

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.004



# 透水铺装材料湿物理性质测定

汪俊松, 韩雪颖, 张玉, 张磊, 孟庆林

(华南理工大学 建筑学院; 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

**摘要:**为获取典型透水铺装材料的湿物理性质,以用于进行透水铺装热湿传递计算,进而科学评价其蒸发降温效果。以中国居住区广泛使用的 3 种透水铺装材料:烧结陶瓷透水砖(TC)、再生骨料混凝土透水砖(ZS)和普通透水砖(PT)为研究对象,参考相关标准,采用真空饱和和实验测试了透水铺装材料的表观密度  $\rho$ 、开放孔隙率  $\phi$  及真空饱和含湿量  $w_{vac}$ ;采用单面浸泡实验测试了毛细饱和含湿量  $w_{cap}$  及吸水系数  $A$ ;采用渗透实验测试了其渗透系数  $k_T$ 。通过对测试结果进行误差分析,建立了透水铺装材料与液态水相关的湿物理性质数据库。通过对比 3 种材料测试数据发现:保水性能方面,ZS 最优、PT 次之、TC 最差;吸水性能方面,TC 最优、PT 次之、ZS 最低,表明材料保水与吸水性能并非正相关;渗透性能方面,TC 性能最优、PT 次之、ZS 最弱,在满足渗透性能的前提下,PT 最有利于吸水后的蒸发降温。

**关键词:**透水材料;铺装材料;湿物理性质;蒸发降温

**中图分类号:**TU111.2;TU502 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)04-0020-07

## Measurement of hygric properties of porous paving materials

Wang Junsong, Han Xueying, Zhang Yu, Zhang Lei, Meng Qinglin

(School of Architecture; State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

**Abstract:** In order to obtain the hygric properties of typical porous paving materials for calculating heat and moisture transfer and evaluating its effect of evaporation cooling scientifically, three widely used porous paving materials, including sintered ceramic porous brick (TC), recycled aggregate concrete porous brick (ZS) and ordinary porous brick (PT) were selected. Firstly, referring to relevant standards at home and abroad, the apparent density  $\rho$ , open porosity  $\phi$  and vacuum saturation moisture content  $w_{vac}$  of the porous bricks were tested by vacuum saturation test; the capillary water content  $w_{cap}$  and the water absorption coefficient  $A$  of the porous bricks were tested; the permeability coefficient  $k_T$  was tested by Darcy flow

**收稿日期:**2017-08-08

**基金项目:**国家自然科学基金(51308223,51678243);广东省自然科学基金(016A030313506);亚热带建筑科学国家重点实验室自主课题(2015ZC14);中央高校基本科研业务费(2017ZD017,2017ZD039)

**作者简介:**汪俊松(1990-),男,博士生,主要从事建筑热环境与节能研究,E-mail: arwjs@qq.com.

张玉(通信作者),女,E-mail: arzy@scut.edu.cn.

**Received:**2017-08-08

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51308223, 51678243); Guangdong Natural Science Foundation (No. 2016A030313506); State Key Laboratory of Subtropical Building Science Independent Subject (No. 2015ZC14); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2017ZD017, 2017ZD039)

**Author brief:** Wang Junsong (1990-), PhD candidate, main research interests: building thermal environment and energy saving, E-mail: arwjs@qq.com.

Zhang Yu (corresponding author), E-mail: arzy@scut.edu.cn.

experiment. The hygric properties of porous bricks were initially established based on the error analysis of the test results. Through comparing with the test data, for water retention performance, ZS is the best, PT follows, TC is the worst; while, for water absorption performance, TC is optimal, PT follows, ZS is the minimum, showing that water retention and water absorption performance have not positively related; for permeability performance, TC is the optimal, PT follows, ZS is the weakest, on the premise of meeting the permeability, PT brick is the most conducive to the evaporation after water absorption.

**Keywords:** porous materials; pavement materials; hygric properties; evaporative cooling

相比传统下垫面高热容量带来的城市热岛恶化现象<sup>[1]</sup>,透水铺装除了能够在降雨时段有效缓解径流<sup>[2-3]</sup>,还能通过吸水蒸发过程,降低铺装表面温度,进而改善室外热环境<sup>[4-5]</sup>。中国南方地区夏季高温多雨,利用被动蒸发降温有很大优势<sup>[6]</sup>。研究表明,透水铺装可在降雨时段内将地表径流体积减弱为降雨体积的30%~50%<sup>[7]</sup>;晴朗天气下,透水铺装上方WBGT指标值比普通不透水混凝土铺装小,最大差别达到4℃,有效降低了行人在户外活动时被灼伤的可能<sup>[8]</sup>。透水铺装材料的渗透、吸水及保水性能是评价其综合性能的基础指标,从缓解径流的角度,采用渗透系数这一湿物理性质参数即可进行评价<sup>[9]</sup>;但从蒸发降温的角度,降雨后铺装材料的初始含水率是其蒸发降温过程的重要初始边界条件之一,而该指标与铺装材料的吸水率和保水率有关,国际上多采用吸水系数及真空饱和含水率<sup>[10]</sup>两项多孔材料湿物理性质参数分别进行评价。

然而,铺装材料湿物理性质参数在中国严重缺失,部分产品出厂时也仅标注渗透系数。基于此,选取中国南方居住区常用的3种类型透水铺装材料:烧结陶瓷透水砖、普通混凝土透水砖和再生骨料混凝土透水砖,参考湿物理性质相关测试标准,采用真空饱和和实验测试了3种材料的真空饱和含湿量,并计算得出表观密度及开放孔隙率;采用单面浸泡实验测试了其吸水系数、毛细饱和含湿量;最后,对比分析了三者吸水、保水及渗透性能差异,以期完善透水铺装材料湿物理性质数据库。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

选择的3种类型透水铺装材料,分别为陶瓷透水砖(简称“陶瓷砖”,代号“TC”)、再生骨料透水砖(简称“再生砖”,代号“ZS”)和普通混凝土透水砖(简称“普通砖”,代号“PT”),其中,陶瓷砖由陶瓷材料添加结合剂后,高温烧结而成<sup>[11]</sup>;再生砖由建筑混凝土废料经破碎后筛分,加水泥、沙等搅拌压制而成<sup>[12]</sup>;普通砖由粒径尺寸较大的人工碎石为骨料,

添加水泥、沙等搅拌压制而成<sup>[13]</sup>,3种材料表观如图1所示,普通砖的表观孔隙较陶瓷砖与再生砖大,且更粗糙。

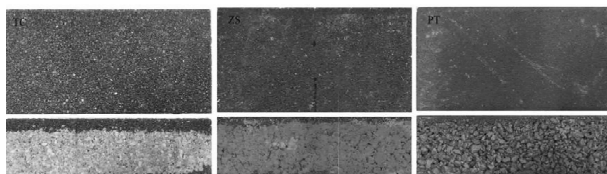


图1 3种类型透水砖表观图

Fig. 1 Three types of porous bricks

实验前,将试件放置于温度为 $105\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的鼓风烘干箱内,每隔24h称重,当连续3次称重试件质量变化率不超过0.1%,且质量不呈单调变化时,则视为达到恒重,将烘干后的试件取出,记录质量,然后置于实验环境内稳定至常温恒重,以排除温度对实验的影响。其他涉及到的实验器材有:天平(SHIMADZU UX4200H型,分度值0.01g,最大量程6.2kg)、电子温度计(精度 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,量程 $-40\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、蒸馏水、量筒(2个,量程分半为 $2\ 000\pm 10\text{ mL}$ 、 $100\pm 1\text{ mL}$ )、烧杯( $2\ 000\pm 200\text{ mL}$ )及自制实验装置等。

### 1.2 实验方法

1.2.1 真空饱和实验 真空饱和实验可获得衡量多孔材料保水性能的真空饱和含湿量这一湿物理性质参数,可参考国际标准ASTMC 1699—09<sup>[14]</sup>。实验通过真空箱内的内外压差使放在其内的多孔材料孔隙内的气体被全部抽出,然后向真空箱内注入蒸馏水,在内外压差作用下,水分进入多孔材料内部,待开放孔隙全部被水填充后,通过水下称重及出水称重,计算出多孔材料的真空饱和含湿量。此外,该实验还能测试出多孔材料的开放孔隙率和表观密度等基础物理指标。

为操作方便并缩短实验时间,将透水材料均切割为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的试件各3块进行实验。实验环境控制为:空气温度 $20\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 $50\%\pm 2\%$ ,实验装置如图2所示。将烘干的试件称重( $m_{\text{dry}}$ ,kg)、冷却后放入敞口玻璃容器内,然

后放入密闭的真空箱中,降低真空箱内部气压至 20 mbar 以下,保持该压力 4 h,以便彻底排除试件孔隙内的空气,保持真空箱内的低压,向干燥器内缓缓注入蒸馏水(水温 20 ℃),通过阀门调节进水速度,使液面上升速度保持在 5 cm/s 左右,当水面到达试件上方 5 cm 后,停止注水,保持试件在水下 3 d 后称重。水下称重时,用铁丝一端吊起试件,将铁丝另一端悬于天平下方,记录试件在有浮力下的重量( $m_{in}$ , kg),然后将试件取出,用柔软的湿布擦去表面的浮水后,在空气中进行称重( $m_{wet}$ , kg),则按照式(1)~(3)计算材料的表观密度  $\rho$ 、真空饱和含湿量  $w_{vac}$  及开放孔隙率  $\phi$ 。

$$\rho = \frac{m_{dry} \rho_{water}}{m_{wet} - m_{in}} \quad (1)$$

$$w_{vac} = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}} \rho \quad (2)$$

$$\phi = \frac{w_{vac}}{\rho_{water}} \quad (3)$$

式中:  $\rho_{water}$  为实验条件下水的密度, kg/m<sup>3</sup>。

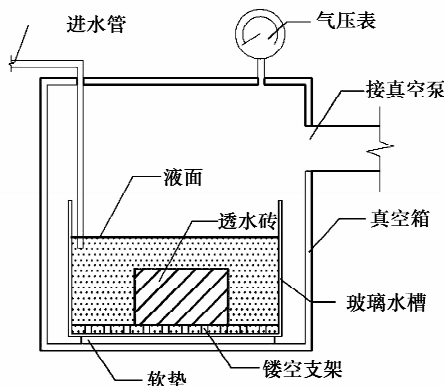


图 2 真空饱和实验装置示意图

Fig. 2 Vacuum saturation test device

1.2.2 单面浸泡实验 单面浸泡实验参考国际标准 ISO15148:2002(E)<sup>[15]</sup>。透水材料上表面为主要接触雨水面,故选择其为浸水面。为操作方便及缩短实验时间,将材料均切割为 100 mm×100 mm×60 mm 的试件各 3 块进行实验。实验环境控制为:空气温度 20±1 ℃,相对湿度 50%±2%。实验前,将试件烘干、降温且称重处理后,采用不透水、不透水且吸水的防水胶条对试件的下表面及 4 边进行密封,侧面封闭至距离上表面 10 mm,下表面留小孔用于排气,将密封好的试件称重。自制实验装置如图 3 所示,采用点支撑方式将上表面浸没于蒸馏水内(水温 20 ℃),由于试件浸水面较为平整,按标准要求,试件浸水深度需保持在 5±2 mm,同时,根据材料吸水快慢,按照一定间隔(如  $t=0$  s、2 s、5 s、10 s、20 s、60 s、30 min、1 h、4 h、24 h)称取包裹后的

试件重量,试件每次取出时保持水平状态,并使用柔软湿布吸附表面明水后迅速称重,待透水砖吸水进入第 2 阶段,且质量变化率不超过 0.1% 后停止实验。根据标准对实验数据进行第 1、2 阶段进行拟合,采用  $\sqrt{t}$  为横坐标,质量增长  $\Delta m$  为纵向坐标,所拟合第 1 阶段直线斜率即为砖体的吸水系数  $A$ 。此外,将第 1 阶段与第 2 阶段拟合曲线交点的纵坐标除以试件高度,则可得到毛细饱和含湿量  $w_{cap}$ 。

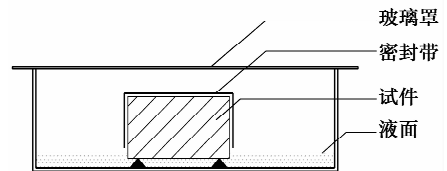


图 3 单面浸泡实验装置示意图

Fig. 3 Partial immersion test device

1.2.3 渗透实验 渗透系数是衡量透水铺装材料渗流能力的重要指标,该指标遵循达西定律,通常采用常水头进行测试<sup>[16]</sup>,计算式见式(4)。中国通常以 15 ℃ 水温为标准温度,该温度下的透水系数见式(5)。

$$k_T = \frac{QL}{SHt} \quad (4)$$

$$k_{15} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{15}} \quad (5)$$

式中:  $k_T$  为水温为  $T$  ℃ 时的透水系数, cm/s;  $Q$  为  $t$  秒内渗出的水量, mL;  $S$  为试件上表面的面积, cm<sup>2</sup>;  $H$  为水位差, cm;  $t$  为时间, s;  $k_{15}$  为 15 ℃ 时的材料透水系数;  $\eta_T$  为  $T$  ℃ 时水的动力粘度系数, kPa·s;  $\eta_{15}$  为 15 ℃ 时水的动力粘度系数, kPa·s。

渗透实验参考《透水砖》(JB/T 945—2005)<sup>[9]</sup>进行,实验装置如图 4 所示。将试件切割为 200 mm×100 mm×60 mm 试件各 3 块进行实验。将干燥的试件用密封胶密封,一共涂刷 3 次,每次间隔时间为 6 h,以保证密封胶彻底晾干,从而使水分全部通过上表面向下层渗透;将密封后的试件与高 300 mm、平面尺寸与试件相同的玻璃透水圆筒采用玻璃胶进行粘合,静止 24 h,以确保玻璃胶完全干燥;将密封好的试件放进玻璃容器后放入真空箱内,抽真空至 90±1 kPa,并保持 30 min;在真空状态下,将采用新制备的蒸馏水(水温 20 ℃)注入玻璃容器内,当水面高于透水砖上表面 10 cm 后停止加水,停止抽真空,浸泡试件 20 min 后取出,以备实验使用;把真空处理好的试件放入透水系数实验装置中,将蒸馏水缓缓倒入圆筒中。待溢流槽内的溢流量和透水圆筒的溢流量稳定后,用钢直尺测量透水圆筒水位和溢流

槽水位之差,并用量筒从出水口处接水,记录 5 min 内的渗流量。

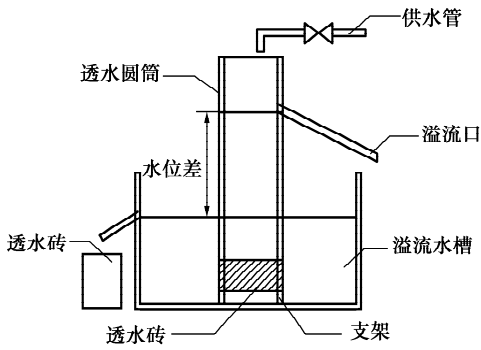


图 4 渗透实验装置示意图

Fig. 4 Permeability test device

### 1.3 误差分析

为衡量测试结果误差,根据国际标准 ISO 5725—1:1994<sup>[17]</sup>中关于重复性误差的定义及参考相关文献<sup>[18]</sup>的计算方法,采用平均相对标准差  $rs$  来描述测试结果的重复性误差  $rs_{repeatability}$  及由材料不均一引起的误差  $rs_{material}$ ,  $rs_{repeatability}$  计算公式为

$$rs_{repeatability} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p rs_{x_{i,j}}(j) \quad (6)$$

$$rs_{x_{i,j}}(j) = \frac{s_{x_{i,j}}(j)}{x_{i,j}(j)} \times 100\% =$$

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^q (x_{i,j} - \overline{x_{i,j}}(j))^2}{q-1}} \times \frac{1}{x_{i,j}(j)} \times 100\% \quad (7)$$

$$rs_{material} = \sqrt{(rs_{x_{i,j}}(i,j))^2 - (rs_{repeatability})^2} \quad (8)$$

$$rs_{x_{i,j}}(i,j) = \frac{s_{x_{i,j}}(i,j)}{x_{i,j}(i,j)} \times 100\% =$$

$$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^q (x_{i,j} - \overline{x_{i,j}}(i,j))^2}{p \cdot q - 1}} \times \frac{1}{x_{i,j}(i,j)} \times 100\% \quad (9)$$

式中: $x_{i,j}$ 为  $i$  样本第  $j$  次测试结果值,为测试值; $p$  为样本的数量; $q$  为测试次数; $\overline{x_{i,j}}(j)$  为单一样本重复实验的平均值; $s_{x_{i,j}}(j)$  为单一样本  $i$  重复  $j$  次测试值的方差; $\overline{x_{i,j}}(i,j)$  所有测试样本测试结果的平均值; $s_{x_{i,j}}(i,j)$  为所有测试样本重复  $j$  次测试值的方差。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 真空饱和实验

3 种透水材料真空饱和含湿量如图 5 所示,其中,ZS 最高、PT 次之、TC 最低,ZS、PT、TC 的真空

饱和含湿量平均值分别为:270.63、234.65、202.59  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,表明在极端情况下,ZS 保水性能最优,高于 PT 的 1.15 倍、TC 的 1.34 倍,这是因为再生骨料表面包裹少许硬化水泥砂浆,而这这些砂浆表面粗糙、内部孔隙率大,有很强的保水能力。3 组样本测试的 ZS、PT、TC 的重复性及变异性误差分别是:0.77% 和 1.40%、1.91% 和 0.89%、1.08% 和 6.32%,整体精度较高,其中,TC 的变异性误差较大,这是由于其在烧结过程中内部材料结构变化不均一导致的。

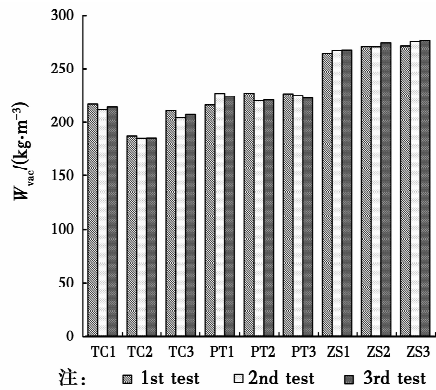


图 5 真空饱和含湿量

Fig. 5 Vacuum saturated moisture content

由真空饱和含湿量及式(3)计算得到的 3 种透水材料孔隙率如图 6 所示,结果仍为 ZS 最大、PT 次之、TC 最小,ZS、PT、TC 的孔隙率平均值分别为:27.08%、22.32%、20.27%,ZS、PT、TC 的 3 次测试结果重复性及变异性误差分别位:0.78% 和 1.33%、1.79% 和 0.56%、1.08% 和 6.32%,其中 TC 的变异性误差较大,仍为其在烧结的过程中内部材料结构变化不均一导致的。

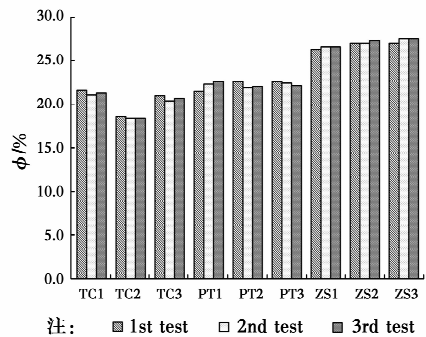


图 6 孔隙率

Fig. 6 Porosity

利用式(1)计算出的 3 种透水材料表观密度如图 7 所示,3 种材料表观密度为 PT 最大、ZS 次之、TC 最小,PT、ZS、TC 的 3 组样本结果平均值分别

为:2 061.75、1 937.41、1 866.18 kg/m<sup>3</sup>,PT、ZS、TC 测试结果的重复性及变异性误差分别是:1.53%和 0.41%、0.24%和 0.54%、0.19%和 0.46%,整体精度高,主要原因为该项指标通过水下称重获得,此种称重方式干扰因素较小。

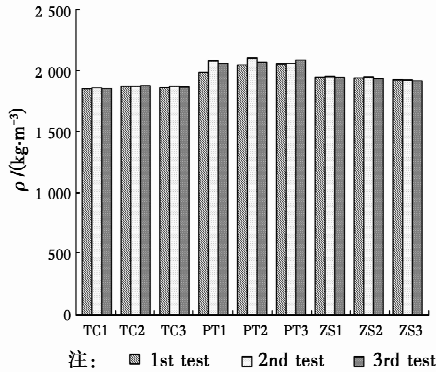


图 7 表观密度

Fig. 7 Apparent density

### 2.2 单面浸泡实验

3 种类型透水材料毛细吸水速率如图 8 所示。吸水第 1 阶段过程中,TC 吸水速率最快、PT 次之、ZS 最慢,经线性回归得到 3 种透水材料的毛细吸水系数如图 9 所示,TC、PT、ZS 的 3 组样本测试所得吸水系数平均值  $A_{average}$  分别为:2.04、0.07、0.03 kg/m<sup>2</sup>·s<sup>0.5</sup>,表明 TC 吸水速率高于 ZS 的 69 倍、高于 PT 的 25.88 倍。TC、PT、ZS 的 3 组样本测试结果重复性和变异性误差分别为:2.17%和 10.30%、6.44%和 3.35%、8.81%和 7.44%,测试误差较真空饱和实验数据大,这主要是由材料连通孔隙率的不均匀性导致。

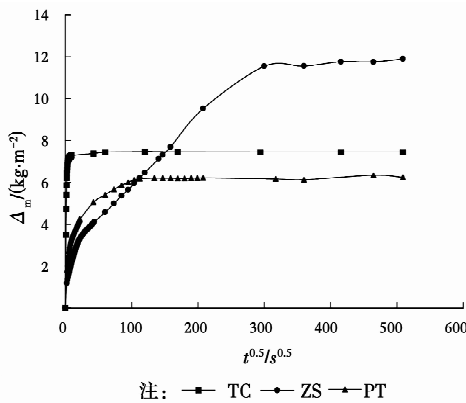


图 8 毛细吸水速率

Fig. 8 Capillary water absorption rate

吸水第 2 阶段过程中,由于透水材料的孔隙阻力增加及水分重力影响,3 种透水材料单位面积含水量均逐步到达稳定状态,最终三者单位面积含水

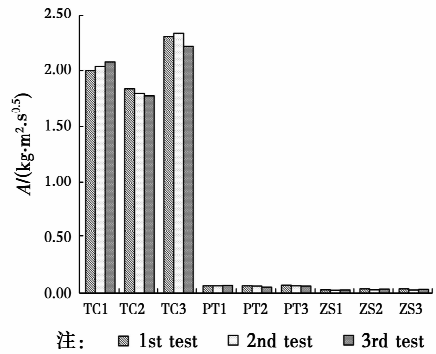


图 9 吸水系数

Fig. 9 Water absorption coefficient

量为 ZS 最大、TC 次之、PT 最差,将第 2 阶段与第 1 阶段拟合曲线联合求解得到的 3 种透水材料毛细饱和和含湿量如图 10 所示,仍为 ZS 最高、TC 次之、PT 最小,ZS、TC、PT 的毛细饱和含湿量平均值分别为:190.59、121.07、86.41 kg/m<sup>3</sup>,其中,TC 和 PT 的该项数据与真空饱和含湿量数据规律相反,主要原因是:毛细吸水主要受连通孔隙影响,而真空饱和状态下材料的真空饱和含湿量受连通与半连通孔隙等共同影响,由于肉眼观察下 PT 的孔隙明显大于 ZS 和 TC,而三者开放孔隙率均相差不大,导致其毛细储水能力较差,进而导致了毛细饱和含湿量的差异。

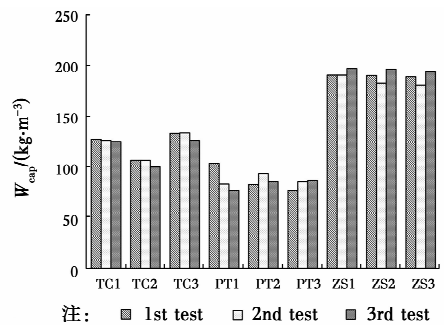


图 10 毛细饱和含湿量

Fig. 10 Capillary saturated moisture content

### 2.3 渗透实验

3 种透水材料渗透系数测试结果如图 11 所示。其中,TC 渗透系数最大、PT 次之、ZS 最低,TC、PT、ZS 的 3 组样本测试结果平均值分别为 0.069、0.020、0.003 cm/s,表明 ZS 渗透性能最差。TC、PT、ZS 的 3 组样本测试结果重复性误差和变异性误差分别为:1.01%和 31.02%、3.01%和 40.41%、2.44%和 41.89%,变异性误差较大,其中,TC 的 3 个样本中,最大渗透系数可以达到 0.094 cm/s,最小渗透系数 0.044 cm/s,差异达 2.14 倍;PT 的 3 个样本最高值与最低值相差为 2.30 倍,再生砖为 3.21 倍,该结果表明,测试样本个体差异较大,主要原因

为渗透系数受孔隙迂回度、孔径尺寸及开放孔隙率等多种因素影响<sup>[19]</sup>,考虑到透水材料实际制作过程较为粗糙,造成材料孔隙特征参数离散性较大,影响测试结果,由吸水系数测试误差也可以获得相似结论。

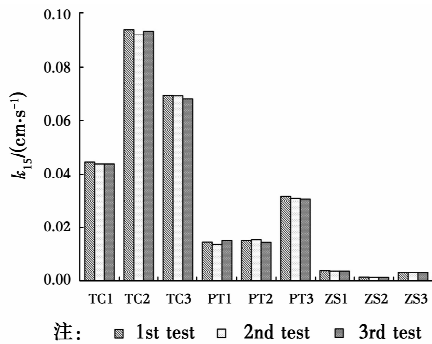


图 11 渗透系数

Fig. 11 Permeability coefficient

## 2.4 透水砖性能评价

透水铺装材料除了应具有良好的渗透性能以保证其在自身达饱和后能快速渗透雨水,避免产生径流。此外,从蒸发降温的角度来说,较好的保水性能有效保持无雨条件下的蒸发降温效果。但在室外条件下,天然降雨是铺装材料水分的主要来源且透水材料不可能在任何时候都处于饱和状态,此时,良好的吸水性能保证其在降雨时间段内快速储存更多的雨水。

从单面浸泡测试结果可以看出,3种透水材料的吸水性能差异较大,且与开放孔隙率及真空饱和含水率等指标并不成正相关,如ZS虽然真空饱和含水率及开放孔隙率较TC大,但其吸水系数很低,造成了吸水速度较慢,无法在短时间内储存较多雨水,故采用真空饱和含水率及开放孔隙率衡量砖体在实际环境的保水能力有一定缺陷,应在满足渗透系数的前提下,结合吸水系数指标综合考虑。

## 3 结论

1)通过真空饱和和实验测试了透水铺装材料的真空饱和含水率、孔隙率及表观密度,结果表明,3种透水材料的真空饱和含水率为ZS最高、PT次之、TC最低,ZS、PT、TC的真空饱和含湿量平均值分别为270.63、234.65、202.59 kg/m<sup>3</sup>;开放孔隙率仍为ZS最高、PT次之、TC最低,ZS、PT、TC的孔隙率平均值分别为27.08%、22.32%、20.27%。上述测试结果中TC的变异性误差较大,这是在烧结过程中内部材料结构变化不均一导致的。

2)通过单面浸泡实验测试了透水铺装材料的吸

水系数和毛细饱和含湿量,结果表明,3种材料的吸水系数为TC最优、PT次之、ZS最弱,三者吸水系数平均值分别为2.04、0.07、0.03 kg/m<sup>2</sup>·s<sup>0.5</sup>;毛细饱和含湿量为ZS最高、TC次之、PT最小,三者毛细饱和含湿量平均值为190.59、121.07、86.41 kg/m<sup>3</sup>,测试结果受材料不均一影响,变异性误差较大。

3)通过渗透实验测试了透水铺装材料的渗透性能,结果表明,TC渗透性能最优、PT次之、ZS最差,3组样本测试结果平均值分别为0.069、0.020、0.003 cm/s,测试结果受材料不均一影响,变异性误差较大。

4)材料的吸水性能与保水性能并非正相关,不应单独采用真空饱和含水率及开放孔隙率衡量砖体在实际环境的保水能力,应结合吸水系数、真空饱和含水量及渗透系数指标综合决定。

## 参考文献:

- [1] QIN Y, HILLER J E. Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development [J]. Energy & Buildings, 2014, 85: 389-399.
- [2] HUANG J, VALEO C, HE J, et al. Three types of permeable pavements in cold climates: Hydraulic and environmental performance [J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 142(6): 04016025.
- [3] ALIZADEHTAZI B, DIGIOVANNI K, FOTI R, et al. Comparison of observed infiltration rates of different permeable urban surfaces using a cornell sprinkle infiltrometer [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016, 21(7): 06016003.
- [4] YAMAGATA H, NASU M, YOSHIZAWA M, et al. Heat island mitigation using water retentive pavement sprinkled with reclaimed wastewater [J]. Water Science & Technology, 2008, 57(5): 763-771.
- [5] LI H, HARVEY J T, HOLLAND T J, et al. The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management [J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(1): 3865-3879.
- [6] SANTAMOURIS M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island: A review of the actual developments [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 26(10): 224-240.
- [7] PRATT C, MANTLE J, SCHOFIELD P. Porous pavements for flow and pollutant discharge control [C]// 5th International Conference on Urban Storm Drainage, Osaka, Japan, 1990.

- [8] 金玲, 孟庆林. 地面透水性对室外热环境影响的实验分析[C]//中国建筑学会建筑物理分会. 绿色建筑与建筑物理——第九届全国建筑物理学术会议论文集(一), 南京, 2004: 128-131.  
JIN L, MENG Q L. Experimental study on the effect of ground permeability on outdoor thermal environment [C]// Building Physics Branch of Chinese Architecture Society. Green Building and Building Physics - Proceedings of the 9th National Conference on Building Physics (1), Nanjing, 2004: 128-131. (in Chinese)
- [9] 透水砖: JC/T 945—2005 [S]. 2005.  
Water Permeable Brick: JB/T 945-2005 [S]. 2005. (in Chinese)
- [10] 冯驰. 多孔建筑材料湿物理性质的测试方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
FENG C. Study on the test methods for the hygric properties of porous building materials [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [11] 成智文, 闫开放. 陶瓷透水砖的生产技术及发展前景[J]. 砖瓦, 2016(2): 21-23.  
CHENG Z W, YAN K F. Production technology and development prospect of ceramic permeable brick [J]. Block-Brick-Tile, 2016(2): 21-23. (in Chinese)
- [12] 王军强. 再生骨料透水混凝土的强度和透水性能试验研究[J]. 结构工程师, 2015(4): 167-171.  
WANG J Q. Testing study on the strength and permeable performance of recycled aggregate pervious concrete [J]. Structural Engineers, 2015(4): 167-171. (in Chinese)
- [13] 王海燕, 刘华章. 混凝土透水砖的配合比设计、生产与施工[J]. 新型建筑材料, 2007(7): 27-29.  
WANG H Y, LIU H Z. Mix design, production and construction of concrete pervious brick [J]. New Building Materials, 2007(7): 27-29. (in Chinese)
- [14] Standard Test Method for Moisture Retention Curves of Porous Building Materials Using Pressure Plates: ASTM C1699-09 [S].
- [15] Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion: EN ISO 15148:2002 [S].
- [16] QIN Y, YANG H, DENG Z, et al. Water permeability of pervious concrete is dependent on the applied pressure and testing methods [J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2015, 2015: 1-6.
- [17] Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - part 1: General principles and definitions: ISO 5725-1: 1994 [S].
- [18] FENG C, JANSSEN H, FENG Y, et al. Hygric properties of porous building materials: Analysis of measurement repeatability and reproducibility [J]. Building & Environment, 2015, 85: 160-172.
- [19] BENAVENTE D, PLA C, CUETO N, et al. Predicting water permeability in sedimentary rocks from capillary imbibition and pore structure [J]. Engineering Geology, 2015, 195: 301-311.

(编辑 胡英奎)