



# 光催化技术在建筑环境与设备中的应用及研究现状

北京工业大学 吴延鹏<sup>☆</sup> 马重芳

**摘要** 简述了光催化技术在建筑环境与设备领域中的研究和应用,目前研究开发的热点是利用光催化技术改善室内空气质量、光催化材料的杀菌作用、光催化材料的自清洁和防雾功能、利用光催化材料强化空调与制冷换热设备的传热性能;对其应用研究现状进行了分析,并指出需要进一步研究的问题。

**关键词** 光催化 建筑环境与设备 空气净化 杀菌 自清洁表面 防雾 超亲水 强化传热

## Status of studies and applications of photocatalytic technology in building environment and facility field

By Wu Yanpeng<sup>★</sup> and Ma Chongfang

**Abstract** Briefly states the studies and applications of the technology. The main studies are improving indoor air quality, sterilization, self-cleaning, anti-fogging and heat transfer enhancement in HVAC equipment. Analyses the research status and points out several problems to be solved for further researches.

**Keywords** photocatalysis, building environment and facility, air cleaning, sterilization, self-cleaning surface, anti-fogging, superhydrophilicity, heat transfer enhancement

★ Beijing University of Technology, Beijing, China

①

### 0 引言

光催化技术是一项新的环境能源技术,它具有能耗低、操作简便、反应条件温和、可减少二次污染、可连续工作等优点,日益受到人们的重视。光催化技术的研究开始于 20 世纪 50 年代,当时是为了解决由于无机化合物导致的光分解反应即由染料导致的涂料老化问题展开的。在 20 世纪 60~70 年代,科研人员在研究与开发复印、传真等光电新技术时,对具有光的刺激-应答功能的半导体氧化物材料进行了一系列的探索研究。1972 年藤岛昭等人在实验中偶然发现用  $\text{TiO}_2$  单晶半导体为电极,在光照射下能将水电解为氧和氢,同时,他们还发现水中的一些微量有机物也被降解掉了,取得了光催化技术研究的重大突破<sup>[1]</sup>。之后,他们将  $\text{TiO}_2$  负载于金属载体上制成微电池,在水中同

样证实了  $\text{TiO}_2$  具有光催化反应功能。此后 20 多年,藤岛昭等人在日本领衔从事纳米  $\text{TiO}_2$  的研究和技术开发工作。对  $\text{TiO}_2$  光催化氧化技术的研究与开发、推广与应用,被称为“光洁净的革命”。各国科学家们也纷纷研究光催化现象,但是光催化技术在建筑环境与设备工程中的应用研究还是近 10 年的事情。在建筑环境和设备领域中,利用光催化技术改善室内空气质量,光催化技术的杀菌作用,光催化材料对玻璃幕墙和建筑装饰表面的自清

①<sup>☆</sup> 吴延鹏,男,1972 年 12 月生,博士  
100022 北京市朝阳区平乐园 100 号北京工业大学环境与能源工程学院传热强化与过程节能教育部重点实验室  
(010) 89823666  
E-mail: wuyanpeng@tsinghua.org.cn  
收稿日期:2004-05-09  
修回日期:2005-11-25

洁和防雾功能,纳米技术强化空调与制冷设备的传热性能是目前国内外研究和开发的热点。

### 1 光催化技术在室内空气净化中的应用

TiO<sub>2</sub> 光催化材料在受到紫外线光照射时,钛原子上的电子被光激发,形成电子-空穴对,空气中的水、氧气会被分解为具有极强氧化力的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 和氢氧根自由基 OH<sup>-</sup>,能使有机物分解成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O,也能降解部分无机化合物,从而达到净化空气的效果。光催化空气净化的本质是在光电转换过程中进行氧化还原反应。表 1 列出了各种氧化剂的氧化电位。光催化空气净化技术不同于传统

表 1 各种氧化剂的氧化电位

	氧化电位/V	相对氧化电位
氢氧根自由基	2.80	2.05
氧原子	2.42	1.78
臭氧	2.07	1.52
双氧水	1.77	1.30
双氧水自由基	1.70	1.25
次氯酸	1.49	1.10
氯气	1.36	1.00

的过滤吸附方法。传统的过滤吸附方法只起到使污染物转移的作用,并不能对污染物彻底根除,且存在滤芯的吸附饱和问题,需要定期更换滤芯。纳米光催化空气净化技术可以直接利用包括太阳光在内的各种途径的紫外线光,在室温条件下就能将室内病毒、各种挥发性有机污染物光解消除。用纳米尺度 TiO<sub>2</sub> 作为催化剂,以吸附介质为载体形成高活性 TiO<sub>2</sub> 催化剂膜研制成的纳米光催化氧化空气净化器,可以在一定程度上解决室内空气污染问题。将纳米尺度 TiO<sub>2</sub> 做成涂料,喷涂在建筑物内墙上,可以改善室内空气质量。采用光催化空气净化技术,还可以减少通过增加建筑物通风换气带来的能量消耗,从而达到节能的目的。

在光催化空气净化方面,国内不少高校和研究所以纷纷展开这方面的研究,在建筑环境与设备领域里以清华大学、北京工业大学、福州大学等的研究成果最有代表性,已经取得了一系列填补国内空白的研究成果<sup>[2-6]</sup>。

在光催化技术净化空气方面,光催化空气净化器的研究最为活跃。日本在光催化技术的理论研究方面一直处于世界领先地位<sup>[7-9]</sup>,在应用方面也取得突破性进展,产业化程度高、速度快、产品种类

多(应用光催化技术的产品有数十种)。目前,仅日本就有数百家公司进行研发和生产。另外,德国、美国、韩国等国正在积极进行光催化空气净化器的研究<sup>[10-13]</sup>。图 1 为光催化空气净化器内部结构示意图。

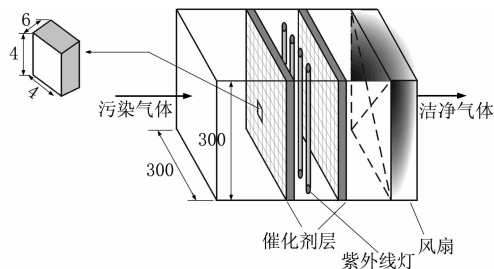


图 1 光催化空气净化器内部结构示意图

目前,我国大多数有关厂家仍然是生产机械过滤、活性炭吸附和空气负离子发生器,生产光催化空气净化器的厂家不多,有的产品在性能方面还存在不少问题。图 2,3 是北京工业大学的实验结果<sup>[6]</sup>。图 2 是某空气净化器放在实验舱内,舱内有低浓度的甲醛,分别在三种情况下实测舱内甲醛浓度的变化情况:1) 实验舱内的空气净化器未启动,

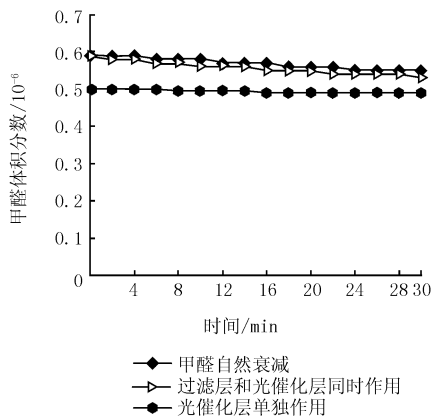
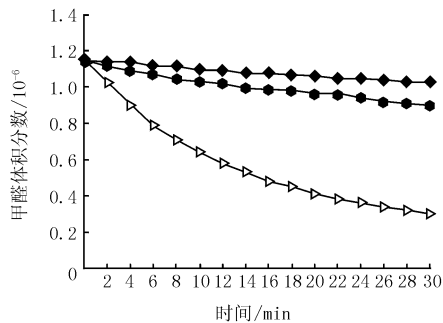


图 2 国外某光催化空气净化器实测结果



图例同图 2

图 3 国内某光催化空气净化器实测结果

甲醛浓度自然衰减;2) 启动实验舱内空气净化器, 过滤层和光催化层同时作用;3) 将净化器内过滤层取出, 保留光催化层, 启动舱内净化器。测试时间为 30 min。从图 2 可以看出光催化层几乎对甲醛没有任何降解作用。图 3 是相同的实验舱, 带有活性炭吸附层和光催化层的某空气净化器放在实验舱内, 舱内有低浓度的甲醛, 分别在三种情况下实测舱内甲醛浓度的变化情况:1) 实验舱内的空气净化器未启动, 甲醛浓度自然衰减;2) 启动实验舱内空气净化器, 活性炭吸附层和光催化层同时作用;3) 将净化器内活性炭吸附层取出, 保留光催化层, 启动舱内净化器。从图 3 可以看出, 对甲醛降解起主要作用的是活性炭吸附层, 光催化层的作用微乎其微。

通过以上实验和其他一系列的实验, 总结出目前市场上一些光催化空气净化器产品存在的三个比较突出的问题:1) 不是所有的光催化空气净化器都真正具有光催化空气净化效果;2) 光催化材料和吸附过滤材料的配置问题还没有很好地解决;3) 光催化空气净化器效率没有统一的标准可以衡量。总之, 目前市场上有关光催化装置性能的说明有些没有提供严格的科学依据。

## 2 光催化技术在杀菌方面的应用

1997 年藤岛昭等人在玻璃上涂一薄层纳米  $\text{TiO}_2$ , 发现光照射 3 h 可完全杀灭大肠杆菌<sup>[14]</sup>, 进一步的实验证明, 纳米  $\text{TiO}_2$  对绿脓杆菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、芽枝菌和曲霉等多种细菌和藻类具有很好的杀灭能力, 但  $\text{TiO}_2$  杀菌一般需要在光的照射下才起作用。传统的无机类抗菌剂含银、铜、锌等金属离子, 不需要光的照射即可使细菌失去活性, 但细菌被杀死后, 可以释放出致热和有毒的组分如内毒素, 内毒素是致命物质, 可以引起伤寒、霍乱等疾病, 但纳米光催化剂却可以将内毒素等中间产物彻底去除。需要说明的是,  $\text{TiO}_2$  颗粒本身对微生物和细胞并无毒性, 只有形成比较大的聚集体后才对微生物和细胞呈现出毒性。目前北京工业大学正在与新加坡南洋理工大学合作, 研究利用光催化技术杀灭冷却塔内细菌, 已经取得了一定的进展。日本富士化水工业株式会社、国立环境研究所、成蹊大学、筑波大学正在对利用光催化技术防止冷却塔藻类的生成和杀菌进行深入研究<sup>[15-16]</sup>。图 4, 5 是日本某公司生产的带

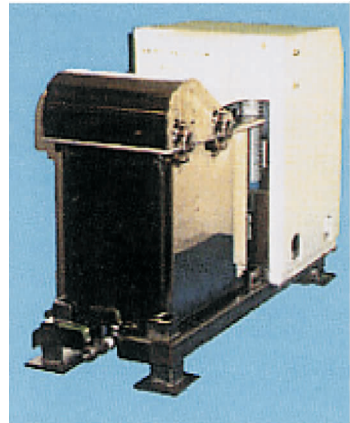


图 4 光催化杀菌搅拌器外形

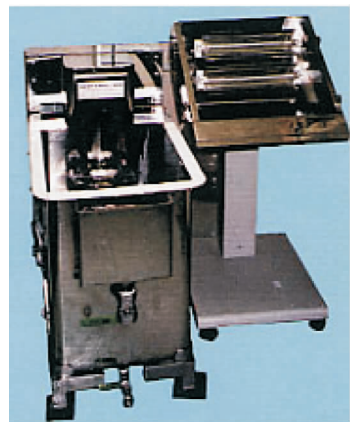


图 5 光催化杀菌搅拌器内部结构

有振荡搅拌功能的光催化杀菌搅拌器, 有望用于贮水池的杀菌。

## 3 光催化技术在自清洁、防雾方面的应用

1997 年藤岛昭揭示了纳米  $\text{TiO}_2$  涂层表面的超亲水性现象, 发现了  $\text{TiO}_2$  涂层的自清洁作用<sup>[17]</sup>。在通常情况下,  $\text{TiO}_2$  涂层表面与水有较大的接触角, 但经紫外线光照射后, 水的接触角减小到  $5^\circ$  以下, 甚至可达到  $0^\circ$ , 水滴完全浸润  $\text{TiO}_2$  涂层表面, 显示非常强的超亲水性。停止光照后, 表面超亲水性可维持数小时或一周左右, 随后慢慢恢复到照射前的疏水状态; 再经紫外线照射, 又可表现出超亲水性, 即采用间歇紫外线光照射可使表面始终保持超亲水状态。

需要指出的是,  $\text{TiO}_2$  表面的超亲水性不同于  $\text{TiO}_2$  的光催化氧化分解特性<sup>[18-21]</sup>。光照条件下,  $\text{TiO}_2$  表面的超亲水性起因于其表面结构的变化。在紫外线光照射下,  $\text{TiO}_2$  价带电子被激发到导带, 在表面生成电子空穴对, 电子与  $\text{Ti}^{4+}$  反应, 空穴则

与表面桥氧原子反应,分别形成  $Ti^{3+}$  和氧空位。此时,空气中的水解离吸附在氧空位中,成为化学吸附水(表面羟基),化学吸附水可进一步吸附空气中的水分,形成物理水吸附层,即在  $Ti^{3+}$  缺陷周围形成了高度亲水的微区,而表面剩余区域仍保持疏水性,这样就在  $TiO_2$  表面构成了均匀分布的纳米尺寸的亲水区,类似于二维的毛细管现象。滴下的水被亲水微区吸附,从而浸润表面。停止紫外线光照射,化学吸附的羟基被空气中的氧取代,重又回到疏水性状态。将  $TiO_2$  与一些蓄水性材料如  $SiO_2$  相结合,可使其表面维持长时间的亲水特性。

以往自清洁玻璃的开发是在玻璃表面涂制含氟的高分子薄膜,其耐热性和耐候性存在问题,利用  $TiO_2$  涂层的亲水性或超亲水性制成的自清洁玻璃作为新型的生态建筑材料前景光明。日本已经成功开发了用于汽车反光镜的 PET 抗雾膜、路旁标牌或广告牌外部装饰用瓷砖<sup>[22-23]</sup>。我国也纷纷开展这方面的研究,通过不同方法进行自清洁玻璃或陶瓷及抗雾膜材料的研制与开发<sup>[24-28]</sup>。利用纳米  $TiO_2$  光催化材料的自清洁和防雾性能,可以使玻璃幕墙、窗户保持清洁、透明,可以充分利用自然光。

#### 4 光催化技术在强化传热方面的应用

高田保之等人在 20 世纪 90 年代末期率先将光催化技术应用到气液相变现象如沸腾和蒸发的传热强化方面<sup>[29-30]</sup>。他们主要做了以下三方面的工作。第一,将超亲水性用于下降液膜的蒸发。实验表明,在低流率(130~630 mL/min)和低热流量区(30~45 kW/m<sup>2</sup>)传热得到了明显的强化, $TiO_2$  涂层表面的努塞尔数比正常表面大 40 倍。在高流速和高热流量区传热特性与正常表面没有多大区别。第二,将超亲水性用于热金属的浸渍冷却。实验表明, $TiO_2$  涂层试料比非涂层试料冷却得更快。第三,在稳定状态下进行池沸腾实验,实验表明,临界热流密度点和最小热流密度点具有润湿性效应。

目前,该项技术正处于基础研究阶段,将来有望在制冷空调换热设备中得到应用,用以提高换热器的传热性能。

#### 5 光催化技术在建筑环境与设备中的研究现状与展望

目前日本在光催化技术研究与应用方面处于世界领先地位,近年来日本产业界一直积极开拓中

国市场,学术交流也日趋活跃。日本在 2000 年 1 月成立了光催化产品技术协会<sup>[31]</sup>,这是日本最先成立的同时也是最大的光催化产业界、学术界和政府部门结合的光催化团体,目前有 300 多名会员。该协会已经开展了有关光催化产品质量标准的策划、光催化性能评价实验方法的标准化的、光催化标志(SITPA)的策划、标识、术语等相关标准的制订工作。2002 年 9 月日本成立了光催化标准化委员会,并设立了空气净化性能、水净化性能、自清洁性能和抗菌防霉性能 4 个分委员会。日本 2004 年 4 月成立的光机能材料研究会<sup>[32]</sup>,会长是藤岛昭,常务理事会由来自日本 15 所大学和研究所的 23 名理事组成。会报《光触媒》于 2000 年 4 月 25 日创刊,每年出版 3 期。除了上述两个光催化方面大的组织外,日本光化学协会、光催化产品企业协会、日本表面科学会<sup>[33]</sup>等组织的成立,在光催化技术的推动,光催化产品的标准化,确保市场销售的光催化产品的性能、品质和安全,光催化知识的普及方面发挥了重要作用。

我国对光催化技术在建筑环境与设备领域的应用也给予了高度重视。2004 年,国家自然科学基金会在工程与材料科学领域专门设立了 300 万元经费资助重点项目“纳米光催化及其消除室内外有机化学污染和微生物污染方法的机理”,对光催化空气净化进行研究。《奥运工程环保指南》中在建筑节能部分要求利用最新材料和先进的空气处理技术(太阳能纳米光催化技术),用具有自洁、杀菌和降解空气中有害气体作用的瓷砖、地板砖、卫生陶瓷、壁纸等改善室内空气质量<sup>[34]</sup>。

光催化方面的研究涉及多学科的交叉。现有的研究大多从单一学科考虑问题,比如分别从材料、化学、传热传质、流动、辐照等的角度来分析,对它们之间内在的联系研究得还不够,所以难以全面认识光催化反应中涉及的特殊反应机理和主要影响因素。应综合多学科交叉研究,对纳米光催化材料进行改性,对基底材料和基材结构进行筛选,对催化剂结构进行优化设计。另外,光催化技术必须从工程方面开展实验研究和设计优化才能真正取得切实的效果,国内在此领域的研究工作偏重理论和实验,工程应用方面的研究还远远不够。

展望未来,光催化在建筑环境与设备领域需要研究的问题还很多。

### 1) 催化剂的涂膜固化问题

过去大多数光催化研究中使用粉末状催化剂,但粉末状催化剂在使用过程中存在团聚失活以及分离和回收困难等问题,限制了以  $\text{TiO}_2$  等催化剂为基础的光催化方法快速商业化。因此在  $\text{TiO}_2$  成膜过程中需要通过控制薄膜表面形态来增加表面催化活性及膜的牢固性,必须解决以下几个问题:

① 催化剂载体必须具备抗催化降解特性。由于  $\text{TiO}_2$  具有较高的光催化活性,能分解多种有机物质,目前使用的载体主要是陶瓷、玻璃。日本曾在纸质基材上涂布  $\text{TiO}_2$ ,结果使得纸的 C—H 键被破坏,纸质变脆,基材劣化<sup>[36]</sup>。因此必须寻求具有抗催化降解性能的载体,用于工程实践。

② 形成的  $\text{TiO}_2$  膜必须牢固,即在保证催化活性的前提下不存在催化剂掉粉现象,由于催化剂是通过光催化反应使表面的有害物质分解,故须使催化剂表面暴露在外或能让欲分解的反应物移动而易与之接触。目前在耐热材料上的固化是将  $\text{TiO}_2$  溶胶喷涂或浸涂在基材上,然后在高温下烧结制成<sup>[35-43]</sup>。 $\text{TiO}_2$  光催化剂在非耐热材料上固化存在困难,因为有机材料本身不耐  $\text{TiO}_2$  光催化剂的强氧化作用,虽可用耐  $\text{TiO}_2$  光催化分解的无机系粘结剂涂覆,但大量无机系粘结剂包覆  $\text{TiO}_2$  表面将导致其光催化活性大幅下降,故涂膜的耐久性和光催化活性无法同时兼顾。

③ 针对催化剂膜的具体应用,需要对基材结构进行筛选,使其具有较好的透光性且流动阻力较小。

### 2) 提高光催化材料的量子效率和稳定性

通过采用一系列的改性方法,如通过增加表面缺陷、减小催化剂颗粒尺寸、贵金属沉积或过渡金属离子掺杂、半导体复合等方法来提高电荷的分离速率,抑制载流子复合以提高量子效率、扩大光的吸收波长范围、改变产物的选择性或产率、提高光催化材料的稳定性<sup>[44-45]</sup>。

### 3) 提高光催化材料的杀菌能力

研究表明,锐钛矿白色纳米  $\text{TiO}_2$  粒子表面用  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$  离子修饰,杀菌效果更好<sup>[44]</sup>。 $\text{TiO}_2$  纳米颗粒越小,杀灭细菌的效果越好<sup>[45]</sup>。将传统的抗菌剂掺杂到纳米  $\text{TiO}_2$  催化剂中,使得催化剂在微弱光或无光的条件下也能达到良好的杀菌效果,

是一种提高催化剂效率的有效途径,从而克服了光催化剂的局限性。

### 4) 提高光催化空气净化器效率

对于光催化空气净化器来说,当污染气流流过空气净化器时,合理的净化器结构应能保证活性光子、固体催化剂与污染气流紧密、有效地接触,保证光子利用率高,这就需考虑到净化器内部流场、辐射场、浓度场等各种场的合理匹配,对光催化空气净化器进行优化设计,从而提高光催化空气净化器效率。

### 5) 研究光催化材料在不同建筑材料表面的光催化活性

尽管光催化材料已被应用到室外的墙壁等围护结构上,但是还没有关于光催化材料和传统建筑材料如混凝土、灰泥和石膏之间相互关系的报道,今后应该研究光催化材料在不同建筑材料表面的光催化活性。

### 6) 光催化技术在改善室内空气质量方面的应用还需进一步研究

目前光催化消除室内污染物大多集中于实验室研究方面。由于房间污染物的浓度一般比实验工况下小得多,实际房间的尺寸一般比实验的空间大得多,光催化技术在人们生活的房间内消除污染物究竟起多大作用目前还没有量化的结果,还需要进一步实验研究。

### 7) 制订光催化技术的行业标准和国家标准

指导光催化产品的技术标准在我国目前还是空白。关于光催化去除空气污染物效果评价方法的研究还很少,还没有形成一个统一的标准。不同研究者的实验结果由于实验条件的不同很难作出比较<sup>[46]</sup>。比如光催化材料性能测试的装填量(光催化涂料板面积与实验小室体积之比)、实验小室内的环境条件、光催化空气净化器的效率如何评价等都没有统一的规定<sup>[47]</sup>。因此,为了正确评价光催化的效果,研究制订相应的国家标准和行业标准是当务之急。目前国家标准《自洁净纳米薄膜光催化速度测量方法》征求意见稿已完成<sup>[48]</sup>。《光催化(二氧化钛)-光催化功能评价方法(暂定)》行业标准也正在制订中<sup>[49]</sup>。其他相关的一系列标准也应该逐步制订和完善。

### 8) 光催化技术与其他建筑环境技术的结合

目前北京工业大学正在致力于光催化技术与

光导管技术相结合的研究,使光导管系统不但具有自然采光的功能,而且具有光催化改善室内空气质量的功能<sup>[50-61]</sup>。这项研究在世界上尚属首次。目前该项研究已经取得了一定的成果,申请国家发明专利两项(已经获得授权一项),实用新型专利两项,此外还申请了美国专利。光催化技术与其他建筑环境技术的结合为光催化技术在建筑环境与设备领域中的研究和应用开辟了新的方向。

## 6 结论

光催化技术作为人类可持续发展的环境能源新技术,在建筑环境与设备工程领域中的应用前景十分广阔。光催化技术的研究涉及许多学科交叉问题,到目前为止仍存在许多较难解决的技术问题。但是只要坚持以人为本的原则和求真务实的精神加以研究和应用,实现科技制高点、学科交叉点和市场切入点的有机统一,光催化技术就一定能使人们在享受安全、舒适、健康、卫生的人居环境,发展可持续建筑方面发挥重要作用。

## 参考文献

- [1] Fujishima A, Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. Nature, 1972,238(7):37-38
- [2] Yang Rui, Zhang Yinping, Zhao Rongyi. Photocatalytic degradation of dilute gas-phase toluene using thin film hybrid photocatalyst; Kinetic study for the effect of airflow velocity and concentration[C]// Proceedings of International Conference on Energy and the Environment. Shanghai, 2003:1537-1541
- [3] Xiao Jinsong, Zi Xuehong, Yin Xueyun, et al. Investigation on Nano-TiO<sub>2</sub> photocatalytical coating to clean major pollutants within air [G] // International Symposium on Micro/Nanoscale Energy Conversion and Transport. Antalya, 2002
- [4] 丁正新,王绪绪,付贤智. TiO<sub>2</sub> 基固体超强酸及其在光催化空气净化中的应用[J]. 化工进展, 2003, 22(12):1278-1283
- [5] 瞿学红. 纳米光催化建筑材料降解室内外有害气体的应用研究[D]. 北京:北京工业大学, 2003
- [6] 鹿院卫. 光催化空气净化技术的基础研究与应用开发[R]//北京工业大学博士后研究报告, 2003
- [7] Tryk D A, Fujishima A. Recent topics in photoelectrochemistry: achievements and future prospects[J]. Electrochimica Acta, 2000(45): 2363-2376
- [8] Fujishima A, Hashimoto K. TiO<sub>2</sub> Photocatalysis-Fundamentals and Applications[M]. BKC Inc, 1999: 65-77
- [9] Fujishima A. Photocatalytic materials and applications [J]. Function and Materials, 2000, 20(1): 9-15
- [10] Shin Soo-Yeon, Hong Young-Ki, Lee Sung-Hwa, et al. A study on performance of photocatalyst plasma for air clean[C]// The 4th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning. Beijing, 2003:37-43
- [11] Yoshihisa O, Tryk D A, Kazuhito H, et al. Kinetic study of photocatalytic air cleaning systems [C] // Electrochemical Society Proceedings, 1998(5):122-128
- [12] Zhao Juan, Yang Xudong. Photocatalytic oxidation for indoor air purification; a literature review [J]. Building and Environment, 2003,38:645-654
- [13] Noguchi T, Fujishima A. Photocatalytic degradation of gaseous formaldehyde using TiO<sub>2</sub> film [J]. Environmental Science & Technology, 1998, 32(23):3831-3833
- [14] Kikuchi Y, Sunada K, Iyoda T, et al. Photocatalytic bactericidal effect of TiO<sub>2</sub> thin films; dynamic view of the active oxygen species responsible for the effect [J]. J Photochem Photobiol, A: Chem, 1997 (106): 51-56
- [15] Geichun Kano, Ding Guoji, Kyoko Shibata, et al. Maintaining the function of cooling tower by using photocatalyst to prevent the algae growth [C] // Proceedings of Air Conditioning and Sanitation Engineering, 2003, 90:69-77
- [16] Tetsu Tatsuma, Shuichi Takeda, Shuichi Saitoh, et al. Bactericidal effect of an energy storage TiO<sub>2</sub>-WO<sub>3</sub> photocatalyst in dark [J]. Electrochemistry Communications, 2003 (5):793-796
- [17] Wang Rong, Kazuhito H, Fujishima A. Light-induced amphiphilic surfaces [J]. Nature, 1997, 388(31):431-432
- [18] Sopyan I, Watanabe M, Murasawa S, et al. A film-type photocatalyst incorporating highly active TiO<sub>2</sub> powder and fluoro-resin binder: photocatalytic activity and long-term stability[J]. Journal of electroanalytical chemistry, 1996, 415:183-186
- [19] Wang Xiaoping, Yu Yun. Hydrophilicity of TiO<sub>2</sub> films prepared by liquid phase deposition[J]. Thin Solid Films, 2000, 371:148-152

- [20] Watanabe T, Nakajima A. Photocatalytic activity and photoinduced hydrophilicity of titanium dioxide coated glass[J]. *Thin Solid Films*, 1999, 351:260-263
- [21] Fujishima A, Tatan R, Tryk D A. TiO<sub>2</sub> photocatalysts and diamond electrodes [J]. *Electrochimica Acta*, 2000, 45:4683-4690
- [22] Toru Nonani, Hiroshi Taoda, Nguen Thihue, et al. Aptite formation on TiO<sub>2</sub> photocatalyst film in a pseudo body solution [J]. *Materials Research Bulletin*, 1998, 33(1):125-131
- [23] Masahiko Yamada, Shoichiro Fukusako. A mist generation mechanism above a hydrophobic treated surface [C]//38th National Heat Transfer Symposium of Japan, 2001:549-550
- [24] 沈杰,董昊,张永熙,等.溶胶-凝胶法制备二氧化钛薄膜的亲水性研究[J].*真空科学与技术*,2000,20(6):385-389
- [25] 余家国,赵修建. TiO<sub>2</sub> 涂层自洁净玻璃的制备及其特性研究[J].*太阳能学报*,1999,20(4):398-402
- [26] 冯文辉,管自生,蒋峰芝,等.超亲水 TiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 表面的动态润湿性[J].*高等学校化学学报*,2003,24(4):745-747
- [27] 管自生,马颖,曹亚安,等.预处理对 TiO<sub>2</sub> 涂层表面超亲水性的影响[J].*感光科学与光化学*,2000,18(3):204-207
- [28] 刘平,凌岚,林华香,等.光催化抗雾膜材料的制备及其亲水性研究[J].*高等学校化学学报*,2000,21(3):462-465
- [29] Takata Y, Tanaka K, Kaijima K. Control of boiling and evaporation heat transfer by super-hydrophilic photocatalyst. (2nd Rep, Influence of wettability on minimum heat flux) [C]// 36th National Heat Transfer Symposium of Japan, 1999:385-386
- [30] Takata Y, Hidaka S. Boiling heat transfer from a superhydrophilic surface [C]// 37th National Heat Transfer Symposium of Japan, 2000:445-446
- [31] <http://www.photocatalysis.com>
- [32] <http://www.chem.t.u-tokyo.ac.jp/appchem/labs/fujisima/pccm/PFMA/index.htm>
- [33] <http://www.sssj.org>
- [34] 第29届奥林匹克运动会组织委员会.奥运工程环保指南[G].北京,2004
- [35] Fujishima A, Tatan R, Donald A. Titanium dioxide photocatalysis [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 1, 2000:1-21
- [36] Kataoka S. Applications of photocatalytic oxidation using TiO<sub>2</sub> [D]. University of Wisconsin-Madison, 2003
- [37] 陈国平,李启甲,陈平. TiO<sub>2</sub> 光催化膜的成膜技术[J].*陶瓷学报*,2002,23(1):67-71
- [38] 张彭仪,余刚,蒋展鹏.光活性 TiO<sub>2</sub> 膜的制备与应用[J].*环境科学进展*,1998,6(5):50-56
- [39] 方佑龄,赵文宽,尹少华,等.纳米 TiO<sub>2</sub> 在空心陶瓷微球上的固定化及光催化分解辛烷[J].*应用化学*,1997,14(2):81-83
- [40] 陶咏,陈爱平,戴智铭,等.新颖玻璃弹簧负载化 TiO<sub>2</sub> 光催化剂[J].*中国粉体技术*,2001,7(2):23-27
- [41] 张立德.纳米材料[M].北京:化学工业出版社,2000:126-131
- [42] 张立德,牟季美.纳米材料和纳米结构[M].北京:科学出版社,2002
- [43] Michael Birnie, Saffa Riffat, Mark Gillott. Photocatalytic reactors: design for effective air purification [C] // SET 2004-3rd International Conference on Sustainable Energy Technologies. UK, 2004
- [44] 姚建年.光催化剂的开发研究与展望[R]//中国科学院2002高技术发展报告.北京:科学出版社,2002:95-99
- [45] 高濂,郑珊,张青红.纳米氧化钛光催化材料及应用[M].北京:化学工业出版社,2003:276-289
- [46] 蔡杰,亢燕铭,刘俊杰.空调与净化中一些概念的辨析[J].*暖通空调*,2003,33(6):35-36
- [47] 宋瑞金,崔九思,陈烈贤.纳米光催化涂料去除空气污染物的效果评价方法研究[C]//首届室内环境安全与可持续发展国际论坛论文集.长沙,2003:306-308
- [48] 中华人民共和国国家标准《自洁净纳米薄膜光催化速度测量方法》征求意见稿[EB/OL].<http://www.cbmtc.com/zlbz/zqyj1.doc>
- [49] 光催化标准会议在庐山召开[EB/OL][2005-11-27].<http://www.kjj.com.cn>
- [50] 吴延鹏,马重芳.夏季晴天侧采光光导管实验研究[J].*工程热物理学报*,2004,25(增刊):179-181
- [51] 吴延鹏,马重芳.建筑用光导管技术的研究现状和发展趋势[C]//第12届全国暖通空调技术信息网大会文集.北京:中国建材工业出版社,2003:507-510
- [52] 马重芳,鹿院卫,吴延鹏,等.可实现光催化空气净化与自然通风的光导管系统:中国,200510002281.5 [P].2005-10-12
- [53] 马重芳,鹿院卫,吴延鹏,等.可实现光催化空气净化

与自然通风的光导管装置:中国,200420118097.8 [P].2005-07-27

[54] 吴延鹏,马重芳.光导管系统在隧道中应用的设计方法[J].中国建设动态阳光能源,2005(12):28-30

[55] 吴延鹏,马重芳.采集太阳光的光导管绿色照明技术在建筑中的应用[M]//智能与绿色建筑文集.北京:中国建筑工业出版社,2005:482-486

[56] Wu Yanpeng, Ma Chongfang. Experimental research on daylight performance of side lighting light pipe [J]. Journal of Chongqing University-Eng Ed, 2003, 2:96-99

[57] Wu Yanpeng, Ma Chongfang. Research on energy efficiency in buildings of Beijing Olympic Games 2008 [C] // Proceedings of International Conference on Energy and the Environment. Shanghai, 2003:1574-1578

[58] 吴延鹏,马重芳.具有自然采光功能的自然通风装置

研究现状[J].中国建设信息供热制冷,2005(12):62-64

[59] Wu Yanpeng, Ma Chongfang. Application of sustainable energy technologies in the building of the key laboratory [C] // Proceedings of the 3rd International Symposium on Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation. 2004(2):1500-1504

[60] Wu Yanpeng, Ma Chongfang. Light pipe combined with photocatalysis to decompose formaldehyde under sunny conditions in Beijing [C] // The 4th International Conference on Sustainable Energy Technologies. Jinan, 2005:73-76

[61] Wu Yanpeng, Ma Chongfang. Daylight performance of top lighting light pipes and side lighting light pipe under sunny conditions in Beijing [C] // The 2005 World Sustainable Building Conference. Tokyo, 2005

• 广告 •

# 诚 请 精 英 加 盟

w w w . w e r k h a r t . c o m

五合国际(5+1 Werkhart International) 建筑设计集团作为跨国集团,在德国、英国、澳洲及中国上海、北京、香港设有分支机构。中国大陆现有员工 200 余人,包括掌握欧洲建筑科技的外籍设计师,为客户提供专业水准的建筑设计服务。同德国著名的 SOBEK INGENIEURE 结构设计、德国 TRANSOLAR ENERGIETECHNIK 智能生态设计、德国 HENN ARCHITEKTEN 公建设计以及澳洲 DRILLARCHITECTURAL DESIGN 主创设计优势互补,共同开拓中国市场。2004 年入选境外驻中国十大建筑设计公司。

### 给排水主任工程师

- 全日制院校给排水专业本科以上学历;
- 10 年以上工作经验;
- 5 年以上大中型设计院给排水设计工作经验,具有独立承担大中型项目专业负责人的经验;
- 精通建筑给排水专业设计;
- 熟练使用相关设计软件,熟悉本专业各项规范及最新技术发展动态;
- 细心严谨,有良好的职业素质、团队精神及沟通协调能力;
- 有给排水专业主任工程师经验者优先;
- 熟悉生态节能技术者优先。

### 电气主任工程师(强弱电)

- 全日制院校相关专业本科以上学历;
- 精通民用建筑和公共建筑强、弱电设计,有智能大厦设计经验者优先;
- 5 年以上大中型设计院工作经验,具有独立承担大中型项目专业负责人的经验;
- 细心严谨,有良好的职业素质、团队精神及沟通协调能力。

### 暖通主任工程师

- 全日制院校暖通专业本科以上学历;
- 10 年以上工作经验;
- 5 年以上大中型设计院暖通设计工作经验,具有独立承担大中

型项目专业负责人的经验;

- 精通暖通设计原理;
- 熟练使用相关设计软件,熟悉本专业各项规范及最新技术发展动态;
- 有暖通专业主任工程师经验者优先;
- 细心严谨,有良好的职业素质、团队精神及沟通协调能力。

### 暖通工程师

- 全日制院校暖通专业本科以上学历;
- 5 年以上工作经验;
- 精通建筑暖通专业,了解给排水设计原理;
- 细心严谨,有良好的职业素质、团队精神及沟通协调能力;
- 熟悉生态节能技术者优先。

### 电气工程师(强弱电)

- 全日制院校建筑电气专业本科以上学历;
- 精通民用建筑和公共建筑强、弱电设计,有智能大厦设计经验者优先;
- 5 年以上工作经验;具备独立完成本专业设计工作的能力;
- 熟练使用相关设计软件,熟悉本专业各项规范及最新技术发展动态;
- 细心严谨,有良好的职业素质、团队精神及沟通协调能力。

### 给排水工程师

- 全日制院校给排水专业本科以上学历;
- 5 年以上大型设计院工作经验;
- 具备独立完成本专业设计工作的能力,熟悉本专业各项规范及最新技术发展动态;
- 细心严谨,有良好的职业素质、团队精神及沟通协调能力。

以上职位工作地点为北京及上海分公司,有意者请将简历发送至:

whr@werkhart.com (北京公司)