

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.07.018

## 陶瓷透水砖堵塞及其控制方法研究

成智文<sup>1</sup>, 耿康<sup>2,3</sup>, 陈晓薇<sup>2,3</sup>, 孙昕<sup>2,3</sup>, 刘婷<sup>1</sup>, 李青<sup>1</sup>

(1. 咸阳陶瓷研究设计院有限公司, 陕西 咸阳 712000; 2. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 针对陶瓷透水砖在应用中广泛存在的堵塞问题,利用自行研发的透水砖雨水径流堵塞实时模拟装置,分别采用自来水和模拟雨水,进行透水砖堵塞试验以及应用3种清洁方式恢复透水砖透水性能试验。在相同径流水量和径流水深条件下,透水砖堵塞主要归结于雨水径流中的颗粒物在砖表面和内部被截留。堵塞过程分为快速堵塞、回升波动和平稳堵塞3个阶段。根据颗粒物进入透水砖内部的位置,堵塞可分为表面堵塞和内部堵塞。透水砖表面截留的颗粒质量大于内部截留量,被截留的大部分颗粒粒径 $<50\ \mu\text{m}$ 。负压反冲洗、高压水枪冲洗、表面清扫对透水砖透水系数的恢复率分别为76.80%、46.43%、40.52%,三者基本均能完全去除透水砖表面截留颗粒,但两者无法去除透水砖内部截留颗粒,因此推荐采用负压反冲洗方式控制陶瓷透水砖堵塞。

**关键词:** 陶瓷透水砖; 堵塞; 负压反冲洗; 高压水枪冲洗; 表面清扫

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)07-0116-06

### Clogging of Permeable Ceramic Brick and Its Control Method

CHENG Zhi-wen<sup>1</sup>, GENG Kang<sup>2,3</sup>, CHEN Xiao-wei<sup>2,3</sup>, SUN Xin<sup>2,3</sup>, LIU Ting<sup>1</sup>,  
LI Qing<sup>1</sup>

(1. Xianyang Research & Design Institute of Ceramics Co. Ltd., Xianyang 712000, China;  
2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Northwest China Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology <Ministry of Education>, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** To solve the widespread clogging problems of permeable ceramic brick in application, experiments on clogging and recovery of permeable ceramic brick by three cleaning methods were carried out in a self-developed real-time simulation device for clogging of permeable brick by using tap water and simulated runoff. Under the same runoff discharge and water depth, the clogging of permeable brick was mainly attributed to the interception of particles in rainwater runoff on the surface and inside of the brick. The clogging process could be divided into three stages: rapid clogging, fluctuation and stable clogging. The clogging could be classified into surface clogging and internal clogging according to the position of particles entering into the permeable brick. The intercepted particles on the surface were more than those

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFC0701001-02)

通信作者: 孙昕 E-mail: xinsunn@163.com

inside the permeable brick, and the particle size of most intercepted particles was less than 50  $\mu\text{m}$ . The recovery rates of the permeability coefficient of the permeable brick by vacuum cleaning, high-pressure gun flushing and surface sweeping were 76.80%, 46.43% and 40.52%, respectively. The intercepted particles on the brick surface could be completely removed by the three methods. However, the latter two could not remove the intercepted particles inside the brick. Therefore, the vacuum cleaning was recommended to control the clogging of the permeable ceramic brick.

**Key words:** permeable ceramic brick; clogging; vacuum cleaning; high-pressure gun flushing; surface sweeping

近年来,随着城市化进程的推进,城市道路硬化比例不断加大,相当一部分具有良好渗透性的土壤被渗透性差的非透水路面替代,使得降雨径流无法及时入渗,导致城市内涝问题频发<sup>[1]</sup>。在此背景下,我国大力倡导海绵城市建设,推广透水铺装,利用透水砖内部的大量连通孔隙促进雨水入渗,提高雨水资源利用效率<sup>[2-3]</sup>。透水砖具有良好的透水、透气性能,可使雨水迅速渗入地面,补充土壤水和地下水,保持土壤湿度,有效地缓解城市排水系统的泄洪压力;与此同时,还能改善局部区域的环境,比如缓解“热岛”现象、降低噪音等<sup>[4]</sup>。研究表明,透水砖对雨水径流中的SS具有过滤作用,并能在一定程度上去除COD、TP、TN等,净化后的雨水通过透水路面下渗汇集到排水暗管排走,可有效降低雨水对城市地面污染物冲刷而导致的受纳河道水体污染问题<sup>[5]</sup>。晋存田等<sup>[6]</sup>利用暴雨洪水管理模型(SWMM)软件对北京某区域内铺设透水砖的主要断面的洪峰流量变化进行了计算分析,结果表明,铺设透水砖可有效削减洪峰流量,减小径流系数,从而增加雨水资源的利用量。

地表径流会携带大量泥土、细沙等悬浮颗粒,不断进入透水砖的孔隙,通过物理、生物和化学过程而引起堵塞,导致透水砖渗透率降低,增加了冻融和洪涝灾害发生的可能<sup>[7]</sup>。目前国内外对于透水砖堵塞的研究主要集中在宏观堵塞试验,其他微观研究还局限在局部结构获取或二维层面,缺乏系统深入的研究。韩唯伟等<sup>[8]</sup>发现,透水混凝土路面上层较小粒径的粗骨料会截留大部分堵塞材料,高压水枪冲刷会使上层堵塞物进入粒径较大的下层。Winston等<sup>[9]</sup>研究表明,使用带吸尘器的再生空气道路清扫机对透水混凝土砖路面清扫3次后,路面的透水系数比清扫前提升了14倍,但与初始铺设时相

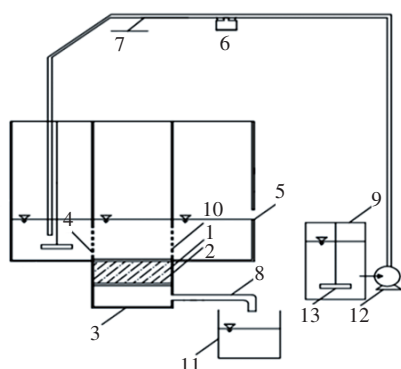
比还是相差很大。宋亚霖等<sup>[10]</sup>采用虹吸法模拟高压水洗清洁透水砖,发现高压水洗仅能清除砖体表面沉积物,无法清除内部堵塞物质。也有研究表明,高压水洗可能使路面透水能力进一步下降<sup>[11]</sup>。James等<sup>[12]</sup>将透水砖表面10~20 mm内堵塞的颗粒清除后,透水砖透水性能得到有效恢复。

无论是人工清扫还是机械清扫,只能将透水砖表面的残渣碎屑清除,防止表面沉积物进一步进入内部孔隙,对更深层孔隙中的杂质则无能为力。笔者以在海绵城市中广泛应用的陶瓷透水砖为研究对象,分别采用高压水枪冲洗、表面清扫和负压反冲洗3种清洁方式,对堵塞透水砖进行透水性能恢复,综合分析透水系数恢复、表面和内部堵塞物质的粒径及百分比变化情况,以期对透水砖堵塞控制和防堵型透水砖设计优化提供依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 雨水径流堵塞透水砖实时模拟装置

目前在实验室模拟降雨径流条件下的透水砖堵塞过程,基本都是单地将水加压通过喷头喷撒于试件上,或是在试件上方安装带有可转动叶片的电动机,均不能准确模拟实际雨水径流的水平流动及其引起的颗粒迁移。为此,自行研制了如图1所示的试验装置,在实验室模拟人工降雨产生的地表径流以及透水砖工作环境,并实时测定不同环境条件下透水砖的透水系数。该装置采用有机玻璃制作了三个水槽,左侧水槽为雨水调节池,中间水槽放置透水砖并收集透水砖透过的雨水,右侧水槽为出水池,两侧水槽通过均匀分布的开孔连通,利用三个水槽的水位差使雨水径流从左向右流动。同时,通过调节左侧水槽的进水阀门开启度获取不同的雨水径流流量,通过调节右侧水槽的出水堰高度获取不同的雨水径流深度。



1. 小型陶瓷透水砖路面 2. 玻璃胶和橡胶圈 3. 有机玻璃容器  
4. 水平径流模拟装置 5. 溢流堰 6. 流量计 7. 阀门 8. 出水口  
9. 雨水桶 10. 超声波流速仪 11. 渗透水收集桶 12. 水泵 13. 搅拌器

图1 雨水径流堵塞透水砖实时模拟装置

Fig.1 Real-time simulation device for clogging of permeable brick by rainwater runoff

在试验过程中,待雨水径流流量及透水砖上面水深稳定后,开始每隔3 min记录水深 $H$ 、流过透水砖的水量 $Q$ 和连续透水时间 $t$ ,计算透水砖的透水系数,当透水系数趋于稳定后视为达到堵塞过程的终点。渗透系数依据达西定律计算:

$$K_T = Q \cdot L / (A \cdot H \cdot t) \quad (1)$$

式中: $K_T$ 是水温为 $T$ ℃时陶瓷透水砖的透水系数,cm/s; $Q$ 为渗出水量,mL; $L$ 为透水砖厚度,cm; $A$ 为透水砖上表面的面积,cm<sup>2</sup>; $H$ 为水深,cm; $t$ 为透水时间,s。

## 1.2 试验材料

试验所用的陶瓷透水砖如图2所示,长20 cm、宽10 cm、高5.3 cm。该透水砖表面层厚度为1.0 cm,孔隙小而紧凑;内部厚度为4.3 cm,孔隙较大且不规则。分别在透水砖表面和内部取一块1.5 cm×1.5 cm×2 cm的试样,利用压汞仪测定其总孔面积、孔径分布、孔隙率、平均孔径等,结果显示,透水砖表面的总孔面积、孔隙率和平均孔径分别为0.714 m<sup>2</sup>/g、12.40%、346.0 nm,透水砖内部的总孔面积、孔隙率和平均孔径分别为0.231 m<sup>2</sup>/g、10.09%、815.8 nm。

根据课题组对西安建筑科技大学校园路面雨水径流水质的分析,其SS浓度为10~232 mg/L,绝大部分粒径小于50 μm,故本次试验采用细沙和自来水配制模拟雨水径流的SS浓度为200 mg/L,粒径为10~20、20~50、50~150 μm的细沙质量占比

别为50%、45%、5%。

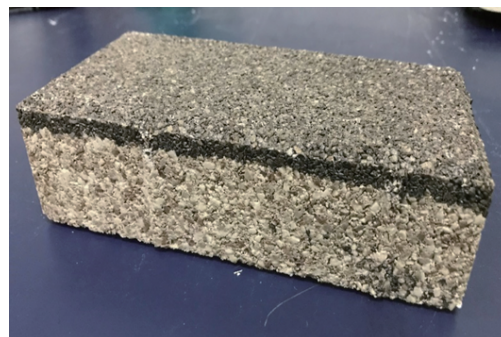


图2 陶瓷透水砖试样

Fig.2 Permeable ceramic brick sample

## 1.3 试验方法

试验方法如下:首先在透水砖的四个侧面涂抹中性胶,完全变干后称质量,放入装置支架部位,并在四周涂抹玻璃胶保证不漏水;然后依次打开进水槽内的搅拌器和水泵,缓慢调节进水阀门,使水流均匀喷洒在透水砖表面,等待水深达到要求后,采用多普勒流速仪测量透水砖表面的水流速度,调节搅拌器转速直至进水速度达到要求;每间隔3 min取透过透水砖的水样,计算透水砖的透水系数,当透水系数<0.01 cm/s时视为堵塞试验结束;取下透水砖,测定透水砖堵塞后的质量变化;之后对透水砖进行清洁试验。

为对比研究不同清洁方式对透水砖透水性能的恢复效果,在透水砖堵塞后分别采用表面清扫(方案1)、高压水枪冲洗(方案2)和负压反冲洗(方案3)三种清洁方式。表面清扫是使用毛刷模拟清洁工人对透水砖路面沉积物进行清扫,清扫结束终点为将透水砖表面沉积的所有颗粒清扫下来;高压水枪冲洗是在5 MPa的压力条件下使用水枪冲刷透水砖表面所有的颗粒;负压反冲洗是将透水砖表面向下倒置于装置中,在四周缝隙中涂抹玻璃胶密封,加水至一定高度形成液封,连接真空泵在1 MPa的负压条件下反冲洗透水砖,将透水砖内部和表面的颗粒冲洗出来,直到没有颗粒出来为止。为了探究陶瓷透水砖在自来水条件下的透水系数变化,增加一组SS浓度为0的对照试验,由于没有颗粒堵塞故不采用清洁方式。考虑到透水砖存在个体差异,每组均设置平行试验。具体试验参数:透水砖上水深为8.5 cm,流速为1.5 cm/s。



2 试验结果与分析

2.1 陶瓷透水砖的下渗过程及特性

自来水和降雨条件下陶瓷透水砖的透水系数变化如图 3 所示。在自来水条件下,透水砖初始透水系数稳定在 0.039 cm/s,随着过水时间的增加略有降低,最终稳定在 0.034 cm/s。究其原因,自来水中不含悬浮颗粒,但其中的溶解氧和二氧化碳等气体会进入到透水砖孔隙中,在流经多孔介质时气体会被吸附至通道表面,从而减小流动面积,降低透水系数,但不会造成透水砖的最终堵塞。

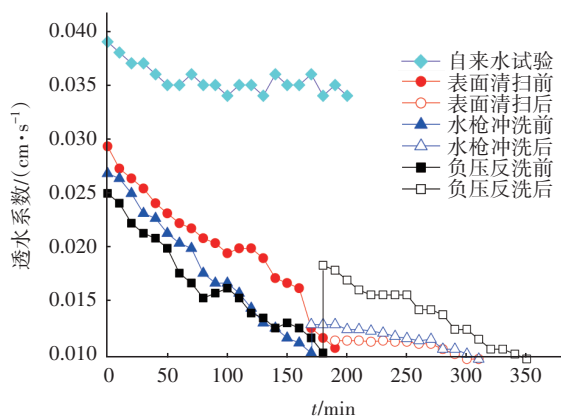


图 3 陶瓷透水砖透水系数变化

Fig.3 Variation of permeability coefficient of permeable ceramic brick

在降雨条件下,雨水径流中的细沙会降低透水砖的透水性能,由于透水砖存在个体差异,初始透水系数略有不同,但透水系数的变化趋势相近,即先快速下降、后略有回升、再平稳下降,由此可将透水砖堵塞过程分为快速堵塞、回升波动和平稳堵塞三个阶段。这是因为在试验初始阶段,尺寸较小的颗粒进入透水砖内部,而尺寸较大的颗粒则容易堵塞在透水砖表面的孔隙口处,很难进入到内部孔隙通道,较大的颗粒开始在表面积累,透水系数明显快速下降。在约 100 min 时,透水系数略有回升,是由于水流会对堆积在透水砖表面的颗粒进行冲刷,部分细颗粒会随水流运动而继续通过大颗粒之间的空隙进入到透水砖内部,导致透水系数产生一定的波动。大约在 180 min 之后,陶瓷透水砖的透水系数缓慢下降,最终稳定在 0.01 cm/s 左右,透水砖堵塞失效。

2.2 陶瓷透水砖堵塞成因

通过对比自来水和降雨条件下的堵塞试验结

果可以看出,陶瓷透水砖的堵塞主要归结于对雨水径流中颗粒物质的截留。为分析雨水径流中颗粒物质在透水砖内的截留特性,对一个过水周期内透水砖内外的颗粒进行了质量守恒分析。进入透水砖系统的颗粒总质量为进水 SS 浓度与水量的乘积,本试验中为 80 g;对透水砖表面的颗粒进行清扫收集称质量,得到砖上截留的颗粒量;测定各阶段透过透水砖的清水 SS 浓度和水量,计算得到透过透水砖的颗粒量;测定出水 SS 浓度和水量,计算得到其他颗粒量;根据透水砖堵塞试验前后的质量,得到砖内截留的颗粒量。具体质量分布见表 1。

表 1 陶瓷透水砖中颗粒的质量分布  
Tab.1 Mass distribution of particles in permeable ceramic brick

项 目	g			
	砖上截留量	砖内截留量	透过颗粒量	其他颗粒量
1-试验组	3.551	1.183	10.200	65.066
1-对照组	3.468	1.152	10.433	64.947
2-试验组	3.654	1.177	10.530	64.639
2-对照组	3.589	1.143	10.663	64.605
3-试验组	3.560	1.164	10.648	64.628
3-对照组	3.637	1.155	10.541	64.667

结合表 1,根据透水砖过水试验中颗粒分布位置的不同,透水砖的堵塞可以分为表面堵塞和内部堵塞两种类型,表面堵塞的颗粒质量比内部堵塞的要多,这是因为大量颗粒由于粒径较大无法进入透水砖内部而被截留在表面,随着过水试验的进行,颗粒不断堆积,粒径较小的颗粒受到影响也被截留在表面,少量粒径较小的颗粒可以随着水流进入到透水砖内部,其中一部分颗粒会由于进入死端孔隙等原因被截留在透水砖内部,另一部分则随水流出透水砖。

2.3 陶瓷透水砖堵塞恢复试验

在透水砖堵塞试验后,采用三种清洁方式对透水砖的透水系数进行恢复,结果如表 2 所示。对比三种清洁方式,负压反冲洗效果最好,高压水枪冲洗效果次之,表面清扫效果最差。为了深入分析三种清洁方式的清洁机制,对清洁前后透水砖表面及内部的颗粒质量分布进行了测定,结果见表 3。可知,表面清扫可以清除绝大部分透水砖表面的颗粒,而高压水枪冲洗几乎可以完全去除透水砖表面的颗粒,但这两种方式都无法有效去除透水砖内部

的颗粒,因此恢复效果有限。负压反冲洗是在真空泵的抽吸下反向过水,能有效去除透水砖体内部的堵塞物质和表面截留的颗粒,故此种清洁方式对透水系数的恢复效果最好,但反冲洗也无法达到100%的恢复率,因为还有一小部分颗粒进入死端孔隙无法被完全清洗出来。

表 2 陶瓷透水砖透水系数的恢复率

Tab.2 Permeability coefficient recovery rate of permeable ceramic brick

项 目	透水系数/(cm·s <sup>-1</sup> )			恢复率/%
	初始	堵塞后	恢复后	
1-试验组	0.029	0.010	0.012	40.52
1-对照组	0.028	0.010	0.011	39.29
2-试验组	0.027	0.010	0.013	46.43
2-对照组	0.029	0.010	0.013	44.83
3-试验组	0.025	0.010	0.019	76.80
3-对照组	0.027	0.010	0.020	74.07

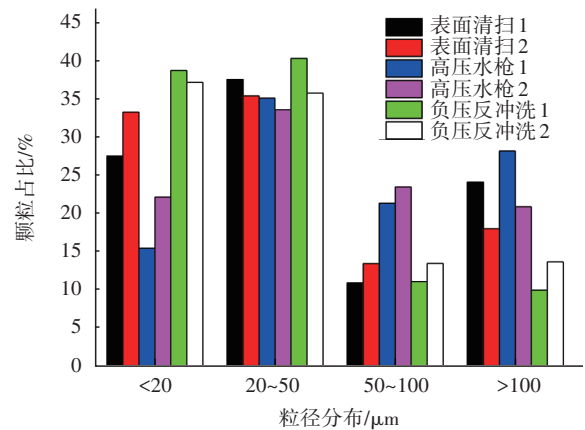
表 3 透水砖清洁前后的颗粒质量分布

Tab.3 Mass distribution of particles in permeable brick before and after cleaning g

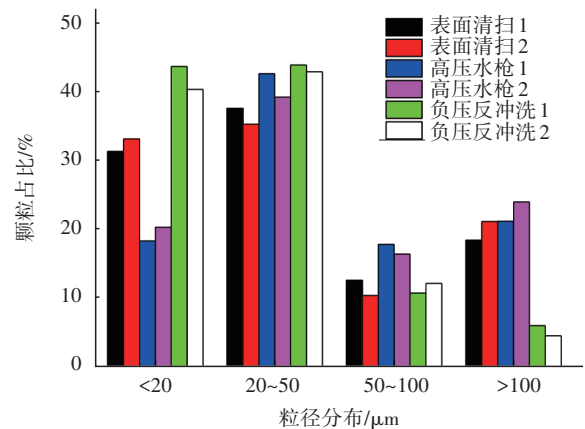
项 目	表面颗粒		内部颗粒	
	恢复前	去除量	恢复前	去除量
1-试验组	3.551	3.441	1.183	0
1-对照组	3.468	3.345	1.152	0
2-试验组	3.654	3.654	1.177	0
2-对照组	3.589	3.589	1.143	0
3-试验组	3.560	3.560	1.164	1.100
3-对照组	3.637	3.637	1.155	1.089

## 2.4 陶瓷透水砖堵塞颗粒粒径分析

为进一步分析三种清洁方式的清洁机制,采用LS230/SVM激光粒度分析仪对透水砖内部和表面的截留颗粒进行粒径分析,测定范围为0.04~2 000 μm,结果如图4所示(以下分析采用第1组数据)。在表面清扫组中,砖表面截留的颗粒粒径<20 μm的占27.51%,20~50 μm的颗粒占37.52%,50~100 μm的颗粒占10.90%;在高压水枪冲洗组中,砖表面截留的颗粒粒径<20 μm的占15.43%,20~50 μm的颗粒占35.08%,50~100 μm的颗粒占21.32%;在负压反冲洗组中,砖表面截留的颗粒粒径<20 μm的占38.71%,20~50 μm的颗粒占40.28%,50~100 μm的颗粒占11.07%。三组试验中砖表面截留的颗粒粒径<50 μm的分别占65.03%、50.51%和78.99%,可见砖表面截留的颗粒粒径大部分在50 μm以下。



a. 砖表面截留颗粒



b. 砖内部截留颗粒

图 4 陶瓷透水砖截留颗粒粒径分布

Fig.4 Size distribution of intercepted particles in permeable ceramic brick

在表面清扫组中,砖内部截留的颗粒粒径<20 μm的占31.31%,20~50 μm的颗粒占37.59%,50~100 μm的颗粒占12.64%;在高压水枪冲洗组中,砖内部截留的颗粒粒径<20 μm的占18.37%,20~50 μm的颗粒占42.59%,50~100 μm的颗粒占17.85%;在负压反冲洗组中,砖内部截留的颗粒粒径<20 μm的占43.66%,20~50 μm的颗粒占43.86%,50~100 μm的颗粒占10.80%。三组试验中砖内部截留的颗粒粒径<50 μm的分别占68.90%、60.96%和87.52%,说明砖内部截留的颗粒粒径大部分也在50 μm以下,且比砖表面截留的颗粒粒径<50 μm的颗粒占比有所增加,可知砖内部截留的颗粒粒径更小。

由此可见,透水砖表面和内部截留的颗粒粒径主要分布在50 μm以下,这一结果也与之之前路面沉积物的粒径分布范围吻合,因此在控制地表径流污

染物的过程中应重点关注粒径 $<50\ \mu\text{m}$ 的污染物。

### 3 结论

① 陶瓷透水砖在雨水径流入渗过程中,会因其中携带的颗粒物质而发生堵塞现象,根据堵塞部位不同可分为表面堵塞和内部堵塞,表面堵塞堆积的颗粒质量较多、粒径较大。

② 对比陶瓷透水砖的三种清洁方式,负压反冲洗效果最好,高压水枪冲洗效果次之,表面清扫效果最差,前者能有效去除透水砖表面和内部的堵塞物质,而后两者均无法去除内部的堵塞物质。

③ 透水砖表面和内部截留的颗粒粒径均主要分布在 $50\ \mu\text{m}$ 以下,这一结果也与之前路面沉积物粒径分布范围吻合,因此在控制地表径流污染物的过程中应重点关注粒径 $<50\ \mu\text{m}$ 的污染物。

### 参考文献:

- [1] 黄泽钧. 关于城市内涝灾害问题与对策的思考[J]. 水科学与工程, 2012, 43(1): 7-10.  
HUANG Zejun. Problems and countermeasures of city waterlogging disaster [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2012, 43 (1) : 7-10 (in Chinese).
- [2] 胡庆芳, 王银堂, 徐海波, 等. 海绵城市建设的5点技术思考[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 152-153.  
HU Qingfang, WANG Yintang, XU Haibo, *et al.* Five technical considerations on sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (5) : 152-153 (in Chinese).
- [3] 王允威, 张召述, 苗庆东. 透水材料研究综述[J]. 广州化工, 2011, 39(18): 29-31.  
WANG Yunwei, ZHANG Zhaoshu, MIAO Qingdong. Overview of the current study on permeable material [J]. Guangzhou Chemical Industry and Technology, 2011, 39(18): 29-31 (in Chinese).
- [4] 殷志奎, 于苗, 张杰. 透水砖在济南海绵城市城市建设中的应用[J]. 山东水利, 2015(5): 67-68.  
YIN Zhikui, YU Miao, ZHANG Jie. Application of permeable brick in Jinan sponge city construction [J]. Shandong Water Resources, 2015 (5) : 67-68 (in Chinese).
- [5] 崔珍珍. 透水路面结构层雨水入渗与水质净化性能及机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2013: 13-17.  
CUI Zhenzhen. Study on Performance and Mechanisms of Stormwater Infiltration and Water Purification of Permeable Pavement Layers [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 13-17 (in Chinese).
- [6] 晋存田, 赵树旗, 闫肖丽, 等. 透水砖和下凹式绿地对城市雨洪的影响[J]. 中国给水排水, 2010, 26(1): 40-42.  
JIN Cuntian, ZHAO Shuqi, YAN Xiaoli, *et al.* Impacts of permeable brick and sunken lawn on urban stormwater [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(1): 40-42 (in Chinese).
- [7] TAN S A, FWA T F, HAN C T. Clogging evaluation of permeable bases [J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(3): 309-315.
- [8] 韩唯伟, 蒋翔, 卢佳林, 等. 透水混凝土路面抗堵塞性能研究[J]. 混凝土, 2018, 41(11): 157-160.  
HAN Weiwei, JIANG Xiang, LU Jialin, *et al.* Research on anti-plugging property of two pervious concrete pavements [J]. Concrete, 2018, 41(11): 157-160 (in Chinese).
- [9] WINSTON R J, AL-RUBAEI A M, BLECKEN G T, *et al.* Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate — the effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 169: 132-144.
- [10] 宋亚霖, 杜新强, 刘文娜, 等. 海绵城市透水砖堵塞规律试验[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 56-59.  
SONG Yalin, DU Xinqiang, LIU Wenna, *et al.* Experimental research on clogging laws of permeable brick in sponge city [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 56-59 (in Chinese).
- [11] HENDERSON V, TIGHE S L. Evaluation of pervious concrete pavement permeability renewal maintenance methods at field sites in Canada [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 38(12): 1404-1413.
- [12] JAMES W, GERRITS C. Maintenance of infiltration modular interlocking concrete pavers with external drainage cells [J]. Journal of Water Management Modeling, 2003, 11: 215-222.

作者简介: 成智文(1969—), 男, 陕西武功人, 本科, 教授级高工, 研究方向为建筑卫生陶瓷材料。

E-mail: xtyczw@sina.com

收稿日期: 2019-06-17

修回日期: 2019-09-14

(编辑: 刘贵春)