

《高阶工程认知实践》2023 版
基本模块六：工业环保与污废碳监测

实
验
指
导
书

（重复利用、请勿带走）

授课教师：王向前 博士/助理研究员

电子邮箱：xqwang1124@zju.edu.cn

编制日期：2023 年 2 月

一、教学目标

1.1 教学背景

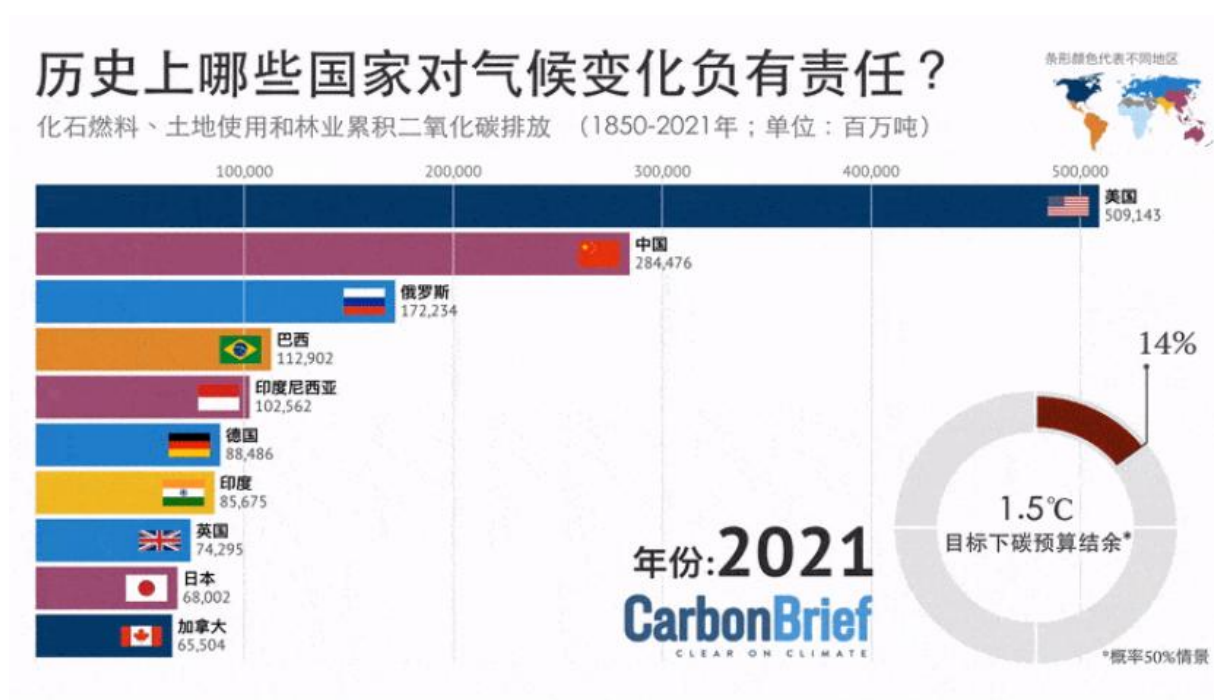
近期发布的一系列工业领域**减污降碳**的政策文件，对各工业行业提出了新要求。生态环境部等七部门《减污降碳协同增效实施方案》提出，要实施绿色制造工程，加快全流程的绿色发展。《工业能效提升行动计划》提出，推进重点行业节能提效改造升级，推进跨产业跨领域耦合提效协同升级。《工业领域碳达峰实施方案》从产业结构、制造体系、技术装备、数字化转型等层面，为工业领域的低碳发展提供指导。

碳中和应从碳排放（碳源）和碳固定（碳汇）这两个侧面来理解。碳排放既可以由人为过程产生，又可以由自然过程产生。人为过程主要来自两大块，一是化石燃料的燃烧形成二氧化碳（ CO_2 ）向大气圈释放，二是土地利用变化（最典型者是森林砍伐后土壤中的碳被氧化成二氧化碳释放到大气中）；自然界也有多种过程可向大气中释放二氧化碳，比如火山喷发、煤炭的地下自燃等。

过去几十年中，人为排放的二氧化碳，大致有 54% 被自然过程所吸收固定，剩下的 46% 则留存于大气中。在自然吸收的 54% 中，23% 由海洋完成，31% 由陆地生态系统完成。比如最近几年，全球每年的碳排放量大约为 400 亿吨二氧化碳，其中的 86% 来自化石燃料燃烧，14% 由土地利用变化造成。这 400 亿吨二氧化碳中的 184 亿吨（46%）加入到大气中，导致大气二氧化碳浓度增加。

因为自工业革命开始以来，二氧化碳（ CO_2 ）的累积排放量与已发生的 1.2°C 全球变暖紧密相关。从 1850 年起，人类总共向大气中排放了约 2.5 万亿吨二氧化碳（ GtCO_2 ）。如果要将变暖控制在 1.5°C 以下，剩下的碳预算不到 5000 亿吨

二氧化碳。这意味着，到 2021 年底，全世界在以 50% 概率实现 1.5℃ 目标的情景下，已集体消耗掉 86% 的碳预算。在三分之二概率的情景下，这一数值为 89%。



政府间气候变化专门委员会（IPCC）于今夏发布的最新评估报告结论称，人为造成的变暖正在导致世界各地极端天气事件的频率和强度增加，这是一个“既定事实”。

我国当前二氧化碳年排放量大数在 100 亿吨左右，约为全球总排放量的四分之一。发电和供热约占 45 亿吨，建筑物建成后的运行（主要是用煤和用气）约占 5 亿吨，交通排放约占 10 亿吨，工业排放约占 39 亿吨。工业排放的四大领域是建材、钢铁、化工和有色，而建材排放的大头是水泥生产（水泥以石灰石（ CaCO_3 ）为原料，煅烧成氧化钙（ CaO ）后，势必形成二氧化碳排放）。

同时，生态环境部等七部门日前发布关于印发《减污降碳协同增效实施方案》的通知。方案提出，到 2025 年，减污降碳协同推进的工作格局基本形成；重点区域、重点领域结构优化调整和绿色低碳发展取得明显成效；形成一批可复制、可推广的典型经验；减污降碳协同度有效提升。到 2030 年，减污降碳协

同能力显著提升，助力实现碳达峰目标；大气污染防治重点区域碳达峰与空气质量改善协同推进取得显著成效；水、土壤、固体废物等污染防治领域协同治理水平显著提高。

- 推进大气污染防治协同控制：优化治理技术路线，加大氮氧化物、挥发性有机物（VOCs）以及温室气体协同减排力度；
- 推进水环境治理协同控制：大力推进污水资源化利用；
- 推进固体废物污染防治协同控制：强化资源回收和综合利用，加强“无废城市”建设。

1.2 实践目标

（1）通过工业废气净化模拟装置、工业废水处理模拟装置、工业吸附/催化材料性能评估平台等理论介绍与多污染物净化试验，结合工程设计和工艺试验探究，提高学生关于工业环保系统的认识，理解工业系统“减污降碳”思路。

（2）结合工业废气、工业吸附/催化材料表征与性能评估、多污染物净化实验，利用 AFM、气相色谱仪、便携式总烃分析仪等进行工业设计与污染物定量，培养学生操作实验仪器、多污染物定量及试验装置调试与运行技能。

（3）依托“工程系统数据感知与污能碳管理云平台”创新应用场景的实践教学，培养学生关于工业过程的系统认知、在线仪表数据采集与处理、能源管理/碳排放总量核算体系等应用开发实践。

二、教学内容

本模块主要依托高效清洁低碳能源平台的工业环保实训系统，主要面向能源/环境/化工等专业领域，自主设计开发的 1.工业废气净化模拟装置、2.工业废水处理模拟装置、3.工业吸附/催化材料净化实验测试台、4.工业吸附/催化材料净化实验测试台、5.工程系统数据感知与污能碳管理云平台，共 5 个实践环节。本模块涵盖了工程系统探究与设计、多污染物定量与材料、数据采集与处理等方面。结合福立 9790 气相色谱分析仪、赛默飞 TVA2020 便携式总烃分析仪、分光光度计等科学手段，开展工艺参数设计、多污染物定量、材料表征、数据处理等试验研究，培养学生认知工业环保系统运行原理与工程设计技能，提高学生操作先进实验仪器与分析测试能力，促使学生开发并创新“工业系统过程管控-能源管理-碳排放”数据应用场景。



图 2.1 模块分组教学实践体系

熟悉工业环保模拟装置（废气、废水、工业吸附/催化）的运行原理、工程设计、调试运行试验，掌握实验分析仪器的操作使用，开展工业环保系统过程管控、能源消耗、碳排放核算，形成了“环保系统认知与工程设计→先进仪器应用与污染物量化表征→污能碳数据监测管理”的实践教学体系。

三、认知与实践环节（模块 1）

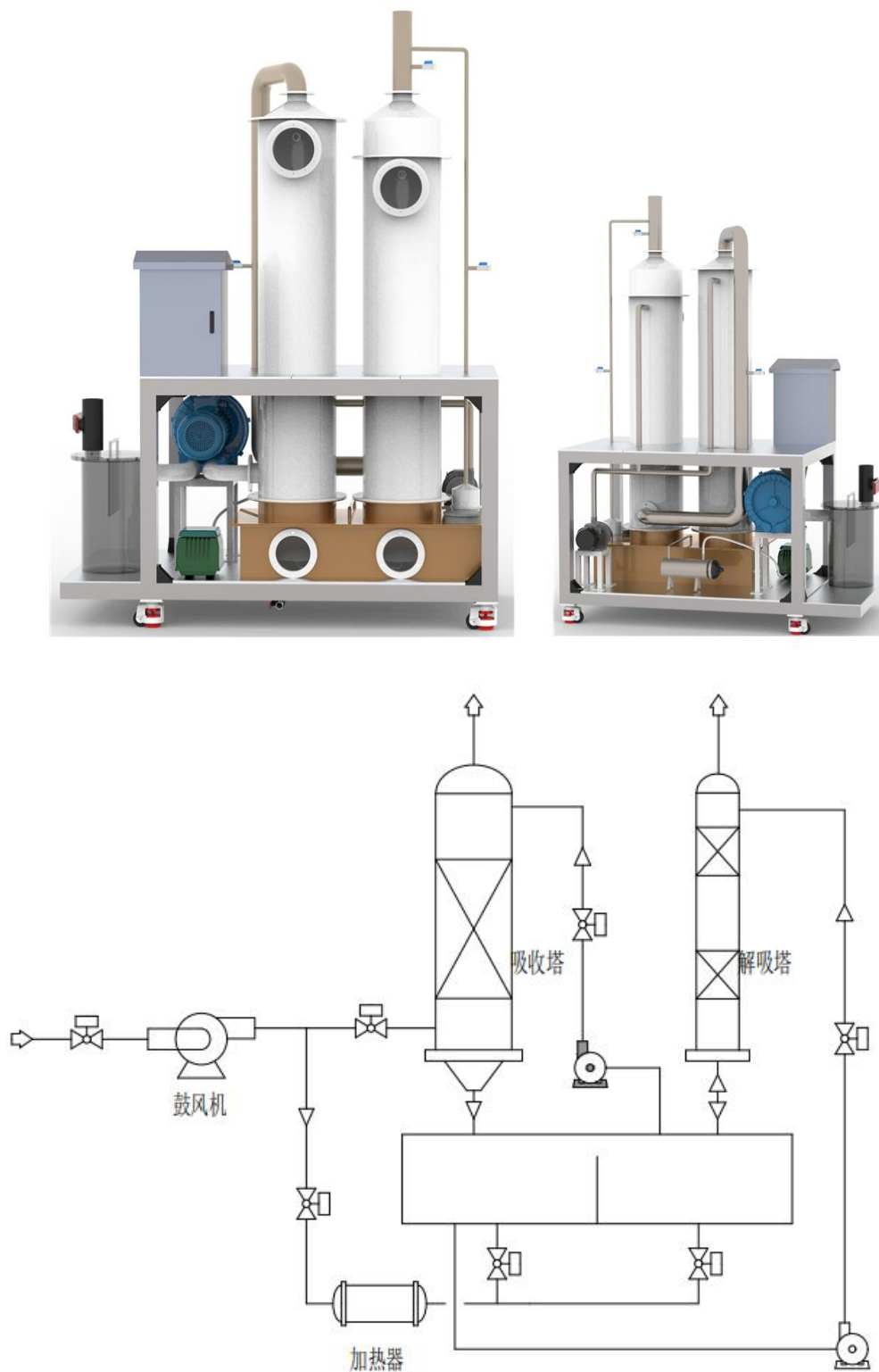


图 3.1 工业废气净化实验模拟装置及工艺流程

3.1.1 认知实践目标

认识了解工业废气净化模拟试验装置的工艺流程和技术原理，通过搜索并查阅参考文献，学生自主设计实验步骤，开展相关工程设计与装置调试运行实践，掌握 TVA2020 便携式总烃分析仪的操作使用方法，探究不同浓度下（ppm）亲水性 VOC/疏水性 VOC 在一定工况下的吸收净化效率（%），提高学生对工业废气净化相关技术的认知和理解。

3.1.2 技术原理

（1）工业废气排放源及污染物种类

工业废气主要来源于工业生产过程中产生的废气，在我国主要工业废气，包括燃料燃烧废气和生产工艺废气。

①煤炭工业：煤炭加工主要有洗煤、炼焦及煤的转化等，在这些加工中均不同程度地向大气排放各种有害物质主要有颗粒物、二氧化硫、一氧化碳、氮氧化物及挥发性有机物及无机物。

②钢铁工业：钢铁工业主要由采矿、选矿、烧结、炼铁、炼钢、轧钢、焦化以及其他辅助工序（例如废料的处理和运输等）所组成。各生产工序都不同程度地排放污染物。排入大气的污染物主要有粉尘、烟尘、SO₂、CO、NO_x、氟化物和氯化物等。

③有色金属工业：重有色金属在火法冶炼中产生的有害物以重金属烟尘和 SO₂ 为主，也伴有汞、镉、铅、砷等极毒物质。生产轻金属铝时，污染物以氟化物和沥青烟为主；生产镁和钛、锆、铪时，排放的污染物以氯气和金属氯化物

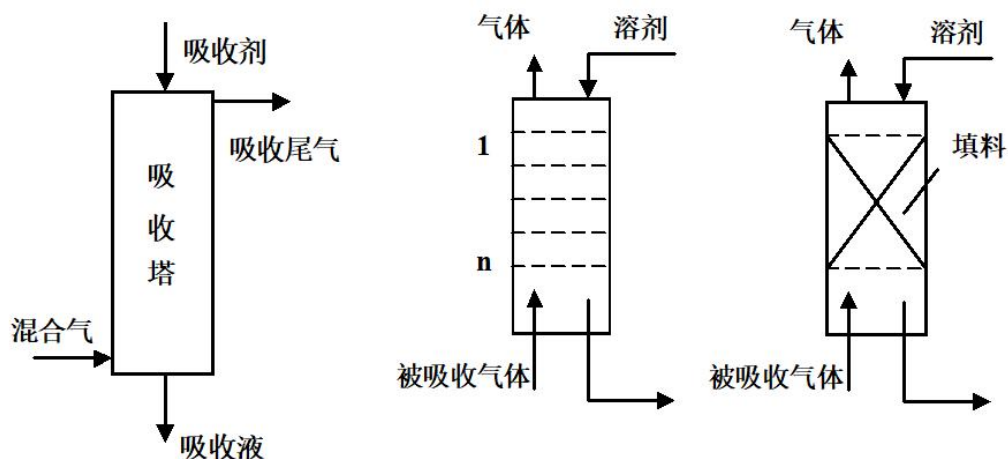
为主。

④建材工业：建筑材料种类繁多，其中砂石、石灰、水泥、沥青混凝土、砖和玻璃等。它们的主要排放物为粉尘。

⑤化学工业：化学工业又称化学加工工业，其中产量大、应用广的主要化学工业有无机酸、无机碱、化肥等工业。其排放的污染物，由原料、加工工艺，生产环境等方面决定。精细化工行业磺化、硝化等工艺过程排放 SO_2 、 NO_x 等酸性废气；生产过程中使用大量有毒有害化工原料和溶剂，如醇、酮、醚、酯、石油烃化合物和卤素化合物，以及恶臭类物质等。产生的 VOCs 及恶臭废气具有刺激性强和成分复杂等特点。

（2）吸收法

基本原理：采用低挥发或不挥发溶剂（通常为水溶液）对气相污染物进行吸收，再利用有机分子和吸收剂物理性质的差异进行分离的气相污染物控制技术。利用气体混合物中各组分在液体溶剂中溶解度的差异来分离气体混合物的操作称为吸收。该法适用于浓度较高、温度较低和压力较高情况下（加压吸收法）气相污染物的处理；但该法也存在后处理过程复杂以及二次污染的问题。



适用范围： SO_x 、酸/碱性废气、水溶性有机物及部分恶臭类物质。

3.1.3 实践环节介绍

（1）仪器设备及耗材

工业废气净化模拟试验装置

赛默飞 TVA2020 便携式总烃分析仪

Testo 风速计

甲醇试剂（亲水性 VOC）

甲苯试剂（疏水性 VOC）

（2）工艺参数设计

风量（ m^3/h ）=实测风速（ m/s ）*管道截面积（ m^2 ）*3600

停留时间（s）=反应器有效体积（ m^3 ）*3600/风量（ m^3/h ）

进气浓度：进气采样口模拟污染物的 TVA2020 响应值（ppm）

出气浓度：出气采样口模拟污染物的 TVA2020 响应值（ppm）

3.1.4 操作步骤-亲水性/疏水性 VOC 吸收净化试验

第 1 步：认识装置工艺流程，通过搜索关键词，查阅相关文献，分析探讨相关技术设计原理，自主设计详细的操作步骤；

第 2 步：启动引风机，调节频率在 0~50Hz，利用风速计测量管道风速值（ m/s ）并换算成风量（ m^3/h ），用米尺测量反应器有效体积（ m^3 ），设计计算停留时间在 0~5s 范围内（如 1s、2s 或 4s）；

第 3 步：将 VOC 试剂投加到配气罐，利用便携式 VOC 分析仪测量进气浓

度（ppm）的测量，等待 15min 左右至模拟污染物浓度稳定；

第 4 步：开启喷淋泵，测量吸收塔进气浓度（ppm）、出口浓度（ppm），间隔 5min 取样一次，连续运行监测，保证 20 组以上数据；评估该模拟试验装置 VOC 污染物吸收净化性能好坏。

3.1.5 数据处理

去除效率：进气浓度与出气浓度的差值，除进气浓度的百分比值（%）

$$\eta = \frac{\rho_{\text{inlet}} - \rho_{\text{outlet}}}{\rho_{\text{inlet}}} * 100\%$$

η：去除效率，%

ρ：实测浓度值，ppm 或 mg/m³

三、认知与实践环节（模块 2）

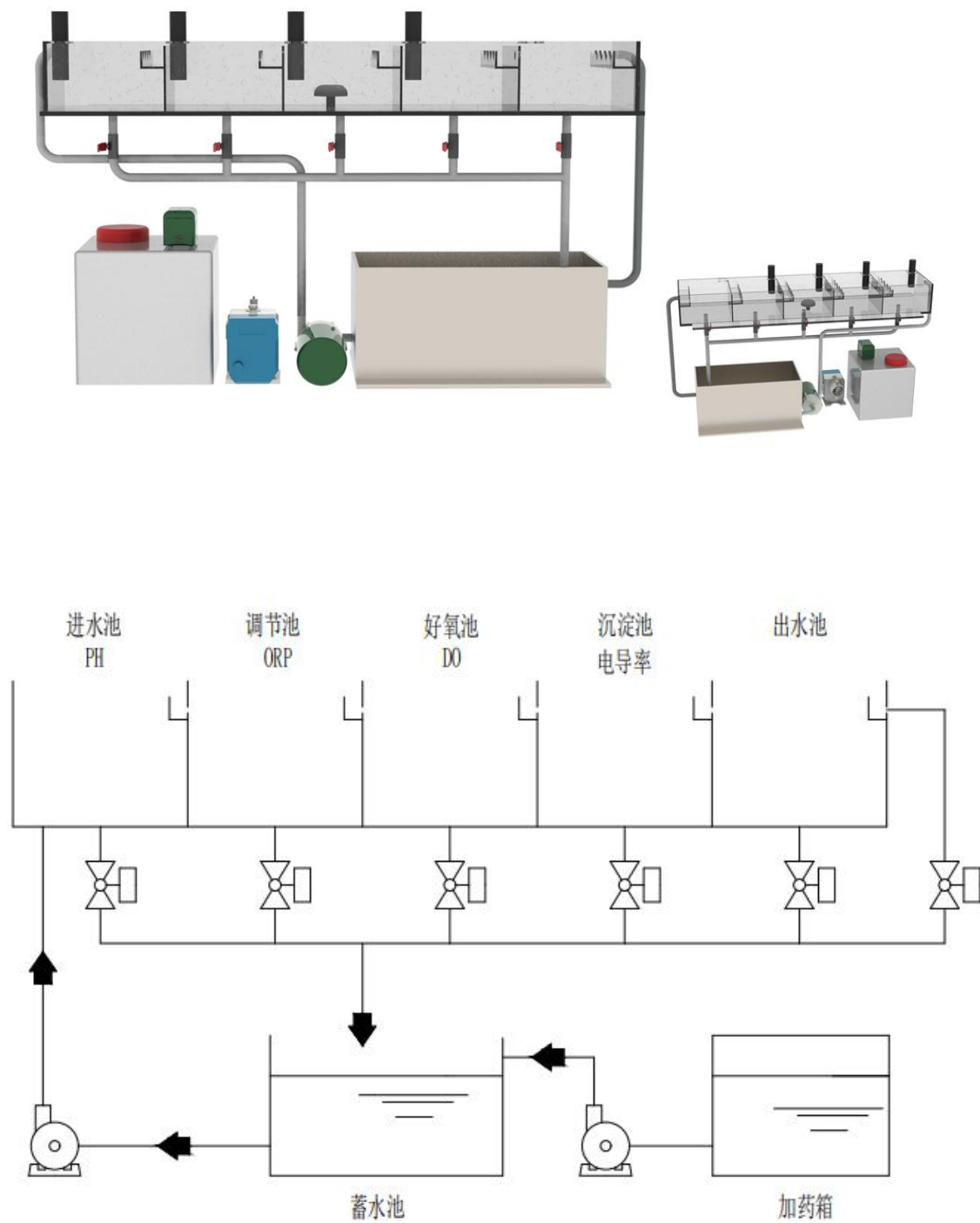


图 3.2 工业废水过程监测实验模拟装置及工艺流程

3.2.1 认知实践目标

认识了解工业废水处理模拟试验装置的工艺流程和技术原理，开展相关工程设计与装置调试运行实践，掌握在线监测仪表、分光光度法/稀释倍数法的工作原理和测试方法，探究 UV 光氧化/ H_2O_2 协同氧化模拟废水脱色过程的监测数据变化与色度指标变化趋势，促使学生理解工业废水处理过程的设计思路。

3.2.2 技术原理

工业废水来源分为食品酿造废水、化工废水、纺织印染废水、造纸废水、医药废水、冶金废水、石油废水、电力废水、垃圾渗滤液、养殖业废水。

第一类污染物：能在环境或动植物体内蓄积对人体健康产生长远不良影响者。不分行业和污水排放方式，也不分受纳水体功能类别，一律在车间或车间处理设施口采样，其最高允许排放浓度必须符合一定要求。如：总汞、烷基汞、总镉、总铬、六价铬、总砷、总铅、总镍、放射性物质等。

第二类污染物：指长远影响小于第一类污染物质，在排污单位排放口采样时对其最高允许的排放浓度符合一定要求。如：pH、色度、悬浮物、化学需氧量、石油类、挥发酚、总氰化物、硫化物、氨氮等。

化学需氧量 COD (Chemical Oxygen Demand)：是在一定的条件下，采用一定的强氧化剂处理水样时，所消耗的氧化剂量。它是表示水中还原性物质多少的一个指标。水中的还原性物质有各种有机物、亚硝酸盐、硫化物、亚铁盐等，但主要的是有机物。因此，化学需氧量（COD）又往往作为衡量水中有机物质含量多少的指标。化学需氧量越大，说明水体受有机物的污染越严重。

氨氮 $\text{NH}_3\text{-N}$: 指以氨或铵离子形式存在的化合氮，即水中以游离氨 (NH_3) 和铵离子 (NH_4^+) 形式存在的氮。氨氮是水体中的营养素，可导致水富营养化现象产生，是水体中的主要耗氧污染物，对鱼类及某些水生生物有毒害。

pH: 氢离子浓度指数 (hydrogen ion concentration) 是表示氢离子浓度的一种方法。它是水溶液中氢离子浓度 (活度) 的常用对数的负值。在 25°C 时，当 $\text{pH} < 7$ 的时候，溶液呈酸性；当 $\text{pH} > 7$ 的时候，溶液呈碱性；当 $\text{pH} = 7$ 的时候，溶液呈中性。故室温环境下，pH 通常是一个介于 0 和 14 之间的数（浓硫酸 pH 约为 -2）。

氧化还原电位: 是用来反映水溶液中所有物质表现出来的宏观氧化还原性。氧化还原电位越高，氧化性越强，氧化还原电位越低，还原性越强。电位为正表示溶液显示出一定的氧化性，为负则表示溶液显示出一定的还原性。

电导率 (conductivity): 是用来描述物质中电荷流动难易程度的参数。电导率是以数字表示的溶液传导电流的能力。在公式中，电导率用希腊字母 σ 来表示。电导率 σ 的标准单位是西门子/米 (简写做 s/m)，为电阻率 ρ 的倒数，即 $\sigma = 1/\rho$ 。

溶解氧: 溶解在水中的空气中的分子态氧称为溶解氧，水中的溶解氧的含量与空气中氧的分压、水的温度都有密切关系。在自然情况下，空气中的含氧量变动不大，故水温是主要的因素，水温愈低，水中溶解氧的含量愈高。通常记作 DO，用 mg/L 表示。水中溶解氧的多少是衡量水体自净能力的一个指标。溶解氧跟空气里氧的分压、大气压、水温和水质有密切的关系，在 20°C 、 100kPa 下，纯水里大约溶解氧 9mg/L 。

3.2.3 实践环节介绍

（1）仪器设备及耗材

工业废水处理模拟试验装置

分光光度计、10mm 比色皿（分光光度法）-580nm 吸收波长

pH 计、盐度计等

在线 pH 计、在线电导率计、在线溶解氧仪、在线氧化还原点位仪

100mL 比色管（2 倍稀释倍数法）

活性艳蓝 KN-R 染料（2g/L 溶液）

（2）工艺参数设计

废水流量（ m^3/h ）：单位时间内（h）废水的处理体积（ m^3 ），烧杯测量法

停留时间（h）：废水在一定体积内水池的停留时间，即水池有效体积（ m^3 ）
/废水流量（ m^3/h ），即水力停留时间

3.2.4 操作步骤-模拟废水 UV/ H_2O_2 协同氧化脱色试验

第 1 步：认识装置及工艺流程，通过搜索关键词，查阅相关文献，分析探讨相关技术设计原理，自主设计操作步骤；

第 2 步：停留时间动态演示（教师操作），配置染料废水，开启循环泵，控制阀门在稳定的废水循环流量；

第 3 步：利用烧杯、量筒等工具粗略测量废水在一定时间内的循环处理体积（ m^3 ），换算成废水流量值（ m^3/h ）；

第 4 步：原水取样，分别采用分光光度法、稀释倍数法测量模拟废水的色度指标，同时记录水温、盐度、pH 值、溶解氧、电导率、氧化还原电位等监测指标；

第 5 步：开启紫外灯、加入 100~500mL 的 3%浓度 H_2O_2 溶液，间隔 10min 取样一次，连续取样 10 次以上，测量模拟废水的色度值（分光光度法、稀释倍数法；建议等所有样品取样完成后，统一分析色度），并记录各取样点的水温、盐度、pH 值、溶解氧、电导率、氧化还原电位等监测指标，评估模拟废水色度变化趋势。

3.2.5 数据处理

废水中污染物的去除效率（ η ，%）：污染物进水浓度与出水浓度的差值，除进水浓度的百分比值（%）

$$\eta = \frac{\rho_{\text{inlet}} - \rho_{\text{outlet}}}{\rho_{\text{inlet}}} * 100\%$$

η ：去除效率，%

ρ ：实测浓度值，色度单位

三、认知与实践环节（模块3）

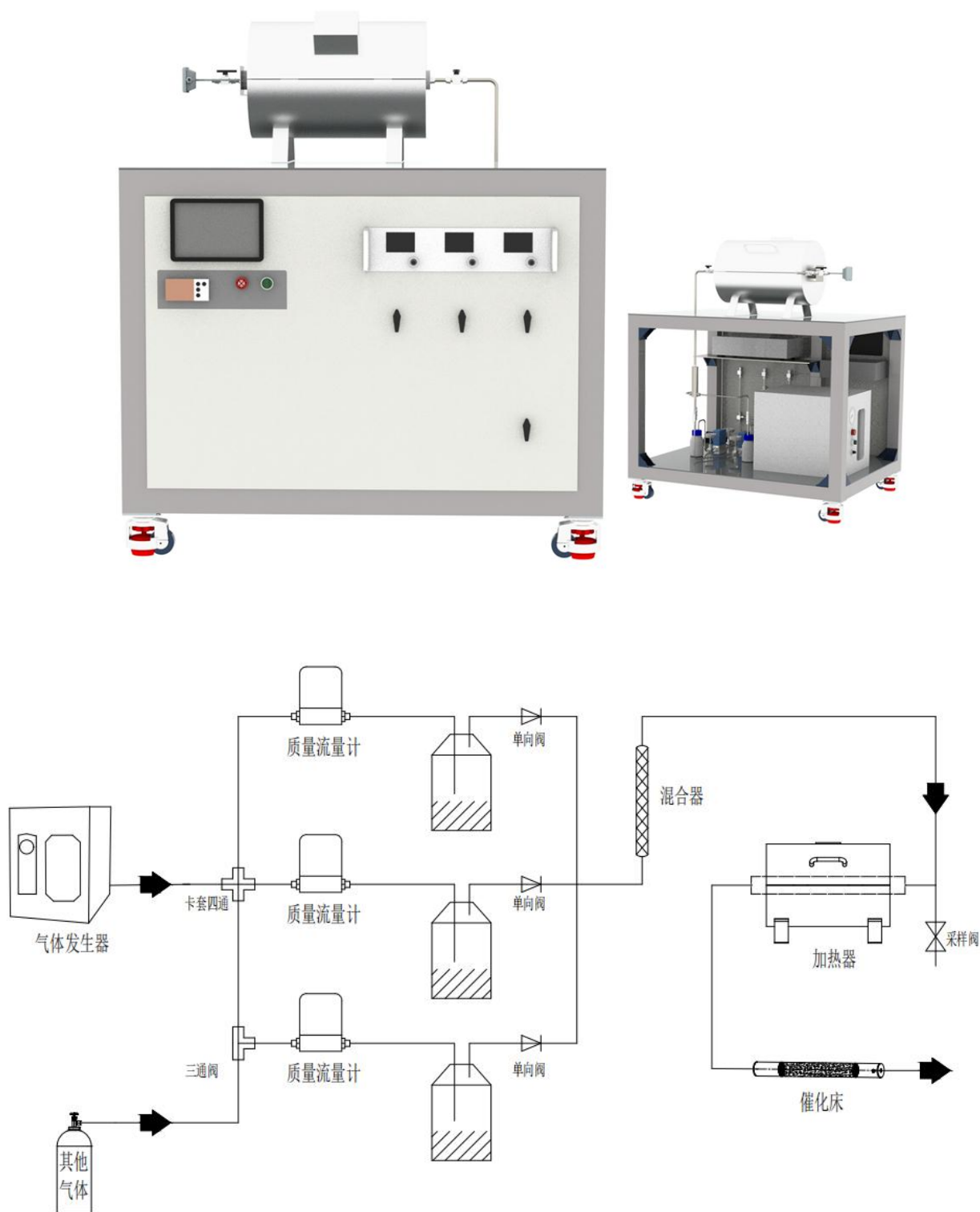


图 3.3 工业催化材料性能评估试验台及工艺流程

3.3.1 认知实践目标

认识了解工业催化材料性能评估试验台的工艺流程和技术原理，开展颗粒型催化材料净化 VOC 的效果评价测试，掌握气相色谱定量 VOC 浓度的使用方法，探究一定工况下的模拟 VOC 污染物催化净化效果，促使学生理解工业废气催化净化技术的工程设计思路。

3.3.2 技术原理

基本原理：在催化剂（重金属 Pt、Pd、过渡金属 MnO_x、CoO_x 等）的作用下，将有机废气加热到 50~100℃ 进行氧化分解，使废气中的 VOC 在氧化成 CO₂ 和 H₂O。

适用范围：用于金属印刷、绝缘材料、漆包线、炼焦、油漆、化工等多种行业的较低浓度有机废气或恶臭类废气，主要用于较低浓度的有机废气的净化（一般在 500~3000 mg/m³）。

3.3.3 实践系统介绍

（1）仪器设备及耗材

工业催化材料性能评估试验台（颗粒型催化剂）

福立 9790 气相色谱仪

分析检测条件：辅助 I/进样口 150℃、柱温 80℃

FID 检测器 150℃、辅助 II 280℃

微量进样针：进样体积 200μL

甲醇试剂

甲苯试剂

（2）工艺参数设计

停留时间 (s) = 材料填装量 (m^3) / 风量 (m^3/s)，统一换算单位

进气浓度：进气采样口模拟污染物的气相色谱响应值（峰面积）/80~100，单位为 (mg/m^3)

出气浓度：出气采样口模拟污染物的气相色谱响应值（峰面积）/80~100，单位为 (mg/m^3)

3.3.4 操作步骤—高浓度 VOC 催化净化试验

第 1 步：认识装置及工艺流程，通过搜索关键词，查阅相关文献，分析探讨相关技术设计原理，自主设计详细的操作步骤；

第 2 步：提前开启加热器，组装催化反应器，根据 3 组废气质量流量计的量程范围（300mL/min、1000mL/min、10L/min），设计催化材料（颗粒型催化剂）填装量，设计有效停留时间在 0.1~1.0 s 范围内，并控制进气温度在稳定范围内；

第 3 步：将模拟污染物试剂瓶（甲醇）接入测试台，调节 3 组废气质量流量计的量程范围，连续取样分析进气浓度值，控制进气浓度在稳定范围内；

第 4 步：连接催化反应器，间隔 5min 取样 1 次，连续运行检测分析，获取 20 组以上进气/出气样品，定量 VOC 浓度，评估 VOC 催化净化效果。

3.3.5 数据处理

去除效率：进气浓度与出气浓度的差值，除以进气浓度的百分比值（%）

$$\eta = \frac{\rho_{\text{inlet}} - \rho_{\text{outlet}}}{\rho_{\text{inlet}}} * 100\%$$

η：去除效率，%

ρ：实测浓度值，mg/m³

三、认知与实践环节（模块 4）

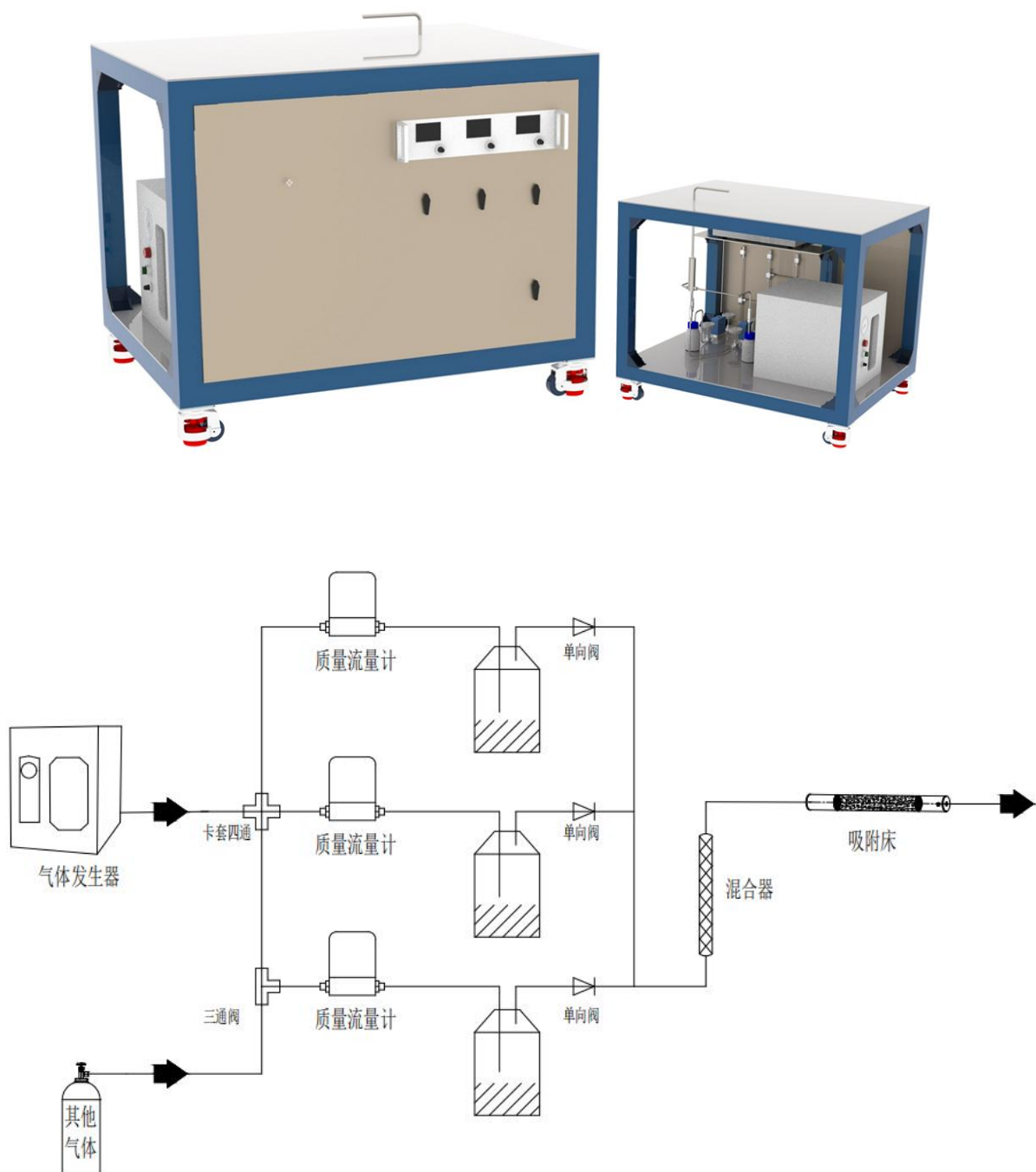


图 3.4 工业吸附材料性能评估试验台及工艺流程

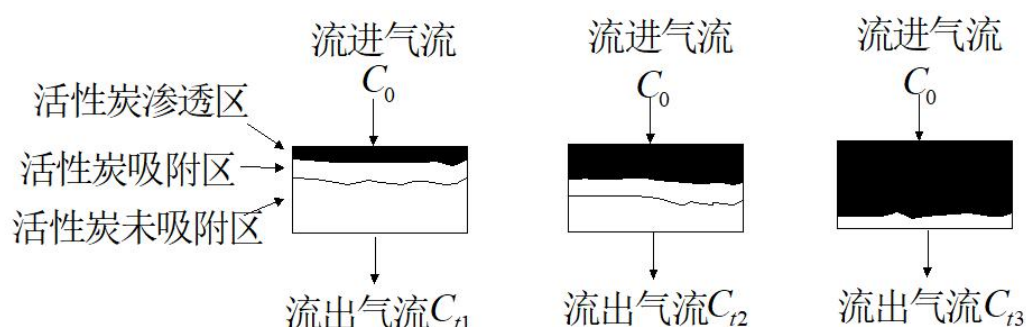
3.4.1 认知实践目标

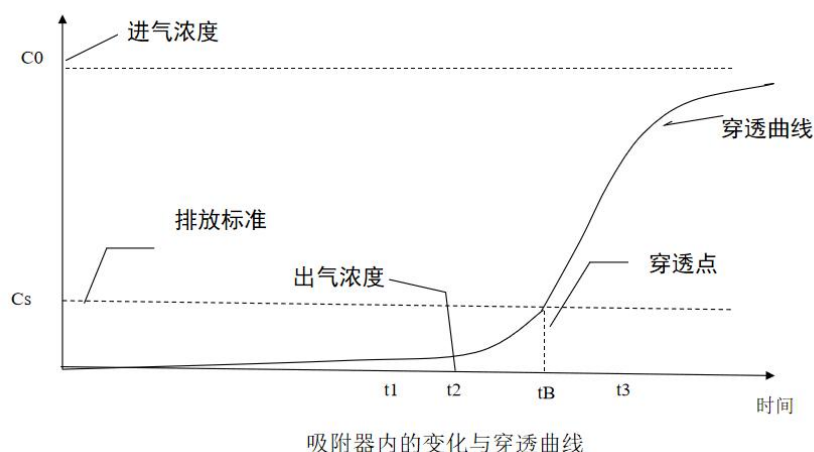
认识了解工业吸附材料性能评估试验台的工艺流程和技术原理，开展椰壳炭吸附净化 VOC 的效果评价测试，掌握气相色谱定量 VOC 浓度的使用方法，探究一定工况下的模拟 VOC 污染物吸附净化效果，促使学生理解工业废气吸附净化技术的工程设计思路。

3.4.2 技术原理

基本原理：利用某些具有吸附能力的物质（如活性炭、活性炭纤维及分子筛等）来吸附有害成分，达到消除污染的目的。该法具有去除效率高的优点，是去除气相污染物较为常用的方法，但存在投资运行费用较高且有产生二次污染的缺陷，而且吸附剂的容量有限而设备庞大，吸附剂再生机溶剂回收等后处理工程复杂。

- 物理吸附：气体分子和固体间形成弱键，采用加热和减压的方法可进行再生。
- 化学吸附：吸附质和吸附剂之间形成化学键，化学吸附极难可逆，不易再生。





适用范围：适用于几乎所有的气相污染物，一般是中低浓度的气相污染物，其吸附效果取决于吸附剂性质、气相污染物种类等因素。如活性炭（颗粒/纤维）吸附技术。

3.4.3 实践系统介绍

（1）仪器设备及耗材

工业吸收材料性能评估试验台（椰壳炭）

福立 9790 气相色谱仪

分析检测条件：辅助 I/进样口 150℃、柱温 80℃

FID 检测器 150℃、辅助 II 280℃；

微量进样针：进样体积 200μL

甲醇试剂

甲苯试剂

（2）工艺参数设计

停留时间 (s) = 材料填装量 (m³) / 风量 (m³/s)，统一换算单位

进气浓度：进气采样口模拟污染物的气相色谱响应值（峰面积）/80~100，单位为（mg/m³）

出气浓度：出气采样口模拟污染物的气相色谱响应值（峰面积）/80~100，单位为（mg/m³）

3.4.4 操作步骤—高浓度 VOC 吸附净化试验

第 1 步：认识装置及工艺流程，通过搜索关键词，查阅相关文献，分析探讨相关技术设计原理，自主设计操作步骤；

第 2 步：组装吸附反应器，根据废气质量流量计的量程范围，设计吸附材料（8~16 目椰壳炭）填装量，设计有效停留时间在 0.1~1.0 s 范围内；

第 3 步：将模拟污染物试剂瓶（甲醇）接入测试台，调节 3 组废气质量流量计的量程范围，连续取样分析进气浓度值，控制进气浓度在稳定范围内；

第 4 步：连接吸附反应器，间隔 5min 取样 1 次，连续运行检测分析，获取 20 组以上进气/出气样品），定量 VOC 浓度，评估 VOC 吸附净化效果。

3.4.5 数据处理

去除效率：进气浓度与出气浓度的差值，除进气浓度的百分比值（%）

$$\eta = \frac{\rho_{\text{inlet}} - \rho_{\text{outlet}}}{\rho_{\text{inlet}}} * 100\%$$

η：去除效率，%

ρ：实测浓度值，mg/m³

三、认知与实践环节（模块 5）

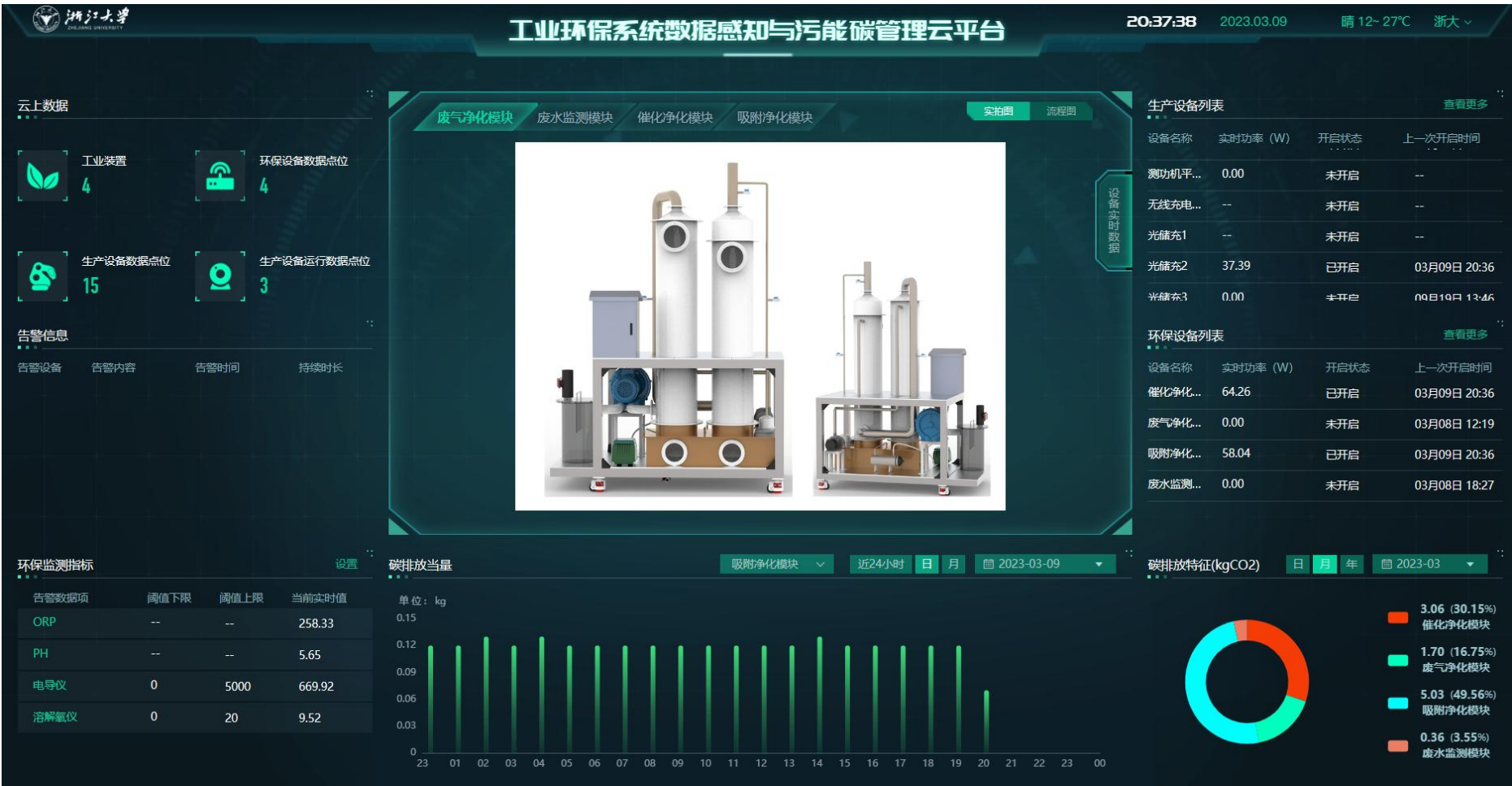


图 3.5 工业环保系统数据感知与污能碳云平台

3.5.1 认知实践目标

认识了解工业系统数据感知与污能碳管理云平台的设计思路及数据架构，开展生产装置、环保装置的在线仪表/电量统计数据传感，理解工业系统过程管控与污染指标监控、能源消耗、碳排放的实时数据采集与测算方法，分析“污能碳”数据关联性，探讨“双碳”背景下的工业企业降碳措施的发展方向。

3.5.2 技术原理

企业需要确定基准年排放量的过程较为复杂，需要企业界定组织边界、明确温室气体种类、梳理相关活动，并评估活动层面的排放量。

目前，主要有两种测量温室气体排放的方法：

系数法：通过计算活动数据和相应的排放因子来确定排放量，是广泛采用的标准评估方法，典型代表是颇受欢迎的温室气体核算体系（GHG Protocol）和 ISO 14000 系列。

测量法：利用排放连续监测系统（CEMS），对活动层面相关温室气体的浓度进行连续测量。

企业在评估排放水平时可遵循 **3 大步骤**。首先，从业务角度出发，收集相关活动的数据，接着选择最合适的排放因子，最后计算出排放水平。具体如下：

第 1 步—收集活动数据（AD）：企业需要确定指定范围内各项活动的排放源，并收集活动数据作为关键输入之一。活动数据是与能源使用直接相关的信息，例如用电度数（千瓦时）或填埋废弃物的吨数。整个数据收集过程往往耗时较长，对于数据基础薄弱的企业尤为如此。



第2步—选择排放因子（EF）：排放因子的选取方法不尽相同，且受到具体活动、国家地区、技术或能源结构的影响。大多数企业不必直接测量或计算排放因子，尤其是那些来自中低排放行业的企业。企业可以从非政府组织和行业协会发布的一系列标准因子中选择可利用的指标。此外，还可参考按国家划分的跨行业排放因子，例如欧盟排放交易体系的MRR、美国环保局的温室气体

规则 and 中国的 GB/T 32150/32151。当缺乏更准确的排放因子时，IPCC 的缺省排放因子可作为有力补充。企业还可以随时利用 IPCC 排放因子数据库（EFDB）等资源来快速获取多种排放因子，减少排放评估的复杂性。

第 3 步—将活动数据和排放因子相乘：确定活动数据和排放因子后，便可将活动数据和排放因子相乘，并加总到公司层面。然后，根据国际公认的标准（全球变暖潜势，GWP），将不同温室气体的排放数据转化为统一的指标—二氧化碳当量（CO₂e）。

3.5.3 实践系统

工业系统数据感知与污能碳管理云平台（开发环境）

访问地址：http://139.198.191.254:8070/#/login?redirect=

3.5.4 操作步骤—污能碳数据关联性分析

第 1 步：认识工业系统数据感知与污能碳管理云平台，结合 4 套实验模块的用电设备的运行状态，识别生产装置、环保模块的能源消耗单元的运行时长、电量消耗情况，识别实际最大能耗单元；

第 2 步：查阅参考文献，获得工业用电、风电、光热发电、光伏发电、核电、水电等碳排放因子（kgCO₂/kWh）；

第 3 步：利用 excel 进行数据处理，按照所有能耗单元的碳排放数据；比较工业用电、风电、光热发电、光伏发电、核电、水电等供能情景下的碳排放差异；

第 4 步：实时记录本次课程 4 台环保模块的实际电消耗、相应运行时长，换算本课程能耗设备的最大碳排放模块、累计碳排放量；查阅文献，提出合理的降碳策略。

3.5.5 数据处理

碳排放当量（CO₂e）=活动数据（AD）*排放因子（EF）

四、课程安排及考核方式

4.1 课程安排

1-3 学时（上半场）-工艺探究：

1.理论讲解：《高级工程认知实践》课程、装置模块原理、功能及操作步骤、考核方式；

2.模块介绍：5 套实训装置模块操作及控制功能，检测分析仪器及使用方法，动态演示“停留时间”的概念；

3.教师演示：配置含染料模拟废水，测量废水流量及水池体积，动态演示“停留时间”概念（秒表计时）；

4.初步探究：结合实验指导书，学会操作仪器设备，实验数据初探。

4-6 学时（下半场）-系统实验：

1.装置开机：按照实验操作步骤，规范操作流程，正式开展试验；

2.系统实验：废水按照 10min 一次取样，保证 10 组有效数据；废气按照 5min 一次取样，保证 20 组有效数据；

3.数据总结：数据整理并计算净化效率（%），整理数据记录表、原始数据表、签到表。

4.2 考核方式

数据记录与评分表

认知实践项目：_____ 日期：_____

实践目标						上半 场
关键词						
仪器设备/ 耗材						
实验条件 工艺参数 操作步骤						
结果简述						下半 场
考核评分	废气模块	废水模块	催化模块	吸附模块	能碳模块	
小组人员 (签名)						

原始数据记录

签到表（_____模块）

班级：1 班●；2 班●；3 班●；4 班●；5 班●；6 班●；7 班●；8 班●；其他：_____

序号	姓名	学号	签到（打√）	分工职责

废气组 6 人；废水组 8 人；催化组 6 人；吸附组 6 人；能碳组 4 人