

# 纤维或织物负载光催化剂的研究进展

褚朱丹, 邱琳琳, 庄志山, 陈悦, 杜平凡\*

(浙江理工大学 材料与纺织学院、丝绸学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**概述了光催化技术的机理和发展, 详细介绍了纳米  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZnO}$  等光催化剂负载于纤维或织物上的研究进展及存在的问题, 展望了光催化剂负载纤维或织物的发展方向。

**关键词:**光催化剂; 负载; 纤维; 织物; 研究进展

**中图分类号:** O643.32; X703.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-0356(2018)11-0006-05

科学技术进行着一次又一次的革新, 工业文明在给人类物质生活带来便利的同时也留下了数量巨大且难以自然降解的有机污染物。2017年我国工业污染虽较2016年同比下降了6.5%<sup>[1]</sup>, 但污染的治理是一项庞大而复杂的系统工程, 仍然需要全社会共同努力。在过去的几十年中, 传统的生物和物理处理方法(吸附、超过滤、混凝等)是去除有机污染物的主要技术。

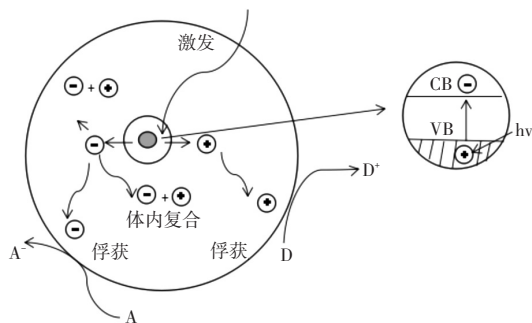
光催化是1970年左右兴起的一种高级氧化降解有机污染物的技术<sup>[2]</sup>。1972年, 日本科学家 Fujihima 和 Honda<sup>[3]</sup>首次发现金红石型  $\text{TiO}_2$  单晶电极能在常温常压下将水光分解为氢气和氧气, 这一发现在科学界引起了很大的轰动, 此后, 越来越多的研究者开始开展光催化相关研究。光催化剂是光催化技术的核心, 因其具有极高的反应活性和处理效率及对目标污染物的无选择性等特性而备受关注, 时至今日, 光催化领域的研究依然方兴未艾。

但是光催化剂粉体在催化降解水中有机污染物时存在不易回收而造成二次污染的缺点。为此研究者们试图将光催化剂负载在大尺度、易于回收的材料上以解决上述问题。其中, 将光催化剂负载于纤维或织物上由于具有便利和廉价等优点, 具有重大的研究意义。目前已开展的相关研究中, 负载于纤维及织物上的光催化剂包括纳米  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{In}_2\text{O}_3$ 、钙钛矿材料和铋系化合物等。

## 1 光催化技术的机理

半导体催化剂是光催化技术的关键, 其能带结构

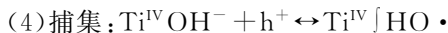
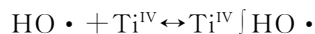
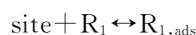
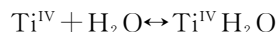
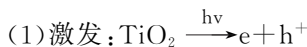
与金属不同的是, 半导体的价带(VB)和导带(CB)之间存在一个禁带, 当光源的辐射能大于半导体的禁带能级差时, 半导体价带中的电子跃迁进入导带, 从而在导带中产生具有还原能力的光生电子以及在价带中形成具有氧化能力的光生空穴, 如图1所示。氧化电位在半导体价带位置以上的物质(D, 电子给体)可被光生空穴氧化, 还原电位在半导体导带以下的物质(A, 电子受体)可被光生电子还原。虽然电子和空穴(光生载流子)产生后经历多个变化途径, 但是对光催化反应过程来说影响最大的两个相互竞争的过程就是电子-空穴的捕获和复合。



注: -为还原性的电子, +为氧化性的空穴

图1 光催化反应机理示意图

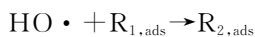
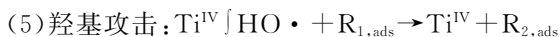
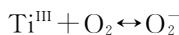
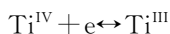
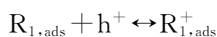
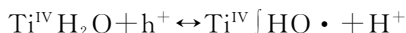
以  $\text{TiO}_2$  为例, 其光催化降解过程的具体步骤如下:



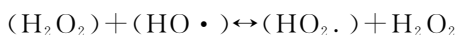
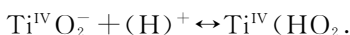
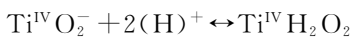
收稿日期: 2018-09-17

作者简介: 褚朱丹(1995-), 女, 硕士, 主要研究方向为纤维和织物负载光催化剂, E-mail: 179091935@qq.com。

\* 通信作者: 杜平凡(1980-), 男, 副教授, 主要从事功能纺织品、智能纺织品、可穿戴纺织结构柔性能源器件等研究, E-mail: dupf@zstu.edu.cn。



(6)其他自由基反应:



## 2 纳米 TiO<sub>2</sub> 负载于纤维或织物的研究进展

### 2.1 纳米 TiO<sub>2</sub> 的制备

1976年,加拿大学者 Carey 等<sup>[4]</sup>利用 TiO<sub>2</sub> 光催化技术将多氯联苯溶液经 UV 光照射 30 min 后成功地光解脱氯,首次将 TiO<sub>2</sub> 技术应用于剧毒化合物多氯联苯的降解研究,开启了光催化技术废水处理的新纪元,具有十分重要的意义。1977年, Frank 等<sup>[5]</sup>发现利用 TiO<sub>2</sub> 光催化能够分解水中的氰化物。此后,其他研究者进一步证实了光催化可使许多有机物得到有效降解,或完全矿化为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等无机物<sup>[6-7]</sup>,催化氧化技术在消除环境污染物中的作用得到越来越广泛的认可,尤其在处理水中难降解污染物方面极具应用潜力。目前, TiO<sub>2</sub> 光催化技术已经被应用于处理酚类污染物、硝基芳类、卤代物、表面活性剂、长效农药等方面,国际组织甚至将其列为难生物降解的有机污染物处理的推荐技术。

气相法和液相法是制备 TiO<sub>2</sub> 的主要方法<sup>[8]</sup>。气相法包括低压气体蒸发法、活性氢-熔融金属反应法、溅射法流动液面上真空蒸发法、钛醇盐气相水解法、TiCl<sub>4</sub> 高温气相水解法、钛醇盐气相分解法等;液相法包括沉淀法、水热法、溶胶凝胶法、微乳液法等。

### 2.2 以纳米 TiO<sub>2</sub> 为主体光催化剂负载于纤维或织物

TiO<sub>2</sub> 是最常用的光催化剂,许多研究者通过改性来提高它的光催化效应。TiO<sub>2</sub> 的晶型有 3 种:板钛矿 (brookite)、锐钛矿 (anatase) 和金红石 (rutile),如图 2 所示。不同晶型的催化活性有明显差异,其中,板钛矿型 TiO<sub>2</sub> 不稳定;锐钛矿型 TiO<sub>2</sub> 晶格中含有较多的缺陷,从而产生较多的氧空位来捕获电子,所以具有较高的活性;金红石型 TiO<sub>2</sub> 是最稳定的晶型结构,具有较

好的晶化态,缺陷少,导致电子和空穴容易复合,几乎没有光催化活性。

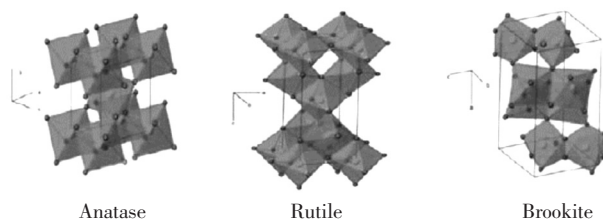


图 2 TiO<sub>2</sub> 的 3 种晶型结构<sup>[9]</sup>

为了改善纳米 TiO<sub>2</sub> 因颗粒较小而导致在使用环境中易于团聚和失活的缺点,可以将其负载于一定的载体上,如棉纤维、碳纤维、玄武岩纤维、玻璃纤维或织物等材料上。

杨梓薇等<sup>[10]</sup>通过紫外辐照和超声法将不同表面性质的 TiO<sub>2</sub> 纳米粒子负载到棉织物上制成光催化材料,通过降解甲基橙试验对其光催化活性进行分析。结果表明,材料具有良好的降解能力,并且 TiO<sub>2</sub> 纳米粒子与经紫外辐照后的棉织物结合更牢固,具有更好的耐久性及更优异的光催化活性。Sadr 等<sup>[11]</sup>采用声纳合成和超声辐照法将 TiO<sub>2</sub> 负载于棉织物上,经研究发现,制得的棉织物具有良好的自洁性能和防紫外功能,还具有优异的洗涤耐久性。Kale 等<sup>[12]</sup>在棉织物表面进行涂覆纤维素-TiO<sub>2</sub> 来实现棉织物的自清洁能力。通过洗涤牢度的仪器表征表明,织物的硬度是永久性的,自清洁性能是稳定的。

李显华等<sup>[13]</sup>比较了不同制备方法制备的 TiO<sub>2</sub>/碳纳米纤维复合材料对罗丹明 B 的催化降解能力,试验对比表明,与共混法制备的 TiO<sub>2</sub>/碳纳米纤维复合材料相比,水热合成法制备的复合材料虽然负载了较多的 TiO<sub>2</sub>,降解率高,但经过 5 次循环后,降解率从 98.8% 降到 92.8%;而共混法制备的复合材料虽然 TiO<sub>2</sub> 负载量小,降解率稍低,但循环稳定性优异。

Luo 等<sup>[14]</sup>在 Ti 溶胶中浸渍预热玄武岩纤维,然后在 300~600 °C 进行烧结得到玄武岩纤维/TiO<sub>2</sub> 复合材料。通过 SEM 等仪器进行表征,可以发现 TiO<sub>2</sub> 在玄武岩纤维表面分布均匀,随着烧结温度的升高, TiO<sub>2</sub> 的晶型由非晶相转变为锐钛矿相,再到混合的锐钛矿和金红石相。通过降解甲基红可以发现玄武岩纤维/TiO<sub>2</sub> 复合材料具有优异的光催化性能,在可见光催化领域具有潜在的应用价值。

Pham 等<sup>[15]</sup>用溶胶-凝胶法制备负载了 Ag-TiO<sub>2</sub>

的亚光玻璃纤维,采用 Ag-TiO<sub>2</sub>/GF 光催化剂在可见光下对葡萄球菌(STAPH)的细菌消毒效果进行了试验研究。研究表明,制备的材料对葡萄球菌有良好的消毒效果,且掺杂 Ag 后的光催化效果更好。

龚昕等<sup>[16]</sup>用溶胶-凝胶法在玻璃纤维上负载了 TiO<sub>2</sub> 薄膜,进行了以初始浓度为 10 mg/L 的水中腐殖酸为目标污染物的降解试验。结果表明,提高光照强度能促进腐殖酸的分解,溶液的 pH 越低,反应速率越快,腐殖酸的去除效果越好,腐殖酸的去除效率随空气流通量的增大呈现先上升后下降的变化趋势,但影响不大。

邢宏伟等<sup>[17]</sup>采用溶胶-凝胶法在 BFSF(高炉渣纤维)载体表面负载 TiO<sub>2</sub>,制备了 TiO<sub>2</sub>/BFSF 光催化材料,试验通过降解亚甲基蓝(MB)为目标来评价样品的光催化活性。结果表明,TiO<sub>2</sub>/BFSF 光催化材料表面负载了一层均匀密实的锐钛矿型 TiO<sub>2</sub>,当紫外光照射 180 min 时,亚甲基蓝的降解率达到 92.5%。循环利用 4 次后,TiO<sub>2</sub>/BFSF 对亚甲基蓝的降解率还有 63%。

### 2.3 TiO<sub>2</sub> 材料存在的问题

作为环境光催化材料,TiO<sub>2</sub> 对反应物具有较高的吸附性和反应活性,以及较高的光利用率和较长的寿命。由于 TiO<sub>2</sub> 本身结构与性能的限制,必须采取多种途径如晶型优化、颗粒细化、表面处理、增加比表面积、离子掺杂等来进一步提高 TiO<sub>2</sub> 光催化材料的性能。同时,TiO<sub>2</sub> 的光吸收范围窄,不能最大化利用太阳能的问题也有待解决。

由于 TiO<sub>2</sub> 颗粒太小,回收困难,因此将其负载于纤维或织物是一种常见的催化优化方案,通常有两种负载方法:一是将其负载到载体上形成薄膜;二是仅仅固定在纤维或织物上。这两种方法都存在一定的缺点,薄膜法制备的薄膜不容易均匀,可能导致龟裂;而固定法负载上去的 TiO<sub>2</sub>,其附着性较差,易于脱落。

另外,如何制备得到具有较高亲水性,同时还具有耐酸碱、抗腐蚀特点的 TiO<sub>2</sub> 光催化剂也是今后研究的重点。

## 3 纳米 ZnO 负载于纤维或织物

### 3.1 以纳米 ZnO 为主体光催化剂负载于纤维或织物的研究进展

ZnO 是第二到第六主族化合物半导体材料中最重

要的成员之一,属于直接带隙半导体<sup>[18]</sup>,具有良好的热电性能、紫外吸收性能和化学稳定性,是一种性能优越的功能材料,在传感器、光电器件、压电器件、场发射器件、紫外激光器等方面均具有广阔的应用前景,作为光催化剂也有着某些优点,如无毒性和低成本。

张越等<sup>[19]</sup>采用金属醇盐制备出均匀稳定的纳米 ZnO 溶胶,再将其负载于苧麻纤维上,通过煅烧等处理得到 ZnO-苧麻纤维光催化材料,以浓度为 5 mg/L 的亚甲基蓝为目标污染物进行降解实验。结果表明:制备得到的 ZnO-苧麻纤维光催化材料对亚甲基蓝有一定的降解效果,自然光光照 8 h 后的降解率为 75.52%。孙晓竹等<sup>[20]</sup>通过溶胶-凝胶法制备负载 ZnO 纳米颗粒的棉织物光催化材料,通过表征证实生成了紧密附着在棉织物表面的 ZnO 颗粒。光催化研究表明,负载 ZnO 的织物对亚甲基蓝具有有效、稳定的光催化降解能力。

林皓等<sup>[21]</sup>采用原位负载的方式,实现了 ZnO 在活性碳纤维上的负载,降低了制备成本并提高了 ZnO 的负载量。同时,制备得到的 ZnO-活性碳纤维为纳米级,比表面积大,大大提高了对有机污染物的吸附性能,提高了光催化活性。Chen 等<sup>[22]</sup>采用水热法将三维花状 ZnO 微结构附着于活性碳纤维(ACF)表面,以甲基橙溶液为目标污染物与纯 ZnO 进行降解对比试验。结果表明,ZnO/ACF 复合物在甲基橙降解中表现出比纯 ZnO 更加优异的光催化活性。

Pan 等<sup>[23]</sup>采用电纺水热法,成功制备了 ZnO/Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 异质结(Z 型结构)的棉纤维素纳米纤维骨架,并以亚甲基蓝为目标污染物进行降解试验,图 3 是其光催化剂机理。试验结果表明,由于 ZnO/Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 的异质结构及 CCNFs 的高分散性,该光催化剂具有较好的催化降解能力和循环稳定性,因此 Z 型棉纤维素纳米纤维框架有望成为绿色可回收光催化剂的候选材料之一。

### 3.2 ZnO 材料存在的问题

国内外学者对于纳米 ZnO 光催化材料的研究已取得了一定的进展,但仍然存在许多不足,如其制备技术还不完善,形成机理、掺杂机理、光催化机理以及应用性能还应进行系统研究。同时 ZnO 本身禁带宽度较宽,为 3.37 eV<sup>[24]</sup>,仅能吸收紫外光,光催化活性偏低,单一 ZnO 材料制成的光催化剂无法很好地满足工业要求。因此,有研究者将其与纳米 TiO<sub>2</sub> 粒子等结合

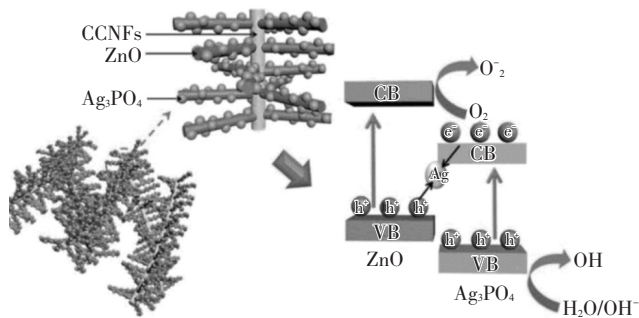


图3 ZnO/Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 异质结型光催化剂的作用机理

形成复合光催化剂来协同降解有机污染物。如任铁强等<sup>[25]</sup>将均匀沉淀法制得的碱式碳酸锌前驱体与 TiO<sub>2</sub> 溶胶复合,得到 ZnO/TiO<sub>2</sub> 复合光催化剂,并以亚甲基蓝为目标污染物进行降解试验,结果表明:ZnO/TiO<sub>2</sub> 复合光催化剂对亚甲基蓝的效果明显优于纯纳米 ZnO。另外,ZnO 在纤维或织物上的负载稳定性及循环利用方面也应加以关注。

#### 4 其他光催化剂负载于纤维或织物的研究进展

TiO<sub>2</sub> 是当前使用最广泛的光催化剂<sup>[26]</sup>,ZnO 在部分工业光催化领域也有所应用。除此以外,对 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、铋系(如钒酸铋、钨酸铋、钼酸铋、磷酸铋、氧化铋)和钙钛矿型光催化剂等也有一定研究。

Li 等<sup>[27]</sup>利用 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的空心球降解罗丹明 B 溶液,并与 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米方块进行比较。结果表明,In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的空心球降解罗丹明 B 的效果更好。

周山权等<sup>[28]</sup>先用水热一煅烧法将 SiO<sub>2</sub> 半导体与 BiVO<sub>4</sub> 进行复合,再用低温浸渍法将 SiO<sub>2</sub>-BiVO<sub>4</sub> 复合光催化剂负载在经浓碱处理后的涤纶织物表面,制备出涤纶负载 SiO<sub>2</sub>-BiVO<sub>4</sub> 光催化功能织物。并以活性蓝-19 为目标污染物进行降解试验,结果表明该光催化功能织物对活性蓝-19 的最大可降解浓度在 75 mg/L 以内,高浓度下的光催化性能受到抑制。与 SiO<sub>2</sub>-BiVO<sub>4</sub> 复合光催化剂粉体对比,涤纶负载 SiO<sub>2</sub>-BiVO<sub>4</sub> 光催化功能织物能更好地利用可见光源,具有更快的催化降解速率,可满足实际应用要求。

王肖杰等<sup>[29]</sup>将 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 通过溶胶-凝胶浸渍法分别负载到经改性处理的碳纤维、芳纶及 PAN 纤维上。通过表征表明,g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 较为均匀地分散、沉积在 3 种改性纤维上,并与改性纤维表面的官能团产生较为牢固的化学键合作用。光催化降解亚甲基蓝试验表明,3

种复合纤维在紫外和可见光下均可快速降解亚甲基蓝,光催化活性较高;并且在循环使用 8 次后,其活性仅仅略有降低然后趋向稳定,说明这 3 种复合纤维光催化剂具有良好的稳定性。

Zhang 等<sup>[30]</sup>采用简便的湿化学方法制备了异质结构的 MaSi<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 光催化剂(MA 代表 CH<sub>3</sub>NH<sup>+</sup>),通过降解罗丹明 B 的试验表明 MaSi<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 光催化剂在 40 min 内能完全降解罗丹明 B(97%),其光催化性能优于纯 MaSiN<sub>3</sub> 和纯 TiO<sub>2</sub>。

#### 5 结语

随着社会和经济的快速发展,人类对自然资源的需求量越来越大,在开发利用自然资源的同时,大量的有机污染物随之产生。光催化是一种非常具有潜力的有机物降解技术,目前较为常见的光催化剂包括 TiO<sub>2</sub>、ZnO、g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、磷酸银、氧化钨、铋系光催化剂等。对光催化剂的使用主要有两种方式,一是直接使用光催化剂粉体,二是将光催化剂负载于其他材料之上。在实际应用中,为了避免光催化剂粉体后期分离回收困难的问题,其负载技术越来越受到重视。但是常规的负载技术存在以下问题:

- (1)颗粒负载不均衡、负载牢固性不够;
- (2)较宽的带隙决定了它只能被紫外光所激发,而紫外光在太阳能中所占的比例不到 5%,导致很难利用太阳能来实现有效 TiO<sub>2</sub> 光催化;
- (3)材料的固有特性易改变以及无法大规模生产等。

将光催化剂负载于纤维或织物上,既不改变负载材料的原有特性,又能使光催化剂得到均匀牢固负载并充分发挥催化功能,是一项值得进一步研究和发展的光催化改性技术,具有巨大的应用前景和社会经济效益,同时如何结合将 TiO<sub>2</sub> 的光催化能力从紫外区拓展到占太阳能大多数的可见光区域也是当前国际上材料研究的热点和难点问题。

#### 参考文献:

- [1] 江帆,邵甜.生态治理显成效,好水好气超八成[N].浙江日报,2018-6-5.
- [2] 张彭义,贾瑛.光催化材料及其在环境净化中的应用[M].第1版.北京:化学工业出版社,2016.
- [3] FUJISHIMA A, HONDA K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. Nature, 1972.



- 238; 37-38.
- [4] CAREY J H, LAWRENCE J, TOSINE H M. Photodechlorination of PCB's in the presence of titanium dioxide in aqueous suspensions [J]. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 1976, 16(6): 697-701.
- [5] FRANK S N, BARD A J. Heterogeneous photocatalytic oxidation of cyanide ion in aqueous solutions at titanium dioxide powder[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1977, 8(14): 303-304.
- [6] ASAHI R, MORIKAWA T, OHWAKI T, *et al.* Visible-light photocatalysis in nitrogen-doped titanium oxides[J]. *Science*, 2001, 293(5 528): 269-271.
- [7] KHAN S U M, AL-SHAHRY M, INGLER W B. Efficient photochemical water splitting by a chemically modified n-TiO<sub>2</sub> [J]. *Science*, 2002, 297(5 590): 2 243 - 2 245.
- [8] 王祉诺, 李梦雨, 郭 玉, 等. 纳米 TiO<sub>2</sub> 制备及其应用研究进展[J]. *中国陶瓷工业*, 2018, (2): 21-25.
- [9] 陈 琳, 杨苏东, 王传义, 等. 二氧化钛光催化材料及其改性技术研究进展[J]. *离子交换与吸附*, 2013, 29(1): 86-96.
- [10] 杨梓薇, 周顺利, 王 锐, 等. 纳米二氧化钛负载棉织物的制备及性能[J]. *高等学校化学学报*, 2017, 38,(10): 1 880-1 887.
- [11] AKHAVAN S F, MONTAZER M. In situ sonosynthesis of nano TiO<sub>2</sub> on cotton fabric[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21(2): 681-691.
- [12] KALE B M, WIENER J, MILITKY J, *et al.* Coating of cellulose-TiO<sub>2</sub> nanoparticles on cotton fabric for durable photocatalytic self-cleaning and stiffness[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 150: 107-113.
- [13] 李显华. TiO<sub>2</sub>/碳纳米纤维复合材料结构设计及其光催化降解性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
- [14] 罗大军, 徐彩云, 高红娇, 等. TiO<sub>2</sub> 负载玄武岩纤维毡复合材料的制备及其光催化性能[J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(10): 2 493-2 497.
- [15] PHAM T D, LEE B K. Feasibility of silver doped TiO<sub>2</sub>/glass fiber photocatalyst under visible irradiation as an indoor air germicide[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11(3): 3 271 - 3 288.
- [16] 龚 昕. 玻璃纤维负载二氧化钛光催化处理水中腐殖酸的应用基础研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2015.
- [17] 邢宏伟, 谷少鹏, 刘志刚, 等. 高炉渣纤维负载 TiO<sub>2</sub> 光催化材料的制备及其光催化性能[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(8): 2 329-2 334.
- [18] LAM S M, QUEK J A, SIN J C. Mechanistic investigation of visible light responsive Ag/ZnO micro/nanoflowers for enhanced photocatalytic performance and antibacterial activity[J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology A Chemistry*, 2018, 353:171-184.
- [19] 张 越, 张秀林, 刘庆生, 等. 负载纳米 ZnO 麻纤维预氧丝的制备和光催化性能[J]. *材料导报*, 2011, (s1): 110-112.
- [20] 孙晓竹, 权 静, 聂华丽, 等. 负载纳米氧化锌棉织物的制备及其光催化性能的研究[J]. *印染助剂*, 2015, 32(11): 21-24.
- [21] 林 皓, 赵璠云, 赵升云, 等. 活性碳纤维膜负载 ZnO 光催化剂的制备方法: 106824160 A [P]. 2017.
- [22] CHEN G, WANG Y, SHEN Q, *et al.* Synthesis and enhanced photocatalytic activity of 3D flowerlike ZnO microstructures on activated carbon fiber[J]. *Materials Letters*, 2014, 123(17):145-148.
- [23] PAN J, ZHANG X, MEI J, *et al.* The cotton cellulose nanofibers framework of Z-Scheme ZnO/Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, heterojunction for visible-light photocatalysis[J]. *Science Materials in Electronics*, 2017, 28(23): 1-6.
- [24] 魏鹏飞, 余小红, 李 尧. 氧化锌光催化剂的掺杂与复合研究进展[J]. *江汉大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(1): 42-48.
- [25] 任铁强, 张 冰, 孙 悦, 等. TiO<sub>2</sub>/ZnO 复合光催化剂的制备及其光催化性能研究[J]. *精细石油化工*, 2015, 32(5): 1-4.
- [26] WANG Q, FAN J, ZHANG S, *et al.* In situ coupling of TiO<sub>2</sub> with rutile TiO<sub>2</sub> as a core-shell structure and its photocatalysis performance [J]. *Rsc Advances*, 2017, 7(86):54 662-54 667.
- [27] LI B, XIE Y, JING M, *et al.* In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hollow microspheres: synthesis from designed In(OH)<sub>3</sub> precursors and applications in gas sensors and photocatalysis [J]. *Langmuir*, 2006, 22(22): 9 380-9 385.
- [28] 周山权, 王振华, 何瑾馨. 负载 SiO<sub>2</sub>-BiVO<sub>4</sub> 涤纶织物的光催化性能[J]. *印染*, 2015, (17): 1-5.
- [29] 王肖杰. 石墨相氮化碳(g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)的改性、负载化及光催化性能研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2017: 15-18.
- [30] ZHANG W, ZHAO Q, WANG X, *et al.* Lead-free organic-inorganic hybrid perovskite heterojunction composites for photocatalytic application[J]. *Catalysis Science & Technology*, 2017, 7(13): 2 753-2 756.

制越来越成为一种主流,而目前国内针对个性化三维服装定制系统处于一种理论多于实际应用的处境。目前单一的个性化三维服装设计技术已较为成熟,大多数的个性化三维服装定制系统的产品多为T恤和西服的定制,产品种类较为单一,没有多元化的种类,定制模式单一,用户只能在系统提供的已有款式中选择,进行排列组合定制,不能让用户自己设计出系统中没有的款式,不能生成用户自己的独一无二的服装款式,不能让用户体验成为设计师的存在感和满足感。致力于服装整个行业设计集服装设计与生产、服装电子商务及配送为一体的一套完整的流程是未来服装行业的商业发展趋势。

### 参考文献:

- [1] 王楠楠,陈建伟.国内外服装MTM的比较及国内应用现状分析[J].山东纺织经济,2010,(11):88.
- [2] 罗静,杨继新,王旭.三维人体建模技术[J].大连工业大学学报,2009,(5):378-381.
- [3] 曹之江.面向个性化服装定制的三维人体测量研究[D].上海:东华大学,2008.
- [4] 李敏,唐晓中.电子化服装量身定制研究[J].纺织科技进展,2007,12(2):97-98.

- [5] 李惠敏,方建安,陈家训.在线服装eMTM系统的研究[J].北京纺织,2005,26(2):45-49.
- [6] 凌晨,方建安,陈家训.基于Web的远程服装定制系统的设计与实现[J].计算机工程与设计,2005,26(2):375-377.
- [7] 杨念.服装新技术的发展概况[J].纺织科学研究,2005,26(2):45-49.
- [8] 王海霞,张鸿志.网络虚拟服装设计[J].纺织导报,2002,(2):28-30.
- [9] 陈州.基于J2EE的某服装企业在线定制系统的研究[D].杭州:浙江理工大学,2009.
- [10] 万蕾.基于MTM个性化贴体女衬衫网上定制的研究[D].上海:东华大学,2012.
- [11] 徐春阳.特殊体型数字化服装定制系统[D].上海:东华大学,2012.
- [12] 高雅.对服装个性化定制电子商务系统的设计与实现[D].上海:东华大学,2014.
- [13] 李露.服装O2O网络定制系统研究与开发[D].上海:上海工程技术大学,2015.
- [14] 李丙洋.基于个性定制的婚纱设计系统的研究[D].天津:天津工业大学,2015.
- [15] 朱伟明,谢琴,彭卉.男西服数字化智能化量身定制系统研发[J].纺织学报,2017,38(4):151-157.

## Domestic Personalized 3D Garment Customization Technology and Its Development Trend

LI Xue-fei

(School of Computer Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China)

**Abstract:** With the development of the national economy, the clothing customization industry was more and more prosperous, and personalized 3D clothing customization technology had also been applied to fashion design. From static simulation of simple 2D garment deformation to dynamic simulation of complex 3D garments, personalized 3D clothing customization technology became mainstream trend of the garment industry. Personalized 3D garment customization technology was elaborated and analyzed. The application prospects and development trends of personalized 3D garment customization technology were detailed.

**Key words:** personalization; 3D clothing customization technology; application

(上接第10页)

## Research Progress of Fiber or Fabric Supported Photocatalysts

CHU Zhu-dan, QIU Lin-lin, ZHUANG Zhi-shan, CHEN Yue, DU Ping-fan\*

(Silk Institute, College of Materials and Textiles, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The mechanism and development of photocatalytic technology were briefly summarized. The research progress and existing problems of nano photocatalysts such as TiO<sub>2</sub> and ZnO loading on fiber or fabric was introduced in detail. The future development of photocatalysts loading technology was prospected.

**Key words:** photocatalysts; load; fiber; fabric; research progress