

# 《环境工程综合实验》课程大纲

制订人 徐璇 石德智 罗宁 教学团队审核人 刘国涛 开课学院审核人 吉芳英

一、课程名称：环境工程综合实验（Environment Engineering Synthetical Experiment）

课程代码：ENVR42010

二、学时与学分：实验学时 2 周、学分 1 分

三、适用专业及层次：环境工程、环境科学、环境生态工程专业，以及相关专业领域，具备一定专业基础知识的学生

四、先修课程：

公共基础课程：大学化学

专业基础课：流体力学、物理化学、环境监测、环境工程微生物学、环境工程原理、环境水化学

专业课：水污染控制工程、固体废物控制工程、空气污染控制工程

五、主要教学用书和参考资料：

参考资料：

王兵主编，环境工程综合实验教程，化学工业出版社，2011 年

楼菊青主编，环境工程综合实验，浙江工业大学出版社，2009 年

六、课程类别：专业课程

七、课程性质：必修

八、课程学习目标

通过所开实验使学生学习实验的原理、方法，掌握实验报告书写，学会对实验结果的分析及提出正确的结论，培养学生的动手能力与创新能力，为学生打下一般科研的前期基础。方向一：通过该课程学习使学生了解污水处理厂调试运行的流程和基本方法，了解活性污泥法污水处理系统的结构特征、运行方式和污水处理功效，掌握基本污水水质指标的测试方法，了解污水处理工艺的调控方法。在掌握各类实验技术基础上，了解并逐步掌握系统间各工艺单元协同运行的原理和效果，探索系统内部各单元的组合同步设计方法。方向二：通过该课程学习使学生加强对准好氧填埋原理的认识和理解，进一步熟悉填埋工艺操作过程，掌握城市垃圾理化特征、垃圾渗滤液水质等指标的测试分析的基本原理和基本方法，了解对准好氧填埋模拟反应器产生的渗滤液进行周期性回灌工艺的调控方法，了解准好氧填埋工艺下回灌控制工艺评价与污染物削减机理。方向三：通过该课程学习使学生加强对汽车尾气净化采用的三效催化转化器工作原理的认识和理解，进一步熟悉气态污染物控制的催化转化工艺操作过程，掌握汽车尾气中的 HC、CO 和 NO<sub>x</sub> 等指标的测试分析的基本原理和基本方法；加强对物理吸附法控制 VOCs 工作原理的认识和理解，了解并掌握物理吸附法控制 VOCs 的半连续式固定床工艺的调控方法，以及工艺评价与污染物削减机理。

通过本门课程的学习，使学生具备以下能力：

1、能将所学相关知识综合运用用于污水处理 SBR 系统、固体废物填埋处理系统、汽车尾气三效催化净

化装置和物理吸附法控制 VOCs 系统的优化、调试及运行中，实现 SBR、填埋系统和生物法滴滤塔控制 VOCs 系统各项指标达标。在实验过程及报告中，归纳总结相关数据，分析实验现象，判断 SBR 和填埋系统的运行状态。（支撑毕业要求 1、2）

- 2、根据分析判断，发现 SBR、填埋系统、汽车尾气三效催化净化装置和物理吸附法控制 VOCs 系统运行过程中存在的问题，并能运用相关知识诊断出导致该问题的关键原因。能按照问题分析及其诱因分析结果，提出针对性解决办法，能在此基础上改进或设计新的实验方案，并开展相关实验解决问题。总结分析实验过程的相关数据和现象，总结 SBR、填埋系统、汽车尾气三效催化净化装置和物理吸附法控制 VOCs 系统关键运行控制参数。（支撑毕业要求 4）
- 3、在实验报告中对实验数据进行详细归纳，要求图表详细，问题描述清楚，分析详细，结论准确。对所提出的问题解决方案进行二次分析，比较方案改变前后的利弊及后续影响。总结实验中发现的新现象新规律。（支撑毕业要求 5、6、7）
- 4、实验小组做到既分工明确，又团结协作，共同完成课程内容。善于在实验过程中沟通交流，表达专业准确；实验报告用语规范专业。（支撑毕业要求 9/10）

本门课程培养目标包含 5 个毕业要求指标点，详见表 1。

## 九、课程承担的毕业要求及其达成途径和评价依据

本课程承担的能支撑课程学习目标的毕业要求、具体指标点、权重以及支撑各指标点达成的教学环节、途径和评价方法见表 1。

表 1 课程承担的毕业要求及达成途径和评价

毕业要求	指标点	支撑毕业要求指标点的课程目标	达成度目标值	课程目标达成的教学环节
1.工程知识：掌握数学、自然科学、工程基础和环境工程专业基础知识和基本理论，能够运用其理论和方法解决环境领域新技术开发、工程设计和环境咨询中的复杂工程问题。	1-4：能够将环境工程专业知识用于复杂环境工程问题的咨询、管理和工艺及技术优化；	能将所学相关知识综合运用用于污水处理 SBR 系统、固体废物填埋处理系统、汽车尾气三效催化净化装置和物理吸附法控制 VOCs 系统的优化、调试及运行中，实现 SBR 和填埋系统各项指标达标。	0.7	实验过程操作
2.问题分析：能够应用数学、自然科学和工程科学的基本原理，发现问题、识别判断、科学描述、定性定量分析、借助文献研究环境工程领域中的复杂工程问题，获得有效的分析结论。	2-4：能够经过理论推导、实验验证、对比分析、总结归纳、综合判断，获得有效的分析结论；	在实验过程及报告中，归纳总结相关数据，分析实验现象，判断 SBR、填埋系统、汽车尾气三效催化净化装置和物理吸附法控制 VOCs 系统的运行状态。	0.7	实验过程操作、实验报告撰写
4.研究：针对环境工程领域的某一特定复杂工程或科学问题，能够基于科学原理并采用科学方法进行相关研究，包括设计实验、分析与解释数据、并通过信息综合得到合理有效的结论。	4-1：能够对实验中的现象、规律和问题进行准确的诊断，能够确定其中的关键环节；	根据分析判断，发现 SBR、填埋系统、汽车尾气三效催化净化装置和物理吸附法控制 VOCs 系统运行过程中存在的问题，并能运用相关知识诊断出导致该问题的关键	0.7	实验过程操作

		原因。		
	4-2: 针对环境工程领域的某一特定复杂工程或科学问题,能够基于科学原理并采用科学方法有针对性的设计科学实验,并有效实施;	能按照问题分析及其诱因分析结果,提出针对性解决办法,能在此基础上改进或设计新的实验方案,并开展相关实验解决问题。	0.7	实验过程操作
	4-3: 能够分析、归纳和总结实验数据,并通过信息综合得到合理有效的结论;	总结分析实验过程的相关数据和现象,总结SBR、填埋系统、汽车尾气三效催化净化装置和物理吸附法控制VOCs系统关键运行控制参数。	0.7	实验报告撰写
5.使用现代工具: 针对环境工程领域的复杂工程问题,能够选择与使用恰当的技术、资源、现代工程工具和信息技术工具,包括对复杂工程问题的预测和模拟,并能够理解其局限性。	5-2: 熟练掌握常用的制图和模拟软件,能够对复杂环境工程问题进行模拟和预测,并对结果做出正确的分析和准确的判断;	在实验报告中对实验数据进行详细归纳,要求图表详细,问题描述清楚,分析详细,结论准确。	0.7	实验报告撰写
6.工程与社会: 能够基于工程相关背景知识进行合理分析,评价环境工程设计、运行管理和新技术开发应用对社会、健康、安全、法律以及文化的影响,理解应承担的责任并能够在采取合理的技术手段降低或避免其不利影响。	6-3: 能够采取合理的技术手段降低或避免环境工程运行或新技术开发的不利影响;	对所提出的问题解决方案进行二次分析,比较方案改变前后的利弊及后续影响。	0.7	实验报告撰写
7.环境和可持续发展: 能够理解和评价复杂环境工程的工程实践对环境、社会可持续发展的影响,并能够基于可持续发展的理念设计和管理环境工程、开发环保新技术。	7-3: 能够基于可持续发展的理念设计和管理环境工程、开发环保新技术;	总结实验中发现的新现象新规律。	0.7	实验报告撰写
9.个人和团队: 具备团队协作的精神,能够在多学科背景下的团队中承担个体、团队成员以及负责人的角色。	9-2: 具有良好的大局观念,能够在团队中根据需要承担相应的职责;	遵守实验纪律(含考勤);实验小组做到既分工明确,又团结协作,共同完成课程内容。	0.7	考勤、实验过程操作
10.沟通: 能够运用专业知识就复杂工程问题的环境工程设计、运行管理、环境咨询的问题,及公众关注环境事件与业界同行和社会公众进行书面和口头的有效沟通和交流,包括撰写报告和设计文稿、陈述发言、清晰表达或回应指令。并具备一定的国际视野,能够用英文与国际同行进行有效的书面和口头的沟通和交流。	10-2: 能够运用专业知识就复杂工程问题的环境工程设计、运行管理、咨询服务与团队成员、业界同行进行口头和书面的有效沟通和交流,包括撰写报告和设计文稿、陈述发言、清晰表达或回应指令;	善于在实验过程中沟通交流,表达专业准确;实验报告用语规范专业。	0.7	课堂讨论、实验过程操作、实验报告撰写
<b>能力培养达成的考核体现</b>	<p>实验过程操作: 考察学生是否能独立完成实验水污染、固废处理和空气污染控制系统相关实验操作,重点考察学生对污水处理、固废处理系统和空气污染控制系统的运行调控能力,分析判断实验现象及通过关键实验参数的优化不断完善污染治理系统运行水平的能力。</p> <p>课堂讨论: 通过实验小组方案设计、实验现象分析、问题诊断、优化运行方案设计等多个环节的课堂讨论,考察学生对个人及团队问题的协调处理能力、沟通及表达能力。</p> <p>实验报告: 重点考核任务描述、实验方案设计、实验过程记录、实验数据处理及分析、实验现象及规律描述分析、问题诊断、主要结论的归纳总结等,</p>			

	从逻辑严密性、用语规范性、结构完整性等方面进行考核。
评价方法	<p>依据课程考核结果,选取年级全体参考学生作为评价样本,进行课程对该条毕业要求指标点的达成度评价。其中,本门课程对某条毕业要求指标点达成度的评价量化计算方法:</p> $\text{评价值} = \text{目标值} \times \frac{\text{样本中与该毕业要求指标点相关试题的平均得分}}{\text{样本中与该毕业要求指标点相关试题的总分}}$ <p>将毕业要求指标点达成限值规定为目标值的 70%,即评价值<math>\geq 0.70</math>,视为该毕业要求指标点已经达成。</p>

## 十、课程教学内容和安排

课程教学分为水污染控制综合实验、固体废物处理处置综合实验、大气污染控制综合实验三个部分,具体实验内容安排见表 2。

表 2 环境工程综合实验教学内容与安排

序号	实验项目	实验内容	学时	实验类型
实验方向一：水污染控制综合实验				
1	活性污泥接种、培养和驯化	从污水厂收集活性污泥,用于实验装置生化池接种。通过测定 MLSS、MLVSS、SVI 等指标确定活性污泥驯化成功。	2 周	综合性
2	污水处理工艺调试	调试运行 SBR 污水处理系统,在确定进水水质情况下,通过测定各项主要指标(COD、SS、氨氮等)确定系统运行稳定。		
3	污水处理工艺运行控制	不同进水负荷条件下 SBR 污水处理效果实验。通过调节各个处理单元的主要控制参数,实现不同进水负荷的处理达标排放,掌握 SBR 处理工艺的基本调控方法。		
实验方向二：固体废物处理处置综合实验				
4	准好氧填埋反应器物料配比与装填	对不同构造的准好氧填埋模拟反应器通过进行本阶段的垃圾物料入场装填,掌握生活垃圾组分分选与理化性质分析方法。	2 周	综合性
5	准好氧填埋工艺下渗滤液回灌与污染物削减	对各个准好氧填埋模拟反应器产生的渗滤液进行周期性回灌,评价准好氧填埋工艺下回灌控制工艺与污染物削减机理。		
实验方向三：大气污染控制综合实验				
6	汽车尾气三效催化净化试验	不同风量、处理负荷、反应温度条件下对汽车尾气三效催化净化效果实验。通过调节净化器的运行参数,分析不同的催化剂载体、活性组分、反应温度对汽车尾气污染物削减的影响。	2 周	综合性
7	物理吸附法控制 VOCs 系统	不同风量、处理负荷下对活性炭物理吸附法净化效果实验。通过调节净化器的主要运行参数,实现不同 VOCs 负荷的处理达标排放,掌握固定吸附床处理工艺的基本运行方法和参数。		

# 实验 1 活性污泥接种、培养、驯化

## 一、实验目的

活性污泥是指充满了大量微生物及有机物和无机物的絮状泥粒。它具有很大的表面积和强烈的吸附和氧化能力，沉降性能良好。活性污泥生长的好坏，与其所处的环境因素有关，而活性污泥性能的好坏，又直接关系到废水中污染物的去除效果。为此。水质净化厂经常要通过观察和测定活性污泥的工作状况，从而预测处理出水的好坏。本实验的目的：

- (1) 了解评价活性污泥性能的四项指标及其相互关系。
- (2) 掌握 SV、SVI、MLSS、MLVSS 的测定和计算方法。

## 二、实验原理

活性污泥的评价指标一般有混合液悬浮固体浓度 (MLSS)、混合液挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS)、污泥沉降比 (SV)、污泥体积指数 (SVI) 和污泥龄等。

混合液悬浮固体浓度 (MLSS) 又称混合液污泥浓度。它表示曝气池单位容积混合液内所含活性污泥固体物的总质量，由活性细胞 (Ma)，内源呼吸残留的不可生物降解的有机物 (Me)、入流水中生物不可降解的有机物 (Mi) 和入流水中的无机物 (Mii) 4 部分组成。混合液挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS) 表示混合液活性污泥中有机性固体物质部分的浓度，即由 MLSS 中的前三项组成。活性污泥净化废水靠的活性细胞 (Ma)，当 MLSS 一定时，Ma 越高，表明污泥的活性越好，反之越差。MLVSS 不包括无机部分 (Mii)，所以用其来表示活性污泥的活性数量上比 MLSS 为好，但它还不真正代表活性污泥微生物 (Ma) 的量。但测定方法简单易行，也能够一定程度上表示相对的生物量因此广泛用于活性污泥处理系统的设计、运行。对于生活污水和以生活污水为主体的城市污水，MLVSS 与 MLSS 的比值在 0.75 左右。性能良好的活性污泥，除了具有去除有机物的能力以外。还应有好的絮凝沉降性能。这是发育正常的活性污泥所具有的特性之一。也是二沉池正常工作的前提和出水达标的保证。活性污泥的絮凝沉降性能，可用污泥沉降比 (SV) 和污泥体积指数 (SVI) 这两项指标来加以评价。污泥沉降比是指曝气池混合液在 100mL 量筒中沉淀 30min，污泥体积和混合液体积之比，用百分数 (%) 表示。活性污泥混合液经 30min 沉淀后，沉淀污泥可接近最大密度，因此可用 30min 作为测定污泥沉降性能的依据。一般生活污水和城市污水的 SV 为 15%~30%。污泥体积指数 (SVI) 是指曝气池混合液经过 30min 沉淀后，每克干污泥所形成的沉淀污泥所占有的容积，以 mL 计，即 mL/g。污泥沉降性能较差；如 SVI 较小，污泥颗粒密实，污泥老化，沉降性能好。但如 SVI 过低，则污泥矿化程度高，活性及吸附性能都较差。一般来说，当 SVI<100 时，污泥沉降性能良好；当 SVI=100~200 时，沉降性能一般；而当 SVI>200 时，沉降性能较差，污泥易膨胀。一般城市污水的 SVI 在 100 左右。

## 三、实验仪器、设备、制剂及系统原理

1、生物曝气池；2、电子分析天平；3、烘箱；4、马弗炉；5、量筒：100mL；6、锥形瓶：250mL 若干；7、短颈漏斗：若干；8、称量瓶：40×70mm，若干。9、瓷坩埚：50mL 若干；10 干燥器：1 只；11、

moticBA200 显微镜、计算机、载玻片、盖玻片。

#### 四、实验步骤与方法

1、将 12.5cm 的定量中速滤纸折好并放入已编号的称量瓶中，在 103~105°C 的烘箱中烘 2h，取出称量瓶，放入干燥器中冷却 30min，在电子天平上称重，记下称量瓶编号和质量  $m_1$ (g)。

2、将已编号的瓷坩埚放入马弗炉中，在 600°C 温度下灼烧 30min，取出瓷坩埚，放入干燥器冷却 30min，在电子天平上称重，记下坩埚编号和质量  $m_2$  (g)。

3、用 100mL 量筒量取混合液 100mL ( $V_1$ )，静置沉淀 30min，观察活性污泥在量筒中的沉降现象，到时记录下沉淀污泥的体积  $V_2$  (mL)。

4、从已知编号和称重的称量瓶中取出滤纸，放置到已插在 250mL 三角瓶瓶上的玻璃漏斗中，将测定过沉降比的 100mL 量筒内的泥水全部倒入漏斗，过滤(用水冲净量筒，水也倒入漏斗)。

5、将过滤后的污泥连滤纸放入原称量瓶中，在烘箱 103~105°C 烘至恒重 (2h)，取出称量瓶，放入干燥器中冷却 30min，在电子天平上称重，记下称量瓶编号和质量  $m_3$  (g)。

6、取出称量瓶中已烘干的污泥和滤纸，放入已编号和称重的坩埚中，在电炉上炭化后，置于马弗炉中，于 600°C 下灼烧至恒重。取出瓷坩埚，放入干燥器中冷却 30min，在电子天平上称重，记下坩埚编号和质量  $m_4$  (g)。

7、通过微生物相的镜检，观察污泥生长状况，保留镜检照片。

#### 五、实验记录及数据处理

- 1、污泥沉降比计算；
- 2、混合液悬浮固体浓度计算；
- 3、污泥体积指数计算；
- 4、混合液挥发性悬浮固体浓度计算；
- 5、根据实验数据，判断污泥是否接种完成。

#### 六、问题及分析

1、污泥沉降比是反映污泥沉降性能的重要指标，它在活性污泥法处理污水的运行中有何作用？对于城市污水的 SV 值应控制在多少范围内为合适？当 SV 值超过正常运行范围时应采取哪些措施？

2、污泥容积指数是表示活性污泥凝聚沉降和浓缩性能的重要指标，试分析 SVI 值的高或低对活性污泥运行的影响？城市污水的 SVI 值在哪一段范围为合适？

3、测定 MLSS 和 MLVSS 有何实际意义？试作简要的分析。

## 实验 2 污水处理工艺调试

### 一、实验目的

序批式活性污泥法简称 SBR 法，是早期充排式反应器（Fill-Draw）的一种改进，随着自动控制水平的提高，SBR 法又引起人们的重新重视。SBR 法一般具有投资费用少，运行灵活，沉积分离效果好，耐冲击负荷等优点，适合于水量较小的污水处理。

通过本试验要达到下述目的：

- （1）了解间歇式活性污泥法的基本特点和运行操作方法；
- （2）通过测定各项主要指标（COD、DO、MLSS、总磷、总氮等）确定系统运行稳定。

### 二、实验原理

间歇性活性污泥法是一种非稳态的方法，其运行过程包括充水、反应、沉淀、排水（排泥）及闲置等五个阶段（如图 1 所示）。从污水流入到闲置结束构成一个周期，在每个周期里，上述过程都是在一个设有曝气或搅拌装置的反应器内依次进行的。在一个运行周期中，通过测定 COD、DO、MLSS 等指标，观察污泥生长状况，可有效判断污泥培养的情况。

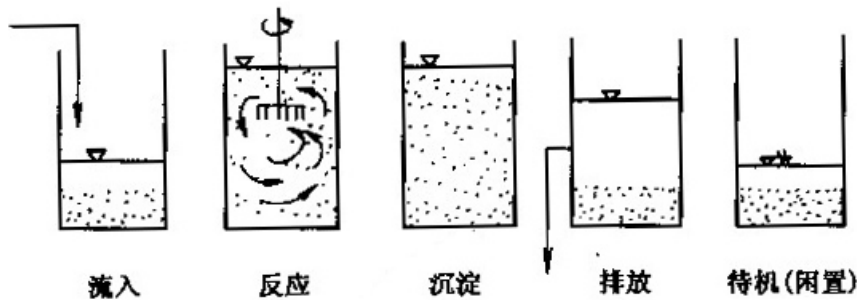


图 1 SBR 工艺的操作过程

### 三、实验仪器、设备、制剂及系统原理

#### （一）试验装置

自动控制 SBR 反应器。

#### （二）设备与仪器、制剂

- 1、生化反应器及充氧装置；
- 2、测定 COD 仪器（COD 消解仪、COD 测定仪、13mm 预制试剂管）、硫酸汞、硫酸-硫酸银；
- 3、溶解氧测定仪；
- 4、测定总磷仪器（DR5000 分析仪、比色皿、比色管）、5%过硫酸钾、1+1 硫酸、钼酸盐、10%抗坏血酸
- 5、测定总氮仪器（DR5000 分析仪、比色皿、比色管）、盐酸（1+9）、碱性过硫酸钾；

其他：洗耳球、各种型号移液管、去离子水、量筒、短颈漏斗、锥形瓶、滤纸、镊子、鼓风干燥箱、分析天平等。

#### 四、实验步骤与方法

- 1、取进出水水样测定 COD，COD 的分析方法为重铬酸钾法；
- 2、用溶解氧仪测定进出水 DO；
- 3、用 pH 计测定进出水 pH；
- 4、测定混合液 MLSS，MLSS 的分析方法为重量法；
- 5、测定进出水水样 TP，TP 的分析方法为钼锑抗坏血酸分光光度法；
- 6、测定进出水水样 TN，TN 的分析方法为紫外分光光度法；

#### 五、实验记录及数据处理

- 1、记录数据 COD、DO、pH、MLSS、TP 和 TN；
- 2、计算 COD、TN、TP 去除率；
- 3、绘制各指标变化趋势图；
- 4、分析实验数据，判断工况是否正常以及系统是否稳定运行。

#### 六、问题及分析

结合实验结果，探讨 SBR 的适用范围和局限。



## 实验3 污水处理工艺运行控制

### 一、实验目的

本实验为城市生活污水处理的模仿实验，污水水源为校园的生活污水，采用 SBR 工艺对其进行处理，旨在将本科阶段所学的污水处理理论知识应用于实践中。通过调节各个处理单元的主要控制参数，实现不同进水负荷的处理达标排放，掌握 SBR 处理工艺的基本调控方法。

### 二、实验原理

在 SBR 的一个运行周期中，各个阶段的运行时间、反应器内混合液体积的变化及运行状态等都可以根据具体污水的性质、出水水质及运行功能要求等灵活掌握。当污泥培养完毕，出水水质较好且稳定，污泥性状较好时，开始工况运行阶段。根据实验条件和实验需要，可设置多个工况。工况的确定就是 SBR 反应器的进水、曝气、静沉、排水时间的确定以及曝气量、进水量、排水量的确定。对不同工况的出水水质、污泥情况以及能耗等方面进行技术经济比较，来确定在一定的实验条件下最适合的工况。

### 三、实验仪器、设备、制剂及系统原理

#### （一）试验装置

自动控制 SBR 反应器。

#### （二）设备与仪器、制剂

1、生化反应器及充氧装置；

2、测定 COD 仪器（COD 消解仪、COD 测定仪、13mm 预制试剂管）、硫酸汞、硫酸-硫酸银；

3、溶解氧测定仪；

4、测定总磷仪器（DR5000 分析仪、比色皿、比色管）、5%过硫酸钾、硫酸（1+1）、钼酸盐、10%抗坏血酸

5、测定总氮仪器（DR5000 分析仪、比色皿、比色管）、盐酸（1+9）、碱性过硫酸钾；

其他：洗耳球、各种型号移液管、去离子水、量筒、短颈漏斗、锥形瓶、滤纸、镊子、鼓风干燥箱、分析天平等。

### 四、实验步骤与方法

1、根据实验条件及实验需要，设置多个工况进行实验，对各个工况的相关测试指标的数据进行比较，以确定该 SBR 反应器在何种情况下运行，处理效果最佳，能耗最少；

2、改变系统有机负荷，设立至少两个工况，在一个工况出水水质稳定达到一周后，再调整至下一工况，监测各指标，考察不同有机负荷下的废水处理效果。

## 五、实验记录及数据处理

- 1、记录各实验指标数据；
- 2、分析废水各指标，评价系统运行特征及处理效果。

## 六、问题及分析

多组同学采用不同的有机负荷进行运行，综合起来可以发现一定的规律。

## 实验 4 准好氧填埋反应器物料配比与装填

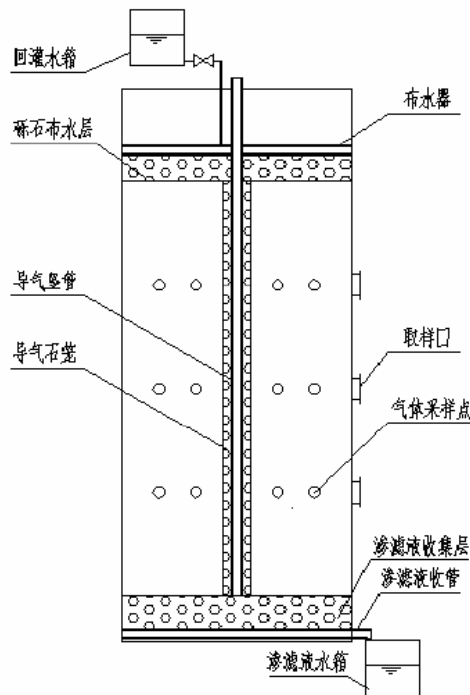
### 一、实验目的

根据填埋场中垃圾降解的机理，填埋场可分为好氧填埋场、厌氧填埋场，以及准好氧填埋场。通过本试验要达到下述目的：

- (1) 对不同构造的准好氧填埋模拟反应器结构进行了解；
- (2) 对进行准好氧填埋模拟反应器本阶段的垃圾物料入场装填；
- (23) 掌握生活垃圾组分分选与理化性质分析方法。

### 二、实验原理

准好氧填埋通过增大排气排水管径，扩大排水和导气空间，使排气管与渗沥液收集管相通，利用大管径的不满流设计使空气与填埋堆体相通，填埋堆体内高温环境造成内外温差，将堆体外空气引入堆体内，在内部形成准好氧环境。垃圾表面、渗沥液导排管、导气石笼周围为好氧状态，而在空气接近不了的填埋体中则为厌氧状态。在好氧区域，垃圾迅速降解；在厌氧区域，部分有机物被分解，还原成硫化氢，垃圾中含有的镉、汞等重金属离子与硫化氢反应，生成不溶于水的硫化物，沉积在填埋体中。



准好氧填埋整合了厌氧卫生填埋和好氧填埋的优势。与厌氧卫生填埋相比，准好氧填埋为垃圾的降解提供了有利条件，垃圾分解较快，堆体稳定速度加快，便于填埋场地的稳定与修复；同时由于垃圾得到有效降解，准好氧卫生填埋产生的渗沥液中 COD、BOD、氨氮浓度较低。经初步的对比测试，与厌氧型填埋场相比，准好氧填埋场所产生渗沥液中 COD 浓度可降低 20%~50%，甲烷单位时间排放量可减少 30%~80%，同时由于填埋场在准好氧条件下可实现快速稳定化，封场 4~6a 后即可开展土地再利用的开发。与好氧填

埋相比，准好氧填埋不需要鼓风设备，建设成本低，能源消耗量少。准好氧填埋因具有填埋结构简单、垃圾降解速度快等优势而成为目前生活垃圾处理处置领域的一个热点。

本实验所涉及的准好氧填埋模拟反应器的结构如图所示。

### 三、实验仪器、设备、制剂及系统原理

1、电子分析天平；2、烘箱；3、pH计；4、瓷盘、牛皮纸；5、分选手套；6、量筒：200mL，100mL，50mL；7、锥形瓶：250mL若干；8、烧杯：若干；9、容量瓶：200mm，500mm，1000mm若干；10、瓷坩埚：50mL若干；14、试剂所需实验药品

### 四、实验步骤与方法

1、了解本次实验中共有6个准好氧填埋模拟柱。分别标号1#，2#，3#，4#，5#，6#，各筒的填料结构见表1，其中1#、2#、3#、4#为对照，能表示相同材料下不同层高的防渗差距，3#和5#、4#和6#构成对照，反映相同高度不同材料下的防渗差距。

表3 各模拟反应器填料层结构

编号	材料	收集层结构粒径/mm	厚度/cm
1#	砾石	15~30	6
2#	砾石	15~30	12
3#	砾石	15~30	18
4#	砾石	15~30	24
5#	卵石	40~50	18
6#	上部	陶粒	8
	下部	砾石	15~30

2、选取校区垃圾收集站的校园生活垃圾，按组分分选，进行各组分的测定；

3、筛除生活垃圾中的金属、玻璃等组分，混合均匀；

4、模拟反应器内下部分为往年已装填垃圾，分别向6个模拟反应器内上半部分进行装填新鲜垃圾，装填高度约10cm，压实；

### 五、实验记录及数据处理

1、分别记录6个准好氧填埋模拟柱的结构特点，分析底部渗滤液收集层不同填埋的材料特点与分布规律。

2、记录新选取生活垃圾的组分特点、含水率等监测数据；

3、分别记录6个准好氧填埋模拟柱装填垃圾的组分、重量、装填高度等参数；

### 六、问题与分析

1、准好氧填埋场的原理是什么？模拟反应器的结构特点是什么？

2、校区生活垃圾的组分特点是什么？填埋场物料装填过程中需注意什么问题？

## 实验5 准好氧填埋工艺下渗滤液回灌与污染物削减

### 一、实验目的

回灌型准好氧填埋场通过对填埋场产生的渗滤液进行回灌，实现填埋场渗滤液的原位消减、减少渗滤液处理站的处理量，降低渗滤液中污染物的排放。通过本试验要达到下述目的：

- (1) 掌握各个准好氧填埋模拟反应器产生的渗滤液进行周期性回灌工艺；
- (2) 评价准好氧填埋工艺下回灌控制工艺与污染物削减机理。

### 二、实验原理

准好氧填埋场结构：集水井末端敞开，利用自然通风，空气通过集水管向填埋场中流通。如填埋层含有有机废弃物，因最初与空气接触，由于好氧分解，产生二氧化碳气体，气体经排气设施或立渠排放。随着堆积的废弃物越来越厚，空气被上层废弃物和覆盖土挡住无法进入下层，下层生成的气体穿过废弃物间的空隙，由排气设施排除。这样，在填埋层中形成与放出的空气体积相当的负压，空气便从开放的集水管口吸进来，向填埋层中扩散，扩大好氧范围，促进有机物分解。但是，空气无法到达整个填埋层，当废弃物层变厚以后，填埋层表层、集水管附近、立渠或排气设施左右部分成为好氧状态。而空气接近不了的填埋层中央部分等处则成为厌氧状态。

在厌氧状态领域，兼氧菌和厌氧菌较活跃。兼性厌氧菌的作用下，垃圾中的有机组分被降解为有机酸和乙醇，部分溶解于渗滤液中被带出，而留在垃圾中的部分则在专性厌氧菌的作用进一步被降解为甲烷和二氧化碳，有的被还原为硫化氢。废弃物中含有的镉、汞和铅等重金属与硫化氢反应，生成不溶于水的硫化物，存留在填埋层中。这种期望在好氧领域有机物分解，厌氧领域部分重金属截留，即好氧厌氧共存的方式，即为准好氧填埋。准好氧填埋在费用上与厌氧填埋无大的差别，而在有机物分解方面又不比好氧填埋逊色，因而得到普及。

渗滤液回灌是将收集后的渗滤液再次回灌入填埋场，利用填埋场堆体内的微生物对渗滤液进行处理的一种技术，它是渗滤液管理的一种有效方法，回灌型准好氧填埋场通过对填埋场产生的渗滤液进行回灌，不仅可大幅提高填埋气的产量、提高垃圾能量转化效率，还能够显著提高垃圾的降解量、实现填埋场渗滤液的原位消减、减少渗滤液处理站的处理量，降低渗滤液中污染物的排放。

### 三、实验仪器、设备、制剂及系统原理

1、电子分析天平；2、烘箱；3、pH计；4、紫外可见光分光光度计；5、消解装置；6、COD分析仪；7、锥形瓶：250mL若干；8、烧杯、试剂瓶：若干；9、容量瓶：200mm，500mm，1000mm若干；10、离心机；11、试剂所需实验药品

### 四、实验步骤与方法

- 1、回灌操作：实验开始2周后进行渗滤液回灌，模拟天然降水过程，按 $14.2\sim 21.2L/(m^3 \cdot w)$ 向各填埋柱回灌渗滤液，频率为每周一次。
- 2、每周监测回灌周期内经过模拟反应器底部渗滤液收集层过滤的渗滤液，监测指标：

- 1) pH, 玻璃电极法, PHS-3C 型 PH 计, 方法参照 GB 6920-86
- 2) COD, 重铬酸钾法, HACH 公司的 COD 测定仪, 方法参照 HJ/T 345-2007
- 3) 氨氮, 纳氏试剂分光光度法, 721 型分光光度计, 方法参照 HJ 535-2009
- 4) 亚硝酸氮, 分光光度法, 721 型分光光度计, 方法参照 GB 7493-87
- 5) 硝酸盐氮, 紫外分光光度法, UV-2800 型紫外可见分光光度计, 方法参照 HJ/T 346-2007
- 6) 凯氏氮, 凯氏定氮法, 2100 型 FOSS 凯氏定氮仪, 方法参照 GB 11891-89
- 7) 硫酸盐, 铬酸钡分光光度法, 721 型分光光度计, 方法参照 HJ/T 342-2007
- 8) 氯离子, 硝酸汞滴定法, 方法参照 HJ/T 343-2007

3、将每周产生的渗滤液经行回灌, 逐步将渗滤液回灌负荷增至  $21.2\sim 28.3\text{L}/(\text{m}^3 \cdot \text{w})$ , 基本属于全回灌。

## 五、实验记录及数据处理

- 1、分别记录 6 个准好氧填埋模拟柱的在所有回灌周期内, 每次收集的渗滤液中的 pH、COD、氨氮、亚硝酸氮、硝酸盐氮、凯氏氮、硫酸盐、氯离子等指标数据;
- 2、绘制渗滤液各污染物数据随着填埋回灌周期的变化曲线,
- 3、分析渗滤液各污染物的变化规律;
- 4、分别分析 6 个准好氧填埋模拟柱不同的渗滤液收集层填料结构 (材料类型、厚度等因素) 对渗滤液污染物削减的影响规律。

## 六、问题与分析

- 1、准好氧填埋场渗滤液回灌的作用机理是什么?
- 2、不同的渗滤液收集层填料结构对渗滤液污染物削减有什么影响? 其中, 材料类型、厚度等因素中什么因素起主要作用?

## 实验 6 汽车尾气三效催化净化试验

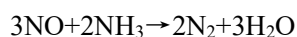
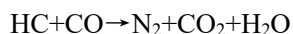
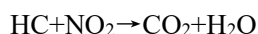
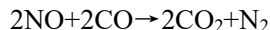
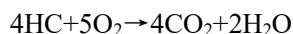
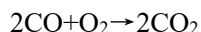
### 一、实验目的

催化转化是气态污染物控制的主要方法之一。目前汽车尾气净化采用的就是三效催化转化方法，即通过催化剂的作用将汽车尾气中的 HC、CO 和 NO<sub>x</sub> 利用氧化还原作用同时转化为无害的 N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 和水。通过本试验要达到下述目的：

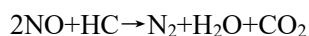
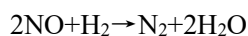
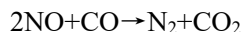
- (1) 加强学生对汽车尾气净化采用的三效催化转化器工作原理的认识和理解；
- (2) 进一步熟悉气态污染物控制的催化转化工艺操作过程；
- (3) 掌握汽车尾气中的 HC、CO 和 NO<sub>x</sub> 等指标的测试分析的基本原理和基本方法。

### 二、实验原理

汽车尾气催化净化的目的就是将有害的 CO 和 HC 氧化为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O，将 NO<sub>x</sub> 还原成 N<sub>2</sub>。由于汽车尾气的化学成分很复杂，其转化率除和催化剂的活性有关外，还和反应气是氧化气还是还原气有关，因此催化剂在功能上分为氧化型和还原型两部分。氧化型催化剂主要催化 CO 和 HC 的氧化反应，有关反应如下：



还原型催化剂主要催化 NO<sub>x</sub> 的还原反应：



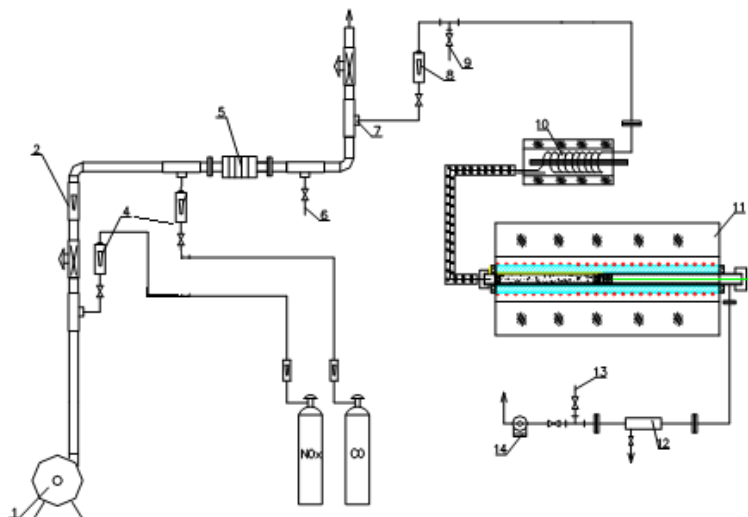
因两种反应要求的化学环境不同，故早期的催化剂将两者分立。后来由于发动机的改进，实现了可使两种功能兼容的化学环境；由于催化剂制备技术的改进，使氧化与还原两种活性中心共存于同一个催化剂上，最终出现了三效催化剂 TWC(three-waycatalyst)。目前最常用的催化器是使用蜂窝型催化(honeycombcatalyst)，载体是陶瓷蜂窝体，其外附载有高比表面积的氧化铝涂层，其上再浸渍活性组分。所以，汽车尾气净化催化剂主要由载体、涂层及活性物质三部分组成。

### 三、实验仪器、设备、制剂及系统原理

大型仪表控制框 1 只、不锈钢反应器 1 套、不锈钢预热器 1 套、不锈钢催化燃烧器 1 套、冷却器 1 套、

恒温水浴温度控制系统、流量计 3 套、铠装热电偶及显示仪 1 套、湿式气体流量计 1 台、三元催化剂 1 套，管路主要由管道、保温材料 1 套、采样口 4 组、漏电保护开关 1 套、电压表 3 只、电流表 3 只、按钮开关 4 只、电源线、连接管道、阀门及固定支架带脚轮等组成。

实验系统流程示意如图所示。



从右向左系统情况如下：

- 1、气泵，提供实验系统载气源；
- 2、制气主气体流量计，计量制气主气体流量；
- 3、挥发性有机物发生系统，配有恒温水浴，与玻璃转子流量计 4 配合用于配制所需浓度的入口挥发性有机气体；
- 4、制气辅助气体流量计，用于控制污染气体发生流量；
- 5、气体阻火器，一方面充分混合待处理气体，一方面防止事故情况下的回火；
- 6、预采样口（选配）
- 7、反应气体分流口；
- 8、反应气体流量计，计量进入催化床的气体流量；
- 9、入口气体采样测定孔（配备了带阀采样嘴和隔垫采样口）；
- 10、可控温气体预加热器，将待反应气体快速加热到较高温度；
- 11、可控温催化反应器，包括加热炉、可拆卸不锈钢反应管（内径 25mm，催化剂恒温装填区域 50mm），配有催化床层反应区温度测定装置；
- 12、反应后气体冷却器，带排液口；
- 13、出口气体采样测定孔（配备了带阀采样嘴和隔垫采样口）；
- 14、湿式流量计；
- 15、CO、NOx 钢瓶座架，各配有流量计 1 只；
- 16、显示控制箱，用于系统的运行控制。



设备结构：本装置由仪表控制柜、操作架台和气瓶座架组成，还需配置 CO 和 NO<sub>x</sub> 钢瓶。操作架台上置有气泵、HC 气体发生器（可用汽油代替）、预热器、反应器、冷却器及转子流量计、湿式流量计、取样器等。仪表控制面板上配有气体发生水浴的温控器、开关及电流、电压显示；预加热炉的温控（缺）、开关及电流、电压显示；催化反应器加热炉的温控器、开关、电流、电压显示、功率调节电位器（电流电压调节）；催化反应器反应床温度显示；数据采集装置；风机开关；漏电断路器等。

主体装置外形尺寸（不包括气瓶座架）：长×宽×高=1400mm×500mm×1800mm

## 四、实验步骤与方法

### \*催化床的准备：

说明：不锈钢反应管的两个端口，一端为催化剂装填口 A，一端为催化床层温度探头安装口 B，均采用旋帽结构。

#### 反应器的拆卸：

- 1、在反应加热炉温度接近常温、电源箱总开关关闭的情况下，旋松反应炉左侧端面中间的反应管旋帽至分离；
- 2、断开反应炉右侧中间的反应管上 6mm 气体支管的快速接头；
- 3、旋松反应炉右侧中间的反应管旋帽至分离，**小心拔出热电偶**；
- 4、从右侧小心拔出不锈钢反应管；
- 5、取出不锈钢反应器内部端口 A 处的固定玻璃棉，倒出石英砂，用工具旋转取出内部的玻璃棉，最后倒出催化剂；

#### 催化剂的安装：催化剂最大装填量（16ml）

- 1、小心清洁拆卸下的反应器，（水洗、烘干）；
- 2、将若干量催化剂（颗粒态，粒径不小于 0.4mm）从反应器 A 端口装入，然后装填入约 5~10mm 厚度的玻璃棉，再装填石英砂至距管口 20~30mm 处（约 60ml），最后用玻璃棉封堵；
- 3、将反应管 A 端小心从加热炉的右侧水平插入至从反应炉左侧端面的中孔中露出，整理好炉膛密闭挡板，旋上入口气体旋帽；
- 4、小心旋上反应炉右侧 B 端旋帽，**小心安装上热电偶探头**；
- 5、连接反应炉右侧中间的反应管上 6mm 气体支管的快速接头。

### \* 催化系统的运行

- 1、首先检查设备系统外况和全部电气连接线有无异常，采样口隔垫是否需要更换，放空阀是否均已打开，管线的速接是否连接到位，HC 气体发生罐是否有足量的汽油等，一切正常后开始操作；
- 2、打开电控箱总开关，合上漏电保护开关；启动数据采集装置

3、按实验要求设定反应加热炉控制温度，启动加热炉开关；

4、**设定预热炉温度（通常低于预定反应温度 20℃左右）；**

5、设定有机气体发生系统恒温水浴温度（大小根据汽油的沸点和所需的浓度确定，由于汽油为混合有机液体，新鲜汽油的蒸气压较大）；

6、模拟尾气配制：由于催化床所需的气体流量较小，且小流量混合气体的配置对器材的要求很高，故本系统采用的解决方法是先配制出较大流量的混合气体再从其中分流出一部分进入催化床，其余排空。具体过程如下（1）HC，待恒温水浴达到指定温度后，启动气泵，调节制气主气体流量计和制气辅助流量计以调整气体浓度（该过程须通过记录流量和水浴温度、测定发生气体浓度来摸索确定）；（2）NO<sub>x</sub> 和 CO 可根据外购气瓶气体浓度、所需模拟尾气气体成分浓度通过制气主流量计和 NO<sub>x</sub>、CO 各自的流量计控制调节。

**气瓶的开关操作应严格按有关的程序进行！**

7、当反应炉温度达到指定温度时，测定不同气体流量下的进出口气体浓度，确定催化转化率；

8、还可调节反应炉温度进行不同工况的实验；

9、实验结束时首先关闭气体加热、反应加热炉和恒温水浴的电源开关；

10、关闭制气辅助流量计开关，按气瓶操作程序和要求关闭 NO<sub>x</sub>、CO 气瓶，同时调节试验气体流量为最大对实验系统进行清洁；

11、待反应炉温度下降到 150℃以下时关闭气泵；

12、关闭控制箱主电源；

13、打开反应器气体冷却器的排液口阀门，排空可能有的液体，然后关闭排液口阀门；

14、检查设备状况，没有问题后离开。

## 五、实验记录及数据处理

1、分别记录保持风量和催化剂反应温度不变，6 组不同入口 CO 和 NO<sub>x</sub> 浓度下，CO 和 NO<sub>x</sub> 出口浓度，并计算器催化转化率；

2、分别记录保持风量和入口 CO 和 NO<sub>x</sub> 浓度不变情况下，6 组不同催化剂反应温度下，CO 和 NO<sub>x</sub> 出口浓度，并计算器催化转化率；

3、绘制 CO 和 NO<sub>x</sub> 转化率随着催化剂反应温度变化的变化曲线，

4、分析 CO 和 NO<sub>x</sub> 转化率的变化规律；

## 六、问题与分析

1、汽车尾气净化三效催化器的作用机理是什么？

2、不同的催化剂载体、活性组分、反应温度对汽车尾气污染物削减有什么影响？

## 实验 7 物理吸附法控制 VOCs 系统

### 一、实验目的

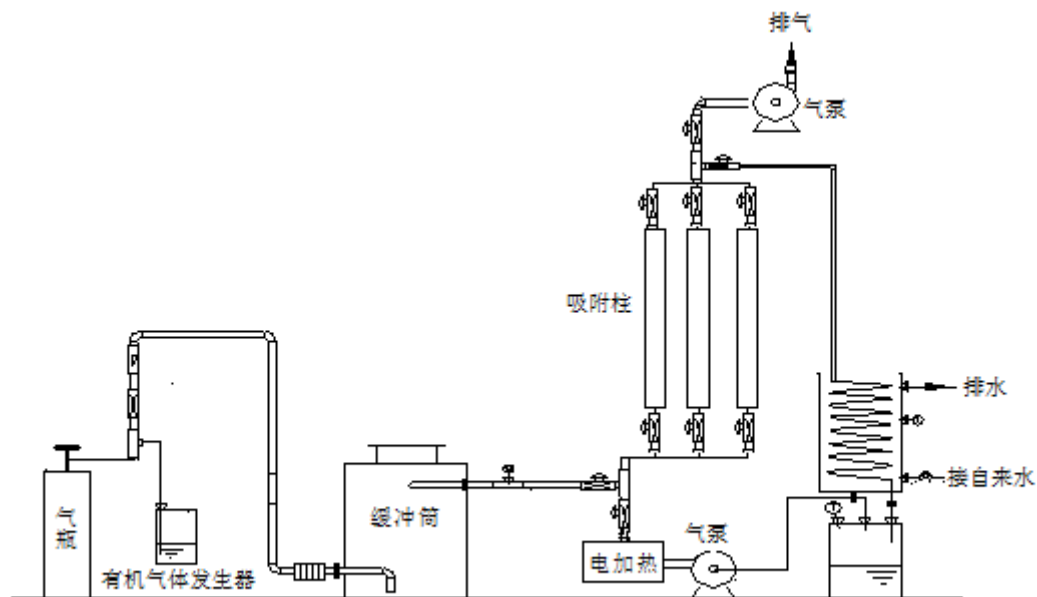
含 VOCs 的气态混合物与多孔性固体接触时，利用固体表面存在的未平衡的分子吸引力或化学键作用力，把混合气体中 VOCs 组分吸附在固体表面，这种分离过程称为吸附法控制 VOCs 污染。吸附操作已广泛应用于石油化工、有机化工的生产部门，成为一种重要的操作单元。

通过本试验要达到下述目的：

- (1) 加强学生对物理吸附法控制 VOCs 工作原理的认识和理解；
- (2) 掌握物理吸附法控制 VOCs 的半连续式固定床工艺的调控方法。

### 二、实验原理

活性炭吸附热空气再生系统流程如附图所示。



系统包括主风机，有机气体发生系统，气体混合缓冲罐，吸附塔，空气加热器和冷凝回收系统及回收系统循环风机，数据自动采集系统和控制箱等。全系统主要由不锈钢塔罐和管线构成，可进行有机气体吸附和热解析的过程试验。系统还配置了一座有机玻璃制吸附塔供学生了解固定床吸附塔的构造情况。

实验顺序为先进进行吸附试验再进行脱附试验。

在切断再生循环系统回路的情况下，可进行吸附试验。含污染物系统由鼓泡发生系统产生。主风机鼓出的空气一路调节计量后直接进入系统，另一股较小流量气体通过水浴锅恒温的发生瓶鼓泡后产生含较高浓度有机物的气体。两股气流混合后进入缓冲罐即可得到浓度较为均匀的含有机物气体。该气体通过吸附

床吸附净化后排出。通过测定不同通气时间对应的不同断面浓度的变化，可分析固定床吸附过程的有关参数。通过吸附床断面上的温度探头可监视吸附过程温升效应。

吸附柱穿透后，关闭主风机和发生系统，断开吸附塔的进出口阀，打开再生循环系统回路阀门，可进行脱附试验。首先确保打开冷凝系统的冷却水阀门，形成持续的溢流水。然后通过循环风机和空气电加热系统持续对吸附柱进行热解析再生。脱附的气体中的有机物部分冷凝析出后流入冷凝器下方的储液管回收。

注意：再生过程中循环系统（包括吸附塔均处在高温状态!!，切勿触碰!!）

关闭再生系统的空气加热后，循环通风，待吸附塔温度降到室温后，关闭冷却水。此时可进行下一轮试验。

### 三、实验仪器、设备、制剂及系统原理

#### （一）试验装置

VOCs 的半连续式固定床（含三组吸附柱、活性炭热空气再生系统）

#### （二）设备与仪器、制剂

- 1、VOCs 气瓶装置；
- 2、在线 VOCs 测定仪器；
- 3、在线温度计；
- 4、自动数据采集系统

其他：洗耳球、各种型号移液管、去离子水、量筒、短颈漏斗、锥形瓶、滤纸、镊子、鼓风干燥箱、分析天平等。

### 四、实验步骤与方法

#### 1. 准备工作

- 1.1 检查发生源的水浴锅是否有水。打开水浴锅进水阀门，确定水浴锅溢流管出水即可，关闭水浴锅进水阀门。
- 1.2 检查（或加入）有机气体发生瓶中是否有有机物（建议采用甲苯）液体，通过探棒确定大致液位（3~8cm）并确保旋帽密闭。
- 1.3 检查冷凝器中是否有水。打开自来水进水阀，确定排水口有出水。
- 1.4 检查确定气体发生罐流量阀 V3 的阀门处于关闭，流量计 1 前的 V1 和 V2 阀门处于开启。

#### 2. 系统的启动与运行

##### 2.1 吸附试验过程

- 2.1.1 通过控制箱的 T1 温控仪表盘设定发生源水浴锅水温为  $30 \pm 2^\circ\text{C}$ 。
- 2.1.2 确定缓冲管手孔处密闭，所有采样口阀门处于关闭状态。
- 2.1.2 确定阀门 v4 和 v5 处于开启状态，v6 和 v7 处于关闭状态。

- 2.1.3 打开控制箱总电源，检查温度表盘显示是否正常，启动数据自动采集系统
- 2.1.4 启动主风机开关，通过调节 V1 和 v2 调节流量计 1 的流量为 2~6m<sup>3</sup>/h
- 2.1.5 打开 V3 调节流量计 2 的流量为 0.1~0.3 m<sup>3</sup>/h。
- 2.1.6 在不同时刻数据采集系统分别通过 S1。。S4 采样测定气体中有机物浓度。（也可通过采样口通过气相色谱或其他检测仪器进行气相浓度测定）
- 2.1.7 待 S4 出口浓度开始升高到设定值后，首先关闭 V3，然后过 5 分钟后关闭主风机，关闭 V4 和 v5，吸附过程结束。

## 2.2 热解析过程

- 2.2.1 确保 V4、V5 已关闭，打开 V6 和 V7。
- 2.2.2 打开冷凝器进水阀（重要!!!）
- 2.2.3 关闭 V9，启动循环气泵并通过 V8 调节流量为 0.2~0.6m<sup>3</sup>/h。
- 2.2.4 设定电加热装置控制温度表盘 T5 为 140~200±5℃。
- 2.2.5 启动电加热系统开始热风解析。  
注意：此时系统部分管线温度升高，切记勿触碰管线!!!  
通常 40~60 分钟后，解析过程完成。
- 2.2.6 关闭电加热系统，循环通风 20 分钟后，待 T4 温度低于 30℃后可停止循环气泵，关闭冷凝器自来水阀。  
如有机物量积累较多，打开有机物冷凝收集罐底阀排放。

## 3. 系统的关闭

吸附和解析可交替进行，如有些有机物在短时间内无法完全解析，可适当提高解析温度（本试验上限为 200℃）增加解析时间。

试验结束后打开有机物冷凝收集罐底阀，排空收集管。

最后关闭数据采集系统，关闭控制箱主开关。

## 五、 实验记录及数据处理

- 1、记录各实验指标数据；
- 2、分析 VOCs 净化指标，评价系统运行特征及处理效果。

## 六、 问题及分析

多组同学采用不同的进气 VOCs 负荷进行运行，综合起来可以发现一定的规律。

## 十一、课程目标考核与评价方式和成绩比例

本课程的成绩评定采用五级计分制，主要考察实验表现和实验报告，实验表现占 40%（其中考勤 10%、实验操作及交流 30%）、实验报告占 60%，考核评价覆盖了所有的课程目标（10 个毕业要求指标点）。课程目标考核、评价方式及成绩比例见表 4。

表 4 课程目标考核、评价方式及成绩比例

序号	课程目标	毕业要求指标点	考核与评价方式、成绩比例 (%)		成绩比例 (%)
			实验表现	实验报告	
1	能将所学相关知识综合运用用于污水处理 SBR 系统和固体废物填埋处理系统的优化、调试及运行中，实现 SBR、填埋系统、汽车尾气三效催化净化装置和物理吸附法控制 VOCs 系统各项指标达标。	1-4	5	/	5
2	在实验过程及报告中，归纳总结相关数据，分析实验现象，判断 SBR、填埋系统、汽车尾气三效催化净化装置和物理吸附法控制 VOCs 系统的运行状态。	2-4	5	15	20
3	根据分析判断，发现 SBR、填埋系统、汽车尾气三效催化净化装置和物理吸附法控制 VOCs 系统运行过程中存在的问题，并能运用相关知识诊断出导致该问题的关键原因。	4-1	10	/	10
4	能按照问题分析及其诱因分析结果，提出针对性解决办法，能在此基础上改进或设计新的实验方案，并开展相关实验解决问题。	4-2	10	/	10
5	总结分析实验过程的相关数据和现象，总结 SBR、填埋系统、汽车尾气三效催化净化装置和物理吸附法控制 VOCs 系统关键运行控制参数。	4-3	/	15	15
6	在实验报告中对实验数据进行详细归纳，要求图表详细，问题描述清楚，分析详细，结论准确。	5-2	/	15	15
7	对所提出的问题解决方案进行二次分析，比较方案改变前后的利弊及后续影响。	6-3	/	6	6
8	总结实验中发现的新现象新规律。	7-3	/	3	3
9	遵守实验纪律（含考勤）；实验小组做到分工明确，又团结协作，共同完成课程内容。	9-2	5	/	5
10	善于在实验过程中沟通交流，表达专业准确；实验报告用语规范专业。	10-2	5	6	11
			40	60	100