

高等学校教材

环境工程原理

郭仁惠 主编

郭仁惠 孔繁余 艾凤祥 编



化学工业出版社

高等学校教材

环境工程原理

郭仁惠 主 编

郭仁惠 孔繁余 艾凤祥 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

环境治理工程中常应用化工工艺流程中的单元操作。本书即是在化工原理的基础上,结合环境治理工程中涉及的单元操作编写而成的。每章均列举了其单元操作在环境治理工程中的应用实例,对于膜分离新技术,除了列举应用实例外,相应章节还提出了可以应用的领域。本书语言精练,重视理论与工程实际结合。附录中列出了环境工程中常用的单元操作设备规格型号与性能参数,供选用参考。

本书可作为环境工程及相关专业本科教学用书,也可供从事环境工程的工作人员作为参考资料使用。

图书在版编目(CIP)数据

环境工程原理/郭仁惠主编;郭仁惠,孔繁余,艾凤
祥编. —北京:化学工业出版社,2008.7

高等学校教材

ISBN 978-7-122-03406-9

I. 环… II. ①郭…②郭…③孔…④艾… III. 环境工程
学-高等学校-教材 IV. X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 107787 号

责任编辑:刘俊之

文字编辑:刘莉珺

责任校对:凌亚男

装帧设计:张辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张22½ 字数604千字 2008年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:38.00元

版权所有 违者必究

前 言

环境治理工程中常应用化工工艺流程中的单元操作。由于环境工程有其独特性，并不是化工中的单元操作均可用于环境治理工程中，所以，应用于环境治理工艺中的单元操作需考虑其适宜性和经济性。本书是在化工原理的基础上，结合环境治理工程中涉及的单元操作编写而成的，每章均列举了其单元操作在环境治理工程中的应用实例，对于膜分离新技术，除了列举应用实例外，相应章节还提出了可以应用的领域。本书重视理论与工程实际结合。附录中列出了环境工程中常用的单元操作设备规格型号与性能参数，供选用参考。本书可用于本科教学，也可作为环境工作者的参考资料。

全书章节包括绪论、流体流动与输送机械、流体与固体颗粒分离和流化床、传热、吸收、吸附、膜分离技术、附录等内容。郭仁惠编写绪论、第二章、第三章、第五章、第六章、附录一和附录二（除离心泵部分）；孔繁余编写第一章、附录二中的离心泵部分；艾凤祥编写第四章（其中第四节及思考题和习题部分由郭仁惠编写）。全书由郭仁惠统稿。

由于作者水平有限，收集的资料不是很全面，编写时间仓促，书中难免有遗漏和不妥之处，真诚希望广大读者不吝赐教，以使本书内容日趋丰富、完善。

编 者
2008 年 5 月
于江苏大学

目 录

绪论	1	一、过滤基本原理	95
一、环境工程学与环境工程原理	1	二、滤液通过滤饼层时的压降	98
二、污染治理与单元操作	2	三、滤饼层过滤速率基本方程	100
三、物料和能量衡算	4	四、过滤基本方程应用	103
四、物理量的单位换算	7	五、滤饼洗涤速率	108
思考题	10	六、过滤常数的测定	110
习题	10	第六节 环境工程中常用的过滤设备	
第一章 流体流动与输送机械	12	及计算	111
第一节 流体动力学基本方程	12	一、板框压滤机	111
一、基本概念	12	二、转鼓真空过滤机	115
二、伯努利方程	13	三、加压叶滤机	119
第二节 流体流动类型	20	四、带式压榨过滤机	120
一、层流和湍流现象	20	第七节 固体流态化	122
二、流型判据——雷诺数	21	一、流态化的基本概念	122
三、流体在圆管内的速度分布	22	二、流化床的操作范围	124
第三节 流体流动的阻力损失	25	三、流化床的主要特点	126
一、直管沿程阻力损失	25	四、环境工程中的流态化设备简介	126
二、局部阻力损失	32	思考题	130
第四节 流体流动的应用	36	习题	131
一、管路计算	36	第三章 传热	133
二、液体输送设备——离心泵	41	第一节 基本概念	133
三、气体输送设备	59	一、热量传递的基本方式	133
思考题	62	二、对流传热中的几种热交换接触	
习题	62	方式	134
第二章 流体与固体颗粒分离和流化床	65	三、传热在环境工程中的应用	135
第一节 概述	65	第二节 热传导	135
一、非均相物系概念及应用	65	一、热传导的基本理论	135
二、颗粒及颗粒群的物理性质	66	二、傅里叶定律在导热过程中的应用	138
第二节 重力沉降	68	第三节 间壁式热交换	144
一、重力沉降速度	68	一、对流传热机理	144
二、重力沉降计算	72	二、对流传热速率方程和对流传热	
第三节 离心沉降	75	热系数	145
一、离心沉降速度	75	三、影响对流传热系数的因素	147
二、分离因数	77	四、间壁式换热的总传热速率方程	149
第四节 环境工程中应用的沉降分		五、间壁传热过程计算	150
离设备	77	第四节 对流传热系数经验关联式	166
一、重力分离设备	77	一、对流传热过程的无量纲特征数	166
二、离心力分离设备	82	二、对流传热系数关联式	168
第五节 过滤分离	95	第五节 传热在环境工程中应用实例	

及计算	171	四、填料吸收塔设计步骤	261
一、管道或设备的热损失	171	思考题	265
二、保温及保温层厚度	171	习题	265
三、换热器在环境工程中的应用	174	第五章 吸附	268
四、强化传热的途径	176	第一节 基本概念	268
第六节 常用换热器结构简介	180	一、吸附概念	268
一、管式换热器	180	二、吸附剂	269
二、板式换热器	183	三、吸附剂颗粒群性能的表示方式	271
第七节 管壳式换热器的选型计算	186	第二节 物理吸附速率与吸附平衡	271
一、管壳式换热器的型号与系列标		一、吸附平衡	271
准介绍	187	二、吸附速率	274
二、选型计算步骤	187	第三节 吸附设备及吸附计算	276
三、校核计算	188	一、吸附在环境治理中的应用	276
思考题	195	二、吸附设备	277
习题	195	三、吸附设备计算	279
第四章 吸收	199	第四节 离子交换法	284
第一节 吸收过程概述	199	一、离子交换的工艺和设备	284
一、吸收的基本概念	199	二、离子交换法在废水处理中的应用	285
二、吸收过程分类	199	思考题	288
三、吸收剂的选用	201	第六章 膜分离技术	290
四、吸收单元操作在环境工程中		第一节 概述	290
的应用	201	一、膜的概念	290
第二节 吸收传质机理与传质速率	202	二、膜分离过程	291
一、分子扩散与非克定律	202	三、膜分离技术在环境工程中的应用	292
二、气液相平衡与亨利定律	203	第二节 压力差为推动力的膜分离	293
三、定态分子扩散速率及扩散系数	209	一、膜组件	293
四、对流传质	214	二、超滤及微滤膜分离	295
五、吸收过程机理与吸收速率方程	215	三、反渗透膜分离	299
第三节 吸收塔填料层理论高度计算	220	第三节 电渗析	305
一、物料衡算和操作线方程	221	一、电渗析原理	305
二、吸收剂用量的计算	222	二、离子交换膜及其性质	306
三、填料层理论高度计算	224	第四节 其他膜过程	310
四、化学吸收	235	一、气体膜分离混合技术	310
五、吸收系数获得	240	二、渗透汽化	311
第四节 解吸及其计算	243	思考题	314
一、解吸方法	244	附录一 单位换算及常见物质的物	
二、解吸过程的计算	244	性参数	315
第五节 填料塔的设计计算	247	附录二 常用单元操作设备的规格	
一、方案确定	247	型号	329
二、填料塔尺寸的计算	253	参考文献	353
三、填料层压降的计算	258		

绪 论

一、环境工程学与环境工程原理

1. 环境工程学概述

人类的生存与发展依赖于自然，同时也给自然环境带来一系列的问题。人类要在地球上持久生存，必然要解决环境问题，保护自然环境。“环境学科”是随着环境问题的日趋突出而产生的一门新兴的综合性边缘学科。环境学科包括环境科学、环境工程学、环境生态学、环境规划与管理。

环境工程学科体系包括以下方面。

① 环境净化与污染防治技术，包括水质净化与水污染控制工程；空气净化与大气污染控制工程；固体废物处理与处置；物理性污染防治工程（包括能量回收技术）；土壤净化与污染防治技术。

② 生态修复与构建技术。

③ 清洁生产理论及技术。

④ 环境规划管理与环境系统工程。

⑤ 环境监测与环境质量评价。

环境工程学的任务是利用环境学科与工程学的方法，研究环境污染控制理论、技术、措施和政策，以改善环境质量，保证人类的身体健康、舒适的生存和社会的可持续发展。

环境工程学是把化学、生物学、物理学、工程学、管理学等学科的理论应用到环境保护中，研究的对象是水质净化与水污染控制技术、大气污染控制技术、固体废物处理处置与管理与资源化技术、物理性污染（热污染、辐射污染、噪声、振动）防治技术、自然资源的合理利用与保护、环境监测与环境质量评价等传统的内容，还包括生态修复与构建理论与技术、清洁生产理论与技术以及环境规划、管理与环境系统工程等。

2. 环境工程原理研究的内容

环境净化与污染防治技术是环境工程学科之一，主要研究内容包括污染物分离的宏观过程、微观机理、工程设计计算的基本理论。宏观分离过程包括沉降、过滤，吸附、吸收、膜分离等。微观机理是对宏观过程中现象的微观分析，微观机理分析包括机理与步骤研究。

环境工程原理课程是环境净化与污染防治技术中重要课程之一，它研究的内容是环境净化与污染防治过程中的宏观分离单元操作、传热单元操作、流体输送单元操作的基本理论，典型设备结构及设计计算方法。环境工程原理不包括化学转化和生物转化原理方面的内容。

“单元操作”概念起源于化学工程学科，后又超越行业界限，应用于具有共性规律物理过程的各行业中。所谓的“单元操作”是指具有共性基本规律的物理操作过程，如流体输送、沉降、过滤、流态化、热量传递、吸收、吸附等过程。由于各单元操作均遵循自身的规律和原理，并将这些原理应用于相应的工程设备中，所以，研究单元操作的内容包括两部分，即操作过程原理和设备结构与计算两部分。

环境工程原理讨论的是与环境净化与污染防治工程有关的单元操作，其基本规律与化工原理是一致的。概括起来，单元操作遵循的基本规律有以下三种：

- ① 流体流动基本规律，如输送流体、沉降、过滤、固体流态化等单元操作。
- ② 传热基本规律，如流体热交换单元操作。
- ③ 传质基本规律，如吸收、吸附、膜分离等单元操作。

二、污染治理与单元操作

1. 水体中的主要污染物及治理技术

(1) 水体中的主要污染物 自然水体中的污染源来自于工农业生产及人们的日常生活排出的废水，当排入水体的污染物超过了水体的自净能力，就会导致水体质量恶化。造成水质恶化的主要污染物如表 0-1 所示。

表 0-1 水体中主要污染物

污染类型	污染物分类	污染物质实例	对水体的作用
物理污染	热量	废热	水温升高，水体中溶解氧急剧减少
	悬浮物质	泥沙、油滴、泡沫、腐殖质颗粒、细菌残骸、毛发、金属微粒	水体混浊
	放射性物质	铀(²³⁵ U)、钚(²³⁸ Pu)、锶(⁹⁰ Sr)、铯(¹³⁷ Cs)	水体具有放射性
化学污染	有色物质	色素、染料、有色金属离子	水体带色，影响感官，有些物质使水体有毒
	发臭物质	硫化氢、硫醇、氨、甲醛、胺	水体散发臭味，有些物质使水体有毒
	需氧有机物	食物类、油类、有机酸、醇等	与微生物作用，消耗水中溶解氧
	植物营养物	NO ₃ ⁻ 、NO ₂ ⁻ 、NH ₄ ⁺ 、含磷物质等	水体富营养化，有利于水体中藻类生长
	无机有害物	酸、碱、盐	增大水体酸碱度，使水体硬度增加
	无机有毒物	氰化物、重金属离子(Hg ²⁺ 、Hg ⁺ 、Cd ²⁺ 、Cr ³⁺ 、Cr ⁶⁺ 、Pb ²⁺ 、Co ²⁺ 、Ni ²⁺ 、Cu ²⁺ 、Zn ²⁺)、砷类物质	水体有很强的毒性，能使水中生物快速死亡，或使其产生毒性效应
	可降解有机毒物	有机磷农药、酚类	水体有毒，能使水中生物死亡
	持久性有机污染物	有机氯农药、多氯联苯、二噁英	化学性质稳定，能在水中集聚，水体有毒
生物污染	病原微生物	病毒、细菌、原生动物等	在水体中能繁殖，使水成为疾病源

(2) 水污染治理工艺中的单元操作 为减少向自然界排放污染物的量，工程中常采用多种方法对排出的污水进行处理，图 0-1 所示为某酿造废水处理工艺流程。

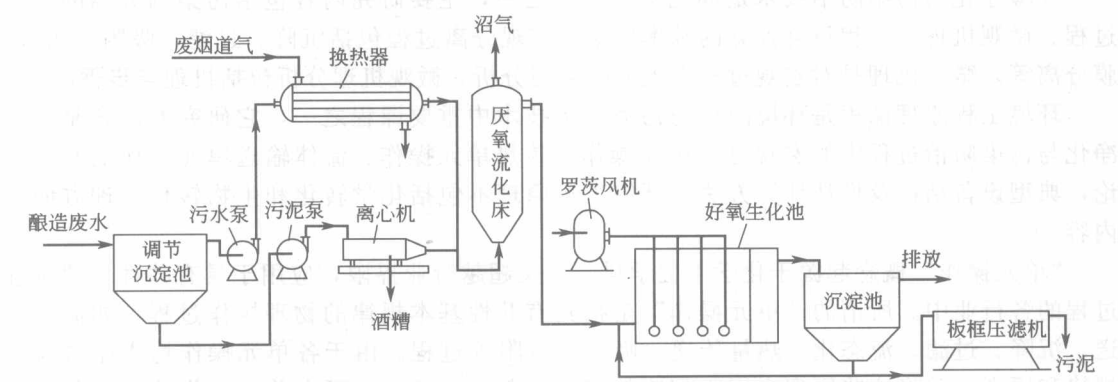


图 0-1 某酿造废水处理工艺流程示意

由图 0-1 可以看出，废水处理工艺由多个单元操作组成。依据环境工程原理研究的内容，将水处理工程中应用的主要单元操作归纳为表 0-2。

表 0-2 水处理工程中单元操作和基本原理

单元操作	基本原理	作用
热交换	利用热量能自发地从高温物体传递到低温物体这一原理来实现两流体间热交换	加热废水,使其满足工艺条件;回收废热能,减少热损失
液体输送	利用液体流动特性来输送废水	将废水从一处输送到另一处
重力、离心力作用下的非均相分离	在重力或离心力的作用下,利用物质的密度差来实现非均相分离	去除水中的固体颗粒
过滤	利用过滤介质的拦截性能,在压力的作用下进行非均相分离	去除水中的固体颗粒
气浮	利用微气泡黏附悬浮颗粒的原理来改变非均相物系密度差,从而实现非均相分离	去除水中的固体颗粒或油滴
液膜分离,包括反渗透、电渗析、精密过滤、渗透气化	利用具有选择性渗透性能的膜为分离介质,在膜两侧推动力的作用下来实现均相分离,或浓缩液相	去除废水中的细菌、胶体颗粒、较大分子的污染物;浓缩水中的离子,回收废水中的有用物质
吸附、离子交换	利用某些多孔固体物质具有选择性吸附的原理来实现均相分离	去除水中的有机物、重金属离子,回收废水中的有用物质

2. 大气中的主要污染物及治理技术

(1) 大气中的主要污染物 大气中的污染物主要来自于工业生产中废气的排放。当排放的废气一旦进入大气环境这个动态系统中,则参与不同介质的物质交换、化学反应和大气整个循环。排入到大气中的污染物不仅影响到局部环境的空气质量,还可以给全球带来环境问题。排放到大气中的主要污染物如表 0-3 所示。

表 0-3 大气中的主要污染物

污染类型	污染物分类	污染物质实例	对大气的作用
颗粒类污染	固体颗粒和气溶胶	粉尘、雾(液体粒子)、烟	能见度降低,人类呼吸的空气质量下降
气态污染	无机物	SO ₂ 、H ₂ S、CO、CO ₂ 、N _y O _x 、NH ₃ 、HCl、HF、Cl ₂ 等	形成酸雨、温室效应、人类呼吸的空气质量下降,甚至空气带毒,大气污染物向地面转移,污染土壤和水体
	有机物	氟里昂、甲醛、丙酮、小分子烷烃等有机物	破坏臭氧层、温室效应、人类呼吸的空气质量下降,甚至空气带毒

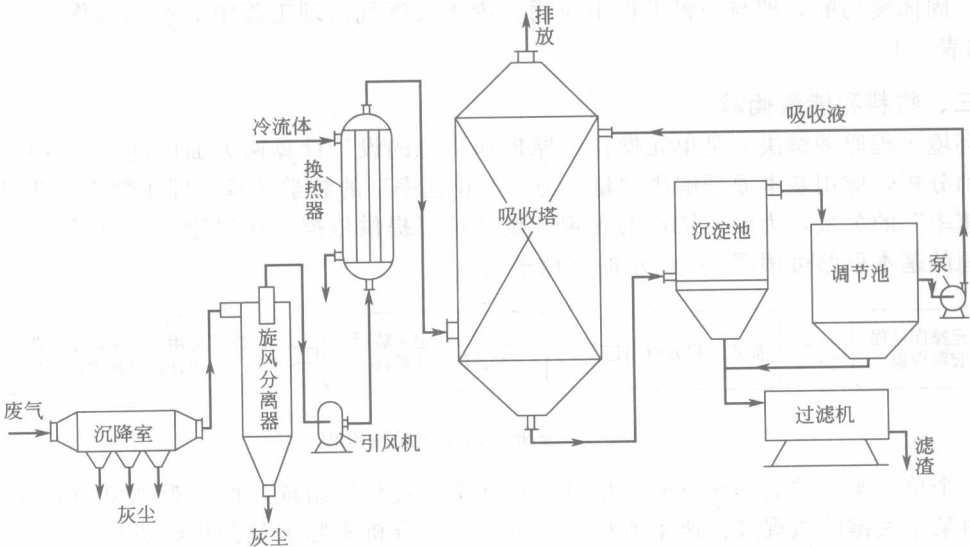


图 0-2 某烟道气处理工艺流程

(2) 大污染治理工艺中的单元操作 由表 0-3 可以看出, 排入大气的污染物有多种, 治理工艺也各有不同, 图 0-2 为某烟道气处理工艺流程。由图 0-2 可以看出, 烟道气处理工艺中不仅有处理气体中污染物的单元操作, 也涉及水处理中的单元操作。大气污染治理工程中应用的主要单元操作归纳为表 0-4。

表 0-4 大气污染治理工程中单元操作和基本原理

单元操作	基本原理	作用
重力、离心力作用下的非均相分离	在重力或离心力的作用下, 利用物质的密度差来实现非均相分离	去除废气中的固体颗粒
过滤	利用过滤介质的拦截性能, 在压力差的作用下进行非均相分离	去除废气中的固体颗粒
吸收	利用气体中污染物的可溶性, 把气体中的污染物转移到液体中	去除废气中的气态有机和无机污染物
吸附(静电除尘)	利用某些多孔固体物质具有选择性吸附的原理(或静电吸附)来实现均相分离	去除废气中的气态有机或无机污染物(固体颗粒)
气膜分离	利用具有选择性渗透性的膜为分离介质, 在膜两侧推动力的作用下来实现均相分离	去除废气中的气态有机和无机污染物
热交换	利用热量能自发地从温度高的物体传递到温度低的物体这一原理来实现两流体热交换	回收废热能, 减少热损失

3. 固体废物的处理与处置技术

固体废物是指人类活动过程中产生的, 且对所有者已经不再具有使用价值而被废弃的固态或半固态物质。如工业生产中排出的废渣、失效的产品, 城市中的生活垃圾。

固体废物对环境的危害通常通过雨水的淋溶和地表径流的渗滤, 污染土壤、地下水和地表水; 通过飞尘、微生物作用、化学反应产生的有害气体污染空气。固体废物治理方式有两类, 一类是作为废物弃之, 如城市生活垃圾填埋, 对于污染较大的固体废物先应用化学法进行无害化处理, 然后填埋; 另一类进行资源化处置, 如废弃物分类回收再用、垃圾发电、应用化学法进行物质转化。在固体废物处理与处置工程中, 应用到水处理和大气污染治理工程中的一些单元操作, 如为了防止垃圾对土壤和水体的污染, 应对垃圾场排出的雨水进行处理; 垃圾焚烧排放的废气应进行处理; 用萃取法回收固体废物中的某种物质。因此, 固体废物的处理与处置工程中应用到废水或废气治理工程中的单元操作, 可参见表 0-2 和表 0-4。

三、物料和能量衡算

环境工程原理解决的是单元操作的原理和设备的设计计算两方面的问题, 这就涉及到原理的分析, 应用基本原理解决“量”与“变化速率”的数学计算, 即用数学式表达“量”与“速率”的关系, 为设备结构的确定和设计计算提供依据。在讨论每个单元操作时, 分析问题的基本思路可用图 0-3 所示的流程来表示。

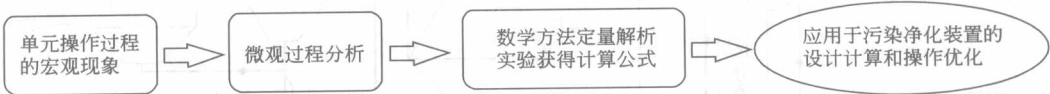


图 0-3 分析单元操作思路流程

一个单元操作的宏观现象通常是由一系列微观过程所组成, 而宏观现象的表观速率往往是由某个关键的微观过程速率所控制。微观过程分析实际上是剖析组成单元操作的基本要素, 透过宏观现象看本质。微观过程分析包括物质与能量的迁移、转化过程, 所以在计

算时需要应用质量守恒与能量守恒原理。

1. 物料衡算

在环境净化及污染物治理过程中，无论是水处理、废气处理和固体废物处理处置，还是给水排水管道工程，均涉及能量传递和质量传递。所以在讨论各单元操作前，应掌握物料衡算和能量衡算的方法。

物料衡算应用的是质量守恒定律，运用该定律的要点如下：

(1) 界定衡算范围 根据计算需要，界定单元操作中的某一部分或整体作为独立的系统。例如，图 0-4 所示为废气吸收塔，可以把 dh 高度微元体作为一个独立的系统，也可以把整个塔作为一个独立的系统。

(2) 确定衡算物料 当系统中没有化学转化的情况时，根据待求量，确定是以总物料作为衡算基准，还是某组分的物料作为衡算基准，当有化学转化时，应按元素进行物料衡算。

(3) 确定衡算量的基准 可以取一定的时间间隔的物料为衡算基准，如单位时间内的质量流量、体积流量或摩尔流量，也可取一定量的某物料的进料或出料为基准。

(4) 质量衡算 应用质量守恒定律，即输入系统的某物料总量应等于输出该系统的某物料总量与存留在系统中物料量之和。其数学表达式为：

$$\sum m_1 = \sum m_2 + m_A \quad (0-1)$$

式中 $\sum m_1$ ——输入系统物料量之和；

$\sum m_2$ ——输出系统物料量之和；

m_A ——存留在系统中的物料量。

若系统在运行过程中，系统内各部分的状态随时间而变化，该系统则称为非定态系统，反之则称为定态系统。

如果是定态系统，物料输入系统中没有存留，则输入系统的某物料总量应等于该系统输出的物料总量。式(0-1)可以简化为：

$$\sum m_1 = \sum m_2 \quad (0-2)$$

【例 0-1】 图 0-4 所示为填料式废气吸收塔，图中 Y 、 X 均表示气液相中被吸收组分的摩尔比， M_V 、 M_L 分别为气、液两流体的摩尔流量，请推导计算气体出口浓度 Y_2 的计算式。

解：将废气吸收塔看作为一个独立的系统，被吸收组分的摩尔流量为基准物料，由于吸收过程是定态过程，依据式(0-2)得：

$$Y_1 M_V + X_2 M_L = Y_2 M_V + X_1 M_L$$

整理得：

$$Y_2 = Y_1 - \frac{M_L}{M_V} (X_1 - X_2)$$

【例 0-2】 某污水处理工艺中有沉淀池和浓缩池，沉淀池用于去除水中的悬浮物，浓缩池用于将沉淀的污泥进一步浓缩，浓缩池的上清液返回到沉淀池中。污水流量为 $5000 \text{ m}^3/\text{d}$ ，悬浮物含量为 200 mg/L ，沉淀池出水中悬浮物质量浓度为 20 mg/L ，沉淀污泥的含水率为 99.8% ，进入浓缩池停留一定时间后，排出的污泥含水率为 96% ，上清液中的悬浮物含量

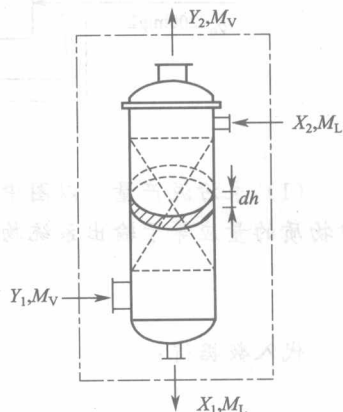
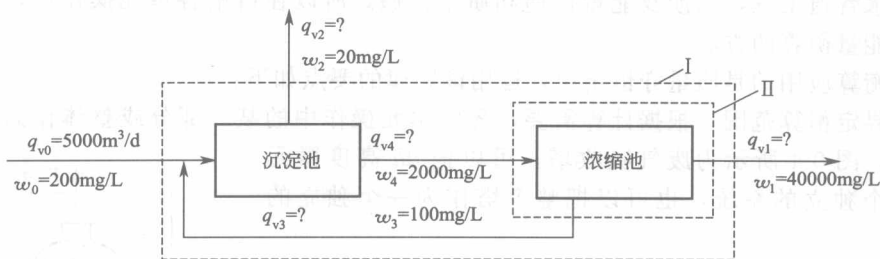


图 0-4 废气吸收塔物料衡算图

为 100mg/L。假设系统处于稳定状态，过程中没有生物作用。求整个系统的污泥产量和排水量，以及浓缩池上清液回流量。污水的密度为 1000kg/m³。

解：依据题意，可画出如下的物料衡算系统图。



例 0-2 附图

(1) 求污泥产量 以图中虚线 I 部分作为物料衡算系统。因系统稳定运行，输入系统中物质的量应等于输出系统物质的量，即：

$$\begin{cases} q_{v0} = q_{v1} + q_{v2} \\ q_{v0} w_0 = q_{v1} w_1 + q_{v2} w_2 \end{cases}$$

代入数据得：

$$\begin{cases} 5000 = q_{v1} + q_{v2} \\ 5000 \times 0.2 = 40 \times q_{v1} + 0.02 q_{v2} \end{cases}$$

解得： $q_{v1} = 22.5 \text{ m}^3/\text{d}$ ； $q_{v2} = 4977.5 \text{ m}^3/\text{d}$

(2) 浓缩池上清液量 以图中虚线 II 部分（浓缩池）作为物料衡算系统，输入系统中物质的量应等于输出系统物质的量，即：

$$\begin{cases} q_{v4} = q_{v1} + q_{v3} \\ q_{v4} w_4 = q_{v1} w_1 + q_{v3} w_3 \end{cases}$$

代入数据得：

$$\begin{cases} q_{v4} = 22.5 + q_{v3} \\ 2 \times q_{v4} = 40 \times 22.5 + 0.1 \times q_{v3} \end{cases}$$

解得： $q_{v3} = 450 \text{ m}^3/\text{d}$ ； $q_{v4} = 472.5 \text{ m}^3/\text{d}$

2. 能量衡算

能量可以多种形式存在，如机械能、电能、光能、热能、化学能等，各种能量间可以相互转换。环境工程原理中不讨论能量转换过程，而讨论系统中总能量的衡算，重点讨论热能的衡算。

单元操作系统中常常是既有能量输入和输出，也有物料输入和输出。也就是说在对系统进行能量衡算时，还应考虑到物料的量。

能量衡算步骤与物料衡算步骤相同，即根据需要确定衡算系统、衡算物料、衡算基准，然后根据能量守恒定律进行计算，其数学表达式如下：

$$\sum q_{m1} E_1 = \sum q_{m2} E_2 + q_0 E_0 + E_L \quad (0-3)$$

式中 q_m ——物料的质量或质量流量，kg 或 kg/s；

E ——单位质量物料的能量，kJ/kg；

E_L ——系统的能量损失，kJ；

下标“1”、“2”、“0”分别为“输入”、“输出”、“存留”的含意。

如果是定态系统，即系统中没有能量存留，则式(0-3)可简化为：

$$\sum q_{m1} E_1 = \sum q_{m2} E_2 + q_0 E_0 + E_L \tag{0-4}$$

环境工程原理中讨论的问题通常是定态系统，所以式(0-4) 能量衡算式经常用到。

在进行能量计算时，往往用焓来计算，焓的定义如下：

$$I = E_n + p \nu \tag{0-5}$$

式中 I ——单位质量物质的焓，kJ/kg；

E_n ——单位质量物质的内能，kJ/kg；

p ——物质所受的压强，kPa；

ν ——单位质量物质的体积，即比容，m³/kg。

由式(0-5) 可以看出，焓是状态的函数。物质的焓值是相对值，在用焓进行能量衡算时，应选择基准，通常以 273K 物质的液态为基准，即 273K 液态物质的焓值为 0。

【例 0-3】 热水器发热元件的功率 $N=1.5\text{kW}$ ，试计算将水 20L 从 15℃ 加热到 65℃ 所需的时间？设发热元件的热能转换率为 100%，在水加热过程中的热损失为水吸收热量的 1%，容器壁温升所需的热量可以忽略。

解：依据题意，可画出如左边所示的能量衡算系统图。

设加热时间为 τ 。则输入系统的电能 E ，应等于水温升高所需的能量 E_n 及由容器壁与周围环境的热交换损失的能量 Q_L ，即：

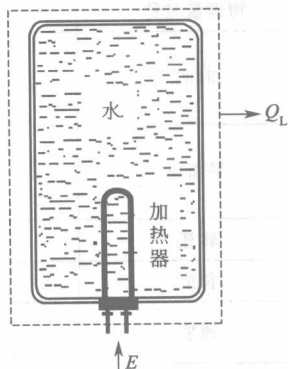
$$E = N\tau = E_n + Q_L$$

代入数据得：

$$1.5 \times \tau = 20 \times 1 \times 4.18 \times (65 - 15) \times (1 + 0.01)$$

解得：

$$\tau = 2814.5\text{s} = 0.782\text{h}$$



例 0-3 附图

四、物理量的单位换算

1. 基本单位和导出单位

任何物理量均是由数字和单位两部分组成，物理量单位又分基本单位和导出单位。基本单位是几个独立基本物理量的单位，这几个基本物理量是人们为方便使用而规定的，如长度、时间是基本物理量，其基本单位分别是米（m）、秒（s）。根据物理量的意义，由基本单位构成的单位为导出单位，如速度单位是 m/s，体积流量单位是 m³/s。另外，还有一些具有专有名称的导出单位，如压强的单位为帕（Pa），能量的单位为焦耳（J）。常用的具有专有名称的导出单位与基本单位的关系见表 0-5。

表 0-5 常用的专有名称的导出单位与基本单位的关系

物理量名称	单位专有名称	单位符号	与基本单位关系
力	牛顿	N	1N=1kg·m/s ²
压强、应力	帕[斯卡]	Pa	1Pa=1N/m ² =1kg/(m·s ²)
能、功、热量	焦耳	J	1J=1N·m=1kg·m ² /s ²
功率	瓦[特]	W	1W=1J/s=1kg·m ² /s ³
频率	赫[兹]	Hz	1Hz=1s ⁻¹

由于地区、学科等方面的不同，各自规定的基本物理量和单位有所不同，因而产生了不同的单位制，如物理单位制（厘米、克、秒制），米、千克、秒制，英制，国际单位制

等。随着社会的发展，国际上的物质和学术交流日益频繁，统一计量单位是一件重要的事。1960 年和 1974 年，国际计量局（BIPM）组织的国际计量大会确定了“国际单位制（SI）”，并规定了国际单位制中的基本物理量，参见表 0-6。

表 0-6 国际单位制的基本单位

物理量名称	单位名称	单位符号	物理量名称	单位名称	单位符号
长度	米	m	温度	开[尔文]	K
质量	千克(公斤)	kg	发光强度	坎[德拉]	cd
时间	秒	s	物质的量	摩[尔]	mol
电流	安[培]	A			

1984 年，我国颁布并实施了法定计量单位。法定计量单位是以国际单位制的单位为基础，适当增加了一些其他单位，参见表 0-7。

表 0-7 法定计量单位中的非国际单位制的单位

物理量名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	1min=60s
	小时	h	1h=60min=3600s
	天(日)	d	1d=24h=86400s
平面角	(角)秒	"	1"=(π /648000)rad
	(角)分	'	1'=60"=(π /648000)rad
	(角)度	°	1°=60'=(π /648000)rad
转速	转/分	r/min	1r/min=(1/60)s ⁻¹
长度	海里	n mile	1 n mile=1852m(限于航程)
速度	节	kn	1kn=1n mile/h=(1852/3600)m/s (限于航行)
质量	吨	t	1t=1000kg
	原子质量单位	u	1u≈1.6605655×10 ⁻²⁷ kg
体积	升	L	1L=1dm ³ =10 ⁻³ m ³
能	电子伏	eV	1eV≈1.6021892×10 ⁻¹⁹ J
级差	分贝	dB	
线密度	特克斯	tex	1tex=1g/km

2. 单位换算

由于存在着不同的单位制，同一物理量因单位不同而在数值上也不同，例如某直线长度为 1in（英寸），亦可表示为 25.4mm（毫米），两种表示方法是“等价”的，只是因为单位不同而导致数值不同。如果把不同单位的同一物理量相比，即可获得比例因子，这个比例因子即为不同单位物理量的换算“换算因子”。在进行物理量的单位换算时，用已知单位的物理量乘以相应的换算因子，即得到新单位下的物理量。本书附录一给出了常用物理单位的换算因子。

【例 0-4】 将长度为 205in 的物理量换算成 m 单位，压强为 0.075mmHg 的物理量换算成 Pa 单位。

解：依题意查附录一，长度换算因子为 0.0254m/1in，压强的换算因子为 133.32Pa/1mmHg，则：

205in×(0.0254m/1in)=5.207m

0.075mmHg×(133.32Pa/1mmHg)=9.999Pa

这种单位换算方法不适用温度物理量的单位换算，温度物理量的单位换算按以下方式计算。

热力学温度与华氏温度间的换算关系：

$$T' = 1.8T - 459.94 \quad (0-6)$$

式中 T' ——华氏温度， $^{\circ}\text{F}$ ；

T ——热力学温度， K 。

热力学温度与摄氏温度间的换算关系：

$$T = t + 273.3 \quad (0-7)$$

式中 t ——摄氏温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

摄氏温度与华氏温度间换算关系：

$$t = (T' - 32) \times \frac{5}{9} \quad (0-8a)$$

$$T' = t \times \frac{9}{5} + 32 \quad (0-8b)$$

3. 公式物理量单位换算

无论是推导的物理公式还是经验公式，公式中所有物理量均赋予一定的单位。有时需要改变公式中物理量的单位。当公式中的物理量单位发生变化时，公式中的系数和/或常量通常会发生变化，把这种改变公式中物理量单位的过程称为公式物理量单位换算。换算步骤如下：

- ① 确定公式各中物理量的单位，哪些物理量需要改变单位；
- ② 设定公式中新单位下的相应物理量符号；
- ③ 查找或计算公式中原单位物理量与新单位物理量之间的换算关系，将新单位物理时换算成原公式要求的单位；
- ④ 将换算后的新单位物理量代入原公式中；
- ⑤ 通过整理变换，即或得到新单位下的计算公式。

【例 0-5】 设备壁面因强制对流和辐射作用向周围环境中散失的热量可用下式表示，即

$$\alpha = 5.3 + 0.036u \quad (a)$$

式中 α ——对流-辐射联合传热系数， $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；

u ——设备周围空气流动速度， cm/s 。

试将式(a)变换为国际单位制下的计算公式。

解：由题意可知，式(a)中传热系数 α 和空气流动速度 u 物理量单位需要改变。

设：传热系数 α' 的单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，空气流动速度 u' 的单位为 m/s 。

查附录一得相关物理量的换算因子： $1\text{kcal}=4186.8\text{W} \cdot \text{s}$ ； $1\text{h}=3600\text{s}$ ；温度单位“ $^{\circ}\text{C}$ ”与“ K ”，二者表示温度差时，其值是相同的。由此可得：

$$1\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}) = \frac{1 \times 4186.8}{3600} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) = 1.163 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$1\text{cm}/\text{s} = 0.01\text{m}/\text{s}$$

将新单位物理量换算成原公式中要求的单位，即：

$$\alpha = \frac{\alpha'}{1.163}$$

$$u = 100u'$$

将换算后的物理量带入原式中得：

$$\frac{\alpha'}{1.163} = 5.3 + 0.036 \times 100u'$$

整理上式，略去上标得：

$$\alpha = 6.164 + 4.187u \quad (b)$$

比较式(a) 和式(b) 可以看出，两式的形式是相同的，改变的是常量和系数。

思考题

1. 环境工程原理研究的内容是什么？
2. 环境工程原理应遵循哪些规律？
3. 废气、废水、固体废物治理工程中涉及哪些单元操作？
4. 在 SI 单位制中，基本单位有哪些？
5. 我国的法定计量单位依据什么单位制？
6. 物料和能量衡算依据什么定律？其计算的基本公式有哪些？

习题

1. 反渗透装置可以将高盐分的海水分离成淡水和浓度较高的废盐水，用反渗透装置进行海水淡化，其流程如习题 1 附图所示。将含盐量为 3.2%（质量分数，下同）、流量为 1000kg/h 的海水与渗透装置回流的废盐水混合成浓度为 4% 的盐水，送入反渗透装置中进行淡化分离，淡水的含盐量为 0.05%，废盐水含盐量为 5.25%，试求：



习题 1 附图

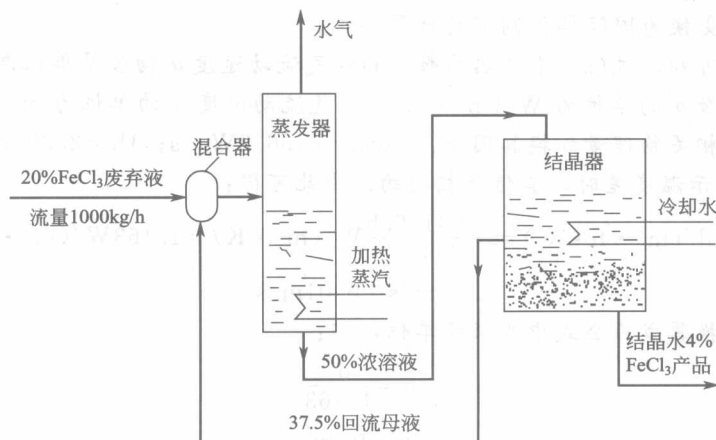
- (1) 每小时获得的淡水量；
- (2) 回流液占生成废盐水的质量分数。

[答：(1) 394.2kg/h；(2) 51.4%。]

2. 习题 2 附图是连续蒸发回收某废弃液中 FeCl_3 的流程简图。废弃液的质量分数为 20%，送入蒸发器的流量为 1000kg/h。蒸发器中的废弃液被浓缩到浓度为 50% 时，用泵送入结晶器中冷却结晶，析出含 4% 结晶水的 FeCl_3 晶体，结晶产品由结晶器底部排出。结晶器中质量分数为 37.5% 的母液被送回至蒸发器进口，与新的废弃液混合后进入蒸发器浓缩。试求：

- (1) 每小时由蒸发器排出的水气量，结晶器排出的产品量；
- (2) 每小时从结晶器回流的母液量和由蒸发器送入结晶器的浓缩液的量；
- (3) 蒸发器进口混合液中 FeCl_3 的浓度。

[答：(1) 791.7kg 水气/h，208.3kg 产品/h；(2) 766.5kg 母液/h，974.8kg 浓液/h；(3) 27.6%。]



习题 2 附图

3. 一污水池内有 50m^3 的污水，温度为 15°C ，为加速消化过程，需将其加热到 35°C 。用蒸汽式换热器进行外循环加热，污水以 $5\text{m}^3/\text{h}$ 的流量通过换热器，污水的出口温度为 100°C 。假设污水池内污水能瞬间混合均匀，不考虑池的热损失，污水的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。问：污水加热到 35°C 所需的时间？

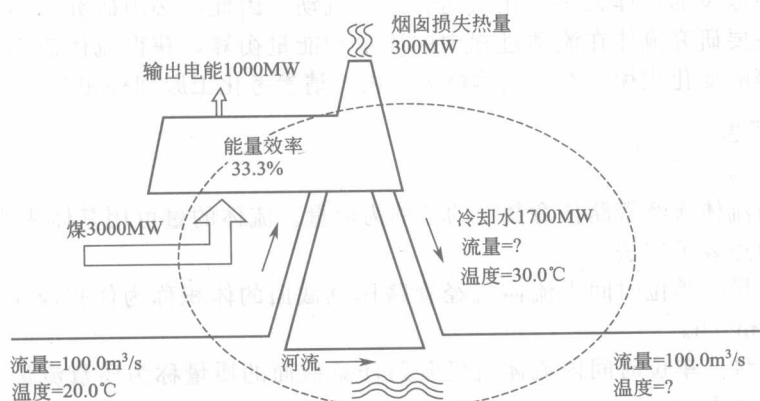
[答：2.68h，提示：将污水池作为衡算系统，污水池中水的温度随时间而变化。]

4. 燃煤发电厂将煤的化学能的三分之一转化为电能，输出电能 1000MW 。其余三分之二的化学能以废热的形式释放到环境中，其中有 15% 的废热从烟囱中排出，其余 85% 的余热随冷却水进入附近的河流中。如习题 4 附图所示。河流上游的流速为 $100\text{m}^3/\text{s}$ ，水温为 20°C 。试计算：

(1) 若冷却水的温度只升高了 10°C ，冷却水的流量为多少？

(2) 这些冷却水进入河流后，河水的温度将变化多少？

[答：(1) $40.6\text{m}^3/\text{s}$ ；(2) 24.1°C ，升高 4.1°C]



习题 4 附图

5. 热空气与冷水间的总传热系数 K 值约为 $42.99\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ，试从基本单位换算开始，将 K 值的单位改为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

[答： $K=50\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]

6. 甲烷的饱和蒸气压与温度的关系符合下面经验公式：

$$\lg p = 6.421 - \frac{352}{t + 261}$$

式中 p ——饱和蒸气压， mmHg ；

t ——温度， $^\circ\text{C}$ 。

现需将式中 p 的单位改为 Pa ，温度单位改为 K ，请对该公式加以变换。

[答： $\lg p = 8.546 - \frac{352}{T - 12}$]