

工业废气治理技术现状及优化路径研究

陈尚敏

苏州昂乐科技有限公司，中国·江苏 苏州 215134

摘要：城市及工业发展带来空气、水、噪声、光、土壤的污染，生活环境恶化，带来健康问题。基于此，环境治理是必要的也需技术革新，而目前各大院校尚无系统性针对性的学科来培养环保行业人才，本论文基于此现状并结合长期的工作实战经验，提出工业废气治理技术路线，从系统的工艺设计到设备的选型及参数计算。

总结现有技术的工作效率与能力，成本投入，并从中探索未来发展方向和新技术。

关键词：工业废气；VOCs；吸附；催化燃烧；RTO；洗涤塔

Research on the Current Situation and Optimization Path of Industrial Waste Gas Treatment Technologies

Chen Shangmin

Suzhou Angle Technology Co., Ltd. China Jiangsu Suzhou 215134

Abstract: Urbanization and industrial development leads to pollution of air, water, noise, light and soil, deteriorating living environment and causing health problems. Therefore, environmental is necessary and technological innovation is required. However, currently, no systematic and targeted disciplines exist in major universities to cultivate talents for the environmental protection industry. Based on this current situation and combined with long-term practical work experience, this proposes an industrial exhaust gas treatment technical route, covering from systematic process design to equipment selection and parameter calculation. Summarize the current technical work efficiency and capabilities, cost, and explore future development directions and new technologies from this.

Keywords: Industrial waste gas; VOCs; Adsorption; Catalytic combustion; RTO; Scrubber

0 引言

研究背景：我国是全球最大的工业国，据统计，我国制造业规模连续 15 年全球第一，占全球比重的 35% 以上（2024 年统计数据），为全球提供工业产品，是全球工业生产制造供应链的重要组成部分，工业门类齐全，基于我国有如此庞大规模及强大的生产制造能力，产生不少的工业废气废水（噪声，光，土壤的污染基本可以忽略不计），因此产生了环境污染。

研究现状：废气治理系统，涉及专业层面相对比较广泛如：机械行业，暖通技术，物理计算，化学分析，电气电控及自动化领域等等，属于技术集成，非一家公司所能全部完成的部分，就形成了所有的环保公司，绝大部分为集成商的原因，基于此，各个环保公司的造价也各不相同，也就是性价比不高，新建设项目投入相对较大。

工业废气废水系统实不能为企业带来经济收益，反而给业主带来沉重的经济负担，所以企业不愿意投入更多的资金用于此项投入，只是基于国家坚定不移的保护环境

政策和相关的法律法规，企业不得不建设，基于社会责任和子孙后代的幸福健康生活，绿色可持续发展理念，企业要求能有效的解决问题的同时投入最低的资金用于建设并能够降低使用成本。由于资金不足，导致环保技术的革新相对缓慢。本论文只针对工业废气治理领域进行讨论。

1 研究的目的和意义

1.目的只有一个：保护人类赖以生存的环境，空气，淡水，土壤。

2.研究废气治理的意义在于给人类一个不感觉重要角色理所当然的其实很重要的生存基础条件之一：洁净的空气。

2 工业废气治理现状分析

2.1 概述

暂抛开各种书籍阐述的理论治理方式，制造业行业领域不谈，只依照工业生产过程

产生的废气组分，浓度，湿度，温度，体量（即风量）来划分治理技术工艺路线。

依照工业废气组分来确定工艺

关于废气组分的排放限值限量请参阅相关国标和不同省份的地标，废气组分通常包括不限于（组分很复杂而且很多，此处不一一列举，读者可自行查阅相关国标和地标及在工作中遇到的特别的废气成分）颗粒粉尘（我们常说的PM2.5\PM10, 及生产加工过程中产生的颗粒粉尘，专业术语叫作：固态气溶胶），气态污染物（主要有五大类：以SO₂为主的含硫化合物、以NO和NO₂为主的含氮化合物、碳的氧化物、烃类化合物及含卤素化合物。）看似废气组分主要只有上述的两大类（生物污染与疾病属于医疗范畴，此处不讨论），其实很复杂，比如固态气溶胶，包含了粒径大小，质量轻重，温度，湿度，浓度等参数，气态污染物尤其复杂，特别是五大类中的烃类物质，烃类又分四大类：烷烃、烯烃、芳香烃、含氧烃。烷烃又称之为饱和烃，是指扣除CH₄（甲烷）的浓度或称非甲烷烃类的浓度。其他重要的烷烃有乙烷、丙烷和丁烷。烯烃是不饱和和烃，通式为C_nH_{2n}。因为分子中含有双键，故烯烃活泼，容易发生加成反应，其中最重要的是乙烯、丙烯和丁烯。乙烯对植物有害，并能通过光化学反应生成乙醛，刺激眼睛。烯烃是形成光化学烟雾的主要成分之一等等限于篇幅限制，不一一阐述，这些工业废气成分，如果不加以治理，将会严重影响人类的生产生活，是人类未知疾病或者高发疾病产生的源头之一，而这些废气组分不仅仅来源于工业废气，自然界也是重要的废气源头之一。包括不限于火山爆发，地震，动植物自然腐败填埋垃圾自我降解等条件。

基于废气组分的不同，在业界，以气态聚合物，和卤素废气组分最难治理。

2.2 物理治理法

物理治理法，主要针对颗粒粉尘及可以被吸附剂吸附的气态废气组分，主要方法有：

布袋除尘，滤筒除尘，干式过滤除尘，基本原理类似家用吸尘器，选用的时候需要参考废气的温度，湿度条件，风量大小综合考虑，增加相应的工艺配置，比如增加喷粉器，降温装置等

机械加工产生的油雾，包括不限于皂化液，切削液高速喷洒产生的雾状油雾废气，可以采用静电油雾净化器，机械油雾过滤器，也可以采用湿式比如文丘里湿式除尘器，喷淋洗涤塔，气旋塔，湿电等工艺设备，进行水洗，水洗之后，将漂浮在水上的油雾分离。油泥加以人工清理等，湿式洗涤治理要注意产生的废水，业主是否有条件进行水处理，以防止二次污染

气态污染物，有机废气，能被吸附剂比如活性炭吸附的部分，比如烃类物质，氮氧化物等物质，可以采用活性炭等吸附剂进行有效的吸附，此为物理治理法。

2.3 化学中和法

比如硫化物，包含不限于硫化氢（H₂S）、二氧化硫（SO₂）、三氧化硫（SO₃）、硫酸（H₂SO₄）、亚硫酸盐（SO₃²⁻）、硫酸盐（SO₄²⁻）和有机硫气溶胶等，及氮的氧化物，典型代表氨气，可以采用酸碱化学中和法治理，以立式喷淋洗涤塔为最佳工艺。

其中催化氧化法，很多环保同行称之为燃烧，或者叫无焰燃烧，其本质依然是化学反应法，即利用高温，配合催化剂加速氧化的化学反应过程，将废气裂解氧化的一个过程，同时延长吸附剂（活性炭，分子筛等）使用寿命。

2.4 燃烧法

本论文针对燃烧的讨论，行业有个不成文的话语：万物皆可烧，高温火焰燃烧，一了百了，燃烧产生的高温还可以回收利用，有人担心有氯气元素，高温燃烧会产生二噁英，这是荒谬的，二噁英产生有其苛刻的条件，4个因素：

- 1：必须有含苯环结构的化合物（二噁英母体）存在；
- 2：必须有氯源；
- 3：必须有合适的生成温度（350℃左右为最佳生成温度）；
- 4：必须有催化剂（如铜、铁等金属元素）存在。

破坏4个条件中的任何一个条件，二噁英就不能产生，目前的RTO就代表了燃烧的一个技术工艺，需要严格管控废气流动的过程和温度控制。TO直燃炉，都是属于火焰燃烧。

2.5 总结

工业废气治理，是一个非常复杂的过程，要详细分析：废气组分（业主通常自己也不知道，需要业主提供废气产生的源点的使用生产物质的MSDS），废气浓度（业主通常自己也不知道，需要业主提供废气产生的源点的使用生产物质的数量，以此分析其挥发物的数量），温度，湿度，理化特征（是否具有腐蚀性），风量风速，吸附剂用量及废气在废气治理设备中的停留时间这些主要因素，然后才能进行相对应的工艺选择与相关计算，甚至是多重技术工艺组合使用。在设计的过程中还要考虑可燃易爆废气的最低爆炸下限的浓度，做好安全措施的配置。

总的来说，废气治理涉及：1. 管道 2. 工艺设备选择，不同的工艺设备依照废气组分，浓度，风量，风速，温湿

度,是否易燃易爆理化特征等因素工艺设计与选择。3.参数计算,滤芯参数,吸附剂的特征及参数,针对性的进行数据计算,尺寸计算包括不限于滤筒除尘机布袋除尘机,干式过滤箱等过滤面积计算及尺寸设计,喷淋塔的直径和高度,文丘里除尘机的桶径高度等尺寸计算和设计,给排水、气旋塔的尺寸计算及给排水、活性炭吸附箱尺寸计算设计及活性炭选择,活性炭或吸附剂的填充量、催化炉的风量尺寸结构计算设计,分子筛转轮的选择定型,RTO的尺寸计算与设计,RTO内部蓄热体的选择及填充量的设计计算,燃烧器的参数确定型号选择等等。4.风机的选型。5.设计钢构,检测平台,步梯,烟囱计算设计。6.电控逻辑设计。7.工业废气爆炸浓度等安全管控设计等等。总之,工业废气的系统及工艺设备,虽然看起来技术入门门槛很低,真正能做好,是相当不容易的,并不是人人都可以完成并做的优秀(排除一些滥竽充数浑水摸鱼的厂家歪打正着的做法)。整套系统涉及初期的现场数据踏勘,收集详细真实的业主数据,依照业主的实际工况及相关的法律法规及指导文件,详细的工艺规划及参数计算,设计出一套既有效果,又经济的系统,还需要结合实战经验,基础理论和经验相结合才能做出优秀的工业废气治理系统及设备,业主才能降低操作使用维护保养成本和首次建设成本。

3 相关的环保政策

目前中国的废气治理后排放标准依然依照:GB 16297-1996 大气污染物综合排放标准执行,江苏地标以:DB32-4041-2021 大气污染物综合排放标准执行,其他各省份有的有自己的地标,有的没有,地标都高于国家标准。在不同省份设计安装废气治理系统,需要遵循当地的地区标准

工业废气排放标准,限于篇幅,请读者自行查阅,至于其他城市不断的出台相关政策或者指导文件,需要关注当地的相关规范及指导文件。

4 传统工艺技术优化

4.1 设计原则

高效有效,较低的投入,较低的使用维护成本,自动化运行程度高,便于操作,便于维护保养。

4.2 设计依据

(1)《中华人民共和国环境保护法》,2015年1月1日实施

(2)《中华人民共和国大气污染防治法》,2016年1月1日实施

(3)《中华人民共和国清洁生产促进法》,2012年7月1日起施行

(4)《大气污染物综合排放标准》(DB50/418-2016)

(5)《工业企业挥发性有机物排放控制标准》(DB12/524-2014)

(6)《恶臭污染物排放标准》爆B14554-93

设计依据的基础目标,由于大气污染治理设备,系统,涉及的行业有机械结构,通风管道,电气自动化,物理化学领域,涉及知识面相对宽泛广泛,所以,建设设计过程参考的标准和依据相当多,有很多业主并不了解相关的法律法规及行业规范,要求“能用,实现排放目标就行”实现最经济的建设,导致建设不规范的居多。所谓的优化,就是在这些基本规范,原则的基础上,实现低成本,较少的工艺组合就能达成有效的废气治理。

5 关键技术研究

5.1 前言

现有的技术工艺路线及各个环节的治理设备,上文有相对详细的概括说明,那么依照本人多年(2016年开始至今,将近10年)的相关从业经验,不同工况总结如下:

塑料注塑行业工艺:烟气收纳罩+风量调节阀+风管(依照规范增加检测口)+前置过滤(将烟气中的颗粒粉尘过滤去除:大部分采用干式过滤箱,也可以采用布袋或者滤筒除尘机)+活性炭吸附+风机+电控+排气筒排风(依照规范需要检测口,检测平台,检测步梯或者爬梯)。塑料造粒,又不同了,需要静电吸附后,再湿式治理,然后干式过滤,最后活性炭吸附,工艺组合特别重要

金属压铸行业工艺:有单机版和系统集中版本,单机版本效果不如室外独立集成系统,其工艺原理基本接近,所谓的单机版本,也是由室外独立集成系统演变而来,由于体积的缩小,单机版本的治理效率远远小于室外的独立集成系统效率和处理能力。

烟气收纳罩(独立定制)+风量调节阀+管道(原则上需要增加管道降温 and 清洗功能)+喷淋水洗(二级)+干式过滤+活性炭吸附+风机+电控+排气筒排风(依照规范需要检测口,检测平台,检测步梯或者爬梯)。

机加工油雾或者皂化液雾状废气治理工艺:烟气收纳罩(有的直接接入机床封闭的空间内,则不需要烟气收纳罩)+喷淋水洗(或者采用静电净化器,或者采用机械油雾分离器等)+风机+电控+排气筒排风(依照规范需要检测口,检测平台,检测步梯或者爬梯)。

涡喷发动机尾气治理工艺:排气间接入管道(管道接

入喷淋降温 and 反冲洗功能) + 风量调节阀 + 立式喷淋水洗塔 (二级) + 干式过滤 + 活性炭吸附 + 风机 + 电控 + 排气筒排风 (依照规范需要检测口, 检测平台, 检测步梯或者爬梯)。

电子及半导体工艺: 酸碱废气工艺: 管道 + 风量调节阀 + 喷淋塔 (二级) + 风机 + 电控 + 排气筒排风 (依照规范需要检测口, 检测平台, 检测步梯或者爬梯), 低浓度有机废气: 采用活性炭吸附工艺, 高浓度有机废气工艺: 活性炭吸附或者增加 CO 催化炉, 视工况也可以采用分子筛转轮 + RTO, 甲类库: 一般采用酸碱水洗 + 活性炭吸附。

热处理行业工艺: 水洗 + 干式过滤 + 活性炭吸附工艺或者采用水洗后 + 干式 + RTO + 水洗。

电镀行业工艺: 主要就是酸碱水洗。

其他单机废气, 各种都无法具体分类的独立的特殊的工况, 依照废气组分, 浓度, 温度, 湿度, 是否具有易燃易爆特征, 风量风速, 综合考虑匹配工艺及工艺组合。

总结: 各种工艺组合都要依照工况, 及建设的成本综合考虑, 工艺可以依照各个工艺设备治理效率, 顺序和组合可以重新组合, 目前, 本人涉及的简单工艺不算在内, 大部分的工艺设计, 基本成熟而且稳定, 排放达标。

5.2 关键技术研究

本论文主要涉及化学学科的研究, 重点在废气组分, 如何采用既能节约成本, 又能缩小设备, 又能有效的治理工业废气, 有些大风量的工业废气治理系统, 动辄几百万上千万的造价。期待相关的研究院能够开发新技术设备, 具备对各种废气组分具有针对性的有效治理。

关键在于: 比如滤筒, 布袋, 干式过滤滤芯, 活性炭 (以下统称吸附剂) 等等, 如何能做到多功能, 寿命耐用, 而且实现集成 (比如滤筒, 目前采用材质为聚酯覆膜材质, 基本只具有过滤固态颗粒物功能, 如果能同时治理气态有机废气, 将是很优秀的), 活性炭, 如何改进 (市面上的活性炭, 也有改性, 只是增加高锰酸钾或者氢氧化钠等简单的特性, 属于改性不成功) 等等, 是否有更好的材质, 技术替代? 由于大部分环保公司的资金并不充分, 用于研发的资金就是更少, 本人势单力薄, 试错成本很高, 所以希望更多的人参与进来, 研究和讨论。

6 案例应用和问题

限于篇幅, 本论文只介绍本人设计经手的一个案例及相关的问题: 涡喷发动机的尾气排放问题。起初业主有一套系统, 是蜂窝活性炭吸附系统, 周边居民投诉有异味,

邀请我司整改, 于是勘查了现场, 并详细询问业主相关参数, 但是业主要求: 不能投入太多资金, 只能在现有的基础上整改, 以下的问题全部凸显出来:

业主不愿意投入资金认真整改

在不愿意投入资金的前提下, 实现治理效果 (航空煤油异味不要再被周边的人投诉)

很多原始参数, 业主并不明确, 也不知道

需要自行设计工艺及设备参数设计

场地面积限制, 建设受到园区物业管理限制

……

第一步: 勘查现场, 现有的风机功率 11kW, 负压 1200pa, 经过管道阻力损失和设备的压力损失, 风量预估在 1 万左右, 开机实测, 风速 18m/s 左右, 实测管口直径 480mm, 由此折算实际风量 $Q = V \cdot S = 18 \times 3.14 \times 0.240 \times 0.240 \times 3600 = 11719.9872 \text{ m}^3/\text{h}$, (风量只能依照此风量, 其他不能修改, 基于资金投入的考虑, 这是一个问题) 温度没有条件测试, 询问客户: 告知常温 (这又是一个问题, 后续的问题出现埋下伏笔)。湿度, 经过分析, 涡喷发动机工作的时候, 会有燃烧不充分的颗粒粉尘和油雾, 长时间管道壁会有油雾油泥, 但是因为业主的排气筒较高, 空间较大, 所以, 实际管道油泥较少 (此处也是细节的经验累积), 此处确认, 湿度较高, 主要是航空煤油的油雾。

那么废气组分呢? 经过分析如下:

尾气组分

氮气 (N_2): 空气是涡喷发动机燃烧的主要进气来源, 而空气中含量最多的是氮气, 一般占尾气总体积的绝大部分。

二氧化碳 (CO_2): 燃料 (通常是航空煤油等碳氢化合物) 在燃烧室中与氧气充分燃烧, 其在尾气中占有一定比例, 具体含量和燃料的种类、燃烧效率等因素相关。

水蒸气 (H_2O): 在尾气排出后, 水蒸气遇冷就可能出现凝结等现象, 是形成尾迹云的重要物质基础。

氧气 (O_2): 尽管燃烧过程消耗了一部分氧气,

氮氧化物 (NO_x): 由于燃烧室内的高温高压环境, 空气中的氮气和氧气会发生一定程度的化学反应生成氮氧化物

一氧化碳 (CO): 在燃烧不够充分的情况下, 会有少量一氧化碳产生并随尾气排出,

碳氢化合物 (HC): 同样是在燃烧不够理想时, 未完全燃烧的燃料以碳氢化合物的形式残留在尾气中排出,

不过其含量通常相对较低，

气味特征

异常气味：当尾气出现刺鼻气味时，往往预示着发动机存在问题。例如，有明显的臭鸡蛋味，可能是尾气中含有硫化氢，这意味着发动机燃烧过程出现异常，有可能是三元催化器故障等原因，导致含硫化合物不能有效转化；若闻到焦糊味，有可能是车辆的排气系统部件出现过热、烧损等情况，比如排气管上附着了易燃杂物被引燃，如果有浓浓的煤油气味，说明航空煤油不充分，雾化残留在空气中。

温度特征：尾气从排气管排出时温度较高，刚启动后或者高负荷运转时温度会更高些，通常能达到几百摄氏度。不过随着尾气在排气管中流动以及向外界散热，排出管口时温度有所降低，但仍然明显高于周围环境温度。其具体温度受发动机工况、排量、散热情况等诸多因素影响。

污染物成分：还含有一氧化碳（在燃烧不充分时产生，是一种有毒气体）、碳氢化合物（未完全燃烧的燃油成分）、氮氧化物（在发动机高温高压燃烧环境下，空气中的氮气和氧气发生反应生成，是形成酸雨、光化学烟雾等环境问题的因素之一）等有害污染物成分，

关于浓度：业主告知，大约 7 升 / 分钟燃油，有多少燃烧不充分的未知。

由于高温，实测 98 度进气温度，前置喷淋塔洗涤（PP 外壳体，内置不锈钢填料和不锈钢丝网除雾层），废气表现酸性，加氢氧化钠碱洗，加中性植物除臭剂，排气筒由原来的楼顶侧倒放置更改为立式高空排放，效果达标，但是系统处理风量不够，发动机排气 3kg/s，算上高温气体膨胀，空气密度膨胀接近 3.1 倍，后期第二套系统，工艺如下：管道 + 风量调节阀门 + 不锈钢立式喷淋洗涤塔（二级）+ 干式过滤箱 + 蜂窝活性炭吸附 + 风机 + 电控 + 排气筒（含检测平台，检测口，检测步梯），配喷淋塔废水

净化系统，效果优秀。

7 结论和展望

7.1 结论

没有治理不好工业废气系统，只要投入的资金足够，传统工艺组合，一切都可以采用洗涤和燃烧方式解决，只是基于成本投入，此结论可能有些武断，但是结合工作经验判断，基本可以，工业废气治理一定要结合体量（测算计算风量大小，废气组分和浓度要分析计算（制定工艺的基础），）温度湿度的考虑，工业废气治理系统，两个方面最重要，如何收集捕捉，尽可能的减少废气逃逸，如果过滤净化，抓住这两个问题，即可有效治理，只看工况是否合适及性价比是否可行。

7.2 展望

中国工业的蓬勃发展，发展到占据全球重要的份额，从早前的空气雾霾，沙尘暴，到现在的蓝天白云，青草地，清澈的河水，于是自己也有些自豪，作为将近十年环保行业的工作，也算是对社会有点儿贡献！未来的技术也一定会革新进步！而未来的趋势，基本是如何变废为宝，循环可持续可再生发展，比如，活性炭吸附饱和后，喷淋塔内的废水及产生的油泥危废，如何有效再利用，充分深挖其利用价值，实现再利用，而且不会产生二次污染，这应该是未来发展的趋势和方向。

参考文献：

- [1] 王纯，张殿印. 废气处理工程技术手册[M]. 北京：化学工业出版社. 2012.11
- [2] 徐鑫. 暖通空调设计与施工数据图表手册（第二版）[M]. 北京：化学工业出版社. 2024.8
- [3] 彭丽娟. 除尘技术[M] 北京：化学工业出版社. 2014.6

作者简介：陈尚敏(1980.12-), 男, 汉族, 江苏苏州人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工业废气治理。