基础研究

铜铈基整体式催化剂 CO 催化氧化性能及中试试验

郭泽浩[1]，王延江[2]，佘雪峰[1]，李晓海[2]，葛志彬[2a]，李 勇[1]，韩美丹[1]
（1. 北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室，北京 100083；2. 德龙钢铁有限公司
a. 烧结厂；b. 河北省热轧板带钢技术创新中心，河北 邢台 054009）

摘要：以 $CuO\text{-}CeO_2$ 为活性组分、莫来石为载体，采用浸渍法制备 Cu-Ce 整体式催化剂用于实际烧结烟气的 CO 催化氧化。在不同制备方式及反应条件下对催化性能进行测试，当活性组分同时浸渍，浸渍液浓度为 2 mol/L，反应条件为 180 ℃、4 500 h^{-1}时，CO 的转化率达 93%；经过 200 h 催化后，催化效率仍可超过 90%。在 180 ℃的反应温度下，催化剂在含 SO_2 和 H_2O 条件下表现出不同的稳定性，H_2O 和 SO_2 能够明显抑制催化剂的催化性能，且 SO_2 的抑制效果更明显。通入 H_2O 会覆盖催化剂表面的活性位点，抑制 CO 和 O_2 的吸附，导致催化效率降低。SO_2 的引入导致催化剂表面积累了 SO_4^{2-} 物种，从而抑制 CO 催化氧化，导致催化剂不可逆失活。同时，批量制备 1 m^3 整体式催化剂用于烧结烟气 CO 净化中试试验，在持续 720 h 的中试试验中，进口烟气温度约为 200～220 ℃，平均出口烟气温度约为 240 ℃，CO 催化效率大于 70%（平均为 73%），出口 CO 质量浓度约为 1 700 mg/m^3。

关键词：Cu-Ce 整体式；浸渍法；烧结烟气；CO 净化；中试试验
中图分类号：TF046.4；X701.7 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764(2024)06－0078－09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.093

CO catalytic oxidation performance and pilot test of Cu-Ce monolithic catalyst

GUO Zehao[1], WANG Yanjiang[2], SHE Xuefeng[1], LI Xiaohai[2], GE Zhibin[2a], LI Yong[1], HAN Meidan[1]
(1. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Delong Steel Co., Ltd. a. Sinterplant; b. Hebei Hot-rolled Strip Steel Technology Innovation Center, Xingtai 054009, Hebei, China)

Abstract: $CuO\text{-}CeO_2$ is taken as the active component and mullite as the carrier, the Cu-Ce monolithic catalyst is prepared by impregnation method for CO catalytic oxidation of actual sintering gas. The catalytic performance is tested under different preparation methods and reaction conditions, and the conversion rate of CO reaches 93% when the active components are impregnated at the same time, the impregnation solution concentration is 2 mol/L, and the reaction conditions are 180 ℃ and 4 500 h^{-1}. After 200 h of catalysis, the catalytic efficiency can still reach more than 90%. At the reaction temperature of 180 ℃, the catalyst exhibits different stability under the conditions of SO_2 and H_2O, and H_2O and SO_2 could significantly inhibit the catalytic performance of the catalyst, and the inhibition effect of SO_2 is more obvious. The introduction of H_2O covers the active site on the surface of the catalyst, inhibiting the adsorption of CO and O_2, resulting in a decrease in catalytic efficiency. The introduction of SO_2 leads to the accumulation of SO_4^{2-} species on the surface of the catalyst, thereby inhibiting the catalytic oxidation of CO, resulting in irreversible inactivation of the catalyst. At the same time, a batch of

收稿日期：2024－04－11；**修回日期：**2024－07－09
基金项目：国家重点研发计划重点专项资助项目(2019YFC1905703)；邢台市重点研发计划项目资助(2022zz056)
作者简介：郭泽浩(2000—)，男，硕士研究生，从事烧结烟气 CO 减排方面的研究。
通信作者：佘雪峰(1978—)，男，博士，教授，从事能源高效转化与链接方面的研究。

1 m^3 monolithic catalyst is prepared for the pilot test of CO purification of sintering gas. In the pilot test lasting 720 h, the temperature of the imported gas is about 200 ~ 220 ℃, the average gas temperature of the outlet is about 240 ℃, the CO catalytic efficiency is greater than 70% (the average is 73%), and the mass concentration of CO at the outlet is about 1 700 mg/m^3.

Key words: Cu-Ce monolithic; impregnation method; sintering gas; CO purification; pilot test

CO 气体是一种不易被人的感官所察觉的污染物，其随空气被人体吸入后，会损害心脏和神经系统，影响人体健康[1]。钢铁行业是 CO 排放的主要来源，其 CO 排放量在工业行业中占比约为 70%，而烧结工序的 CO 排放量约占钢铁行业总排放量的 45%。烧结烟气中 CO 质量浓度一般在 8 000 ~ 10 000 mg/m^3，全国钢铁烧结烟气每年排放 CO 总量达 5 000 ~ 6 000 万吨[2]。目前，多个部门制定了严格的污染物排放标准，河北省要求现有 CO 污染源最高允许排放质量浓度为 5 000 mg/Nm^3。因此，CO 排放已经成为钢铁工业大气污染物治理的重点，也影响钢铁工业的可持续发展[3]。

烧结烟气 CO 治理主要可以从源头、过程、末端三个方面来进行，但源头减排及过程控制脱除 CO 的能力有限，无法满足环保要求。因此，末端处理已经成为目前净化烧结烟气 CO 的主要手段。其中，催化氧化法具有起燃温度低、催化效率高、无二次污染和适应范围广等优点，成为当前工业烟气 CO 治理的主流技术[4]。CO 催化剂可以分为贵金属和非贵金属催化剂。贵金属催化剂(如 Au、Pd 和 Pt 等)具有催化效率高、不易中毒、氧化温度低等优点，但其成本高昂，在工业领域很少应用于烟气中 CO 的脱除[5]。与贵金属催化剂相比，非贵金属催化剂价格便宜，且具有较好的催化活性。目前，Cu 基催化剂中的复合型和负载型催化剂得到大量关注，其中 $CuO\text{-}CeO_2$ 体系催化剂由于具有较高的催化活性，且成本低有望成为取代贵金属的非贵金属催化剂[6]。根据催化剂成型方式的不同，CO 催化剂可以分为颗粒型催化剂和整体式催化剂[7]。整体式催化剂由基体、活性涂层和活性组分构成，相较于传统颗粒型催化剂，其能够提供良好的物质交换能力，且压降较低，催化性能较好[8]。

本文以 $CuO\text{-}CeO_2$ 为活性组分，刚玉莫来石为载体，采用浸渍法制备铜铈基整体式催化剂，探究不同制备及反应条件对催化性能的影响，并搭建 1 m^3 中试试验装置探究整体式催化剂对实际烧结烟气的处理能力。

1　试验部分

1.1　材料与仪器

试验原料为三水合硝酸铜(分析纯)、六水合硝酸铈(分析纯)，均产自上海某生化科技公司；试验采用去离子水作为溶剂；试验测试标准气体产自北京某气体化工公司，其中，CO、O_2 体积分数为 1%、20%，高纯氮气体积分数为 99.999%；试验用莫来石蜂窝载体产自江西某石油化工填料厂。试验仪器设备的规格型号如表 1 所示。

1.2　催化剂制备

负载型催化剂采用浸渍法制备。将硝酸铜[$Cu(NO_3)_2\cdot 3H_2O$]、硝酸铈[$Ce(NO_3)_3\cdot 6H_2O$]以物质的量之比为 1∶1充分溶于去离子水中，然后将搅拌均匀的混合溶液缓慢滴加在莫来石载体上，并浸渍 4 h。将所得到的催化剂前驱体放置于烘箱内，在 200 ℃条件下干燥 2 h，然后在 400 ℃下焙烧4 h，即得到负载型整体式催化剂。

中试整体式催化剂制备：现场中试试验采用莫来石(150 mm × 150 mm × 300 mm)为载体，制备方法与上述方法相同，试验最终得到 147 块样品；试验将催化剂样品以单层49块(7 × 7)，填装上、中、

表 1　试验仪器设备

Table 1　Experimental instrumentation

电热鼓风干燥箱	马弗炉	电子分析天平	质量流量控制器	智能超声波清洗机	气体混气实验台	U 型反应管直径/mm	K 型热电偶	玛瑙研钵	磁力搅拌反应器	气体检测仪
101 - 085	KSL-1200X-J	FA1004	CS200A	GT-1990QTS	3H-2000MAB	13	TP-K01	- 60 mm	DF-101S	SN-311

下三个床层于反应器内，总体填装体积为 1 m^3。

1.3 催化剂活性评价系统

1.3.1 实验室催化性能评价

CO 催化性能测试系统如图 1 所示，该系统主要包括进气段，催化反应段和尾气检测段三部分。反应器可对催化反应温度以及气体成分进行控制。将催化剂装入 U 型管后，通入测试气体。测试气体组成：1% CO、4% CO_2、16% O_2、13% H_2O、0.01% SO_2，其余为 N_2。气体流量采用专用质子流量计控制。在恒定温度下进行 CO 催化效率稳定性测试，在每个温度测试点稳定反应 30 min 后，采用烟气分析仪测试反应前后的 CO 浓度值。催化氧化活性以 CO 转化率计算。

$$c_{CO} = \frac{\varphi_{in} - \varphi_{out}}{\varphi_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：c_{CO}为 CO 转化率,%；φ_{in}为原料气中 CO 的体积分数,%；φ_{out}为尾气中 CO 的体积分数,%。

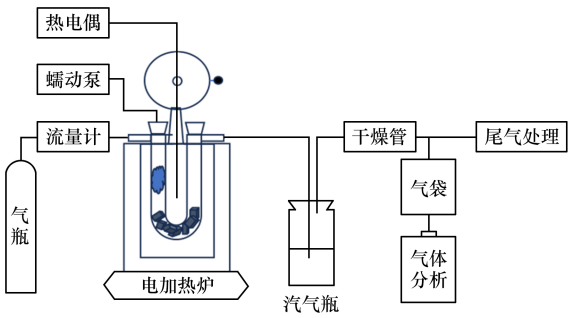


图 1 催化性能测试平台

Fig. 1 Test platform of catalytic performance

1.3.2 烧结现场催化性能评价

中试项目位于某钢铁厂 230 m^2 烧结机车间，气源取自烧结烟气脱硫脱硝系统，如图2所示。烧结烟气通过引风管直接进入催化反应装置，烧结烟气主要成分：15%～16% O_2、3%～4% CO_2、0.6%～0.8% CO、13%～15% H_2O、10～100 mg/Nm^3 NO_x、SO_2 质量浓度≤3 mg/Nm^3。

为防止整个催化床层大量热量散失，在每个床层以及管道外部用保温岩棉包覆，并在催化床层中间设置温度传感器，监测催化床层的温度变化。整体式催化中试系统及流程如图 3 所示。由图 3 可见，在催化床前后均设有电动蝶阀，在催化床出入口及中部设置测压表和测温表，采用变频风机调控烟气流量，采用流量积算仪监测烟气流量，采用烟气分析仪检测催化后烟气成分。催化装置进口烟气温度为 200～220 ℃，烟气流量为 3 000 m^3/h(体积空速为3 000 h^{-1})。试验采用催化前后烧结烟气中 CO 体积分数获得催化效率[9]。

2 结果与讨论

2.1 实验室催化性能

2.1.1 不同制备条件对催化性能的影响

(1) 浸渍顺序。不同的 Cu-Ce 浸渍顺序不仅会影响 CeO_2 氧空穴的形成，而且影响 Cu-Ce 的协同效应[10]。不同浸渍顺序催化剂的反应性能如图 4 所示，Ce/Cu 代表先浸渍 Cu 后浸渍 Ce，Cu-Ce 代表同时浸渍。在三种浸渍方式中，先浸渍 Ce 再浸渍 Cu 的催化剂活性很低(小于 30%)，而先浸渍 Cu 再浸渍 Ce 的催化剂活性相对较高，略低于 Cu-Ce 共浸渍催化剂。当分步浸渍时，第二步浸渍的活性物种的有效负载率较低，铜铈之间的相互作用较弱[11]。同时有研究表明，浸渍方式会对载体表面形成的CuO物种的形态产生影响。先浸渍

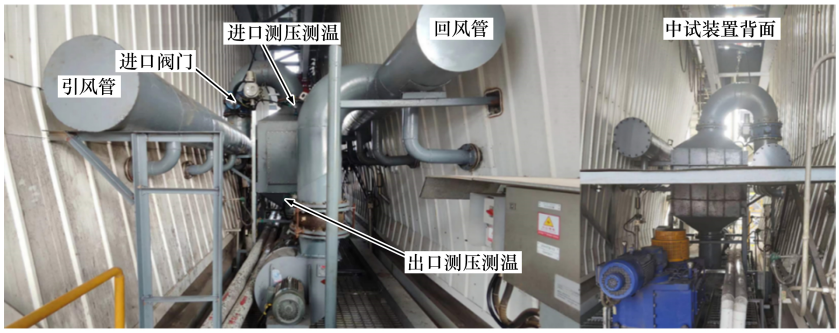
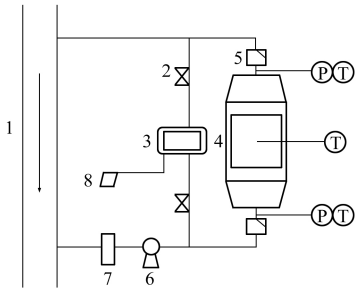


图 2 烧结烟气 CO 催化净化中试现场

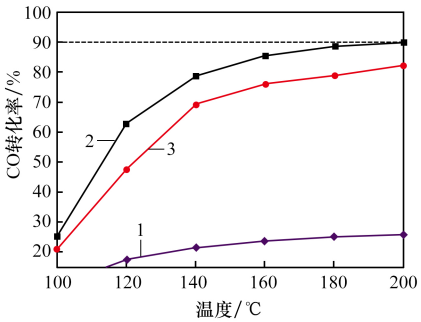
Fig. 2 The pilot site of CO catalytic purification of sintering flue gas



1—烟气主烟道；2—阀门；3—紫外烟气分析仪；4—整体式催化装置；5—电动蝶阀；6—风机；7—流量积算仪；8—尾气排出；P—测压表；T—测温表。

图 3　烧结烟气催化净化中试试验流程

Fig. 3　The pilot experiment flow of catalytic purification of sintering flue gas



1—Ce/Cu；2—Cu-Ce；3—Cu/Ce。

图 4　浸渍顺序对催化性能的影响

Fig. 4　Effect of impregnation order on catalytic properties

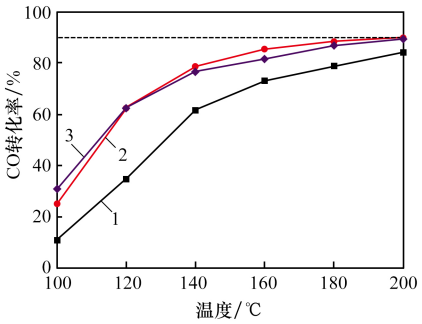
Ce 再浸渍 Cu，此时主要形成体相 CuO，而体相 CuO 与 CeO_2 之间仅有微弱的相互作用；先浸渍 Cu 再浸渍 Ce，此时在催化剂表面形成的 CuO 与 CeO_2 颗粒具有更强的相互作用，但低于共浸渍方式。共浸渍方式有利于形成与 CeO_2 具有强相互作用的 Cu 物种[12]。

（2）浸渍液浓度。浸渍液浓度对负载量的影响如表 2 所示，对催化性能的影响如图 5 所示。从表 2 及图 5 可以看出，浸渍液浓度不仅影响活性物质的负载效率，而且对催化剂的催化性能也有着重要的影响。当浸渍液浓度为 1 mol/L 时，溶质扩散缓慢，单次负载量过小(1.9%)；当浸渍液浓度为 3 mol/L 时，活性组分在孔内分布不均匀，且负载率降低，这是由于浸渍液黏稠度增加，溶质进入载体内部空间较为困难。由图 5 可见，活性组分的负载量对 CO 的催化性能有着显著影响，3 mol/L 浸渍液制备的整体式催化剂的催化性能明显高于 1 mol/L 时，更多的活性组分能够达到更高的催化效率。

表 2　浸渍液浓度对负载量的影响

Table 2　Effect of impregnation solution concentration on the loadings

浸渍液浓度/(mol·L^{-1})	负载量(质量分数)/%	活性组分质量/g
1	1.900	0.057
2	4.146	0.124
3	3.082	0.092



浸渍液浓度/（mol·L^{-1}）：1—1；2—2；3—3。

图 5　浸渍液浓度对催化性能的影响

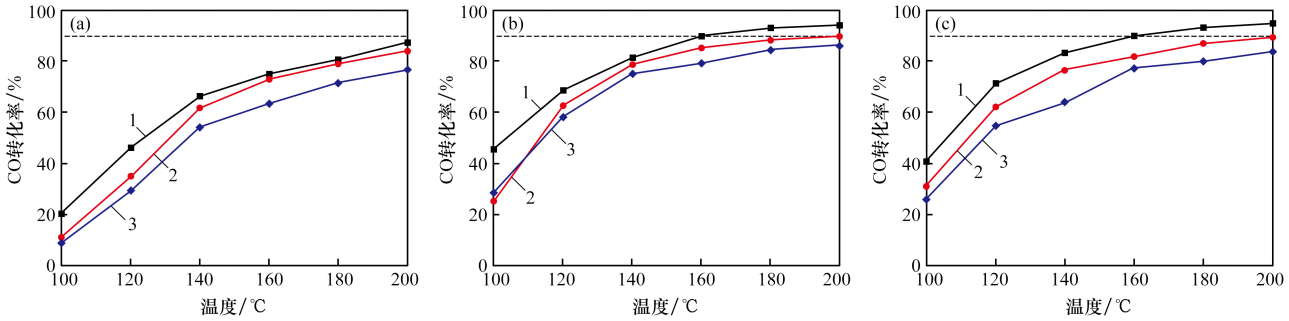
Fig. 5　Effect of impregnation solution concentration on loading rate and catalytic performance

2.1.2　不同反应条件对催化性能的影响

（1）空速及温度。图 6 为不同温度及空速条件下 CO 转化率的变化趋势。由图 6 可以看出，CO 转化率随着空速的逐渐增加呈下降趋势，随着温度的增加呈上升趋势。以 2 mol/L 浸渍液制备的整体式催化剂为例，在 180 ℃时，CO 催化效率从 3 000 h^{-1} 时的 93.06% 略微下降到 6 000 h^{-1} 时的 84.65%；在 4 500 h^{-1} 时，CO 转化率从 100 ℃时的 25.28% 增加到 200 ℃时的 90.05%。

当空速较低时，烟气在催化剂床层的停留时间较长，CO 的氧化反应得以充分进行，CO 转化率较高[13]。而随着空速的增大，负载于载体内层的催化活性组分利用率会降低，同时过高的空速会导致烟气未经彻底催化就直接排出，造成二次污染[14]。升高温度可使催化剂活性组分与反应气体分子的能量升高，促进分子活化，增大了分子之间的有效碰撞，从而使得 CO 转化率提高。

（2）稳定性及抗水抗硫性测试。在不含 H_2O 以及 SO_2 的条件下，对催化剂进行了长达 200 h 的



浸渍液浓度/(mol·L^{-1})：(a) 1；(b) 2；(c) 3

空速/h^{-1}：1—3 000；2—4 500；3—6 000。

图 6 空速及反应温度对催化性能的影响

Fig. 6 Effect of air velocity and reaction temperature on catalytic performance

稳定性测试，如图 7 所示。在经过 200 h 的稳定性测试后，催化剂仍表现出较好的催化活性，催化效率稳定在 90% 以上。

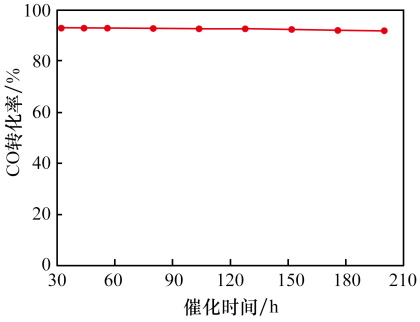
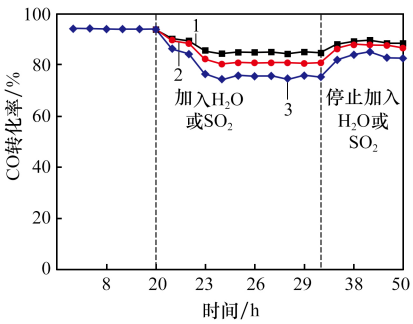


图 7 催化剂稳定性测试

Fig. 7 Stability test of the catalysts

(注：温度为 180 ℃；空速为 3 000 h^{-1}；浸渍液浓度为 2 mol/L；Cu 和 Ce 的物质的量之比为 1∶1)

在实际烧结烟气中不可避免地含有 SO_2 和 H_2O 气体，因此对整体式催化剂的抗水抗硫性能进行测试，结果如图 8 所示。由图 8 可见：在反应温度为 180 ℃，空速为 3 000 h^{-1}时，未添加 H_2O 和 SO_2 的情况下，整体式催化剂在前 20 h 内表现出较高的催化效率(93%)；催化 20 h 后，添加 13% H_2O 或 0.01% SO_2。在单独添加 H_2O 的情况下，催化效率逐渐下降至 85%，这是由于 H_2O 会吸附在催化剂表面，覆盖活性位点，抑制 CO 和 O_2 的吸附[15]。催化 32 h 后，停止通入 H_2O，催化效率逐渐上升至 87%。单独添加 SO_2 或 H_2O 与同时添加 H_2O 和 SO_2 三种情况呈现相同的变化趋势，但 SO_2 对催化剂的抑制作用要强于单独添加 H_2O、同时添加 SO_2 和 H_2O 两种情况。SO_2 在催化剂上的主要反应：① $SO_2 + 1/2O_2 = SO_3$；② $SO_3 + MeO = MeSO_4$。前者主要是 SO_2 与 CO 竞争氧化活性位点，而后者产生的硫酸盐则导致催化剂不可逆失活[16-18]。



通入气体条件：1—H_2O；2—SO_2；3—$H_2O + SO_2$。

图 8 H_2O 与 SO_2 对催化性能的影响

Fig. 8 Effect of H_2O or SO_2 on catalytic performance

2.2 基于实际烧结烟气催化性能测试

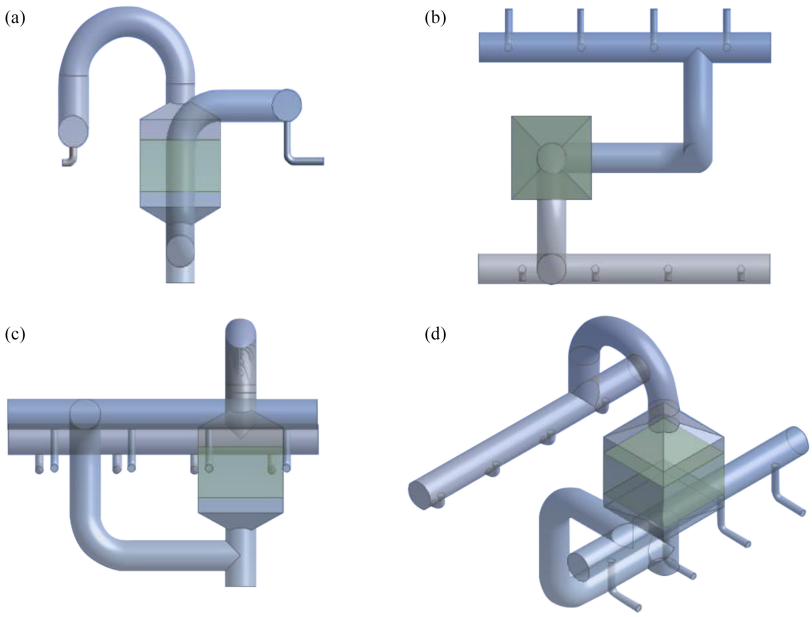
2.2.1 Fluent 模拟管道烟气压降

(1) 催化床模型建立。催化床的具体设计如图 9 所示。催化反应装置体积为 1 100 mm × 1 100 mm × 1 100 mm，催化床层厚度为 1 000 mm。CO 气体在入口处的流量为 10 000 m^3/h。

(2) 模型假设。催化床气流量设置为 10 000 m^3/h，温度为 300 ℃，多孔介质材料的密度为 2 400 kg/m^3，比热容为 1 000 J/(kg·K)，导热系数为 2.4 W/(m·K)。在 Fluent 中设置黏性和惯性阻力系数以实现不同孔隙率多孔介质的模拟。这里使用 Ergun 经验公式进行计算，黏性阻力系数 $C_1 = 1/\alpha$ 的计算公式如下。

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150}\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \tag{2}$$

式中：D_p 为孔径，m；ε 为孔隙率。



（a）正视图；（b）俯视图；（c）左视图；（c）45°图

图 9　催化床模拟设计

Fig. 9　Design of catalytic bed simulation

惯性阻力系数 C_2 的计算公式：

$$C_2 = \frac{3.5}{D_p}\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \tag{3}$$

（3）为探究多孔介质孔隙率对于整体床中压阻的影响，将孔径设置为 2.8 mm，分别对孔隙率为 0.64、0.70、0.80、0.90、1.00 这 5 种情况进行模拟。不同孔隙率对应的黏性和惯性阻力系数大小如表 3 所示。

表 3　不同孔隙率对应的黏性和惯性阻力系数

Table 3　The viscous resistance and the inertial resistance coefficient corresponding to various porosity ratios

孔隙率	黏性阻力系数	惯性阻力系数
0.64	9.46×10^6	1.72×10^3
0.70	5.02×10^6	1.09×10^3
0.80	1.49×10^6	4.88×10^2
0.90	2.62×10^5	1.71×10^2
1.00	0	0

通过模拟得到孔径为 2.8 mm，孔隙率分别为 0.64、0.70、0.80、0.90、1.00 时多孔介质的压力分布如图 10 所示，对应的压阻汇总如表 4 所示。由图 9 及表 4 可以发现：当孔隙率从 0.90 减小到 0.80 时，催化床层压阻从 43.2 Pa 增大至 95.4 Pa；当孔隙率减少至 0.64 时，压阻增大至 322 Pa；当孔隙率的值为 1.00 时，该处不设多孔介质，压阻为 0。孔隙率是指孔隙的体积与催化剂总体积的比例。孔隙率越大，压阻越小，气体可以流经的空间越大，气体通过多孔介质会更加顺畅、流速更快，其在催化床层中停留的时间越短。

表 4　不同孔隙率对应的压阻

Table 4　Pressure resistance corresponding to different porosities

孔隙率	0.64	0.70	0.80	0.90	1.00
压阻/Pa	322	204	95	43	0

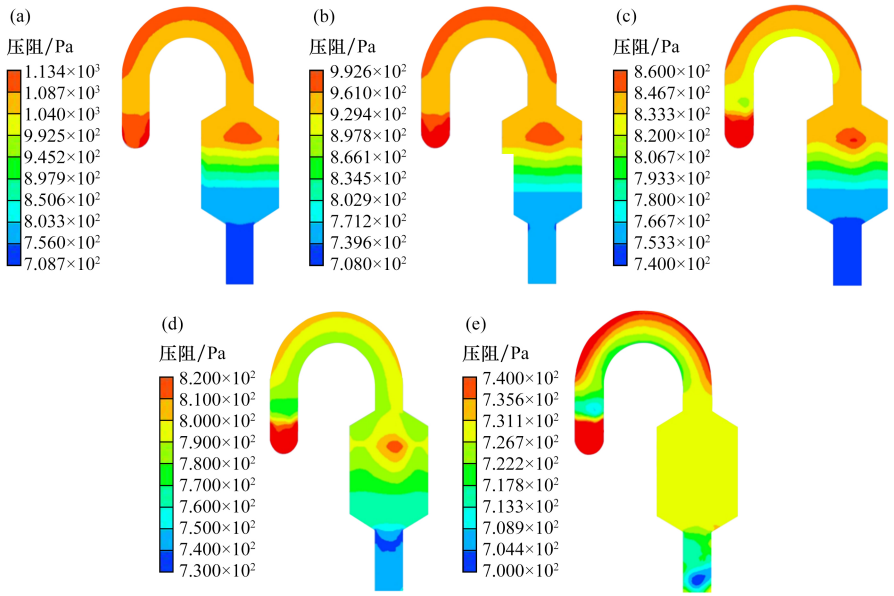
2.2.2　整体式催化剂中试试验

为探究中试试验的可行性，对不同规格载体的特性进行测算，并核算中试试验中催化剂处理烟气的能力。整体式催化剂的负载量以及负载率通过称量负载前、后的莫来石载体的质量来计算，计算公式如下。

$$W_1 = \frac{M_1 - M_0}{M_0}\times100\% \tag{4}$$

式中：W_1 为负载率，%；M_0 为未负载的莫来石的质量，kg；M_1 为负载后的整体式催化剂的质量，kg。

当浸渍液浓度为 2 mol/L、载体体积为 150 mm × 150 mm × 150 mm 时，不同规格载体特性如表 5 所示。选用中试试验中活性组分负载率较低的载



孔隙率：(a) 0.64；(b) 0.70；(c) 0.80；(d) 0.90；(e) 1.00

图 10 不同孔隙率的压力分布模拟结果

Fig. 10 Simulation results of pressure distribution for different porosities

表 5 不同规格载体特性

Table 5 Characteristics of different carrier sizes

载体规格（方孔数量）/个	孔径/mm	比表面积/($m^2 \cdot m^{-3}$)	孔隙率/%	负载率/%
25×25	5.0	590	70	3.77
43×43	2.8	963	64	4.12
50×50	2.4	1 104	62	5.21
60×60	2.0	1 291	60	5.81

体与实验室样品进行对比，结果如表 6 所示。中试所制备的整体式催化剂的催化组分负载量高于实验室制备样品。在实验室条件下，每 1 g 活性组分每分钟能够处理 2 026 mL 烟气，中试试验条件下则能够处理 1 687 mL 烟气，因此认为，中试试验所制备的整体式催化剂能够处理实际烧结烟气。

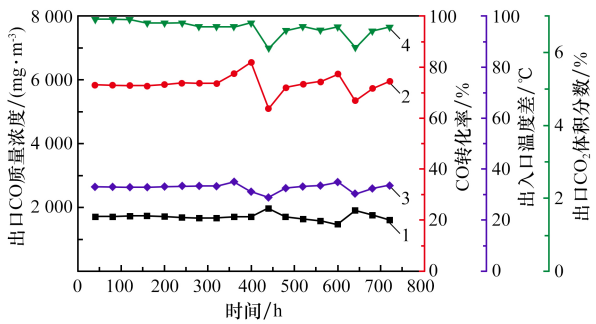
表 6 单位质量催化剂催化烟气量

Table 6 Catalyzed flue gas amount of catalyst per unit mass

项目	浸渍液浓度/($mol \cdot L^{-1}$)	负载率/%	处理烟气量/($mL \cdot min^{-1} \cdot g^{-1}$)
实验室样品	2	4.42	2 026
中试样品	2	3.77	1 687

基于模拟管道烟气压降的结果以及上述讨论，为保证烟气与活性组分接触时间以及活性组分负载量，采用莫来石载体的规格为 150 mm×150 mm×150 mm、方孔数量为 43×43、孔径为2.8 mm、比表面积为 963 m^2/m^3、孔隙率为 0.64、单块负载率为 4.12%。

CO 催化净化中试试验装置于 2022 年 3 月底完成建设，于 4 月中旬开始正式测试。催化装置进口烟气温度为 200～220 ℃，流量为 3 000 m^3/h（体积空速为 3 000 h^{-1}）。在两个月的持续测试中，选取 1 个月的有效数据，基于催化前、后烟气中的 CO 浓度，得到实际应用中整体式催化剂的性能以及稳定性，如图 11 所示。由图 11 可见，在 720 h的中试试验中，CO转化率稳定在73%左右，



1—出口 CO 质量浓度；2—CO 转化率；3—出入口温度差；4—出口 CO_2 体积分数。

图 11 中试试验整体式催化剂催化效率及温差变化

Fig. 11 Catalytic efficiency of monolithic catalyst and temperature variation in pilot experiment

出口 CO 质量浓度稳定在1 700 mg/m^3 左右，CO_2 体积分数高于 6%，出入口烟气温度差约为 30 ~ 35 ℃，出口烟气温度最高达到 250 ℃左右。由于烧结生产过程的不稳定性，烟气中 CO 含量存在工况波动，但在长达一个月的中试时间内，CO 转化率仍可维持在 70% 以上，表明该整体式催化剂可应用于实际烧结烟气 CO 催化氧化。

此外，经济效益方面，假定钢铁厂烧结烟气排放量为 300 万 Nm^3/h，CO 初始质量浓度为 6 000 mg/m^3，CO 转化率为 70%，CO 的年均减排量可达 10.9 万吨。结合河北省 CO 的税收政策，每年可以减少税收约 2 080 万元。

3　结　论

（1）以 CuO-CeO_2 为活性组分、莫来石为载体制备整体式催化剂，在不同负载及反应条件下对催化性能进行测试。在浸渍液浓度为 2 mol/L、铜铈共同浸渍反应温度为 180 ℃、空速为 3 000 h^{-1}的最佳制备及反应条件下整体式催化剂催化效率达 93%。

（2）H_2O 和 SO_2 能够明显抑制催化剂的催化性能，且 SO_2 的抑制效应更强。通入 H_2O 会覆盖催化剂表面的活性位点，抑制 CO 和 O_2 的吸附，导致催化效率降低。SO_2 的引入导致催化剂表面积累了 SO_4^{2-} 物种，从而抑制 CO 催化氧化，导致催化剂不可逆失活。

（3）批量制备了 1 m^3 整体式催化剂，并开展了烧结烟气 CO 净化中试试验。在长达一个月的中试时间内，CO 转化率仍可维持在 70% 以上，进口烟气温度约为 200 ~ 220 ℃，CO 催化效率大于 70%（平均为 73%），出口 CO 质量浓度约为 1 700 mg/m^3，平均出口烟气温度达 240 ℃。

参考文献：

[1] 程扬，李杰，朱金伟，等. 烧结烟气 CO 减排研究动态[J]. 矿产综合利用，2022(2)：22 - 25.
CHENG Yang, LI Jie, ZHU Jinwei, et al. Research progress of CO emission reduction in sintering flue gas [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(2): 22 - 25.

[2] 李洪涛. 环境空气中 CO 对健康的影响[J]. 科技资讯，2017，15(8)：132；134.
LI Hongtao. Health effects of CO in ambient air[J]. Science & Technology Information, 2017, 15(8): 132; 134.

[3] 赵欣锋，齐西伟，程扬，等. 铁矿烧结过程烟气排放规律分析[J]. 钢铁研究学报，2022，34(8)：758 - 767.
ZHAO Xinfeng, QI Xiwei, CHENG Yang, et al. Analysis of flue gas emission law in sintering process of iron mine [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(8): 758 - 767.

[4] 阚家伟，李兵，李林，等. 含氯挥发性有机化合物催化燃烧催化剂的研究进展[J]. 化工进展，2016，35(2)：499 - 505.
KAN Jiawei, LI Bing, LI Lin, et al. Advances in catalysts for catalytic combustion of chlorinated volatile organic compounds[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(2): 499 - 505.

[5] 杜月利. 改性 CuO-CeO_2 催化剂催化氧化烧结烟气 CO 性能研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2022.
DU Yueli. Study on catalytic oxidation of CO in sintering flue gas over modified CuO-CeO_2 catalyst[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.

[6] CHEN A L, YU X J, ZHOU Y, et al. Structure of the catalytically active copper-ceria interfacial perimeter[J]. Nature Catalysis, 2019, 2: 334 - 341.

[7] 黄庆庆. 铈基催化剂的制备、表征及催化性能的研究[D]. 南宁：广西大学，2016.
HUANG Qingqing. The preparation and characterization study of catalytic performance over ceria-based catalysts [D]. Nanning: Guangxi University, 2016.

[8] FAURE B, ALPHONSE P. Co-Mn-oxide spinel catalysts for CO and propane oxidation at mild temperature[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2016, 180: 715 - 725.

[9] 卞文博. 钢铁烧结烟气 CO 整体式催化净化特性研究[D]. 北京：北京科技大学，2022.
BIAN Wenbo. Study on the characteristics of monolithic catalytic purification of CO in steel sintering flue gas [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.

[10] AHN S Y, NA H S, JEON K W, et al. Effect of Cu/CeO_2 catalyst preparation methods on their characteristics for low temperature water-gas shift reaction: A detailed study [J]. Catalysis Today, 2020, 352: 166 - 174.

[11] 魏艳. 高抗震性 CuO-CeO_2/AlOOH/Al-fiber 整体式催化剂及其 CO 优先氧化性能研究[D]. 上海：华东师

范大学,2022.
WEI Yan. High jolt-resistance CuO-CeO_2/AlOOH/Al-fiber monolithic catalyst for CO preferential oxidation [D]. Shanghai:East China Normal University,2022.

[12] AGUILA G, GUERRERO S, ARAYA P. Effect of the preparation method and calcination temperature on the oxidation activity of CO at low temperature on CuO-CeO_2/SiO_2 catalysts[J]. Applied Catalysis A: General, 2013,462:56 - 63.

[13] 李子宜,卞文博,侯环宇,等. 铜锰基整体式催化剂对烧结烟气 CO 净化特性[J]. 中国环境科学,2022,42(9):4052 - 4058.
LI Ziyi, BIAN Wenbo, HOU Huanyu, et al. Performance of CO purification from sintering flue gas by copper-manganese-based monolithic catalyst[J]. China Environmental Science,2022,42(9):4052 - 4058.

[14] 牛琦. 整体式锰基复合氧化物的制备及其催化氧化甲苯的研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
NIU Qi. Preparation of monolithic Mn-based mixed oxides and its catalytic performance for toluene[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2020.

[15] 丝梦,沈伯雄. SO_2 和 O_3 对锰 - 钴催化剂氧化 NO 的影响研究[J]. 河北工业大学学报,2021,50(6):69 - 76.
SI Meng, SHEN Boxiong. The effect of SO_2 and O_3 on NO catalytic oxidation by manganese-cobalt catalyst[J]. Journal of Hebei University of Technology,2021,50(6): 69 - 76.

[16] LI Z Y, CHEN J D, JIANG M, et al. Study on SO_2 poisoning mechanism of CO catalytic oxidation reaction on copper-cerium catalyst[J]. Catalysis Letters, 2022, 152(9):2729 - 2737.

[17] KIM M R, WOO S I. Poisoning effect of SO_2 on the catalytic activity of Au/TiO_2 investigated with XPS and in situ FT-IR[J]. Applied Catalysis A:General,2006,299: 52 - 57.

[18] SHEN Z H, XING X D, SHE Y, et al. Revealing of K and SO_2 poisoning mechanism on $CuCeO_x$ catalyst for low-temperature CO oxidation[J]. Chemical Engineering Journal,2024,485:149373.

内蒙古科技大学稀土产业学院介绍

内蒙古科技大学稀土产业学院(稀土工程技术学院)历史可追溯至1956年建校之初，1987年开始培养稀土冶金专业本科生，2013年开始培养博士研究生，2004年建成了全国首家稀土学院，2022年获批首批内蒙古自治区现代产业学院建设点，2023年高质量完成国家级现代产业学院申报工作，依托学院建设的稀土冶金先导工程学院获批内蒙古自治区首批未来技术学院。悠久的办学历史为冶金、稀土行业培养了长江学者特聘教授、“万人计划”领军人才、全国五一劳动奖章获得者等一大批行业杰出人才和技术骨干。稀土产业学院现有冶金工程、稀土材料科学与工程、新能源材料与器件三个本科专业，依托冶金工程一级学科博士点、硕士点和材料与化工专业学位硕士点，形成了本硕博接续培养的完整人才培养体系，2024年成为工程硕博士培育改革专项试点学院。航空发动机用稀土热障涂层、稀土材料电磁冶金技术与应用、白云鄂博稀土矿产绿色低碳高效冶炼分离、选冶固废资源综合利用、高强高韧稀土钢等一批创新成果获得工业化应用，填补了国家重要领域技术空白，产值达到年均20亿元以上。近年来，学生参加科技创新竞赛获“挑战杯”国赛特等奖等各类奖项300余项，特色育人模式成效显著。新时期，内蒙古科技大学稀土产业学院将坚守稀土、冶金领域的人才培养与科技创新，立足白云鄂博稀土矿产优势资源，围绕绿色低碳智能冶金和稀土新材料与应用产业需求，将产业链、创新链、教育链有效衔接，产教融合，理实一体，培养高素质应用型、复合型、创新型人才，建成我国重要的稀土、冶金人才培养培训基地、稀土新材料开发与应用交叉创新、稀土产业技术转移和稀土产业经济研究基地，成为特色鲜明、区域一流、国内知名、政校企多元“共建共管共享”的产学研用融合发展的现代产业学院。