

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.19.018

纳米材料对透水砖堵塞的控制效果

李盟¹, 孙昕¹, 高峰², 杨宇², 位文倩¹, 孙哲¹,
成智文³

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 内蒙古自治区水利
科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010011; 3. 咸阳陶瓷研究设计院有限公司, 陕西 咸阳
712000)

摘要: 为了探究雨水径流中有机污染物对透水砖堵塞的影响,采用仅含无机颗粒物的雨水径流(P_{ss} 径流)和包含无机颗粒物及有机污染物的雨水径流(P径流),考察了透水砖的堵塞特性,分析了堵塞颗粒物粒径和透水砖孔径的关系。结果表明,雨水径流中的有机污染物加剧了透水砖堵塞的速度和程度,粒径为10~150 μm 的颗粒物是引发堵塞的主要颗粒物,合理减少透水砖表层大于50 μm 孔径的比例对延缓堵塞有重要意义。采用亲水性纳米二氧化钛($n\text{-TiO}_2$)和纳米氧化锌($n\text{-ZnO}$),对比研究了不同表面负载纳米材料对透水砖堵塞的控制效果,结果显示, $n\text{-TiO}_2$ 和 $n\text{-ZnO}$ 均可提高透水砖的渗透性能,其中锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 的效果最佳,在不进行清扫维护的情况下,整个生命周期内的透水量是未负载组的1.52倍,参照西安市降雨条件和70%降雨就地消纳的建设要求,可使透水砖有效寿命延长1.41年。

关键词: 陶瓷透水砖; 雨水径流污染物; 压汞法; 纳米材料; 堵塞控制

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)19-0125-07

Effect of Nanomaterials on Clogging Control of Permeable Brick

LI Meng¹, SUN Xin¹, GAO Feng², YANG Yu², WEI Wen-qian¹, SUN Zhe¹,
CHENG Zhi-wen³

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Inner Mongolia Hydraulic Research Institute, Hohhot 010011, China; 3. Xianyang Research & Design Institute of Ceramics Co. Ltd., Xianyang 712000, China)

Abstract: The rainwater runoff containing inorganic sediments (P_{ss} runoff) and rainwater runoff containing inorganic particles and organic pollutants (P runoff) were employed to investigate the clogging characteristics of permeable brick, and the relationship between the size of the particles from the runoff and the pore size of the permeable brick was analyzed, so as to explore the effect of organic pollutants in rainwater runoff on the clogging of permeable brick. The organic pollutants in rainwater runoff aggravated the speed and degree of clogging of the permeable brick, and the sediments with particle size of 10~150 μm were the main particles causing the blockage of the permeable brick. Therefore, it was of great

基金项目: 内蒙古自治区水利科技项目(NSK202002); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0701001-02)

通信作者: 孙昕 E-mail: xinsunn@163.com

significance to appropriately reduce the proportion of pore size above 50 μm on the surface of the permeable bricks to delay the clogging. The control effect of different surface loaded nanomaterials [hydrophilic titanium dioxide (n-TiO_2) and nano-zinc oxide (n-ZnO)] on the clogging of the permeable bricks were compared. The hydrophilic n-TiO_2 and n-ZnO both increased the permeability of the permeable bricks. Among them, the anatase hydrophilic n-TiO_2 demonstrated the best performance. Without cleaning and maintenance, the permeable capacity during the whole life cycle was 1.52 times that of the permeable bricks unloaded with nano materials. The effective life of the permeable brick would be increased by 1.41 years when it was applied in the rainfall conditions in Xi'an to achieve the requirement of 70% rainfall detention on the spot.

Key words: ceramic permeable brick; rainwater runoff pollutants; mercury intrusion porosimetry; nanomaterial; clogging control

透水砖是海绵城市系统的重要组成部分,但透水砖易于堵塞,造成其透水性能在短时间内大幅下降,缩短了其使用寿命。透水砖堵塞包括物理堵塞和生物堵塞^[1],且以物理堵塞为主,其主要由表面和孔隙结构中的颗粒累积引起。雨水径流中除了无机颗粒物外,还包括以COD、油和脂等指标表征的有机污染物,其对道路环境的影响不容忽视,尤其是我国交通规模迅速扩大后,车辆轮胎等的损耗、机动车燃料和润滑油等的泄漏引起的雨水径流有机污染^[2-3]。在这些污染物的共同作用下,引起透水砖堵塞的因素和规律亟待研究。

纳米二氧化钛(n-TiO_2)和纳米氧化锌(n-ZnO)具有廉价、无毒和较高的光催化降解性能,近年来在道路污染物的降解中释放出巨大潜力。在多孔混凝土表面外掺(喷涂或浸渍)少量的 n-TiO_2 ,对雨水径流中有机污染物、TP、氨氮的去除率可达60%~90%^[4]。同时,负载 n-TiO_2 的路面对道路油污的光催化降解率最高达到约75%^[5]。这些研究表明,将纳米颗粒负载于路面有益于道路自洁,但应用纳米颗粒对透水砖堵塞的控制研究目前较少。为此,笔者分析了雨水径流中有机污染物对透水砖堵塞的影响特性,以及透水砖孔径与截留粒径的关系,对比研究了不同纳米颗粒对透水砖堵塞的控制性能。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

1.1.1 透水砖及表面负载纳米材料

实验用普通分层陶瓷透水砖由咸阳陶瓷研究院提供,其长×宽×高=20 cm×10 cm×5.5 cm,表层厚1 cm、下层厚4.5 cm,孔径“上小下大”。

实验所用纳米材料来自上海麦克林生化科技有限公司,包括5~10 nm的锐钛矿型亲水性 n-TiO_2 和金红石型亲水性 n-TiO_2 ,以及(30±10) nm的亲水性 n-ZnO ,3种纳米材料的质量分数均为3%。采用六偏磷酸钠作为分散剂,先磁力搅拌30 min,然后超声分散20 min,最后通过0.1 mol/L的NaOH溶液调节分散液pH为9.5。最终,3种纳米材料在分散液中的粒径分别为4.85、5.01、30.06 nm。

纳米透水砖的制备:采用电动喷枪(喷头口径为0.5 mm,功率为800 W),按照25 g/m²的负载量将纳米材料喷涂至透水砖表面,然后在100℃烘箱中保温4 h备用。

1.1.2 雨水径流和污染物

由于实际雨水径流很难保证污染物的一致性和稳定性,本实验采用人工配制雨水径流,以便分析雨水径流污染物对透水砖的影响。

参照西安市雨水径流污染物浓度的监测结果^[6-7],COD主要来源于车辆行驶过程中汽油的滴漏、汽车尾气的排放以及轮胎磨损的沥青溶出颗粒。本实验采用润滑油模拟油、脂和部分COD^[8],剩余COD由葡萄糖模拟;采用高岭土、石英砂、 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 等模拟无机颗粒物、氮和磷。本实验每次配制雨水径流400 L,表1为配制的雨水径流污染物情况。

我国城市街尘以粉砂和细砂为主,但不同地区的颗粒物粒径大小及其比例不同^[9-10]。根据西安地区的城市街尘和雨水径流中颗粒物特征,本实验人工雨水径流中的无机颗粒物由黏粒(<5 μm)、粉砂(5~50 μm)和细砂(50~250 μm)组成,模拟物分别为

高岭土、石英砂、石英砂,质量分别为 7.2、48、24.8 g,质量占比分别为 9%、60%、31%。

表 1 人工雨水径流污染物的化学组成
Tab.1 Chemical composition of pollutants in synthetic rainfall runoff

项目	SS	COD	TN		NH ₃ -N	TP	石油类
浓度/(mg·L ⁻¹)	200	105	7.3		4.3	0.35	60
模拟物	高岭土、石英砂	葡萄糖	NH ₄ Cl	KNO ₃	NH ₄ Cl	KH ₂ PO ₄	润滑油
规格	黏粒、粉砂、细砂	分析纯	分析纯	分析纯	分析纯	分析纯	5W-40
模拟物质量/g	80	5.62	—	2.02	6.57	0.61	24

1.2 实验装置及方法

1.2.1 模拟雨水径流堵塞透水砖装置

本实验设计了模拟雨水径流堵塞透水砖装置,如图 1 所示。

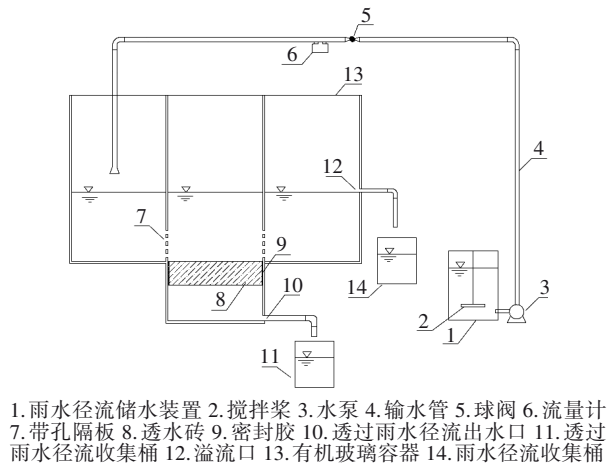


图 1 模拟雨水径流堵塞透水砖装置
Fig.1 Schematic diagram of the device for simulating rainfall runoff to clog permeable brick

待雨水径流流量及透水砖上部水头稳定后,开始每隔 5 min 记录水深、单位时间内的渗水量和连续透水时间,计算间隔时段透水砖的渗透系数,当渗透系数趋于稳定后视为达到堵塞终点。依据达西定律计算渗透系数:

$$K_T = Q \cdot L / (A \cdot H \cdot t) \tag{1}$$

式中: K_T 为 T °C 水温下陶瓷透水砖的渗透系数, cm/s; Q 为渗水量, mL; L 为透水砖的厚度, cm; A 为试样上表面的面积, m²; H 为水深, cm; t 为时间, s。

1.2.2 径流污染物对透水砖堵塞的影响实验

固定雨水径流中无机颗粒物浓度和其他条件,对比只含无机颗粒物的雨水径流(P_{ss} 径流)和包含无机颗粒物及有机污染物的雨水径流(P 径流)条件下透水砖的堵塞特性,通过压汞仪和激光粒度仪分析透水砖孔径与堵塞颗粒粒径的关系,探究除无机颗粒物以外的有机污染物对透水砖堵塞的影响,以优化透水砖孔隙结构。

1.2.3 纳米材料对透水砖的堵塞控制实验

监测在 P 径流和 P_{ss} 径流条件下表面负载锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 透水砖的渗透系数变化,并观测清扫前后的表面微观形貌,以评估锐钛矿型 $n\text{-TiO}_2$ 在透水砖表面的负载效果和对堵塞的控制效果。

最后,对比相同负载量下(0.5 g)金红石型 $n\text{-TiO}_2$ 、锐钛矿型 $n\text{-TiO}_2$ 和 $n\text{-ZnO}$ 三种纳米颗粒在 P 径流条件下对透水砖堵塞的控制效果。

2 结果与讨论

2.1 雨水径流污染物对透水砖堵塞的影响

P_{ss} 和 P 两种雨水径流条件下普通陶瓷透水砖的堵塞过程如图 2 所示,纵坐标采用归一化渗透系数以避免透水砖初始渗透系数差异的影响。

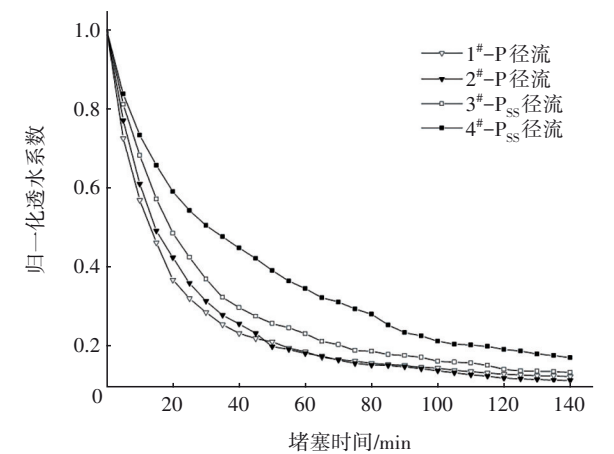


图 2 不同雨水径流污染物对透水砖堵塞的影响
Fig.2 Impact of different rainfall runoff pollutants on clogging of permeable brick

从图 2 可以看出, P 径流对透水砖的堵塞速度和程度高于 P_{ss} 径流。对于 P 径流下的普通陶瓷透水砖(1#、2#),在快速堵塞阶段(前 40 min)渗透系数下降了 76.12% 和 73.78%;在稳定期末端,其渗透系数为初始的 13.01% 和 12.02%。而 P_{ss} 径流下的普通陶瓷透水砖(3#、4#),在前 40 min 内渗透系数分别下降了 69.65% 和 54.72%;在稳定期末端,其渗透

系数为初始的 14.08% 和 17.74%。相对 P_{ss} 径流条件,在快速堵塞阶段, P 径流下透水砖的平均渗透系数下降 12.77%,在稳定期末端仍下降 3.40%,整个生命周期内透水量减少 14.70%。

对堵塞后的透水砖进行表面高压水冲洗和内部反冲洗,分析透水砖表面和内部截留颗粒粒径,结果见表 2。 P 径流下普通陶瓷透水砖(1#、2#)表面

和内部截留的颗粒物粒径比 P_{ss} 径流下的透水砖(3#、4#)明显增大,且透过透水砖的颗粒减少至几乎很少透过。这主要是因为部分有机污染物黏附在颗粒物表面,发生颗粒物之间、颗粒物与透水砖孔道之间的相互吸附、黏附和堆积,在透水砖表面形成“滤膜”,使颗粒物大多卡在表层,不能进入下层深处,从而加重透水砖的堵塞程度。

表 2 透水砖截留颗粒粒径分布和透过雨水径流的颗粒浓度

Tab.2 Size distribution of particles captured by permeable brick and particle concentration of permeation

项目	表面截留颗粒粒径/ μm			内部截留颗粒粒径/ μm			透过雨水径流的颗粒浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
	d_{10}	d_{50}	d_{90}	d_{10}	d_{50}	d_{90}	
1#	24.26	76.17	156.70	8.12	67.42	218.70	1.6
2#	25.31	79.84	167.20	7.91	43.89	196.20	0.5
3#	15.55	36.93	89.36	5.35	19.60	76.08	14.0
4#	14.00	33.90	81.91	6.77	21.82	59.12	12.3
5#	27.61	89.79	177.00	8.79	33.42	107.20	2.2
6#	26.83	87.53	178.20	6.98	36.24	122.40	2.5
7#	15.22	36.98	89.38	8.51	23.39	51.39	17.1
8#	14.28	34.42	80.74	7.68	22.98	60.03	35.9

P 径流条件下透水砖堵塞前后的表层孔径及截留颗粒粒径分布如图 3 所示。

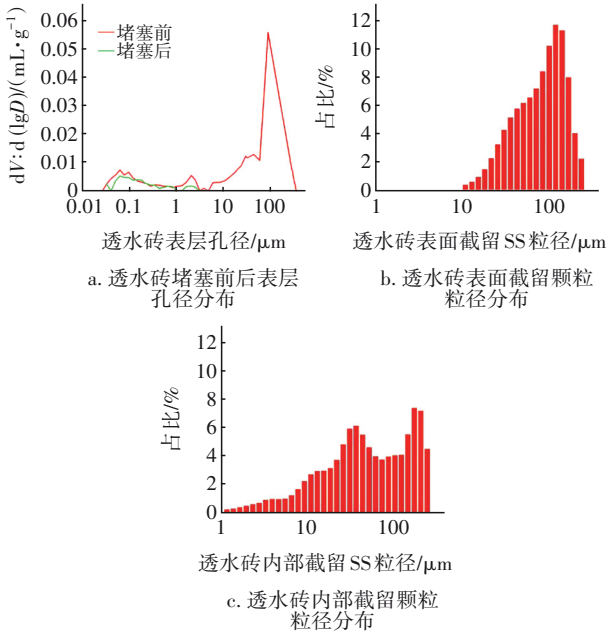


图 3 P 径流条件下透水砖堵塞前后表层孔径及截留颗粒粒径分布

Fig.3 Distribution of surface pore size and captured particle size of permeable brick before and after blockage by P runoff

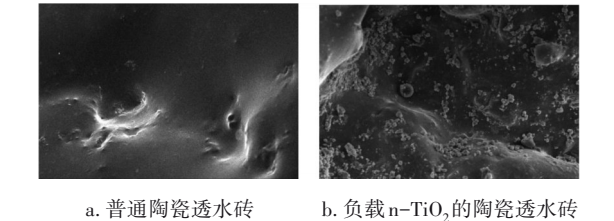
由图 3 可见,粒径为 10~150 μm 的颗粒是造成透水砖堵塞的主要颗粒物,内部截留颗粒中有

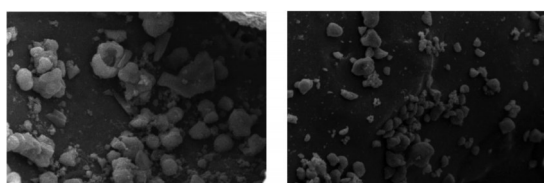
46.58% 的粒径在 50~250 μm ,表面截留颗粒中仅有 28.67% 的粒径 < 50 μm ,而堵塞前透水砖表层大于 50 μm 的孔径占 73.01%。此结果表明,较大的孔径不仅让更多的大颗粒进入内部,还加大了小颗粒进入内部的几率,使较大孔隙尺寸的透水砖容易堵塞。因此,减小表层大于 50 μm 孔径的比例,减少颗粒物在内部的累积,寻找渗透系数和表面最大截留量的最优工况对延缓透水砖堵塞具有重要意义。

2.2 纳米材料对透水砖堵塞的控制效果和机制

2.2.1 锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 的负载效果

采用扫描电子显微镜(SEM)观察锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 负载透水砖的表面形貌,见图 4。 $n\text{-TiO}_2$ 负载相对均匀,即使经过高压水枪冲洗和表面反复清扫后,其表面仍存留有 $n\text{-TiO}_2$ 颗粒,这是因为透水砖表面具有丰富且粗糙的孔隙结构,为 $n\text{-TiO}_2$ 提供了较好的负载场所。此外, $n\text{-TiO}_2$ 颗粒有较强的吸附力,使得透水砖表面负载的 $n\text{-TiO}_2$ 能抵抗一定程度的外力破坏,为其性能长久保持提供了保障。





c. 高压水枪冲洗后

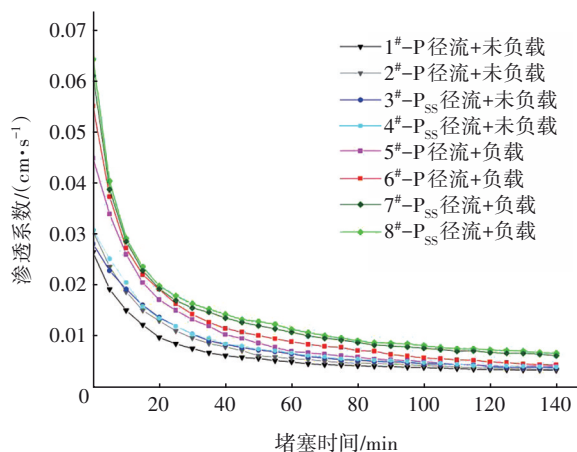
d. 表面反复清扫后

图 4 陶瓷透水砖表面的 SEM 照片

Fig.4 SEM pictures of ceramic permeable brick surface

2.2.2 $n\text{-TiO}_2$ 对透水砖堵塞的控制效果和机制

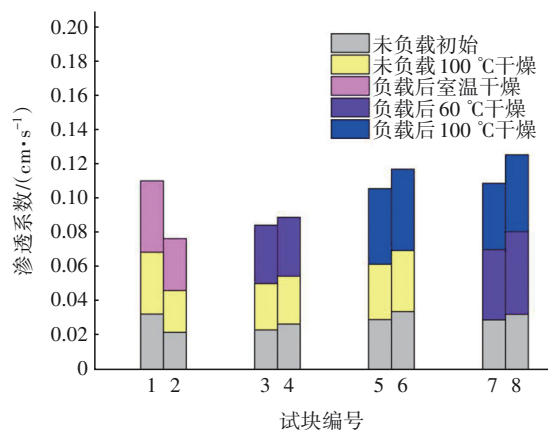
表面负载锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 对透水砖透水性能的影响如图 5 所示。对于 P_{ss} 和 P 两种雨水径流,表面负载 $n\text{-TiO}_2$ 的透水砖在整个堵塞过程中的渗透系数均高于未负载的透水砖,尤其是在快速堵塞和缓慢堵塞阶段。对于未负载组(1[#]、2[#]、3[#]、4[#]),其初始渗透系数分别为 0.025 9、0.029 9、0.027 5、0.030 9 cm/s ;过水 60 min 后,渗透系数分别变为 0.005 0、0.005 6、0.006 5、0.006 9 cm/s 。而表面负载 $n\text{-TiO}_2$ 的透水砖(5[#]、6[#]、7[#]、8[#]),初始渗透系数分别为 0.043 8、0.053 8、0.059 5、0.062 7 cm/s ;过水 60 min 后,渗透系数分别为 0.007 0、0.008 8、0.010 7、0.011 2 cm/s 。即使在稳定期末端,负载组的渗透性能仍优于未负载组。

图 5 表面负载 $n\text{-TiO}_2$ 对透水砖透水性能的影响Fig.5 Effect of surface loading $n\text{-TiO}_2$ on the permeability of permeable bricks

总体来看,锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 对透水砖堵塞的控制效果较好。对于 P 径流下的未负载组透水砖,整个堵塞过程中平均透水量为 19.50 L,而负载组的平均透水量为 29.67 L,是未负载组的 1.52 倍。参考西安市年均降雨量 530.48 mm(中国气象数据网),按照海绵城市就地消纳利用 70% 降雨的建设要求,将透水砖渗透系数折算为其有效使用年限,

在从未对透水砖进行管理和维护的情况下,按单块透水砖渗透面积计算,负载锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 的透水砖的使用年限比未负载的透水砖多 1.41 年。实际上,日常的清扫管养会使得负载 $n\text{-TiO}_2$ 透水砖的寿命大大提高。

由表 2 可知,在 P 径流下负载锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 透水砖(5[#]、6[#])表面截留的颗粒粒径相比未负载组(1[#]、2[#])要大,而内部截留的颗粒粒径明显减小;对于 P_{ss} 径流,负载锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 透水砖(7[#]、8[#])表面和内部截留的颗粒粒径与未负载组(3[#]、4[#])的相近。另外,两种径流条件下负载组透过的径流颗粒浓度均增加。图 6 为同一块透水砖负载锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 前后及不同干燥过程后的渗透系数变化。

图 6 表面负载 $n\text{-TiO}_2$ 和干燥过程对透水砖透水性能的影响Fig.6 Influence of surface loading $n\text{-TiO}_2$ and drying process on water permeability of permeable brick

随着干燥温度的升高,透水砖的渗透性能略有提高,而负载 $n\text{-TiO}_2$ 明显改善了透水砖前期的透水性能,负载 $n\text{-TiO}_2$ 的透水砖随着干燥温度从室温升高到 60 $^{\circ}\text{C}$,其渗透性能有明显提高;而当干燥温度升为 100 $^{\circ}\text{C}$ 时,其渗透性能反而略有下降,这可能是因为之前 60 $^{\circ}\text{C}$ 干燥后测量其渗透系数的过程中发生了少量 $n\text{-TiO}_2$ 的流失。高温干燥可能会促进透水砖的毛细作用和纳米材料的固结过程,从一定程度上改善透水砖的透水性能;但干燥对透水砖渗透性能的提升效果远不及负载 $n\text{-TiO}_2$ 明显。

采用毛细管上升法^[11]测量负载不同纳米材料的透水砖表层材料的接触角,结果如表 3 所示。相比未负载纳米材料的透水砖,负载 $n\text{-TiO}_2$ 的透水砖的接触角减小,即其表面亲水性更佳,这表明其渗

透性能的提高是由于纳米 $n\text{-TiO}_2$ 的亲水性促进了雨水径流在透水砖表面的铺展和通过^[12],同时也解释了负载 $n\text{-TiO}_2$ 的透水砖在前期渗透系数下降较快的原因,即刚开始所有 $n\text{-TiO}_2$ 都发挥了亲水性作用,随着颗粒物的堆积, $n\text{-TiO}_2$ 颗粒被逐渐覆盖,亲水性作用就会有所降低。

表3 表面负载不同纳米材料的透水砖表层接触角

Tab.3 Surface contact angle of permeable bricks loaded with different nano-materials

负载条件	样品质量/g	纳米材料负载量/g	颗粒目数/目	$\cos\theta$	接触角/(°)
未负载	5	0	80	0.324 8	71.04
负载锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$	5	0.3	80	0.429 2	64.58
负载金红石型亲水性 $n\text{-TiO}_2$	5	0.3	80	0.421 0	65.10
负载亲水性 $n\text{-ZnO}$	5	0.3	80	0.369 1	68.34

2.2.3 不同纳米材料对透水砖堵塞的控制效果

P径流条件下表面负载不同纳米材料的透水砖渗透性能如图7所示。

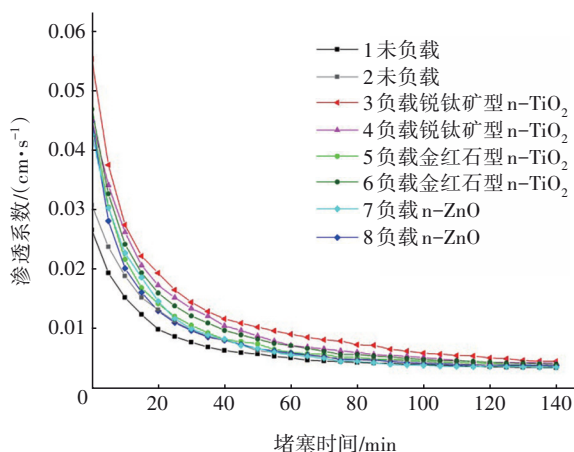


图7 表面负载不同纳米材料对透水砖透水性能的影响

Fig.7 Effect of surface loading of different nanomaterials on permeability of permeable brick

由图7可知,3种纳米材料均提高了透水砖的渗透性能,且锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 优于金红石型亲水性 $n\text{-TiO}_2$,而 $n\text{-ZnO}$ 对透水砖渗透性能的提高作用较小,这可能是因为 $n\text{-ZnO}$ 的粒径较大而且亲水性比 $n\text{-TiO}_2$ 要差,雨水径流在其表面铺展较差。但在关注透水性能的同时,负载纳米材料的耐候性和

抗菌性能也不容忽视,金红石型 $n\text{-TiO}_2$ 在 $1\,000\sim 1\,200\text{ }^\circ\text{C}$ 下不变性,因此可在陶瓷透水砖高温烧结前加入,通过烧结固化提高其耐久性。此外,透水砖的生物堵塞被低估,Yong等^[13]发现,有干燥期的透水路面寿命几乎是持续润湿路面的两倍。 $n\text{-ZnO}$ 的抗菌性能优于 $n\text{-TiO}_2$,即使在黑暗条件下也具有抗菌活性^[14],这有望缓解透水砖的生物堵塞。

透水铺装是一个系统,在使用亲水性纳米材料提高其透水性的同时,相对较多的颗粒物进入了找平层和基层,找平层、基层骨料的优化和渗蓄水能力的核算^[15]以避免找平层和基层板结^[16]对发挥面层优势和延缓堵塞同等重要。

3 结论

① 雨水径流中的有机污染物会黏附在无机颗粒物和孔道上而加剧透水砖的堵塞,与仅含无机颗粒物的雨水径流条件相比,在包含无机颗粒物及有机污染物的雨水径流条件下,透水砖在快速堵塞和稳定阶段的渗透系数分别下降 12.77% 和 3.40%。

② 粒径在 $10\sim 150\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物是引发透水砖堵塞的主要颗粒物,合理减少透水砖表层大于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 孔径的比例,寻找渗透系数和表面最大截留量的最优工况对延缓堵塞有重要意义。

③ 按负载量为 25 g/m^2 负载亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 和 $n\text{-ZnO}$ 于透水砖表面,可增强其渗透性能,其中锐钛矿型亲水性 $n\text{-TiO}_2$ 的效果更佳,在不进行清扫维护条件下,整个生命周期内的透水量是未负载组的 1.52 倍,按西安市降雨条件和海绵城市建设 70% 降雨就地消纳的要求,其有效寿命可延长 1.41 年。

参考文献:

- [1] KIA A, WONG H S, CHEESEMAN C R. Clogging in permeable concrete: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193: 221-233.
- [2] 唐荣,钱国平,秦志斌,等.路面径流污染成因与特征的研究进展[J].环境科学与技术,2010,33(S2): 425-429.
TANG Rong, QIAN Guoping, QIN Zhibin, et al. Research progress of pavement runoff pollution causes and characteristics [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(S2): 425-429 (in Chinese).
- [3] MÜLLER A, ÖSTERLUND H, MARSALEK J, et al.

- The pollution conveyed by urban runoff: a review of sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 709: 136125.
- [4] LIANG X, CUI S, LI H, *et al.* Removal effect on stormwater runoff pollution of porous concrete treated with nanometer titanium dioxide [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 73: 34–45.
- [5] 钱国平, 郑凯, 郑伟, 等. 路面漏油污染的光催化降解试验研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(6): 172–176.
- QIAN Guoping, ZHENG Kai, ZHENG Wei, *et al.* Experimental study on photocatalytic degradation of road surface oil pollution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(6): 172–176 (in Chinese).
- [6] 李家科, 李怀恩, 董雯, 等. 西安市城区非点源污染特性与负荷估[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(4): 131–138.
- LI Jiake, LI Huai'en, DONG Wen, *et al.* Estimation of non-point source pollution characteristics and loading in Xi'an urban areas [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(4): 131–138 (in Chinese).
- [7] 王小林, 余李鑫, 王旭东, 等. 西安市不同下垫面雨水水质分析及道路雨水利用设计[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(4): 555–560.
- WANG Xiaolin, YU Lixin, WANG Xudong, *et al.* Analysis of rainwater quality from different underlying surfaces in Xi'an and the design of road drainage project [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 49(4): 555–560 (in Chinese).
- [8] FRONCZYK J. Artificial road runoff water treatment by a pilot-scale horizontal permeable treatment zone [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 107: 198–207.
- [9] LI H Y, LI Z F, ZHANG X R, *et al.* The effect of different surface materials on runoff quality in permeable pavement systems [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2017, 24: 21103–21110.
- [10] 陈颢. 基于校园样品的西安城市灰尘重金属污染研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014.
- CHEN Hao. Metal Contamination in Urban Dust of Xi'an, China: A Study Based on Campus Dust Samples [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2014 (in Chinese).
- [11] 孔令云, 曹慧平, 张玉贞. 影响毛细管上升法测矿粉接触角的外因及解决方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(9): 85–89.
- KONG Lingyun, CAO Huiping, ZHANG Yuzhen. External factors for contact angle of mineral filler with capillary rise method and solutions [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(9): 85–89 (in Chinese).
- [12] MUNAFÒ P, GOFFREDO G B, QUAGLIARINI E. TiO₂-based nanocoatings for preserving architectural stone surfaces: an overview [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 84: 201–218.
- [13] YONG C F, MCCARTHY D T, DELETIC A. Predicting physical clogging of porous and permeable pavements [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 481: 48–55.
- [14] DYSHLYUK L, BABICH O, IVANOVA S, *et al.* Antimicrobial potential of ZnO, TiO₂ and SiO₂ nanoparticles in protecting building materials from biodegradation [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2020, 146: 104821.
- [15] 韦甦, 吴力平, 李军, 等. 透水砖应用于海绵城市建设的若干问题探讨[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(12): 1–5.
- WEI Su, WU Liping, LI Jun, *et al.* Discussion on the application of permeable brick in the construction of sponge city [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(12): 1–5 (in Chinese).
- [16] FASSMAN E A, BLACKBOURN S. Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, 15(6): 475–485.

作者简介:李盟(1995–),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为透水材料堵塞控制技术。

E-mail: 1577584108@qq.com

收稿日期:2020-08-17

修回日期:2021-01-16

(编辑:刘贵春)