

磷、铬共掺杂 TiO₂ 制备及光催化降解苯酚研究

王冠宇^{1,2,3}

¹煤炭科学技术研究院有限公司, 北京, 中国

²国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室, 北京, 中国

³中国煤科低碳技术研究院, 北京, 中国

【摘要】采用溶胶凝胶法制备磷(P)、铬(Cr)共掺杂 TiO₂ 光催化剂, 并研究其在可见光条件下催化降解苯酚效能。采用扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、X射线衍射(XRD)等测试方法对制备的 P、Cr 共掺杂 TiO₂ 光催化材料进行表征。考察了不同掺杂量及煅烧温度等制备条件对催化剂形貌、物化性能以及可见光条件下催化降解苯酚效能的影响。研究表明, P、Cr 元素的掺杂均会抑制 TiO₂ 晶粒生长, 使带隙值降低至 1.88eV。在可见光辐射 12h 条件下, 苯酚初始浓度 300mg/L、催化剂投加量 0.5g/L、苯酚去除率可达 82.5%。本研究旨在为光催化材料在环境污染治理领域提供新思路和新方法。

【关键词】苯酚降解; 可见光催化; 共掺杂 TiO₂; 带隙

【基金项目】天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(编号: 2023-2-TD-ZD00)

1. 引言

在现代工业高速发展的背景下, 苯酚作为一种关键的有机化工原料, 被大量用于塑料、医药及染料等行业。但含酚废水的排放也对生态环境和人类健康构成严重危害。苯酚具有毒性高、难降解和易生物富集等特点, 即使在较低浓度下仍对水生生物有毒害效应, 人体长期接触可能损伤神经系统和肝脏等功能, 因此开发高效处理含酚废水的方法刻不容缓[1-5]。

光催化氧化技术由于具备反应条件温和、氧化能力优异、环境友好等优点, 已成为降解有机污染物的研究热点[6-8]。在众多光催化剂中, 二氧化钛(TiO₂)因其稳定性高、催化性能良好、成本低且无毒, 被视作最具潜力的材料之一。然而, TiO₂本身存在一定局限性, 制约了其光催化性能的进一步提升与实际应用[9,10]。首先, TiO₂的禁带宽度较大(锐钛矿相约 3.2 eV, 金红石相约 3.0 eV), 导致它只能吸收波长小于 387.5 nm 的紫外光, 而紫外光在太阳光谱中占比低于 5%, 严重限制了对太阳光的有效利用[11]。其次, 光生电子-空穴对容易快速复合, 致使载流子寿命较短, 参与光催化反应的效率不高, 从而降低了光催化降解能力[12]。

为克服上述局限, 研究人员不断探索多种改性方法, 其中元素掺杂备受关注。通过将特定元素引入 TiO₂ 晶格, 可以调节其能

带结构, 引入杂质能级, 缩小带隙, 从而扩展光吸收范围, 增强可见光响应。同时, 掺杂元素可作为电子或空穴陷阱, 抑制载流子复合, 延长光生电荷寿命, 显著提高光催化效率[13]。吴丹等[14]采用水热法合成了 Ce-TiO₂ 复合材料, Ce 掺杂使吸收边红移, 带隙降至 2.62 eV, 吸收边达到 474 nm。高悦等[15]制备了氮掺杂 TiO₂, 发现在 400°C 煅烧条件下催化性能最优。李媛等[16]利用溶胶-凝胶法制得铈-锂共掺杂 TiO₂, 实验显示共掺杂存在协同增强效应, 性能优于单元素掺杂样品。笔者此前对非金属元素(C、N、P、S)掺杂改性 TiO₂ 开展了研究[17], 结果表明掺杂均能减小带隙, 其中 P-TiO₂ 带隙最小为 3.10 eV, 在掺杂量 4%、600°C 煅烧、可见光照射 12 h 条件下, 对苯酚的降解率最高达 66.5%。另外, 笔者还基于第一性原理计算研究了 P 与多种金属(Cr、V、Fe、Mn、Co、Ni)共掺杂锐钛矿 TiO₂ 的电子结构[18], 发现 P、Cr 共掺杂体系具有较大的电子转移量和较强的氧化还原能力。

目前, 关于 P、Cr 共掺杂 TiO₂ 的研究仍处于初步阶段, 其在制备工艺优化、光催化机制阐释及含酚废水处理的实际应用效果等方面尚需深入探讨。因此, 本研究拟采用溶胶-凝胶法制备 P、Cr 共掺杂 TiO₂ 光催化剂, 并评价其在可见光下催化降解苯酚的性能, 以期开发高效可见光响应催化剂及含

酚废水治理提供理论支持和技术途径，助力
环境污染防治。

2.1 实验试剂

实验所用试剂清单如表 1 所示。

2.材料和方法

表 1.实验试剂

药品名称	化学式	编号 (CAS)	规格	生产厂家
九水硝酸铬	$\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	7789-02-8	分析纯 (AR)	阿拉丁
钛酸四丁酯	$\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{O}_4\text{Ti}$	5593-70-4	分析纯 (AR)	阿拉丁
去离子水	H_2O	-	电导率: 3.07 μs	自制
磷酸	H_3PO_4	7664-38-2	分析纯 (AR)	阿拉丁
无水乙醇	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	64-17-5	分析纯 (AR)	阿拉丁
冰醋酸	CH_3COOH	64-19-7	分析纯 (AR)	阿拉丁

2.2 实验仪器

材料制备所用仪器信息如表 2 所示。

表 2.实验仪器

实验仪器	型号	生产厂家
箱式马弗炉	CQ	洛阳纯青炉业有限公司
pH 计	PHS-3C	上海仪电科学仪器股份有限公司
恒温磁力搅拌器	S85-1	舍岩仪器有限公司
电子天平	AL104 (d=0.0001)	Mettler Toledo 仪器有限公司
超净工作台	SW-CJ-2F	苏州安泰空气技术有限公司
台式离心机	TGL-16G	上海安亭科学仪器厂
循环水真空抽滤机	SHB	郑州长程科工贸有限公司
真空干燥箱	DHG-9053A(50L)	上海捷呈实验仪器有限公司

2.3 材料制备方法

采用溶胶-凝胶法制备 P-Cr-TiO₂光催化剂。首先将 10 mL 钛酸四丁酯与 60 mL 无水乙醇混合，磁力搅拌 30 分钟，制得溶液 A。另将 80 mL 去离子水、6 mL 冰醋酸、60 mL 无水乙醇及计量九水硝酸铬混合，搅拌 30 分钟，得溶液 B。随后将溶液 B 与 114 mL 磷酸置于分液漏斗中混匀，在持续搅拌下缓慢滴加至溶液 A 中，反应生成乳白色悬浊液。继续搅拌 6 小时使水解充分进行，密封后于避光条件下静置陈化 72 小时。体系中钛酸四丁酯、无水乙醇、去离子水与冰醋酸的体积比为 1:12:8:0.6，设定 Ti、P 与 Cr 的摩尔比分别为 1:4%:x% (x = 2, 4, 6, 8, 10)。将陈化后产物于马弗炉中在 300–900℃煅烧 4 小时，冷却后抽滤洗涤至中性，110℃干燥 6 小时，最终经研磨获得目标催化剂粉末。

2.4 表征分析方法

材料的结构与性能通过多种分析技术进行表征。样品的微观形貌采用扫描电子显微镜 (SEM, 日本电子 JSM-IT500) 和透射电子显微镜 (TEM, 日立 HT7800) 进行观察；晶体结构通过 X 射线衍射仪 (XRD, 德国 Bruker D8 Advance) 分析；比表面积及孔

结构由比表面积及孔隙度分析仪 (贝士德 3H-2000PSAX) 测定；化学键和官能团信息通过傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR, 德国 Bruker VERTEX70) 采集；采用 X 射线光电子能谱仪 (XPS, 美国 Thermo Fisher K-Alpha) 分析元素组成与化学状态；材料的光吸收性能及禁带宽度通过紫外-可见漫反射光谱仪 (UV-Vis DRS, 北京普析通用 TU-190) 进行测定。

2.5 苯酚降解实验方法

在光催化降解实验中，将 0.05 g 催化剂与 100 mL 初始浓度为 300 mg/L 的苯酚溶液置于循环水冷却夹套烧杯中，于磁力搅拌状态下进行反应。以 500 W 氙灯作为模拟光源，垂直置于液面上方 15 cm 处进行照射。通过夹套中持续通入的 10 °C 冷却水控制反应体系温度，避免因光照导致溶液升温或蒸发。每小时取样 5 mL，经 0.22 μm 水系滤头过滤后，采用紫外-可见分光光度计在 190–350 nm 波长范围内监测苯酚浓度变化，检测完成后样品及时返回反应体系，以保持总体积及催化剂含量不变。苯酚浓度依据其在 270 nm 处的特征吸收峰强度进行计算。

3.结果与讨论

3.1 催化剂表征分析

3.1.1 形貌分析

TiO_2 、P-4%- TiO_2 和 P-4%-Cr- TiO_2 催化剂的扫描电镜 (5000 \times) 如图 1 所示。与纯 TiO_2 (a) 相比, P 掺杂样品 (b) 的颗粒团聚现象明显减轻, 表明 P 的引入有助于改善颗粒分散性。然而, 随着 Cr 元素的加入 (c-f), 团聚程度有所增加, 其形貌虽未发生显著变化, 但相较于 P 单掺杂样品, 分散性下降, 推测可能与 Cr 引入后影响颗粒表面电荷、范德华力及表面能, 从而削弱 P

的抗团聚作用有关。

TiO_2 、P-4%- TiO_2 和 P-4%-Cr-6%- TiO_2 的透射电子显微镜如图 2 所示。可见 P 和 Cr 的共掺杂使 TiO_2 颗粒由不规则形态转变为近似球形, 且粒径减小至 20–30 nm。高分辨图像 (d) 中可观察到锐钛矿 TiO_2 的 (101) 和 (103) 晶面, 同时存在 $(\text{TiO})_2\text{P}_2\text{O}_7$ 及含铬化合物相关晶面的晶格条纹, 表明 P 和 Cr 已成功进入 TiO_2 晶格。

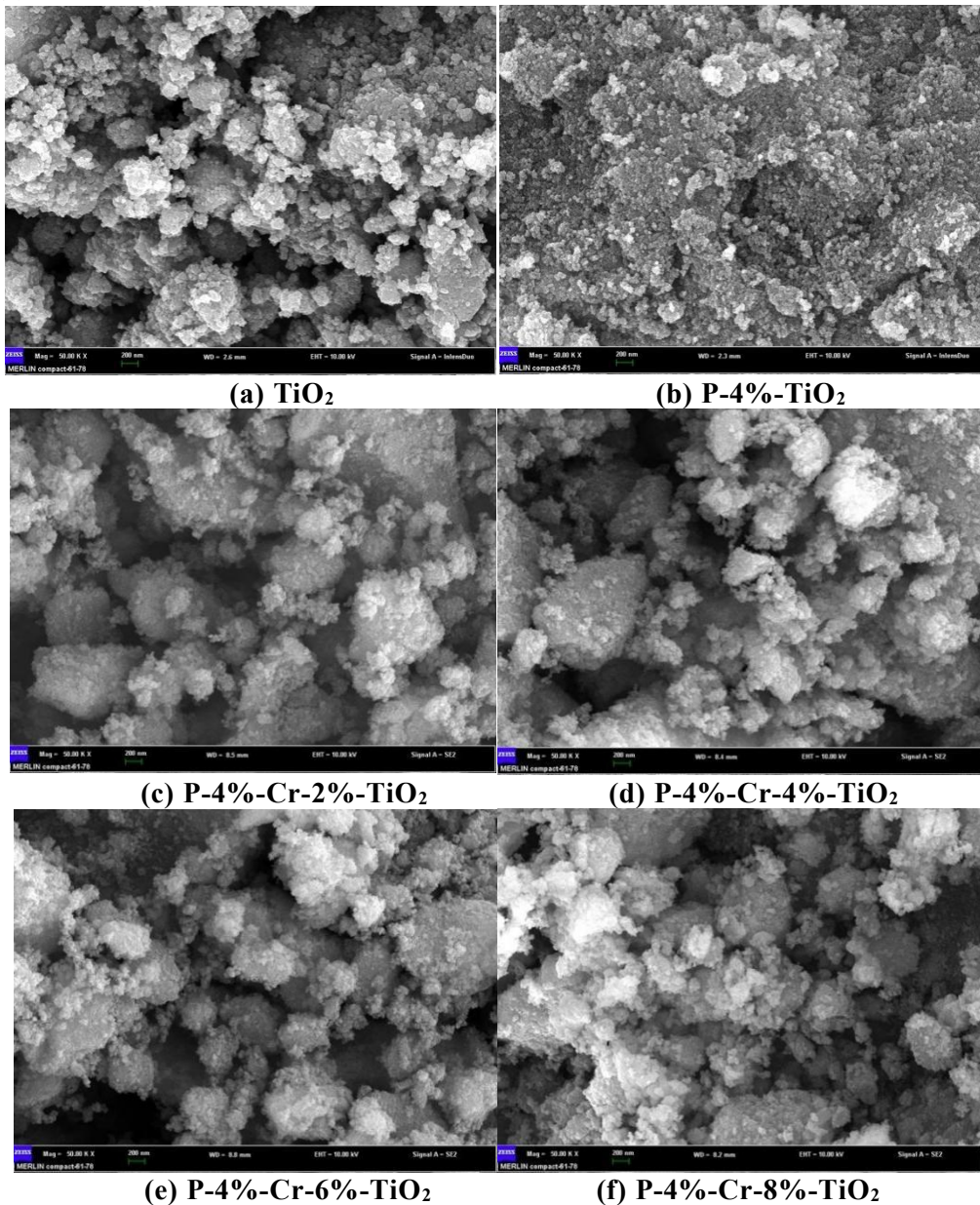


图 1. TiO_2 、P-4%- TiO_2 和 P-4%-Cr- TiO_2 的扫描电子显微镜图

3.1.2 XRD 分析

TiO_2 与 P-4%-Cr-6%- TiO_2 在不同煅烧温度下 (300~900 $^\circ\text{C}$) 的 XRD 图谱如图 3 所示。当煅烧温度达到 700 $^\circ\text{C}$ ~900 $^\circ\text{C}$, 两种

材料在 700~900 $^\circ\text{C}$ 范围内均未出现金红石相衍射峰, 表明 P 与 Cr 的掺杂均有助于抑制锐钛矿向金红石相的转变, 提高了相变温度。在低温区 (300~800 $^\circ\text{C}$), P 单掺杂样品 (a)

的结晶度低于 P-Cr 共掺杂样品 (b), 说明 P 对晶体生长的抑制作用更强。这可能是因为 H_3PO_4 水解产生的 PO_4^{3-} 基团能够直接与 -Ti-O- 结构作用, 抑制其交联与晶粒生长; 而 $Cr(NO_3)_3 \cdot H_2O$ 的引入在一定程度上阻碍了 H_3PO_4 的水解, 同时低温条件下部分 P、Cr 离子未能充分进入晶格, 导致对结晶的抑制效果减弱。当温度升至 $900^\circ C$ 时, P-Cr 共掺杂样品对 TiO_2 结晶的抑制作用反而强于 P 单掺杂样品。这可能是由于高温为离子迁移提供了足够能量, 使 P、Cr 更完全地进

入晶格, 或在晶界处形成钛磷酸盐和铬氧化物等第二相, 共同抑制了 TiO_2 晶粒的进一步生长。

不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr- TiO_2 在 $600^\circ C$ 煅烧温度下的 XRD 图谱如图 4 所示。随着 Cr 含量的增加, TiO_2 的结晶度逐渐降低, 这主要归因于 Cr^{3+} 进入晶格取代 Ti^{4+} , 从而抑制了晶粒生长。当 Cr 掺杂量达到 8%~10% 时, 图谱中出现 Cr_2O_3 的衍射峰, 表明过量 Cr 元素在晶界处形成 Cr_2O_3 相, 进一步阻碍了 TiO_2 晶粒的交联与长大。

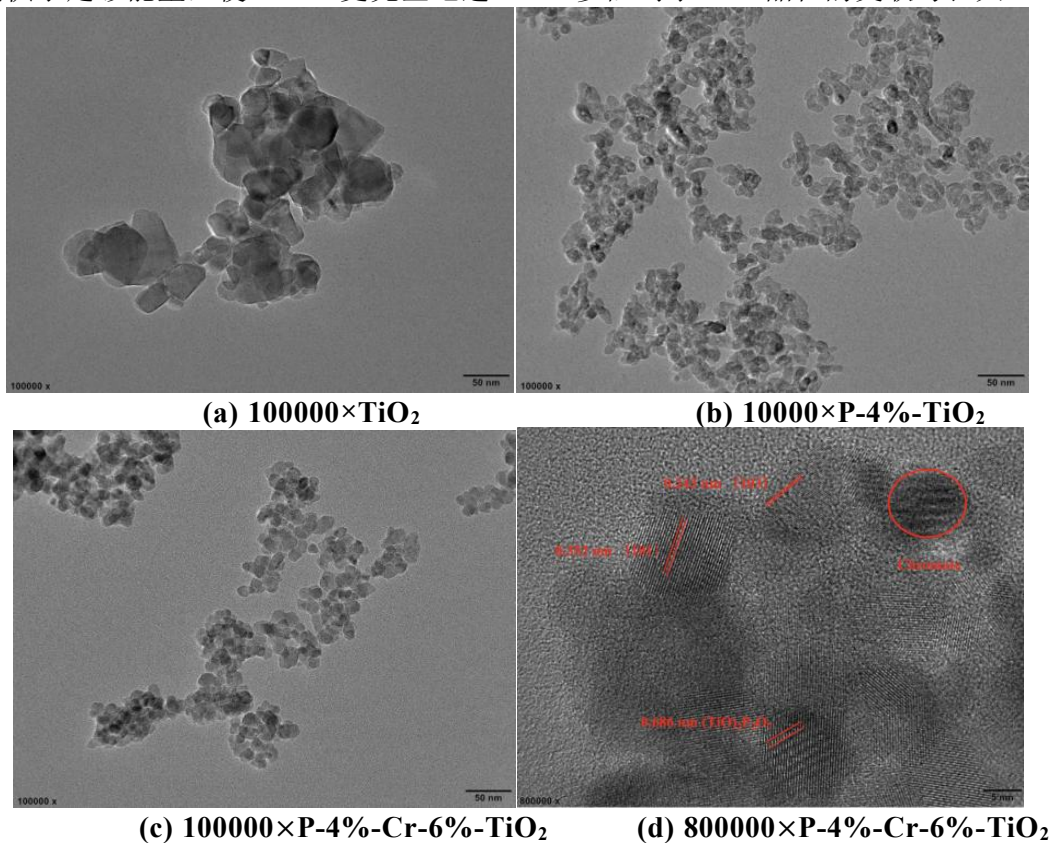


图 2. TiO_2 、P-4%- TiO_2 和 P-4%-Cr-6%- TiO_2 的透射电子显微镜图

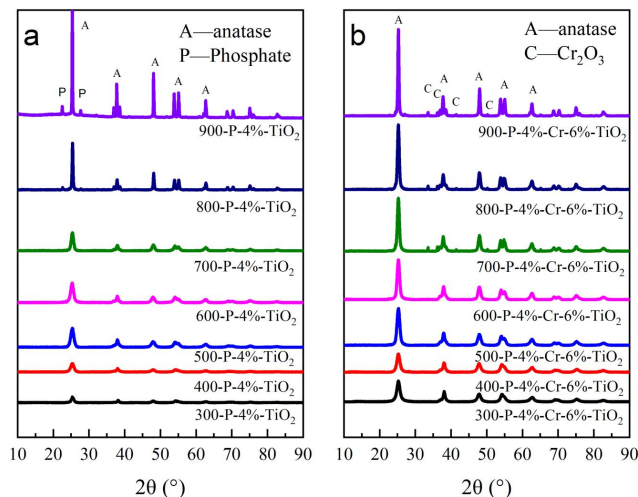


图 3. P-4%- TiO_2 (a) 与 P-4%-Cr-6%- TiO_2 (b) 在不同煅烧温度下的 XRD 图谱

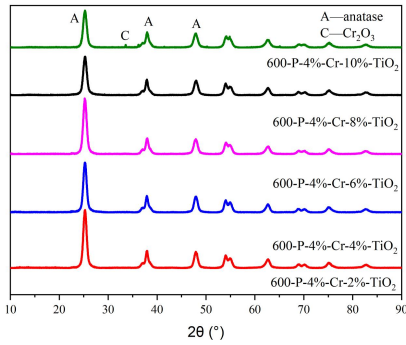


图 4.600°C煅烧温度下不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 的 XRD 图谱

3.1.3 BET 分析

不同煅烧温度 P-4%-Cr-6%-TiO₂ 和 600°C煅烧温度下, 不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 催化剂的氮吸附脱附曲线如图 5 所示。图 (A) 表明, 随着温度升高, 滞后环向高相对压力方向移动, 氮气吸附量逐渐减少, 说明高温使凝胶态 TiO₂ 中的无序孔道结构发生坍塌, 导致比表面积下降。从图 (B) 可见, 在不同 Cr 掺杂量下, 吸附-脱附曲线基本重合, 滞后环形态和吸附量未发生显著变化, 但所有掺杂样品的氮气吸附量均高于未掺杂 TiO₂。

P-4%-Cr-6%-TiO₂ 在不同煅烧温度下以及不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 样品在 600°C煅烧温度下的比表面积、孔容和孔径数据如表 3 和 4 所示。表 3 数据显示, 随着煅烧温度上升, 材料的比表面积逐渐降低,

表 3.P-4%-Cr-6%-TiO₂ 在不同煅烧温度下的比表面积、孔容和孔径数据

Temperature (°C)	Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g)	Pore Size (nm)
300	213.6	0.251371	3.8631
400	204.8	0.265717	3.9222
500	117.8	0.247826	6.3085
600	95.0	0.252738	8.0038
700	69.7	0.255684	10.2601
800	65.5	0.316614	14.3570
900	31.6	0.184083	18.9578

表 4.不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 样品在 600°C煅烧温度下的比表面积、孔容和孔径数据

Type	Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g)	Pore Size (nm)
TiO ₂	12.5383	0.051038	14.0354
P-4%-Cr-2%- TiO ₂	108.9150	0.258654	7.1814
P-4%-Cr-4%- TiO ₂	99.7186	0.261261	7.8849
P-4%-Cr-6%- TiO ₂	95.0362	0.252738	8.0038
P-4%-Cr-8%- TiO ₂	98.4917	0.234753	7.1577
P-4%-Cr-10%- TiO ₂	100.9586	0.217597	6.4180

3.1.4 FT-IR 分析

不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C煅烧温度下的红外光谱图如图 6 所示。所有样品在 3420 cm⁻¹和 1626 cm⁻¹附近均出现吸

孔径则相应增大, 主要原因在于高温促使凝胶态 TiO₂ 的孔道结构发生坍塌。结合表 4 可看出, 在不同 Cr 掺杂量下, 样品的比表面积、孔容及孔径均未发生显著变化, 比表面积始终维持在约 100 m²/g 的水平。

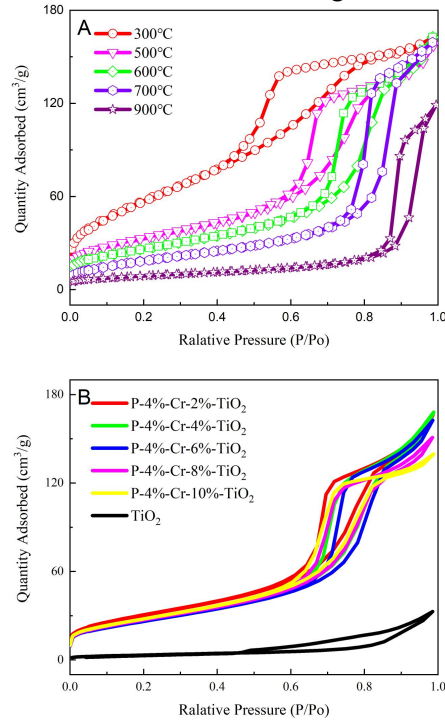


图 5. (A) 不同煅烧温度 P-4%-Cr-6%-TiO₂ 催化剂的氮吸附脱附曲线、(B) 不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 催化剂的氮吸附脱附曲线

收峰, 分别归属于表面吸附水的 O-H 伸缩振动和 H-O-H 弯曲振动。随着 Cr 掺杂量增加, 这两个峰的位置和强度未发生显著变化, 表明材料比表面积保持稳定, 与 BET 分析

结果一致。谱图中未观察到 532 cm^{-1} 处 Cr_2O_3 的特征峰，说明该温度下 Cr_2O_3 未完全结晶。 1043 cm^{-1} 处 Ti-O-P 振动峰的存在表明 Cr 的引入未改变 P 在材料中的化学状态。

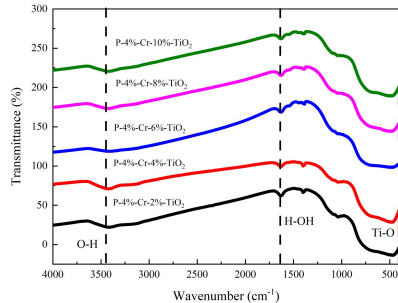


图 6.不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C 煅烧温度下的红外光谱图

3.1.5 XPS 分析

不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C 煅烧温度下的 XPS 图谱如图 7 所示。在所有样品的 XPS 谱图中，结合能 133.5 eV、454.7 eV、532 eV 及 572.1 eV 处分别出现了 P 2p、Ti 2p、O 1s 和 Cr 2p 的特征峰，表明 P 和 Cr 元素已成功掺杂进入 TiO₂ 晶格。谱图中观察到的 C 1s 信号可归因于仪器本身带来的碳污染。

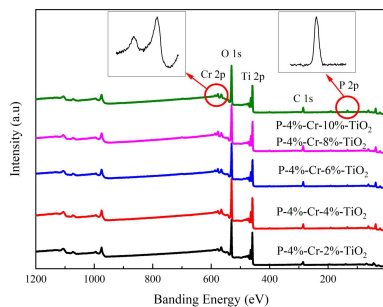


图 7.不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C 煅烧温度下的 XPS 图谱

不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C 煅烧温度下 O 1s 的 XPS 图谱如图 8 所示。所有样品均呈现宽化的 O 1s 谱峰，且随 Cr 含量增加，谱峰在高结合能区域的肩部逐渐增强并展宽。经分峰拟合后，可在 529.6 eV、530.2 eV、531.2 eV 和 532.1 eV 处分别指认为 Ti-O、Cr-O、P-O 及表面 -OH 物种的特征峰。随着 Cr 掺杂量提高，Cr-O 峰强度增大，Ti-O 峰相应减弱，P-O 峰则保持稳定，表明 Cr 成功进入晶格并部分取代 Ti-O 结构。

不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C 煅烧温度下 Ti 2p 的 XPS 图谱如图 9 所示。如图 (a) 所示，Ti 2p 谱由分别对应 Ti 2p_{3/2} 和 Ti 2p_{1/2} 的两个峰组成。随着 Cr 掺杂量增加，两个峰均出现轻微红移。

已知 Ti⁴⁺ 的 2p_{1/2} 和 2p_{3/2} 结合能分别位于 464.9 eV 和 458.6 eV，而 Ti³⁺ 的对应峰位分别在 463.9 eV 和 457.6 eV。初步推测红移可能与 Ti 离子电子环境变化有关。经分峰拟合 (图 (b) - (f)) 发现，所有样品中 Ti 2p_{3/2} 均仅归属于 Ti⁴⁺，未检测到 Ti³⁺ 信号，其微小偏移 (约 0.2 eV) 可能在仪器误差范围内。而 Ti 2p_{1/2} 可分解为 Ti⁴⁺ 和 Ti³⁺ 两个组分。随着 Cr 掺杂量提高，Ti⁴⁺ 2p_{1/2} 峰强度逐渐增强，Ti³⁺ 2p_{1/2} 峰则相应减弱，从而导致 Ti 2p_{1/2} 整体向高结合能方向移动。

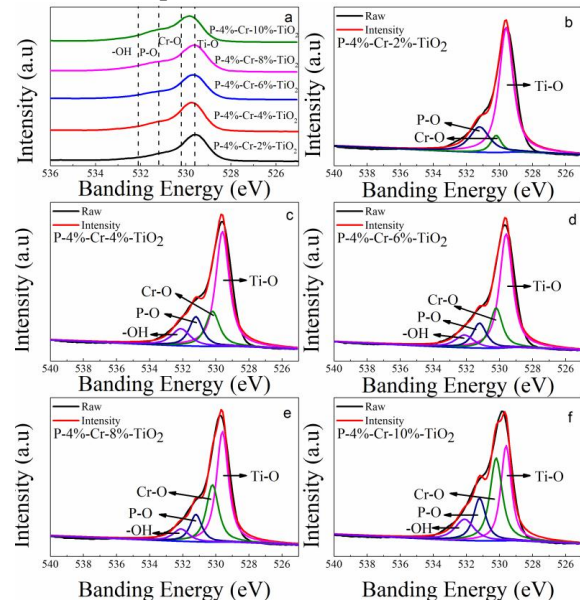


图 8. (a) 不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C 煅烧温度下 O 1s 的 XPS 图谱、(b) P-4%-Cr-2%-TiO₂ 的 O 1s 分峰图、(c) P-4%-Cr-4%-TiO₂ 的 O 1s 分峰图、(d) P-4%-Cr-6%-TiO₂ 的 O 1s 分峰图、(e) P-4%-Cr-8%-TiO₂ 的 O 1s 分峰图、(f) P-4%-Cr-10%-TiO₂ 的 O 1s 分峰图

不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C 煅烧温度下 Cr 2p (a) 和 P 2p (b) 的 XPS 图谱如图 10 所示。由图 (a) 可知，在不同 Cr 掺杂量的样品中，P 元素始终以 P⁵⁺ 形态存在，表明 Cr 的掺入未影响 P 的价态。由图 (b) 可知，Cr 2p 谱在 576.4 eV 和 585.2 eV 处呈现两个特征峰，分别归属于 Cr³⁺ 的 2p_{3/2} 和 2p_{1/2} 能级，证实 Cr 以 +3 价形式存在于材料中。

3.1.6 紫外可见漫反射分析

不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C 煅烧温度下的紫外-可见漫反射光谱和 (ahv)^{1/2}-hv 图如图 11 所示。由图 (a) 所示，P 的掺杂使 TiO₂ 吸收边发生轻微红移，而 P、

Cr 共掺杂样品在紫外、可见和红外区域均呈现吸收，且可见光区吸收显著增强。

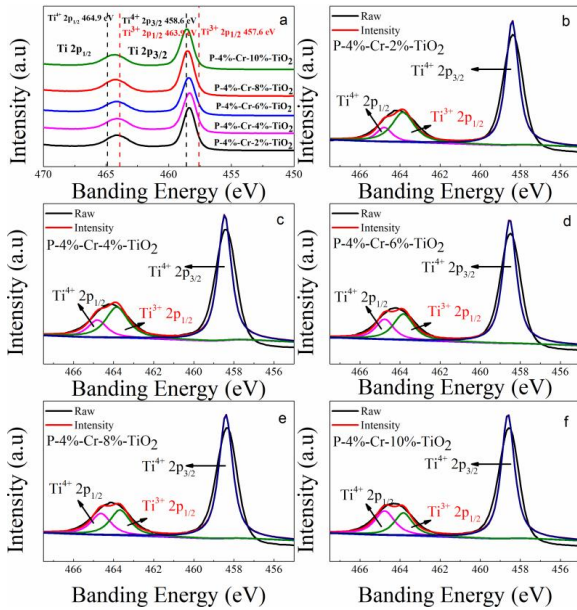


图 9. (a) 不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C 煅烧温度下 Ti2p 的 XPS 图谱、(b) P-4%-Cr-2%-TiO₂ 的 Ti2p 分峰图、(c) P-4%-Cr-4%-TiO₂ 的 Ti2p 分峰图、(d) P-4%-Cr-6%-TiO₂ 的 Ti2p 分峰图、(e)

P-4%-Cr-8%-TiO₂ 的 Ti2p 分峰图、(d) P-4%-Cr-10%-TiO₂ 的 Ti2p 分峰图

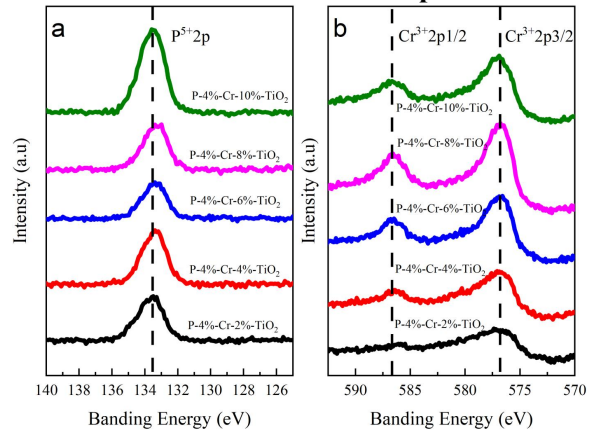


图 10. (a) 不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C 煅烧温度下 P2p 的 XPS 图谱、(b) 不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C 煅烧温度下 Cr2p 的 XPS 图谱

由图 (b) 可知，随着 Cr 掺杂量增加，吸收边红移更为明显，带隙值从 2.14 eV 逐渐减小至 1.88 eV。该现象可归因于 P、Cr 共掺杂的协同效应，导致 TiO₂ 晶格膨胀、能带结构改变及禁带中杂质能级的形成，从而增强了对可见光的吸收。

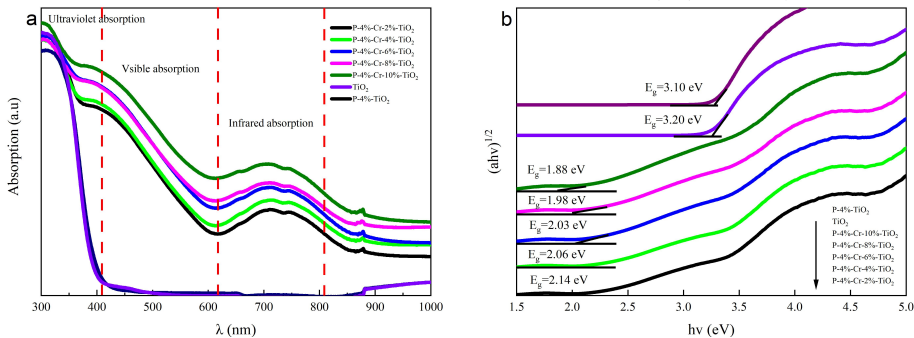


图 11. (a) 不同 Cr 掺杂量 P-4%-Cr-TiO₂ 在 600°C 煅烧温度下的紫外-可见漫反射光谱、(b) 紫外-可见漫反射光谱的 (ahv)^{1/2}-hv 图

3.2 可见光催化降解苯酚效果

不同 Cr 掺杂量和不同煅烧温度 P-4%-Cr-TiO₂ 对苯酚去除率效果如图 12 所示。苯酚去除率随煅烧温度升高先增后降，在 600°C 时 P-4%-Cr-6%-TiO₂ 的去除率最高，达 82.5%。P、Cr 共掺杂有效拓宽了材料的光响应范围，提高了可见光利用效率。在较低煅烧温度下 (≤600°C)，提高温度有助于增强 TiO₂ 结晶度和量子产率，从而提升苯酚降解效率；而当温度超过 600°C 时，Cr₂O₃ 结晶的形成抑制了量子效率，导致活性降低。当 Cr 掺杂量为 2%–6% 时，去除率随掺杂量增加而上升，这是由于 Cr³⁺ 引入形成杂质能级，窄化带隙，促进可见光吸收与

载流子分离；但当掺杂量进一步提高至 8%–10% 时，过量 Cr 形成 Cr₂O₃ 分离相，不利于光催化反应进行，催化性能因而下降。

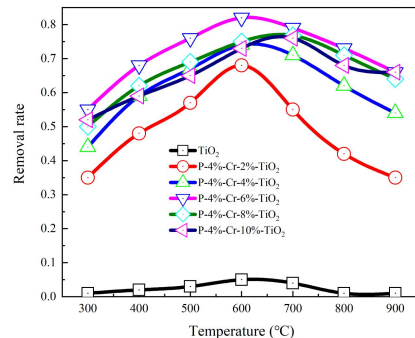


图 12. 不同 Cr 掺杂量和不同煅烧温度 P-4%-Cr-TiO₂ 对苯酚去除率效果图

4. 结论

(1)采用溶胶凝胶法制备了 P、Cr 共掺杂 TiO₂ 光催化材料。P、Cr 元素的引入减弱 TiO₂ 团聚现象，提高材料的分散性；强烈抑制 TiO₂ 晶粒生长，减小晶粒尺寸从而扩大比表面积至 100 m²/g 左右；能带中引入杂质能级从而拓宽光吸收边界，带隙值从 2.14 eV 减小至 1.88 eV，增强对可见光响应能力。

(2)P、Cr 元素的引入在可见光条件下对苯酚的去除率均显著提高。可见光辐射 12h，P-4%-Cr-6%-TiO₂ 在 600℃煅烧温度下，催化剂投加量 0.5g/L、苯酚初始浓度 300mg/L、对苯酚的去除率达到最大 82.5%。

参考文献

- [1] 朱在洪, 王雪, 郑刚超等.某苯酚厂职业病危害控制效果评价[J].当代化工研究, 2021, (09): 172-174.
- [2] 刘嘉润, 何怡静, 乔宇等.微生物燃料电池在含酚废水处理中的应用[J].上海师范大学学报(自然科学版), 2023, 52 (01): 110-117.
- [3] 强喆林, 王玲, 吴迪等.含酚废水处理技术研究进展[J].当代化工, 2021, 50 (09): 2206-2210.
- [4] FUJISHIMA A, HONDA K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode [J]. Nature, 1972, 238 (5358): 37-38.
- [5] WANG X H, LI J J, ZHANG H W. Research progress on treatment technologies for phenolic wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43 (5): 105 - 112.
- [6] LIU Y F, WANG Z Q, ZHAO X X. Research progress in modification of TiO₂ photocatalysts [J]. Materials Review, 2021, 35 (9): 9012 - 9018.
- [7] CHEN J, YANG M, ZHOU L. Preparation and properties of co - doped TiO₂ photocatalysts [J]. New Chemical Materials, 2022, 50 (4): 215 - 219.
- [8] ZHANG M, LI H, WANG L. Preparation and photocatalytic performance of phosphorus - doped TiO₂ photocatalysts [J]. Journal of Inorganic Materials, 2019, 34 (7): 765 - 771.
- [9] ZHAO Q, SUN T, LIU H. Synthesis and application of chromium - doped TiO₂ photocatalysts [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2020, 37 (6): 621 - 628.
- [10] 马骏杰, 李伟, 蓝晓琪等.二维 TiO₂ 基材料的制备及其储钠性能研究进展[J].电源技术, 2025, 49 (02): 255-266.
- [11] 朴锐, 刘贺津, 乔鹏等.TiO₂ 纳米管改性方法研究进展[J].当代化工, 2025, 54 (01): 149-153.
- [12] 侯宝森, 曾锦涛, 陆林源等.改性 TiO₂ 光催化降解有机染料的研究进展[J].当代化工研究, 2024, (23): 16-18.
- [13] BANSAL J, TABASSUM R, SWAMI S, et al. Performance analysis of anomalous photocatalytic activity of Cr-doped TiO₂ nanoparticles [Cr(x)TiO₂(1-x)][J]. Applied Physics A, 2020, 126(5): 363.
- [14] 吴丹, 刘伯赓, 徐洲.改性纳米 TiO₂ 的制备及光催化降解废水性能的研究[J].功能材料, 2025, 56 (01): 1164-1170.
- [15] 高悦, 齐轩.氮掺杂 TiO₂ 光催化剂制备及性能分析[J].化工设计通讯, 2024, 50(11): 96-98.
- [16] 李媛, 张家豪, 王月. Li-Ce 共掺杂 TiO₂ 纳米材料制备及光催化性能的研究[J].当代化工, 2024, 53 (10): 2419-2422.
- [17] 王冠宇, 郭卫杰, 刘迪等.非金属 (C、N、S、P) 掺杂对锐钛矿 TiO₂ 性质影响的第一性原理研究[J].矿业科学学报, 2020, 5 (05): 584-591.
- [18] 王冠宇.磷、铬共掺杂 TiO₂ 复合 GO 材料的制备及光催化性能[D].中国矿业大学(北京)博士学位论文, 2021.