

基于变温变压径向固定床的吸附法有机废气治理新技术

1 背景及意义

青山绿水堪比金山银山。可挥发性有机物（VOCs）是细颗粒物（PM2.5）和臭氧（O₃）污染物前体物，近年我国 O₃ 污染问题显现，为深入打好污染防治攻坚战，强化 O₃ 和 PM2.5 协同控制，必须尽快解决当前 VOCs 治理中存在的问题。

自 2005 年以来，北京石油化工学院与北京华创朗润环境科技有限公司、成都科特瑞兴科技有限公司、北京三聚环保新材料股份有限公司共同研发的“基于变温变压径向固定床的吸附法有机废气治理新技术”，在国家自然科学基金青年基金项目（21207006）、北京市科技新星计划项目（2005B25）、北京市教委科技发展计划重点项目暨北京市自然科学基金重点项目（B 类）（KZ201410017019）、北京市属高等学校“长城学者”培养计划资助项目（CIT&TCD20150317、CIT&TCD20190314）、北京市科技重大专项课题（Z191100009119002）等项目的支持下，长期致力于有机废气净化技术的研发。开发了多级孔氧化铝/活性炭复合型吸附剂、实现了 MOFs 吸附剂成型和吨级放大技术，解决了吸附剂在 VOCs 治理应用中脱附效率、导热系数、机械强度和耐受水汽能力低下方面的关键技术难题；研发了变温变压径向固定床吸附工艺，具备压降低、分布均匀、安全性强等优点，提高了系统处理效率；开发了基于吸附剂级配装填和变温变压吸脱附成套技术，VOCs 回收率高达 99%，实现了资源的循环利用。成果在石油石化、化工制药、印刷、轻工等行业推广装置 49 台/套，取得了良好的经济和环境效益。

2 技术优势

本项目技术的主要创新点：

（1）高效吸附剂和吸附剂级配装填。针对传统活性炭导热系数低，易于烧蚀、易碎、疏水性较差等缺陷，利用氧化铝的高粘结性、导热性且有较大孔径，研制了活性炭-氧化铝复合吸附剂，并采用苯基三乙氧基硅烷（PTES）对吸附剂嫁接基团提高疏水性，吸附容量适中，导热系数高（传统活性炭的 40~80 倍）、耐水汽性优异且机械强度高（ $\geq 80\text{N/cm}$ ），综合性能优于现有活性炭。研制过程中还发现 MOFs 材料 MIL-101 吸附容量大且具有优异的脱附再生性。MIL-101 成型和放大尚未见报道，采用水热合成技术进行了吨级放大，并开发了 PVA 乙醇溶液等造粒助剂，采用造粒-压片技术实现了 MIL-101 成型。结合 MOFs 易再生、复合吸附剂相对廉价优势，提出吸附剂级配装填，通过吸脱附动力学和 Aspen Adsorption 精准确定装填方案，吸附剂效率大幅提升。

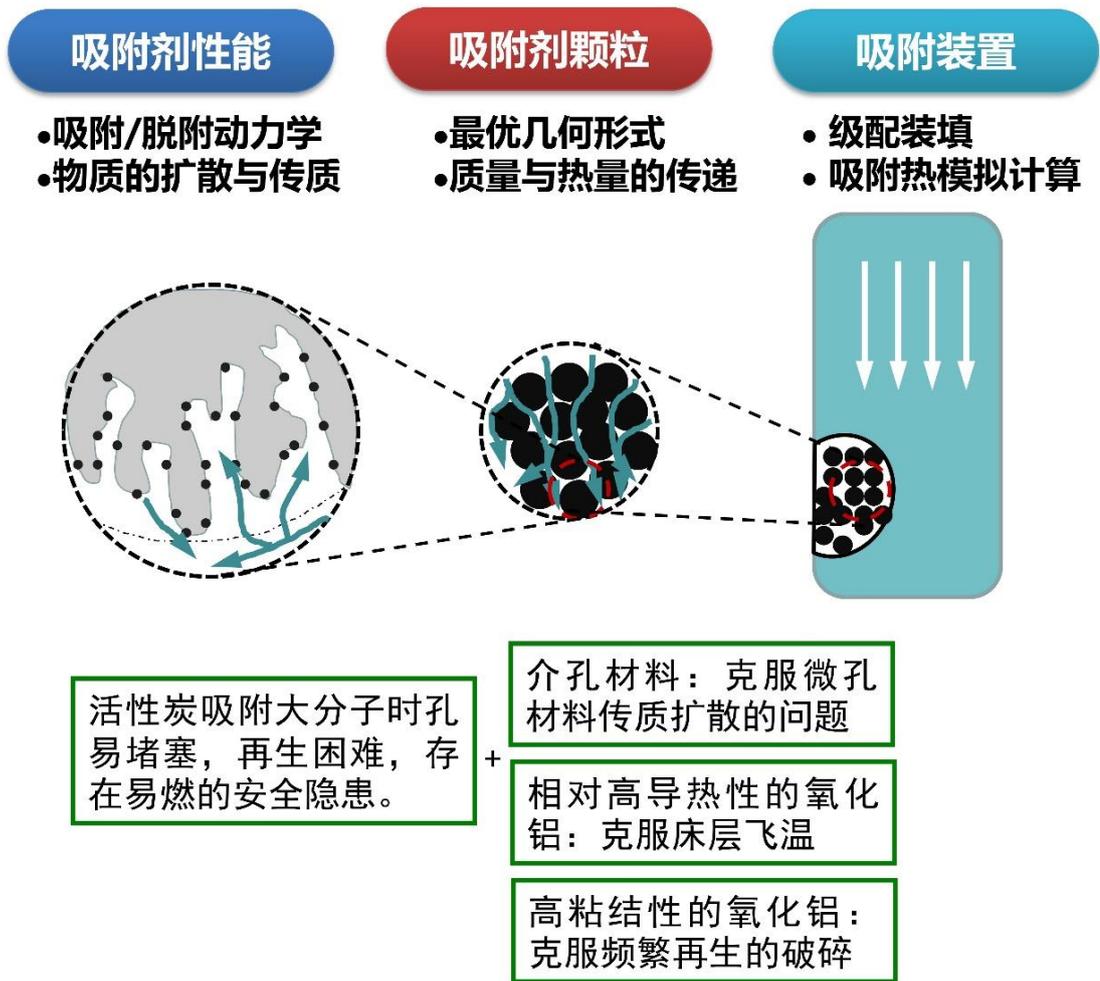


图 1 吸附剂研发和工程化应用思路图

(2) 采用径向吸附塔的恒低温吸附-变温变压脱附工艺。采用间壁传热理念，吸附过程采用冷冻水移热，在业内率先实现恒低温吸附，防止吸附热聚集且提高吸附容量，本质提高安全性。脱附过程采用同时变温变压操作工艺，大幅提高了脱附效率，同时再生热源与吸附剂不接触，原理上避免了二次污染。巧妙设计了循环冷热水罐，实现在同一吸附塔器内“恒低温吸附-变温变压脱附再生”。将径向固定床引入 VOCs 治理领域，并利用 Fluent 进行了内构件设计，采用非均匀开孔实现了气流的均匀分布，该吸附器具备压降低的特点，可适用于不同风量范围的尾气处置。

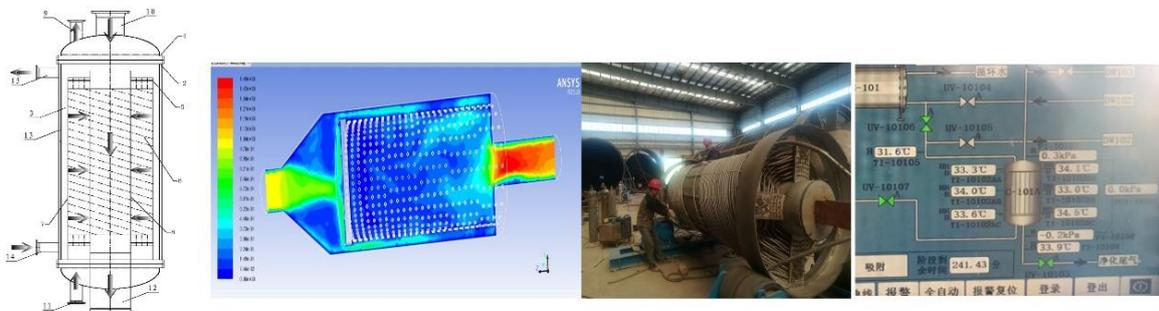


图 2 径向吸附塔

(3) 成套工艺包编制和自动化控制。编制了符合《石油化工装置工艺设计包(成套技术工艺包)SPMP-STD-EM2001》规定的工艺包，并基于动态模拟和开发的基于可编程控制器（PLC）和组

态软件的整套处理装置无人值守监控系统，实现了无人值守控制设计，VOCs 回收率高达 99%，实现了资源的循环利用。



图 3 智能控制系统（依次操作界面、实时数据上传界面、报警-联锁逻辑图）

3 推广应用

目前在石油石化、精细化工、制药、印刷、食品等行业合计推广装置 49 台/套（如表 6-1）。其中，经过有源统计分析，且可明确排放量的为 15 家企业的 19 台/套，合计年减排 7318 吨，回收的有机物经财务统计确认的价值 10,716 万元/年，近三年合计 27,408 万元。为用户创造了较大的经济效益，特别是为中国的 VOCs 减排做出了较大的贡献。

表 1 所有用户的应用统计表

序号	项目名称	台/套数	应用单位
1	制药尾气治理和回收	3	华北制药集团倍达公司
2	芳烃尾气治理和回收	1	中国石化集团巴陵石化公司
3	苯乙烯罐区罐装尾气	1	中国石油锦州石化公司
4	装置尾气治理、氢气净化及回收	3	迈奇化学股份有限公司
6	罐区尾气处理项目	2	广西新天德能源有限公司
7	甲酰胺尾气回收装置	1	重庆万利来化工有限公司
8	甲酰胺尾气回收装置	1	北京四合科技有限公司
9	甲酰胺尾气回收装置	1	河北冀峰新能源有限公司
10	氯乙烯尾气回收和氢气提纯装置	1	内蒙古亿利化学工业有限公司
11	环己醇脱氢尾气净化提纯装置	1	中国平煤神马集团有限公司
12	环己醇脱氢尾气净化提纯装置	1	河南首恒新材料有限公司
13	氯乙烯尾气回收和氢气提纯装置	1	新汶矿业山东盐化工有限公司
14	汽修钣喷车间 VOC 废气处理装置	2	北京祥龙博瑞汽车集团公司
15	油漆生产反应釜 VOC 废气净化装置	2	河北晨虹油漆有限公司
16	凹版印刷烘干废气 VOC 净化装置	1	扬州云瀚包装印刷有限公司
17	糠醛废气净化装置	2	河北无极化工有限公司
18	药业生产废气净化装置	1	同仁堂药业有限公司

19	彩钢板彩涂生产线废气净化装置	1	山东星翰彩钢有限公司
20	汽车零配件涂装废气净化装置	5	上海延盟汽车配件公司
21	家具行业喷漆废气净化装置	2	天津玫颂家具有限公司
22	电子元器件喷漆废气净化装置	1	天津诺思微电子有限公司
23	SMC 生产废气苯乙烯净化装置	2	山东润鹏新材料有限公司
24	吹膜废气净化装置	1	河北智优捷印刷有限公司
25	油炸食品废气净化装置	2	上海统一方便面工厂
26	铝型材镀膜废气净化装置	1	山东赛达铝业有限公司
27	平面印刷 VOC 净化装置	1	南昌印刷十二厂有限公司
28	工程机械喷漆废气净化装置	2	河北北奥特种车辆厂
29	溶剂油废气净化装置	1	石家庄正宏雨鞋厂
30	报纸刊物印刷废气净化装置	2	经济日报社印刷厂
合计		49	



4 联系方式

联系人：黄龙副教授

联系电话：15810381508

邮箱：huangl@bipt.edu.cn