

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.06.012

透水砖堵塞和控制研究及应用进展

成智文¹, 李 盟^{2,3}, 孙 昕^{2,3}, 刘明文^{2,3}, 耿 康^{2,3}, 陈晓薇^{2,3}

(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 环境与市政工程学院, 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: 透水砖是海绵城市系统的重要组成部分,可有效降低城市雨洪风险。但透水砖会因截留颗粒物而降低其渗透性能,严重缩短其使用寿命。综述了透水砖的分类、堵塞机理、防堵控制技术,及其在我国的工程实践应用情况。透水砖堵塞位置和程度主要受材料、孔隙结构、雨水径流颗粒物性质及暴露环境等诸多因素共同影响,需要经常性的维护清理以保证其透水性能。目前,透水砖主要有人工清扫、高压冲洗和真空抽吸等三种维护方法,但只能去除透水材料表层截留物,恢复能力有限。因此,研制高强度和高渗透性的透水砖,以及与纳米科技应用和耦合系统有助于源头控制堵塞。最后对缓堵型透水材料研制和长效维护机制提出了研究建议。

关键词: 透水砖; 孔隙结构; 堵塞机理; 堵塞维护

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)06-0060-07

Progress in Research and Applications on the Control of Clogging in Permeable Bricks

CHENG Zhi-wen¹, LI Meng^{2,3}, SUN Xin^{2,3}, LIU Ming-wen^{2,3}, GENG Kang^{2,3},
CHEN Xiao-wei^{2,3}

(1. Xianyang Research & Design Institute of Ceramics, Xianyang 712000, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Northwest China Key Laboratory of Water Resources and Environment Ecology, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Permeable bricks are important parts of the sponge city system that can be used to effectively reduce the urban flood risk. However, the permeability of permeable bricks will decrease by particles blocking, which will severely shorten the service life. This paper reviews the classification of permeable bricks, blocking mechanism, anti-blocking control technologies and application of engineering practice in China. The location and degree of permeable bricks blockage are mainly affected by many factors such as materials, pore structure, particulate matter of rainwater runoff and exposed environment. Regular maintenance is required to ensure the permeating performance of permeable bricks, three maintenance methods of manual sweeping, pressure washing and vacuum sweeping are currently used. But only the surface sediments of the permeable material can be removed, which caused limited recovery

基金项目:“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

capacity. The development of high-strength and high-permeability permeable bricks, nanotechnology applications and coupling systems are needed for the control of blockage from the source. Research suggestions are given from the perspectives of slow-blocking permeable bricks and long-term maintenance systems.

Key words: permeable bricks; pore structure; clogging mechanism; clogging maintenance

透水砖通过构建“降雨-径流-下渗-回归”的良性循环,可增强降雨入渗而削减地表径流和洪峰流量,降低雨洪风险^[1-2]。但目前透水砖存在强度低、易堵塞、耐久性差等问题,其中堵塞问题尤为严重,造成透水砖渗透性能短时间内大幅下降甚至丧失,严重缩短其使用寿命。采取堵塞恢复措施,会一定程度恢复透水砖的透水性,可以降低成本。介绍了透水砖的分类,重点论述透水砖孔隙结构与透水性关系、堵塞机理和控制技术及应用进展,以期为解决透水砖的实际应用问题提供参考。

1 透水砖的分类

透水砖种类繁多,按照材质和生产工艺可分为两大类:一是陶瓷透水砖,也称烧结透水砖,主要原料为陶瓷废料、尾矿等,通过对废料破碎、混合、成型、烧结而成;二是非陶瓷透水砖,主要包括砂基和水泥基透水砖,通过添加黏结剂使其骨料间黏结,将其混合、成型、凝固,无需烧结。目前市场上应用最广泛的就是混凝土透水砖和陶瓷透水砖。无论是哪种透水砖,其最大特点都是内部具有丰富的孔隙,可以使雨水径流下渗到地下,有效减小城市排水压力,并在一定程度上改善入渗水质^[3]。

2 透水砖堵塞机理

2.1 透水砖的孔隙结构和透水性

透水砖的渗透性能、强度等与孔隙结构密切相关。Sansalone等^[4]指出:孔隙度、尺寸分布和拓扑结构是控制透水砖性能的关键参数。孔隙度<15%的透水砖连通孔隙度不足,会导致渗流缓慢;孔隙度>35%的透水砖渗透性良好,但强度较弱。孔隙度的增大必然伴随强度的下降,一般孔隙度每增加1%,强度相应下降3%^[5]。Kia等^[6]基于格里菲斯断裂理论建立了一种多孔混凝土抗压强度与孔隙度关系的数学模型,较好地预测了抗压强度随孔隙度的变化。Debnath等^[7]发现增大骨料尺寸能使连通孔隙率增加进而使渗透率增大,单级骨料可增加透水混凝土的渗透性。而有研究^[8]指出连通孔隙度主要受

骨料类型的影响,而不是骨料大小。透水砖的透水系数不仅与材料的有效孔隙率有关,还与迂曲度等其他孔隙结构参数相关。Zhong等^[9]分析了相对平均孔径和迂曲度的关系,用修正的Kozeny-Carman模型预测了骨料粒径在1.19~4.75 mm时,混凝土透水砖的有效孔隙率为15.7%~29.6%。Martin等^[10]指出垂直孔隙度分布在透水混凝土铺装的水力特性中起着关键作用。由于透水砖内部孔隙的不规则和随机性,目前定量描述垂直孔隙度分布对透水砖的水力性能的影响仍待解决。

透水砖在使用一段时间后,都会发生不同程度的堵塞,引起了众多学者对透水砖堵塞机理、恢复方法和研发新型透水砖等方面的重视。

2.2 堵塞机理

国外对透水砖堵塞机理的研究较早。Kia等^[11]用含有砂子和黏土的水流对透水砖进行循环测试,结合透水系数的变化,从透水系数衰减、半衰期和循环到堵塞来定义堵塞潜势,并发现堵塞与连通孔隙的曲折性有关,曲折度越大,堵塞的可能性越大。同时指出附近土地的雨水径流沉积物和塌陷的孔隙也是堵塞发生的重要因素,当堵塞颗粒物粒径与透水铺装内部孔隙大小相近时,渗透性能下降最大,堵塞最快。Rasiah等^[12]发现,黏土显著降低了透水混凝土的渗透性,而高压洗涤无法完全恢复其渗透性。Razzaghamanesh等^[13]指出透水砖所承担削减径流面积的大小和降雨特征是影响堵塞过程的重要因素。另外,一些学者将堵塞分为物理堵塞和生物堵塞:物理堵塞较为常见,是由表面和孔隙结构中堆积的颗粒引起的;生物堵塞是由藻类、细菌的繁殖和植物根系的生长引起的。生物堵塞常伴随着湿润的气候条件,Yong等^[14]发现,有干燥期的透水路面的寿命几乎是持续润湿路面的2倍。

微观结构探索为研究者提供了表征透水砖堵塞和失效的新方法。Kayhanian等^[15]通过对使用时间不同的混凝土透水路面进行CT扫描,结合图像分

析和孔隙度剖面分析,准确地检测到堵塞物及其位置,并发现大多数堵塞发生在道路表面附近,在表层25 mm厚度内孔隙度普遍较低,并推断是颗粒堵塞引起,并且粒径 $<38\ \mu\text{m}$ 的粉粒量是堵塞发生的重要因素。

国内随着海绵城市建设进程的加快,相关研究也日渐升温。Zhong等^[16]讨论了透水混凝土的孔隙表征方法及其对透水混凝土的机械强度、水力和声学特性的影响,重点对微观结构图像进行了分析。Tang等^[17]通过CT对透水砖进行孔隙结构分析,研究了成型压力和骨料尺寸的影响,并建立了孔隙与渗透率之间的球棒模型,指出透水砖的孔半径、孔喉半径、长度、孔体积和连通性越大,渗透性越好。

透水砖堵塞过程受雨水径流中颗粒大小、浓度,及透水砖的材料、成型工艺和孔隙结构等诸多因素影响,当颗粒积聚并堵塞连通孔隙时就会发生堵塞。Zhang等^[18]采用CFD-DEM模型对孔隙堵塞进行了模拟,结果表明,随着孔隙率、水平径流速度和渗流速度的增加,沉积物将向路面深层运移。崔新壮等^[19]指出,透水混凝土砖的孔隙率越大,内部通道的曲率越小、通道的有效直径越大,过水阻力越小,透水砖越容易堵塞。刘嘉豪等^[20]发现堵塞过程中透水系数与时间具有对数关系,透水砖孔隙率越大、悬浮物浓度越高、进水水位越低,堵塞速度越快。如何定量表征透水砖堵塞过程中颗粒尺寸与不规则孔隙、垂直孔隙度之间的关系仍然存在挑战,建模和高级表征方法有望更好地理解透水砖微观孔隙和宏观性能之间的关系,为透水砖的堵塞恢复提供帮助。

3 透水砖堵塞控制方法

目前透水砖堵塞的控制主要有两种途径:一是清除透水砖表面及内部截留的颗粒,二是研制新型缓堵透水砖。

3.1 堵塞恢复方法与策略

目前透水砖堵塞恢复的方法并不多,较为常用的有人工清扫、真空抽吸、压力冲洗以及这几种方式的组合。这几种方法单独使用都不能完全清除堵塞在砖内的沉积物,其中人工清扫效果较差,甚至会加重堵塞;而在人工清扫后进行高压水冲洗或真空抽吸的恢复效果和经济效益较好。恢复方式还取决于堵塞发生的程度和位置。当路面堵塞时,

粗砂粒主要沉积在表面,真空清扫、压力清洗或组合可提高其透水性。当堵塞主要是由砖内的粉砂、黏砂颗粒堆积所致时,传统清洗方法则无能为力。

Chopra等^[21]发现使用真空清扫车清除深层堵塞效果不明显,只能清除表面沉积物,而压力清洗相对于真空清扫具有更高的效率,真空和压力清洗组合可实现最好的渗透性恢复。Hein等^[22]发现压力清洗和真空处理均可清除堵塞,但只能使渗透率提高到初始渗透率的90%以上。文韬等^[23]对仿石透水砖进行了堵塞恢复,发现混有柠檬酸钠的高压水清洗效果最好,其次是普通高压水清洗、常压水清洗及使用毛刷清洗,透水系数分别维持在初始值的50%、36%、15%、0.78%,而且在湿润状态下清洗比干后再清洗效果更明显。不同维护方法的效果还与透水砖的种类和使用年限等有关。

建议透水砖维护频率为1~4次/a,具体取决于场地和天气条件。在颗粒物浓度和沉积速率较高的地区,需要更频繁的维护。除了定期维护,还可以定期监测渗透性,根据监测结果指导恢复,以降低成本^[24]。在干燥期应对透水砖进行充分的清洁,否则雨期将对透水砖造成更大的污染和负荷。Lin等^[25]建议,在铺设后两年内应进行定期真空清洗维护工作,当路面几乎完全堵塞时再进行清洗将非常困难和昂贵。Kia等^[11]指出即使定期进行维护也不能将渗透率完全恢复到初始值,并且由于堵塞物的累积,渗透性能会随着时间延长而降低直至失效。

3.2 缓堵型透水砖结构设计

随着透水砖的推广,必将对透水砖性能提出更高要求,而透水砖和基层结构设计在延缓堵塞中起到重要作用。Sonebi等^[26]采用统计方法研究了原料混合比对透水混凝土的密度、孔隙率、渗透性和强度的影响。结果表明,水灰比、水泥含量、粗骨料含量及其相互作用是显著影响透水混凝土性能的关键参数。孔隙率和骨料尺寸的增加能有效减少由颗粒物堵塞导致的渗透率损失^[27]。而韩唯伟等^[28]研究指出透水砖较小且合理的上层厚度可延缓堵塞。张佳炜等^[29]发现水泥稳定碎石结构层在削减峰值和延迟洪峰方面的效果略优于普通碎石结构层。韦甦等^[2]针对渗透性系数较小的软塑性黏土,提出采用小型砂石桩在提高透水砖蓄水能力的同时改善土基承载力。

3.3 纳米科技与自洁型透水砖

纳米材料因尺寸效应、光催化功能近年来引入建筑领域。纳米 TiO_2 已被证明对混凝土的自清洁非常有效,并且可以清洁环境^[30]。一些研究表明,纳米 TiO_2 可以促进硅酸盐水泥的早期水化,提高抗压和抗弯强度,并增强耐磨性^[31]。同样,通过添加少量的纳米 SiO_2 和纳米铁,也证明能显著提高透水混凝土的耐磨性、抗压强度和更好的水质改善效果^[32]。López-Carrasquillo等^[33]发现透水混凝土渗透率在一定范围内随着纳米材料含量的增加而增加。在透水砖中使用纳米技术会扩大工业副产品和废料的利用,而不会损害其工程或环境性能。有报道称,严重退化的透水混凝土铺装的渗透性比耐用的透水铺装低^[34]。因此,可以通过纳米科技提高透水砖的透水性和强度及自洁功能,但其经济性研究有待深入。

4 透水砖的工程应用实践

4.1 地理和气候特征对透水砖的影响

在透水路面建设中,区域地理和气候条件如城市灰尘、土壤渗透性能、降雨强度、温度等都会对透水砖的堵塞产生不同程度的影响。

我国城市灰尘多以粉砂和细砂为主,但粒径大小不一。例如,北京城市街尘粒径 $<105\ \mu\text{m}$ 的颗粒物占比为49.6%^[35];西安地区,5~50 μm 和50~250 μm 的的灰尘质量占比在70%以上^[36];而重庆粒径 $\leq 10\ \mu\text{m}$ 和粒径为100~250 μm 的城市灰尘占65%以上^[37]。这就可能造成同样的透水砖,由于雨水径流所携灰尘粒径不同,砖表面和内部堵塞情况不同。同样,不同地区地基土壤粒径对径流控制影响也很大。因此,在透水砖的研发、建设和管养过程中,应以地质条件为导向,合理选取透水砖类型,通过调整基层与垫层厚度比例来延迟产流时间,加强存水功能,从源头上减缓堵塞情况。

我国东北、青海等寒冷地区,风沙大,透水砖易堵塞,且受到冻融循环和融雪剂径流的挑战,导致渗透性能快速降低,维护频率高^[38]。因此,结构缝隙式透水砖优良的渗透性能和简易的堵塞恢复方法更适合这些地区^[39]。另外,降雨持续时间较长的地区,透水砖的堵塞会更严重,堵塞影响更大^[40]。对于遂宁、玉溪等低山丘陵地区,降雨集中,降雨量大,对抗冻要求不高,更适合使用具有优良透水性、

抗压性、耐磨性能的陶瓷透水砖^[41]。

4.2 透水铺装建设模式探索

近年来,我国透水铺装已在海绵城市建设中发挥了重要作用,也积累了丰富的建设经验。陕西西咸新区根据不同场地、不同使用功能和需求,铺设了不同的透水铺装,如停车场使用植草砖,人行道使用透水砖,绿地花园使用结构性透水铺装,透水铺装因地制宜且使用率高,有望成为西北地区的海绵城市模板。对于山地城市重庆,透水铺装广泛应用,效果显著,但部分人行道虽铺设透水铺装,而基层仍采用不透水材料,未能实现真正透水,同时透水铺装不注重养护,影响了渗透效果。缝隙式透水砖具有价格便宜、施工快、堵塞恢复简单的优势,在镇江得到大面积铺设,使用20个月后其渗透效果依然良好。海绵城市应系统规划,将透水铺装与下凹式绿地、生物滞留池等进行不同方式的耦合,充分发挥大型海绵体的蓄、净、滞作用,有效延缓和控制透水砖的堵塞,以保证最大程度地削减雨水径流量和雨水径流污染。

西北地区干旱少雨,降雨集中,雨水利用率低,透水铺装的建设应侧重参与蓄。西咸新区的市政道路采取透水路面、生态滤沟、植草沟、雨水花园的耦合系统,对中型降雨地表径流的削减效果可达70.5%^[42]。华东萍乡万龙湾内涝区通过透水铺装、下沉式绿地、生物滞留池等多种设施的实施,实现了75%的年径流总量控制率,相比往年暴雨期未发生内涝^[43]。同样,华中地区常德市通过透水铺装、雨水花园、植草沟的组合,使雨水径流量削减了30%,对SS的截留率达到90%^[44]。而对于天津这类透水性不良、盐渍化严重的区域,应以雨水滞蓄为主、入渗为辅^[45]。对于厦门,因其短时降雨强度大,雨量丰沛,透水铺装建设应侧重净、蓄、排^[46]。对于地下水位高、土壤含水率高、土壤渗透率低的平原河网地区,应以河流水系为骨架,透水铺装协同,以净化为主,兼顾渗和排的系统^[47]。对于低透水、强降雨地区,透水砖可能仅适用于小区、公园道路建设,其核心是通过坑塘或在透水铺装下部设置蓄水实现蓄排功能^[48]。

5 透水砖研究展望

今后,围绕透水砖堵塞控制,应重点关注和开展以下研究:①针对大多数透水砖存在强度与渗透

性成反比的问题,需探究原料的种类、配比和成型工艺,在利用建筑垃圾、矿渣、污泥等材料制备透水砖时除了要形成理想的孔隙结构和强度外,还需要考虑环境影响和环境效益。②需要更好地从微观研究砂粒、黏土、除冰剂等对透水砖结构的影响。③目前纳米技术在建筑领域的应用较少,这与纳米材料易团聚、用量控制和昂贵有关。而自洁透水砖对于城市面源污染意义重大,有必要研究纳米科技在保护环境方面的巨大潜力。④透水砖应结合各地地面沉积物和地下土质情况,因地制宜,考虑整个系统,重视管养,形成长久的协同性良好的渗、滞、蓄、排透水系统。

参考文献:

- [1] ZHU H R, YU M M, ZHU J Q, *et al.* Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff[J]. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2019, 8(4): 373-382.
- [2] 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 water permeable brick in the construction of sponge city[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(12): 1-5 (in Chinese).
- [3] KIM G M, JANG J G, KHALID H R, *et al.* Water purification characteristics of pervious concrete fabricated with CSA cement and bottom ash aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 136: 1-8.
- [4] SANSALONE J J, KUANG X, RANIERI V, *et al.* Porous pavement as a hydraulic and filtration interface for urban drainage[J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2008, 134: 666-674.
- [5] KUANG X, SANSALONE J, YING G, *et al.* Pore-structure models of hydraulic conductivity for permeable pavement[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 399(3/4): 148-157.
- [6] KIA A, WONG H S, CHEESEMAN C R, *et al.* Clogging in permeable concrete: a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 193: 221-233.
- [7] DEBNATH B, SARKAR P P. Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 643-651.
- [8] ĆOSIĆ K, KORAT L, DUCMAN V, *et al.* Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 78: 69-76.
- [9] ZHONG R, XU M, NETTO R V, *et al.* Influence of pore tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: characterization and modeling[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125: 1165-1168.
- [10] MARTIN W D, KAYE N B, PUTMAN B J, *et al.* Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 59: 78-84.
- [11] KIA A, WONG H S, CHEESEMAN C R. Defining clogging potential for permeable concrete[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 220: 44-53.
- [12] RASIAH S, DO H, NGUYEN L, *et al.* Effect of clogging on the water permeability of pervious concrete[C]//Fragomeni S, Venkatesan S. *Incorporating Sustainable Practice in Mechanics and Structures of Materials*. USA: CRC Press, 2010: 873-876.
- [13] RAZZAGHMANESH M, BORST M. Investigation clogging dynamic of permeable pavement systems using embedded sensors[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 887-896.
- [14] YONG C F, MCCARTHY D T, DELETIC A, *et al.* Predicting physical clogging of porous and permeable pavements[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 481: 48-55.
- [15] KAYHANIAN M, ANDERSON D, HARVEY J T, *et al.* Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95(1): 114-123.
- [16] ZHONG R, LENG Z, POON C S. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: a state-of-the-art and state-of-the-practice review[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 183: 544-553.
- [17] TANG B W, GAO S, WANG Y G, *et al.* Pore structure analysis of electrolytic manganese residue based permeable brick by using industrial CT[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 208: 697-709.
- [18] ZHANG J, MA G D, DAI Z X, *et al.* Numerical study on pore clogging mechanism in pervious pavements[J].

- Journal of Hydrology, 2018, 565: 589–598.
- [19] 崔新壮,张炯,黄丹,等.暴雨作用下透水混凝土路面快速堵塞试验模拟[J].中国公路学报,2016,29(10):1–11,19.
CUI Xinzhuang, ZHANG Jiong, HUANG Dan, *et al.* Experimental simulation of rapid clogging of pervious concrete pavement under effects of rainstorm[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(10): 1–11,19(in Chinese).
- [20] 刘嘉豪,杜垚,文韬,等.玉溪市海绵工程透水砖堵塞规律研究[J].中国给水排水,2019,35(12):23–27.
LIU Jiahao, DU Yao, WEN Tao, *et al.* Research on plugging pattern of permeable bricks in Yuxi sponge project [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(12): 23–27(in Chinese).
- [21] CHOPRA M, KAKUTURU S, BALLOCK C, *et al.* Effect of rejuvenation methods on the infiltration rates of pervious concrete pavements[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010,112(39):426–433.
- [22] HEIN M F, DOUGHERTY M, HOBBS T, *et al.* Cleaning methods for pervious concrete pavements[J]. International Journal of Construction Education and Research, 2013, 9(2): 102–116.
- [23] 文韬,李雅雯,刘嘉豪,等.玉溪海绵城市透水砖堵塞恢复方法研究[J].中国给水排水,2019,35(12):28–32.
WEN Tao, LI Yawen, LIU Jiahao, *et al.* Research on recovery method of permeable bricks in Yuxi sponge city [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(12): 28–32 (in Chinese).
- [24] CHU L J, FWAT F. Evaluation of surface infiltration performance of permeable pavements[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 238(3): 136–143.
- [25] LIN W G, PARK D G, RYU S W, *et al.* Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging [J]. Construction and Building Materials, 2016, 118: 20–26.
- [26] SONEBI M, BASSUONI M T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling [J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 147–154.
- [27] CHEN J, LI H, HUANG X M, *et al.* Permeability loss of open-graded friction course mixtures due to deformation-related and particle-related clogging: understanding from a laboratory investigation [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(11): 04015023.
- [28] 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(11):157–160.
HAN Weiwei, JIANG Xiang, LU Jialin, *et al.* Research on anti-plugging property of two pervious concrete pavements [J]. Concrete, 2018 (11): 157–160 (in Chinese).
- [29] 张佳炜,刘勇,金建荣,等.透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响[J].环境科学,2019,41(2):1–9.
ZHANG Jiawei, LIU Yong, JIN Jianrong, *et al.* Performance assessment of permeable interlocking concrete pavement facility structure [J]. Environmental Science, 2019, 41(2): 1–9(in Chinese).
- [30] SANCHEZ F, SOBOLEV K. Nanotechnology in concrete—a review [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11): 2060–2071.
- [31] FENG D C, XIE N, GONG C W, *et al.* Port land cement paste modified by TiO_2 nanoparticles: a microstructure perspective[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(33): 11575–11582.
- [32] LEON R J, CHOCKALINGAM T. Strength and abrasion characteristics of pervious concrete[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2019.1596828.
- [33] LÓPEZ-CARRASQUILLO V, HWANG S. Comparative assessment of pervious concrete mixtures containing fly ash and nanomaterials for compressive strength, physical durability, permeability, water quality performance and production cost [J]. Construction and Building Materials, 2017, 139: 148–158.
- [34] KIM Y, WAKEEL S, GADDAFI A, *et al.* In-place performance of severely deteriorated pervious concrete: a case study [J]. ACI Materials Journal, 2015, 112: 295–304.
- [35] 何小艳,顾培,李叙勇,等.北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征[J].环境科学,2013,34(1):357–363.
HE Xiaoyan, GU Pei, LI Xuyong, *et al.* Characteristics of heavy metal contamination in street dusts along the urban-rural gradient around Beijing [J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 357–363(in Chinese).
- [36] 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. Study on Heavy Metal Pollution in Urban

- Dust in Xi'an Based on Campus Samples [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2014(in Chinese).
- [37] 李章平. 重庆市主城区街道灰尘的污染与风险特征研究[D]. 重庆:西南大学, 2012.
- LI Zhangping. Study on the Pollution and Risk Characteristics of Dust in the Streets of Chongqing's Main District [D]. Chongqing: Southwest University, 2012(in Chinese).
- [38] 王思思,任朝阳,王文亮,等. 北方严寒地区LID设施建设面临的挑战及优化策略[J]. 中国给水排水, 2019,35(10):1-7.
- WANG Sisi, REN Chaoyang, WANG Wenliang, *et al.* Challenges and optimization strategies for construction of LID facilities in the cold regions of northern China [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (10) : 1-7 (in Chinese).
- [39] 朱晓娟,刘静,吴薇. 缝隙式透水铺装在镇江海绵城市建设中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2017,33(20): 1-4.
- ZHU Xiaojuan, LIU Jing, WU Wei. Application of slotted permeable pavement in the construction of sponge city:taking Zhenjiang as an example[J]. China Water & Wastewater, 2017,33(20):1-4(in Chinese).
- [40] YANG Q X, BEECHAM S, LIU J X, *et al.* The influence of rainfall intensity and duration on sediment pathways and subsequent clogging in permeable pavements [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 730-736.
- [41] 翁邦正,李亮,马竞,等. 海绵城市改造工程的路面透水砖性能比选与应用研究 [J]. 中国给水排水, 2019, 35(12):19-22.
- WENG Bangzheng, LI Liang, MA Jing, *et al.* Performance comparison and application of permeable bricks in sponge city projects [J]. China Water & Wastewater, 2019,35(12):19-22(in Chinese).
- [42] 黄宁俊,张斌令,王社平,等. 陕西西咸新区海绵城市LID市政道路设计[J]. 中国给水排水, 2017,33(24): 61-66.
- HUANG Ningjun, ZHANG Binling, WANG Sheping, *et al.* Design of sponge city road in Xixian new area of Shaanxi Province [J]. China Water & Wastewater, 2017,33(24):61-66(in Chinese).
- [43] 徐海东,赵晨辰,吕梅,等. 萍乡市万龙湾内涝区海绵城市综合整治实践[J]. 中国给水排水, 2017,33(18): 9-13.
- XU Haidong, ZHAO Chenchen, LÜ Mei, *et al.* Practice of the comprehensive improvement in waterlogged areas based on sponge city: a case study of Wanlongwan in Pingxiang [J]. China Water & Wastewater, 2017,33(18):9-13(in Chinese).
- [44] 陈利群,刘曦. 常德市海绵城市建设项目实施体系构建[J]. 给水排水, 2019,45(6):71-76.
- CHEN Liqun, LIU Xi. The implementation framework for sponge city construction projects in Changde City [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019,45(6):71-76(in Chinese).
- [45] 刘建华,刘小芳,李旭东,等. 天津市建筑与小区海绵城市设计要点及案例分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32(22):108-111.
- LIU Jianhua, LIU Xiaofang, LI Xudong, *et al.* Analysis on main points and project case in sponge city design of buildings and communities in Tianjin [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22): 108-111(in Chinese).
- [46] 杨一夫. 厦门海绵城市建设的冷静思考[J]. 中国给水排水, 2017,33(2):27-30,36.
- YANG Yifu. Reconsideration of current sponge city development practice: a case study of Xiamen [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(2):27-30,36(in Chinese).
- [47] 印熠. 海绵城市建设机制在平原河网地区的应用 [D]. 苏州:苏州科技大学, 2019.
- YIN Yi. Application of Sponge City Construction Mechanism in Plain River Network Area [D]. Suzhou : Suzhou University of Science and Technology, 2019 (in Chinese).
- [48] 周杨军,赵祥,宋源. 弱透水地质条件下的海绵城市规划建设方法探索[J]. 中国给水排水, 2017,33(13): 124-129.
- ZHOU Yangjun, ZHAO Xiang, SONG Yuan. Exploration of sponge city planning and construction under low permeability geological condition [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (13) : 124-129 (in Chinese).

作者简介:成智文(1969-),男,陕西武功人,本科,教授级高级工程师,长期从事建筑卫生陶瓷行业的科研工作。

E-mail:xtyczw@sina.com

收稿日期:2019-11-28

修回日期:2020-01-16

(编辑:丁彩娟)