

# 介孔 $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ 复合催化剂的一锅法合成及其对噻吩类化合物的高效脱除

周生学\*, 欧少源, 李瑾蓉, 赵英孜

(宁夏师范大学化学化工学院, 宁夏绿色催化材料与技术重点实验室, 宁夏 固原 756000)

**摘要:**采用一锅水热法制备了二氧化钛-三氧化钼( $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ )复合材料,研究了这种材料在不同反应条件下对二苯并噻吩(DBT)等含硫化化合物的脱除效果,探讨了相关反应机理。实验结果表明,在反应温度 50°C、催化剂 0.05 g 和  $\text{H}_2\text{O}_2$  用量 25  $\mu\text{L}$  的条件下,脱硫率可达 100%。循环稳定性实验结果显示,在重复使用 10 次后,该催化剂的脱硫率仍保持在 95% 以上,展现出良好的催化稳定性。

**关键词:**  $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ ; 过渡金属氧化物; 深度脱硫; 水热法; 噻吩

中图分类号: TQ426.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)02-0160-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.02.026

## One-pot synthesis of mesoporous $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ composite catalyst and its high-efficiency desulfurization performance for thiophene compounds

ZHOU Sheng-xue\*, OU Shao-yuan, LI Jin-rong, ZHAO Ying-zi

(Ningxia Key Laboratory of Green Catalytic Materials and Technology, College of Chemistry and Chemical Engineering, Ningxia Normal University, Guyuan 756000, China)

**Abstract:** Titanium dioxide-molybdenum trioxide ( $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ ) composite materials were prepared using a one-pot hydrothermal method. The removal effect of this material on sulfur-containing compounds such as dibenzothiophene (DBT) under different reaction conditions was investigated, and the relevant reaction mechanisms were explored. Experimental results showed that at a reaction temperature of 50°C, with 0.05 g of catalyst and 25  $\mu\text{L}$  of  $\text{H}_2\text{O}_2$ , the desulfurization efficiency could reach 100%. The results of the cyclic stability test indicated that after 10 consecutive reaction cycles, the desulfurization efficiency of the catalyst remained above 95%, demonstrating high catalytic stability.

**Key words:**  $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ ; transition metal oxides; deep desulfurization; hydrothermal method; thiophene

燃油中含有多种硫、氮化合物,大量燃烧时会产生硫氧化物和氮氧化物等有害气体,对大气环境具有严重危害<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着环境污染问题日益严峻,燃料油燃烧带来的污染问题逐渐凸显,各国推出更严格的燃料油质量标准,对柴油中的含硫化合物含量严格控制<sup>[4-6]</sup>,我国《重型柴油车污染物排放限值及测量方法》规定柴油中硫含量不高于 10 mg/L<sup>[7]</sup>。

传统的加氢脱硫(HDS)<sup>[8-12]</sup>通常需要高温高压条件以及昂贵的催化剂,并且难以脱除二苯并噻吩(DBT)等噻吩类含硫化合物。氧化脱硫(ODS)<sup>[13-17]</sup>利用氧化剂将燃油内的含硫化合物氧化后,形成易溶于水的化合物,萃取后与燃油分离,达到脱硫的效果,具有反应条件温和、效率高和成本低等优点。过渡金属氧化物( $\text{WO}_3$ 、 $\text{MoO}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 等)

具有较高氧化态,在氧化脱硫反应过程中展现出高效的催化活性<sup>[18-22]</sup>,并且过渡金属氧化物易于回收,可以通过简单的物理或化学方法从反应体系中分离出来,经过适当的再生处理后,能够保持其原有的催化性能,进而实现资源的高效利用,减少废弃物的产生。

本研究采用一锅水热法合成了二氧化钛-三氧化钼( $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ )复合材料,通过扫描电镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)、X射线光电子能谱仪(XPS)和  $\text{N}_2$  吸附-脱附自动吸附仪等多种仪器表征了其形貌和结构,并以所制备的  $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$  作为催化剂,探究了这类材料在模拟燃油催化氧化脱硫中的性能,并结合傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、质谱(MS)等表征手段,分析了催化氧化脱硫的反应机理。

收稿日期: 2025-09-04; 修回日期: 2025-12-05

基金项目: 宁夏重点研发项目(引才专项)(2021BEB04052); 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03329); 宁夏回国留学人员创新创业项目([2023]5号); 宁夏高校一流学科建设项目(HGZD23-01, HGZD22-23); 宁夏师范大学大学生科技创新基金项目资助

作者简介: 周生学(1983-), 男, 博士, 教授, 研究方向为清洁能源催化, 通讯联系人, sxzhou@nxnu.edu.cn。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

正辛烷(分析纯,上海泰坦科技股份有限公司);二苯并噻吩(分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司);苯并噻吩(分析纯,上海泰坦科技股份有限公司);4,6-二甲基二苯并噻吩(分析纯,上海泰坦科技股份有限公司);过氧化氢(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);四氯化钛(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);五氯化钼(分析纯,上海泰坦科技股份有限公司);乙腈(分析纯,上海泰坦科技股份有限公司);甲醇(色谱纯,上海泰坦科技股份有限公司)。

高效液相色谱仪(HPLC, Agilent 1200, 安捷伦公司);紫外分光光度计(UV-Vis, Cary 3500, 安捷伦公司);X射线衍射仪(D8 Advance, 德国 Bruker 公司);红外光谱仪(NEXUS 870, 美国 Nicolet 公司);XPS 能谱仪(K-Alpha, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司);扫描电子显微镜(SEM, PhilipsXL 30, 荷兰 Philips 公司);N<sub>2</sub> 吸附-脱附自动吸附仪(ASAP 2010, 美国 Micromeritics 公司)。

### 1.2 催化剂制备

向聚四氟乙烯内衬高压反应釜中依次加入 2 mmol MoCl<sub>5</sub>、18 mmol TiCl<sub>4</sub>、58 mL 蒸馏水,放入烘箱中于 150℃ 下加热 3 h,取出反应釜自然冷却至室温,离心收集沉淀,用去离子水洗涤,并在烘箱中于 60℃ 下干燥 12 h 后,得到 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 复合材料。

### 1.3 氧化脱硫反应

使用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 作为氧化剂, TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 作为催化剂进行氧化脱硫。准确称量 0.025 mg DBT,溶解到 250 mL 正辛烷中,配成硫含量为 10 μg/g 的模型油。取 10 mL 该模型油加入三角瓶中,再依次加入 0.05 g TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub>、25 μL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 10 mL 乙腈,于一定温度和搅拌转速下反应后,取少量上层油相,用高效液相色谱仪测定硫含量,并根据式(1)计算脱硫率:

$$D_s = [(C_0 - C_t)/C_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $D_s$  为脱硫率,%;  $C_0$  为模拟燃油初始硫含量, mol/L;  $C_t$  为反应  $t$  时间后模拟燃油中硫含量, mol/L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的形貌表征

TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的 SEM 表征结果如图 1(a)、(b) 所示,可以看到,所合成的样品呈现疏松的无定形结

构。TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的 EDS 表征结果如图 1(c)~(g) 所示,其 Ti、O、Mo 元素在样品中分布均匀。

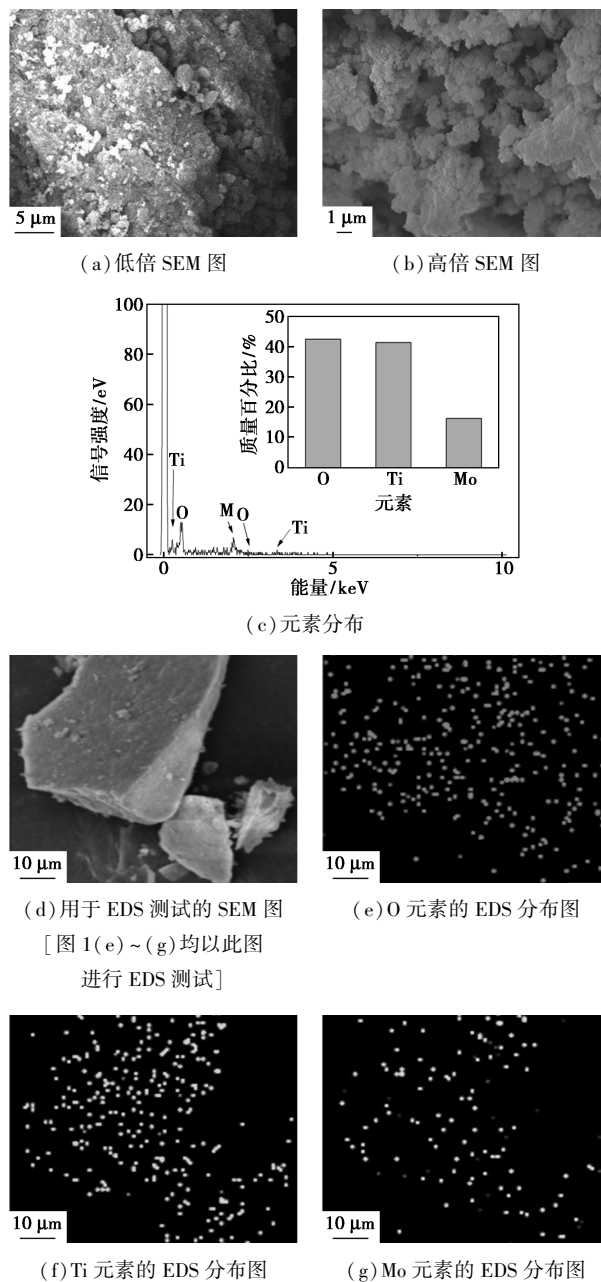


图 1 合成的 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的形貌表征及 EDS 元素分布图

### 2.2 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的结构表征

图 2(a) 是合成的 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的 XRD 表征结果,在 25.7° 和 39.6° 出现的峰为 MoO<sub>3</sub> 的特征衍射峰,在 48.0°、53.8°、55.0° 出现的衍射峰为 TiO<sub>2</sub> 的 (200)、(105)、(211) 衍射面(PDF#99-0008),反应前后的催化剂谱图无明显差别,说明脱硫反应后催化剂性质未产生明显改变。图 2(b) 曲线为 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的 N<sub>2</sub> 吸附等温线,曲线中后段上升趋势加快,且末尾处出现吸附平台,呈现第二类吸附等温线的

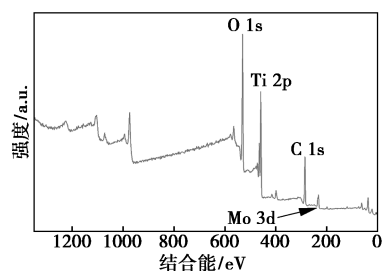
形状和特点,反映出介孔固体单一-多层可逆吸附过程,并且吸附质发生毛细管凝聚<sup>[23-24]</sup>。

TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的比表面积和孔径参数如表 1 所示,其中,TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的孔径为 5.062 5 nm、孔容为 0.318 020 cm<sup>3</sup>/g、比表面积为 251.276 4 m<sup>2</sup>/g。TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 孔分布曲线如图 2(c)所示,可以看出,在 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 中,孔径大小集中在 10 nm 左右,具有介孔结构<sup>[25]</sup>。

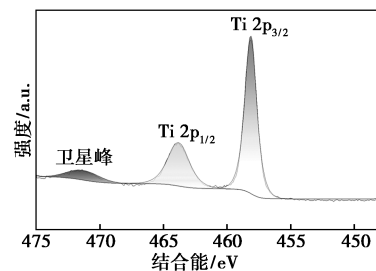
表 1 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的比表面积和孔径参数

催化剂	孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔径/nm	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )
TiO <sub>2</sub> -MoO <sub>3</sub>	0.318020	5.0625	251.2764

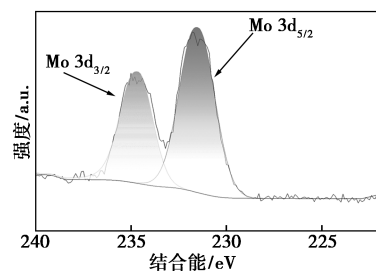
图 2(d)为 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的全扫描 XPS 谱图,具有 Ti、Mo、O、C 的特征峰。图 2(e)为 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 中 Ti 2p 的谱图,Ti 2p<sub>1/2</sub> 的峰位于 464.13 eV,Ti 2p<sub>3/2</sub> 峰位于 458.35 eV,对应 TiO<sub>2</sub> 中的 Ti<sup>4+</sup>,还可以发现位于 471.49 eV 处对应的 Ti<sup>2+</sup> 的卫星峰(Satellite)<sup>[26]</sup>。图 2(f)为 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的 Mo 3d 的高分辨率窄光谱,可



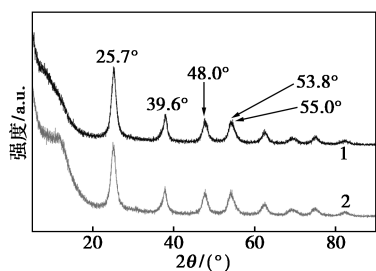
(d) TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的 XPS 总谱图



(e) TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的 Ti 2p 的 XPS 谱图

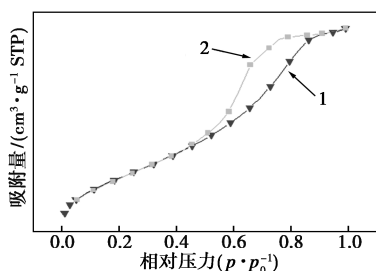


(f) TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的 Mo 3d 的 XPS 谱图



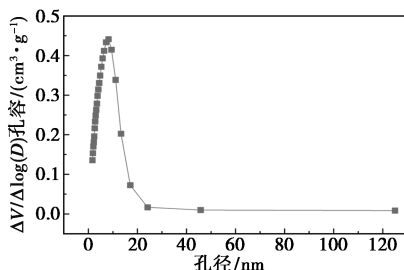
1—反应前;2—反应后

(a) 脱硫反应前后 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的 XRD 谱图



1—吸附曲线;2—脱附曲线

(b) TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的 BET 测试



(c) TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的孔径分布曲线图

图 2 合成的 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的结构表征

以看到 Mo 3d<sub>3/2</sub> 的峰位于 235.58 eV, Mo 3d<sub>5/2</sub> 峰位于 232.38 eV,对应 MoO<sub>3</sub> 中的 Mo<sup>6+</sup>,表明 TiO<sub>2</sub> 和 MoO<sub>3</sub> 在 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 中以最高氧化态形式存在<sup>[27]</sup>。

### 2.3 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 对噻吩类化合物的脱硫性能分析

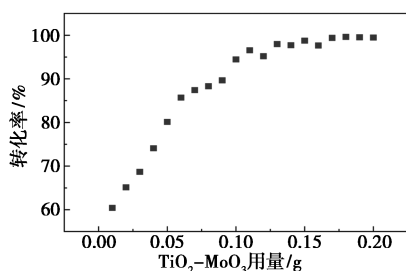
#### 2.3.1 使用不同反应体系对脱硫性能的影响

图 3(a)为 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 用量对脱硫率的影响。在本组实验中,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的用量为 10 μL。可以看到,TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 用量从 0.01 g 增长至 0.06 g 时,脱硫率提升 27%。在 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 用量达到 0.11 g 时,脱硫率超过 95%;随着用量继续加大,脱硫率可以达到 100%。

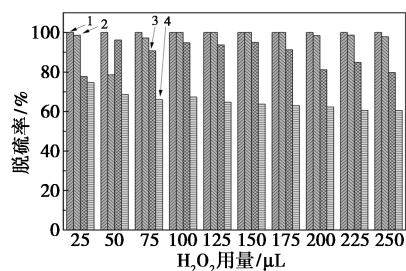
图 3(b)所示为不同 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 用量下,脱硫率随 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量的变化规律。由图可知,当 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 用量为 0.01 g 时,脱硫率在不同 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量时总体不高,维持在 60%~75% 范围;当 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 用量为 0.02 g 时,脱硫率在不同 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量下普遍提升;当 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 用量为 0.03 g 时,脱硫率在不同 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量下总体可达 98% 以上(除 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量 50 μL 样品外);当 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 用量为 0.04 g 时,脱

硫率在不同 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量下均可达到 100%。因此,选用合适的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量,可在较低 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 用量下实现高脱硫率。本实验选取最佳的 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 用量为 0.04 g, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量为 25 μL。

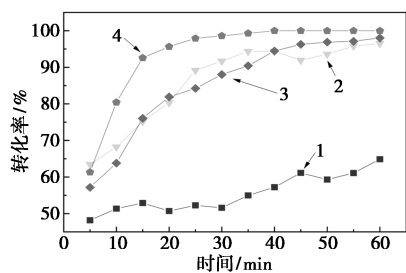
图 3(c) 考察了不同温度下脱硫效果与反应时间的关系。随着反应时间增大,脱硫率逐渐增大。当反应温度为 20℃ 时,脱硫率整体偏低,最高达 65%,从反应时间 5 min 增长到 60 min,脱硫率增长幅度为 17%,增长幅度较小。当反应温度为 30~



(a) TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 的质量对脱硫性能的作用

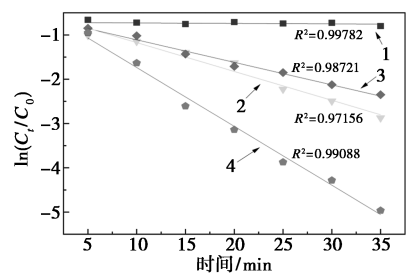


1—0.04 g; 2—0.03 g; 3—0.02 g; 4—0.01 g  
(b) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的体积对脱硫性能的影响



1—20℃; 2—30℃; 3—40℃; 4—50℃

(c) 温度和反应时间对脱硫性能的影响



1—20℃; 2—30℃; 3—40℃; 4—50℃

(d) 温度和反应时间对反应速率的影响

图 3 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 体系脱硫性能测试

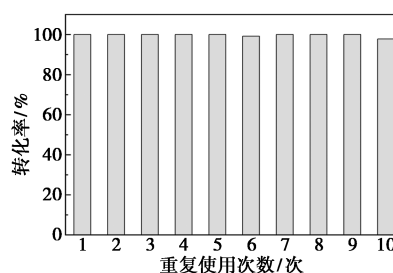
40℃ 时,脱硫率最高可达 97%,从反应时间 5 min 增长到 60 min,脱硫率增长幅度约为 35%,而 30℃ 与 40℃ 的温度对脱硫率影响差别不明显,曲线出现交叉;当反应温度为 50℃ 时,脱硫率最高达 100%,实现了硫的完全脱除,从反应时间 5 min 增长到 45 min,脱硫率增长幅度为 31%。反应速率的阿伦尼乌斯拟合图如图 3(d) 所示,随着反应时间增加,脱硫率逐渐增大,增长幅度与时间呈线性关系,在反应温度为 50℃ 时,脱硫率在反应时间 40 min 时达到 100%。

### 2.3.2 催化剂循环稳定性

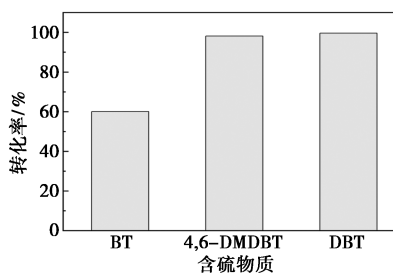
图 4(a) 为催化剂脱硫性能的循环稳定性测试结果。在一次脱硫实验结束后,取出 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 催化剂,用乙醇浸泡 1 h 后进行离心处理,收集沉淀物,在 50℃ 下烘干,再将其用于后续的脱硫反应。由图可以看出, TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 重复使用 10 次后,脱硫率保持在 95% 以上,表明该催化剂具有良好的循环稳定性。

### 2.3.3 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 对其他含硫物质的脱除性能

考察了 TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 对其他噻吩类含硫物质,如 4,6-二甲基二苯并噻吩(4,6-DMDBT) 和苯并噻吩(BT) 的脱除性能。如图 4(b) 所示,分别用 4,6-DMDBT 和 BT 配制模拟柴油,测得其脱硫效率分别为 98% 和 60%,考虑到前述对 DBT 的脱硫率可以达到 100%,可以看出, TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 对 4,6-DMDBT 和 DBT 均能实现深度脱硫,而对 BT 的脱除效果一般。



(a) TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 催化剂脱硫反应循环稳定性



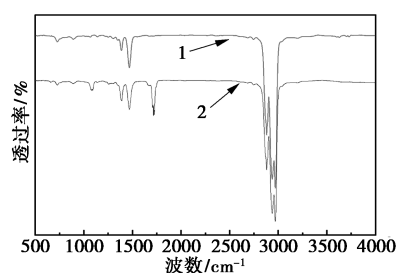
(b) TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> 催化剂对不同含硫物质的脱硫性能

图 4 催化剂循环稳定性测试及其对不同含硫物质的脱硫性能

这 3 种含硫物质脱除性能的顺序为: DBT > 4,6-DMDBT > BT。虽然 4,6-DMDBT 和 DBT 的空间位阻较大,但它们具有较强的离域  $\pi$  电子,在电子离域  $\pi$  键和金属离子活性位点之间发生的配位作用比 BT 更强,这使得  $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$  更容易与 DBT 和 4,6-DMDBT 结合形成配合物,因此, $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$  对 4,6-DMDBT 和 DBT 的脱除性能比 BT 更好。

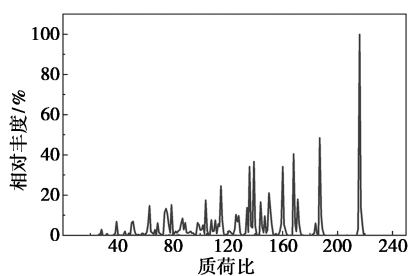
#### 2.4 $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ 的脱硫反应机理

图 5(a) 为脱硫反应前后模拟燃油的 FT-IR 图。从谱图可知,脱硫反应后,在  $1\ 100\ \text{cm}^{-1}$  处有吸收峰,对应 S—O 键的吸收峰;在  $1\ 700\ \text{cm}^{-1}$  处有吸收峰,对应 S=O 键的吸收峰,表明在脱硫反应后有 DBTO<sub>2</sub> 生成。对反应后的模拟燃油取上清液油相进行 MS 表征,图 5(b) 为表征得到的 MS 图,其最高峰对应的质荷比 ( $m/z$ ) 为 216,与 DBTO<sub>2</sub> 的相对分子量一致,表明脱硫反应后 DBT 主要被转化为 DBTO<sub>2</sub>,与图 5(a) 脱硫反应前后模拟燃油的 FT-IR 实验结果一致。



1—反应前;2—反应后

(a) 模拟燃油脱硫反应前后的 FT-IR 图



(b) 反应后模拟燃油的 MS 图

图 5 反应机理的图谱分析

在以上实验结果的基础上,探究了  $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$  催化剂在本研究体系中的催化氧化脱硫机理,如图 6 所示。 $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$  具有疏松多孔结构,使反应物可以充分扩散到催化剂内部,使活性位点和反应物之间能够完全接触。 $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$  首先与  $\text{H}_2\text{O}_2$  结合,形成过氧金属物质,再与 DBT 上的 S 结合,形成亚砷结构,进一步氧化转变为砷<sup>[28]</sup>。

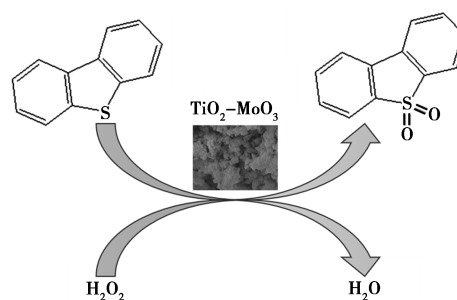


图 6  $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$  催化 DBT 转化为 DBTO<sub>2</sub> 的反应机理

### 3 结论

(1) 采用水热法合成了介孔  $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$  复合催化剂,并对其进行了结构表征,以  $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$  作为催化剂进行催化氧化脱硫,在反应温度  $50^\circ\text{C}$ 、催化剂  $0.05\ \text{g}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$  用量  $25\ \mu\text{L}$ 、搅拌速率  $1\ 000\ \text{r/min}$  时,可以稳定实现 DBT 的完全脱除,催化性能和循环使用稳定性具有应用价值。

(2) 对比考察了  $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$  对 DBT、4,6-DMDBT 和 BT 的脱除效果, $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$  对 4,6-DMDBT 也能实现深度脱硫(98%),对这 3 种含硫物质脱除性能的顺序为: DBT > 4,6-DMDBT > BT。

#### 参考文献

- [1] An X, Jiang W, Zhu L H, *et al.* Design of grain boundaries enriched nickel molybdate for enhanced catalytic oxidative desulfurization [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2023, 333: 122779.
- [2] Zhang M, Zhu W, Li H, *et al.* Fabrication and characterization of tungsten-containing mesoporous silica for heterogeneous oxidative desulfurization [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2016, 37 (6): 971-978.
- [3] Xu Y, Long J, Shao X, A survey of novel processes to produce ultra low sulfur gasoline [J]. *China Petroleum Processing and Petrochemical Technology*, 2003, (2): 19-23.
- [4] 陈明燕,冯新凯,刘宇程.金属有机框架材料催化氧化脱硫研究进展 [J]. *应用化工*, 2022, 359(1): 241-245.
- [5] Song C, Ma X. New design approaches to ultra-clean diesel fuels by deep desulfurization and deep dearomatization [J]. *Applied Catalysis B, Environmental*, 2003, 41(1/2): 207-238.
- [6] Khan M R, Sayed E. 8-Sulfur removal from heavy and light petroleum hydrocarbon by selective oxidation [M]. *Advances in Clean Hydrocarbon Fuel Processing*, 2011: 243-261.
- [7] 中国环境科学研究院. GB 17691—2018 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段) [S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2018-06-22.
- [8] Huang H Y, He J, Cheng X Q, *et al.* Constructing frustrated Lewis

- pairs on Mo-doped Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst to enhance oxidative desulfurization efficiency[J]. *Fuel*, 2025, 381: 133535.
- [9] Wu P, Wu Y, Chen L, *et al.* Boosting aerobic oxidative desulfurization performance in fuel oil via strong metal-edge interactions between Pt and h-BN[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 380: 122526.
- [10] Rajendran A, Cui T, Fan H, *et al.* A comprehensive review on oxidative desulfurization catalysts targeting clean energy and environment[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(5): 2246–2285.
- [11] Lima F, Dave M, Silvestre D J A, *et al.* Concurrent desulfurization and denitrogenation of fuels using deep eutectic solvents[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(13): 11341–11349.
- [12] Hassan M M M, Nath B B, Hwa S J. Molybdenum nitride@porous carbon, derived from phosphomolybdic acid loaded metal-azolate framework-6; A highly effective catalyst for oxidative desulfurization[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 288: 119988.
- [13] Zhu C, Shen Y, Yang F, *et al.* Engineering hydrogenated TiO<sub>2</sub> nanosheets by rational deposition of Ni clusters and Pt single atoms onto exposing facets for high-performance solar fuel production[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 466: 143174.
- [14] Zheng Y, Zhou W, Liu Y, *et al.* A DFT study of the effects of oxygen on the hydrodesulfurization of sulfur macromolecules during the direct hydrodesulfurization process[J]. *Molecular Catalysis*, 2020, 485: 110803.
- [15] Mansouri A, Semagina N. Palladium islands on iron oxide nanoparticles for hydrodesulfurization catalysis[J]. *Catalysis Science & Technology*, 2018, 8(9): 2323–2332.
- [16] 任欣然, 赵华, 李会鹏, 等. 类 Fenton 氧化辅助超声法在废活性炭再生脱硫中的应用[J]. *现代化工*, 2025, 45(8): 147–154.
- [17] Jiang W, Zhu K, Li H, *et al.* Synergistic effect of dual Brønsted acidic deep eutectic solvents for oxidative desulfurization of diesel fuel[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 394: 124831.
- [18] Ding Y C, Wang J, Liao M Y, *et al.* Deep oxidative desulfurization of dibenzothiophene by novel POM-based IL immobilized on well-ordered KIT-6[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 418: 129470.
- [19] 宋友桂, 何伟煜, 孙贤波, 等. MoO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 纳米管的制备及其光催化降解多环芳烃的机制[J]. *环境化学*, 2020, 39(3): 624–635.
- [20] Ali S A, Ahmad T. Decorating thermodynamically stable (101) facets of TiO<sub>2</sub> with MoO<sub>3</sub> for multifunctional sustainable hydrogen energy and ammonia gas sensing applications[J]. *Inorganic Chemistry*, 2023, 63(1): 304–315.
- [21] Gubran A, Abdo H, Abdullah M B, *et al.* Sulfate radicals induced from peroxymonosulfate on electrochemically synthesized TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> heterostructure with Ti-O-Mo bond charge transfer pathway for potential organic pollutant removal under solar light irradiation[J]. *Chemosphere*, 2022, 303(P1): 134562–134566.
- [22] Diniz J, Nunes C D, Monteiro O C. Novel approach to synthesise MoO<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> nanocomposites for the photo-assisted oxidation of benzyl alcohol to benzaldehyde[J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2020, 119: 108099–108105.
- [23] 刘金龙, 朱银华, 杨祝红, 等. MoO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂的二苯并噻吩加氢脱硫性能[J]. *过程工程学报*, 2009, 9(5): 882–886.
- [24] 陈铭, 梁晓峰. 孔结构在 MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 改性活性炭脱硫过程中的作用[J]. *现代化工*, 2024, 44(9): 195–200, 207.
- [25] 全国颗粒表征与分检及筛网标准化技术委员会. GB/T 21650.2—2008 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第 2 部分: 气体吸附法分析介孔和大孔[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2008–04–16.
- [26] 吕明星. TiO<sub>2</sub>/MoO<sub>3</sub> 复合纳米纤维的制备及其光催化性能研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2013.
- [27] Shrestha N K, Nah Y C, Tsuchiya H, *et al.* Self-organized nanotubes of TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> with enhanced electrochromic properties[J]. *Chemical Communications*, 2009, 15: 2008–2010.
- [28] 吕树祥, 刘昊, 王超. 燃油氧化脱硫催化剂的研究进展[J]. *天津科技大学学报*, 2022, 37(3): 1–11. ■
- (上接第 159 页)
- [6] 杨海龙, 王璐, 闫海军, 等. 尿素改性新疆煤基炭负载铜催化剂的乙炔氢氯化性能[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(6): 142–148.
- [7] Tao X, Chen F Y, Xie Y G, *et al.* Microporous nitrogen-doped carbon from polyaniline as a highly efficient and stable catalyst for acetylene hydrochlorination[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021, 126: 80–87.
- [8] 谢永刚, 陶萱, 陈方永, 等. 含氮多孔碳材料的制备及其对乙炔氢氯化反应催化性能研究[J]. *现代化工*, 2020, 40(10): 155–159, 164.
- [9] Nakanishi S, Sakai S I, Hatou M, *et al.* Oscillatory peroxodisulfate reduction on Pt and Au electrodes under high ionic strength conditions, caused by the catalytic effect of adsorbed OH[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2002, 106(9): 1305–1311.
- [10] 张绪立, 王富民, 王录. 乙炔氢氯化过程中铜基催化剂的制备及催化性能[J]. *化学工业与工程*, 2016, 33(3): 19–24.
- [11] Feng Y, Ying M, Wang C, *et al.* Influence of volume of short carbon fiber on properties of composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sini-*ca, 1994, 11(4): 14–19.
- [12] Henrist C, Traina K, Hubert C, *et al.* Study of the morphology of copper hydroxynitrate nanoplatelets obtained by controlled double jet precipitation and urea hydrolysis[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2003, 254(1/2): 176–187.
- [13] Newman S P, Jones W. Comparative study of some layered hydroxide salts containing exchangeable interlayer anions[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 1999, 148(1): 26–40.
- [14] Niu H X, Yang Q, Tang K B. A new route to copper nitrate hydroxide microcrystals[J]. *Materials Science & Engineering: B*, 2006, 135(2): 172–175.
- [15] Han M S, Lee B G, Ahn B S, *et al.* Surface properties of CuCl/AC catalysts with various Cu contents: XRD, SEM, TG/DSC and CO-TPD analyses[J]. *Applied Surface Science*, 2003, 211(1/4): 76–81.
- [16] Li C C, Luo J, Zhang Q X, *et al.* Cu(II)/Cu(I)/AC catalysts for gas-solid acetylene dimerization[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 59(1): 110–117. ■