

纳米二氧化钛基光催化建筑材料 在有害污染物修复中的应用：综述

斯里尼瓦劳·普拉塔普·辛格, 拉胡尔·阿里, 迪尔沙德·库马尔·达卡,
乌沙·奈克·巴纳瓦特, 乐夏玛, 因德吉特·泰吉
隶属机构: 中心建筑研究院, 247667, 印度

摘要: 纳米二氧化钛 ($n\text{-TiO}_2$) 由于其独特的光催化和疏水性能, 可用于制备自洁水泥基智能建筑材料。 $n\text{-TiO}_2$ 通过其光催化作用降解有机和无机污染物, 并将其转化为无毒的副产品, 即改善空气质量。本文综述了 $n\text{-TiO}_2$ 的合成方法、 $n\text{-TiO}_2$ 在水泥基材料上的负载方法、光催化性能、自清洁机理以及 $n\text{-TiO}_2$ 在水泥基材料中的应用等方面。此外, $n\text{-TiO}_2$ 可用作路面砌块、斑马线处的砂浆/混凝土、道路分隔物和衬砌以及高层建筑中的涂料或外加剂。此外, 在水泥基材料中使用 $n\text{-TiO}_2$ 的影响和经济方面表明, 与传统建筑材料相比, $n\text{-TiO}_2$ 将材料成本增加了约 27% (101 至 128.1 美元)。此外, 已经建议使用低成本的碳化材料如生物炭作为 $n\text{-TiO}_2$ 的载体, 以降低成本并提高光催化混凝土的修复效率。

关键词: 纳米二氧化钛; 光触媒; 污染物修复; 自清洁; 智能建材

Application of nano-titania-based photocatalytic construction materials to remediate noxious pollutants: A review

Srinivasrao Pratap Singh, Rahul Ali, Dilshad Kumar Dhaka, Usha Naik Banavath, Lok Sharma, Inderjeet Tyagi
Affiliation: Centre Building Research Institute, 247667, India

Abstract: Nano-titania ($n\text{-TiO}_2$), due to its unique photocatalytic and hydrophobic properties, can be used to prepare self-cleaning cement-based smart building materials. The $n\text{-TiO}_2$ degrades organic and inorganic pollutants through its photocatalytic action and convert them into non-toxic byproducts, i.e., improves the air quality. In this review, aspects such as methodologies of $n\text{-TiO}_2$ synthesis, approaches for $n\text{-TiO}_2$ loading on cementitious materials, photocatalytic properties, self-cleaning mechanism, and application of $n\text{-TiO}_2$ in cement-based materials have been overviewed. Further, the $n\text{-TiO}_2$ can be used either as coatings or admixtures in pavement blocks, mortars/concrete at zebra crossings, road dividers and linings, and high rise buildings. Moreover, the implications and economic aspects of $n\text{-TiO}_2$ usage in cement-based materials revealed that $n\text{-TiO}_2$ increases the material cost by $\sim 27\%$, (101 to 128.1\$) in comparison to conventional building materials. Furthermore, the low-cost carbonized materials such as biochars have been suggested to be used as support of $n\text{-TiO}_2$ to lower the cost and improve the remediation efficiency of photocatalytic concrete.

Keywords: Nano-titania; Photocatalyst; Pollutant remediation; Self-cleaning; Smart building material

引言:

由 NO_x 、 SO_x 、CO、挥发性有机化合物 (VOC) 和从大城市及其周边的车辆交通中释放的颗粒物引起的空气污染是一个非常值得关注的问题, 因为它会导致有害的健康后果, 例如潜在的胸膜和呼吸系统疾病。除此之外, 家具、设备和居住者本身释放的微量挥发性有机化

合物 (VOCs) 以及室内环境中的微生物污染会导致黏膜刺激、头痛、恶心和过敏反应等后果。VOC 和霉菌之间的协同作用有时会导致慢性疾病, 例如病态建筑综合症, 因为人们大部分时间都在室内环境中度过。上海新德里等城市面临严重的 SMOG (烟雾和雾气混合) 问题, 有时甚至会影响学校、工业和交通等正常生活活动。已采

用多种环保技术来降低有害空气污染物（如 SO_x 、 NO_x 、CO和颗粒物）的排放水平。这些技术可能会在建筑领域提供潜在的室内和室外自清洁应用，但建筑中的纳米技术被列为最有可能对发展中国家产生影响的顶级应用之一。纳米材料作为水泥基材料的添加剂有可能解决不同的挑战问题，即二氧化碳排放、抗裂性和抗拉强度差、固化时间长、吸水率高、延展性低。 SiO_2 、 ZnO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、CNTs、粘土、碳纳米纤维等纳米材料在水泥基材料中的应用提高了性能，增强了耐久性能，即适用于现代高层建筑和智能化建设。使用寿命长的基础设施系统。因此，纳米材料在水泥基材料中的应用导致更耐用和可持续的基础设施。此外，为了实现纯净的室内/室外空气质量，已经探索了纳米技术干预措施。我们可以改善用于空气、水和土壤污染清洁的常规材料的性能和特性。虽然它是一项相对较新的技术，但已经在世界上一些可以商业购买光催化水泥的地方使用。多个行业涉及商业制造和为建筑行业供应 n-TiO_2 ，例如光催化路面、自清洁瓷砖（TOTO）和玻璃（日本平板玻璃）。鉴于上述情况，本综述涵盖了诸如 n-TiO_2 合成、其性质、掺入方法、经济和毒性方面、低成本替代品以及使用自清洁建筑材料的未来范围等重要方面。此外，还讨论了 n-TiO_2 颗粒的涂层厚度、结构、晶体取向和形貌、处理方法以及掺杂剂对 n-TiO_2 光催化活性的影响。此外，还探讨了将 nTiO_2 作为光催化剂在具有自清洁性能和相关经济方面的智能建筑材料中的应用，以实现未来的可持续性目标。这些观察结果将有益于环境、材料科学家和建筑行业。

一、纳米二氧化钛

理想的光催化剂必须有效、稳定、环保且易于获得。此外，它的大批量生产必须容易，它应该能够催化太阳或荧光灯诱导的反应。由于其相对更好的光催化活性，优选使用以两种多晶型物（锐钛矿和金红石）可获得的纳米二氧化钛（ n-TiO_2 ）。 n-TiO_2 具有不同的尺寸，如团簇、胶体、粉末和大单晶。

二、光催化机理

在光激发过程中， n-TiO_2 吸收紫外辐射（阳光或荧光灯），价带电子（ e^- ）被激发并提升到导带，产生空穴（ h^+ ）。分子吸附和随后的电荷转移现象很大程度上取决于光催化材料的表面性质，并且由于不同的取向，多晶型物甚至相同材料的表面性质可能会有所不同。 n-TiO_2 在光存在下的光催化活性是水分解成氧气和氢气的原因。在价带（VB）和导带（CB）的氧化还原反应过程中， n-TiO_2 表面产生高反应性超氧阴离子自由基（ $\text{O}_2^{\cdot-}$ ）和

羟基自由基（ $\text{OH}^{\cdot}$ ）。这些活性物质负责分解附着在混凝土表面的有机、无机污染物和微生物。此外， n-TiO_2 具有高度的两亲性（亲水性或疏水性）特性。

三、催化剂再生

从理论上讲，催化剂可以永远使用，但实际上任何光催化剂的效率都会随着经常使用而降低（退化）。催化剂在环境中保持稳定，但由于氧化污染物、污垢、油的积累，包括表面的磨损或磨损，其光催化效率会降低。马丁内斯等人。研究了玻璃和砂浆的光催化降解率，以及从催化剂表面去除产物以恢复光催化效率的推荐再生方法。此外，只需用水清洗表面即可恢复效率。作者观察到，与砂浆相比，玻璃基材的退化速度更快，因为在玻璃基材上，由于其吸附能力差， NO_2 的产生更加猖獗。用雨水模拟或水浸泡报告了最大再生。Brouwers等人。研究了路面砌块对 NO_x 氧化（光催化）的光催化性能，并报道了表面清洗前后对再生光活性砌块的光催化能力具有重要作用。

四、纳米二氧化钛作为环境净化剂

n-TiO_2 是一种很有前途的光催化剂，可用于环境修复和太阳能利用。 n-TiO_2 的效率受限于其较大的固有带隙（ $>3\text{eV}$ ），即它只能吸收紫外线（UV）辐射。 n-TiO_2 可与混凝土和灰泥中的白色或灰色水泥混合使用。它附着在混凝土表面，在有太阳光的情况下降解有机污染物和一些无机污染物。它被广泛用作除雾、自洁、杀菌活性和改善室内空气质量的清洁剂。具有光催化材料的水泥配方（与普通波特兰水泥类似地使用）可以将有毒烟雾降解为无毒产品。此外，基于 nTiO_2 的光催化剂保持不变，因为它仅分解有机/无机污染物。 n-TiO_2 的自清洁和光催化活性是一种经济的技术，因为它不需要在后期导致混凝土表面恶化的潜在有害化学物质。

五、 n-TiO_2 的制备方法

包覆 n-TiO_2 的特性及其光催化活性通常取决于制备方法。可以通过控制工艺参数（时间、温度、pH、反应物浓度、添加剂）来开发具有所需结晶度、组成、结构和形态的产品。 nTiO_2 的制备方法分为液相法和气相法。液相法包括溶胶-凝胶法、溶剂热法、微乳液法、燃烧法、电化学法、火焰喷射热解法、物理气相沉积法（PVD）、化学气相沉积法（CVD）、动态离子束、分子束、溅射和离子注入是气相方法。

溶胶-凝胶法：溶胶-凝胶法是最流行的锐钛矿相合成 n-TiO 的工艺之一。该方法广泛用于各种陶瓷材料的制备。在此过程中，通过无机和有机前体（金属盐或

金属醇盐)的水解和聚合制备胶体悬浮液(溶胶)。pH、盐、温度、反应时间和在超临界流体中干燥的顺序等参数在制备不同性质(薄膜、粉末、膜)的 $n\text{-TiO}_2$ 中起着重要作用。通过完全聚合和溶剂损失,由溶胶形成固体凝胶相。西科拉等人。采用溶胶-凝胶法合成以 $n\text{-SiO}_2$ 为核、 $n\text{-TiO}_2$ 为壳材料的核/壳;合成的核壳纳米材料粒径约为 $220 \pm 30\text{nm}$,表面积为 $379.2\text{m}^2/\text{g}$ 。

微乳液法、燃烧法和电化学法:微乳液法通常用于合成热力学稳定的纳米粒子(NPs)。在该方法中,两种光学各向同性不混溶液体的溶液通过表面活性剂界面膜具有稳定的液体微区,用于制备 $n\text{-TiO}_2$ 。表2中的表面活性剂分子通过占据界面位置以最小化张力来控制它们的相互作用。燃烧法通常优选通过氧化还原混合物溶液的快速加热(650°C ,约2分钟)合成具有细颗粒和大比表面积的高结晶 $n\text{-TiO}_2$ 。电化学方法用于通过改变电解参数(pH、电流密度、电位和温度)来改进先进的薄膜(纳米多孔、超晶格、外延、量子点)。在这种方法中,使用 TiCl_3 、 $\text{TiO}(\text{SO}_4)$ 和 $(\text{NH}_4)_2\text{TiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$ 等钛化合物在电极上沉积 $n\text{-TiO}_2$ 薄膜。

水热法:与溶胶凝胶法一起最常用的方法之一;它涉及有机前体如丁醇钛($\text{Ti}(\text{OBu})_4$)的水解和缩合反应。与其他方法相比,通过该路线合成的纳米二氧化钛具有优异的物理和形态性能。此外,该方法具有成本效益和Lee和Kale使用水热法合成 $n\text{-TiO}_2$ 并揭示水热合成的 $n\text{-TiO}_2$ 是单相金红石形式,而商业合成的 $n\text{-TiO}_2$ 由两相组成,即锐钛矿(86%)和金红石(14%)。此外,Dell Edera等人报道了在室温下使用 110°C 温和热处理不同时间间隔(即2、8、16和24h。结果表明,合成的介孔纳米粒子的尺寸随处理时间而变化,即随时间增加,并在24h左右变得恒定。2、8、16和24h合成的粒径sized纳米颗粒分别为 4 ± 1 、 13 ± 8 、 23 ± 6 和 $22 \pm 7\text{nm}$ 。可以得出结论,长时间的热处理,即24小时不会导致 $n\text{-TiO}_2$ 合成的任何实质性改变。

火焰喷雾热解:气溶胶工艺通常用于制备粉末状纳米粒子(NPs)。在这个过程中,液态前驱体被喷射到高速氢/氧(H_2/O_2)火焰中,在那里它蒸发、反应和成核以生成粉末状NP。掺杂剂和敏化剂可用于增强 $n\text{-TiO}_2$ 的光催化活性。首次采用液体火焰喷射热解法在蒸压加气混凝土上直接合成了用于空气净化的 $n\text{-TiO}_2$ 基涂料。

溅射:溅射通常用于制备致密、均匀分布和化学计量的 $n\text{-TiO}_2$ 薄膜。它涉及使用等离子体(氩气和氧气),以便使用直流或射频电流生产 $n\text{-TiO}_2$ 薄膜。基于 $n\text{-TiO}_2$ 的

不同合成方法,我们可以得出结论,溶胶-凝胶和水热路线可能是材料科学家的首选,因为这些方法可以轻松放大,并且合成的纳米粒子具有均匀的形态以及不同的粒径。此外,使用这些方法合成的纳米颗粒通常具有高比表面积。

物理和化学气相沉积:这些是气相方法,通常用于 $n\text{-TiO}_2$ 薄膜沉积。热蒸发是常用的物理气相沉积(PVD)技术,其中坩埚中的前体在室温下蒸发并沉积到基板上。在化学气相沉积(CVD)工艺中, $n\text{-TiO}_2$ 粉末通过在氢气气氛中加热到 900°C 来还原,使其导电以聚焦电子束。CVD用于生产高质量和高性能的固体材料。

六、在胶凝材料中掺入 $n\text{-TiO}_2$ 的方法

由于其经济前景, $n\text{-TiO}_2$ 作为光催化剂在胶结材料中的应用是最受青睐的。然而,在胶凝材料中掺入 $n\text{-TiO}_2$ 是一项具有挑战性的任务。希望在材料表面具有最大量的催化剂,而不会有因磨损或风化而失去它的风险。在水泥体系中掺入 $n\text{-TiO}_2$ 有两种主要方法,(i)与水泥材料混合(外加剂)和(ii)在混凝土上进行表面涂层(表面涂层)。

与胶凝材料混合:在这种方法中, $n\text{-TiO}_2$ 颗粒嵌入胶凝材料中,以保护合成材料免受恶劣和侵蚀性环境的影响。格拉齐亚尼等人。报道了将 $n\text{-TiO}_2$ 颗粒作为外加剂掺入(与水泥或红砖混合或以浆料的形式)。嵌入 $n\text{-TiO}_2$ 的水泥/红砖的光催化活性低于嵌入浆料中的颗粒。拉克霍夫等人。还注意到经过几个月的改性水泥, $n\text{-TiO}_2$ 的催化活性显着下降。Chen和Poon在 NO_x 和甲苯去除潜力的基础上比较了混凝土表面层(TiO_2 混合)的光催化活性。他们观察到 NO_x 被显着去除,而甲苯的光催化转化率为零。这种方法的主要缺点是 $n\text{-TiO}_2$ 颗粒不会暴露以显示光催化活性。此外,由于光催化剂在水泥涂层中的表面覆盖导致光子传输受阻,抑制了活性自由基的表面扩散和吸附的污染物,最终抑制了光催化活性,因此 $n\text{-TiO}_2$ 的光催化活性随时间显着降低。

混凝土表面涂层:在这种方法中, $n\text{-TiO}_2$ 涂层被施加在基材上。有不同的方法可用于施加涂层以实现高光催化 $n\text{-TiO}_2$ 活性。浸涂法:将乙醇和 TiO_2 (0.05g/ml)的悬浮液搅拌30分钟,然后将基材浸入悬浮液中5分钟。涂覆的基材随后在烘箱中在 125°C 下干燥24小时。在这种方法中,光催化剂的活性位点被广泛暴露,可能会降解有害污染物。与5% $n\text{-TiO}_2$ 混合砂浆相比,使用浸涂技术涂有 $n\text{-TiO}_2$ 溶液的砂浆显示出改进的光催化活性,这反映在100%的细菌灭活上。

商用水性涂料: 近年来, 它是油漆和防水涂料行业应用最广泛的方法之一。 $n\text{-TiO}_2$ 耐用且反光, 是丙烯酸涂料配方中的主要颜料。市场上有不同等级的 $n\text{-TiO}_2$, 它们以不同的速率氧化, 随着时间的推移会形成不同等级的涂层。光催化材料, 即 $n\text{-TiO}_2$ 增加了这种基于水-丙烯酸的系统的白度/反射率, 这直接影响了正在研究的混凝土基础设施的能源效率。采用水泥水浆法在混凝土表面涂上一层水泥基薄涂层 (10 mm)。将超细 $n\text{-TiO}_2$ 、水泥、填料 (沙子~1.18毫米) 和水 (水与水泥 (w/c) 之比为0.6) 的表面混合物施加到混凝土表面, 保持所需的10毫米厚度; $n\text{-TiO}_2$ 的含量从水泥重量的1%到5%不等 (Lee 2012)。建议水泥与骨料的最小比例为1: 3, 以达到所需的表层机械强度。这种方法的主要缺点是价格昂贵, 因为需要大量的 $n\text{-TiO}_2$, 从而影响了该技术的实际实施。市售的水性涂料, 即PURETI (99%水和1% $n\text{-TiO}_2$) 通过静电喷涂在任何建筑材料 (如金属、玻璃、石头、塑料、油漆和混凝土等当紫外线 (太阳或荧光灯管) 激发PURETI中的 TiO_2 晶体时, 晶体中会形成带隙, 因此它会像磁铁一样吸引存在于水中的 H_2O 分子的氢原子湿度, 留下羟基自由基 ($\text{OH}\cdot$); 自由基的形成导致 $n\text{-TiO}_2$ 的光催化作用。

七、 $n\text{-TiO}_2$ 的工业应用和毒性

纳米二氧化钛广泛用于不同的工业领域, 如油漆/涂料、聚合物、纸化妆品、电子、建筑材料、纺织、医药和食品领域, 以及废水处理等其他环境应用。除了在建筑、农业、能源、医药、化学传感、二氧化碳捕获等不同工业领域的多种应用外, 纳米粒子对环境和人类健康具有一定的毒性影响。NPs通过水、土壤和空气等不同途径进入生态系统, 对包括人类在内的花卉和动物多样性造成不利影响。有必要了解一些关于纳米二氧化钛 ($n\text{-TiO}_2$) 毒性影响的基本信息, 即对微生物、藻类、植物、无脊椎动物和脊椎动物等不同动物多样性的细胞毒性和遗传毒性。Erdem等人。报道了纳米粒子的毒性取决于 $n\text{-TiO}_2$ 的粒径随着粒径的减小; 毒性增加, 反之亦然。据观察, 在相似条件下, 枯草芽孢杆菌的 LC_{50} 值分别为96 mg/L和401 mg/L, 16.2和45.8 nm $n\text{-TiO}_2$ 。另一方面, 林等人。观察了不同尺寸的 $n\text{-TiO}_2$ 纳米粒子对大肠杆菌 LC_{50} 值的影响; 从所得结果可以看出, $n\text{-TiO}_2$ 颗粒的毒性随着粒径的增大而降低; 这是因为小尺寸的纳米粒子倾向于以更高的速率聚集, 从而导致表面积增加, 从而导致纳米粒子和生物体的细胞附着增强, 从而导致生物体的代谢和行为损伤。

八、 $n\text{-TiO}_2$ 在胶凝材料中的经济应用

为了实现可持续发展, 有必要大规模合成具有成本效益、环境友好的 $n\text{-TiO}_2$ 作为自清洁剂在建筑领域的广泛应用。为了扩大 $n\text{-TiO}_2$ 生产工艺的规模, 需要降低成本和减轻有害的环境影响。在合成工艺中, 常用的是溶胶凝胶路线。不幸的是, 溶胶-凝胶法存在缺点, 例如使用昂贵的前体、高环境影响、较差的再现性、收缩和不可放大的性质。为了解决大规模合成中的上述问题, 由于有机前体成本低, 必须用无机前体代替。根据Stat Nano报告, 市场上有来自32家公司的180种基于 $n\text{-TiO}_2$ 的产品。因此, 已经使用领先生产商 (美国研究纳米材料) 的可用在线数据对水泥材料中 $n\text{-TiO}_2$ 的使用进行了成本分析。不同尺寸 (5、15、18、30、40、100、800和1500 nm) 的高纯度 $n\text{-TiO}_2$ (锐钛矿) 粉末的价格被认为是~235、198、108、298、198、195、分别为136美元和195美元 (<https://www.us-nano.com/nanopowders>)。对 1m^3 高强度混凝土进行了成本分析 (表8)。分析表明, 如果将 $n\text{-TiO}_2$ 与水泥、细骨料、粗骨料和减水剂等常规建筑材料一起使用, 成本将增加约27% (101美元至128.1美元)。净化的空气、改善材料的机械性能以及降低建筑物的维护成本可能被视为对增加的成本的补偿。

九、二氧化钛的抗菌性能

除了光催化和自清洁性能外, 水泥和混凝土基体中的纳米二氧化钛还以其抗菌性能而闻名。Janus等人。(2019) 通过大肠杆菌K12的细菌灭活阐明了 $n\text{-TiO}_2$ 的抗菌特性。获得的结果表明, 在可见光照射下, 掺入 $n\text{-TiO}_2$ 的混凝土板可作为抗菌剂, 使大肠杆菌K12完全失活。他们使用了市售的 $n\text{-TiO}_2$ P25并在不同温度下掺杂了 $n\text{-TiO}_2$ (12种), 即100、300和600 $^\circ\text{C}$ 。抗菌作用的机制涉及细胞壁破坏, 然后是细胞内成分的破坏。此外, 掺杂/改性的 $n\text{-TiO}_2$ 相对于市售的 $n\text{-TiO}_2$ 显示出更好的抗菌性能。

十、结论

在回顾文献的基础上, 作者在此建议在水泥基材料中应用纳米二氧化钛以及生物炭等其他低成本去污剂。由于它们的组合应用将有助于降低碳足迹, 因为前者具有光催化活性, 而后者具有二氧化碳封存能力。 $n\text{-TiO}_2$ 与生物炭的潜力可能会导致污染物修复和固体废物管理领域的新里程碑, 因为生物炭通常是由生物材料的热解制备的。除此之外, 还建议在纳米工程混凝土中应用 $n\text{-TiO}_2$ 以及 $n\text{-SiO}_2$ 颗粒, 因为它可能有助于在混凝土的不同混合物中获得早期强度以及自清洁活性。根据

成本分析, 强烈推荐在水泥基材料中应用 $n\text{-TiO}_2$, 因为它比传统材料的费用高约 27%, 这可以很容易地与每年清洁高层基础设施的成本相平衡。作者在此建议在水泥基材料中采用纳米材料和生物材料, 因为这将导致形成生物基纳米工程混凝土 (Bio-NanCon), 进而满足低碳足迹的可持续基础设施的需求。此外, 它将通过以下方式帮助我们实现建筑行业可持续基础设施的最终目标: (i) 使用经济、节能和环保的工艺制备具有成本效益的 $n\text{-TiO}_2$; (ii) 基于 $n\text{-TiO}_2$ 的光催化剂对 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的选择性更高; (iii) 开发作为有害气体传感器的 $n\text{-TiO}_2$ 光催化剂; (iv) 在斑马线、道路分隔线和衬砌以及高层建筑中应用 $n\text{-TiO}_2$ 涂料, 以修复印度车辆交通造成的有害污染物; (v) 使用 $n\text{-TiO}_2$ 催化剂进行能量存储和水分解。

参考文献:

- [1] Bonazzi M (2011) Successful European Nanotechnology. Research:1 – 120 Bourgeois PA, Puzenat E, Peruchon L, Simonet F, Chevalier D, Deflin E, Brochier C, Guillard C (2012) Characterization of a new photocatalytic textile for formaldehyde removal from indoor air. Appl Catal B Environ 128:171 – 178.
- [2] Brouwers HJH, Ballari MM, Hunger M, Hu G (2010) NO_x photocatalytic degradation employing concrete pavement containing titanium dioxide. Appl Catal B Environ 95:245 – 254.
- [3] Drobne D, Jemec A, Tkalec ZP (2009) In vivo screening to determine hazards of nanoparticles: Nanosized TiO_2 . Environ. Pollut. 157: 1157 – 1164.
- [4] Erdem A, Metzler DM, Cha DK, Huang CP (2015) The short-term toxic effects of TiO_2 nanoparticles toward bacteria through viability, cellular respiration, and lipid peroxidation. Environ Sci Pollut Res 22: 17917 – 17924.
- [5] Ershad-Langroudi A, Fadaei H, Ahmadi K (2019) Application of polymer coatings and nanoparticles in consolidation and hydrophobic treatment of stone monuments. Iran Polym J 28:1 – 19.
- [6] Guo M, Ling T, Poon C (2012) TiO_2 -based self-compacting glass mortar : comparison of photocatalytic nitrogen oxide removal and bacteria inactivation. Build Environ 53:1 – 6.
- [7] Guo X, Rao L, Wang P, Wang C, Ao Y, Jiang T, Wang W (2018) Photocatalytic properties of P25-doped TiO_2 composite film synthesized via sol – gel method on cement substrate. J Environ Sci (China) 66:71 – 80.
- [8] Loh K, Gaylarde CC, Shirakawa MA (2018) Photocatalytic activity of ZnO and TiO_2 ‘nanoparticles’ for use in cement mixes. Constr Build Mater 167:853 – 859.
- [9] Ltifi M, Guefrech A, Mounanga P, Khelidj A (2011) Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behaviour of cement mortars. Procedia Eng. 10:900 – 905.
- [10] Lucas SS, Ferreira VM, Aguiar JLB (2013) Incorporation of titanium dioxide nanoparticles in mortars — Influence of microstructure in the hardened state properties and photocatalytic activity. Cem Concr Res 43:112 – 120.