

# V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 脱硝催化剂的制备及抗硫性能

周惠<sup>1,2</sup>, 黄华存<sup>1,2\*</sup>, 董文华<sup>1,2</sup>, 崔晶<sup>1</sup>

(1. 广西大学环境学院, 广西南宁 530004;

2. 广西大学广西高校环境保护重点实验室, 广西南宁 530004)

**摘要:**以锐钛矿 TiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub>(P25) 为载体, 采用浸渍法制备 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 和 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>(P25) 催化剂。利用 FESEM、EDS、XRD、TGA 和激光拉曼对催化剂进行表征。以 NH<sub>3</sub> 为还原剂, 考察载体晶型、钒质量分数、SO<sub>2</sub> 和活性测试时间对 SCR 催化还原 NO 的性能影响。结果表明, 锐钛矿 TiO<sub>2</sub> 载体制备的催化剂更利于选择性催化还原反应的发生, 并且钒质量分数为 3% 时, 锐钛矿 TiO<sub>2</sub> 载体制备的催化剂脱硝性能较好且抗硫性能表现良好。在空速为 10 000 h<sup>-1</sup>, 反应温度为 300℃, 存在 0.08% SO<sub>2</sub> 的条件下, 催化剂在 48 h 内也能保持 94% 的脱硝率。

**关键词:**选择性催化还原法; V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>; 浸渍法; P25

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)09-0114-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.09.026

## Preparation of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> denitrification catalyst and its sulfur resistance

ZHOU Hui<sup>1,2</sup>, HUANG Hua-cun<sup>1,2\*</sup>, DONG Wen-hua<sup>1,2</sup>, CUI Jing<sup>1</sup>

(1. School of the Environment, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Universities Key Laboratory of Environmental Protection, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> and V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>(P25) catalysts are prepared by impregnation method with anatase TiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>(P25) as carriers. The catalysts are characterized by FESEM, EDS, XRD, TGA and Laser Raman in order to obtain physicochemical properties of the prepared catalysts. The influences of carrier's crystal type, mass fraction of vanadium, SO<sub>2</sub> and activity test time on selective catalytic reduction of NO by NH<sub>3</sub> are investigated. The results indicate that the catalyst prepared by anatase TiO<sub>2</sub> carrier is more conducive to the selective catalytic reduction, and exhibits better performance in denitration and resisting sulfur when the mass fraction of vanadium is 3%. The results also show that the denitration rate by the catalyst can maintain at 94% within 48 h under the conditions of space velocity at 10 000 h<sup>-1</sup>, the reaction temperature being 300℃ and the presence of 0.08% SO<sub>2</sub>.

**Key words:** selective catalytic reduction method; V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>; impregnation method; P25

我国火电厂主要以燃煤发电为主。大气污染中 90% 的 SO<sub>2</sub> 排放和 67% 的 NO<sub>x</sub> 排放来源于煤<sup>[1]</sup>。目前, 工业应用较为成熟的脱硝方法是选择性催化还原法(selective catalytic reduction, SCR), 效率可达 70%~90%, 但存在催化剂造价过高的缺点<sup>[2]</sup>。对于 NH<sub>3</sub>-SCR 过程, 燃煤火电厂中广泛应用于 NO<sub>x</sub> 处理的是 TiO<sub>2</sub> 为载体的脱硝催化剂<sup>[3-5]</sup>。Zhao 等<sup>[6]</sup>采用溶胶凝胶法制备 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-MoO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂, 结果发现钼的加入对汞氧化能力具有重要作用; Djerad 等<sup>[7]</sup>用溶胶凝胶法制备 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂, 结果发现较高的煅烧温度使 TiO<sub>2</sub> 由锐钛矿型向金红石型转变; Zhang 等<sup>[8]</sup>对低温 SCR-NH<sub>3</sub> 的 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂的表面特性进行研究, 高质量分数钒的加入使 V 和 Ti 产生相互作用, 减小 TiO<sub>2</sub>

由锐钛矿型向金红石型转变的温度。这些研究表明, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 脱硝催化剂脱硝性能受 TiO<sub>2</sub> 载体和钒质量分数的影响, TiO<sub>2</sub> 载体晶型的变化和钒质量分数的高低影响脱硝率。由于 V<sup>3+</sup> 本身也是硫酸生产工艺中将 SO<sub>2</sub> 氧化成 SO<sub>3</sub> 的主要催化剂, 因此在工业脱氮中应用钒系催化剂, 同时还要考虑到硫酸盐对该类催化剂的活性抑制问题<sup>[9]</sup>。因此, 笔者以锐钛矿型和 P25(混晶型, 锐钛矿和金红石的质量比约为 4:1) 纳米二氧化钛作为载体, 负载不同质量分数的钒, 考察不同的 TiO<sub>2</sub> 载体和钒质量分数对选择性催化还原 NO 的影响, 同时考察烟气中 0.08% SO<sub>2</sub> 的存在对脱硝性能的影响, 并利用 FESEM、EDS、XRD、TGA 和激光拉曼等表征手段分析催化剂的表面形貌和晶型变化。

收稿日期: 2017-03-14

基金项目: 广西高校环境保护重点实验室项目[桂教科研(2015)5号]

作者简介: 周惠(1991-), 女, 硕士, 研究方向为大气环境与污染控制, 735496053@qq.com; 黄华存(1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为大气环境与污染控制、环境空气净化处理技术, 通讯联系人, hua0666@163.com。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

纳米二氧化钛 ( $TiO_2$ ), 质量分数为 99.82%, 锐钛矿, 天津市宏达化工有限公司生产; P25 纳米二氧化钛 [ $TiO_2(P25)$ ], 质量分数为 99.5%, 德国赢创工业集团生产; 钨酸铵 [ $(NH_4)_{10}W_{12}O_{41} \cdot xH_2O$ ], 质量分数为 85.0%~90.0%, 国药集团化学试剂有限公司生产; 偏钒酸铵 ( $NH_4VO_3$ ), 质量分数为 99.0%, 成都市科龙化工试剂厂生产; 草酸 ( $H_2C_2O_4$ ), 质量分数为 99.5%, 天津市大茂化学试剂厂生产。氮气 (99.999%  $N_2$ ), 国信气体研究有限公司生产; 氧气 (99.999%  $O_2$ ), 佛山市华特气体有限公司生产。氨气 (10%  $NH_3$ ,  $N_2$  为平衡气)、一氧化氮 (10%  $NO$ ,  $N_2$  为平衡气)、二氧化硫 (10%  $SO_2$ ,  $N_2$  为平衡气), 均为广州市君多气体有限公司生产。

### 1.2 催化剂的制备

采用浸渍法制备质量比  $m(V_2O_5):m(WO_3):m(TiO_2) = x:5:100$  的  $V_2O_5-WO_3/TiO_2$  和  $V_2O_5-WO_3/TiO_2(P25)$  催化剂, 其中钒质量分数  $x$  分别为 1%、3%、5%。量取适量的 5% 草酸溶液备用, 称取一定量的钨酸铵和偏钒酸铵溶于部分草酸溶液中, 取一定量的  $TiO_2$  和  $TiO_2(P25)$  粉末浸渍于上述混合液, 加入剩余草酸溶液, 于 60℃ 恒温水浴中搅拌 1 h, 静置 1 h 后于 105℃ 下彻底干燥, 经 500℃ 焙烧 5 h 并研磨、筛分至 40~60 目, 制得 SCR 脱硝催化剂样品, 如表 1 所示。

表 1 催化剂样品表

催化剂	成分组成(质量比)
V1WT	$V_2O_5:WO_3:TiO_2 = 1:5:100$
V3WT	$V_2O_5:WO_3:TiO_2 = 3:5:100$
V5WT	$V_2O_5:WO_3:TiO_2 = 5:5:100$
V1WTP	$V_2O_5:WO_3:TiO_2(P25) = 1:5:100$
V3WTP	$V_2O_5:WO_3:TiO_2(P25) = 3:5:100$
V5WTP	$V_2O_5:WO_3:TiO_2(P25) = 5:5:100$

### 1.3 催化剂的活性评价

催化剂活性评价装置如图 1 所示。以钢气瓶来模拟工业废气组成, 包括  $NO$ 、 $SO_2$ 、 $O_2$ 、 $N_2$  等,  $NH_3$  为还原气体。模拟烟气进入反应器的总流量为 200 mL/min,  $NO$ 、 $SO_2$ 、 $NH_3$  和  $O_2$  的体积分数分别为 0.08%、0.08%、0.08% 和 5%,  $N_2$  作为平衡气, 空速为 10 000  $h^{-1}$ , 反应器下端放置石英棉来固定催化剂。实验过程中反应器采用程序升温,  $NO$  初始浓度及尾气浓度用 TH-990S 烟气分析仪(武汉市天虹

智能仪有限责任公司生产)进行在线监测。

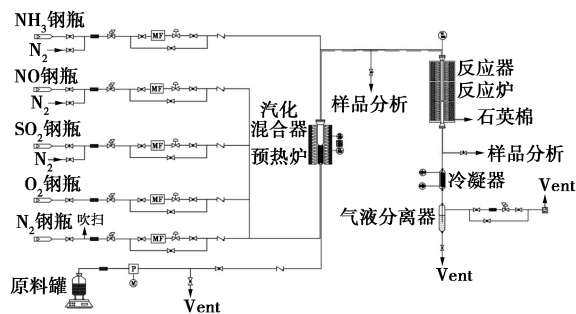


图 1 活性评价装置

### 1.4 表征方法

利用日本日立 SU 8020 型场发射扫描电镜 (FESEM) 观察样品形貌, 加速电压为 20 kV; 利用英国牛津公司 X-MAX 80 型能谱分析仪 (EDS) 分析催化剂含有的元素种类, 该仪器与 FESEM 联用; 利用丹东浩元仪器有限公司 DX-2700A 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析样品的晶相, 其辐射源为  $Cu-K\alpha$ , 波长  $\lambda = 0.154$  nm, 扫描范围  $2\theta$  为 20~80°; 利用日本岛津 DTG-60(H) 型热重分析仪 (TGA) 分析催化剂的热稳定性能; 利用英国雷尼绍 inVia Reflex 型激光拉曼光谱仪 (Raman) 分析样品的分子结构, 其激发光源波长为 532 nm, 检测范围 100~2 000  $cm^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 场发射扫描电镜分析

载体与催化剂的场发射扫描电镜分析如图 2 所示, 分别为放大倍数为  $50 \times 10^3$  的  $TiO_2$ 、 $TiO_2(P25)$ 、V1WT、V1WTP。从图 2(a)、图 2(b) 可以看出,  $TiO_2$  与  $TiO_2(P25)$  载体尺寸都比较均一, 存在很多微孔,

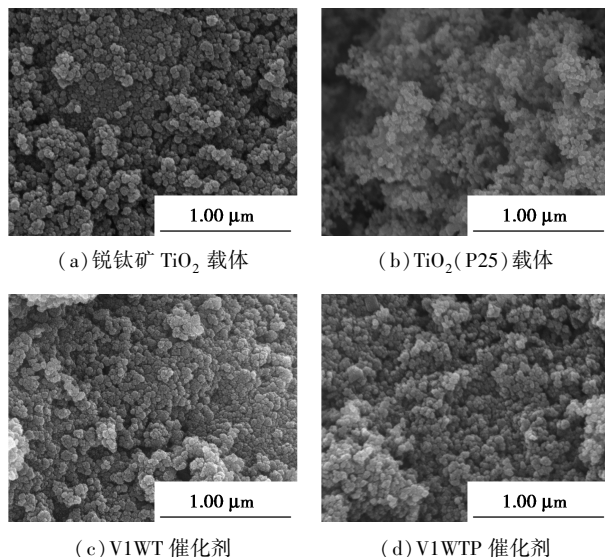


图 2 催化剂的 FESEM 图

并且 TiO<sub>2</sub>(P25) 载体晶粒更小。从图 2(c) 可以看出, 负载 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 WO<sub>3</sub> 后, V1WT 催化剂表面变得粗糙不平, 出现少量较大的晶粒, 但是活性组分分散较均匀。从图 2(d) 可以看出, V1WTP 催化剂的表面变得致密, 样品颗粒间发生烧结, 颗粒尺寸有所增大。

此外, 为了分析 V1WT 和 V1WTP 催化剂的元素种类, 对样品进行 EDS 表征, 结果分别如图 3 和图 4 所示。由图 3 可以看出, V1WT 中包含 O、Ti、V 和 W 4 种元素, 对应的原子质量分数分别为 75.27%、24.13%、0.20% 和 0.41%; 由图 4 可以看出, V1WTP 中也包含 O、Ti、V 和 W 4 种元素, 对应的原子质量分数分别为 80.22%、19.25%、0.15% 和 0.37%。证实了 V 和 W 成功地负载在 V1WT 和 V1WTP 上, 并且元素的质量分数和原子质量分数都相差不大, 因此, 2 种催化剂的 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 实际负载量大致相同。

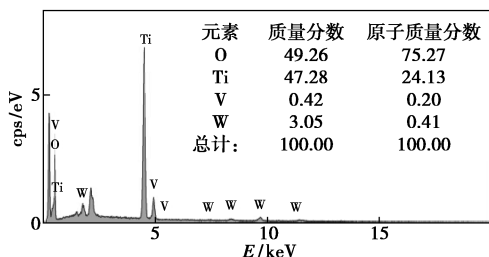


图 3 V1WT 的 EDS 图

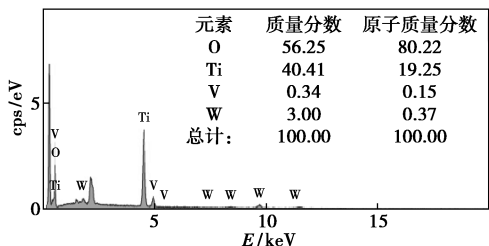
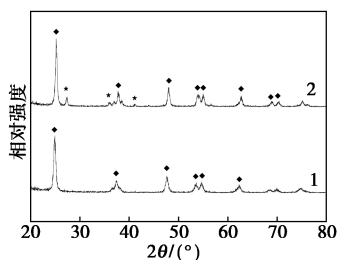


图 4 V1WTP 的 EDS 图

### 2.2 XRD 分析

V1WT 和 V1WTP 催化剂的 XRD 图如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 2 种样品的衍射峰的峰型尖锐, 说明结晶度良好, V1WT 以标准锐钛矿型 TiO<sub>2</sub> 峰 (PDF#21-1272) 为主<sup>[10]</sup>, 说明 500℃ 焙烧和负载活性组分均没有使 TiO<sub>2</sub> 的晶型结构改变; V1WTP 除了发现有锐钛矿型 TiO<sub>2</sub>, 还有金红石型的 TiO<sub>2</sub> 峰, 表征与所用材料相符。文献[11-12]中报道, 主要以锐钛矿相为主的 TiO<sub>2</sub> 比锐钛矿与金红石的混晶型 TiO<sub>2</sub> 表现出更好的催化活性。XRD 图中没有发现 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 WO<sub>3</sub> 的衍射峰, 说明其良好地分散在催化剂表面, 也有可能是形成高度非晶态或微晶太小, 低于 XRD 的检测限。

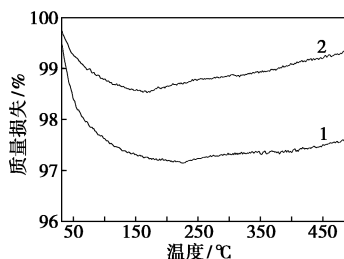


1—V1WT; 2—V1WTP

图 5 催化剂的 XRD 图

### 2.3 热重分析

V1WT 和 V1WTP 的热重分析图如图 6 所示。由图 6 可以看出, 2 种催化剂在 100℃ 后质量都有所减少, 主要是表面羟基脱水<sup>[7]</sup>, 而 V1WT 的质量比 V1WTP 先减少, 而且其表面羟基数量较多。催化剂表面羟基数量表示其对 NO 的吸附能力和氧化能力<sup>[13-14]</sup>, 较多表面羟基对选择性催化还原反应有利。200℃ 之后 2 种催化剂的质量都保持相对稳定, 说明他们在活性评价中热稳定性能良好。

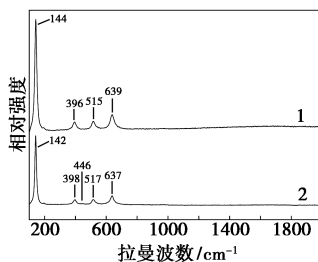


1—V1WT; 2—V1WTP

图 6 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 和 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>(P25) 催化剂的热重曲线

### 2.4 激光拉曼分析

V1WT 和 V1WTP 的激光拉曼光谱图如图 7 所示。由图 7 可以看出, V1WT 催化剂在 144、396、515、639 cm<sup>-1</sup> 处和 V1WTP 在 142、398、517、637 cm<sup>-1</sup> 处出现的为锐钛矿 TiO<sub>2</sub> 的拉曼特征峰, 其中 144 cm<sup>-1</sup> 与 142 cm<sup>-1</sup> 处归属为 E<sub>g</sub> 模式<sup>[15-17]</sup>, 均没有



1—V1WT; 2—V1WTP

图 7 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 和 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>(P25) 催化剂的拉曼光谱图

发现  $V_2O_5$  和  $WO_3$  的拉曼特征峰,说明  $V_2O_5$  和  $WO_3$  在载体表面均高度分散,这与 XRD 表征结果一致。 $V1WTP$  在  $446\text{ cm}^{-1}$  处出现的小峰为金红石  $TiO_2$  的拉曼特征峰<sup>[15,18]</sup>。

## 2.5 载体晶型对脱硝性能的影响

不同载体对脱硝性能的影响如图 8 所示。由图 8 可以看出,锐钛矿型纳米  $TiO_2$  制备的催化剂的脱硝率明显高于 P25 型纳米  $TiO_2$  制备的催化剂,钒质量分数为 3% 的催化剂在温度  $300\sim 350^\circ\text{C}$  时的脱硝率甚至可以达到 100%,而 P25 型纳米  $TiO_2$  制备的催化剂的脱硝率最高仅达到 95%。但在钒质量分数为 1%,温度为  $450^\circ\text{C}$  时,P25 型的脱硝率反而高于锐钛矿型。实验结果表明, $V_2O_5-WO_3/TiO_2$  的脱硝率在总体上比  $V_2O_5-WO_3/TiO_2$  (P25) 催化剂效率要高,与 Chin 等<sup>[11]</sup> 和 Cha 等<sup>[12]</sup> 的研究结果相符。

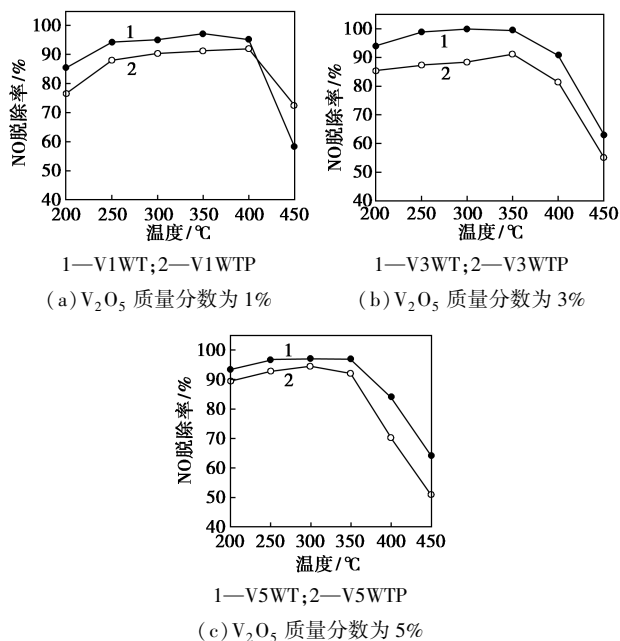


图 8 不同载体对催化剂脱硝性能的影响

## 2.6 钒质量分数对脱硝性能的影响

钒质量分数对脱硝性能的影响如图 9 所示。由图 9 可以看出,催化剂脱硝率的总体趋势都是随着温度的升高先增大后降低的。钒质量分数为 1% 时,催化剂虽然在  $400^\circ\text{C}$  表现良好,但是在其他温度的脱硝率都明显偏低,说明其脱硝性能十分不稳定;钒质量分数为 3% 时,催化剂的脱硝率在  $200\sim 350^\circ\text{C}$  都是最高的,脱硝性能相对比较稳定;钒质量分数为 5% 时,催化剂在  $350\sim 450^\circ\text{C}$  的高温范围内脱硝率极速下降,说明高质量分数的钒在高温下并不能保持良好的脱硝性能。相比锐钛矿型载体,P25 型的脱硝率整体偏低,但是和锐钛矿型催化剂相同的是,低

质量分数的催化剂在高温段的脱硝率较高,而高钒负载量的催化剂在低温段的脱硝率较高。

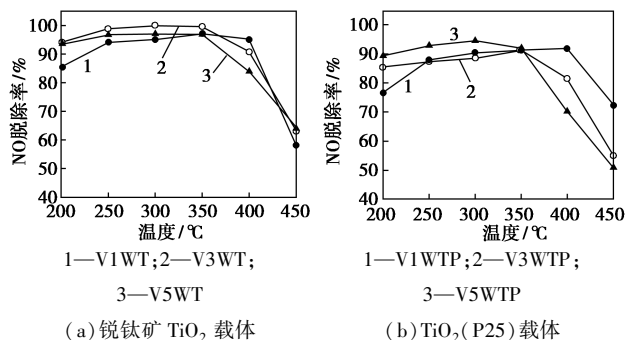


图 9 不同钒质量分数对催化剂脱硝性能的影响

## 2.7 $SO_2$ 对脱硝性能的影响

$SO_2$  对脱硝性能的影响如图 10 所示。由图 10 (a)、图 10(c) 和图 10(e) 可以看出,0.08%  $SO_2$  存在时,钒质量分数为 1% 时催化剂的活性反而提升,钒质量分数为 3% 和 5% 时, $SO_2$  对催化剂的影响可以忽略,尤其是在中高温段。总体来说,烟气中存在 0.08%  $SO_2$  对  $V_2O_5-WO_3/TiO_2$  催化剂的活性没有明显的影响,但是在低温段催化剂的活性降低了,在中高温段  $SO_2$  对催化剂的活性影响不明显。

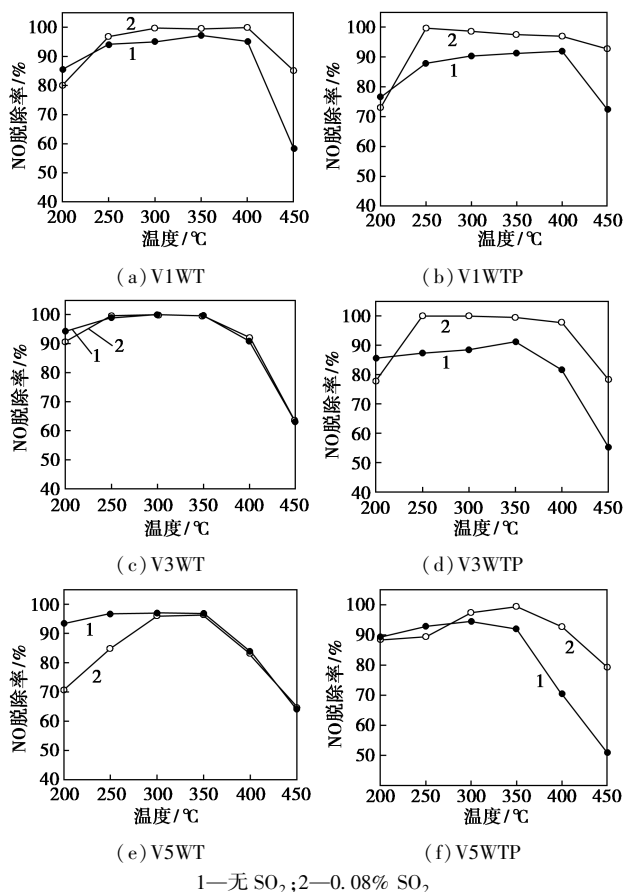


图 10  $SO_2$  对催化剂脱硝性能的影响

由图 10(b)、图 10(d) 和图 10(f) 可以看出, 0.08% SO<sub>2</sub> 存在时, 催化剂的催化活性明显得到了提升。与锐钛矿 TiO<sub>2</sub> 制备的催化剂相同, 在低温段 0.08% SO<sub>2</sub> 对催化剂的脱硝性能有一定的影响, 活性有所降低, 但在中高温段催化剂的催化活性有所提升。

## 2.8 活性测试时间对脱硝性能的影响

在以锐钛矿 TiO<sub>2</sub> 为载体, 钒质量分数为 3%, SO<sub>2</sub> 存在条件下, 催化剂具有良好的脱硝性能且受 0.08% SO<sub>2</sub> 影响较小, 在 300℃ 时脱硝率达到最高, 为 100%, 因此, 选取 V3WT 催化剂在空速为 10 000 h<sup>-1</sup>, 反应温度为 300℃ 的条件下, 研究活性测试时间对脱硝性能的影响, 结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 刚开始反应时还未稳定, 因此脱硝率为 92%, 随着活性测试时间为 12、24、36、48 h, 催化剂的脱硝率几乎没有变化, 都能达到 94%, 说明随着活性测试时间不断变长, 催化剂也能保持良好的脱硝性能。

表 2 活性测试时间对催化剂脱硝性能的影响

活性测试时间/h	0	12	24	36	48
NO 脱除率/%	92	94	94	94	94

## 3 结语

以锐钛矿 TiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub>(P25) 为载体, 采用浸渍法制备 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 和 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>(P25) 催化剂。FESEM、EDS、XRD、TGA 和激光拉曼等表征结果表明, 锐钛矿 TiO<sub>2</sub> 载体制备的催化剂经过负载活性组分和 500℃ 焙烧后, 晶型结构没有发生改变, 活性组分在载体表面分散均匀且表面羟基较多, 根据表征及实验结果充分说明, 锐钛矿 TiO<sub>2</sub> 载体制备的催化剂更利于选择性催化还原反应的发生。钒质量分数对于催化剂的脱硝率有着明显的影响, 钒质量分数为 3% 时, 锐钛矿 TiO<sub>2</sub> 载体制备的催化剂脱硝性能较好且抗硫性能表现良好。在空速为 10 000 h<sup>-1</sup>, 反应温度为 300℃, 存在 0.08% SO<sub>2</sub> 时, V3WT 催化剂在 48 h 内也能保持稳定的脱硝率。

## 参考文献

[1] Liang Z, Ma X, Lin H, *et al.* The energy consumption and environmental impacts of SCR technology in China [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(4): 1120-1129.

[2] 董慧科, 王菲, 董慧裕, 等. TiO<sub>2</sub> 光催化氧化脱除模拟烟气中的 NO<sub>x</sub> [J]. *环境工程学报*, 2015(5): 2379-2385.

[3] Yang N, Yu J, Dou J, *et al.* The effects of oxygen and metal oxide

catalysts on the reduction reaction of NO with lignite char during combustion flue gas cleaning [J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 152: 102-107.

- [4] 张礼君, 黄华存, 童张法. 纤维毡碳基 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂脱除 NO 的性能 [J]. *化学反应工程与工艺*, 2010(6): 539-543.
- [5] Yang J, Yang Q, Sun J, *et al.* Effects of mercury oxidation on V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> catalyst properties in NH<sub>3</sub>-SCR process [J]. *Catalysis Communications*, 2015, 59: 78-82.
- [6] Zhao B, Liu X, Zhou Z, *et al.* Effect of molybdenum on mercury oxidized by V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-MoO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> catalysts [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 253: 508-517.
- [7] Djerad S, Tifouti L, Crocoll M, *et al.* Effect of vanadia and tungsten loadings on the physical and chemical characteristics of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> catalysts [J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2004, 208(1): 257-265.
- [8] Zhang S, Zhong Q. Surface characterization studies on the interaction of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> catalyst for low temperature SCR of NO with NH<sub>3</sub> [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2015, 221: 49-56.
- [9] 戴华, 叶代启, 田柳青. SO<sub>2</sub> 及水蒸汽对新型钒氧化物脱氮催化剂活性的影响 [J]. *工业催化*, 2005(6): 47-50.
- [10] Qiu Y, Liu B, Du J, *et al.* The monolithic cordierite supported V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-MoO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> catalyst for NH<sub>3</sub>-SCR [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 294: 264-272.
- [11] Chin S, Park E, Kim M, *et al.* Synthesis and photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> nanoparticles prepared by chemical vapor condensation method with different precursor concentration and residence time [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 362(2): 470-476.
- [12] Cha W, Ehrman S H, Jurng J. CeO<sub>2</sub> added V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> catalyst prepared by chemical vapor condensation (CVC) and impregnation method for enhanced NH<sub>3</sub>-SCR of NO<sub>x</sub> at low temperature [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, 4(1): 556-563.
- [13] Costello C K, Yang J H, Law H Y, *et al.* On the potential role of hydroxyl groups in CO oxidation over Au/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2003, 243(1): 15-24.
- [14] Tang N, Liu Y, Wang H, *et al.* Mechanism study of NO catalytic oxidation over MnO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> catalysts [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011, 115(16): 8214-8220.
- [15] Pang L, Fan C, Shao L, *et al.* Effect of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/WO<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> catalyst preparation method on NO<sub>x</sub> removal from diesel exhaust [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2014, 35(12): 2020-2028.
- [16] Zhang W F, He Y L, Zhang M S, *et al.* Raman scattering study on anatase TiO<sub>2</sub> nanocrystals [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2000, 33(8): 912.
- [17] Chesalov Y A, Andrushkevich T V, Sobolev V I, *et al.* FTIR study of β-picoline and pyridine-3-carbaldehyde transformation on V-Ti-O catalysts. The effect of sulfate content on β-picoline oxidation into nicotinic acid [J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2013, 380: 118-130.
- [18] 吴健春, 任亚平, 王斌. 利用拉曼光谱定量分析金红石型二氧化钛 [J]. *分析试验室*, 2012(12): 100-103. ■