

• 高等学校教材



环境工程原理

Principles of Environmental Engineering

刘燕 李亮 主编



科学出版社

环境工程原理

刘燕 李亮 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在整合水力学、流体力学、化工原理、化学反应工程学、生物工程等课程中和环境工程相关的内容,摒弃了关系不密切的内容以及其他基础课程已经学习的内容的基础上,结合环境工程的专业特点编写而成。主要内容包括流体在管道和明渠中的流动和输送、热量传递、吸收、反应动力学及反应器等内容的基本概念、理论、方法和相关的设备,以及它们对环境工程中的应用。让读者熟悉并掌握工程技术常用的基本观点和方法,如衡算的方法、合理简化、量纲分析法、边界层理论、最优化、数学模型的方法等。本书是学习水污染控制、大气污染控制、固体废弃物处理处置、生态修复工程等环境工程专业课的基础,同时又避免了与这些专业课程内容的重复。

本书可作为高等院校(特别是少学时的高等院校)环境工程、环境科学、环境管理、给水排水专业及其相关专业的本科生教材,也可作为相关专业的研究生以及其他从事环境保护工作的专业技术人员和科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

环境工程原理 / 刘燕,李亮主编. —北京:科学出版社,2018.10

ISBN 978-7-03-059185-2

I. ①环… II. ①刘… ②李… III. ①环境工程
IV. ①X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 245275 号

责任编辑:许 健 / 责任校对:谭宏宇
责任印制:黄晓鸣 / 封面设计:殷 颀

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年10月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019年7月第二次印刷 印张:20 3/4

字数:500 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者名单

主编：刘 燕 李 亮

参编：黄光团 代瑞华 安 东

前 言

“环境工程基础”作为复旦大学环境科学与工程系环境工程、环境科学、环境管理三个专业的本科生的专业基础必修课,从2000年开设至今已有18年。环境工程基础的主要教授内容整合了水力学、流体力学、化工原理、化学反应工程学、生物工程等课程中和环境工程相关的内容,摒弃了关系不密切的内容和其他基础课程中已经学习过的内容,是为了配合复旦大学少学时、宽基础的教学理念,同时又避免与将要学习的水污染控制、大气污染控制、固体废弃物处理处置、生态修复工程等专业课程的重复。长期使用的“环境工程基础”讲义内容与高等学校环境工程专业的核心课程“环境工程原理”相近,将原讲义修订出版时,编辑建议书名修改为“环境工程原理”。该书适合作为高等院校(特别是少学时的高等院校)环境工程、环境科学、环境管理、给水排水专业及其相关专业本科生教材;也可以用作相关专业的研究生以及其他从事环境保护工作的专业技术人员和科研人员的参考用书。其内容适合48~64学时的教学需要。全书共五章,主要内容包括流体在管道和明渠中的流动和输送设备、热量传递、吸收、反应动力学及反应器,以及它们在环境工程中的应用。让读者熟悉并掌握工程技术常用的基本观点和方法,如物料衡算、合理简化、量纲分析、边界层理论、最优化、数学模型等。该书涉及的符号众多,全书进行了统一,并列于附录中,便于查找;基本术语和概念也列于附录中。

本书由刘燕和李亮主编,黄光团、代瑞华、安东参编。在使用该讲义的十几年和此次出版的过程中,复旦大学环境科学与工程系的研究生和本科生参与了该讲义和书的编写、修改、画图以及文字和公式的录入等工作,他们是陈云路、李晨曦、李淑雅、林琳、张云、严杨蔚、查晓松、吴瑾、李佳、宋安安、黄元龙、李春林、陆灏文、汉京超、荆毓航等,在此表示诚挚的谢意!

非常感谢复旦大学环境科学与工程系在本书出版过程中给予的大力支持

和幫助。

本書編寫過程中參考並引用了大量文獻，我們已盡量列出，但難免有疏漏之處，敬請這些知識產權所有者諒解並表示衷心的感謝。

由於編者的知識水平和寫作能力有限，缺點難免，歡迎讀者批評指正，敬請同行專家不吝指教。

編者

2018年6月

目 录

前言	III
第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 质量衡算与热力学第一定律	1
1.3 平衡与速率	4
1.4 物理量的单位和单位制	5
第二章 流体流动和输送设备	8
2.1 概述	8
2.2 流体流动时的阻力损失	23
2.3 流体稳态流动时系统的衡算方程及应用	33
2.4 明渠均匀流和薄壁堰	55
2.5 常见测量仪器	70
2.6 两相流动	72
2.7 流体输送设备	77
第三章 热量传递	105
3.1 概述	105
3.2 热传导	106
3.3 对流传热	116
3.4 传热过程的计算	131
3.5 热交换设备	141
3.6 强化换热器传热过程的途径	147
第四章 吸收	153
4.1 概述	153
4.2 传质机理及传质速率和传质通量	155

4.3	气液相平衡	166
4.4	吸收的动力学基础	173
4.5	吸收过程的设计与操作计算	181
4.6	解吸	202
4.7	多组分吸收与化学吸收	207
第五章	反应动力学及反应器	220
5.1	反应动力学	220
5.2	反应器	245
5.3	微生物反应器	268
参考文献		280
附录		282
附录 1	环境工程常用法定计量单位	282
附录 2	常用单位换算	282
附录 3	某些气体的重要物理性质	285
附录 4	干空气的物理性质(101.33 kPa)	287
附录 5	水的物理性质	287
附录 6	常用固体材料的密度和比热容	288
附录 7	某些固体材料的导热系数	289
附录 8	某些液体的导热系数	290
附录 9	管内流体常用流速范围	291
附录 10	壁面污垢的热阻	291
附录 11	管壁的绝度粗糙度	292
附录 12	泰勒标准筛的规格	292
基本概念和术语		294
主要符号及单位		305

第一章

绪 论

1.1 概述

工业、农业和服务业的发展以及人口、经济、城镇化的快速增长导致大量污染物的产生。目前整个地球环境已经不可能仅仅依靠自净能力实现污染的控制和环境保护的平衡,因此需要环境工程师通过建立污水、污染气体、废物等的收集、处理、排放等环境工程设施来控制污染,保护环境。而这些环境工程设施的设计、建造、运行过程中涉及大量的其他学科的基础知识,如流体力学、化工原理、反应动力学及反应器等。这构成了环境工程基础和原理的主要内容,是进一步学习环境工程,掌握水污染控制工程、大气污染控制工程、固体废弃物治理工程和生态修复工程的基础。

1.2 质量衡算与热力学第一定律

依据物质不灭定律建立的质量衡算和根据热力学第一定律建立的能量守恒计算,是环境工程基础课程中分析、解决问题的基本原则、方法和基础。

1) 质量衡算

质量衡算首先需要确定衡算的范围。根据情况,既可以选整体,也可以是其中的一部分作为一个界定的质量衡算系统。根据质量衡算的依据——质量守恒定律,单位时间内输入系统的物料总量等于单位时间内系统输出的物料总量、系统中积累的物料总量以及系统中反应的物料总量三者之和。其数学表达式为:

$$\sum q_{m进} = \sum q_{m出} + \sum q_{m积累} + \sum q_{m反应} \quad (1-1)$$

式中, $\sum q_{m进}$ ——单位时间内输入系统物料总量, kg/s;

$\sum q_{m出}$ ——单位时间内输出系统物料总量, kg/s;

$\sum q_{m积累}$ ——单位时间内系统中积累的物料总量, kg/s;

$\sum q_{m反应}$ ——单位时间内系统反应的物料总量, kg/s。

式中衡算的物料,既可以是某物质的量[如质量流量、体积流量、摩尔流量、化学需氧量(COD)、生化需氧量等],也可以是元素的量(如硫、氧、碳等)。

【例 1-1】 某大型城市污水处理厂采用混凝沉淀-离心脱水工艺处理合流制污水中的

悬浮物(SS)等,图 1-1 为其处理流程示意图。处理污水流量为 $2.10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$, 混凝沉淀池进出水中的 SS 浓度分别为 240 mg/L 和 15 mg/L 。经混凝沉淀后的污泥(含水率为 95%)进入污泥离心单元后通过高速离心机脱水,脱水后污泥含水率为 65% ,分离液含固率为 0.8% ,分离液回到混凝沉淀池前进行处理。假设系统处于稳定状态,过程中没有生物作用,混凝剂的加入量可以忽略。求整个系统的排水量和污泥体积,以及混凝沉淀池的排泥体积和离心机分离液的回流体积。假设污水和污泥的密度均为 1000 kg/m^3 。

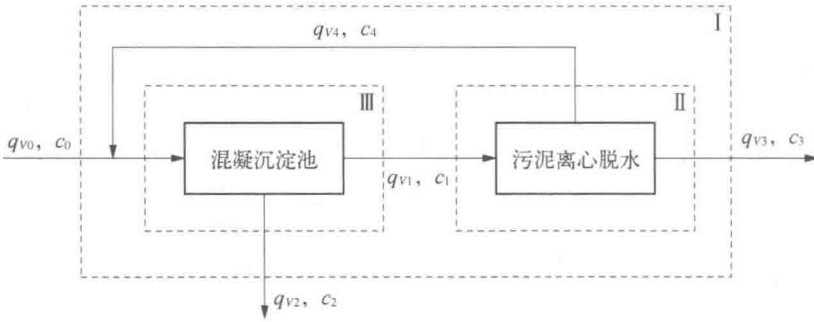


图 1-1 混凝沉淀—离心脱水工艺示意图

已知: $q_{v0} = 2.10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$, $c_0 = 240 \text{ mg/L} = 0.24 \text{ kg/m}^3$, $c_2 = 15 \text{ mg/L} = 0.015 \text{ kg/m}^3$, 污泥含水率为污泥中水和污泥总量的质量比,因此污泥中悬浮物含量为

$$c_1 = (100 - 95)/(100/1000) = 50 \text{ g/L} = 50 \text{ kg/m}^3$$

$$c_3 = 350 \text{ kg/m}^3$$

污水含固率为污水中污泥和水的质量比,因此污水中悬浮物含量为

$$c_4 = 0.8/(100/1000) = 8 \text{ g/L} = 8 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3, \sum q_{m\text{积累}} = 0, \sum q_{m\text{反应}} = 0$$

求: q_{v3} , q_{v2} , q_{v1} , q_{v4} 。

解:

(1) 以系统 I(包括混凝沉淀池和污泥离心脱水单元)为衡算对象

$$\sum q_{m\text{进}} = \sum q_{m\text{出}} + \sum q_{m\text{积累}} + \sum q_{m\text{反应}}$$

$$\sum q_{m\text{进}} = \sum q_{m\text{出}}$$

输入速率 $q_{m\text{入}} = c_0 q_{v0}$

输出速率 $q_{m\text{出}} = c_2 q_{v2} + c_3 q_{v3}$

可得以下衡算方程

$$\begin{cases} c_0 q_{v0} = c_2 q_{v2} + c_3 q_{v3} \\ q_{v0} = q_{v2} + q_{v3} \end{cases}$$

代入数据得

$$\begin{cases} 0.24 \times 2.10 \times 10^6 = 0.015 \times q_{V2} + 350 \times q_{V3} \\ 2.10 \times 10^6 = q_{V2} + q_{V3} \end{cases}$$

解得: $q_{V3} = 1.35 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$, $q_{V2} \approx 2.10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$

(2) 以系统 II (污泥离心脱水单元) 为衡算对象, 同理可得

输入速率 $q_{m\lambda} = c_1 q_{V1}$

输出速率 $q_{m\text{出}} = c_3 q_{V3} + c_4 q_{V4}$

同理, 可得

$$\begin{cases} c_1 q_{V1} = c_3 q_{V3} + c_4 q_{V4} \\ q_{V1} = q_{V3} + q_{V4} \end{cases}$$

代入数据得

$$\begin{cases} 50 \times q_{V1} = 350 \times 1.35 \times 10^3 + 8 \times q_{V4} \\ q_{V1} = 1.35 \times 10^3 + q_{V4} \end{cases}$$

解得: $q_{V1} = 1.10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, $q_{V4} = 9.64 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$

答: 整个系统的排水量和污泥体积分别为 $2.10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $1.35 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$; 混凝沉淀池的排泥体积为 $1.10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 离心机分离液的回流体积为 $9.64 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2) 能量守恒定律与热力学第一定律

能量可以多种形式存在, 且可相互转换, 但遵循能量守恒定律。即一个系统的所有能量的总和是不变的, 能量只能从一种形式变化为另一种形式, 或从系统内一个物体传给另一个物体。根据热力学第一定律, 对任何一个系统, 外界对它传递的热量为 Q , 系统从内能为 E_{n1} 的初始平衡状态改变到内能为 E_{n2} 的末平衡状态, 同时系统对外做功为 W , 那么, 不论过程如何, 总有

$$Q = E_{n2} - E_{n1} + W \quad (1-2)$$

其中, Q ——系统从外界吸收的热量总和, 反之为负, J ;

E_{n1} ——系统初始平衡状态的总内能, J ;

E_{n2} ——系统最终平衡状态的总内能, J ;

W ——系统对外做功, 反之为负, J 。

对微小的状态变化过程, 式(1-2)可写成:

$$dQ = dE_n + dW$$

应用热力学第一定律, 同样需要界定系统范围及选择基准。

【例 1-2】 如图 1-2 所示, 该连续反应池内有 120 m^3 的混合污泥, 温度为 10°C , 进行中温厌氧消化, 需将其加热到 33°C 。采用外循环加热, 使污泥以 $8 \text{ m}^3/\text{h}$ 的流量通过换热器, 换热器用水蒸气加热。其出口温度恒定为 100°C 。假设罐内污泥混合均匀, 污泥的密度为 $1100 \text{ kg}/\text{m}^3$, 不考虑池的散热以及污泥循环过程中的能量损失等, 问污泥加热到所需温度需要多少时间?

已知: $V=120\text{ m}^3$, $q_v=8\text{ m}^3/\text{h}$, $T_1=10^\circ\text{C}$, $T_2=33^\circ\text{C}$, $T_3=100^\circ\text{C}$ 。由于池中污泥混合均匀,则任意时刻从池中排出的污泥温度与池中相同,设为 T 。

求: 污泥加热到所需温度需要的时间。

解: 以污泥池为衡算系统,以 0°C 的污泥为温度物态基准。

在 $d\tau$ 时间内:

$$\text{输入系统的焓 } dH_F = C_p T_3 q_v \rho d\tau$$

$$\text{输出系统的焓 } dH_p = C_p T q_v \rho d\tau$$

$$\text{系统内积累的焓 } dE_q = C_p V \rho dT$$

由 $dH_p - dH_F + dE_q = 0$ 可得 $dH_F - dH_p = dE_q$, 所以

$$C_p T_3 q_v \rho d\tau - C_p T q_v \rho d\tau = C_p V \rho dT$$

$$d\tau = \frac{V dT}{q_v (T_3 - T)}$$

边界条件: $\tau_1 = 0 \quad T_1 = 10^\circ\text{C}$; $\tau_2 = \tau \quad T_2 = 33^\circ\text{C}$

$$\int_0^\tau d\tau = \frac{120}{8} \int_{10}^{33} \frac{dT}{100 - T} \quad \tau = 15 \ln \frac{100 - 10}{100 - 33} = 4.43 \text{ h}$$

答: 污泥加热到所需温度需要 4.43 h。

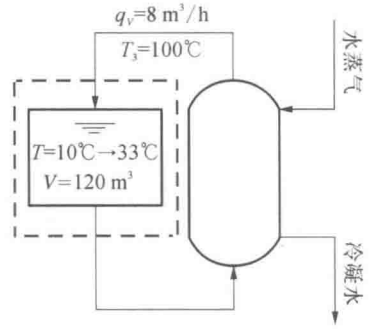


图 1-2 污泥加热系统

1.3 平衡与速率

平衡与速率是分析任何单元操作过程的两个基本方面。

平衡是说明过程进行的方向和所能达到的极限。如过程已达到平衡,则过程不再进行。环境工程反应设备中通常进行的是从一远离平衡的不平衡状态到达另一个靠近平衡的不平衡状态。例如,一个容器中倒入温度不相同的液体,只要空间上任何两处温度不同,即温度不平衡,热量就会从高温处向低温处传递,直到各处温度相同为止。此时过程达到平衡,容器内各处便没有热量传递了。又如测定化学需氧量(COD)装置中的冷凝管,气相中的温度高于液相,即温度不平衡,热量就会从高温的气相向低温的液相转移,出口处气液两相的温差一定小于入口处,即从一个远离平衡的不平衡状态(入口处,温差大)到另一个靠近平衡(温差为零)的不平衡状态(出口处,温差小)。

过程的速率是指过程进行的快慢,是判断一个过程由不平衡向平衡移动的快慢依据。如果一个过程以非常慢的速率进行,那么过程所需的设备将极为庞大,在实际工程中难以应用。

一个过程的速率与过程的推动力成正比,而与过程的阻力成反比,表达式为

$$\text{过程的速率} = \frac{\text{过程的推动力}}{\text{过程阻力}} = \text{过程系数} \times \text{过程推动力} \quad (1-3)$$

推动力的性质决定于过程的内容,如传热过程的推动力是温度差;气体吸收过程的推动力是浓度差或压力差。阻力是各种因素对过程速率影响总的体现。过程系数为过程阻力的倒数。

1.4 物理量的单位和单位制

物理量单位分为基本单位和导出单位。基本单位是几个独立基本的物理量单位。国际单位制(SI)中常用的基本物理量及对应的基本单位有七种(详见表 1-1),它们是长度(米)、质量(千克)、时间(秒)、电流(安)、热力学温度(开)、发光强度(坎)和物质的量(摩尔)。基本物理量以外的其他物理量,均可以根据物理量的定义和物理量之间的规律,从基本物理量导出,称为导出物理量,它们的单位称为导出单位。如物体的长度单位是 m,物质的体积单位是 m^3 。此外,还有一些具有专有名称的导出单位,如功率单位为 W,它与基本单位的关系: $1\text{ W}=1\text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$ 。再如力单位为 N, $1\text{ N}=1\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ 。表 1-2 中为环境工程中常用的一些国际单位制导出单位。

表 1-1 SI 物理量基本单位

物理量名称	符 号	单 位 名 称	单 位 符 号
长度	l	米	m
质量	m	千克(公斤)	kg
时间	τ	秒	s
物质的量	n	摩尔	mol
电流	I	安[培]	A
热力学温度	T	开[尔文]	K
发光强度	I_v	坎[德拉]	cd

表 1-2 环境工程中常用的一些国际单位制(SI)物理导出单位

物理量名称	单 位 名 称	单 位 符 号	其他单位符号
面积	平方米	m^2	—
体积	立方米	m^3	—
速度	米/秒	m/s	—
密度	千克/立方米	kg/m^3	—
浓度	摩尔/立方米	mol/m^3	—
体积流量	立方米/秒	m^3/s	—
质量流量	摩尔/秒	mol/s	—
比容	立方米/千克	m^3/kg	—
力	千克·米/秒 ²	$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$	N
压强	千克/(米·秒 ²)	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$	Pa, N/m^2
能量、功、热	千克·米 ² /秒 ²	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$	J, $\text{N}\cdot\text{m}$
功率	千克·米 ² /秒 ³	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$	W, J/s
动力黏度	千克/(米·秒)	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$	Pa·S, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
运动黏度	米 ² /秒	m^2/s	S·t
比热	米 ² /(秒 ² ·开)	$\text{m}^2/(\text{s}^2\cdot\text{K})$	J/(kg·K)
扩散系数	米 ² /秒	m^2/s	—
导热系数	千克·米/(秒 ³ ·开)	$\text{kg}\cdot\text{m}/(\text{s}^3\cdot\text{K})$	W/(m·K)
传热系数	千克/(秒 ³ ·开)	$\text{kg}/(\text{s}^3\cdot\text{K})$	W/(m ² ·K)

除目前广泛采用的国际单位制以外,由于历史、地域、学科等原因形成了不同的单位制,主要有两类:绝对单位制和工程单位制。这两类单位制又有英制和公制之分。绝对单位制和工程单位制的主要区别在于绝对单位制以质量为基本物理量,其单位(kg)为基本单位,力的单位($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$)为导出单位;而工程单位制以力为基本物理量,其单位(kgf)为基本单位,质量的单位($\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$)为导出单位。力和质量的关系为

$$F_y = ma_j \quad (1-4)$$

式中, F_y ——作用于物体上的力;

m ——物体的质量;

a_j ——物体在作用力方向上的加速度。

表 1-3 表示了公制的绝对单位制、工程单位制、国际单位制(SI)它们物理量关系。同一物理量在不同单位制中的数值可以不同,却“等效”。“换算因子”即为同一物理量用不同单位制度量的数值比值。如国际单位 SI 制中 1 J(或 $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)的能量为工程单位制的 0.102 $\text{kgf}\cdot\text{m}$,其换算因子即为 0.102。环境工程中各种单位制的单位间的换算因子可以在本书附录 1 中查得。

表 1-3 不同单位制下相同物理量关系

单位制 物理量	SI 制		绝对单位制(公制)		工程单位制 (公制)
	符号	名称	CGS	MKS	
长度	m	米	cm	m	m
质量	kg	千克(公斤)	g	kg	$\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$
时间	s	秒	s	s	s
温度	K	开[尔文]	—	—	—
物质的量	mol	摩[尔]	—	—	%
电流	A	安[培]	—	—	—
光强	Cd	坎[德拉]	—	—	—
力	$1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2 = 1 \text{ N}$	牛[顿]	$\text{g}\cdot\text{cm}/\text{s}^2 = \text{dyn}$	$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2 = \text{N}$	kgf
功率	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3 = \text{W}$	瓦[特]	—	—	—
压强	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2) = \text{Pa}$	帕[斯卡]	—	—	atm mmHg mH ₂ O
能量、功、热	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2 = \text{J}$	焦[耳]	—	—	—

【例 1-3】 已知 1.000 atm 等于 760.000 mmHg, 1.033 kgf/cm^2 , 求 1.000 atm 等于多少 Pa、 N/m^2 、 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ 、 mH_2O 。

解: 查附录 2 可知 1 $\text{kgf} = 9.807 \text{ N}$, 可得

$$1.000 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 1.033 \times 9.807 / (1/10\ 000) = 1.013 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}^2$$

因为 $p = F/A$, 其中 F 表示力, 单位是 N; A 表示面积, 单位是 m^2 。则有 $1 \text{ N}/\text{m}^2 = 1 \text{ Pa}$, 故

$$1.000 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

又由表 1-3 可知, 1 $\text{Pa} = 1 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$, 所以 $1.000 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$

由于 $\rho_{\text{Hg}} = 13.600 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1.000 \text{ g/cm}^3$, 所以

$$\begin{aligned} 1.000 \text{ atm} &= 760.000 \text{ mmHg} = 760.000 \times (13.600/1.000) \text{ mmH}_2\text{O} \\ &= 10\,336.000 \text{ mmH}_2\text{O} = 10.336 \text{ mH}_2\text{O} \end{aligned}$$

课后习题

1. 将下列物理量转换成指定的单位:

密度: $3\,600.000 \text{ kg/m}^3 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ g/cm}^3$

压强: $8.900 \text{ atm} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Pa}$; $900.000 \text{ mmHg} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Pa}$; $5.800 \text{ Pa} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kgf/cm}^2$

比热容: $11.300 \text{ kcal}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

表面张力: $10.000 \text{ N/m} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ dyn/cm}$; $8.000 \text{ kgf/m} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ N/m}$

质量: $4.400 \text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kg}$

功率: $20.000 \text{ 马力} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kW}$

流量: $300.000 \text{ m}^3/\text{h} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ L/s}$

2. 如图 1-3 所示, 浓度为 20.0% (质量分数, 下同) 的 PAC (聚合氯化铝) 水溶液以 $1\,000.0 \text{ kg/h}$ 流量送入蒸发器, 在某温度下蒸出一部分水而得到浓度为 50.0% 的 PAC 水溶液, 再送入结晶器冷却析出含有 4.0% 水分的 PAC 固体并不断取走。浓度为 37.5% 的 PAC 饱和母液则返回蒸发器循环处理, 该过程为连续稳定过程, 试求: ① 固体 PAC 产品量 P , 水分蒸发量 W ; ② 循环母液量 R , 浓缩量 S 。

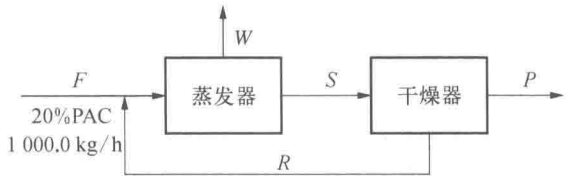


图 1-3 PAC 的干燥过程

3. 如图 1-4 所示, 一罐内存有 30 t 的油, 温度为 30°C 。用外循环加热法进行加热, 油的循环量为 $8 \text{ m}^3/\text{h}$ 。循环的油在换热器中用水蒸气加热, 其在换热器出口温度恒为 100°C , 罐内油均匀混合。假设罐与外界绝热, 问罐内油从 30°C 加热到 75°C 需要多少时间, 油密度设为 990 kg/m^3 。

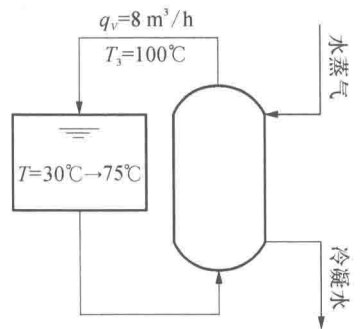


图 1-4 重油加热系统

第二章

流体流动和输送设备

2.1 概述

流体流动是本门课程的基础,这是因为:

- (1) 在研究受污染的水或气体等的输送时,需要研究它们的流动规律,以便进行管路的设计、输送机械的选择及所需功率的计算;
- (2) 为提高去除污染物的效果,常需要提供适宜或最佳的流动条件,以提高设备或反应器的效率;
- (3) 在热量传递和气体吸收过程中,考察对象也多处于流动状态;
- (4) 为了解和控制流体中污染物去除过程,需要对管路或设备内的压强、流量及流速等一系列的参数进行测量,部分测量这些参数的仪器仪表的操作原理是以流体的静止或流动规律为依据的。

综上所述,研究流体流动对提高污染物去除效率,降低成本具有重要的意义。

流体是气体和液体的总称,流体具有以下三个特点:

- (1) 流动性,即抗剪抗张能力都很小;
- (2) 无固定形状,随容器的形状而变化;
- (3) 在外力作用下流体内部发生相对运动。

为了研究流体的运动规律,必须有一个考察流体运动的科学方法。流体连续性假设就是假设流体是由大量质点组成的彼此间没有空隙、完全充满所占空间的连续介质。连续性假设的目的是为了摆脱复杂的分子运动,而从宏观的角度来研究流体的流动规律,这时,流体的物理性质及运动参数在空间作连续分布,从而可用连续函数的数学工具加以描述。考察流体流动就是研究流体质点随空间位置和时间变化时的情况。

2.1.1 流体流动的考察方法

对于流体的流动,有两种不同的考察方法:

- (1) 拉格朗日(Lagrange)法以研究个别流体质点的运动为基础,跟踪质点,描述其运动参数(位移、速度等)随时间的变化规律,通过对每个流体质点运动规律的研究来获得整个流体的运动规律。这种方法又称为质点系法。

$$\begin{cases} u_x = \frac{\partial x}{\partial \tau} = \frac{\partial x(a, b, c, \tau)}{\partial \tau} \\ u_y = \frac{\partial y}{\partial \tau} = \frac{\partial y(a, b, c, \tau)}{\partial \tau} \\ u_z = \frac{\partial z}{\partial \tau} = \frac{\partial z(a, b, c, \tau)}{\partial \tau} \end{cases}$$

拉格朗日法的基本特点是追踪单个质点的运动。在考察单个固体质点的运动以及研究流体质点运动的轨线(质点的运动轨迹)时,采用此法。

(2) 欧拉(Euler)法是以考察不同流体质点通过固定的空间点的运动情况来了解整个流动空间内的流动情况(如空间各点的速度、压强、密度等),即着眼于研究各种运动要素的分布场。这种方法又叫作流场法。欧拉法中,流场中任何一个运动要素可以表示为空间坐标和时间的函数。

欧拉法是流体力学中常用的方法。流体的流线(流场中的一条瞬时曲线,曲线上每一点的切线方向为该点的流速方向)是采用此法考察的结果。对于流体在直管内的稳态流动,轨线与流线重合,采用欧拉法描述流体的流动状态就显得非常方便。研究环境工程工艺某一设备中(控制体)流体的流动情况,就是采用欧拉法。例如,在空间直角坐标系中,

$$\begin{cases} u_x = u_x(x, y, z, \tau) \\ u_y = u_y(x, y, z, \tau) \\ u_z = u_z(x, y, z, \tau) \end{cases} \quad (2-1)$$

若固定空间点,即式(2-1)中 x, y, z 为常数, τ 为变数,即可求得在某一固定空间点上,在不同时刻流速的变化情况。若令 τ 为常数, x, y, z 为变数,则可得到同一时刻,通过不同空间点上的液体质点的流速的分布情况(即瞬时流速场)。

根据复合函数求导数的方法,将式(2-1)对时间求导,可以得到水流质点通过流场中任意点的加速度在 x, y, z 轴方向的分量为

$$\begin{cases} a_{jx} = \frac{du_x}{d\tau} = \frac{\partial u_x}{\partial \tau} + \frac{\partial u_x}{\partial x} \frac{dx}{d\tau} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \frac{dy}{d\tau} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \frac{dz}{d\tau} \\ a_{jy} = \frac{du_y}{d\tau} = \frac{\partial u_y}{\partial \tau} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \frac{dx}{d\tau} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \frac{dy}{d\tau} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \frac{dz}{d\tau} \\ a_{jz} = \frac{du_z}{d\tau} = \frac{\partial u_z}{\partial \tau} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \frac{dx}{d\tau} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \frac{dy}{d\tau} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \frac{dz}{d\tau} \end{cases}$$

因 $\frac{dx}{d\tau} = u_x$, $\frac{dy}{d\tau} = u_y$, $\frac{dz}{d\tau} = u_z$, 代入上式得