

# 基于 DBD 柴油尾气烃类物质净化特性及分析

张传玖<sup>1</sup>, 李 鹏<sup>1</sup>, 徐东亮<sup>2</sup>, 赵彬彬<sup>2</sup>, 荣俊锋<sup>2</sup>, 陈明功<sup>2\*</sup>

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司, 陕西 榆林 719315;

2. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**以乙烯为目标烃类污染物, 采用自研介质阻挡放电反应器, 以工业木质素为碳源制备 B-C、Ru-C 两类掺杂碳基催化剂, 构建非热等离子体协同催化体系, 乙烯净化率提升 20%。Ru-C 催化剂性能显著优于 B-C 催化剂, 在净化过程中起主导作用。最佳反应工况为: Ru-C 催化剂装载量 20 g、放电电压 19 kV、进气流量 3 L/min、乙烯初始浓度 8.91 mmol/L, 对乙烯的去除效率可达 94.6%。经响应面分析, 工况影响程度排序为: 乙烯初始浓度>放电电压>进气流量。

**关键词:**柴油车尾气; 烃类物质; 介质阻挡放电; 催化净化

中图分类号: TQ051.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S1-0146-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.025

## Research on synergistic catalytic purification of hydrocarbons in diesel exhaust by dielectric barrier discharge (DBD)

ZHANG Chuan-jiu<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, XU Dong-liang<sup>2</sup>, ZHAO Bin-bin<sup>2</sup>,  
RONG Jun-feng<sup>2</sup>, CHEN Ming-gong<sup>2\*</sup>

(1. Shendong Coal Technology Research Institute, CHN Energy Group, Yulin 719315, China;

2. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Targeting ethylene as the representative hydrocarbon pollutant, a self-designed dielectric barrier discharge reactor was employed in this study. Using industrial lignin as a low-cost carbon precursor, two types of heteroatom-doped carbon catalysts (B-C and Ru-C) were prepared via a melt synthesis strategy. A non-thermal plasma-catalysis synergistic system was established, and the ethylene purification efficiency was improved by 20%. The Ru-C catalyst exhibited significantly better catalytic performance than the B-C catalyst and played a dominant role in the purification process. Under the optimized conditions (Ru-C catalyst dosage: 20 g, discharge voltage: 19 kV, gas flow rate: 3 L/min, initial ethylene concentration: 8.91 mmol/L), the ethylene removal efficiency reached 94.6%. Response surface methodology indicated that the order of influence of operational parameters was: initial ethylene concentration>discharge voltage>gas flow rate.

**Key words:** diesel exhaust; hydrocarbons; dielectric barrier discharge; catalytic purification

柴油车作为当前主流的运输工具, 凭借效率高、安全可靠、操作便捷等优点, 在公共运输行业应用广泛。然而由于城市人口密集, 空气质量需求较高, 柴油车尾气排放难题愈发受到社会的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。这类尾气排放不仅对环境造成恶劣影响, 更对人体呼吸系统、心血管系统等造成潜在危害, 因此, 柴油车排放标准和技术要求愈加严格。

柴油车尾气排放的典型污染物涉及一氧化碳(CO)、烃类(HC)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和颗粒物(PM)<sup>[3]</sup>。这其中, 具有化学稳定性与毒性的 HC 化合物, 是威胁环境与健康的突出组分。为应对尾气污染, 现行的净化技术主要从机内与机外两个方面进行<sup>[4-5]</sup>。

低温等离子体协同催化是一种新兴的机外净化技术, 它通过产生高能活性物种引发物理与化学协同反应, 从而实现污染物的高效降解, 并具有避免二次污染的优势<sup>[6-8]</sup>。为深入挖掘该技术的潜力, 本研究采用介质阻挡放电(DBD)方式, 重点考察引入 B-C 与 Ru-C 两种催化剂后, 体系对乙烯的净化效率变化规律及相关作用机制。

## 1 实验部分

### 1.1 实验仪器和试剂

实验仪器: 介质阻挡放电反应器(自研), 挥发性有机化合物(VOC)气体检测仪; 高压反应釜; 电

收稿日期: 2025-12-18; 修回日期: 2026-03-03

基金项目: 中国神华能源股份有限公司神东煤炭分公司委托技术开发项目《井工煤矿粉尘与职业病防治研究(五)矿用燃油车辆排放物净化关键技术》(HX2022072222); 安徽省现代环境工程国际联合研究中心(安徽理工大学)开放基金重点项目(XDHJGC2024003)

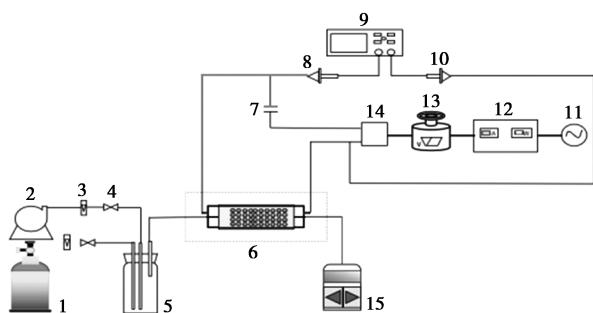
作者简介: 张传玖(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为矿山压力与岩层控制, 11433027@ceic.com; 陈明功(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为环境化工, 通讯联系人, mgchen@aust.edu.cn。

子式霓虹灯电源;单相交流接触式调压器;示波器;功率表;玻璃转子流量计;管式炉;旋转蒸发器;真空干燥箱;搅拌水浴锅。

实验试剂:乙烯气体(WA22094);木质素(分析纯);乙二醇(分析纯);乙酰丙酮钌(分析纯);氧化硼(分析纯);B-C 催化剂、Ru-C 催化剂,自制。

## 1.2 实验流程

本研究的实验流程如图 1 所示,首先完成实验装置的组装与调试,检查气路管路的气密性,确保符合实验操作规范。随后将尾气发生系统预启动,持续稳定运行 5 min 后,在尾气发生装置内基本实现尾气组分的均匀分布;在此过程中,通过气泵与电磁阀组合调节气路流量至设定值,借助气瓶与针型阀调节进气污染物浓度,确保尾气组分均匀稳定。



1—乙烯气体钢瓶;2—鼓风机;3—转子流量计;4—阀门;  
5—气体混合瓶;6—DBD 反应器;7—电容;8—高压探头;  
9—示波器;10—无源探头;11—交流电源;12—功率表;  
13—接触调压器;14—等离子体电源;  
15—VOC/有毒有害气体检测仪

图 1 DBD 反应器净化乙烯流程图

待系统参数稳定后,启动 DBD 反应器进行尾气处理,同时利用调压器调节输入电压,搭配示波器、功率分析仪实时监测并记录放电状态、峰值电压等关键参数。实验采用控制变量法,在预设的多组实验变量下,采用在线气体分析仪同步测定  $\text{NO}_x$  等目标污染物的进出口浓度,每组实验条件下连续进行 3 次并取平均值,以减少随机误差。

通过接触调压器调节 DBD 反应器两极的电压,运用响应面分析等方法,研究放电电压、气体流量和尾气初始浓度三因素单独及交互作用<sup>[9-10]</sup>。

## 2 乙烯净化实验

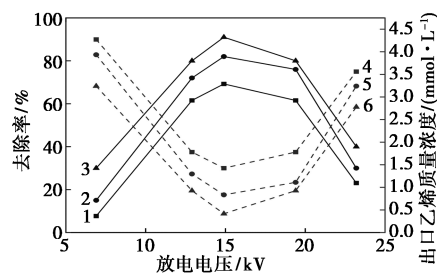
本实验选用 Ru-C 与 B-C 两种碳基催化剂,构建“催化剂-DBD 等离子体”协同体系以净化柴油车尾气中的烃类污染物。为量化催化剂用量对净化效果的协同作用,将催化剂填充量设定为 0、10、20 g。

实验过程中采用在线气体分析仪测定目标污染物的进出口浓度,每组实验条件下连续监测 3 次并取平均值,以减少随机误差。

### 2.1 DBD 协同 Ru-C 催化剂净化乙烯实验研究

#### 2.1.1 协同 Ru-C 催化剂下放电电压对乙烯去除率的影响

Ru-C 催化剂填充量依次为 0、10 g 与 20 g,固定乙烯初始浓度为 4.63 mmol/L,设备进口流量为 3 L/min,探究放电电压对乙烯净化率的影响,实验数据如图 2 所示。



1—填充 0 g 催化剂的去除率;2—填充 10 g 催化剂的去除率;  
3—填充 20 g 催化剂的去除率;4—填充 0 g 催化剂乙烯的浓度;  
5—填充 10 g 催化剂乙烯的浓度;6—填充 20 g 催化剂乙烯的浓度

图 2 不同 Ru-C 催化剂填充量下放电电压与乙烯净化效率关系

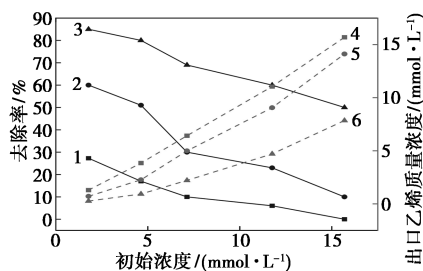
由图 2 实验结果可知,乙烯去除率随放电电压的增加呈现先升后降的趋势,且“催化剂-DBD”协同体系的净化效能较无催化剂体系实现了显著提升。在低电压条件下(7 kV)且未填充催化剂时,系统对乙烯的去除效率相对有限,净化率在 10% 以下;与无催化条件下仅 7% 的去除率相比,填充 20 g 催化剂后,去除率大幅提升至 30%。而在电压升高至 15 kV 的条件下,DBD 与催化剂协同体系的净化性能得到充分激发,乙烯去除率进一步提升至 91%。该结果表明,放电电压与催化剂的耦合能产生显著的协同增效,从而大幅强化整体净化过程。

在介质阻挡放电产生的等离子体中,催化剂表面在捕获高能粒子后得以活化,进而通过引发高能碰撞及自由基反应等途径,促进乙烯分子发生裂解。随着催化剂填充量由 10 g 提高至 20 g,乙烯的去除效果随电压上升呈现逐步增强的趋势,并在较高电压下达到 91% 的去除率。这主要归因于催化剂用量增加后,活性炭载体的表面积得到提升,即与尾气中乙烯分子之间的接触面积扩大,这不仅为污染物提供了更多的吸附位点,提高了乙烯分子的吸附效率;而且延长了尾气在放电区域内的有效停留时间,促使污染物分子与等离子体活性物种的碰撞概率得

到提升,大大提高了反应器对乙烯分子的捕集效率,最终实现乙烯的高效净化。

### 2.1.2 协同 Ru-C 催化剂下气体初始浓度对乙烯去除率的影响

Ru-C 催化剂填充量依次为 0、10 g 与 20 g,固定乙烯进口流量为 3 L/min、放电电压为 6.9 kV,探究初始浓度对乙烯净化率的影响,实验数据如图 3 所示。



1—填充 0 g 催化剂的去除率;2—填充 10 g 催化剂的去除率;  
3—填充 20 g 催化剂的去除率;4—填充 0 g 催化剂乙烯的浓度;  
5—填充 10 g 催化剂乙烯的浓度;6—填充 20 g 催化剂乙烯的浓度

图 3 不同 Ru-C 催化剂填充量下初始浓度与乙烯净化效率关系

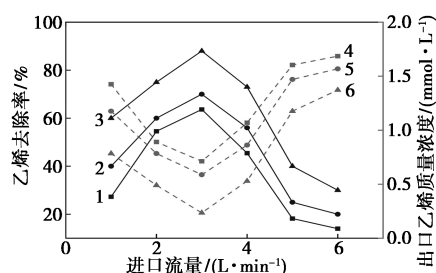
从图 3 的结果可知,当乙烯初始浓度由 1.78 mmol/L 逐步增至 16.04 mmol/L 时,不同催化剂填充量下的乙烯去除率均呈现明显的下降趋势,但“催化剂-DBD”协同体系的净化效率显著优于无催化体系,影响趋势近乎一致,但整体的净化效率显著提高。其中,未填充催化剂的对照组中,乙烯去除率始终低于 30%。当初始浓度固定为 4.63 mmol/L 时,随着催化剂填充量逐步提升,乙烯去除率依次从 23% 提升至 51%,最终达到 65%,由催化剂用量的提高而攀升的降解作用十分显著。

进一步对比不同填充量的抗干扰性能可见:催化剂填充量的提升强化了乙烯分子与催化剂表面活性位点的能量交互作用,使得协同体系在较宽的浓度区间内均能维持较高的净化效能。

### 2.1.3 协同 Ru-C 催化剂下气体进口流量对乙烯去除率的影响

Ru-C 催化剂填充量依次为 0、10 g 与 20 g,固定放电电压为 14.9 kV,气体初始浓度为 1.96 mmol/L,探究设备进口流量对乙烯净化率的影响,实验数据如图 4 所示。

图 4 显示进口流量数值在 1~6 L/min 区间不断提高时,不同催化剂填充量下的乙烯净化率均呈现先升后降的变化特征,不同组的变化趋势几近一致,且从净化数值来看,催化剂的引入对净化效能的提



1—填充 0 g 催化剂的去除率;2—填充 10 g 催化剂的去除率;  
3—填充 20 g 催化剂的去除率;4—填充 0 g 催化剂乙烯的浓度;  
5—填充 10 g 催化剂乙烯的浓度;6—填充 20 g 催化剂乙烯的浓度

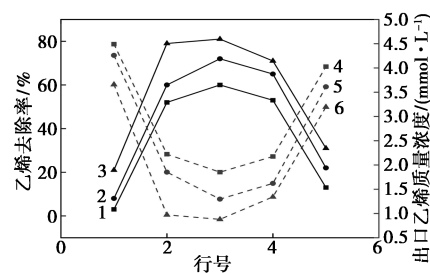
图 4 不同 Ru-C 催化剂填充量下进口流量与乙烯净化效率关系

升作用较为显著。其中,未填充催化剂的对照组净化效果始终偏低,分别填充 10 g 与 20 g 催化剂后,相同流量下的去除率可提升至 20% 与 30%。当进口流量稳定在 3 L/min 这一最优水平时,0、10、20 g 3 种催化剂填充量对应的乙烯净化率分别达到 63%、70% 与 88%,进一步证实了催化剂用量与流量参数的协同优化效应。

## 2.2 DBD 协同 B-C 催化剂净化乙烯实验研究

### 2.2.1 协同 B-C 催化剂下放电电压对乙烯去除率的影响

B-C 催化剂填充量依次为 0、10 g 与 20 g,固定气体初始浓度为 4.63 mmol/L,气体进口流量为 3 L/min,探究放电电压对乙烯净化率的影响,实验数据如图 5 所示。



1—填充 0 g 催化剂的去除率;2—填充 10 g 催化剂的去除率;  
3—填充 20 g 催化剂的去除率;4—填充 0 g 催化剂乙烯的浓度;  
5—填充 10 g 催化剂乙烯的浓度;6—填充 20 g 催化剂乙烯的浓度

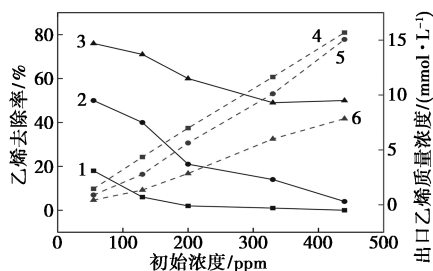
图 5 不同 B-C 催化剂填充量下放电电压与乙烯净化效率关系

图 5 的实验数据显示,放电电压的耦合规律与前述趋势基本一致,即乙烯去除率随放电电压升高先升后降。向系统中引入 20 g B-C 催化剂后,放电电压为 7 kV 时的去除率从无催化时的 5% 提升至 20%,增幅达 3 倍。随着电压从 7 kV 进一步提升至 15 kV,B-C 催化协同体系的乙烯去除率持续上升并达到 81% 的峰值,充分证实了 B-C 催化剂对等离

子体净化过程的强化作用。

### 2.2.2 协同 B-C 催化剂下气体初始浓度对乙烯去除率的影响

B-C 催化剂填充量依次为 0、10 g 与 20 g, 固定气体进口流量为 3 L/min、放电电压为 6.9 kV, 探究气体初始浓度对乙烯净化率的影响, 实验数据如图 6 所示。



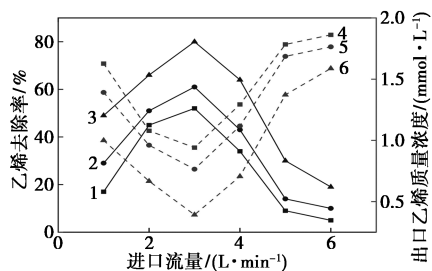
1—填充 0 g 催化剂的去除率; 2—填充 10 g 催化剂的去除率;  
3—填充 20 g 催化剂的去除率; 4—填充 0 g 催化剂乙烯的浓度;  
5—填充 10 g 催化剂乙烯的浓度; 6—填充 20 g 催化剂乙烯的浓度

图 6 不同 B-C 催化剂填充量下初始浓度与乙烯净化效率关系

图 6 揭示了添加 B-C 催化剂的情况下, 乙烯初始浓度对去除效果的影响规律: 在实验要求的初始浓度范围内, 不同 B-C 填充量组的乙烯去除率均呈递减趋势。其中, 未填充 B-C 催化剂的对照组, 乙烯去除率全程不超过 20%; 而引入 B-C 催化剂后, 净化效能实现提升。以 4.63 mmol/L 为例, 随着 B-C 催化剂填充量从 0 g 增至 10 g 再到 20 g, 乙烯去除率依次从 10% 提升至 45%, 最终达到 70%。

### 2.2.3 协同 B-C 催化剂下气体进口流量对乙烯去除率的影响

B-C 催化剂填充量依次为 0、10 g 与 20 g, 固定放电电压为 14.9 kV, 气体初始浓度为 1.96 mmol/L, 探究进口流量对乙烯净化率的影响, 实验数据如图 7 所示。



1—填充 0 g 催化剂的去除率; 2—填充 10 g 催化剂的去除率;  
3—填充 20 g 催化剂的去除率; 4—填充 0 g 催化剂乙烯的浓度;  
5—填充 10 g 催化剂乙烯的浓度; 6—填充 20 g 催化剂乙烯的浓度

图 7 不同 B-C 催化剂填充量下进口流量与乙烯净化效率关系

图 7 反映了在气体进口流量不断提高的情况下, 整体的乙烯去除率呈现出先增加后减少的规律, 进口流量在 3 L/min 时达到峰值。变化趋势同图 4 基本一致, 不同填充量对应的乙烯净化率峰值分别为 50%、60% 和 80%。

### 2.3 DBD 协同 Ru-C 催化剂对乙烯去除率的响应面分析

#### 2.3.1 建立模型

为了评估关键操作参数的影响并确定最佳工艺条件, 采用响应面法开展实验设计。以放电电压、气体初始浓度及进口流量作为自变量, 将乙烯去除率作为响应值。基于上述研究, 选择将催化剂填充量固定为 20 g。根据表 1 所列数据进行实验, 通过数据拟合建立自变量与乙烯去除率之间的数学预测模型。通过响应面法的方差分析(表 2)验证模型的显著性与准确性, 并进一步量化了各操作参数对乙烯去除效果的影响, 最终确定了可实现去除率最大化的工况组合。

表 1 响应面实验方案及结果分析

实验	A 放电电压/ kV	B 气体初始浓度/ mmol/L	C 进口流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	$\eta$ 乙烯去除率/ %
1	32.3	8.91	1	20
2	19.6	8.91	3	90
3	32.3	8.91	5	25
4	6.9	8.91	5	30
5	19.6	8.91	3	93
6	19.6	8.91	3	81
7	6.9	8.91	1	35
8	19.6	8.91	3	87
9	19.6	1.78	1	47
10	19.6	16.04	1	52
11	6.9	16.04	3	50
12	32.3	1.78	3	25
13	19.6	1.78	5	33
14	6.9	1.78	3	85
15	32.3	16.04	3	86
16	19.6	16.04	5	73
17	19.6	8.91	3	88

#### 2.3.2 方差分析

以表 2 的数据作为样本, 建立乙烯去除率  $\eta$  与

放电电压  $A$ 、气体初始浓度  $B$ 、进口流量  $C$  之间的二次多项回归方程,如式(1)所示:

$$\eta = 87.80 - 5.50A + 8.88B + 0.875C + 24.00AB + 2.50AC + 8.75BC - 25.03A^2 - 1.27B^2 - 35.17C^2 \quad (1)$$

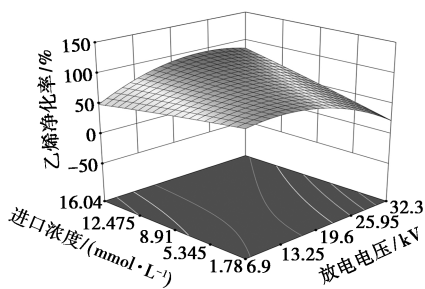
表 2 模型方差分析

因素	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	11894.42	9	1321.60	70.06	<0.0001	显著
A-放电电压	242	1	242	12.83	0.0090	—
B-气体初始浓度	630.13	1	630.13	33.40	0.0007	—
C-进口流量	6.13	1	6.13	0.3247	0.5866	—
AB	2304	1	2304	122.14	<0.0001	—
AC	25	1	25	1.33	0.2875	—
BC	306.25	1	306.25	16.23	0.0050	—
A <sup>2</sup>	2636.84	1	2636.84	139.78	<0.0001	—
B <sup>2</sup>	6.84	1	6.84	0.3628	0.5659	—
C <sup>2</sup>	5239.27	1	5239.27	277.73	<0.0001	—
残差	132.05	7	18.86	—	—	—
失拟项	53.25	3	17.75	0.9010	0.5147	不显著
纯误差	78.80	4	19.70	—	—	—
总误差	12026.47	16	—	—	—	—
相关系数			$R^2=0.9890$			—

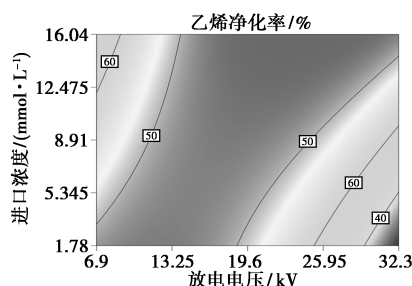
### 2.3.3 响应面优化分析

放电电压、进气流量和进气初始浓度对净化效率的影响规律通过响应面分析获得。图 8~图 10 的 3D 图与等高线图分别展示了电压浓度、电压流量、浓度流量对乙烯去除率的作用趋势。

在进口流量恒定的条件下,图 8(a)展示了放电电压与气体初始浓度的交互作用。结果表明:低电压时去除率与浓度负相关,高电压时则转为正相关;而固定浓度下,去除率随电压升高存在峰值。从图 8(b)可见,在电压 6.9~19.6 kV、浓度 1.78~16.04 mmol/L 的参数范围内,去除率普遍高于 80%。



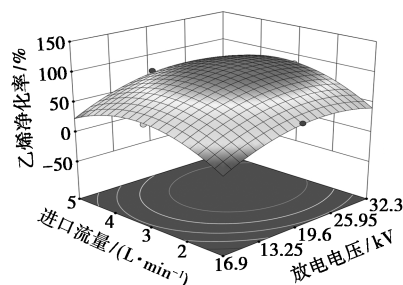
(a) 三维立体图



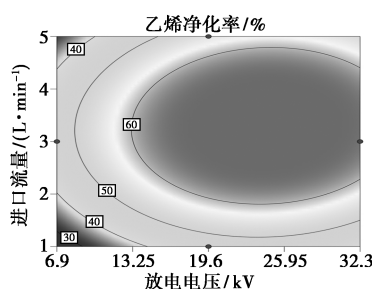
(b) 等高线图

图 8 放电电压与气体初始浓度的交互作用

从图 9(a)可以观察到,在气体初始浓度固定的条件下,调整放电电压或进口流量,乙烯去除率的变化趋势相似,均为先增加后减少。并且,同步增加电压和流量比单独调整任一参数更能有效提升去除效率,这说明电压与进口流量之间存在一定条件的协同关系。对应的参数优化范围见图 9(b),即当电压维持在 14~22 kV、流量控制在 2~4 L/min 时,去除率能达到 80%以上。



(a) 三维立体图



(b) 等高线图

图 9 放电电压与进口流量的交互作用

从图 10(a)中可以观察到,当放电电压恒定时,气体初始浓度与进口流量之间存在明显的交互效应。固定进口流量时,其浓度效应则随流量水平而发生变化。低流量时,去除率与浓度正相关;高流量时,则转为负相关。由图 10(b)可知,在初始浓度 10.69~16.04 mmol/L、进口流量 3~4 L/min 的条件下,净化系统能实现 90%以上的去除效率。

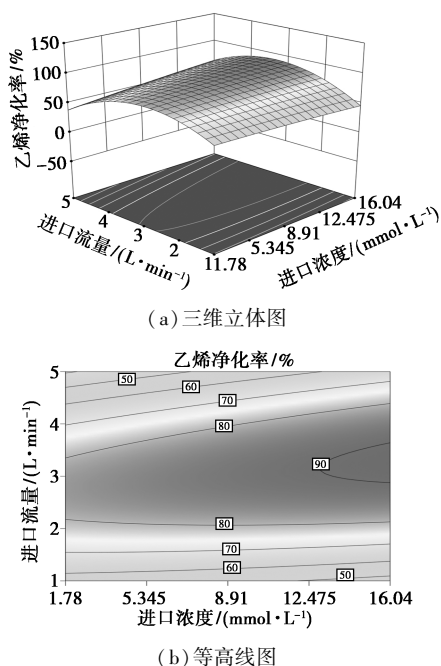


图 10 气体初始浓度与进口流量的交互作用

### 3 结论

本研究通过实验探讨了介质阻挡放电 (DBD) 协同碳基催化剂对模拟柴油尾气中乙烯的净化性能,主要结论如下。

(1) 在制备的两种催化剂中, Ru-C 催化剂表现出更优异的催化活性。在相同实验条件下,其对乙烯的去除效率较 B-C 催化剂平均高出 10% 以上。当催化剂填充量增至 20 g 时,可为污染物提供充分的吸附位点,并延长尾气在放电区域的停留时间,从而显著提升净化效能。

(2) 各操作参数对乙烯去除率的影响呈现规律性变化。放电电压存在最佳区间,去除率随电压升高先增后减,其中 Ru-C 催化剂在约 15 kV 时去除率达 91%, B-C 催化剂在相同电压下最高为 81%。乙烯初始浓度升高对净化过程产生抑制,去除率随之下降,但引入 20 g Ru-C 催化剂后,系统整体去除

能力较无催化剂时提升 50%~60%。气体进口流量在 1~6 L/min 范围内,去除率亦呈现先增后减趋势,于 3 L/min 时达到峰值,此时 Ru-C 与 B-C 催化剂对应的去除率分别为 88% 与 80%。

(3) 基于响应面法建立的模型可靠性较高,各工况因素对乙烯去除率的影响程度依次为:初始浓度>放电电压>进口流量。通过模型获得最优操作条件为:Ru-C 催化剂 20 g、放电电压 19.2 kV、乙烯初始浓度 8.91 mmol/L、进口流量 3 L/min,该条件下乙烯去除率预测可达 94.6%,较单独 DBD 系统提升约 20%。

### 参考文献

- [1] 汪盼,吴文娟,何函,等.DBD 协同 NiO/ $\alpha$ -Mn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 催化降解气态邻氯甲苯[J].环境科学与技术,2024,47(6):79-85.
- [2] 王亚军.润滑油对柴油机颗粒物氧化反应性影响的实验研究[D].天津:天津大学,2022.
- [3] 胡祖和,方敏,李长英,等.低温等离子体协同催化剂净化柴油机尾气中碳烟颗粒物[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2016,36(2):16-19.
- [4] Zhang F, Chen Y, Sun M, *et al.* Non-thermal plasma to boost lattice oxygen activation in Ce<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>2- $\delta$</sub>  catalysts for efficient soot combustion at low temperatures[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2025, 77:99-109.
- [5] 汪智伟.介质阻挡放电低温等离子体协同吸附净化室内甲醛实验研究[D].淮南:安徽理工大学,2020.
- [6] Seong H K, Ung H Y, Jin G K. Low-density polyethylene degradation and energy yield using dielectric barrier discharge under various electrical conditions[J]. Energies, 2023, 16(5):2403.
- [7] 刘洪博,黄志勇.低温等离子体净化去除甲苯综合实验设计[J].实验室研究与探索,2023,42(5):92-96.
- [8] 夏诗杨,马文鑫,米俊锋,等.低温等离子体脱硫技术研究进展[J].科技导报,2022,40(12):66-72.
- [9] 余森霖,杜胜男,米俊锋,等.低温等离子体协同催化处理 VOCs 的研究进展[J].环境工程,2022,40(8):212-219.
- [10] Shang K, Guo L, Yang Z, *et al.* Enhanced electric discharge in a dual AC powered packed-bed DBD reactor for benzene degradation[J]. Journal of Electrostatics, 2025, 138:104155. ■

(上接第 145 页)

- [19] Rupp E C, Wilcox J. Mercury chemistry of brominated activated carbons-Packed bed breakthrough experiments[J]. Fuel, 2014, 117:351-353.
- [20] 周强,段钰锋,冒咏秋,等.NH<sub>4</sub>Cl 改性活性炭脱除气态 HgO 的特性分析[J].化工进展,2018,37(10):4068-4073.
- [21] Miller J S, Dunham E G, Olson S E, *et al.* Flue gas effects on a carbon-based mercury sorbent[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 65:343-363.
- [22] Niska S, Helble J J, Fujiwara N. Interpreting laboratory test data on homogeneous mercury oxidation in coal-derived exhausts[C]. Proceedings of The Air & Waste Management Association Specialty Conference on Mercury Emissions, Chicago; 2001.

- [23] 柳帅.模拟烟气中卤素对单质汞的均相/非均相氧化特性研究[D].南京:东南大学,2019.
- [24] Yokoyama T, Asakura K. Mercury emissions from a coal fired power plant in Japan[J]. Science of the Total Environment, 2000, 259(1/3):97-103.
- [25] Ghorishi B, Gullett B K. Sorption of mercury species by activated carbons and calcium-based sorbents: Effect of temperature, mercury concentration and acid gases[J]. Waste Management & Research, 1998, 16(6):582-593. ■