



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202202127 中图分类号 X511 文献标识码 A

张洋, 朱健勇, 张宇萌, 等. 微米级雾滴协同液相吸收柴油机尾气中的 VOCs[J]. 环境工程学报, 2023, 17(3): 860-868. [ZHANG Yang, ZHU Jianyong, ZHANG Yumeng, et al. Absorption of VOCs from diesel exhaust in liquid phase in synergy with micron droplet[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(3): 860-868.]

## 微米级雾滴协同液相吸收柴油机尾气中的 VOCs

张洋<sup>1</sup>, 朱健勇<sup>1</sup>, 张宇萌<sup>1</sup>, 魏怡<sup>1</sup>, 王文正<sup>2</sup>, 王博<sup>1,✉</sup>

1. 兰州大学资源环境学院, 甘肃省细颗粒物污染控制技术与装备工程研究中心, 兰州 730000; 2. 甘肃省化工研究院有限责任公司, 兰州 730000

**摘要** 针对柴油机尾气中多组分混合的挥发性有机污染物 (VOCs) 开展净化去除研究, 整体基于电声换能超声雾化-超重力收集器联用技术, 提出微米级雾滴协同液相吸收脱除柴油机尾气 VOCs 的应用方案。在对柴油机尾气 VOCs 排放特征定性分析与定量分析的基础上, 选用不同种类的吸收剂、吸收浓度与分配比助剂, 得到吸收剂的最佳使用条件。进而优化运行参数, 获得最优工况条件。结果表明: 在 15% 柠檬酸钠作为主吸收剂, 0.22% 柠檬酸与 1% 氯化钠作为助剂组成的最佳吸收剂与设定雾滴粒径为 5  $\mu\text{m}$ 、雾化量为 71  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , 以及雾化后尾气停留 1 s 的最优运行条件下, 本系统对柴油机尾气 VOCs 的综合吸收效率达到了 58.5%。本研究可为移动源尾气 VOCs 的减排净化提供参考。

**关键词** 柴油机尾气; 挥发性有机污染物; 微米级雾滴吸收技术; 超重力场

挥发性有机污染物 (volatile organic compounds, VOCs) 是形成细颗粒物 ( $\text{PM}_{2.5}$ ) 及臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 的关键前体物与参与物<sup>[1]</sup>, 为主要大气污染物, 其成分复杂、量大面广, 对人群健康亦存在危害<sup>[2-3]</sup>。移动源排放对城市 VOCs 贡献约为 20%<sup>[4]</sup>。其中, 柴油车行驶强度大、里程多, 为移动源排放的主要来源。当前柴油机尾气 VOCs 处理的 DOC、NTP 与低温等离子体协同催化等<sup>[5-8]</sup> 技术存在运行成本较高、效率不稳定<sup>[9]</sup> 及二次污染等问题。研发一种安全绿色无二次污染的协同处理装置对于柴油机尾气多组分 VOCs 减排十分必要。而蒸汽相变团聚预处理技术相对简单、易实现, 已长期应用于细颗粒物的团聚。其中, 电声换能超声雾化技术可将液体破碎生成微米级雾滴<sup>[10]</sup>, 后迅速气化并形成过饱和蒸汽环境。相较于传统喷头形式, 该技术产生雾滴的比表面积更大、能耗更低<sup>[11]</sup>, 更具实用性。而由双膜理论<sup>[12]</sup> 与吸收法<sup>[13]</sup> 基本原理可知, 液相雾滴接触气相 VOCs 时, VOCs 分子可通过扩散作用穿过气膜在相界面与含有吸收剂的雾滴发生相似相溶作用, 从而进入液膜被雾滴吸收。

超重力收集器是一种具有三级超重力场并联同轴设置的新型污染物分离技术<sup>[14]</sup>, 可与雾化系统结合形成雾化超重力技术。目前, 雾化超重力技术已成功应用于工业除尘与气态污染物治理领域, 其对某电厂转运站不同入口浓度烟尘去除效率均高于 99.5%, 对拟薄水铝石和高岭土等细颗粒物的去除效率均在 98.7% 以上。相较于传统 Lapple 型旋风除尘器提升较大<sup>[15-16]</sup>。针对气态污染物的

收稿日期: 2022-02-24; 录用日期: 2023-02-17

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目 (20YF3FA002, 20YF8FA112)

第一作者: 张洋 (1996—), 男, 博士研究生, [zhangyang2021@lzu.edu.cn](mailto:zhangyang2021@lzu.edu.cn); ✉通信作者: 王博 (1978—), 男, 博士, 教授, [wangbo@lzu.edu.cn](mailto:wangbo@lzu.edu.cn)

去除，超重力技术应用微米级雾滴结合化学试剂，对汽车尾气中的 NO 与 SO<sub>2</sub> 去除效率可达 100%<sup>[16]</sup>。超重力技术主要包括多级联用与结构改进两类。在多级联用方面，根据不同的应用场景，分为串联与并联 2 种方式，通过改善流场对称性提高效率<sup>[17-19]</sup>。在结构改进方面，利用多进气道改善气流对称性的多入口超重力技术与增加涡核破碎翼、涡流探测器等部件降低运行压降的内构件超重力技术应用<sup>[20-22]</sup> 较为广泛。

本研究以国 III 标准柴油机为对象，收集其在怠速运行下排放的尾气 VOCs，基于雾化超重力技术结合液相吸收法，研究其在不同运行条件与吸收液配比下的最佳吸收效率，以期为深入实施移动源尾气 VOCs 减排净化与国 VI 标准下的达标排放提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置

实验装置主要包括 4 个部分 (图 1)：柴油机尾气 VOCs 产生装置、雾滴发生装置、超重力收集器 (图 2)、动力装置及连接管道。

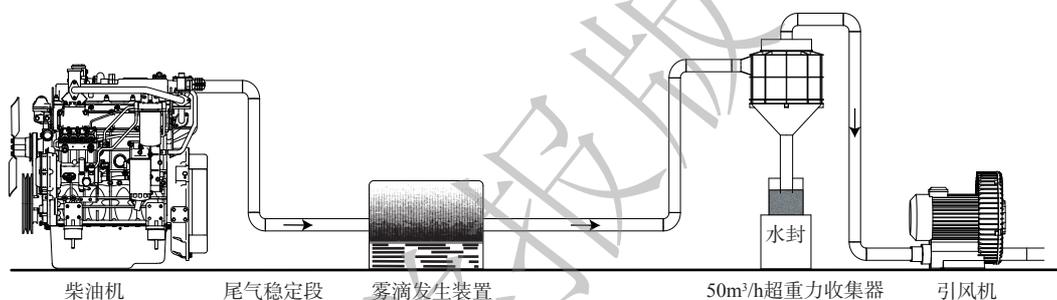


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

采用山东华源莱动 4L18E 型国 III 标准柴油机在怠速工况下产生的 VOCs 尾气为柴油机尾气 VOCs，并在柴油机排气管后接一定长度管段，以稳定柴油机尾气排出状态。雾滴发生装置包括雾化箱及微米级雾滴发生器，是产生微米级粒径超细雾滴，并形成湿度过饱和环境的主要区域。超重力收集器 (图 2) 主要通过三级超重力作用，将经吸收去除后的洁净尾气由其顶部出口排出，废液由其底部收集，其尺寸见表 1。动力装置包括高压漩渦离心式风机及与之配套的变频器。其中，风机可通过负压抽吸作用为整个系统提供稳定的动力，变频器通过改变风机的转速，以达到控制整个系统流速的效果。实验系统使用内径为 50 mm 的 PVC 管道连接。

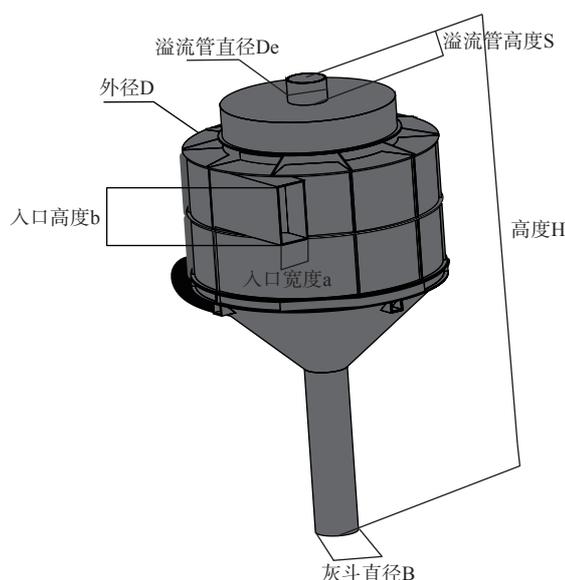


图 2 超重力收集器示意图

Fig. 2 Supergravity collector Diagram

### 1.2 实验方法

实验主要包括三部分：柴油机尾气 VOCs 排放特性研究、吸收剂对比分析和吸收参数优化实验。

柴油机尾气 VOCs 排放特性研究在风机风速为 45~55 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> 时进行。先使柴油机系统连续运行 10 min, 待排出尾气稳定后在采样时间 4 min, 流量 500 mL·min<sup>-1</sup> 的条件下使用 ZC500 型气体采样泵进行采样; 然后使用 GCMS-QP2020 型气相色谱质谱联用仪分析得到尾气中 VOCs 主要组分; 最后使用外标法进行定量分析, 从而柴油机尾气 VOCs 的主要组分浓度。

吸收剂对比分析研究通过使用风机提供动力、用变频器调节流速, 在尾气 VOCs 全部进入微米级雾滴发生装置后, 对不同种类吸收剂做 VOCs 平行吸收实验, 筛选得到主要吸收剂。进而通过改变吸收浓度, 即加入不同浓度柠檬酸和氯化钠, 以筛选最佳吸收条件。

吸收参数优化实验在确定尾气 VOCs 主要组分定量信息及最佳吸收条件后, 通过改变雾滴粒径、雾化量及停留时间来优化实验参数, 从而获得最佳运行条件。

实验中尾气 VOCs 的浓度使用 JC-ADZ-3 (T) 型 VOCs 检测仪测定, 每个数据做 3 组平行实验。通过计算 VOCs 吸收效率对比最优条件, 得到具体计算公式为式 (1)。

$$\eta = \left(1 - \frac{C_2}{C_1}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为吸收效率, %;  $c_1$  为入口 VOCs 的体积分数, %;  $c_2$  为出口 VOCs 的体积分数, %。

吸收装置对吸收废液的捕集效果采取称重法对水量变化进行了对比测定, 吸收废液的收集效率计算公式为式 (2)。

$$\eta_w = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\eta_w$  为吸收废液收集效率;  $m_1$  为雾滴发生装置水量的减少值, L;  $m_2$  为超重力收集器水量的增加值, L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 柴油机尾气 VOCs 排放特性

VOCs 排放特性的定性分析结果表明, 柴油机尾气中 VOCs 成分主要为烷烃、芳香烃及烯烃, 其中烷烃、芳香烃及烯烃的主要成分分别为癸烷 (3.75%)、甲苯 (8.27%) 与乙烯 (4.82%)。定量分析柴油机尾气中 VOCs 主要成分, 结果表面癸烷的质量浓度为 0.88 mg·L<sup>-1</sup>, 甲苯的质量浓度为 1.15 mg·L<sup>-1</sup>, 乙烯的质量浓度为 2.21 mg·L<sup>-1</sup>。

对定性分析结果与主要成分定量分析结果进行综合分析, 结果表明, 柴油机尾气 VOCs 排放特性表现为成分复杂, 且各成分含量较低, 其中占比相对较多的组分分别为癸烷、甲苯及己烯。因此, 后续实验将以柴油机尾气 VOCs 的吸收效率为指标, 确定最佳吸收剂组成及吸收参数, 进而对尾气 VOCs 主要成分吸收效果进行分析。

### 2.2 吸收剂对比分析

基于文献调研及雾化效果分析结果, 选定常见的 6 种吸收剂: 聚乙二醇 (Polyethylene glycol, PEG)、十二烷基苯磺酸钠 (Sodium dodecyl benzene sulfonate, SDBS)、柠檬酸钠、二甲基亚砜 (Dimethyl sulfoxide, DMSO) 及二甲基甲酰胺 (Dimethyl formamide, DMF)。在雾滴粒径为 5 μm、雾

表 1 超重力收集器尺寸

Table 1 Size of Supergravity collector

尺寸参数	符号	尺寸/mm
超重力收集器外径	$D$	125
入口高度	$b$	50
入口宽度	$a$	25
溢流管直径	$De$	50
溢流管高度	$S$	25
超重力收集器高度	$H$	920
灰斗直径	$B$	40

化量为  $70 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、尾气停留时间为  $1.5 \text{ s}$  的实验条件下，进行柴油机尾气 VOCs 吸收效果对比分析。

### 2.2.1 吸收剂种类对吸收效率的影响

选定纯水作为空白对照组，将上述 6 种吸收剂统一配置成质量分数为 10% 的溶液，选定吸收效果最佳的吸收剂，结果如图 3 所示。相较于纯水，6 种不同吸收剂溶液均对柴油机尾气 VOCs 的吸收起到促进作用，其中柠檬酸钠溶液的吸收效率最高。这一方面是因为表面活性剂碳氢链越长，分子憎水性越大，进而导致临界胶束浓度降低，故柠檬酸钠的短链结构有助于促进传质过程；同时，由于离子型表面活性剂在水中可电离，使得离子型表面活性剂与污染物表面之间的静电相互作用强于非离子型表面活性剂，从而促进了脱油过程。因此，确定柠檬酸钠为最佳吸收剂。

### 2.2.2 吸收剂浓度对吸收效率的影响

柠檬酸钠溶于水后可电离产生带负电起表面活性作用的柠檬酸根离子。根据表面活性剂特性可知，吸收剂中表面活性离子浓度与吸收效率成正比，直到溶液中表面活性离子浓度达到临界胶束浓度，吸收效率达到最高。通过改变柠檬酸钠的质量分数，探究吸收剂的最佳吸收浓度，结果如图 4 所示。当柠檬酸钠质量分数为 0，即吸收剂为纯水溶液时，对柴油机尾气 VOCs 吸收效率仅为 5%。这是由于柴油机尾气 VOCs 中的非极性组分难溶于水，随着柠檬酸钠质量分数的不断增加，吸收剂对柴油机尾气 VOCs 的吸收效率明显提高。当柠檬酸钠质量分数为 15% 时，吸收剂吸收效率达到最高值。这是由于柠檬酸钠溶液达到临界胶束浓度时达到吸收饱和。因此，确定后续实验中柠檬酸钠吸收剂的最佳质量分数为 15%。

### 2.2.3 吸收剂助剂对吸收效率的影响

投加一定比例的有机酸和无机盐，有助于提高柠檬酸钠吸收剂对 VOCs 的吸收能力<sup>[23-24]</sup>。因此，选定柠檬酸与氯化钠作为吸收剂助剂，按一定比例加入柠檬酸钠吸收剂中，以研究不同比例吸收剂助剂对柴油机尾气 VOCs 吸收效率的强化作用。首先研究在加入质量分数为 15% 柠檬酸钠吸收剂的基础上，探究加入不同质量分数柠檬酸助剂和氯化钠对柴油机尾气 VOCs 去除效率的影响，结果如图 5 (a) 和 (b) 所示。在此基础上，确定柠檬酸质量分数为 0.22%，探究加入不同浓度氯化钠对 VOCs 吸收效率的复合影响，结果如图 5 (c) 所示。

随着柠檬酸的不断加入，柴油机尾气 VOCs 的吸收效率不断提高，并于柠檬酸质量分数为 0.22% 时，达到吸收效率最高值 56.4%。这一方面是由于柠檬酸可与柠檬酸钠组成缓冲体系，通过

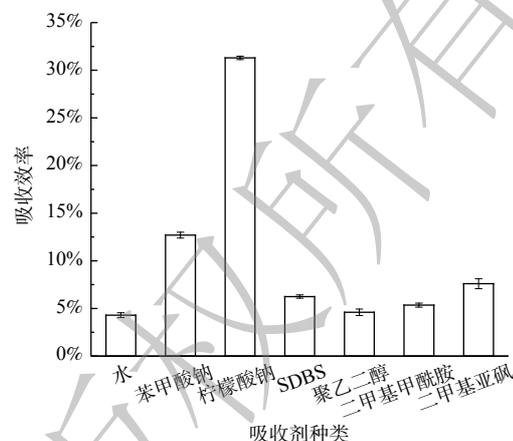


图 3 不同吸收剂吸收尾气 VOCs 的效果对比  
Fig. 3 Comparison of effects of different absorbents on exhaust gas VOCs

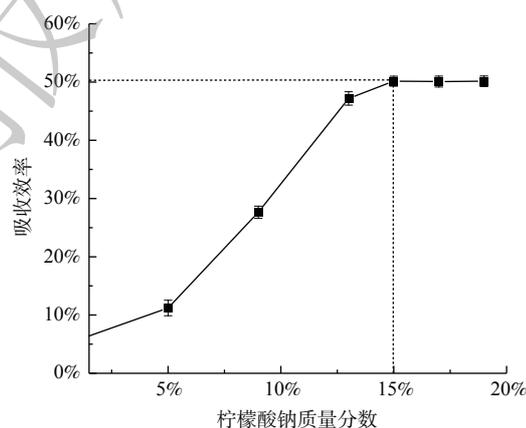


图 4 柠檬酸钠对 VOCs 吸收效率的影响  
Fig. 4 Effect of sodium citrate on VOCs absorption efficiency

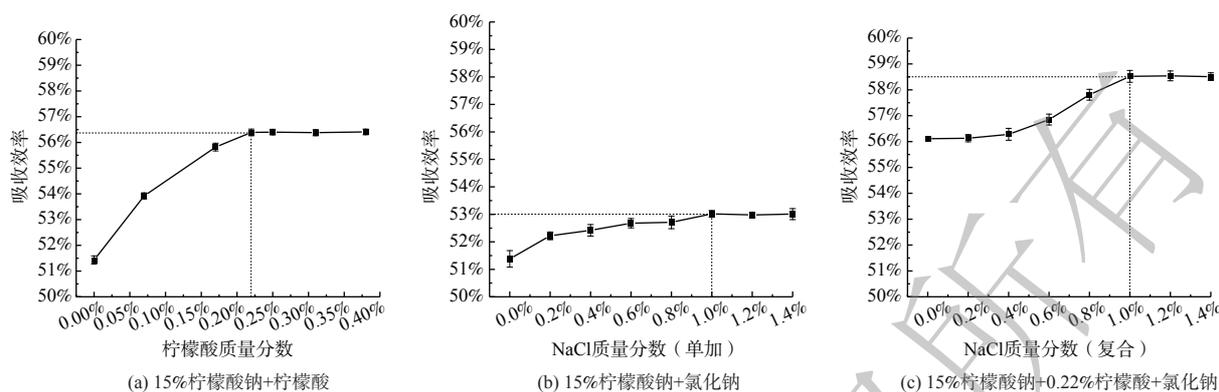


图5 不同浓度助剂对VOCs吸收效率的影响

Fig. 5 Effects of additives of different concentrations on VOCs absorption efficiency

抑制柠檬酸钠的水解反应,使具有表面活性的柠檬酸根离子数量不降低。同时,柠檬酸的加入可降低吸附层同性电荷间的排斥力,进而增强吸收剂对VOCs的吸收效率。而由图5(b)可知,在单独添加氯化钠时,随着氯化钠质量分数的提高,会导致柴油机尾气VOCs吸收效率的增大,当氯化钠质量分数为1%时,柴油机尾气VOCs吸收效率达到峰值,为53.0%。这是由于氯化钠在水中会电离产生钠离子,这部分阳离子可与柠檬酸根离子中和,以减少柠檬酸根离子头基之间的排斥作用。因此,在已投加15%柠檬酸钠、0.22%柠檬酸的基础上,加入不同质量分数的氯化钠,同样发现在氯化钠质量分数为1%时,吸收效率最高,为58.5%,但相较于单独添加氯化钠时吸收效率略有增加。这是由于添加氯化钠后强化了柠檬酸的电离程度,进而提高了吸收剂对VOCs的吸收水平,因此,确定氯化钠的最佳质量分数为1%。

### 2.3 吸收装置参数优化

#### 2.3.1 雾滴粒径对吸收效率的影响

在主吸收剂为15%柠檬酸钠、助剂为0.22%柠檬酸与1%氯化钠的吸收剂条件下,开展主要运行参数的优化研究。超声波雾化技术可产生4~10 μm的超细雾滴,在相同耗水量下,相较于传统工业喷头,尾气接触面积更大,有助于增强吸收效率。实验使用珠海欧美克公司的DP-02型喷雾粒度分析仪测定微米级雾滴粒径与相对应的比表面积,两者关系如图6所示。雾滴的比表面积与粒径呈反比关系,即雾滴粒径越小、雾滴与柴油机尾气VOCs的接触面积越大。

因此,在70 mL·min<sup>-1</sup>的雾化量与1.5 s的尾气停留时间条件下,在反应时间为5~73 μm条件下,研究雾滴粒径对尾气VOCs吸收效率的影响,结果如图7所示。随着雾滴粒径的不断增大,柴油机尾气VOCs的吸收效率迅速降低;当雾滴粒径为5 μm时,柴油机尾气VOCs吸收效率达到最高。这是由于随着雾滴粒径降低,雾滴比表面积不断增大,雾滴与柴油机尾气VOCs的接触面积也随之增加,进而提升了对VOCs的吸收效率。

#### 2.3.2 吸收剂雾化量对吸收效率的影响

微米级雾滴浓度越大,吸收剂与柴油机尾气VOCs分子接触概率会增大,进而增强吸收效

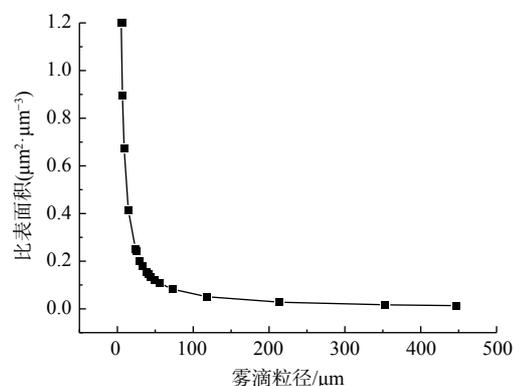


图6 雾滴比表面积随粒径变化图

Fig. 6 Change of specific surface area of fog droplets with particle size

果。因此,利用不同规格的超声波雾化器产生不同浓度雾滴,在 $5\ \mu\text{m}$ 的雾滴粒径与 $1.5\ \text{s}$ 尾气停留时间的条件下,在 $54\sim 75\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下,研究吸收剂雾化量对柴油机尾气VOCs吸收效率的影响,结果如图8所示。

吸收液雾化量与柴油机尾气VOCs吸收效率整体呈正比关系。当吸收液雾化量达到 $71\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,吸收效率达到最高;随着继续增大吸收剂雾化量,吸收效率呈小幅波动趋势。这是由于随着雾化量的增大,雾滴与柴油机尾气VOCs的接触概率增大,但当雾滴浓度增大至一定值时吸收达到饱和,整体柴油机尾气VOCs吸收效率达到峰值。

### 2.3.3 雾化后尾气停留时间对吸收效率的影响

在经过含有吸收剂雾滴与柴油机尾气VOCs接触后,增加反应时间有助于强化气液传质效果。通过改变雾滴发生装置与超重力收集器之间管段的长度,通过控制雾滴与柴油机尾气VOCs的反应时间,在 $5\ \mu\text{m}$ 雾滴粒径与 $71\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 雾化量条件下,探究反应时间为 $0.2\sim 1.4\ \text{s}$ 时,尾气停留时间对吸收效率的影响,结果如图9所示。雾化后尾气停留时间与柴油机尾气VOCs吸收效率呈正比关系。当尾气停留时间为 $1\ \text{s}$ 时,柴油机尾气VOCs吸收效率达到最高并保持恒定。这是由于停留时间的增加使得雾滴与柴油机尾气VOCs充分反应吸收,但雾滴与柴油机尾气VOCs的反应达到上限后,随着停留时间的增加,效率不再升高,故确定 $1\ \text{s}$ 为吸收装置的最佳尾气停留时间。

综上所述,当微米级雾滴发生装置产生雾滴粒径为 $5\ \mu\text{m}$ 、雾化量为 $71\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、雾化后尾气停留时间为 $1\ \text{s}$ 时,实验系统对柴油机尾气VOCs的吸收效果最佳,吸收效率为 $58.5\%$ 。

## 2.4 系统对VOCs主成分的吸收效果

基于上述条件,使用气相色谱质谱联用仪(GCMS)对处理后柴油机尾气VOCs样品的主成分浓度进行定量分析,并根据结果计算得到柴油机尾气VOCs中主要成分中癸烷、甲苯与乙

烯的吸收效率,分别为 $80.26\%$ 、 $42.59\%$ 与 $76.44\%$ 。这表明,在最佳吸收剂配比与实验参数条件下

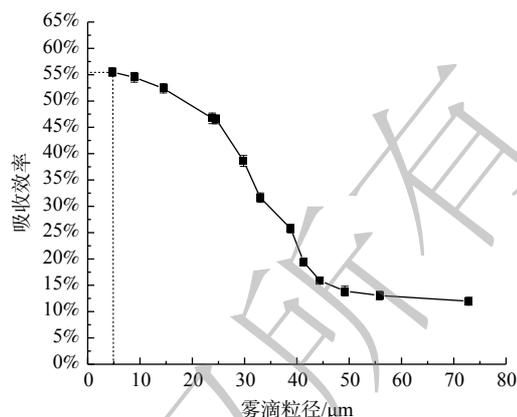


图7 不同雾滴粒径对VOCs吸收效率的影响

Fig. 7 Effect of different droplet size on VOCs absorption efficiency

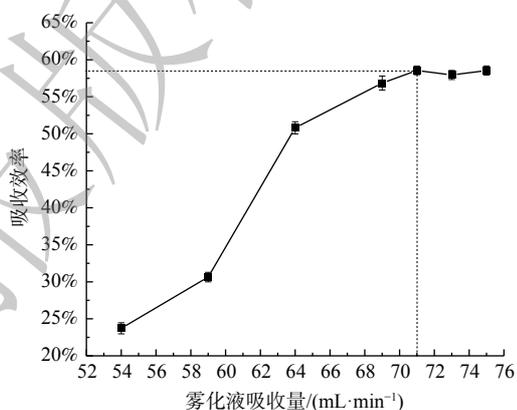


图8 不同吸收液雾化量对VOCs吸收效率的影响

Fig. 8 Effects of different absorption fluid atomization on VOCs absorption efficiency

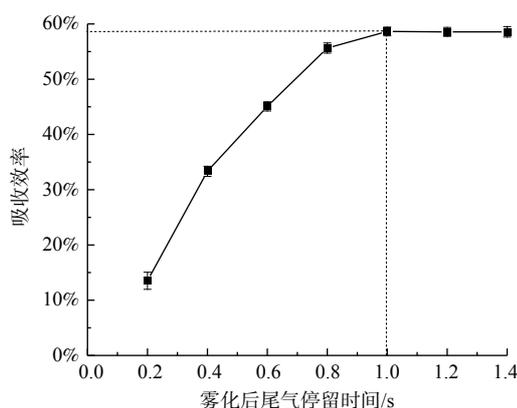


图9 尾气停留时间对VOCs吸收效率的影响

Fig. 9 Effects of residence time of tail gas on VOCs absorption efficiency

运行,本系统对柴油机尾气 VOCs 的 3 类主要成分均保持较好的去除效果。

### 2.5 吸收液的再生性

通过多组实验测定,超重力收集器对吸收废液的收集效率约为 95%,即能捕集吸收过程中产生的绝大多数废液,几乎不产生二次污染。同时,鉴于吸收液在构成上以水为主,采用直接蒸馏的方法开展吸收液的再生性能分析,结果如图 10 所示。吸收液具有良好的可再生性,在重复利用 4 次后仍对 VOCs 具有一定的净化效果,吸收效率为 32.2%。然而,随着再生次数的增加,吸收液对 VOCs 的吸收效率降低。这与 VOCs 成分复杂,蒸馏过程并不能解吸所有成分有关。

## 3 结论

1) 由于柠檬酸钠表面活性剂脱油速率快、分子量小,其短链结构可促进传质,吸收剂的最佳分配比为:15% 柠檬酸钠的主吸收剂搭配 0.22% 柠檬酸与 1% 氯化钠的吸收剂助剂。

氯化钠的加入可通过电中和作用增加柠檬酸钠表面活性,添加柠檬酸对于增加尾气中 VOCs 在吸收剂中的溶解度具有积极作用。

2) 当运行参数为雾滴粒径  $5\ \mu\text{m}$ 、雾化量  $71\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、雾化后尾气停留时间 1 s 时,系统对于柴油机尾气 VOCs 吸收效果最佳。这是由于雾滴粒径与雾滴比表面积成反比关系,减小雾滴粒径的同时增大雾化量可增加含有吸收液的雾滴与尾气中 VOCs 的接触面积,尾气停留时间的提高有助于增加吸收反应时间。

3) 在最佳运行条件下,本系统的综合去除效率为 58.5%。其中,对柴油机尾气 VOCs 主成分癸烷、甲苯和己烯的去除效率分别达到了 80.26%、42.59% 与 76.44%,这表明本系统对柴油机尾气 VOCs 具有较好的去除效果。在接入本系统后,柴油机排气背压相较于未接时上升 5.9%,对柴油机动力性能影响较小。超重力收集器的使用可较好的收集吸收废液,且吸收液具有良好的可再生性,几乎不产生二次污染问题。

4) 雾化超重力吸收系统对柴油机产生的多组分混合 VOCs 尾气去除效果较好,同时具备成本低、不产生二次污染、吸收液可再生等优点,为移动源多组分 VOCs 协同处理提供了新思路。针对移动源尾气处理系统应用小型化的需求,将进一步优化实验系统,开展系统集成化设计和装置引风系统与汽车动力系统结合的研究。

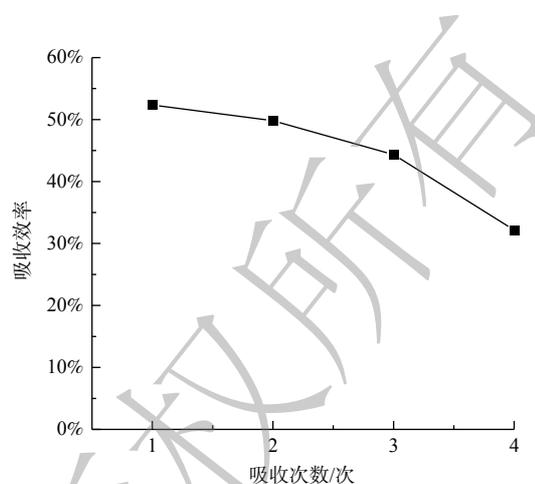


图 10 不同吸收次数对 VOCs 吸收效率的影响  
Fig. 10 Effects of different absorption times on VOCs absorption efficiency

## 参 考 文 献

- [1] WEI W, LI Y, WANG Y, et al. Characteristics of VOCs during haze and non-haze days in Beijing, China: Concentration, chemical degradation and regional transport impact[J]. *Atmospheric environment*, 2018, 194: 134-145.
- [2] 卢娟丽. VOCs废气来源、危害及处理技术研究[J]. *环境与发展*, 2018, 30(03): 97.
- [3] KAMAL M S, RAZZAK S A, HOSSAIN M M. Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs) – A review[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 140: 117-134.
- [4] ZHANG Z, MAN H, QI L, et al. Measurement and minutely-resolved source apportionment of ambient VOCs in a corridor city during 2019 China International Import Expo episode[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 798: 149375.
- [5] OSKOOEI A B, KOOHSORKHI J, MEHRPOOYA M. Simulation of plasma-assisted catalytic reduction of NO<sub>x</sub>, CO, and HC from diesel engine exhaust with COMSOL[J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, 197: 135-149.
- [6] REŞİTOĞLU İ A, ALTINIŞIK K, KESKIN A. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2015, 17(1): 15-27.
- [7] ROUNCE P, TSOLAKIS A, YORK A. Speciation of particulate matter and hydrocarbon emissions from biodiesel combustion and its reduction by aftertreatment[J]. *Fuel*, 2012, 96: 90-99.
- [8] ZHENG M, BANERJEE S. Diesel oxidation catalyst and particulate filter modeling in active-flow configurations[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(14/15): 3021-3035.
- [9] ZHU L, CHEUNG C, ZHANG W, et al. Effects of ethanol-biodiesel blends and diesel oxidation catalyst (DOC) on particulate and unregulated emissions[J]. *Fuel*, 2013, 113: 690-696.
- [10] 黄晖, 姚熹, 汪敏强, 等. 超声雾化系统的雾化性能测试[J]. *压电与声光*, 2004, 26(1): 62-64.
- [11] KIRPALANI D M, SUZUKI K. Ethanol enrichment from ethanol-water mixtures using high frequency ultrasonic atomization[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(5): 1012-1017.
- [12] WHITMAN W G. The two film theory of gas absorption[J]. *International journal of heat and mass transfer*, 1962, 5(5): 429-433.
- [13] 肖潇. 液体吸收法资源化处理工业甲苯废气的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015.
- [14] WANG B, LI S Q, DONG S J, et al. A new fine particle removal technology: Cloud-air-purifying[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(34): 11815-11825.
- [15] 李思庆. 基于云式除尘技术的分子筛生产车间扬尘处理工艺优化设计与应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [16] 王博, 潘仁湖, 夏博实, 等. 一种新式PM<sub>2.5</sub>收集方法——云式除尘方法[C]//中国环境科学学会. 2015年中国环境科学学会学术年会. 深圳, 2015: 1296-1302.
- [17] ZHAO B, SU Y, ZHANG J. Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2006, 84(12): 1158-1165.
- [18] ZHANG Y, JIN R, DONG S, et al. Heterogeneous condensation combined with inner vortex broken cyclone to achieve high collection efficiency of fine particles and low energy consumption[J]. *Powder Technology*, 2021, 382: 420-430.
- [19] FU S, ZHOU F, SUN G, et al. Performance evaluation of industrial large-scale cyclone separator with novel vortex finder[J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(3): 931-939.
- [20] CHEN J, JIANG Z, YANG B, et al. Effect of inlet area on the performance of a two-stage cyclone separator[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022, 44: 8-19.
- [21] YU G, DONG S, YANG L, et al. Experimental and numerical studies on a new double-stage tandem nesting cyclone[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 236: 116537.
- [22] LIU F, CHEN J, ZHANG A, et al. Performance and flow behavior of four identical parallel cyclones[J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 134: 147-157.
- [23] 赵国玺. 表面活性剂物理化学(修订版)[M]. 北京: 北京大学出版社, 1991.
- [24] 赵振国. 吸附作用应用原理[M]. 北京: 化学工业出版社化学与应用化学出版中心, 2005.

(责任编辑: 靳炜)

## Absorption of VOCs from diesel exhaust in liquid phase in synergy with micron droplet

ZHANG Yang<sup>1</sup>, ZHU Jianyong<sup>1</sup>, ZHANG Yumeng<sup>1</sup>, WEI Yi<sup>1</sup>, WANG Wenzheng<sup>2</sup>, WANG Bo<sup>1\*</sup>

1. Engineering Research Center of Fine Particle Pollution Control Technology and Equipment, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Research Institute of Chemical Industry Company Limited, Lanzhou 730000, China

**Abstract** This study was aimed at the purification of multi-component mixed Volatile Organic Compounds (VOCs) from diesel engine exhausts. Based on the electroacoustic transducer ultrasonic atomization-supergravity collector coupling technology, a micron-scale droplet synergistic liquid-phase absorption for the removal of diesel exhaust VOCs was proposed. Firstly, the qualitative and quantitative analysis of the emission characteristics of VOCs from diesel engine exhaust was performed. Moreover, different types of absorbents, absorption concentrations and distribution ratio additives were studied to obtain the optimal conditions for absorbents. In addition, the main operating parameters of the experiment were evaluated to obtain the optimal working conditions. The results showed that the absorption efficiency of this new technology for diesel exhaust VOCs reached 58.5% under the operating conditions of 15% sodium citrate as the main absorber, 0.22% citric acid and 1% sodium chloride as additives, the droplet particle size of 5  $\mu\text{m}$ , atomization volume of 71  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$  atomization volume and 1 s residence time after atomization, The results of the study can provide technical support for the reduction and purification of mobile source tailpipe VOCs.

**Keywords** diesel exhaust; volatile organic compounds; micron-scale droplet absorption technology; supergravity field