

引用格式:李淑芳,朱佳楠,吕雪龙,等. TiO_2 -分子筛/波纹型陶瓷纤维整体式催化剂的制备及其对气相甲苯光催化性能研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(3):35-42.

LI Shufang, ZHU Jianan, LÜ Xuelong, et al. Preparation of TiO_2 -zeolites/corrugated paper catalysts and their photoexcitation property for gaseous toluene[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(3): 35-42.

TiO_2 -分子筛/波纹型陶瓷纤维整体式催化剂的制备 及其对气相甲苯光催化性能研究

李淑芳,朱佳楠,吕雪龙,张文睿,武加峰

(山东科技大学 化学与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为获得一种具有吸附及光催化双重性质的复合光催化剂材料,以波纹型陶瓷纤维为基材,以疏水性分子筛为吸附剂,以钛酸丁酯为钛源,通过浸渍焙烧法制备了一系列 TiO_2 -分子筛/波纹型陶瓷纤维复合光催化剂材料。通过X射线衍射、扫描电镜、紫外-可见漫反射、氮气吸脱附对催化剂的晶体结构、颗粒形貌及吸光度等进行了测试。以3 290 mg/m³的气相甲苯为模型污染物,评价了该系列复合催化剂的光催化性能。结果表明:波纹型陶瓷纤维特殊的孔道结构,提供了大的宏观表面积,有利于分子筛和催化剂的负载,解决了内部光照问题。光催化与吸附相结合后比单纯吸附及单纯光催化效果更好,在分子筛负载量为45.52%时表现出良好的吸附性能;在 TiO_2 负载量为12.97%时,光降解甲苯效果最佳;且研究发现增大再生空速与延长光照时间均有利于催化剂的再生。

关键词: TiO_2 ;分子筛;波纹型陶瓷纤维;吸附;甲苯;光催化

中图分类号:TQ342

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)03-0035-08

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.03.005

Preparation of TiO_2 -zeolites/Corrugated Ceramic Fiber Catalysts and Their Photoexcitation Property for Gaseous Toluene

LI Shufang, ZHU Jianan, LÜ Xuelong, ZHANG Wenrui, WU Jiafeng

(College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of
Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to obtain photocatalyst materials with adsorption capacity and photocatalytic property, TiO_2 -zeolites/corrugated ceramic fiber composite photocatalyst materials were prepared by impregnation calcination method with corrugated ceramic fiber as the base material, hydrophobicity zeolites as adsorbent, and butyl titanate as the titanium source. The crystal structure, particle morphology, optical absorption properties were tested by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), ultraviolet-visible (UV-vis) absorption spectroscopy and N_2 adsorption-desorption method respectively. The photocatalytic performance of the composite catalyst was evaluated with 3 290 mg/m³ gasphase toluene as model pollutant. Results show that the special pore structure of corrugated ceramic provides a large macroscopic surface area, which is beneficial to the load of molecular sieve and catalyst, and

收稿日期:2017-10-27

基金项目:国家自然科学基金项目(21770605);青岛开发区科技开发计划项目(2014-1-35)

作者简介:李淑芳(1991—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事环境材料方面的研究. E-mail:lsfyz91@163.com

武加峰(1975—),男,山东泰安人,讲师,博士,主要从事催化材料方面的研究,本文通信作者.

E-mail:w_jiafeng@126.com

has solved the internal lighting problem. For the treatment effect, the combination of adsorption and photocatalysis is better than simple adsorption and simple photocatalysis. TiO_2 -zeolites/corrugated ceramic fiber composite photocatalyst materials show good adsorption performance at 45.52% of the molecular sieve. When TiO_2 is at 12.97%, the photodegradation of toluene was the best. Moreover, the study found that the increasing speed of regeneration and time of illumination are both beneficial to the regeneration of the catalyst.

Key words: TiO_2 ; zeolites; ceramic fiber; adsorption capacity; toluene; photocatalysis

目前以 NO_x 、 $\text{Hg}^{[1]}$ 、 SO_x 等为代表的大气污染以及以甲醛、苯系物为代表的挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)对室内空气的污染日益严重^[2]。由于建筑物密闭,污染物无法及时排出室外,不仅对人类身体健康造成了严重的威胁,也是一种资源浪费。针对当前室内空气污染较严重而净化技术又相对落后的现状,有必要开发出符合室内空气净化处理特点的有效方法。光催化技术是近年来被广泛关注的污染物处理技术^[3-5],具有反应条件温和、操作简单且无二次污染等优点,能将有机污染物完全氧化成 CO_2 和 H_2O ^[6-7]。而在众多光催化剂中, TiO_2 因为廉价无毒和光催化活性高而被广泛研究^[8],但因其比表面积小、活性位点少、电子-空穴易复合等缺点制约了其在工业应用中的发展。克服这些制约条件的有效方法之一是将纳米 TiO_2 用多孔性吸附材料进行负载化,Yin 等^[9]通过用溶胶凝胶法制备的 TiO_2 负载到介孔碳(mesoporous carbon, MC)上得到复合光催化剂并考察了其对甲基橙的光催化降解效果,结果表明复合光催化剂表现出更高的光催化效率,并观察到 MC 和 TiO_2 存在吸附-光催化的协同效应。分子筛具有巨大的比表面积且稳定性好^[10],能将低浓度的室内污染物吸附富集,提高光催化效率,可以作为光催化剂的优良载体^[9]。

杨青山^[10]分别用活性炭(activated carbon, AC)和活性炭纤维(activated carbon fibre, ACF)为载体负载纳米 TiO_2 制备出复合光催化剂,通过降解气相甲苯测试其光催化性能,结果显示:相同质量的光催化剂,ACF 负载光催化剂的活性高于 AC 负载光催化剂,因为 ACF 的比表面积明显高于 AC 的比表面积。Liang 等^[11]用浸渍水热法制备了 TiO_2 /ACF 复合材料,以甲苯为模型污染物,进行了光催化降解甲苯实验,但 ACF 的宏观构造导致光照利用率不高。Huang 等^[12]通过溶胶-凝胶法制备了 TiO_2 /分子筛复合材料,通过紫外灯降解甲苯,测试其光催化性能。但颗粒状的吸附材料单独负载 TiO_2 存在易团聚的问题,且在使用过程中,光照只作用于复合材料表面,光利用率低。本研究采用浸渍焙烧法制得了一系列 TiO_2 -分子筛/波纹型陶瓷纤维光催化复合材料,并以气相甲苯为模型污染物,考察了复合催化剂对 VOCs 的吸附净化处理效果,确定了最优的制备工艺条件。特别的,本研究采用的是疏水性分子筛,降低了水的竞争吸附,提高了对污染物的吸附效率。复合材料是以波纹型陶瓷纤维(图 1)为基材,从图 1(a)中看出波纹型陶瓷纤维形成的三维空间网状结构,有利于分子筛负载,大大减少了催化剂的团聚现象;同时,图 1(b)波纹型陶瓷纤维的宏观孔道为直孔道,光能照射到内部,增加光照面积,在实际应用中,能够减少气阻、提高光的利用率,为光催化降解 VOCs 提供了新的途径。

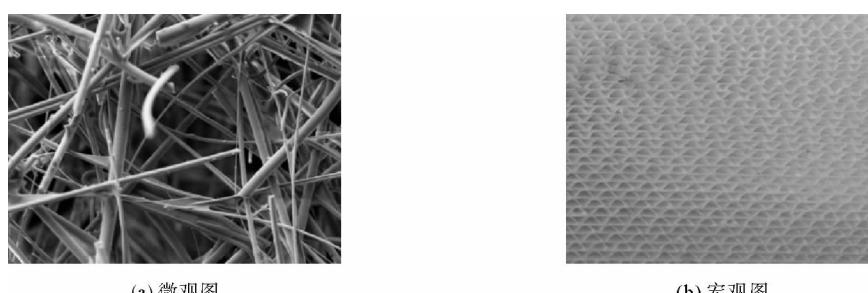


图 1 波纹型陶瓷纤维
Fig. 1 Corrugated ceramic fiber

1 实验方法

1.1 催化剂的制备

1.1.1 分子筛/波纹型陶瓷纤维的制备

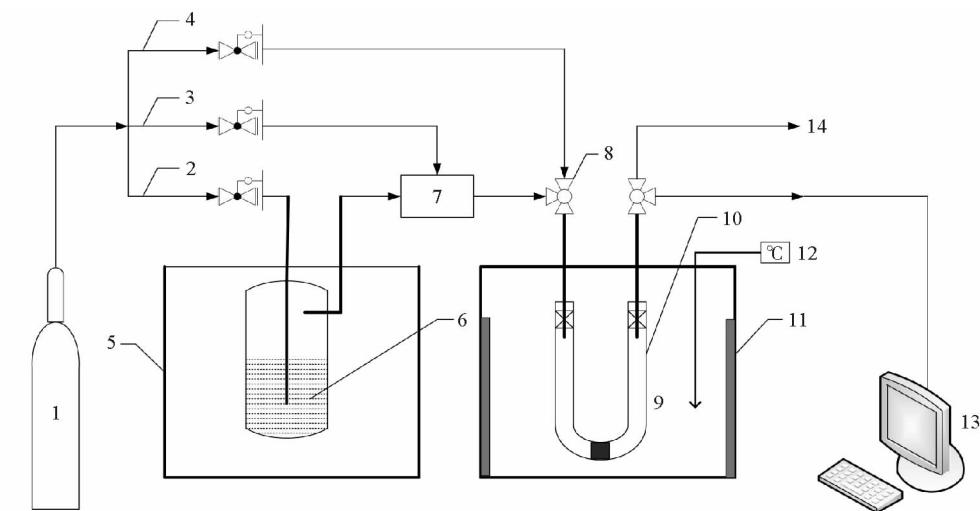
以波纹型陶瓷纤维为基材,首先将波纹型陶瓷纤维基材浸渍于分子筛浆液中(分子筛负载量通过控制浸渍次数实现),450 ℃下焙烧后待用。

1.1.2 TiO_2 -分子筛/波纹型陶瓷纤维复合材料的制备

以钛酸丁酯为钛源,无水乙醇为溶剂,称取一定量的钛酸丁酯,加入到磁力搅拌条件下的无水乙醇溶液中混合均匀得到 TiO_2 前驱液。将上述待用材料浸渍于 TiO_2 前驱液中(TiO_2 负载量通过控制钛酸丁酯的浓度实现),取出自然干燥至恒重。然后将上述材料置于管式炉中,在 N_2 气氛下 550 ℃焙烧 2 h,自然冷却至室温得到一系列 TiO_2 -分子筛/波纹型陶瓷纤维复合光催化剂材料。

1.2 实验装置

以 3 290 mg/m³ 的气相甲苯为模型污染物,以波长 365 nm、功率为 2×8 W 的紫外灯为光源,将复合材料样品置于自制反应器(图 2)中进行复合材料的光催化性能研究。来自空气瓶的空气分为 3 路:鼓泡气、稀释气和再生气。首先鼓泡气进入恒温的液态甲苯容器中进行鼓泡,含甲苯的鼓泡气与稀释气混合后进入自制反应器中,在暗处理条件下达到吸附饱和状态后,计算复合材料对甲苯的饱和吸附容量;然后打开紫外灯,通入再生气进行光催化降解实验;之后再进行再生后的甲苯吸附实验,计算复合材料再生后对甲苯的饱和吸附容量。采用带有氢火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID)的 SP-6800A 型气相色谱仪在线检测甲苯气体浓度的变化。



1—气瓶;2—鼓泡气;3—稀释气;4—再生气;5—冰浴;6—甲苯;7—混合器;8—三通;9—复合材料;
10—U型反应器;11—紫外灯;12—温度表;13—色谱工作站;14—大气

图 2 反应装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the reaction device

1.3 计算方法

实验前配置不同浓度的甲苯气体对色谱进行标定,通过气相色谱检测得到样品穿透曲线,积分出完全穿透曲线包围的面积,由标定的色谱响应值计算样品吸附容量。复合材料的光催化活性通过再生前后对甲苯的饱和吸附容量的变化和对甲苯的降解率来评价。

对穿透曲线进行积分,得到吸附容量的面积 S

$$S = q \times 10^{-6} \times \int_0^t (C_{in} - C_{out}) dt \quad (1)$$

式中:S—根据图谱积分面积所计算出的样品吸附量,mg;q—甲苯废气流量,mL/min;t—穿透时间,min; C_{in} —入口浓度 C_{in} 对应的毫伏信号,mg/m³; C_{out} —出口浓度 C_{out} 对应的毫伏信号,mg/m³。

样品的吸附容量

$$X = \frac{S}{m} \quad (2)$$

式中: X —样品吸附容量,mg/g;S—根据图谱积分面积所计算出的样品吸附量,mg;m—样品测定样品使用量,g。

样品降解率

$$R = \frac{X}{X_0} \times 100\% \quad (3)$$

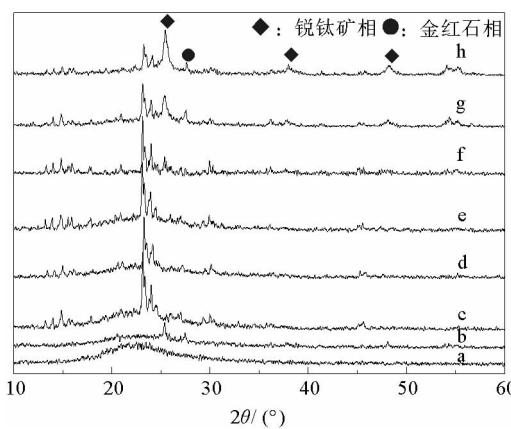
式中: R —样品的降解率,%; X —样品的再生吸附容量,mg/g; X_0 —样品的饱和吸附容量,mg/g。

2 结果与讨论

2.1 表征分析

2.1.1 XRD 分析

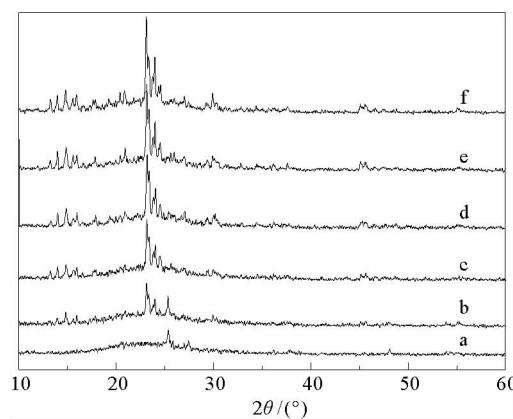
图3是分子筛负载量为35.38%,不同 TiO_2 负载量的光催化复合材料XRD图。由图可以看出,具有ZSM-5分子筛主要特征衍射峰($2\theta=23.18^\circ, 23.99^\circ, 24.45^\circ$), TiO_2 在 2θ 为 $25.28^\circ, 37.80^\circ$ 和 48.05° 分别对应锐钛矿型 TiO_2 的(101)、(004)和(105)晶面的衍射峰,在 2θ 为 27.46° 处对应金红石相的衍射峰,并且 TiO_2 在分子筛上的负载并没有破坏分子筛结构。 TiO_2 负载量为3.35%和6.67%时, TiO_2 的衍射峰不明显,可能因为负载量较少,分散性比较好;当负载量增加到12.97%时,出现了锐钛矿相和金红石相的特征衍射峰,随着负载量继续增加,锐钛矿相的特征峰强度逐渐增强,金红石相特征峰强度相对减小,说明 TiO_2 主要以锐钛矿相存在。并且锐钛矿相衍射峰的强度逐渐增加,半高宽变小,说明 TiO_2 的结晶度不断提高,分散性变差,出现了团聚现象,与扫描电镜中的结果一致。图4是 TiO_2 负载量为12.97%,不同分子筛负载量制备的光催化复合材料XRD图。由图可以看出,随着分子筛负载量的增加,分子筛的特征衍射峰强度逐渐



a—纯基材;b— TiO_2 -基材;c—分子筛-基材;d— TiO_2 负载量3.35%;e— TiO_2 负载量6.67%;f— TiO_2 负载量12.97%;
g— TiO_2 负载量22.74%; h— TiO_2 负载量28.85%

图3 不同 TiO_2 负载量的复合材料XRD图

Fig. 3 XRD patterns of the samples with different contents of TiO_2



a—分子筛负载量0%;b—分子筛负载量17.64%;c—分子筛负载量35.38%;d—分子筛负载量45.52%;e—分子筛负载量55.18%;f—分子筛负载量60.63%

图4 不同分子筛负载量的复合材料的XRD图

Fig. 4 XRD patterns of the samples with different contents of zeolites

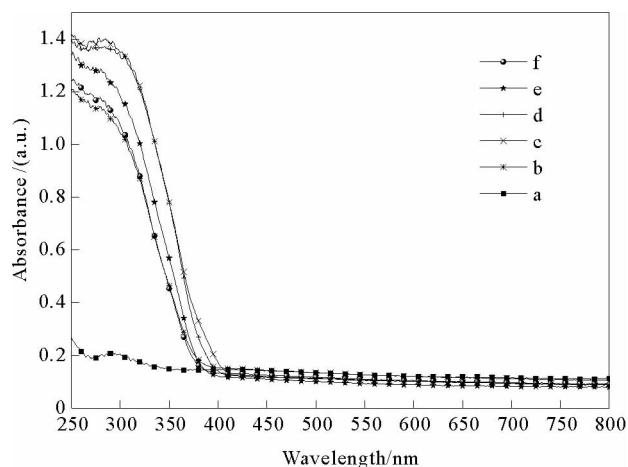
增加, TiO_2 的衍射峰强度相对减弱, 说明分子筛含量的增加提供了更大的比表面积, 促进了 TiO_2 的分散, 与光催化吸附性能变化趋势一致。

2.1.2 UV-vis 分析

图 5 是分子筛负载量为 35.38%, 不同 TiO_2 负载量的光催化复合材料的 UV-vis 吸收光谱图。由图 5 可以看出, 单纯负载分子筛的复合材料在紫外区域(波长<400 nm)的没有吸光能力, 当负载不同含量的 TiO_2 后, 不同 TiO_2 含量的复合材料具有相同的吸收光谱, 且在紫外区域的吸光能力明显提高, 当 TiO_2 负载量从 3.35% 增加到 6.67% 时, 对紫外光的吸收显著增加, 当负载量到 12.97%, 吸光能力达到最佳, 所以紫外光利用率高; 继续增加负载量, 吸光能力逐渐减弱, 可能是因为随着负载量的增加, TiO_2 在分子筛表面发生团聚, 导致比表面积降低, 进而对紫外光吸收降低。

2.1.3 SEM 和 TEM 分析

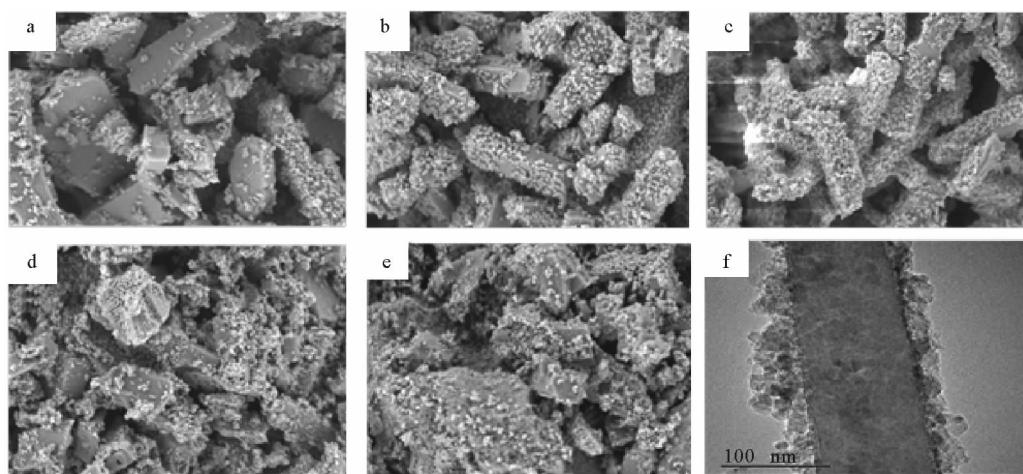
图 6(a-e)是分子筛负载量为 35.38%, 不同 TiO_2 负载量的 SEM 图。从图中可以看出, 通过浸渍焙烧法合成的纳米 TiO_2 负载在分子筛表面。当 TiO_2 负载量为 3.35% 时, 在分子筛上负载非常不均匀, 随着负载量继续增加, TiO_2 负载的逐渐紧密, 均匀性增加, 当负载量为 12.97% 时, TiO_2 在分子筛表面形成了均匀的一层, 但继续增加负载量, TiO_2 开始发生团聚, 并且随着负载量增加, 团聚现象越严重。图 6(f)是光催化吸附复合材料的 TEM(transmission electron microscopy)图。从图中可以观察到, TiO_2 负载后主要分散在分子筛外表面 20 nm 内。



a—分子筛-基材; b— TiO_2 负载量 3.35%; c— TiO_2 负载量 6.67%;
d— TiO_2 负载量 12.97%; e— TiO_2 负载量 22.74%; f— TiO_2 负载量 28.85%

图 5 复合材料的 UV-vis 图

Fig. 5 UV-vis patterns of the samples



a— TiO_2 负载量 3.35%; b— TiO_2 负载量 6.67%; c— TiO_2 负载量 12.97%; d— TiO_2 负载量 22.74%;
e— TiO_2 负载量 28.85% 的 SEM 图; f 为 c 的 TEM 图

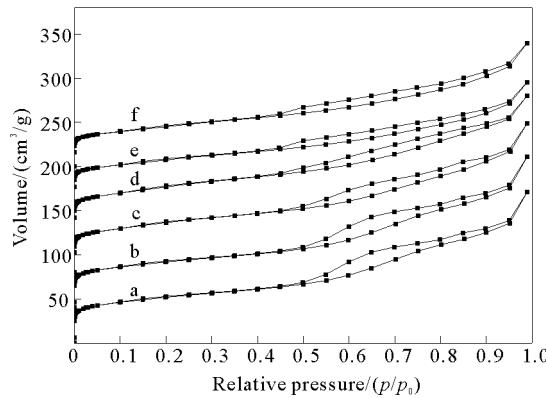
图 6 复合材料的 SEM、TEM 图

Fig. 6 SEM and TEM images of the samples

2.1.4 氮气吸脱附性能分析

图 7 为分子筛负载量为 35.38%, 不同 TiO_2 负载量样品的氮气吸附-脱附等温线图(b-f 向上相对平移)

40 cm³/g),考察了材料的多孔结构特性。从图中可以看出,吸附等温线在低相对压力区有快速上升的趋势,说明复合材料富含微孔结构,主要是分子筛提供的。等温线在0.5~1.0的高相对压力区出现明显的滞后环,表明复合材料具有介孔结构,主要是源于分子筛和TiO₂的堆积形成的二次介孔结构,这与SEM图的结果一致。复合材料的比表面积没有发生大的改变,主要在206~238 m²/g,孔径在0.68~0.75 nm,孔体积在0.19~0.24 m³/g,复合材料微孔比表面积达到70%以上,具有丰富的微孔结构,这有利于低浓度气相甲苯在分子筛表面的富集。



a—分子筛-基材;b—TiO₂ 负载量 3.35%;c—TiO₂ 负载量 6.67%;d—TiO₂ 负载量 12.97%;e—TiO₂ 负载量 22.74%;f—TiO₂ 负载量 28.85%

图 7 复合材料的氮气吸附-脱附等温线

Fig. 7 Nitrogen adsorption-desorption isotherms of the samples

2.2 光催化降解实验

2.2.1 分子筛负载量对吸附及光催化性能的影响

图8是再生时间为2 h,再生空速为3 500 h⁻¹,再生光强为16 W的条件下,TiO₂负载量为12.97%,不同分子筛负载量制备的TiO₂-分子筛/波纹型陶瓷纤维复合材料对甲苯吸附容量的影响图。从图中可以看出,在无分子筛负载的情况下,再生前后对甲苯的吸附容量较小,说明基材及TiO₂几乎不提供吸附能力。当负载上分子筛后,饱和吸附容量显著增加,但当分子筛负载量为60.63%时,饱和吸附容量开始降低,在分子筛负载量为55.18%时具有最大的吸附能力,说明随着分子筛负载量增加,复合材料的比表面积逐渐增加,从而具有更多的吸附活性位,但当负载量增加到一定量时,分子筛出现团聚现象,里层的分子筛被包裹,吸附作用减弱;开紫外灯再生后,复合材料吸附容量呈现先增加后降低的趋势,因为TiO₂负载量一定,光催化活性一定。

2.2.2 TiO₂ 负载量对吸附及光催化性能的影响

图9是再生时间为2 h,再生空速为3 500 h⁻¹,再生光强为16 W的条件下,分子筛负载量为35.38%,不同TiO₂负载量制备的TiO₂-分子筛/波纹型陶瓷纤维复合材料的对甲苯吸附容量的影响图。随TiO₂负载量的增加,复合材料对甲苯的饱和吸附容量会出现降低趋势。可能因为随TiO₂在分子筛上负载量的增加,分子筛在复合材料中的比重变小,故对甲苯的吸附容量减少。经过光催化降解甲苯后,随TiO₂负载量的增加,复合材料对甲苯的饱和吸附容量会出现先增加后降低的趋势,在负载量为12.97%时,光催化效果最佳,降解率达39.99%。因为TiO₂负载量较少时,结晶度低,故光催化活性低,随着TiO₂负载量的增加,结晶度逐渐增加,分散逐渐均匀,但当负载量太高时,TiO₂颗粒分布不均匀,在分子筛表面出现大量团聚现象,导致复合材料比表面积减少,故光催化降解效果降低。

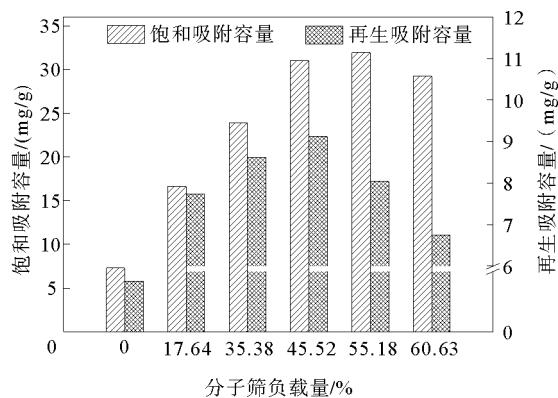
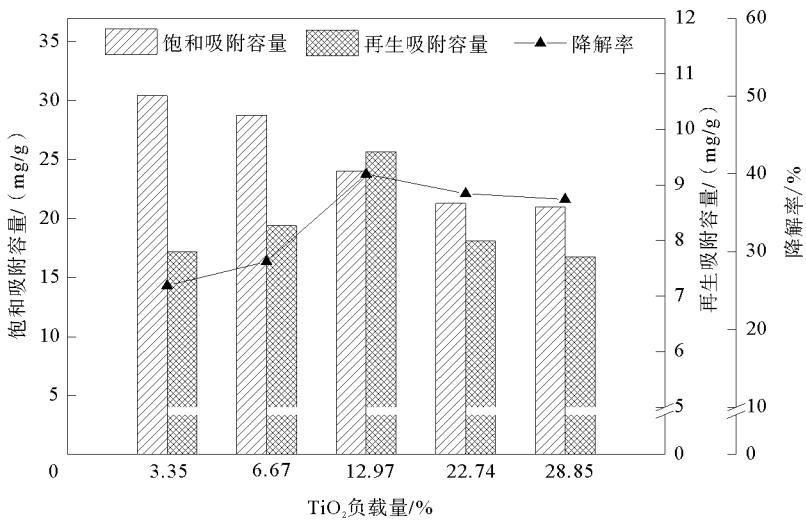


图 8 不同分子筛负载量复合材料的吸附光催化性能

Fig. 8 Adsorption capacity and photocatalytic property of the samples with different contents of zeolites

图9 不同 TiO_2 负载量的复合材料的吸附光催化性能Fig. 9 Adsorption capacity and photocatalytic property of the samples with different contents of TiO_2

2.3 再生条件实验

2.3.1 再生光照时间对再生性能的影响

图10是分子筛和 TiO_2 负载量分别为 35.38%、12.97% 的催化剂，在再生空速为 3500 h^{-1} ，再生光强为 16 W 的条件下，不同再生时间对光催化复合材料再生性能的影响图。可以看出，光照时间 1 h 时，降解率为 26.99%，降解效果较弱，主要是因为光照时间较短，被吸附的甲苯降解不完全。随光照时间增加，降解率是逐渐增加的，因为吸附在分子筛孔内甲苯逐渐被解吸出来，进而在分子筛表面被降解，光照增加到 4 h 后，降解率为 47.25%，继续增加光照到 5 h，降解率为 47.46%，增加的幅度明显减小，可能是随着光照时间增加，分子筛孔内与表面的甲苯浓度差逐渐减少，导致解吸速率降低。

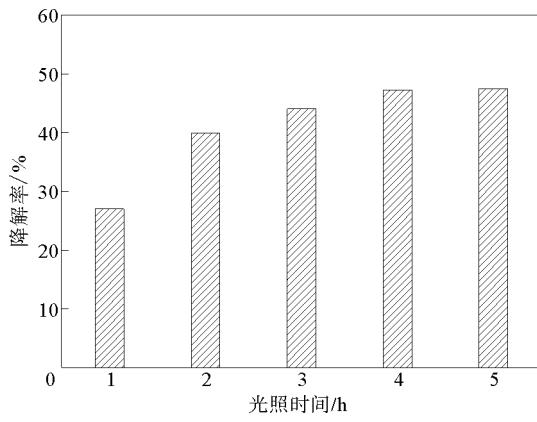


图10 再生光照时间对复合材料的再生性能的影响

Fig. 10 Effects of the regeneration time on the regeneration properties of the samples

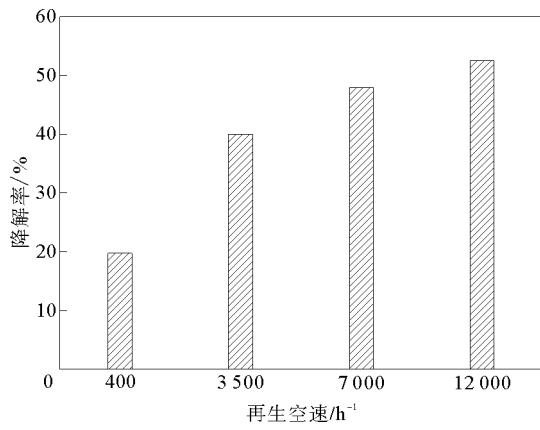


图11 再生空速对复合材料的再生性能的影响

Fig. 11 Effect of regenerative airspeed on the regeneration properties of the samples

2.3.2 再生空速对再生性能的影响

图11是分子筛和 TiO_2 负载量分别为 35.38%、12.97% 的催化剂，在再生时间为 2 h，再生光强为 16 W 的条件下，不同再生空速对光催化复合材料再生性能的影响图。可以看出，再生空速为 400 h^{-1} 时，降解率为 19.74%，因为空气中的 O_2 可以捕获电子形成 O_2^- 抑制电子空穴的复合，也可以形成 $\cdot\text{OH}^-$ ，提高光催化效

率,空速 400 h^{-1} 时,无法提供足够的氧,导致降解率低。故随着再生空速的增加,催化剂所处的环境中氧含量增加,故甲苯降解率逐渐增加。

3 结论

通过浸渍焙烧法制备了一系列 TiO_2 -分子筛/波纹型陶瓷纤维光催化复合材料。结果表明:分子筛均匀填充在陶瓷纤维表面,拥有较大的比表面积,SEM分析表明纳米 TiO_2 颗粒分散在分子筛表面, TiO_2 同时具有锐钛矿相和金红石相,促进了吸附光催化的协同作用。研究表明,复合材料比单纯的负载 TiO_2 光催化效果更好,光利用率高。随着分子筛负载量的增加,甲苯的吸附量逐渐增加,分子筛负载量为45.52%时,甲苯吸附量达到31.03 mg/g; TiO_2 负载量为12.97%时,甲苯降解率为39.99%;且研究发现:增大再生空速与延长光照时间均有利于催化剂的再生。特别地,本实验使用的分子筛为疏水性分子筛,降低了水的竞争吸附,提高了对气相甲苯的吸附能力,且以波纹型陶瓷纤维作为基材,增大了宏观负载面积,提高了光照利用率,为光催化降解低浓度VOCs污染物提供了新途径。

参考文献:

- [1] 赵可,张华伟,陈江艳,等.改性石油焦脱除单质汞的实验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2016,35(4):67-73.
ZHAO Ke,ZHANG Huawei,CHEN Jiangyan,et al. Removal of elemental mercury by the modified petroleum coke[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2016,35(4):67-73.
- [2] 景盛翱,戴海夏,钱华.光催化技术及其在室内空气净化方面研究现状[J].上海环境科学,2010,29(1):21-25.
JING Sheng'ao,DAI Haixia,QIAN Hua. The current situation of research on photocatalysis and its application in indoor air purification[J]. Shanghai Environmental Sciences,2010,29(1):21-25.
- [3] BIAN Z F,ZHU J,WANG J G,et al. Multitemplates for the hierarchical synthesis of diverse inorganic materials[J]. American Chemical Society,2012,134(4):2325-2331.
- [4] ZHU J,WANG S H,WANG J G,et al. Highly active and durable $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ visible photocatalyst in flower-like spheres with surface-enriched Bi_2O_3 quantum dots[J]. Applied Catalysis B: Environmental,2011,102(1/2):120-125.
- [5] CAO F L,WANG J G,LV F J,et al. Photocatalytic oxidation of toluene to benzaldehyde over anatase TiO_2 hollow spheres with exposed {001} facets[J]. Catalysis Communications,2011,12(11):946-950.
- [6] CHEN X,MA W H,LI J. Photocatalytic oxidation of organic pollutants catalyzed by an iron complex at biocompatible pH values: Using O_2 as main oxidant in a Fenton-like reaction[J]. Journal of Physical Chemistry C,2011,115(10):4089-4095.
- [7] ISMAIL A A,BAHNEMANN D W. One-step synthesis of mesoporous platinum/titania nanocomposites as photocatalyst with enhanced photocatalytic activity for methanol oxidation[J]. Green Chemistry,2011,13(2):428-435.
- [8] LI Y,JIANG Y,PENG S. Nitrogen-degradation of formaldehyde under blue doped TiO_2 modified with NH_4F for efficient photocatalytic light-emitting diodes[J]. Journal of Hazardous Materials,2010,182(1/2/3):90-96.
- [9] YIN B,WANG J,XU W,et al. Preparation of TiO_2 /mesoporous carbon composites and their photocatalytic performance for methyl orange degradation[J]. New Carbon Materials,2013,28(1):47-54.
- [10] 张希望,李淑芳,王晓航,等.A型分子筛/活性炭纤维复合材料的制备与吸附性能研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2016,35(4):74-79.
ZHANG Xiwang,LI Shufang,WANG Xiaohang,et al. Preparation and adsorption properties of zeolite A/activated carbon fiber composite materials[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2016,35(4):74-79.
- [11] BRUHWILER D,CALZAFERRI G. Molecular sieves as host materials for supramolecular organization[J]. Microporous Mesoporous Materials,2004,72(1/2/3):1-23.
- [12] 杨青山.负载型 TiO_2 光催化材料的制备及典型气相污染物降解性能研究[D].广州:华南理工大学,2010.
- [13] LIANG P,WEI A F,ZHANG Y Q,et al. Immobilisation of TiO_2 films on activated carbon fibres by a hydrothermal method for photocatalytic degradation of toluene[J]. Micro & Nano Letters,2016,11(9):539-544.
- [14] HUANG H B,LIU G Y,ZHAN Y J,et al. Photocatalytic oxidation of gaseous benzene under VUV irradiation over TiO_2 /zeolites catalysts[J]. Catalysis Today,2017,281:649-655.