

铈基催化剂催化 CO 还原 SO₂ 制硫磺 实验研究

张旭明*, 孟祥龙, 杜兆国

(连云港中星能源有限公司, 江苏 连云港 222042)

摘要:通过制备不同形貌的铈基催化剂,对 CO 还原 SO₂ 制硫磺的催化性能进行了研究。实验结果表明,球形 CeO₂ 因其较大的比表面积和表面酸性而展现出最佳的催化活性,进一步通过稀土元素 La、Y、Sm 的掺杂改性,显著提升了 CeO₂ 的表面酸性和催化性能,其中 La 元素的掺杂效果最为显著,确定了 15% La-CeO_x 在 300~350℃ 的反应温度下具有最佳的催化效果,实现了硫磺的最高产率。该研究为 SO₂ 的资源化处理和硫磺的清洁生产提供了技术支持,为 SO₂ 还原催化剂制备提供了思路。

关键词:二氧化硫;硫磺;催化还原

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0217-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.036

Experimental study on catalytic reduction of SO₂ to sulfur by CO over cerium-based catalyst

ZHANG Xu-ming*, MENG Xiang-long, DU Zhao-guo

(Lianyungang Zhongxing Energy Co., Ltd., Lianyungang 222042, China)

Abstract: In this paper, cerium-based catalysts with different morphologies were prepared, and the catalytic performance of CO reduction of SO₂ to sulfur was studied. The experimental results show that spherical CeO₂ exhibits the highest catalytic activity due to its large specific surface area and surface acidity. Furthermore, the surface acidity and catalytic performance of CeO₂ are significantly improved by doping rare earth elements La, Y and Sm. The doping effect of La element is the most significant. It is determined that 15% La-CeO_x has the best catalytic effect at the reaction temperature of 300–350°C, and the highest yield of sulfur is achieved. This study provides technical support for the resource treatment of SO₂ and the clean production of sulfur, and provides ideas for the preparation of SO₂ reduction catalyst.

Key words: sulfur dioxide; sulfur; catalytic reduction

硫磺(S)是一种非金属元素,在化学工业中扮演着重要角色,是合成硫酸、染料、橡胶、农药等化学品的关键原料。此外,硫磺在医药领域亦具有广泛的应用,在治疗呼吸系统、消化系统、皮肤疾病等领域具有显著的疗效^[1-2]。当下硫磺的市场需求庞大,但中国境内缺乏优质的硫矿资源,中国是世界上最大的硫磺进口国,仅2024年第二季度进口量就高达217.55万吨^[3]。硫磺的制备方法多种多样,包括Frasch法^[4]、加热熔融法^[5]、含硫废气回收法^[6-7]、电化学还原法等^[8],其中利用含硫废气回收硫资源的方法在我国具有重要的战略意义和应用价值。

二氧化硫(SO₂),作为一种典型的大气污染物,广泛存在于工业烟气中。其排放不仅促成了酸雨的形成,还与光化学烟雾和雾霾等环境问题密切相关^[9]。此外,长期暴露于SO₂环境对人体健康构成

严重威胁,可能引发包括呼吸系统疾病、眼部疾病和皮肤疾病在内的多种健康问题^[10-11]。中国作为全球主要的二氧化硫排放国之一,2022年广东省的二氧化硫排放量达到了8.82万吨,我国在二氧化硫排放控制方面面临严峻的挑战^[12]。在传统的污染物处理技术中,湿法脱硫工艺虽然能够有效降低SO₂排放,但其副产品——石膏的市场应用相对有限^[13]。鉴于此,将烟气中的二氧化硫转化为硫磺的工艺不仅能够实现污染物的有效回收利用,还具有显著的市场需求和经济效益,符合当前环保和经济双重目标的发展趋势^[14-16]。

近年来,随着环保意识的提高和科学技术的进步,以二氧化硫为原料制备硫磺的研究取得了显著进展。Xu等^[17]以Ce氧化物为载体,采用水热法合成了一系列Gd@CeO_x催化剂用于催化还原SO₂,以

收稿日期:2025-12-22;修回日期:2026-03-10

基金项目:扬州市重点研发计划(YZ2024283, YZ2025196)

作者简介:张旭明(1975-),男,硕士,研究方向为热能动力和环境工程,通讯联系人,930074605@qq.com。

水热法制备的催化剂具有更多的多孔结构,高温煅烧后催化剂的氢气消耗量降低,表现出优异的脱硫和还原性能。Zhang 等^[18]制备形成 CeO₂-TiO₂ 固溶体催化剂在 500℃ 的 SO₂ 转化率和稳定硫转化率分别可达 93% 和 99%,其中 CeO₂ 是提供氧化还原电对 Ce⁴⁺/Ce³⁺ 和不稳定氧空位的活性组分,也是催化剂具备高反应活性的关键。Lu 等^[19]制备系列 La-Ce-O_x@ZrO₂ 催化剂,在 350℃ 时 SO₂ 转化率为 100%,S 转化率和 S 选择性均在 96% 以上。La 和 Ce 的加入提高了催化剂上吸附的氧浓度。载体 ZrO₂ 与活性组分 LaCe-O_x 之间的强相互作用有利于活性组分与载体之间的电子转移,提高了催化剂的活性。

在上述研究基础上,本研究成功合成铈基催化剂用于 CO 还原 SO₂ 制硫磺。通过制备不同形貌的 CeO₂ 催化剂进行测试,随后引入 La、Sm、Y 元素,探究其对催化活性的影响并筛选最佳掺杂比例。通过 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、氨气程序升温脱附(NH₃-TPD)、BET 比表面积测试法(BET)等表征探究催化剂的晶型及表面形貌,探究不同形貌 CeO₂ 前驱体及其他元素掺杂对催化剂的影响规律。该研究为 SO₂ 催化还原催化剂的制备提供了思路,对于 SO₂ 的资源化利用具有指导意义。

1 材料与制备方法

1.1 催化剂的制备

实验所用原料均为市售分析纯试剂。

球状 CeO₂:将 Ce(NO₃)₃·6H₂O 溶解于去离子水中,控制质量分数为 5%,利用氨水调节 pH 至 10 后,向溶液内添加质量分数 0.3% L-抗坏血酸,先常温搅拌 30 min,然后在 150℃ 下水热处理 8 h。过滤,将得到的粉末状固体于马弗炉内 500℃ 焙烧 4 h,即可得到催化剂粉末。

片状 CeO₂:方案与球状 CeO₂ 相同,以聚乙烯吡咯烷酮替换 L-抗坏血酸,添加量相同。

柱状 CeO₂:方案与球状 CeO₂ 相同,以乙二胺替换 L-抗坏血酸,添加量相同。

不同元素掺杂的催化剂制备方案:以 Ce(NO₃)₃·6H₂O 为 CeO₂ 前驱物、La(NO₃)₃·6H₂O 为 La₂O₃ 前驱物、Y(NO₃)₃·6H₂O 为 Y₂O₃ 前驱物、Sm(NO₃)₃·6H₂O 为 Sm₂O₃ 前驱物。将前驱物按比例混合溶解于去离子水中,控制质量分数为 5%,利用氨水调节 pH 至 10 后,向溶液内添加质量分数 0.3% L-抗坏血酸,先常温搅拌 30 min,然后在 150℃ 下水热处理

8 h。过滤,将得到的粉末状固体于马弗炉内 500℃ 焙烧 4 h,即可得到催化剂粉末。催化剂标记为 m% La-CeO_x、m% Y-CeO_x、m% Sm-CeO_x,m 为各金属氧化物与 CeO₂ 的质量比。

催化剂的成型方案:称量催化剂质量分数 3% 聚环氧乙烷(PEO)与催化剂粉末混合均匀,加入去离子水捏合成团,80℃ 彻底干燥后转移至马弗炉中 450℃ 焙烧 4 h。然后将所得固体破碎,筛选 20~40 目细颗粒作为最终成型的催化剂。

1.2 催化剂性能测试

催化剂的性能测试:称量 1 g 成型催化剂置于石英管(Φ=10 mm)中心位置,两侧以石英棉固定,石英管一端为混合气进气口,另一端连接烟气分析仪。然后将石英管转移至马弗炉中,加热至 500℃ 进行预硫化处理 2 h。预硫化结束后将石英管降温至 250℃ 开始升温并切换为反应气进行催化性能检测,每 25℃ 停留 1 h 检测尾气中 SO₂ 含量。预硫化混合气和反应气流量见表 1。

表 1 预硫化混合气和反应气流量

气体名称	预硫化气体流量/ (mL·min ⁻¹)	反应气体流量/ (mL·min ⁻¹)
N ₂	388	397
CO	8	2
SO ₂	4	1

2 结果与讨论

2.1 不同形貌 CeO₂ 的催化性能及表征

通过扫描电子显微镜观察所制备 CeO₂ 前驱体的形貌,结果如图 1 所示,可以观察到图 1(a) 中显示出纳米球状结构,粒径分布均匀,球状结构由更小粒径的 CeO₂ 颗粒团聚而成。图 1(b) 的图像中显示出片状形貌,片状表面较为光滑。图 1(c) 的图像中显示柱状形貌,柱状之间结合较为紧密,上下底面为不规则形状,呈堆叠状态。对 3 种形貌的 CeO₂ 前驱体的尺寸进行了统计,结果表明球形 CeO₂ 直径约 50 nm,片状 CeO₂ 为表面光滑的不规则片状,纳米片厚度在 40~50 nm 区间,柱状 CeO₂ 柱高约 150 nm。对比 3 种形貌的 CeO₂ 可以明显看出纳米球状的形貌显示出更多微孔结构,这也可能有利于反应物的吸附与扩散。后续活性测试也表明该形貌特征的催化剂活性更强,这可能是得益于纳米球状 CeO₂ 表面提供了丰富的活性位点和良好的传质通道,有助

于提升催化剂的活性与稳定性。

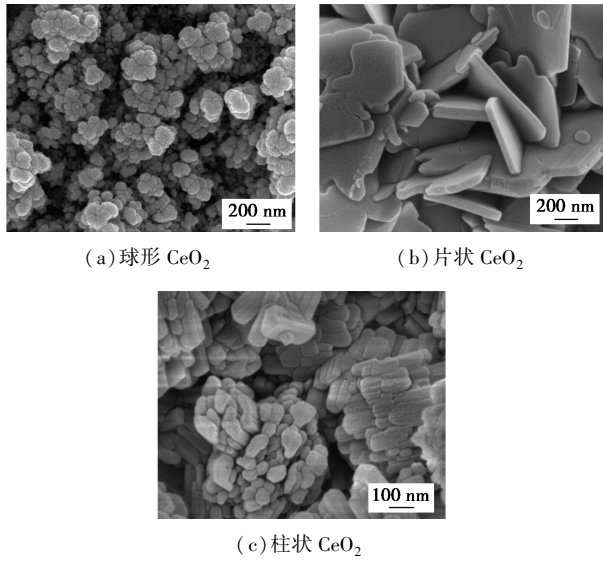
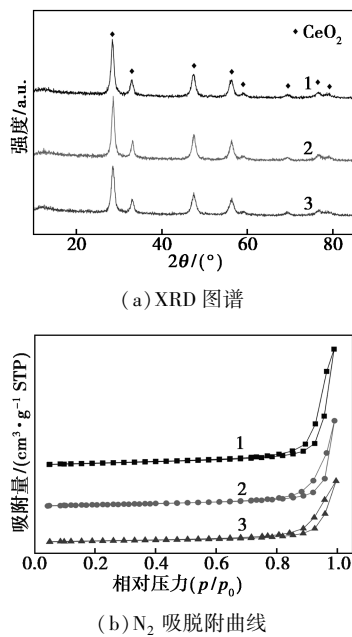


图 1 催化剂的 SEM 图

对样品的晶型结构和形貌进行分析,图 2(a)为不同形貌 CeO₂ 的 XRD 图谱,曲线与 CeO₂ 的立方萤石结构曲线(JCPDS NO. 34—0394)重合,说明所有样品均成功合成。在 $2\theta = 28.5、33.1、47.4、56.3、59.1、69.4、76.7$ 和 79.0° 存在特征峰,分别对应于 CeO₂ 的 (111)、(200)、(220)、(311)、(222)、(400)、(331)和(420)晶面^[20],且特征峰峰形尖锐,说明具有较高的结晶度。3 种形貌 CeO₂ 的 N₂ 吸附脱附特征曲线如图 2(b)所示,其 N₂ 吸附脱附曲线均表现为 V 型等温线带有 H3 型回滞环,表明材料具



1—球形 CeO₂; 2—片状 CeO₂; 3—柱状 CeO₂

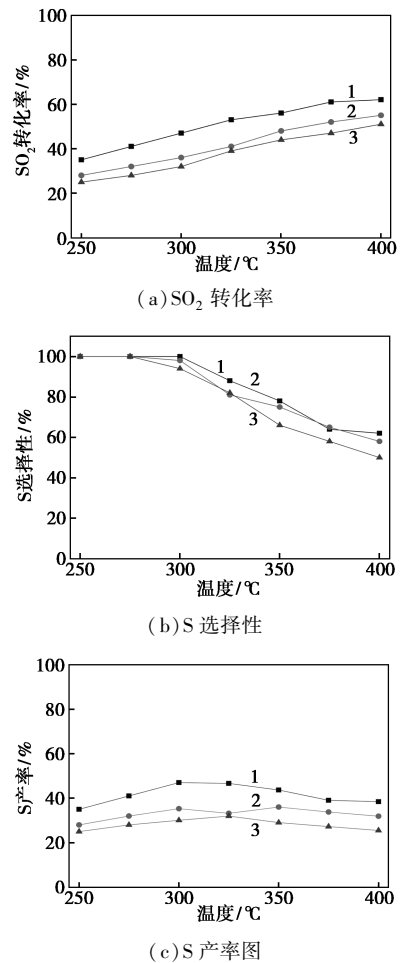
图 2 3 种形貌 CeO₂ 的结构与孔结构表征图

表 2 3 种形貌 CeO₂ 的 BET 比表面积、孔容和平均孔径

材料名称	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	平均孔容/ (cm ³ ·g ⁻¹)	平均孔径/ nm
球形 CeO ₂	69.6	0.125	4.58
片状 CeO ₂	18.5	0.247	11.36
柱状 CeO ₂	37.2	0.176	7.15

有微孔和介孔的不规则孔结构。通过表 2 中 3 种形貌 CeO₂ 的 BET 数据可以看出,球形 CeO₂ 的比表面积最高,具有最大的活性表面,但其平均孔径最小,孔容也最低。片状 CeO₂ 呈现出相反的特征,其比表面积最低,但平均孔径最大,孔容最高,柱状 CeO₂ 的各项参数则介于两者之间。

对不同形态的 CeO₂ 催化剂进行性能测试,如图 3 所示,基于 SO₂ 转化率的排序,3 种催化剂的活性从高到低依次为球形、片状和柱状。同时,S 选择性和 S 产率呈现出相同的规律性趋势。根据 XRD 表征得到的信息,3 种形貌的 CeO₂ 展现出了相同的



1—球形 CeO₂; 2—片状 CeO₂; 3—柱状 CeO₂

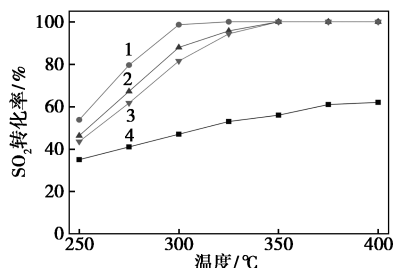
图 3 不同形貌 CeO₂ 的催化效率图

晶体结构和相近的结晶度,说明其晶体学特性并非导致催化活性差异的主要原因。而 SEM 表明 3 种形貌在微观结构上差异较大,再结合 BET 数据与活性数据,可以证明具有球形微观结构 CeO_2 的较大的比表面积提供了更多的活性位点,在提高反应活性中起到了重要作用^[21]。因此基于球形 CeO_2 的测试结果,在球形 CeO_2 催化剂中掺杂其他元素以进一步提高其活性。

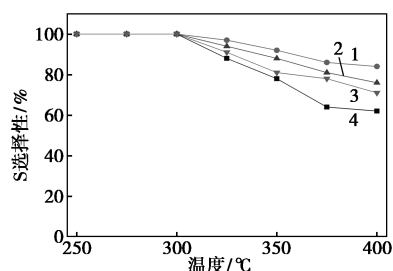
2.2 元素掺杂球形 CeO_2 的催化剂活性及表征

单一的 CeO_2 往往表现出有限的催化活性,为了克服这一局限,对 CeO_2 进行改性处理以增强其表面酸性和催化性能是十分必要的。稀土元素,因其 4f 和 5d 轨道的电子结构特性,能够有效地参与催化过程中的电子转移,从而对催化反应的活性和选择性产生积极影响^[22-23]。基于此,本研究选择 La、Y、Sm 作为掺杂元素,对球形 CeO_2 进行改性处理。通过控制掺杂比例,制备了 10% La- CeO_x 、10% Sm- CeO_x 和 10% Y- CeO_x 3 种改性催化剂。

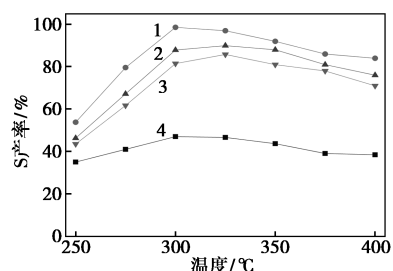
如图 4 所示,掺杂 La、Y、Sm 元素改性后的催化



(a) SO_2 转化率



(b) S 选择性



(c) S 产率图

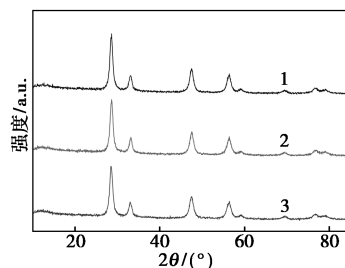
1—10% La- CeO_x ; 2—10% Sm- CeO_x ; 3—10% Y- CeO_x ; 4— CeO_2

图 4 掺杂不同元素的铈基催化剂的催化效率图

剂性能均得到显著提升。同样的以 SO_2 转化率为指标,改性催化剂的催化活性顺序为:10% La- CeO_x > 10% Sm- CeO_x > 10% Y- CeO_x > CeO_2 。同时,3 种改性催化剂的 S 选择性和 S 产率也表现出相同的变化规律。

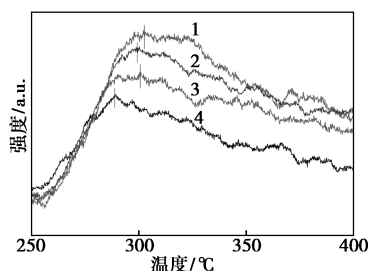
图 5(a) 为掺杂 La、Y、Sm 的 CeO_2 的 XRD 曲线,从图中未观测到 La、Y、Sm 氧化物的衍射峰,推测这 3 种物质以无定形态存在或者高度分散导致没有相应的特征峰出现。同时对比 3 种不同元素掺杂的 CeO_2 催化剂与未掺杂 CeO_2 催化剂的 XRD 图谱,未发现 CeO_2 晶面出现或消失,表现出了与未掺杂催化剂相同的晶体结构和相近的结晶度,说明掺杂引起的催化剂活性增强与晶面变化没有直接关系。

而为了进一步探究 La、Y、Sm 掺杂对催化剂的影响,通过 NH_3 -TPD 对 3 种不同元素掺杂的催化剂表面酸性进行定量分析,结果如图 5(b) 所示,在 250~400°C 温度区间内,可以观测到明显的 NH_3 脱附峰,表明催化剂表面酸性位点的存在。经过稀土元素掺杂处理后,催化剂的表面酸性得到了显著增强。具体地,通过比较不同催化剂在 250~400°C 区间 NH_3 -TPD 的脱附峰面积,按大小排序为 10% La- CeO_x > 10% Sm- CeO_x > 10% Y- CeO_x > CeO_2 ,峰面积的增大说明酸性位点数量增加。此外由图 5(b) 可见,相较于 CeO_2 ,改性后催化剂的脱附峰峰位向高温偏移,说明其表面酸强度得到增加。值得注意



1—10% La- CeO_x ; 2—10% Sm- CeO_x ; 3—10% Y- CeO_x

(a) XRD 图谱



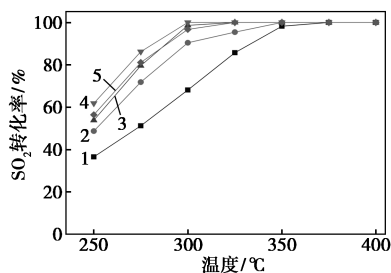
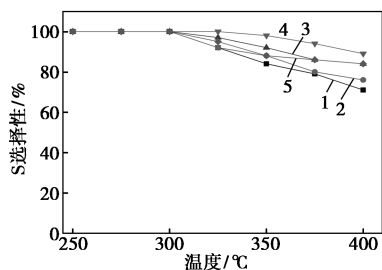
1—10% La- CeO_x ; 2—10% Sm- CeO_x ; 3—10% Y- CeO_x ; 4— CeO_2

(b) NH_3 -TPD 图谱

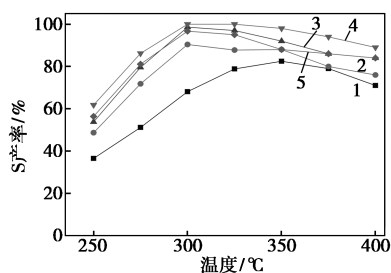
图 5 掺杂不同元素的铈基催化剂的物相结构与表面酸性图

的是,脱附峰面积的大小与催化剂的催化活性呈现出一致的规律性,表明表面酸性与催化活性之间的直接关联。在一定范围内,更高的表面酸性有利于 CO 还原 SO₂ 反应。

对 La₂O₃ 掺杂量进行进一步调控,结果如图 6 所示。催化活性随着 La₂O₃ 掺杂量的增加呈现出先增加后减少的变化趋势,当 La₂O₃ 的掺杂量达到 15% 时,催化剂的催化活性达到峰值。在 275℃ 的条件下,SO₂ 的转化率可达到 100%,同时 S 的选择性达到 99.7%。然而,当 La₂O₃ 的掺杂量继续增加时,SO₂ 的转化率开始降低。这一现象归因于过量的 La₂O₃ 堵塞了 CeO₂ 的孔道结构,导致催化剂的比表面积减少。此外,催化剂的选择性也随着 La₂O₃ 掺杂量的增加而降低,这是由于 La₂O₃ 的过量掺杂导致催化剂表面酸性偏离了最优范围。值得注意的是,S 的选择性在温度升高时表现出下降趋势,这可能是由于在高温条件下,CO 与单质 S 反应生成硫氧

(a) SO₂ 转化率

(b) S 选择性



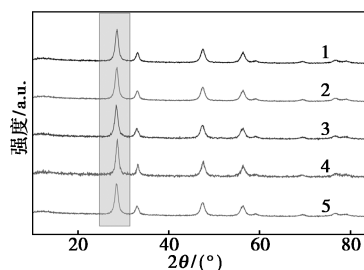
(c) S 产率图

1—2% La-CeO_x; 2—5% La-CeO_x; 3—10% La-CeO_x;
4—15% La-CeO_x; 5—20% La-CeO_x

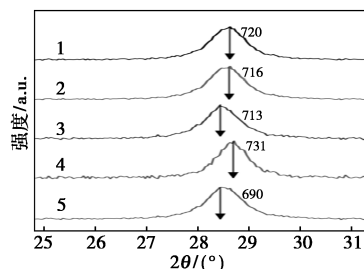
图 6 不同 La 负载量钪基催化剂的催化效率图

化物(COS)。因此,为了实现最佳的催化效果,控制 La₂O₃ 的掺杂量为 15%,并且反应温度应控制在 300~350℃ 之间。

为探究高 La 掺杂量对制备催化剂催化活性的抑制效应的影响,对不同 La 掺杂量的催化剂进行了 XRD 表征,结果如图 7 所示。从图 7(a) 中可以观察到 La 掺杂量为 2%~15% 时,所制备的催化剂的 XRD 图谱中的各特征峰宽和峰高基本保持一致,说明在 2%~15% 掺杂量的 La 对于 CeO₂ 的晶面没有直接影响。但从图 7(b) 中可以明显观察到 20% La-CeO_x 的 XRD 图谱的 CeO₂ 的(200)晶面的峰高明显降低,这也表明高 La 掺杂量会导致 CeO₂ 的结晶度降低,而这可能会导致催化剂活性位点的减少,从而使得该催化剂的活性降低。



(a) 多个催化剂的 XRD 图谱

(b) CeO₂ 的(200)晶面峰形放大图

1—2% La-CeO_x; 2—5% La-CeO_x; 3—10% La-CeO_x;
4—15% La-CeO_x; 5—20% La-CeO_x

图 7 不同 La 掺杂量制备形成的催化剂 XRD 图

3 结论

研究发现不同形貌的 CeO₂ 催化剂中,球状 CeO₂ 凭借更高的比表面积对于 SO₂ 的催化转化效率更高。在此基础上,进一步筛选 La、Y、Sm 3 种稀土元素进行掺杂改性,结果证实 La 能最显著地提升催化剂表面酸性从而提高催化活性。进一步通过掺杂量优选确定 La₂O₃ 的最佳掺杂量为 15%, 15% La-CeO_x 为最优催化剂,在 300℃ 就可 100% 完成 SO₂ 的催化转化。同时,催化剂活性在 300~350℃ 温区内表现最佳,温度继续升高的情况下会有副反

应(COS产生)导致S产率大大降低。本文从CeO₂的形貌出发,形成了La掺杂球形CeO₂的复合催化剂,对于SO₂催化转化为硫资源的催化剂提供了制备参考。

参考文献

- [1] 葛昶,余晓钟,刘梦薇,等.我国硫磺产业发展现状及未来趋势[J].现代化工,2023,43:7-10.
- [2] Slatter M A, Gennery A R. Treosulfan-based conditioning for inborn errors of immunity[J]. Therapeutic Advances in Hematology, 2021, 12:1-9.
- [3] 李大念.我国硫磺产业链市场分析与研究[J].石油化工技术与经济,2023,39:14-17.
- [4] 盛旭山,陈仲明.弗拉施采硫工艺在美国的应用[J].国外采矿技术快报,1988,16:1-2.
- [5] 欧旭东.不溶性硫磺合成方法及生产工艺研究进展[J].广东化工,2009,36:97-100.
- [6] 李益斌,李大江,郭持皓,等.无烟煤还原SO₂制备硫磺工艺及经济性研究[J].中国资源综合利用,2019,37:27-29.
- [7] 刘锦芳.克劳斯硫磺尾气工艺治理选择及应用[J].炼油与化工,2020,31:65-67.
- [8] 张正阳,王海北,孙留根.二氧化硫膜电解制备硫磺机理与应用研究[J].有色金属(冶炼部分),2020,4:1-7.
- [9] Liu T, Wang X, Hu Q, et al. Formation of secondary aerosols from gasoline vehicle exhaust when mixing with SO₂ [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16:675-689.
- [10] 孔德婧.大气SO₂危害与浓度检测方法研究[J].民营科技,2018,6:65.
- [11] Hu Y, Li R, Du L, et al. Could SO₂ and CO₂ emissions trading schemes achieve co-benefits of emissions reduction? [J]. Energy Policy, 2022, 170:113252.
- [12] 钟奇振,单力,沈绍柱.广东COD和二氧化硫排放总量削减工作全面启动[J].环境,2006,10:16-17.
- [13] 李雪松,王昉,王晓玲.石灰石-石膏法烟气脱硫SO₂吸收及CaSO₃氧化系统优化措施研究[J].中国环保产业,2022,11:19-22.
- [14] 李春青,普红平.治理二氧化硫的研究[J].天津化工,2006,6:39-41.
- [15] 赵旺初.我国独创SO₂治理新技术获应用[J].锅炉制造,2004,2:26.
- [16] 刘东生,李凤起.二氧化硫污染治理及其资源化利用新途径[J].辽宁城乡环境科技,2006,26(4):61-64.
- [17] Xu M, Cheng X, Chen L, et al. Catalytic reduction of SO₂ by Gd@CeO_x catalysts: Stability enhancement and structural modulation [J]. Environmental Science: Nano, 2025, 12:1262.
- [18] Zhang L, Qin Y, Chen B, et al. Catalytic reduction of SO₂ by CO over CeO₂-TiO₂ mixed oxides [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26:2960-2965.
- [19] Lu Y, Jin Q, Ji W, et al. Resource utilization of high concentration SO₂ for sulfur production over La-Ce-O_x@ZrO₂ composite oxide catalyst [J]. Journal of Rare Earths, 2022, 41:1945-1952.
- [20] Hu H, Wang S, Zhang X, et al. Study on simultaneous catalytic reduction of sulfur dioxide and nitric oxide on rare earth mixed compounds [J]. Journal of Rare Earths, 2006, 24:695-698.
- [21] Yang S, Shen H, Cheng F, et al. Organometallic precursor induced defect-enriched mesoporous CeO₂ with high specific surface area: Preparation and catalytic performance [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8:14006-14014.
- [22] Cao Y, Zheng X, Deng Y, et al. Comprehensive insight into electronic modulation of rare-earth elements for enhancing electrocatalytic performance of atomically dispersed materials [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35:2423158.
- [23] Wang Y, Fang W, Zhu D, et al. Recent progress in rare earth element modulated electrocatalysts for CO₂ electroreduction [J]. Progress In Materials Science, 2025, 157:101594. ■
- [19] Cao Y, Ma C, Yao J, et al. Impact of biochar colloids on thallium (I) transport in water-saturated porous media: Effects of pH and ionic strength [J]. Chemosphere, 2023, 311:137152.
- [20] Zhu L, Tong L, Zhao N, et al. Key factors and microscopic mechanisms controlling adsorption of cadmium by surface oxidized and aminated biochars [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 382:121002.
- [21] Jiang J, Li R, Yang K, et al. Investigation on Pb²⁺ adsorption characteristics by AAEMs-rich biochar in aqueous solution: Performance and mechanism [J]. Environmental Research, 2023, 236:116731.
- [22] Emenike E C, Okoro H K, Al-Senani G M, et al. Adsorptive removal of Cr(VI) and Pb(II) using biochar from biomass and plastic waste: Characterization and performance evaluation [J]. Biomass and Bioenergy, 2026, 207:108722.
- [23] Wu W, Liu Z, Azeem M, et al. Hydroxyapatite tailored hierarchical porous biochar composite immobilized Cd(II) and Pb(II) and mitigated their hazardous effects in contaminated water and soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 437:129330.
- [24] Huang F, Lin J, Wang B, et al. Adsorption of Pb(II) from aqueous environment on artificially synthesized mordenite and its biochar composite [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 497:154700.
- [25] Wang Y, Li J, Xu L, et al. EDTA functionalized Mg/Al hydroxides modified biochar for Pb(II) and Cd(II) removal: Adsorption performance and mechanism [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 335:126199.
- [26] El-Naggar A, Chang S X, Cai Y, et al. Mechanistic insights into the (im)mobilization of arsenic, cadmium, lead, and zinc in a multi-contaminated soil treated with different biochars [J]. Environment International, 2021, 156:106638. ■

(上接第 216 页)