

二氧化钛表面浸润性调控增强光催化氧化反应性能

卢净宇¹, 刘志萍¹, 盛夏¹, 封心建^{1,2}

(1. 苏州大学材料与化学化工学部, 仿生界面材料科学全国重点实验室, 苏州 215123;

2. 中国科学技术大学苏州高等研究院, 苏州 215123)

摘要 反应界面微环境是影响光催化性能的重要因素. 本文通过调控光催化剂的表面浸润性来改变反应界面微环境, 构筑了高效的三相界面光催化体系, 并用于光催化氧化有机物反应中. 将二氧化钛(TiO_2)纳米颗粒作为模型光催化剂, 通过在其表面接枝聚二甲基硅氧烷(PDMS)以提高疏水性. 结果表明, 疏水PDMS层使得光催化体系在反应界面处形成了气-液-固三相共存的微环境, 极大增加了界面氧气(O_2)的浓度; 同时, 疏水PDMS层大幅提高了有机分子在催化剂表面的吸附能力. 二者的协同作用促进了光催化氧化反应中超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)和羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的生成, 进而提高了光催化氧化反应效率. 研究结果为未来设计构筑高效的催化反应体系提供了新思路.

关键词 浸润性调控; 反应界面微环境; 三相界面; 光催化; 二氧化钛

中图分类号 O643

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20240571

Surface Wettability Regulation of Titanium Dioxide for Enhanced Photocatalytic Oxidation Reaction Performance

LU Jingyu¹, LIU Zhiping¹, SHENG Xia^{1*}, FENG Xinjian^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Bioinspired Interfacial Materials Science, College of Chemistry,

Chemical Engineering and Materials Science, Soochow University, Suzhou 215123, China;

2. Suzhou Institute for Advanced Research, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China)

Abstract The reaction interface microenvironment is an important factor that affects photocatalytic reaction performance. In this study, a highly efficient triphase interface reaction system was constructed by regulating the surface wettability for photocatalytic oxidation of organic compounds. Titanium dioxide (TiO_2) nanoparticle is used as a model photocatalyst, polydimethylsiloxane (PDMS) is grafted onto the surface to enhance the hydrophobicity. The results show that the presence of hydrophobic a PDMS layer enables the formation of a gas-liquid-solid triphase coexisting microenvironment at the reaction interface, which increases the interfacial oxygen (O_2) concentration. Meanwhile, the hydrophobic surface layer enhances the adsorption capability of organic molecule. Such synergistic effect promotes the generation of superoxide radicals ($\cdot\text{O}_2^-$) and hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$) and enhances the photocatalytic oxidation reaction. This work provides a novel approach to design and construction of efficient catalytic reaction systems.

Keywords Wettability regulation; Reaction interface microenvironment; Triphase interface; Photocatalysis; TiO_2

收稿日期: 2024-12-31. 网络首发日期: 2025-02-19.

联系人简介: 封心建, 男, 博士, 教授, 主要从事表界面化学与催化方面的研究. E-mail: xjfeng@suda.edu.cn

盛夏, 女, 博士, 副教授, 主要从事反应界面设计与光催化应用方面的研究. E-mail: shengxia@suda.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 21988102, 51772198, 21975171)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Nos.21988102, 51772198, 21975171).

光催化氧化是一种绿色的氧化反应,其主要反应过程为光激发半导体材料产生电子-空穴对,电子和空穴分别与氧气(O_2)及水反应,通过生成一系列具有氧化性的活性氧物质(ROS)[包括超氧自由基($\cdot O_2^-$)、羟基自由基($\cdot OH$)、双氧水(H_2O_2)和单线态氧(1O_2)等],进行氧化反应^[1-5].光催化氧化在水中污染物处理、有机物合成等领域具有重要应用^[6-10].长期以来,光催化剂的催化活性通常被认为是影响并决定光催化反应性能的主要因素,因此光催化材料的开发是研究重点^[11-14].然而,近年来研究发现,催化反应界面微环境对反应性能同样具有重要的影响.反应界面微环境会影响物质的传输、反应物的吸附、产物的脱附、催化反应的选择性、反应位点的稳定性、光生电荷的复合和分离等过程^[15-18].因此,设计和构筑新型反应界面微环境已成为促进催化反应性能的一种有效策略.

在传统光催化体系中,催化反应通常发生在光催化剂与水形成的固-液两相界面处.光催化氧化中所需的反应物 O_2 来自于溶液中的溶解 O_2 .由于 O_2 在水中的溶解度和扩散速率都很低,限制了界面处的 O_2 浓度^[19],进而抑制了光催化反应动力学.这些问题很难通过提高光催化剂的催化活性来解决.已有研究表明,通过调控光催化剂的表面浸润性,能够改变反应界面微环境^[20-25].如通过提高催化剂表面的疏水性,能够使得传统的固-液两相界面转变成气-液-固三相界面,从而提高气体反应物到催化反应界面的传输^[26-30].

基于此,本文以纳米二氧化钛(TiO_2)作为模型光催化剂,通过调控其表面浸润性,构筑高效的三相界面光催化反应体系,并用于光催化氧化有机物反应中.将聚二甲基硅氧烷(PDMS)接枝在 TiO_2 颗粒上,以增加其表面疏水性.结果表明,疏水的PDMS分子使得在反应界面处形成了气-液-固三相共存的微环境,极大增加了界面 O_2 的浓度;同时,疏水PDMS分子能够有效促进有机物在反应界面处的富集.二者的协同作用使得光催化反应的速率相较于传统两相体系提高了5倍.另外,通过调控PDMS层的厚度研究了表面浸润性调控对反应界面 O_2 的浓度、有机分子吸附及光催化反应动力学的影响规律,分析了反应中ROS的生成及光催化氧化反应过程.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

二氧化钛(TiO_2 ,金红石相,粒径约为25 nm)和5,5-二甲基-1-吡咯啉-N-氧化物(DMPO,纯度95%),阿拉丁生化科技股份有限公司;聚二甲基硅氧烷(PDMS,三甲基硅氧烷封端)和罗丹明B(RhB,纯度99%),上海麦克林生化科技有限公司;环己烷、无水乙醇和丙酮,分析纯,国药集团化学试剂有限公司; N,N -二甲基乙酰胺(DMAC),优级纯,上海泰坦科技股份有限公司;去离子水(电阻率 $18.2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$).

Regulus 8230型扫描电子显微镜(SEM),日本日立公司;EscaLab 250 XI型X射线光电子能谱分析仪(XPS)、Talos F200X G2型透射电子显微镜(TEM)和Evolution 220型紫外-可见分光光度计(UV-Vis),美国赛默飞世尔科技有限公司;JC2000D6型接触角测量仪,上海中晨数字技术设备有限公司;MP516型便携式溶解氧测量仪,上海三信仪表厂;JES-X320型电子自旋共振波谱仪(ESR),日本电子株式会社;VERTEX 70+HYPERION 2000型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),德国布鲁克公司.

1.2 实验过程

1.2.1 催化剂薄膜的制备 将1 mg TiO_2 纳米颗粒超声分散至去离子水中配制成溶液,然后将其滴涂在经过氧等离子体处理过的玻璃片上,得到催化剂薄膜,随后将薄膜在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 下烧结2 h,去除表面残留的有机物后备用.

1.2.2 在催化剂薄膜表面接枝PDMS层 配制一定质量分数(1%, 10%, 20%, 50%, 100%)的PDMS环己烷溶液,采用浸渍提拉法以 100 mm/min 的速度将制备好的 TiO_2 薄膜浸入PDMS环己烷溶液中,确保 TiO_2 薄膜完全浸没PDMS溶液后,再以相同的速度将薄膜提出,在室温下自然晾干样品.将经过浸渍提拉的样品在 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 下加热24 h,采用热固法将PDMS分子接枝在 TiO_2 表面,随后用环己烷清洗样品表面多余的PDMS后自然晾干.

1.3 溶液中 O₂ 浓度检测

通过检测不同体系中 O₂ 浓度的变化来对比界面 O₂ 浓度的相对大小. 使用便携式溶氧仪测量 RhB 染料溶液中的 O₂ 浓度. 在测量之前, 向溶液通入氮气 30 min 以去除溶解氧, 然后, 将负载有催化剂的玻璃片浸没到溶液中, 监测记录溶氧仪的读数.

1.4 光催化氧化反应

1.4.1 光催化氧化有机物 光催化实验采用单色紫外光[波长(367±5) nm]作为光源, 实验中光强为 30 mW/cm², 以 RhB 作为模型有机物, 将 2 mL 10 mg/L RhB 溶液加入石英比色皿中, 再放入先前制备的催化剂薄膜, 在 500 r/min 转速搅拌下进行实验. 并每隔一段时间使用紫外-可见分光光度计测量溶液的吸光度来计算 RhB 的浓度.

1.4.2 反应过程中 ROS 的检测 在光催化反应过程中, 使用 100 mmol/L DMPO 的 DMAC 溶液和水溶液分别用于捕获 ·O₂ 和 ·OH. 将溶液在与光催化反应相同的紫外光下辐照 5 min 后, 使用 ESR 对 ·O₂ 和 ·OH 进行检测, 仪器参数中调制宽度和振幅分别设置为 0.1 mT 和 600.

1.5 有机分子吸附量检测

将催化剂薄膜置于一定浓度的 RhB 溶液中, 在黑暗中静置, 定时测量溶液吸光度的变化, 据此计算薄膜对 RhB 分子的吸附量.

2 结果与讨论

2.1 三相界面光催化反应体系的表征

以粒径约 25 nm 的金红石相 TiO₂ 为模型光催化剂, 为了便于光催化剂的收集和重复利用, 将 TiO₂ 纳米颗粒负载在玻璃片上, 形成厚度约为 7 μm 的薄膜(图 S1, 见本文支持信息). 通过将该薄膜浸渍在含有 PDMS 的环己烷溶液中、提拉并加热, 实现 PDMS 在 TiO₂ 表面的接枝(PDMS@TiO₂). 随着环己烷溶液中 PDMS 质量分数的增加, 水的接触角逐渐增大, 表明 TiO₂ 表面疏水程度逐渐提高(图 S2, 见本文支持信息). 图 1 为未接枝, 经过 1% PDMS 以及 100% PDMS 接枝的 TiO₂ 的高分辨透射电子显微镜(HRTEM)照片, 与未接枝 TiO₂[图 1(A)]相比, 经过 PDMS 接枝后, TiO₂ 颗粒表面包裹了一层非晶层[图 1(B)], 且随着 PDMS 质量分数的增加, 该非晶层的厚度逐渐增加[图 1(C)]. 经过 100% PDMS 接枝的 TiO₂, 其表面非晶层厚度约为 2 nm.

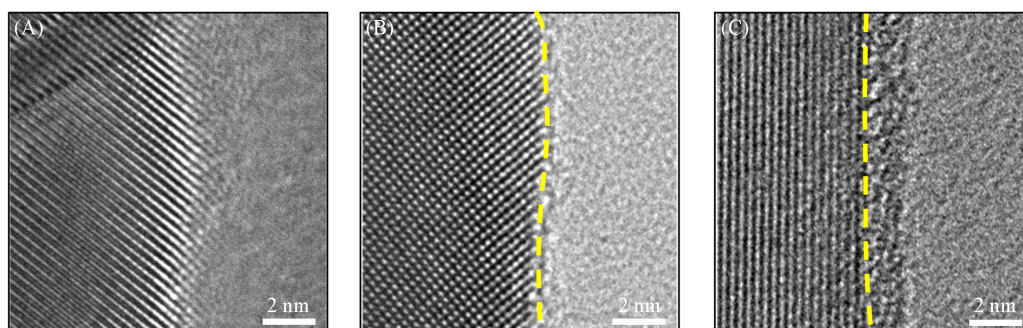


Fig. 1 HRTEM images of bare TiO₂(A), 1%PDMS@TiO₂(B) and 100%PDMS@TiO₂(C)

使用高角度环形暗场扫描透射电子显微镜(HAADF-STEM)对其进行元素分析, 能量色散谱图(EDS)如图 2 所示, 可见, 未接枝 TiO₂ 表面几乎没有 Si 元素信号[图 2(A)和(D)], 而经过表面接枝后均看到 Si 元素的存在[图 2(B)和(C)], 且 Ti 和 Si 元素呈现核壳分布[图 2(E)和(F)], 随着 PDMS 质量分数的增加, Si 壳层厚度逐渐增加, 这与 HRTEM 结果一致.

通过 XPS 进一步分析了 PDMS 在 TiO₂ 表面的接枝方式[图 3(A)~(C)]. 可见, 随着 PDMS 质量分数的增加, Si 元素的信号逐渐增强[图 3(B)]. 对 O_{1s} 峰进行分析, 随着 PDMS 质量分数的增加, Si—O—Si 峰逐渐增强[图 3(C)], 说明 PDMS 在 TiO₂ 表面量逐渐增加, 同时在 531.4 eV 处的峰对应于 Ti—O—Si 键^[31,32]的信号也逐渐增强, 表明 PDMS 通过形成 Ti—O—Si 键接枝到 TiO₂ 表面.

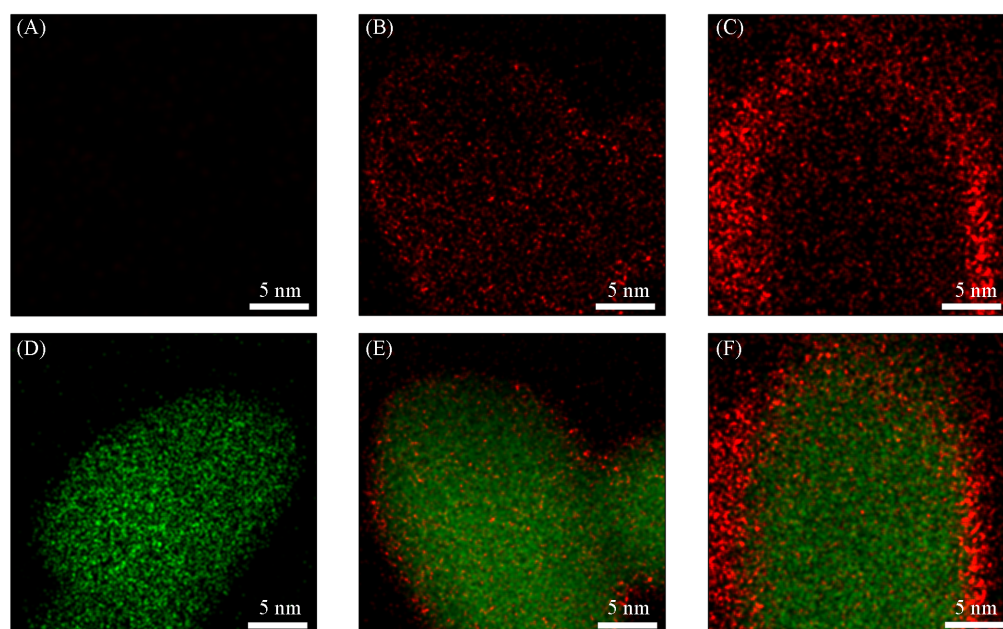


Fig. 2 EDS mappings of Si(A—C), Ti and Si(D—F) of bare TiO_2 (A, D), 1%PDMS@ TiO_2 (B, E) and 100%PDMS@ TiO_2 (C, F)

Si: red spots; Ti: green spots.

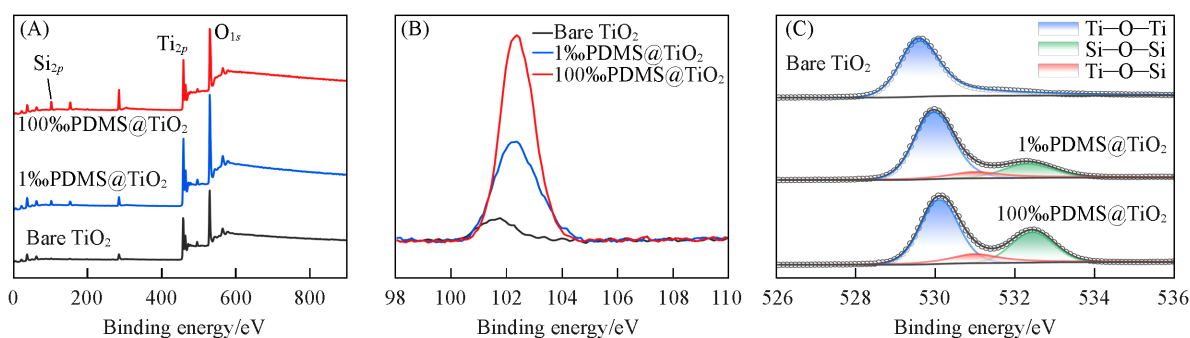


Fig. 3 XPS spectra of survey scan(A), Si_{2p} (B) and O_{1s} (C) of bare TiO_2 , 1%PDMS@ TiO_2 and 100%PDMS@ TiO_2

2.2 三相界面光催化体系的光催化性能

为了研究表面浸润性对光催化性能的影响,将未经接枝和PDMS接枝的 TiO_2 薄膜用于紫外光辐照下的光催化氧化有机物反应中.选取RhB作为模型有机物. RhB的氧化反应会随着体系中产生不同的ROS而呈现不同的氧化过程^[33-35],因此是一种很好的研究光催化性能及光催化氧化过程的模型有机物.如图S3(见本文支持信息)所示,在相同反应时间内,PDMS接枝 TiO_2 体系的RhB的分解量显著大于未经接枝处理的亲水体系,并且催化性能随PDMS质量分数的增加而提高,说明增加 TiO_2 表面的疏水性有利于光催化性能的提高.图4给出了RhB自氧化、未接枝、1%PDMS以及100%PDMS接枝 TiO_2 体系的光催化氧化RhB过程.可以看出,随着PDMS质量分数的增加,反应速率显著提高.

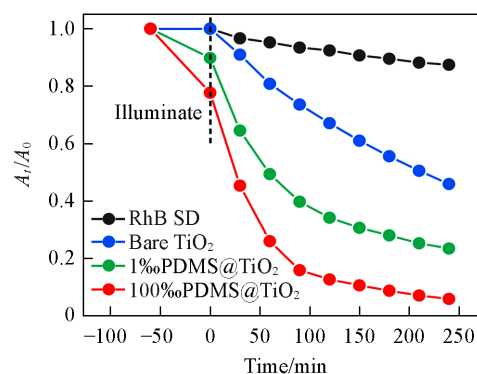


Fig. 4 Photocatalytic performance of the absorbance changes with time under self-degradation(SD) and using bare TiO_2 , 1%PDMS@ TiO_2 and 100% PDMS@ TiO_2

2.3 表面浸润性调控对反应界面有机物吸附、界面 O₂ 浓度的影响

光催化氧化 RhB 的反应速率(r)由反应界面处的 O₂ 和 RhB 浓度决定^[36,37]:

$$r = kc_{O_2}^{int}c_{RhB}^{int} \quad (1)$$

式中: k (L·mol⁻¹·s⁻¹) 为二级反应速率常数; $c_{O_2}^{int}$ 和 c_{RhB}^{int} (mol/L) 分别为反应界面处的 O₂ 浓度和 RhB 浓度. 在一般反应过程中, $c_{O_2}^{int}$ 被看作是一个恒定值, 使用经典的 Langmuir-Hinshelwood 模型, 光催化反应速率将遵循拟一级动力学模型^[38,39]:

$$r = -\frac{dc_{RhB}}{dt} = kc_{O_2}^{int} \frac{K_{RhB}c_{RhB}}{1 + K_{RhB}c_{RhB}} \quad (2)$$

式中: K_{RhB} (L/mg) 为 RhB 的 Langmuir 吸附常数; c_{RhB} (mol/L) 为 RhB 在体相溶液中的浓度. 在稀溶液中, 一般 $K_{RhB}c_{RhB} \ll 1$, 式(2)可进一步简化为表观一级反应动力学方程^[22], 如下:

$$\frac{dc_{RhB}}{dt} = -kc_{O_2}^{int}K_{RhB}c_{RhB} \quad (3)$$

由此可见, 光催化反应动力学与反应界面 O₂ 浓度 $c_{O_2}^{int}$ 及 RhB 的吸附常数 K_{RhB} 直接相关.

图5显示了不同反应体系中溶解 O₂ 浓度的变化. 未接枝的 TiO₂ 薄膜浸入水溶液中后, 溶液的 O₂ 浓度几乎不发生变化. 而 PDMS 接枝的 TiO₂ 薄膜浸入水溶液中后, 溶液的 O₂ 含量显著上升, 这是由于疏水 PDMS 层使得 TiO₂ 和水在接触界面处形成了气-液-固三相共存的微环境, 因而, 界面处的 O₂ 浓度高于溶液中, 从而引起溶液中 O₂ 含量的上升, 这可以反映出所构建的三相界面处是富氧微环境; 且随着 PDMS 层厚度的增加, 溶液中 O₂ 浓度增大, 这表明界面 O₂ 浓度更高. 因此, 增加表面疏水性, 能够有效增加 $c_{O_2}^{int}$.

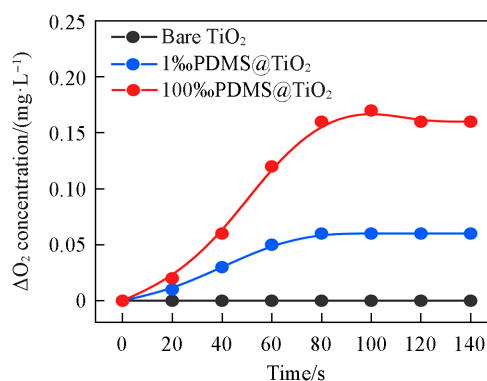


Fig. 5 Change of O₂ concentration in the RhB solution using bare TiO₂, 1%PDMS@TiO₂ and 100%PDMS@TiO₂

图6(A)和(B)分别显示了 RhB 的吸附动力学和热力学过程. 由图6(A)可见, 暗态吸附 40 min 后, RhB 分子在未处理、经过 1%PDMS 以及 100%PDMS 处理的 TiO₂ 薄膜表面的吸附量分别为 0.51, 2.14 和 4.01 mg/g. 由此可见, RhB 的吸附性能随 PDMS 量的增加而逐步提升. 图6(B)为 RhB 分子在未处理和经过 100%PDMS 处理的 TiO₂ 薄膜表面的吸附热力学行为(其中, Q_s 为饱和吸附量), 两种体系的吸附过程均用 Langmuir 方程拟合, 经过处理的 TiO₂ 体系的 K_{RhB} 约为 0.921 L/mg, 为未处理 TiO₂ 体系(0.16 L/mg)的 6 倍. 前期的研究表明, RhB 在水中通常是被一层水合膜包围. 在传统的光催化体系中, RhB 分子与 TiO₂ 主要依靠酯化作用相结合^[40], 即 RhB 的羧基与 TiO₂ 表面的羟基之间形成酯键. 而当

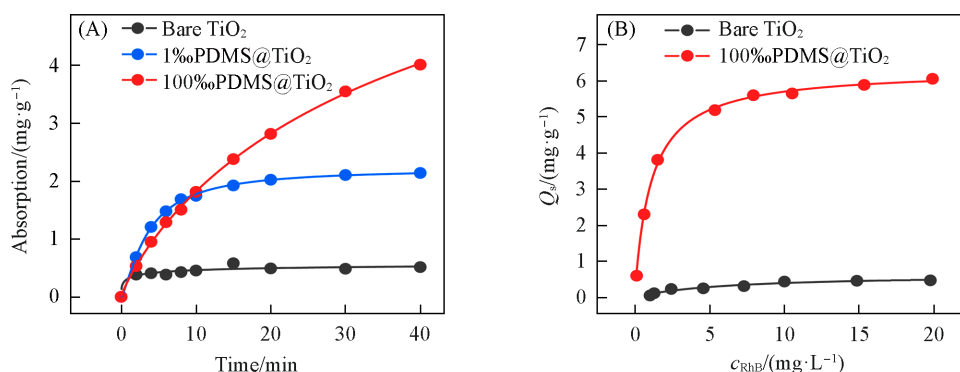


Fig. 6 Adsorption kinetics of RhB using bare TiO₂, 1%PDMS@TiO₂ and 100%PDMS@TiO₂(A), adsorption thermodynamics of RhB using bare TiO₂ and 100%PDMS@TiO₂(B)

TiO₂表面接枝了疏水PDMS层后,疏水PDMS会与RhB的疏水基团(如乙基端)通过疏水相互作用连接,有助于打破RhB分子周围的水合层,进而提高RhB在光催化剂表面的吸附量^[41,42].

通过以上结果可知,在TiO₂表面接枝PDMS提高了其表面疏水性后,在反应界面处形成了气-液-固三相共存的微环境,大幅提高了界面O₂浓度*c*_{O₂}^m;同时疏水PDMS的引入,提高了有机反应物在界面处的吸附性能*K*_{RhB},使得反应物在界面富集,二者的协同作用有效提高了光催化性能.

2.4 催化反应机理

图7(A)和(B)分别显示了未处理和经过100%*c*PDMS处理的TiO₂光催化氧化RhB过程的UV-Vis光谱.可以看出,两个体系光谱变化有明显的差异.对于未处理的TiO₂,RhB的吸收峰强度随反应的进行逐渐降低.而在表面接枝了疏水PDMS的光催化体系中,反应过程分为两步,在反应初期,伴随着RhB的吸收峰强度的降低,其最大吸收位置从约552 nm蓝移至498 nm,随后强度逐渐降低.吸收峰的蓝移是RhB分子的乙基被[·]O₂氧化的结果.[·]O₂的氧化能力相对较弱,一般只能让RhB发生脱乙基反应,进而发生吸收峰蓝移^[43,44].而当RhB完全脱去4个乙基后,继续氧化需要氧化性更强的[·]OH.

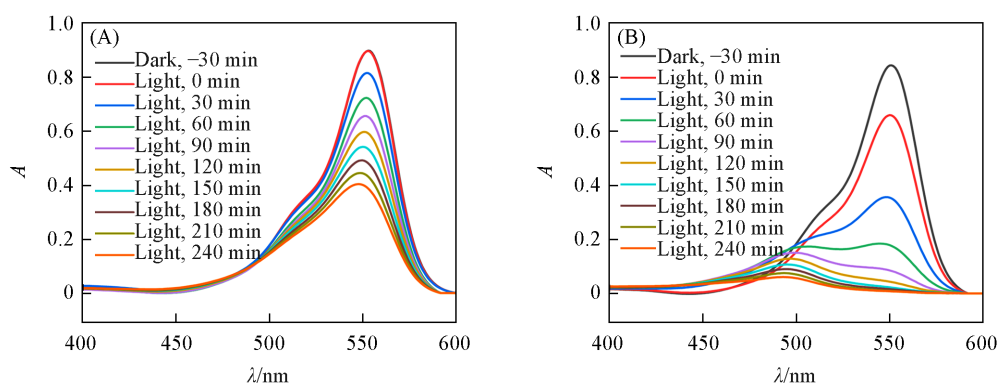
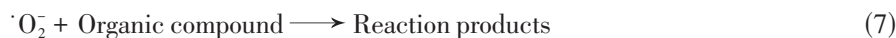


Fig. 7 UV-Vis absorption spectra of RhB using bare TiO₂(A) and 100%*c*PDMS@TiO₂(B) during the reaction

在紫外光照下,对于传统的光催化反应体系,TiO₂能被激发产生电子-空穴对,分别和O₂及水反应,生成[·]O₂和[·]OH,如式(4)~式(6)所示^[45,46].超氧自由基能够被RhB直接捕获反应,也能够继续与电子反应生成[·]OH,如式(7)和式(8)所示^[47,48].



通过ESR表征了反应过程中[·]OH和[·]O₂的生成情况.如图8(A)和(B)所示,在经过PDMS处理的三

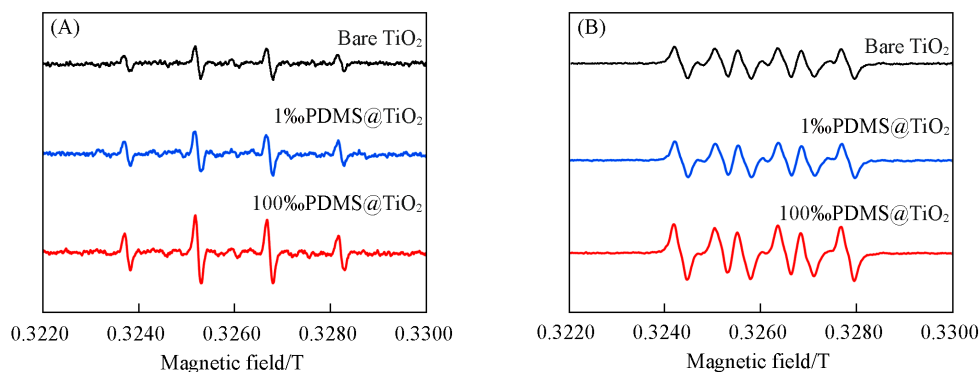


Fig. 8 ESR spectra of [·]OH(A) and [·]O₂(B) produced using bare TiO₂, 1%*c*PDMS@TiO₂ and 100%*c*PDMS@TiO₂ during the reaction

相体系中, $\cdot\text{O}_2^-$ 和 $\cdot\text{OH}$ 浓度都显著上升, 且它们的生成浓度均随 PDMS 量的增加而增加。

在传统的反应体系中, $\cdot\text{O}_2^-$ 和 $\cdot\text{OH}$ 生成量都较少, 此时氧化性较强的 $\cdot\text{OH}$ 会直接氧化 RhB, 或与脱乙基反应同时进行, 吸收峰不发生明显的蓝移。而在三相界面反应体系中, 由于界面 O_2 浓度得到极大提升, 有效促进了电子与 O_2 的反应, 在反应界面处生成了较高浓度的 $\cdot\text{O}_2^-$, 而 $\cdot\text{O}_2^-$ 很容易被 RhB 捕获并发生脱乙基反应[反应(7)]从而造成吸收峰的蓝移。当吸收峰蓝移至 498 nm 后, RhB 分子完全脱去 4 个乙基, 此时, 三相界面处产生的大量 $\cdot\text{O}_2^-$ 将发生反应(8), 即 $\cdot\text{O}_2^-$ 向 $\cdot\text{OH}$ 转变, 从而实现 RhB 分子的进一步深度氧化。

结合上述实验, 三相界面体系增强光催化氧化反应性能的机理如图 9 所示, 与两相体系[图 9(B)]相比, 三相体系[图 9(A)]中疏水 PDMS 层的存在同时提高了界面 O_2 浓度以及有机分子在界面处的吸附量, 促进了 $\cdot\text{O}_2^-$ 和 $\cdot\text{OH}$ 自由基的生成, 进而提高了光生电荷的利用率以及光催化氧化反应效率。

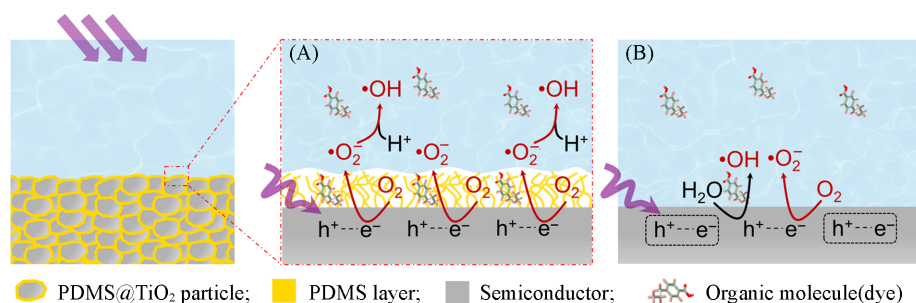


Fig. 9 Scheme of triphase photocatalytic system of PDMS@TiO₂(A) and TiO₂(B) under UV light illumination

稳定性是影响光催化体系实际应用的重要因素。图 S4(见本文支持信息)显示了 100% PDMS 处理的 TiO₂ 光催化体系在经过 10 次循环实验后的结果, 可见, 氧化 RhB 分子的速率没有明显下降。使用 FTIR 和 XPS 对经过 10 次循环实验后的光催化剂进行表征, 如图 S5(见本文支持信息)所示, 在 FTIR 中能观察到属于 PDMS 的 Si—CH₃ 摇摆和伸缩振动峰、Si—O—Si 的伸缩振动峰, 从 XPS 谱图中能够观察到 Ti—O—Si 键, 表明催化剂表面接枝的 PDMS 层依然稳定存在, 三相界面光催化体系具有良好的稳定性。

3 结 论

通过在 TiO₂ 纳米颗粒表面接枝疏水 PDMS 层来调控光催化剂表面的浸润性, 构建了高效的三相界面光催化体系。疏水的 PDMS 分子使得光催化体系在反应界面处形成了气-液-固三相共存的微环境, 大幅提高了界面 O_2 的浓度, 同时提高了有机反应物在界面处的吸附性能。二者的协同作用促进了 $\cdot\text{O}_2^-$ 和 $\cdot\text{OH}$ 自由基的生成, 提高了光催化氧化反应速率。三相界面光催化反应体系显示出了良好的光催化活性和稳定性。突出了界面微环境调控在提高催化反应性能中的重要作用, 也为未来构筑高效催化反应体系提供了基础研究和实验依据。

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/cjcu20240571>。

参 考 文 献

- [1] Gangu K. K., Maddila S., Jonnalagadda S. B., *Sci. Total Environ.*, **2019**, *646*, 1398—1412
- [2] Akerdi A. G., Bahrami S. H., *J. Environ. Chem. Eng.*, **2019**, *7*(5), 103283
- [3] Hao L., Huang H., Zhang Y., Ma T., *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, *31*(25), 2100919
- [4] Anglada J. M., Martins-Costa M. T. C., Francisco J. S., Ruiz-López M. F., *J. Am. Chem. Soc.*, **2020**, *142*(38), 16140—16155
- [5] Luo L., Zhang T., Wang M., Yun R., Xiang X., *ChemSusChem*, **2020**, *13*(19), 5173—5184
- [6] Zhao Y. T., Wang S. K., Zhao F. P., Chen Z. H., Zhao L. J., Zhang D. F., Ge B., Pu X. P., *Chem. J. Chinese Universities*, **2024**, *45*(5), 20240055(赵玉彤, 王仕凯, 赵福萍, 陈志合, 赵丽杰, 张大凤, 葛博, 蒲锡鹏. 高等学校化学学报, **2024**, *45*(5), 20240055)

- [7] Ding Y., Maitra S., Halder S., Wang C., Zheng R., Barakat T., Roy S., Chen L. H., Su B. L., *Matter*, **2022**, 5(7), 2119—2167
- [8] Koo T. M., Fu H. E., Moon J. H., Oh E., Kim Y., Ko M. J., Kim Y. K., *Small Sci.*, **2023**, 4(2), 2300266
- [9] Li F., Wang G. Y., Zhang Y., Li H. R., *Chem. J. Chinese Universities*, **2015**, 36(7), 1351—1357(李锋, 王桂燕, 张岩, 李洪仁. 高等学校化学学报, **2015**, 36(7), 1351—1357)
- [10] Karamzadeh S., Sanchooli E., Oveisi A. R., Daliran S., Luque R., *Appl. Catal. B: Environ.*, **2022**, 303, 120815
- [11] Jeon J., Kweon D. H., Jang B. J., Ju M. J., Baek J., *Adv. Sustain. Syst.*, **2020**, 4(12), 2000197
- [12] Gupta N. M., *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **2017**, 71, 585—601
- [13] Jabbar Z. H., Graimed B. H., *J. Water Process Eng.*, **2022**, 47, 102671
- [14] Kadhim M. J., Mahdi M. A., Selman A. M., Jamel AlAni S. K., Hassan J. J., Ahmed N. M., *Iran. J. Catal.*, **2023**, 13(1), 1—21
- [15] Wang L., Xiao F., *ChemCatChem*, **2014**, 6(11), 3048—3052
- [16] Wu Y., Feng J., Gao H., Feng X., Jiang L., *Adv. Mater.*, **2019**, 31(8), 1800718
- [17] Su B., Tian Y., Jiang L., *J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, 138(6), 1727—1748
- [18] Wang L., Xiao F. S., *Sci. China Mater.*, **2018**, 61(9), 1137—1142
- [19] Zhang Q., Zhou M., Ren G., Li Y., Li Y., Du X., *Nat. Commun.*, **2020**, 11(1), 1731
- [20] Weng C. C., Lv X. W., Ren J. T., Ma T. Y., Yuan Z. Y., *Electrochem. Energy Rev.*, **2022**, 5(S1), 19
- [21] Sheng X., Liu Z., Zeng R., Chen L., Feng X., Jiang L., *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, 139(36), 12402—12405
- [22] Zhou H., Sheng X., Xiao J., Ding Z., Wang D., Zhang X., Liu J., Wu R., Feng X., Jiang L., *J. Am. Chem. Soc.*, **2020**, 142(6), 2738—2743
- [23] Zhang J. Y., Ding Z. Y., Wang D. D., Chen L. P., Feng X. J., *Chem. J. Chinese Universities*, **2021**, 42(10), 3167—3174(张嘉懿, 丁臻尧, 王丹丹, 陈礼平, 封心建. 高等学校化学学报, **2021**, 42(10), 3167—3174)
- [24] Rabiee H., Ge L., Zhao J., Zhang X., Li M., Hu S., Smart S., Rufford T. E., Zhu Z., Wang H., Yuan Z., *Appl. Catal. B: Environ.*, **2022**, 310, 121362
- [25] Rabiee H., Ge L., Zhang X., Hu S., Li M., Smart S., Zhu Z., Wang H., Yuan Z., *Appl. Catal. B: Environ.*, **2021**, 298, 120538
- [26] Mi L., Yu J., He F., Jiang L., Wu Y., Yang L., Han X., Li Y., Liu A., Wei W., Zhang Y., Tian Y., Liu S., Jiang L., *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, 139(30), 10441—10446
- [27] Pan F., Yang Y., *Energy Environ. Sci.*, **2020**, 13(8), 2275—2309
- [28] Liu Z., Sheng X., Wang D., Feng X., *iScience*, **2019**, 17, 67—73
- [29] Shi R., Guo J., Zhang X., Waterhouse G. I. N., Han Z., Zhao Y., Shang L., Zhou C., Jiang L., Zhang T., *Nat. Commun.*, **2020**, 11(1), 3028
- [30] Zou Y., Li J., Peng Q., Liu Z., Fu Q., Zhang L., Liao Q., Zhu X., *Chem. Eng. J.*, **2022**, 450, 138342
- [31] Luo H., Fan X., Tu J., He J., Li X., Xue J., Ye F., Cheng L., *Appl. Surf. Sci.*, **2023**, 609, 155284
- [32] Cha B. J., Woo T. G., Han S. W., Saqlain S., Seo H. O., Cho H. K., Kim J. Y., Kim Y. D., *Catalysts*, **2018**, 8(11), 500
- [33] Liang H., Liu S., Zhang H., Wang X., Wang J., *RSC Adv.*, **2018**, 8(24), 13625—13634
- [34] Liang H., Jia Z., Zhang H., Wang X., Wang J., *Appl. Surf. Sci.*, **2017**, 422, 1—10
- [35] Nidheesh P. V., Rajan R., *RSC Adv.*, **2016**, 6(7), 5330—5340
- [36] Neena D., Kondamareddy K. K., Bin H., Lu D., Kumar P., Dwivedi R. K., Pelenovich V. O., Zhao X., Gao W., Fu D., *Sci. Rep.*, **2018**, 8(1), 10691
- [37] Li Y., Sun S., Ma M., Ouyang Y., Yan W., *Chem. Eng. J.*, **2008**, 142(2), 147—155
- [38] Brosillon S., Lhomme L., Vallet C., Bouzaza A., Wollbert D., *Appl. Catal. B: Environ.*, **2008**, 78(3/4), 232—241
- [39] Qin Y., Long M., Tan B., Zhou B., *Nano-Micro Lett.*, **2014**, 6(2), 125—135
- [40] Sultana R., Liba S. I., Rahman M. A., Yeachin N., Syed I. M., Bhuiyan M. A., *Surf. Interfaces*, **2023**, 42, 103302
- [41] Pan Z., Guan Y., Liu Y., Cheng F., *Sep. Purif. Technol.*, **2021**, 261, 118273
- [42] Li X., Zhang L., Yang Z., He Z., Wang P., Yan Y., Ran J., *Sep. Purif. Technol.*, **2020**, 239, 116517
- [43] Muduli S. K., Wang S., Chen S., Ng C. F., Huan C. H. A., Sum T. C., Soo H. S., *Beilstein J. Nanotechnol.*, **2014**, 5, 517—523
- [44] Yadav S. M., Desai M. A., Sartale S. D., *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **2023**, 34(22), 1651
- [45] Guo Q., Zhou C., Ma Z., Yang X., *Adv. Mater.*, **2019**, 31(50), 1901997
- [46] Lee S. Y., Park S. J., *J. Ind. Eng. Chem.*, **2013**, 19(6), 1761—1769
- [47] Nosaka Y., Nosaka A. Y., *Chem. Rev.*, **2017**, 117(17), 11302—11336
- [48] Parrino F., Livraghi S., Giamello E., Ceccato R., Palmisano L., *ACS Catal.*, **2020**, 10(14), 7922—7931

(Ed.: Y, K, S)