materials

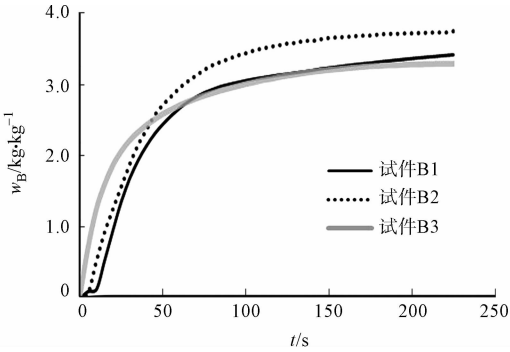


图 6 醋酸纤维材料的浸水重复性能对比
Fig. 6 Comparison of repeated water absorption performance of acetate fiber materials

由于液体表面张力的作用, 在实验初始阶段, 材料面和水面接触的瞬间会产生一定的拉力, 使电子天平的读数瞬间增加. 试件 A1, A3 从开始读数就瞬间达到 5 g 以上, 随后吸水速度逐渐降低, 且趋于稳定; 试件 A2 没有出现这样的情况, 可能的原因在于试件 A2 表面并不足够平整, 试件上的突起部分破坏了面与面之间的张力, 所以, 初始过程没有出现瞬间增高的现象. 另外, 试件 A2 整体的吸水性不如试件 A1, A3, 原因是 A1, A3 为初次进行浸水实验的试件, 而 A2 是曾经做过一次浸水实验而后干燥过的试件, 因此, 试件 A2 在吸水性能上有所降低.

与改性酚醛材料试件不同, 醋酸纤维材料由于放置在聚乙烯圆管内部, 其各个部位的材料孔径和材料孔隙弯曲度都无法保持一致, 这使同一试件在不同部位的吸水性能出现不同. 所以, 试件 B1, B2, B3 的测试曲线在相同时间段的吸水速度略有不同, 但整体的吸水趋势与总吸水量基本一致. 这说明同一醋酸纤维材料在不同部位的吸水速度有所不同, 但相同质量的材料总吸水量基本相同.

2.3 单一材料的浸润吸水重复性能

对于同一改性酚醛板试件和醋酸纤维试件进行吸水重复性实验,结果如图 7,8 所示.

由图 7 可知:开孔型改性酚醛板初次吸水的吸水量较大,可达到自身质量的 4 倍以上,并且吸水速度也很快,可以视为一种优秀的被动蒸发降温材料,但是,在材料烘干后,材料的吸水性能下降;第 2 次的浸润吸水量比第 1 次下降了 25%左右,第 3 次的浸润吸水量比第 2 次下降了 5%左右,第 4 次浸润吸水量与第 3 次相比,下降了 22%左右;第 3 次的浸润吸水量下降最为明显,并且在第 3 次试验时,材料的吸水性能已经降低到一个较低的水平.

由图 8 可知:醋酸纤维试件第 2 次浸润吸水量比第 1 次下降了 28%左右,与改性酚醛试件下降的情况相似.此外,从改性酚醛试件第 4 次浸水情况来看,材料的吸水状态发生了极大的变化,即试件不再是短时间内达到最高的吸水速度,而是保持一个近似恒定的吸水速度进行吸水.这可能是由于材料经过多次的反复浸润,导致内部孔隙的形态发生了变化.

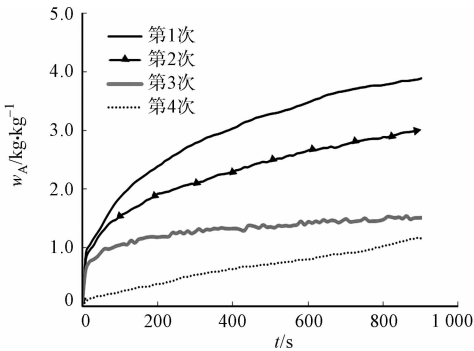


图 7 改性酚醛材料的重复浸润对比
Fig. 7 Comparison of repeated infiltration of modified phenolic materials

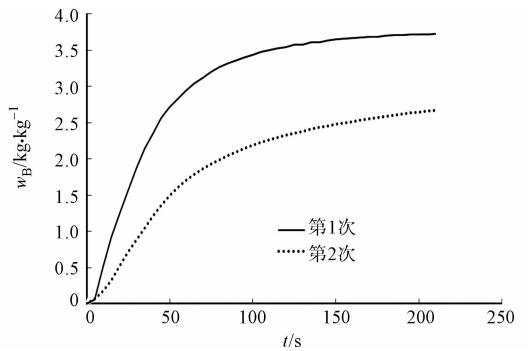


图 8 醋酸纤维材料的重复浸润对比
Fig. 8 Comparison of repeated infiltration of acetate fibers materials

改性酚醛材料和醋酸纤维材料的毛细吸水系数曲线,如图 9,10 所示.由图 9 可知:改性酚醛材料随着浸润次数的增加,毛细吸水系数由高降低,大幅降低发生在浸润后 10 s 左右;在第 4 次浸润时,毛细吸水系数几乎成为一个固定值,说明材料的吸水性能在整个吸水过程中几乎不再发生变化.由图 10 可知:醋酸纤维材料的毛细吸水系数大幅降低发生在试件浸润后 1 min 左右;在第 2 次浸润时,毛细吸水系数发生突变的时间与第 1 次浸润相比无明显变化,单位质量的吸水量略有下降.

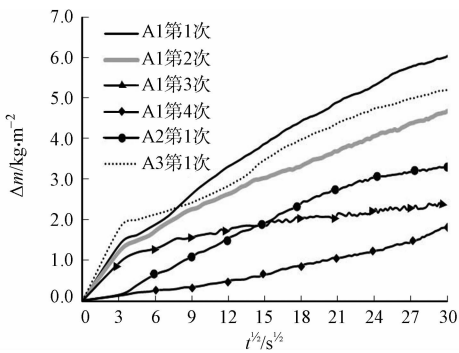


图 9 改性酚醛材料的毛细吸水系数曲线
Fig. 9 Capillarity coefficient curve of modified phenolic materials

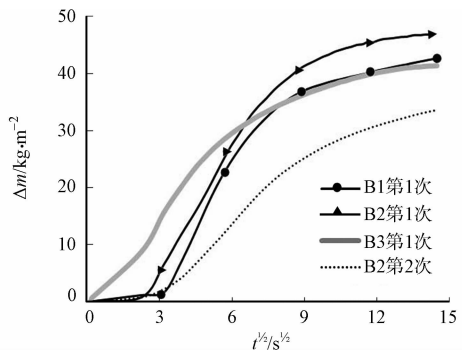


图 10 醋酸纤维材料的毛细吸水系数曲线
Fig. 10 Capillarity coefficient curve of acetate fibers materials

3 结论

通过对原有实验装置进行改造,使用新型装置对两种高吸水性能多孔材料(改性酚醛材料和醋酸纤维材料)进行底部浸润吸水实验,并研究其重复利用后的吸水性能变化情况.这种单面浸润的测试方法可以在构造上更好地模拟屋顶水池漂浮蒸发的状态.原吸水装置需要浸没过材料一定的高度,以免材料

在未饱和时吸水过程因液面高度下降过多而停止吸水;而改造的装置可以使材料始终保持一定的浸没深度,且不需要贴隔水材料,对实验过程产生的影响更小,模拟过程更接近.同时,该装置可以记录材料吸水的全过程,减少人为操作步骤和产生误差的几率.

开孔孔隙度、材料孔径和材料孔隙弯曲度这三者共同影响着材料的吸水性能.单纯比较其中一两个因素不具有实际参考意义.同一材料各个部位的孔隙度、孔径和孔隙弯曲度不同,也会导致材料不同部位的吸水性能产生差异.经过实验测试,相较于改性酚醛材料,醋酸纤维材料具有更高的毛细吸水系数、更低的孔隙率,但其吸水速度优于改性酚醛材料.两种材料的吸水性能均会随着重复使用而下降,两种材料在初次浸润后吸水性能下降的程度相仿,分别下降了 25%,28%左右.改性酚醛材料的毛细吸水系数会在浸润后 10 s 左右发生较大变化,而醋酸纤维材料会在发生浸润后 1 min 左右发生较大变化.两个剧烈变化的时段表明材料从快速吸水的阶段转变为缓速吸水的阶段.

测试的两种多孔质材料,从吸水性能上来讲,都能吸收比自身质量多倍的水,都是吸水性较强的材料.但是从重复性实验来看,浸水的次数可以影响两种材料的吸水性能.在酚醛材料初次吸水时,它可以吸收超过自身质量 4 倍的水;而在第 3 次浸水时,吸水质量不到自身质量的 1 倍,吸水性能大幅减弱;醋酸纤维材料亦是如此.尤其是在改性酚醛材料第 4 次浸润的时候,吸水状态不再是从快速吸水阶段过渡到缓速吸水阶段,而是保持相对稳定的速度持续吸水.出现这种衰减的原因可能是由于材料与水发生了化学反应,或者是吸水后的孔隙结构发生了变化.这对于长期需要铺设在室外风吹雨淋的材料来讲,是一个需要克服的缺点.如何针对开孔型酚醛板这种缺点加以改进,将是今后实验研究的一个重要的方向.研究材料的吸水特性与可重复利用性的相关实验数据,有助于了解实际工程中的屋面被动蒸发降温设计,并选择合理的屋面材料,同时有利于未来建筑被动蒸发降温节能技术的研究和推广.

参考文献:

[1] HAY H R,YELLOTT J I. Natural air conditioning with roof ponds and movable insulation[J]. Ashrae Transactions,1969,75:178-184. DOI:10. 1016/0020-0271(69)90008-4.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 莆野良美. 437 大气放射冷却・蒸発冷却方式に関する基礎的研究:第 1 報 二棟の試験家屋による屋外比較実験の方法と予備実験結果(環境工学)[R]. 福岡:日本建築家協会九州支部,1983.

[5] 莆野良美. 438 大气放射冷却・蒸発冷却方式に関する基礎的研究:第 2 報 二棟の試験家屋による屋外比較実験結果 その1(環境工学)[R]. 福岡:日本建築家協会九州支部,1983.

[6] 莆野良美. 439 大气放射冷却・蒸発冷却方式に関する基礎的研究:第 3 報 二棟の試験家屋による屋外比較実験結果 その2(環境工学)[R]. 福岡:日本建築家協会九州支部,1983.

[7] 莆野良美. 440 大气放射冷却・蒸発冷却方式に関する基礎的研究:第 4 報 室温変動解析モデルによる大气放射冷却・蒸発冷却効果のシミュレーション(環境工学)[R]. 福岡:日本建築家協会九州支部,1983.

[8] 赵鸿佐. 屋顶淋水降温南方建筑降温问题研究[J]. 西安冶金学院学报,1959(1):1-5.

[9] 陈启高. 蓄水屋盖的热工计算理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.

[10] 丁小中. 浮盖式蓄水屋顶隔热功效研究[J]. 重庆建筑大学学报,1998,20(5):10-15. DOI:10. 11835/j. issn. 1674-4764. 1998. 05. 003.

[11] 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.

[12] TANG Runsheng,ETAION Y. Cooling performance of roof ponds with gunny bags floating on water surface as compared with a movable insulation[J]. Renewable Energy,2005,30(9):1373-1385. DOI:10. 1016/j. renene. 2004. 10. 008.

[13] 冉茂宇. 黑色色精与白色涂料质量对比对涂层表面光反射率的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2017,38(6):806-810. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201704104.

[14] 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.
- [15] 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]. 土木建筑与环境工程,1997,19(6):35-41. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.1997.06.006.
- [16] 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. DOI:10.3969/j.issn.1001-702X.2011.07.010.
- [17] 冉茂宇,曹学功. 周期性热湿作用下多孔吸湿体吸解湿性能的实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2001,33(4):313-315. DOI:10.3969/j.issn.1006-7930.2001.04.002.
- [18] INTERNATIONAL ORGANIZATION for STANDARDIZATION. Hygrothermal performance of building materials and products: Determination of water absorption coefficient by partial immersion; ISO 15148:2002[S]. Geneva:International Organization for Standardization,2003.
- [19] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Hygrothermal performance of building materials and products: Determination of water vapour transmission properties; ISO 12572:2001[S]. [S.l.]:British Standards Institution,2001.
- [20] 潘振皓,张磊,孟庆林,等. 多孔烧结陶片吸水特性实验方法[J]. 土木建筑与环境工程,2017,39(1):26-31. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.005.
- [21] ANAND K B,VASUDEVAN V, RAMAMURTHY K. Water permeability assessment of alternative masonry systems[J]. Building and Environment,2003,38(7):947-957. DOI:10.1016/S0360-1323(03)00060-X.
- [22] HALL M,DJERBIB Y. Moisture ingress in rammed earth: Part 1: The effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction[J]. Construction and Building Materials,2004,18(4):269-280. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2003.11.002.
- [23] SMILES D E. Water flow in filter paper and capillary suction time[J]. Chemical Engineering Science,1998,53(12):2211-2218. DOI:10.1016/S0009-2509(98)00061-X.
- [24] PASCULLI A,SCIARRA N. A numerical one-dimensional modelling of water transport through a porous material under saturated and unsaturated condition; Parametric studies[J]. Men Soc Geol It,2001,56:367-374.
- [25] HOFFMANN D,NIESEL K. Quantifying capillary rise in columns of porous material[J]. American Ceramic Society Bulletin,1988,67(8):14-18.
- [26] HOFFMANN D,NIESEL K,WAGNER A. Capillary rise and the subsequent evaporation process measured on columns of porous material[J]. American Ceramic Society Bulletin,1990,69(3):392-396.
- [27] HOFFMANN D,NIESEL K,PLAGGE R. Water retention and conductivity of porous media[J]. American Ceramic Society Bulletin,1995,74(11):48-50.
- [28] BELTRAN V,ESCARDINO A,FELIU C,*et al.* Liquid suction by porous ceramic materials[J]. British Ceramic Transactions and Journal,1988,87(2):64-69.
- [29] BELTRÁN V,BARBA A,RODRIGO M D,*et al.* Liquid suction by porous ceramic materials 2: Influence of pressing conditions[J]. British Ceramic Transactions and Journal,1989,88(6):219-222.
- [30] BELTRÁN V,BARBA A,JARQUE J C,*et al.* Liquid suction by porous ceramic materials 3: Influence of the nature of the composition and the preparation method of the pressing powder[J]. British Ceramic Transactions and Journal,1991,90(3):77-80.
- [31] ESCARDINO A,BELTRÁN V,BARBA A,*et al.* Liquid suction by porous ceramic materials 4: Influence of firing conditions[J]. British Ceramic Transactions and Journal,1999,98(5):225-229. DOI:10.1179/096797899680480.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)