

TiO₂光催化剂在透水混凝土上的多功能应用进展

杨智杭¹, 武金婷², 马中新³, 徐璟³

¹重庆交通大学土木工程学院, 重庆

²浙大宁波理工学院土木建筑工程学院, 浙江 宁波

³丽水市交通建设开发有限公司, 浙江 丽水

收稿日期: 2022年12月29日; 录用日期: 2023年1月19日; 发布日期: 2023年1月31日

摘要

为实现“海绵城市”的目标以及光催化技术的合理利用, 绿色建筑材料的應用將逐漸成為主流, 其中, TiO₂光催化剂在透水混凝土上的多功能应用成为研究热点。本文阐述了TiO₂光催化剂在透水混凝土的不同引入方式, 总结了TiO₂光催化剂对透水混凝土上的物理力学性能的影响, 介绍了其在工程项目中的多功能特性, 包括尾气降解性能、雨水径流净化性能和自清洁特性。对今后TiO₂光催化剂透水混凝土的开发和应用提供一定的参考, 并对未来的研究重点提出建议。

关键词

海绵城市, TiO₂光催化剂, 透水混凝土, 多功能特性

Progress in Multifunctional Application of TiO₂ Photocatalyst in Pervious Concrete

Zhihang Yang¹, Jinting Wu², Zhongxin Ma³, Jing Xu³

¹School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

²School of Civil Engineering and Architecture, NingboTech University, Ningbo Zhejiang

³Lishui Traffic Construction Development Co., Ltd., Lishui Zhejiang

Received: Dec. 29th, 2022; accepted: Jan. 19th, 2023; published: Jan. 31st, 2023

Abstract

In order to achieve the goal of “sponge city” and the rational use of photocatalytic technology, the application of green building materials will gradually become the mainstream, among which

the multifunctional application of TiO_2 photocatalyst on pervious concrete has become a research hotspot. In this paper, the different introduction methods of TiO_2 photocatalyst in pervious concrete are summarized, the influence of TiO_2 photocatalyst on the physical and mechanical properties of pervious concrete is summarized, and its multi-functional characteristics in engineering projects are introduced, including exhaust gas degradation performance, rainwater runoff purification performance and self-cleaning characteristics. It provides a certain reference for the development and application of TiO_2 photocatalyst in pervious concrete in the future and makes suggestions for future research priorities.

Keywords

Sponge City, TiO_2 Photocatalyst, Pervious Concrete, Multifunctional Properties

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2012年“海绵城市”的概念首次被提出，“海绵城市”是利用自然排水系统、生态排水设施，充分发挥城市道路对雨水的吸纳、蓄渗和缓释作用[1]。透水混凝土也称多孔混凝土和无细骨料混凝土[2] [3] [4]，研究表明它可以持续解决城市环境中道路雨水径流危害，并且实现雨水的再利用[5]。同时，透水混凝土作为路面材料，是与汽车尾气排放接触的第一场所，如果能够从该第一接触场所实现对尾气的吸收和处理，将会大大减少汽车尾气对周围环境和空气的影响。在建筑材料领域，光催化技术已经得到广泛的应用，将光催化剂掺入混凝土或砂浆中时，可以将污染物转化为危害较小的二次产物[6]，而将这一策略运用于透水混凝土中也是众多学者研究的方向。

在不同的光催化剂中，二氧化钛(TiO_2)是最常见的材料，其具有成本低廉、化学性质稳定、氧化能力强以及环境友好等优势[7]。当用波长小于等于 387.5 nm 的紫外光辐射 TiO_2 半导体时，处于价带上的电子就会被激发跃迁至导带上，与此同时价带上失去电子形成光生空穴，从而组成具有高度活性的电子-空穴对。由于半导体的能带间缺乏连续区域所产生的电子-空穴对具有较长的寿命，在电场作用下迁移到 TiO_2 粒子表面。导带电子迁移到半导体表面具有很强的还原能力，与吸附在催化剂表面的 O_2 反应，产生具有很强氧化能力的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)；另一方面迁移至 TiO_2 粒子表面的光生空穴具有强氧化性，可以直接氧化有机物，或者是氧化吸附在半导体表面的 H_2O 或 OH^- 粒子生成羟基自由基($\cdot\text{OH}$)从而对有机物进行氧化降解。光催化反应机理如图 1 所示。

Lee [8]、Faraldos [9]等人研究出一种负载 TiO_2 光催化剂的透水混凝土，以对尾气实现降解处理，降解率均达到 50% 以上；Dikkar [10]等人将其应用于室内改善空气质量。透水混凝土的材料组成以及自身特殊的孔隙结构，可形成的广阔表面积，为光催化剂提供大量的附着点，是其应用的理想介质。

TiO_2 光催化剂在建筑材料领域发挥着重要作用，也对透水混凝土等路面材料产生了巨大影响。其不仅旨在改善传统物理力学性能(即强度和耐久性)，还同时为透水混凝土等路面材料赋予新的功能，如尾气降解性能、雨水径流净化性能和自清洁特性[11] [12] [13]。然而，尽管近 20 年来对 TiO_2 光催化剂进行了大量研究，以实现上述多功能特性，但目前应用这种光催化技术在透水混凝土等路面材料上的困难限制了其有效的应用。因此，本文描述了 TiO_2 光催化剂在透水混凝土上的不同引入方式及性能影响，还将其在实验室和工程项目中所获得的多功能特性进行总结。

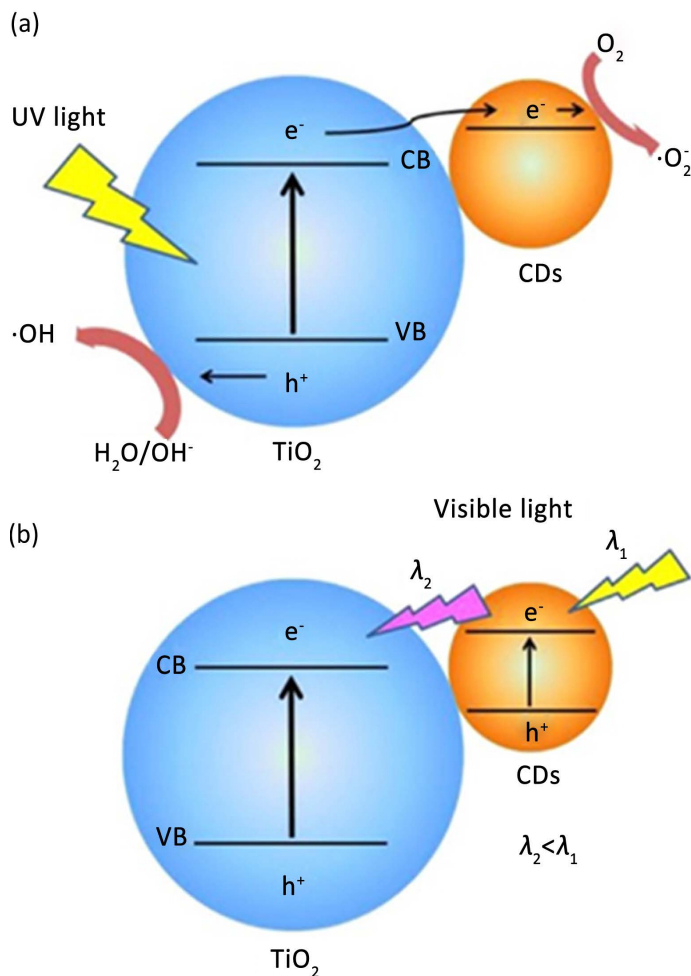


Figure 1. Photocatalytic reaction mechanism
图 1. 光催化反应机理

2. 透水混凝土中 TiO₂ 光催化剂引入方法

2.1. 内掺

内掺式是将光催化材料与水泥混合或取代部分水泥，而后直接用于工程中的水泥基材料，制备出相应的产品。Ortega-Villar [14]研究水泥包裹纳米光催化材料对透水混凝土去除城市径流污染物的影响，结果表明： PO_4^{3-} 的去除率分别达到 94.3%、95.8%和 94.3%，磷酸盐沉淀成羟基磷灰石($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$)和无定形磷酸钙($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)是主要的去除机制。王玲玲[15]选用内掺法，将 0、2%、4%掺量的纳米 TiO_2 分别掺入搅拌成型，制备光催化透水混凝土，测试并分析其性能。各项物理力学性能相对较好的平衡点纳米 TiO_2 掺量为 2%时，降解率峰值可达 35.04%、50.80%、59.73%。然而内掺式引入的纳米 TiO_2 大部分均被包覆于水泥浆体内部，暴露于表面可发挥光催化效果的纳米 TiO_2 量较少，降解效率不高。

2.2. 涂覆

涂覆式主要是指将光催化材料作为涂层材料涂覆在混凝土表面，涂层技术的优点是使用较少的 TiO_2 ，对光和污染物具有大量的颗粒暴露，并且可以应用于路面材料，即适用于现有道路、人行道。Luo [16]通过在表面喷涂纳米 TiO_2 制备了光催化环保型透水混凝土，其可有效降解汽车尾气，显著改善城市空气

质量。推荐的 TiO_2 粒径为 25 nm；用量为 10%；最佳喷施量为 333.3 g/m^2 ，对于 NO_x 有 50%~70% 的降解率。该方法的另一个优点在于 TiO_2 可以较好地结合到透水混凝土表面，显示出比内掺更高的利用效率，这意味着更低得成本。Mendoza [17] 研究了紫外光活性 TiO_2 纳米颗粒和 WO_3/TiO_2 复合材料作为空气净化材料的性能，考察了不同光催化纳米颗粒包覆在天然沸石和透水混凝土块上对 NO_x 的去除效果。涂层在透水混凝土砌块上时，在紫外光下 TiO_2 或 WO_3/TiO_2 纳米粒子对气态 NO_x 去除率皆为 60%。Liang [18] 用刷子将 200 mL TiO_2 溶液分散到多孔混凝土表面，实验表明经 TiO_2 处理的透水混凝土对总磷(TP)去除率极好，90 min 内去除率可达近 90%。

紫外光照射是光催化降解反应的基本条件，光催化降解率随紫外线照射强度的增加而增加。而涂层式引入的 TiO_2 则分布于透水混凝土的空隙表面中，可充分发挥其光催化效果，但同时由于其导致光催化剂暴露在表面外，经历雨水冲刷后耐久性表现较差。

2.3. 其他方式

较于以上方式，大量学者对其他不同方式也进行了研究。Xu [19] 通过用纳米 TiO_2 填充再生骨料的内部空隙。在 0.3% TiO_2 溶液中浸泡再生骨料制备透水混凝土， TiO_2 颗粒形成了芯，促进了球状水泥水化产物的形成。结果表明，经过 10 min 的强雨水冲刷后，透水混凝土对 NO_x 降解率仍达到近 50%。Liang [18] 将制备的透水混凝土浸泡在 200 mL TiO_2 溶液中，直至无白色液体沉淀，经 TiO_2 处理的多孔混凝土能有效去除亚甲基蓝等有机污染物，在 90 min 内去除率可达到 60%。

将于 TiO_2 负载于结构内部多孔，比表面积大的载体上，可利用较少的光催化剂达到理想的效果，并且水泥的胶凝作用使得 TiO_2 与基体的黏结度大大增强，耐久性提高。

3. TiO_2 光催化剂对透水混凝土的影响

3.1. 强度

TiO_2 光催化剂对透水混凝土强度的影响主要原因是：

Table 1. Effect of TiO_2 photocatalyst on strength of permeable concrete

表 1. TiO_2 光催化剂对透水混凝土的强度影响

学者	方式	研究内容及成果
Daniyal [23]	TiO_2 内掺	将 TiO_2 掺入普通硅酸盐水泥后，28 天后的抗压强度为 25 MPa 高于对照样品 30%，通过 SEM 显微照片分析表明， TiO_2 掺入的水泥水化产物分布更好，总孔隙减少
徐子强[24]	TiO_2 内掺	研究多组单掺纳米材料(纳米二氧化硅、纳米二氧化钛)透水混凝土来研究纳米材料掺量对透水混凝土抗压强度的影响，发现纳米材料有助于透水混凝土抗压强度及劈裂抗拉强度增加
李文俊[25]	表面喷涂 TiO_2 涂料	分析了水，乙二醇溶液，乙醇溶液，低浓度水泥浆和高浓度水泥浆五种处理方法制备的光催化透水混凝土的基本性能，表明处理后的光催化透水混凝土的渗透系数均高于 3 mm/s，抗压强度均高于 20 MPa 满足应用要求
胡力群[26]	表层喷涂 TiO_2 涂料	研究 3 种透水混凝土试件表层喷涂纳米 TiO_2 涂料，并测试了其抗压强度以及抗滑性能，发现不同条件下混凝土强度以及抗滑性，当涂覆 TiO_2 的透水混凝土粒径宜在 4.75~13.2 mm 时，其性能差异不大
Xu [21]	TiO_2 负载于骨料	研究了基于废物再利用模型的再生骨料透水混凝土，研究发现再生骨料的替代率为 50% 时，将再生骨料浸泡在 TiO_2 溶液中会导致晶须填充再生骨料中的孔隙，从而提高混凝土强度达到 40 MPa

1) TiO_2 纳米颗粒在水泥水化过程中会形成晶核, 产生大量类似“C-S-H”凝胶的结构[20], 加快了水泥水化速度;

2) TiO_2 通过填充水泥材料中的空隙充当填料, 使水泥浆体界面过渡区的粘结越显牢固。

使用 TiO_2 光催化剂透水混凝土的扫描电子显微镜(SEM)显微图像分析, 与不含 TiO_2 的对照样品对比, 水泥基质显示出大量 C-S-H 凝胶和更少的孔隙[21]。此外, X 射线衍射(XRD)分析证实, TiO_2 的加入增加了 C-S-H 凝胶的量, 这有可能提高水泥材料的微观结构性能, 从而提高其耐久性[22]。表 1 列举了不同学者研究 TiO_2 光催化剂对透水混凝土的强度影响。

3.2. 耐久性

抗冻耐久性和表面耐磨性是作为路面结构的透水混凝土最重要的耐久性指标。其中, 冻融试验过程中可以发现透水混凝土的冻融破坏主要有两个原因:

1) 透水混凝土的孔隙由宏观孔隙和微观孔隙组成, 两者都会随着冻融循环次数的增加而逐渐受到破坏, 导致强度降低, 抗冻性下降;

2) 透水混凝土的多孔结构相比与普通混凝土, 其骨料与胶凝材料间的界面过渡区更容易遭受冻融而产生损伤。

在掺入 TiO_2 的试件中测定其抗冻耐久性, 发现性能高于对照试件的抗冻耐久性[27]。Tarangini [28] 通过纳米 TiO_2 等质量替代水泥制备透水混凝土, 发现 TiO_2 的掺入可以充分优化结构, 使微孔被填充更密实。Bilal [29] 发现纳米材料的掺入使骨料 - 胶凝材料间界面过渡区的增强有显著效果。表面耐磨性的影响主要体现在骨料的种类以及级配上, Chong [30]、Kever [31] 在分别研究了普通透水混凝土和纳米材料外加剂透水混凝土的耐磨性得出, 在试块孔隙率相同的前提下, 与普通透水混凝土相比, 纳米材料外加剂透水混凝土的表面抗磨性有较小提升。说明纳米材料的掺入对于表面耐磨性的宏观影响较小, 并不会产生负面的效果, 但其在水泥中细化孔隙的作用往往还会对表面耐磨性有所增强。

4. 多功能应用

4.1. 尾气降解性能

研究含有 TiO_2 光催化剂的透水混凝土作为路面结构以减少汽车排放尾气造成的空气污染。目前, 大量学者在实验室中用人造光或阳光以及模拟道路尾气检测装置, 对例如氮氧化物(NO_x)、二甲苯、甲苯等相关气相污染物进行光催化降解, 广泛开展深入研究。

Asadi [32] 认为 TiO_2 作为透水混凝土的一部分, 可以有效去除气流中的 NO_x 污染物, 效率从 34% 到 62% 不等。 NO_x 的去除效率随着湿度的增加而降低, 这可能是由于水分子抑制了光催化化合物对 NO_x 的吸收, 从而影响了光降解速率; 随着流量的增加, NO_x 去除率降低; UV 光强度的增加也提高了 NO_x 的去除率。鲁浚浚[33] 在浇筑成型的混凝土表面附着氮化碳悬浊液并烘干, 通过 NO_x 降解实验发现 NO_x 降解率可达 60.99%, 混凝土强度不会降低, 且具有良好的耐久性。此外, 在耐久性研究中, 浸泡法的净化效果表现出较好的性能, 证明了 TiO_2 的分散性可决定光催化降解效果。

在实验室规模取得了令人满意的结果之后, 部分学者已经将光催化透水混凝土产品应用于工程项目, 特别是用于公路和停车场等交通基础设施。钱春香[34] 将 TiO_2 浆液进行放大处理并喷洒在南京长江三桥北收费站广场的透水路面上, 为了保证光催化浆液在混凝土路面的渗透力和光催化剂的附着力, 提高浆液浓度至 10 g/L, 测得 TiO_2 在混凝土路上最高负载量为 10 g/m², 最后将桥南桥北路面 NO_x 浓度经行对比发现, 去除率达到了 70%。同时, 有日本学者通过二氧化钛的光催化性能应用在透水铺路石板, 降解车辆排放的部分 NO_x [35]。将 TiO_2 光催化水混凝土应用于路面结构, 实验已表明其可对尾气进行优异的

降解处理,有望在实际项目中投入使用,但复杂的环境条件如雨水和车辆轮胎的磨损,会对 TiO_2 的光催化效率造成一定的影响。

4.2. 雨水径流污染净化

透水混凝土作为路面结构,可以使城市雨水径流快速渗透穿过路面,进入较大级配骨料基层,进一步自然渗入土壤或排入现有雨水收集系统有助于控制污染排放。通过让雨水自然渗透到土壤中,透水混凝土还可以减少或消除雨水径流堵塞区域和雨水所需的基础设施[36]。同时,雨水径流中的有机污染附着在透水混凝土或骨料基层的大表面积上,可通过负载的 TiO_2 光催化剂实现净化效果。Tota-Maharaj [37]以总磷为目标污染物来表征水质净化效果的耐久性。试验结果表明,试件风化后的水质净化效果随时间而降低,净化效果比开始降低了近一半。结合环境因素,发现高降雨频率和强降雨可以提高净化效果的衰减率。Zhou [38]在透水混凝土中使用 TiO_2 光催化剂去除污水,实验结果发现可以有效降低水中的污染物和细菌活性,并且成功地用于持续的水净化。

目前,相关研究学者引入光催化技术,赋予透水混凝土光催化性能,实验表明可对溶液中的有机污染物进行净化效果,以减少城市雨水径流污染,虽然在实验室和项目中取得了令人满意的结果,但需要对 TiO_2 光催化剂的净化耐久性进行研究,以制造出真正高效的雨水径流净化基础设施。

4.3. 自清洁特性

自清洁特性是指特殊材料的固有性质,可以通过不同的方式自发的清除其表面附着的杂质和细菌指性能,而自清洁特性根据表面得浸润性和润湿性,可分为超亲水性自清洁和超疏水性自清洁。当 TiO_2 光催化剂暴露于紫外光时,它们会增加表面的亲水性,导致水分子扩散到水泥材料上,并将污染物去掉[39],这种现象被称为光致亲水性[40],其机理如图 2 所示,水滴由于光致亲水性而粘附于混凝土上,其携带的污染物会在光照下被 TiO_2 光催化剂分解,以达到自清洁特性。 TiO_2 光致亲水性可通过等离子体表面作用将不同基团引入表面形成结构变化,从而在固体-液体界面处产生力,从而降低水的接触角。此外,根据相关研究紫外线照射产生 O_2 空位,由此 Ti^{4+} 离子转化为 Ti^{3+} 离子,增加了对水分子的亲和力[41] [42]。由于透水混凝土应用于路面结构中,不需要考虑到外观效益,其表面可做粗糙度处理,而在此改性下的自清洁性能会更加优异[13]。

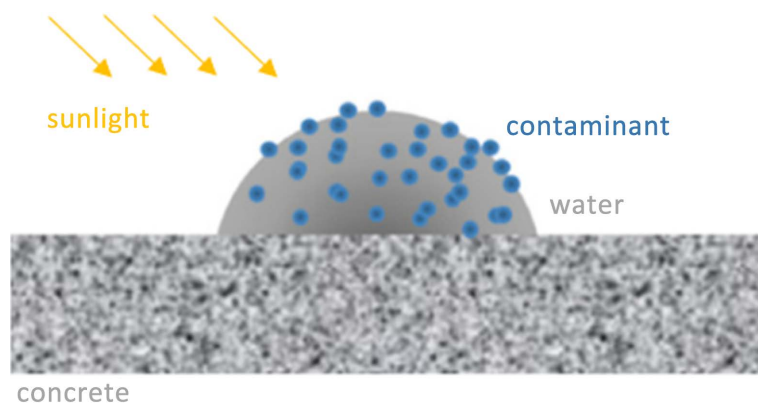


Figure 2. Phenomenon of photoinduced hydrophilic [43]

图 2. 光致亲水性现象[43]

5. 结语

1) 不同的 TiO_2 光催化剂引入方式具有不同的优点和缺点。例如,内掺将光催化材料与水泥混合或取

代部分水泥, 可使光催化材料有效地发挥功能, 但暴露于表面的 TiO_2 量较少, 效率不高; 涂覆引入的 TiO_2 分布于表面中, 充分发挥效果, 但耐久性表现较差; 其他方式虽然能在一定程度上改善前两者的缺点, 但研究较少, 并未在实际工程项目中得到验证。

2) 在制备透水混凝土期间, TiO_2 光催化剂的掺入通常不会影响到试件的强度和耐久性。相反, 大多数研究结果表明强度和耐久性有所增加, 这主要是因为纳米材料的掺入导致更致密的材料结构, SEM、XRD 等微观表征手段证实了这一观点。因此, 调整设计配合比以确定最佳 TiO_2 掺量需要大量实验研究。

3) 尽管大量学者已经使用 TiO_2 光催化剂负载透水混凝土应用于道路结构等基础设施, 但所获得的尾气降解性能、雨水径流污染净化和自清洁特性仍需改进。尽管已经能对有机和无机污染物进行高效去除, 但复杂的环境条件, 特别是特大雨水和高湿度, 还是显著地降低了 TiO_2 透水混凝土的光催化效率。

基金项目

浙江省自然科学基金项目(LY20E080002); 浙江省交通运输厅科技计划项目(202225)。

参考文献

- [1] 前瞻产业研究院. 2021-2016 年中国建筑垃圾处理行业市场现状与发展前景预测资源化处理存在巨大发展空间[Z]. 2021.
- [2] Singh, A., Sampath, P.V. and Biligiri, K.P. (2020) A Review of Sustainable Pervious Concrete Systems: Emphasis on Clogging, Material Characterization, and Environmental Aspects. *Construction and Building Materials*, **261**, Article ID: 120491. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120491>
- [3] Yap, S.P., Chen, P.Z.C., Goh, Y., et al. (2018) Characterization of Pervious Concrete with Blended Natural Aggregate and Recycled Concrete Aggregates. *Journal of Cleaner Production*, **181**, 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.205>
- [4] Yang, J. and Jiang, G.L. (2003) Experimental Study on Properties of Pervious Concrete Pavement Materials. *Cement and Concrete Research*, **33**, 381-386. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3)
- [5] Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, A.E.M. and Fawzy, A.M. (2018) Experimental Investigation on Permeability Indices and Strength of Modified Pervious Concrete with Recycled Concrete Aggregate. *Construction and Building Materials*, **193**, 105-127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.182>
- [6] Hasan, M.R., Zain, M.F.M., Hamid, R., et al. (2017) A Comprehensive Study on Sustainable Photocatalytic Pervious Concrete for Storm Water Pollution Mitigation: A Review. *Materials Today: Proceedings*, **4**, 9773-9776. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.265>
- [7] 孙晓君, 蔡伟民, 井立强, 周德瑞, 沈雄飞. 二氧化钛半导体光催化技术研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001(4): 534-541.
- [8] Lee, J. and Baek, C. (2021) Evaluation of NO_x Reduction Effect and Impact on Asphalt Pavement of Surface Treatment Technology including TiO_2 and Asphalt Rejuvenator. *Applied Sciences*, **11**, 11571. <https://doi.org/10.3390/app112311571>
- [9] Faraldos, M., Kropp, R. and Anderson, M.A., et al. (2016) Photocatalytic Hydrophobic Concrete Coatings to Combat Air Pollution. *Catalysis Today*, **259**, 228-236. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.07.025>
- [10] Dikkar, H., Kapre, V., Diwan, A., et al. (2021) Titanium Dioxide as a Photocatalyst to Create Self-Cleaning Concrete. *Materials Today: Proceedings*, **45**, 4058-4062. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.948>
- [11] Dai, K., Liu, W., Shui, X., et al. (2022) Hydrological Effects of Prefabricated Permeable Pavements on Parking Lots. *Water*, **14**, 45. <https://doi.org/10.3390/w14010045>
- [12] Naganna, S.R., Jayakesh, K. and Anand, V.R. (2020) Nano- TiO_2 Particles: A Photocatalytic Admixture to Amp up the Performance Efficiency of Cementitious Composites. *Sadhana*, **45**, Article No. 280. <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01515-x>
- [13] 董瑞, 沈卫国, 钟景波, 等. 光催化自洁净混凝土研究进展[J]. 混凝土, 2011(8): 62-66.
- [14] Ortega-Villar, R., Lizárraga-Mendiola, L., Coronel-Olivares, C., et al. (2019) Effect of Photocatalytic Fe_2O_3 Nanoparticles on Urban Runoff Pollutant Removal by Permeable Concrete. *Journal of Environmental Management*, **242**, 487-495. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.104>
- [15] 王玲玲, 陈佰岩, 韦志强, 等. 光催化混凝土物理力学性能研究[J]. 混凝土, 2020(4): 29-31.

- [16] Luo, G., Liu, H., Li, W., *et al.* (2020) Automobile Exhaust Removal Performance of Pervious Concrete with Nano TiO₂ under Photocatalysis. *Nanomaterials*, **10**, 2088. <https://doi.org/10.3390/nano10102088>
- [17] Mendoza, J.A., Lee, D.H., Kim, L.H., *et al.* (2018) Photocatalytic Performance of TiO₂ and WO₃/TiO₂ Nanoparticles Coated on Urban Green Infrastructure Materials in Removing Nitrogen Oxide. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **15**, 581-592. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1425-9>
- [18] Liang, X., Cui, S., Li, H., *et al.* (2019) Removal Effect on Stormwater Runoff Pollution of Porous Concrete Treated with Nanometer Titanium Dioxide. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, **73**, 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.06.001>
- [19] Xu, Y., Jin, R., Hu, L., *et al.* (2020) Studying the Mix Design and Investigating the Photocatalytic Performance of Pervious Concrete Containing TiO₂-Soaked Recycled Aggregates. *Journal of Cleaner Production*, **248**, Article ID: 119281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119281>
- [20] Singh, L.P., Dhaka, R.K., Ali, D., *et al.* (2021) Remediation of Noxious Pollutants Using Nano-Titania-Based Photocatalytic Construction Materials: A Review. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 34087-34107. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14189-7>
- [21] Xu, Y., Chen, W., Jin, R., *et al.* (2018) Experimental Investigation of Photocatalytic Effects of Concrete in Air Purification Adopting Entire Concrete Waste Reuse Model. *Journal of Hazardous Materials*, **353**, 421-430. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.030>
- [22] 廖牧情, 熊志文, 柯国军, 等. CoFeMgAl-LDHs/CNTs 复合材料对水泥水化及微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(1): 3-12.
- [23] Daniyal, M., Akhtar, S. and Azam, A. (2019) Effect of Nano-TiO₂ on the Properties of Cementitious Composites under Different Exposure. *Journal of Materials Research and Technology*, **8**, 6158-6172. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.010>
- [24] 徐子强, 毛耐民, 史明辉, 等. 掺纳米材料透水混凝土强度试验研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(1): 100-102.
- [25] 李文俊. 纳米二氧化钛光催化透水混凝土降解汽车尾气性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [26] 胡力群, 张靖, 杨凤雷. 具有降解 NO 功能的多孔水泥混凝土路面材料研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(1): 99-105.
- [27] Alshareedah, O. and Nassiri, S. (2021) Pervious Concrete Mixture Optimization, Physical, and Mechanical Properties and Pavement Design: A Review. *Journal of Cleaner Production*, **288**, Article ID: 125095. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125095>
- [28] Tarangini, D.S. (2022) Effect of Nano Silica on Frost Resistance of Pervious Concrete. *Materials Today Proceedings*, **51**, 2185-2189. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.132>
- [29] Bilal, H., *et al.* (2021) Influence of Silica Fume, Metakaolin & SBR Latex on Strength and Durability Performance of Pervious Concrete. *Construction and Building Materials*, **275**, Article ID: 122124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122124>
- [30] Chong, M.N., Jin, B., Chow, C.W.K., *et al.* (2010) Recent Developments in Photocatalytic Water Treatment Technology: A Review. *Water Research*, **44**, 2997-3027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>
- [31] Kevern (2018) Internal Curing of Pervious Concrete Using Lightweight Aggregates. *Construction and Building Materials*, **161**, 229-235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.055>
- [32] Asadi, S., Hassan, M.M., Kevern, J.T., *et al.* (2012) Development of Photocatalytic Pervious Concrete Pavement for Air and Storm Water Improvements. *Journal of the Transportation Research Board*, **2290**, 161-167. <https://doi.org/10.3141/2290-21>
- [33] 鲁滨滨, 刘栋, 张琪, 等. 负载氮化碳光催化混凝土的制备及性能表征[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 559-566.
- [34] 李丽, 钱春香. 南京长江三桥光催化功能性混凝土路去除汽车排放氮氧化物的研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2009, 30(1): 49-52.
- [35] Petronella, F. (2017) Nanocomposite Materials for Photocatalytic Degradation of Pollutants. *Catalysis Today*, **281**, 85-100. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.05.048>
- [36] Xie, C., Yuan, L., Tan, H., *et al.* (2021) Experimental Study on the Water Purification Performance of Biochar-Modified Pervious Concrete. *Construction and Building Materials*, **285**, Article ID: 122767. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122767>
- [37] Tota-Maharaj, K. and Coleman, N. (2017) Developing Novel Photocatalytic Cementitious Permeable Pavements for Depollution of Contaminants and Impurities in Urban Cities. Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, Vilnius. <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.053>
- [38] Zhou, Y., Elchalakani, M., Liu, H., *et al.* (2022) Photocatalytic Concrete for Degrading Organic Dyes in Water. *Envi-*

-
- ronmental Science and Pollution Research*, **29**, 39027-39040. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18332-2>
- [39] Zhao, A. (2015) Self-Cleaning Engineered Cementitious Composites. *Construction and Building Materials*, **64**, 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.09.007>
- [40] Folli (2012) TiO₂ Photocatalysis in Cementitious Systems: Insights into Self-Cleaning and Depollution Chemistry. *Construction and Building Materials*, **42**, 539-548. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.001>
- [41] Pérez-Nicolás (2017) Atmospheric NO_x Removal: Study of Cement Mortars with Iron- and Vanadium-Doped TiO₂ as Visible Light-Sensitive Photocatalysts. *Construction and Building Materials*, **149**, 257-271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.132>
- [42] Banerjee, S. and Dionysiou, D. (2015) Self-Cleaning Applications of TiO₂ by Photo-Induced Hydrophilicity and Photocatalysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, **176-177**, 396-428. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.03.058>
- [43] Yang, L. and Amer, H. (2019) Photocatalytic Concrete for NO_x Abatement: Supported TiO₂ Efficiencies and Impacts. *Cement and Concrete Research*, **116**, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.002>