

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.05.017

纳米二氧化钛控制透水砖堵塞试验研究

成智文¹, 陈晓薇^{2,3}, 孙 昕^{2,3}, 刘 婷¹, 耿 康^{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 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: 为了研究纳米二氧化钛对陶瓷透水砖堵塞的控制效果,采用不同方式在透水砖表面负载纳米二氧化钛,并开展了一系列透水砖堵塞控制试验,测定了透水砖的透水系数随过水时间的变化。结果表明,引入适量纳米二氧化钛可以提高陶瓷透水砖的透水性能。在1 g和4 g纳米二氧化钛负载量下,采用喷涂法和浸提法负载1 g纳米二氧化钛的透水砖均表现出良好的透水性能。喷涂法负载纳米二氧化钛透水砖的透水性能优于浸提法,初期和末期透水系数比未负载纳米二氧化钛的透水砖分别高146.15%和100%。用喷涂法负载粒径为5~10、25、40、100 nm的纳米二氧化钛时,5~10 nm的透水砖表现出最佳的透水性能,且成本最低。因此,推荐采用喷涂法负载纳米二氧化钛,且最适粒径范围为5~10 nm。

关键词: 陶瓷透水砖; 二氧化钛; 堵塞控制; 负载方式

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)05-0102-06

Control of Permeable Brick Clogging by Nanometer Titanium Dioxide

CHENG Zhi-wen¹, CHEN Xiao-wei^{2,3}, SUN Xin^{2,3}, LIU Ting¹, GENG Kang^{2,3}

(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 explore the control effect of nanometer titanium dioxide (Nano-TiO₂) on ceramic permeable brick clogging, Nano-TiO₂ was loaded on the surface of permeable brick in different ways, and a series of clogging control tests were carried out to measure the change of permeability coefficient with penetration time. The permeability of ceramic permeable brick was improved by introducing proper amounts of Nano-TiO₂. Under loading amounts of 1 g and 4 g Nano-TiO₂, the permeable bricks loaded with 1 g Nano-TiO₂ by spraying and extraction methods both had good permeability. The permeability of permeable bricks loaded with titanium dioxide by spraying method was better than that by extraction method, and the initial and final permeability coefficients of permeable bricks loaded with Nano-TiO₂ were

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

146.15% and 100% higher than those of the unloaded permeable brick, respectively. When titanium dioxide with particle sizes of 5–10 nm, 25 nm, 40 nm and 100 nm was loaded by spraying method, permeable bricks with particle sizes of 5–10 nm showed the best permeable performance and the lowest cost. Therefore, it is recommended that the optimal particle size range of Nano-TiO₂ loaded by spraying method is 5–10 nm.

Key words: ceramic permeable brick; titanium dioxide; clogging control; loading mode

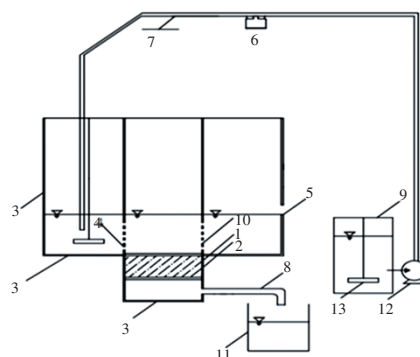
透水砖路面铺装是低影响开发(LID)技术措施之一,近年来在市政领域的推广应用逐渐增多^[1-2]。透水砖能利用其内部孔隙明显改善城镇环境,如显著减少雨洪峰量、减轻雨水污染^[3-4]、降低城市交通噪音、削弱城市热岛效应^[5]。但普遍存在的堵塞问题直接影响其长期的工作效能,正成为制约其广泛应用的主要瓶颈^[3,5]。根据《透水砖路面技术规程》(CJJ/T 188—2012)要求,透水砖的透水系数应超过0.01 cm/s,合理使用年限宜为8~10年;但透水砖的透水系数波动大(0.000 2~1.82 cm/s),不少透水砖的使用年限为1~2年^[6-7]。透水砖堵塞主要包括粗颗粒在砖体浅层的表层阻塞^[8]和细颗粒渗入砖体内部的深层堵塞,目前主要通过表面清扫、高压水冲洗和真空抽吸等方法清除表层截留的颗粒物,但无法有效清除深层截留的颗粒物^[3,5-9]。

如需从根本上解决透水砖堵塞问题,应从减小透水砖孔隙弯曲度和削弱透水砖孔隙表面对颗粒物的黏附能力着手,笔者主要从后者着手研制了防堵型透水砖。虽然纳米二氧化钛光催化降解污染物的优良性能已被高度关注^[10-11],但是鲜有利用其亲水性来控制雨水中颗粒物堵塞透水砖的报道,笔者主要通过不同纳米二氧化钛负载条件下透水砖的过水试验,探究如何利用纳米二氧化钛的亲水性减少颗粒物黏附于透水砖表面的能力和几率,降低透水砖堵塞风险,旨在为新型防堵型透水砖的研制提供参考。

1 材料与方法

1.1 雨水径流堵塞透水砖实时模拟装置

自行研制的雨水径流堵塞透水砖实时模拟装置如图1所示。人工配制的含砂雨水经泵从雨水桶提升至左侧雨水调节池,再通过重力流经中间水池内透水砖的表面至右侧出水池,雨水径流流量和深度分别通过雨水调节池的进水管阀门开启度和出水池堰板高度调节。



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 of clogging permeable brick by rainwater runoff

试验过程中,待雨水径流流量及透水砖上面水深稳定后,每隔3 min记录1次水深(H)、经过透水砖的水量(Q)和连续透水时间(t)。依据达西定律计算透水系数,见式(1),当计算的透水系数趋于稳定后视为达到堵塞过程的终点。

$$K_T = QL/AHt \quad (1)$$

式中: K_T 表示水温为 T 时陶瓷透水砖的透水系数,cm/s; Q 为 t 时间内渗出水水量,mL; L 为透水砖的厚度,cm; A 为试样上表面的面积,cm²; H 为水深,cm; t 为时间,s。

1.2 试验材料

1.2.1 陶瓷透水砖及模拟雨水

试验所用的陶瓷透水砖长20 cm、宽10 cm、高5.0 cm,上面层厚度约为1.0 cm,形成的孔隙小且紧凑;下面层厚度约为4.0 cm,形成的孔隙较大且不规则。试验仅研究亲水性纳米二氧化钛对透水砖堵塞的控制效果。参考雨水径流水质监测结果及文献[12]和[13],采用细砂和自来水配制模拟雨水径流,其SS浓度为200 mg/L,粒径为10~20、20~

50、50~150 μm 的粉粒砂,质量分数分别为50%、45%、5%。

1.2.2 纳米二氧化钛陶瓷透水砖的制备

试验所用纳米二氧化钛为白色松散粉末,粒径为5~100 nm,易于团聚。选取三聚磷酸钠为分散剂^[14],加入纳米二氧化钛水溶液中,依次超声处理30 min、磁力搅拌2 h,制得纳米二氧化钛分散液。

分别采用浸提法和喷涂法在陶瓷透水砖表层负载纳米二氧化钛。浸提法中,透水砖表层在纳米二氧化钛分散液的浸入深度为10 mm,浸提时间为30 min;喷涂法中,采用压力喷壶将纳米二氧化钛分散液均匀喷涂在透水砖10 mm厚表层的外表面,喷涂时间为10~20 min。将负载纳米二氧化钛的透水砖置于110 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中进行烘干,保温4 h后备用。

1.3 试验方法

为优选纳米二氧化钛负载方法,分别采用浸提法和喷涂法利用1 g二氧化钛制备纳米透水砖;为优选纳米二氧化钛负载量,采用优选的负载方法进行试验,负载量分别为1 g和4 g;为优选纳米二氧化钛粒径,采用优选的负载方法和负载量,选择粒径分别为5~10、25、40、100 nm进行试验。在雨水径流深度为8.5 cm、流速为1.5 cm/s和粉粒砂条件下,采用不同纳米透水砖进行过水试验,每种条件下制备的透水砖均进行两次平行试验,试验条件见表1。

表1 纳米二氧化钛负载试验的条件

Tab.1 Experimental conditions of loading nano-TiO₂

砖体编号	负载方式	纳米TiO ₂ 粒径/nm	纳米TiO ₂ 负载量/g
1 [#]	浸提	25	4
2 [#]	浸提	25	4
3 [#]	浸提	25	1
4 [#]	浸提	25	1
5 [#]	喷涂	25	1
6 [#]	喷涂	25	1
7 [#]	—	—	0
8 [#]	—	—	0
9 [#]	喷涂	5~10	1
10 [#]	喷涂	5~10	1
11 [#]	喷涂	40	1
12 [#]	喷涂	40	1
13 [#]	喷涂	100	1
14 [#]	喷涂	100	1

2 结果与分析

2.1 纳米二氧化钛负载方式与负载量的影响

负载方式会影响纳米二氧化钛在基体内的分布形态及均匀性,进而影响亲水性能及光催化性能^[10]。在粒径为25 nm、负载量为1 g条件下,分别采用浸提法和喷涂法对相同材质及规格和普通陶瓷透水砖负载纳米二氧化钛,纳米透水砖及普通透水砖的透水系数随时间的变化如图2所示。

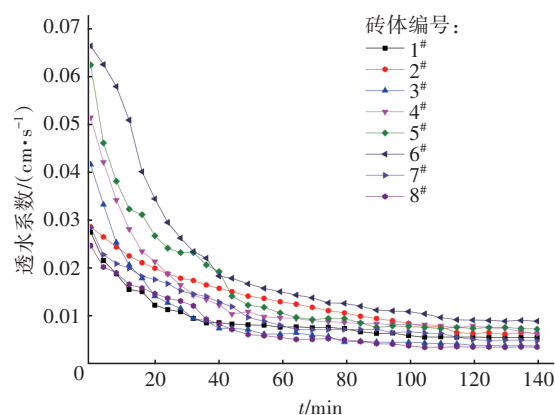


图2 不同负载方式下纳米二氧化钛陶瓷透水砖透水系数的变化

Fig.2 Variation of permeability of nano-TiO₂ ceramic permeable brick under different loading modes

从图2可知,在相同雨水径流历时条件下,透水砖个体存在一定的差异,每两组平行试验中的透水系数不完全相同,但在试验初期和稳定末期,负载纳米二氧化钛的透水砖的透水系数均大于普通透水砖,其中采用喷涂法制备的纳米透水砖的透水系数高于浸提法制备的透水砖。对于未负载组、浸提1 g组、喷涂1 g组而言,各组的初始平均透水系数分别为0.026、0.046、0.064 cm/s,后期稳定时的平均透水系数分别为0.004、0.005、0.008 cm/s。在纳米二氧化钛负载量均为1 g时,对于采用喷涂法和浸提法制备的纳米透水砖,其初期平均透水系数分别比普通透水砖高146.15%和76.92%,后期稳定时平均透水系数分别比普通透水砖高100%和25%。而在前60 min,纳米透水砖的透水系数由高值到低值下降较快,一是由于纳米二氧化钛的亲水性,负载后的砖体可快速吸收水分使透水砖表面的颗粒物质不易黏附在砖体上,增加砖体初期表面径流下渗量,表现出良好的透水性能;二是由于陶瓷透水砖内部存在微孔结构^[14],随着径流下渗量的增多,孔

隙吸附水中气体的量也同时快速增加,流道面积减小,使透水性能快速变差。

从图2还可看出,在雨水流经透水砖的过程中,尽管各透水砖的透水系数均在2 h内逐渐降低到快速堵塞的终点;但是具体的透水系数降低过程依然存在一些差异,采用喷涂法负载纳米二氧化钛透水砖的透水系数总体高于浸提法。对于采用浸提法负载1 g纳米二氧化钛的3[#]、4[#]透水砖,初始透水系数均高于7[#]、8[#]普通透水砖;但过水10~15 min后,透水系数较7[#]普通透水砖有所降低。对于采用喷涂法负载1 g纳米二氧化钛的5[#]、6[#]透水砖,5[#]纳米透水砖的透水系数始终高于普通透水砖,90 min后逐渐和普通透水砖持平,透水系数降至0.01 cm/s,透水砖完全失效;6[#]纳米透水砖的透水系数在整个透水过程中表现最好,均高于普通透水砖。

根据式(1),对各微小过水时段内 K 和 t 的乘积进行积分,再乘以 AH/L ,即可得过水期间内透水砖总透水量(Q_T)。如将图2中透水系数曲线以下、横坐标轴以上的面积进行积分,得到面积 S_T ,再除以 H/L ,亦可得到 Q_T 。由图2可直观估算出,在相同过水期内,负载1 g纳米二氧化钛的透水砖总透水量均大于普通透水砖,其中喷涂法制备的纳米透水砖总透水量更大,主要原因在于喷涂法比浸提法能更均匀地将纳米二氧化钛分散于透水砖孔隙表面和上面层内部。根据不同类型透水砖的微观结构(见图3),喷涂法能够使纳米二氧化钛较为均匀地分布在砖体表面,颗粒大小均匀;而浸提法是利用纳米二氧化钛分散液的黏附性和表面张力自行分散在透水砖表面或上面层内部,纳米二氧化钛颗粒容易在砖体表面孔隙内部发生团聚离析,减小透水砖内部有效过流面积,使浸提法制备的透水砖的透水性能弱于喷涂法。

从图2还可以看出,相对于7[#]、8[#]普通透水砖,负载量为4 g的1[#]、2[#]纳米透水砖的透水系数变化趋势大致相同;但在整个过水过程中,2[#]纳米透水砖的透水系数均高于普通透水砖。相较于3[#]、4[#]纳米透水砖,在过水前20 min,1[#]、2[#]纳米透水砖的透水系数明显较低;随后的透水系数变化虽然略有波动,但总体降低趋势也类似。根据透水砖的总过水量计算结果,负载1 g纳米二氧化钛的透水砖较负载4 g的总过水量更大。分析原因,在1 g低负载量(对应负载率为5 g/L)条件下,纳米二氧化钛的分散性

能较好,更易于浸入透水砖表面,从而展现其亲水性能(见图3);相反,纳米二氧化钛可能会在浸提过程中发生团聚,形成较大聚集体而堵塞透水砖表面,并且形成的纳米二氧化钛涂膜厚度较大,见图3(b),纳米透水砖表层能够吸附更多水分,即保水性能优于透水性能,导致负载量为4 g的透水砖的透水性能低于负载量为1 g的透水砖。

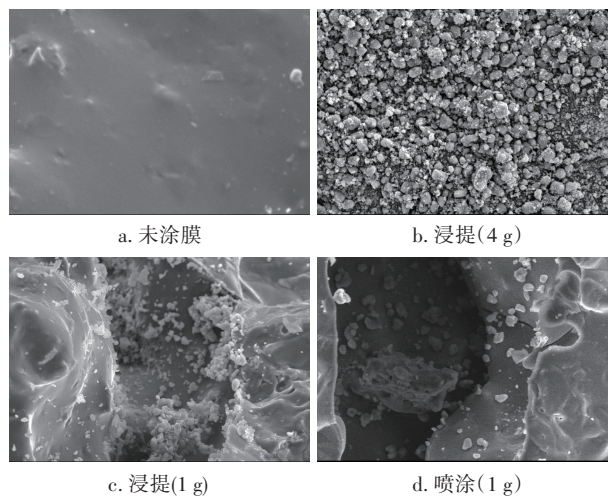


图3 不同陶瓷透水砖的SEM结果

Fig.3 SEM results of different ceramic permeable bricks

综上所述,在透水砖上负载适量的亲水性纳米二氧化钛,能减少地表径流颗粒物黏附在砖体表面的数量,增大透水砖的透水量。对于随流体流动进入透水砖内部的微小颗粒,砖体上表层负载的纳米二氧化钛颗粒也能通过吸附其表面水分来维持颗粒形态,使得其在后续流体作用下增大颗粒物流出透水砖内部的机会,减少透水砖堵塞现象的发生。

2.2 纳米二氧化钛粒径的影响

纳米二氧化钛的粒径影响其亲水性能^[15],进而影响纳米透水砖的透水性能;同时粒径大小也影响其销售价格,从而影响纳米透水砖的加工成本。为了进一步优选纳米二氧化钛的粒径,分别采用粒径为5~10、25、40、100 nm的4种纳米二氧化钛,采用喷涂法负载于陶瓷透水砖表层,进行相同雨水径流条件下的过水试验。不同粒径纳米二氧化钛陶瓷透水砖透水系数的变化如图4所示。由图4可知,喷涂法制备的纳米透水砖的透水系数均大于普通透水砖,对于粒径25 nm组(5[#]和6[#])、5~10 nm组(9[#]和10[#])、40 nm组(11[#]和12[#])、100 nm组(13[#]和14[#]),各组初始平均透水系数分别为0.064、0.066、0.065、0.060 cm/s;末期稳定时的平均透水系数分

别为0.008、0.008、0.008、0.007 cm/s,其初期平均透水系数分别比普通透水砖高146.15%、153.38%、150%和130.77%,而末期稳定时的平均透水系数也分别比普通透水砖高100%、100%、100%和75%。试验结果表明,纳米二氧化钛粒径会大大增强透水砖的透水能力,从而减缓透水砖的最终堵塞程度。

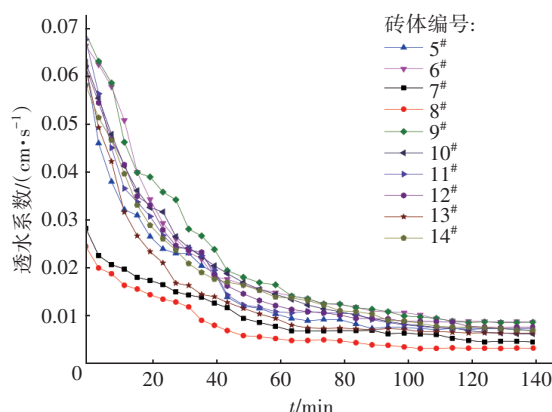


图4 不同粒径纳米二氧化钛陶瓷透水砖透水系数的变化
Fig.4 Variation of permeability of nano-TiO₂ ceramic permeable brick under different particle sizes

经计算,过水期间纳米二氧化钛粒径为25 nm组、5~10 nm组、40 nm组、100 nm组和未负载组的平均透水流量分别为0.315、0.328、0.314、0.302、0.182 L/min,可见粒径为5~10 nm组透水砖的透水能力最好。这是因为纳米二氧化钛粒径越小,接触角越小^[15],其表面张力和表面能越大,亲水性能越好;在相同负载量条件下,流经透水砖表面的颗粒物相对不易黏附于其表面。

从成本方面考虑,对于常见规格为5~10、25、40、100 nm的亲水性锐钛矿纳米二氧化钛,其市售价格分别在0.68、0.76、0.79、0.79元/g左右,可见粒径为5~10 nm纳米二氧化钛的价格相对较低,技术、经济性能均较好。相对于普通透水砖,同等降雨条件下,纳米透水砖的透水量较大、截留的颗粒物较少,降雨后及时进行表面清扫或负压清洗能够有效延长透水砖的使用寿命。

3 结论

① 在陶瓷透水砖中负载适量亲水性纳米二氧化钛可增强其透水性能。当负载1 g粒径为25 nm纳米二氧化钛时,喷涂法的透水性能增强效果更佳,其初始期和稳定期平均透水系数的增幅程度分别为浸提法的1.39倍和1.6倍。

② 采用浸提法制备25 nm纳米二氧化钛透水砖时,过大的负载量不利于纳米二氧化钛的分散,影响其性能的发挥,适宜负载率为5 g/L。

③ 采用喷涂法制备粒径为5~100 nm的纳米二氧化钛透水砖时,粒径为5~10 nm的小粒径纳米二氧化钛表现的增强效果最好、价格最低,推荐的最适粒径为5~10 nm。

④ 采用喷涂法制备纳米二氧化钛透水砖,其工艺简单、材料易得,可利用纳米二氧化钛的亲水性减弱雨水颗粒物在透水砖内的黏附,有利于透水砖的长期运行。

参考文献:

- [1] 吴耀珊, 计波, 刘卓成. 透水砖材料和下垫面对城市雨洪的影响[J]. 中国给水排水, 2018, 34(21):133-138.
- WU Yaoshan, JI Bo, LIU Zhuocheng. Influence of permeable brick material and underlying surface on urban stormwater [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(21):133-138 (in Chinese).
- [2] RODRÍGUEZ-ROJAS M I, HUERTAS-FERNÁNDEZ F, MORENO B, et al. A study of the application of permeable pavements as a sustainable technique for the mitigation of soil sealing in cities: a case study in the south of Spain [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 205:151-162.
- [3] WEISS P T, KAYHANIAN M, GULLIVER J S, et al. Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017:20(2):143-162.
- [4] 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.
- [5] ZHONG R, LENG Z, POON C. 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.
- [6] 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.
- [7] BOOGAARD F, LUCKE T, BEECHAM S. Effect of age of permeable pavements on their infiltration function [J]. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 2014, 42 (2):146-152.
- [8] YONG C F, MCCARTHY D T, DELETIC A. Predicting physical clogging of porous and permeable pavements [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 481:48-55.
- [9] 朱永祥, 梁冠军. 浅谈海绵城市理念下的透水混凝土道路研究[J]. *价值工程*, 2018, 37(12):229-231.
- ZHU Yongxiang, LIANG GuanJun. Research on permeable concrete road under the concept of sponge city [J]. *Value Engineering*, 2018, 37 (12): 229-231 (in Chinese).
- [10] 高如琴, 郝丹迪, 耿悦. 多孔陶瓷固载TiO₂薄膜的制备及甲醛光催化动力学[J]. *复合材料学报*, 2016, 33 (1):142-148.
- GAO Ruqin, HAO Dandi, GENG Yue. Preparation of porous ceramics immobilized TiO₂ thin film and formaldehyde photocatalytic kinetics [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33 (1): 142-148 (in Chinese).
- [11] LIANG X, CUI S H, 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.
- [12] KIM J Y, SANSALONE J J. Event-based size distributions of particulate matter transported during urban rainfall-runoff events[J]. *Water Research*, 2008, 42(10/11): 2756-2768.
- [13] 朱伟, 边博, 李磊. 镇江城市径流颗粒粒径分布及其与污染物的关系[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(4): 764-771.
- ZHU Wei, BIAN Bo, LI Lei. Particle size distribution and associated pollutants in urban runoff in Zhenjiang [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(4): 764-771 (in Chinese).
- [14] 李平, 翟龙, 张春喜, 等. 纳米二氧化钛涂层沥青路面降解汽车尾气实际使用效果研究[J]. *材料导报*, 2016, 30(Z1):182-187, 192.
- LI Ping, ZHAI Long, ZHANG Chunxi, *et al.* Research on practical degradation character of nano-TiO₂ coating of asphalt pavement on automobile exhaust [J]. *Materials Reports*, 2016, 30(Z1):182-187, 192 (in Chinese).
- [15] 王挺, 蒋新, 夏增敏. 铁掺杂对TiO₂薄膜结晶和光诱导超亲水性的影响[J]. *化学反应工程与工艺*, 2010, 26(2):125-130.
- WANG Ting, JIANG Xin, XIA Zengmin. Influence of iron dopant on crystallization and photo-induced hydrophilicity of TiO₂ thin films [J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 2010, 26 (2): 125-130 (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研究。
- E-mail:xytczwsina@.com
- 收稿日期:2019-07-20
- 修回日期:2019-09-25

(编辑:任莹莹)

环境就是民生,青山就是美丽,蓝天也是幸福