



全国高等院校环境科学与工程统编教材

环境工程综合实验

HUANJING GONGCHENG ZONGHE SHIYAN

刘延湘 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

环境工程综合实验

主 编 刘延湘

副主编 石 零 米 铁

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书按照环境污染控制技术分为三个部分,内容包括水污染控制工程综合实验、大气污染控制工程综合实验及固体废弃物处理与利用综合实验。各部分主要针对一些环境实际问题,选择一些经典及目前应用性较强的处理技术设计成综合性的实验。

本书可作为高等学校环境工程及相关专业本科生、研究生的实验教材或参考书,也可以供相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境工程综合实验/刘延湘主编. —武汉:华中科技大学出版社,2019.5
ISBN 978-7-5680-5125-5

I. ①环… II. ①刘… III. ①环境工程-实验 IV. ①X5-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 062544 号

环境工程综合实验

Huanjing Gongcheng Zonghe Shiyān

刘延湘 主编

策划编辑:王新华

责任编辑:李 佩 王新华

封面设计:潘 群

责任校对:李 琴

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉正风天下文化发展有限公司

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:6.5

字 数:135千字

版 次:2019年5月第1版第1次印刷

定 价:22.00元



华中大版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

随着社会变革与产业革命的挑战,国务院出台了《关于深化高等学校创新创业教育改革的实施意见》和《统筹推进世界一流大学和一流学科建设总体方案》,提出要围绕国家的创新驱动发展战略,深化高校创新创业教育改革,培养具有历史使命感和社会责任心、富有创新精神和实践能力的各类创新型、应用型、复合型优秀人才。实施卓越工程师培养计划、开展工程教育专业认证、发展战略新兴产业相关专业及建设和发展新工科等都强调了人才培养的新内涵、新期望。环境工程是一门重点发展的新兴应用性技术学科,主要解决复杂环境体系中产生的环境问题,必须建立在实验应用的基础上。环境工程实验是环境工程学科的重要组成部分,其中综合性、设计性实验是提高学生综合能力、创新能力的重要途径,要求学生把已学的基础理论及掌握的基本实验方法及技能有效地融合,解决实际环境中有一定难度的复杂问题,以此培养学生学习的主动性、积极性和分析问题、解决问题的能力。

本书共分三部分,第一部分为水污染控制工程综合实验,第二部分为大气污染控制工程综合实验,第三部分为固体废弃物处理与利用综合实验。各部分的实验都是针对当前一些环境问题,结合一些新的处理技术及设备,同时参考了教师积累多年的科研成果编写而成。

本书由刘延湘担任主编,石零、米铁担任副主编,刘君侠、刘晓烨、岳琳、常玉锋参加编写。本书出版得到江汉大学研究生教材建设项目及教务处教材出版基金的资助,在编写过程中借鉴了同行学者的文献资料,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和不成熟之处,敬请同行和读者批评指正,使之更加完善。

编 者

目 录

第一部分 水污染控制工程综合实验	1
实验一 混凝法处理受污染的地表水	1
一、实验目的	1
二、实验原理	1
三、实验设备与试剂	2
四、实验内容与步骤	3
五、注意事项	4
六、实验结果记录与分析整理	5
七、思考题	7
实验二 气浮法处理工业乳化废水	7
一、实验目的	7
二、实验原理	7
三、实验装置及材料	8
四、实验步骤	9
五、实验结果记录与分析整理	9
六、注意事项	10
七、思考题	10
实验三 高级氧化法处理有机废水实验	10
一、实验目的	10
二、实验原理	11
三、实验仪器与试剂	14
四、实验内容与步骤	14
五、实验结果记录与分析整理	16
六、思考题	20
七、注意事项	20
实验四 SBR+MBR 工艺处理生活污水实验	20
一、实验目的	20

二、实验原理	20
三、实验设备和材料	22
四、实验内容和步骤	23
五、实验结果记录与数据整理	28
六、注意事项	29
七、思考题	29
实验五 UASB 处理高浓度有机废水实验	29
一、实验目的	29
二、实验原理	29
三、实验仪器及材料	31
四、实验内容与步骤	32
五、注意事项	32
六、实验结果记录与数据处理	33
七、思考题	33
实验六 废水处理组合流程设计实验	34
一、实验目的	34
二、实验设计内容	34
三、实验安排	36
四、实验总结与实验报告	37
第二部分 大气污染控制工程综合实验	39
实验一 烟气采样实验	39
一、实验目的	39
二、烟气中颗粒物采样实验	39
三、烟气中气态污染物采样实验	42
四、烟气中水分含量采样实验	44
五、思考题	45
实验二 烟气除尘实验	46
一、实验目的	46
二、粉尘粒径测试实验	46
三、粉尘比电阻测试实验	47
四、电极放电特性测试实验	50
五、静电除尘器除尘效率测定实验	51
六、思考题	53

实验三 烟气脱硫实验	54
一、实验目的	54
二、石灰石/石灰法脱硫实验	54
三、自由纤维旋线除雾实验	56
四、思考题	57
实验四 烟气脱硝实验	58
一、实验目的	58
二、选择性非催化还原法脱硝实验	58
三、选择性催化还原法脱硝实验	60
四、思考题	62
实验五 烟气 VOCs 脱除实验	62
一、实验目的	62
二、实验原理	63
三、实验设备与装置	64
四、实验内容与步骤	64
五、实验结果记录与分析整理	65
六、注意事项	66
七、思考题	66
第三部分 固体废弃物处理与利用综合实验	69
实验一 城市生活垃圾的处理工艺实验	69
一、实验目的	69
二、实验原理	69
三、实验仪器和材料	70
四、实验内容与步骤	71
五、实验结果记录与分析整理	72
六、注意事项	73
七、思考题	74
实验二 有害废物的固化处理和浸出毒性实验	74
一、实验目的	74
二、实验原理	74
三、实验设备及材料	75
四、实验内容与步骤	76
五、实验结果记录及分析整理	77

六、注意事项	78
七、思考题	78
实验三 有机废弃物-生物质热解实验	78
一、实验目的	78
二、实验原理	78
三、实验材料与仪器	80
四、实验内容与步骤	80
五、实验结果记录与分析处理	81
六、注意事项	83
七、思考题	83
实验四 高湿中药废渣制备活性炭及其对 CO ₂ 的吸附实验	83
一、实验目的	83
二、实验原理	84
三、实验材料与仪器	85
四、实验内容与步骤	86
五、实验结果记录与分析处理	86
六、注意事项	87
七、思考题	87
实验五 生物质气化特性实验	87
一、实验目的	87
二、实验原理	87
三、实验材料与仪器	89
四、实验内容与步骤	91
五、实验结果记录与分析处理	91
六、注意事项	93
七、思考题	93

第一部分 水污染控制工程综合实验

实验一 混凝法处理受污染的地表水

一、实验目的

(1) 通过烧杯实验,观察混凝现象及过程,了解混凝沉淀的净水机理及影响混凝的主要因素。

(2) 了解实验设计的方法,掌握优化混凝工艺条件的方法;单因素实验和正交实验,找出影响混凝沉淀的主要因素,并确定混凝工艺的最佳工艺参数。

二、实验原理

我国城镇普遍存在不同比例的直排污水,导致大部分的城市地表水域受到严重污染,河湖黑臭现象成为制约我国社会、经济发展,影响我国形象和生态安全的重大环境问题。国务院颁布实施的《水污染防治行动计划》(“水十条”)明确了消除黑臭水体的时间表,利用混凝沉淀处理可以快速使受污染地表水变澄清并消除臭味。

分散在水中粒径小的悬浮物以及胶体物质,由于微粒的布朗运动,胶体颗粒间的静电斥力和胶体的表面作用,长期处于稳定分散状态,不能用自然沉淀法去除。混凝的处理对象主要是废水中的微小悬浮物和胶体物质。根据胶体的特性,在废水处理过程中通常采用投加电解质、不同电荷的胶体或高分子等方法破坏胶体的稳定性,然后通过沉淀分离,达到废水净化的目的。关于混凝主要有以下四种机理。

1. 压缩双电层机理

当两个胶粒相互接近以至双电层发生重叠时,产生静电斥力。加入的反离子与扩散层原有反离子之间的静电斥力将部分反离子挤压到吸附层中,从而使扩散层厚度减小。由于扩散层变薄,胶粒相撞时的距离减小,相互间的吸引力变大。胶粒间排斥力与吸引力的合力由斥力为主变为以引力为主,从而使胶粒相互凝聚。

2. 吸附电中和机理

异性胶粒间相互吸引达到电中和而凝聚;大胶粒吸附许多小胶粒或异性离子,使

电位降低,吸引力使同性胶粒相互靠近发生凝聚。

3. 吸附架桥机理

吸附架桥作用是指链状高分子聚合物在静电引力、范德华力和氢键等作用下,通过活性部位与胶粒和细微悬浮物等发生吸附桥连的现象。

4. 沉淀物网捕机理

当采用铝盐或铁盐等高价金属盐类作凝聚剂时,若投加量很大而形成大量的金属氢氧化物沉淀,则可以网捕、卷扫水中的胶粒,并以这些沉淀为核心产生沉淀。这基本上是一种机械作用。

消除或降低胶粒稳定因素的过程称为脱稳。脱稳后的胶粒,在一定的水力条件下,才能形成较大的絮凝体,俗称矾花。直径较大且较密实的矾花容易下沉。投加混凝剂使水中胶粒和微小悬浮物形成较大矾花的过程称为混凝。在混凝过程中,上述现象常常不是单独存在的,往往同时存在,只是在一定情况下以某种现象为主。

在混凝沉淀处理过程中,影响混凝沉淀效果的因素较多,主要有水质特征、水温、pH 值、混凝剂及其投加量、混凝剂的投加顺序、水流速度梯度等。

为了迅速找到最佳的反应条件,需要通过实验设计,合理安排实验点,减少实验的工作量。单因素分析法是将 N 个变量中固定 $N-1$ 个变量,改变一个变量。这种方法能确定某个变量对整个实验的影响趋势,最终找到特定环境下的最优方案。在单因素实验结果的基础上,确定正交实验的因素与水平,优化混凝沉淀的最佳工艺条件。

正交实验设计是研究多因素水平的一种设计方法,它是根据正交性从全面实验的所有变量中选取具有代表性的几个变量进行实验,而这些具有代表性的因素具有“均匀分散、齐整可比”的特点。正交实验是一种快速、高效、经济的实验方法。正交实验法就是利用排列整齐的正交表对实验进行整体设计、综合比较、统计分析,实现通过较少的实验次数找到最佳的生产条件,以达到最好的生产工艺效果。

三、实验设备与试剂

1. 实验设备

- (1) 六联自动混凝实验搅拌器 1 台。
- (2) COD 快速测定分析成套装置 1 套。
- (3) pH S-2 型酸度计或精密 pH 试纸。
- (4) 光电浊度仪 1 台。
- (5) 烧杯(1000 mL、100 mL、200 mL,各 6 个)。
- (6) 移液管(1 mL、2 mL、5 mL、10 mL,各 1 支)。
- (7) 量筒 1000 mL 1 个。

2. 实验试剂

- (1) 混凝剂:聚合氯化铝(PAC),浓度 10 g/L。
- (2) 盐酸、氢氧化钠(浓度 10%)。
- (3) 城市黑臭水(COD > 100 mg/L)。

四、实验内容与步骤

(一) 单因素条件选择实验

1. 水样水质特征

取较典型的城市黑臭水样 50 L,测定其浊度和 COD、pH 值、温度等。

2. 混凝条件实验

选择聚合氯化铝(PAC)作为混凝剂对其进行混凝沉淀处理,通过混凝实验确定混凝剂的最佳投药量、最佳 pH 值、最佳水流速度梯度 3 个参数。

(1) 最佳投药量实验

① 形成矾花所用的最小混凝剂量:取 400 mL 污水样置于 1 L 的烧杯中,在搅拌器上进行慢速搅拌(40 r/min),向其中分次投加混凝剂聚合氯化铝溶液,从 0.5 mL 开始,每次增加 0.5 mL 直至出现矾花为止,记录混凝剂投加总量即是形成矾花的最小投加量。

② 在 6 个 1000 mL 的烧杯中分别放入 1000 mL 原水,然后编号,置于实验搅拌器平台上,根据形成矾花的最小混凝剂的投加量,取其 1/4 作为 1 号烧杯的混凝剂投加量,取其 2 倍作为 6 号烧杯的混凝剂投加量,用依次增加混凝剂投加量相等的方法求出 2~5 号烧杯混凝剂投加量,把混凝剂分别加入 1~6 号烧杯中。

③ 启动搅拌器:快速搅拌 30 s,转速约 300 r/min;中速搅拌 6 min,转速约 100 r/min;慢速搅拌 6 min,转速约 40 r/min。

④ 关闭搅拌器,抬起搅拌桨,静置沉淀 10 min,取上层清液,测定其浊度及 COD,(每杯水样测定三次),记入表 1-1-1 中,以沉淀水浊度、COD 为纵坐标,混凝剂投加量为横坐标,绘出浊度、COD 与药剂投加量关系的曲线,从图上求出最佳混凝剂投加量。

(2) 最佳 pH 值实验

① 在 6 个 1000 mL 的烧杯分别放入 1000 mL 原水,用稀盐酸、稀氢氧化钠调节原水 pH 值,分别为 3、4、5、7、8、9。

② 利用加药管,向各烧杯中加入相同剂量的混凝剂(最佳剂量采用实验 1 中得出的最佳投药量结果)。

③ 启动搅拌器:快速搅拌 30 s,转速约 300 r/min;慢速搅拌 6 min,转速约 40 r/min。

④ 关闭搅拌机,抬起搅拌桨,静置沉淀 10 min,取上层清液,测定其浊度及 COD(每杯水样测定三次),记入表 1-1-2 中。

(3) 最佳水流速度梯度实验

① 按照最佳混凝 pH 值和最佳投药量,分别调节 6 个 1000 mL 烧杯中水样的 pH 值和投加混凝剂,置于实验搅拌机平台上。

② 启动搅拌机快速搅拌 30 s,转速约 300 r/min。随即把其中 5 个烧杯移置搅拌机上,1 号烧杯继续以 20 r/min 搅拌 20 min。其他各烧杯分别用 50 r/min、90 r/min、150 r/min、200 r/min、300 r/min 搅拌 20 min,记录相应的速度梯度 G 值。

③ 关闭搅拌机,静置 10 min,分别取上层清液,测定其浊度及 COD(每杯水样测定三次),记入表 1-1-3 中。

④ 以沉淀水浊度、COD 为纵坐标,速度梯度 G 值为横坐标绘出浊度、COD 与 G 值的关系曲线,从曲线上求出所加混凝剂混凝阶段适宜的 G 值。

(二) 正交优化设计实验

在单因素实验结果的基础上,确定正交实验的因素与水平,优化混凝沉淀的最佳工艺条件。

1. 挑选因素,选水平,制定因素水平表

根据上述实验选取三因素五水平,三因素分别为:pH 值、混凝剂用量和速度梯度 G 值。选择使用 $L_{25}(3^5)$ 正交实验方案(表 1-1-4),一般水处理中,混合阶段的 G 值为 $500 \sim 1000 \text{ s}^{-1}$,混合时间为 $10 \sim 30 \text{ s}$,一般不超过 2 min ;在反应阶段, G 值为 $10 \sim 100 \text{ s}^{-1}$,停留时间一般为 $15 \sim 30 \text{ min}$;沉淀 $20 \sim 40 \text{ min}$ 。

2. 选做正交表,进行实验

根据以上选择的因素水平,确定 $L_{25}(3^5)$,建立三因素五水平正交表(表 1-1-4)。

3. 确定实验方案,完成实验

根据确定的因素顺序入列,水平对号入座,列出实验条件,填写实验结果,如表 1-1-5 所示。实验评价指标:选择混凝沉淀效果的指标为浊度去除率及 COD 去除率。

五、注意事项

(1) 整个实验过程中采用均匀水样,取样时搅拌均匀。

(2) 在最佳投药量、最佳 pH 值实验中,向各烧杯投加药剂时要求同时投加,避免因时间间隔较长各水样加药后反应时间长短相差太大,混凝效果悬殊。

(3) 在测定水的浊度、用注射针筒抽吸上层清液时,不要扰动底部沉淀物。同时,各烧杯抽吸的时间间隔尽量减小。

(4) 正交实验中一个因子对应一列,不能两个因子对应同一列。

(5) 任何两列所构成的各有序数对出现的次数都一样多,每一列中各数字出现的次数都一样多。

(6) 根据实验教学的安排与要求,可以在完成单因素实验的基础上,选做正交优化实验,或利用混凝沉淀联合处理污水实验。

六、实验结果记录与分析整理

(1) 实验结果记录

原水浊度：_____ 原水温度：_____ 原水 COD：_____ 原水 pH 值：_____

表 1-1-1 混凝剂最佳投加量的选择

水 样 编 号		1	2	3	4	5	6
混凝剂投加量/mL							
矾花观察情况							
沉淀水浊度	1						
	2						
	3						
	均值						
出水 COD /(mg/L)	1						
	2						
	3						
	均值						

表 1-1-2 混凝最佳 pH 值的选择

水 样 编 号		1	2	3	4	5	6
pH 值							
混凝剂投加量/mL							
矾花观察情况							
沉淀水浊度	1						
	2						
	3						
	均值						
出水 COD /(mg/L)	1						
	2						
	3						
	均值						

表 1-1-3 混凝最佳速度梯度 G 值的选择

水 样 编 号		1	2	3	4	5	6
pH 值							
混凝剂投加量/mL							
速度梯度 G 值/s ⁻¹							
矾花观察情况							
沉淀水浊度	1						
	2						
	3						
	均值						
出水 COD /(mg/L)	1						
	2						
	3						
	均值						

(2) 以沉淀水浊度、COD 为纵坐标,投药量为横坐标,绘制关系曲线,从曲线上求出最佳投药量。

(3) 以沉淀水浊度、COD 为纵坐标,水样 pH 值为横坐标,绘制关系曲线,从图上求出所投加混凝剂的混凝最佳 pH 值及其适用范围。

(4) 以沉淀水浊度、COD 为纵坐标,速度梯度 G 值为横坐标,绘制关系曲线,从曲线上求出所加混凝剂混凝阶段适宜的 G 值。

(5) 正交实验结果分析与评价

对实验结果进行统计分析:极差分析,方差分析。根据分析结果,确定优化工艺的方案。

表 1-1-4 正交实验因素水平表

水 平	因 素		
	pH 值	混凝剂用量/mL	速度梯度 G 值/s ⁻¹
1			
2			
3			
⋮			

表 1-1-5 正交实验表

实验编号	pH 值	混凝剂用量/mL	G 值/ s^{-1}	浊度去除率/(%)	COD 去除率/(%)
1					
2					
3					
⋮					

七、思 考 题

- (1) 根据实验结果以及实验中所观察到的现象,简述影响混凝的几个主要因素。
- (2) 为什么达到最大投药量时,混凝效果不一定好?
- (3) 正交实验与单因素实验的特点是什么?
- (4) 正交实验设计的关键步骤是什么?

实验二 气浮法处理工业乳化废水

一、实 验 目 的

- (1) 理解工业乳化废水的特点及处理方法。
- (2) 掌握加压溶气气浮法以及其实验系统的运行。
- (3) 掌握影响气浮法处理效果的主要因素,了解气浮法处理的工艺流程。
- (4) 了解常见的破乳方法,根据要求选择合适的破乳方法。

二、实 验 原 理

乳化液废水是一种排量巨大且污染面广的污染源,主要来自石油、化工、钢铁、焦化、煤气发生站、机械等工业企业。乳化液废水的特点是品种繁多、COD 和含油量浓度高、处理难度大。国内外已开发了一些乳化液废水处理技术,如:化学法(化学破乳法、混凝-气浮法)、生化法、电解法、离心分离法、吸附过滤法、膜过滤法等,其中混凝-气浮法是较常见的处理工艺。

加压溶气气浮法是通过向废水中通入空气(或其他难溶于水的气体)使废水中产

生大量微气泡,并与废水中悬浮污染颗粒物黏附,形成密度小于水的气泡-颗粒物复合物,使污染物浮到水面,在水面积聚成浮渣以便从水中分离除去。根据产生微气泡的方式不同,气浮工艺一般有曝气气浮、溶气气浮、电解气浮三种类型。

加压溶气气浮法是目前常用的气浮工艺,该方法是使空气在加压的条件下溶于水,然后将压力降至常压而使过饱和的空气以细微气泡形式释放出来。加压溶气气浮法包括三种基本流程:全溶气流程、部分溶气流程和回流溶气流程。进行气浮时,用溶气泵将污水抽出送至压力为 $2\sim 4$ 个大气压的溶气罐中。空气在罐内溶解于加压的清水或经处理的回流水中,然后使经过溶气的水(溶气水)通过减压阀(或释放器)进入气浮池,此时由于压力的突然降低,溶解于加压水中的空气便以微气泡的形式从水中释放出来。微细气泡在上升的过程中附着在悬浮颗粒上,使颗粒的密度减小,上浮到气浮池的表面与水分离,达到去除的目的。

疏水性很强的物质(如植物纤维、油珠及炭粉末等),不投加化学药剂即可获得满意的固-液分离效果。一般疏水性或亲水性的物质,均需投加化学药剂,以改变颗粒的表面性质,增加气泡与颗粒的吸附。

三、实验装置及材料

1. 实验装置

实验采用加压溶气气浮实验装置如图 1-2-1 所示。

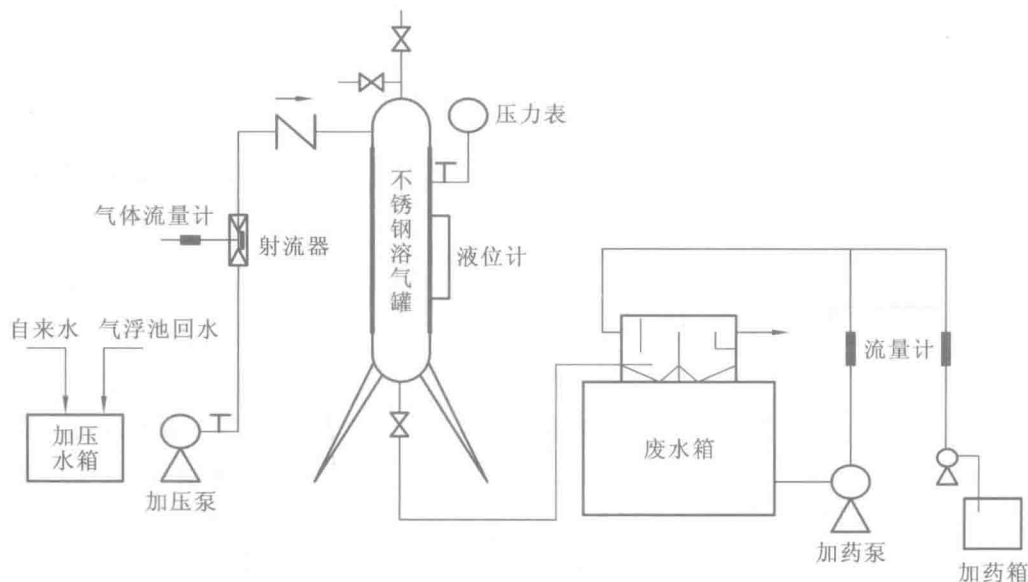


图 1-2-1 加压溶气气浮实验示意图

2. 实验材料

复合破乳混凝剂;工业乳化废水;水质分析(COD,SS 值)所需的器材及试剂。

四、实验步骤

(1) 首先检查气浮实验装置是否完好。

(2) 把自来水加到回流加压水箱与气浮池中,至有效水深度的 90%。

(3) 将含有悬浮物或胶体的乳化废水加到废水配水箱中,投加复合破乳混凝剂后搅拌混合(投药量通过预实验确定)。

(4) 先开动溶气泵往溶气罐中注水加压,加压至 0.3 MPa。

(5) 待溶气罐中的水位升至液位计中间高度,开启释放器的闸阀,调节气浮水量,待空气在气浮池中释放并形成大量微小气泡时,保持工作状态良好,当气浮槽的水体积达到 2/3 时,再打开废水配水箱、废水进水量可按 4~6 L/min 的速度控制,与溶气水混合,气泡与颗粒物上浮,表面浮渣在一端通过刮渣收集排除,下部清水加入溶气水箱循环使用。

(6) 测定废水与处理出水的水质(COD,SS 值)变化。

五、实验结果记录与分析整理

(1) 根据实验设备尺寸与有效容积,以及水和空气的流量,分别计算溶气时间、气浮时间、气固比等参数。

(2) 用量筒量取溶气良好的溶气水,记录气液界面的上升速度,计算微气泡的直径。

(3) 计算不同运行条件下,废水中污染物(以悬浮物表示)的去除率,以去除率为纵坐标,以某一运行参数(如溶气罐的压力、气浮时间或气固比等)为横坐标,作出污染物去除率与其运行参数之间的定量关系曲线。

(4) 测出水 COD、SS 值,将数据记录于表 1-2-1 中。

表 1-2-1 加压溶气气浮实验记录

废水量	溶气罐压力	加压水量	取样体积/mL	COD/(mg/L)	悬浮物浓度 SS 值/(mg/L)