

湖南省高等教育教材建设资助项目

废水处理工程

第二版

唐受印 戴友芝 汪大翠 等编

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

废水处理工程/唐受印等编.—2版.—北京:化学工业出版社,2004.2
ISBN 7-5025-5221-9

I. 废… II. 唐… III. 废水处理 IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 008016 号

废水处理工程

第二版

唐受印 戴友芝 汪大翠 等编

责任编辑:陈丽

责任校对:陶燕华

封面设计:蒋艳君

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话:(010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

开本 787 毫米×960 毫米 1/16 印张 25 $\frac{1}{4}$ 字数 614 千字

2004 年 4 月第 2 版 2004 年 4 月北京第 7 次印刷

ISBN 7-5025-5221-9/X · 384

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

第一章 总 论

第一节 废水来源与特性

水是人类生活和生产活动中不可缺少的物质资源。水资源在使用过程中由于丧失了使用价值而被废弃外排，并以各种形式使受纳水体受到影响，这种水就称为废水。

一、废水的来源

根据来源不同，废水可分为生活污水和工业废水两大类。

生活污水是人们在日常生活中所产生的废水，主要包括厨房洗涤、冲洗厕所和沐浴等污水。

工业废水是在工业生产中所排出的废水，其成分主要决定于生产过程中采用的原料以及所应用的工艺。工业废水又可分为生产污水和生产废水。所谓的生产废水是指较清洁，不经处理即可排放或回用的工业废水（例如冷却水）。而那些污染较严重，须经过处理后方可排放的工业废水就称为生产污水。

二、废水的特性

了解废水特性（即其中污染物的种类、性质和浓度），对于废水的收集、处理和处置设施的设计和操作以及环境质量的技术管理都是重要的。

废水中的污染物种类大致可如下区分：固体污染物、需氧污染物、营养性污染物、酸碱污染物、有毒污染物、油类污染物、生物污染物、感官性污染物和热污染等。

为了表征废水水质，规定了许多水质指标。主要有有毒物质、有机物质、悬浮物、细菌总数、pH值、色度、温度等。一种水质指标可能包括几种污染物；而一种污染物也可以属于几种水质指标。

（一）固体污染物

固体污染物常用悬浮物和浊度两个指标来表示。

悬浮物是一项重要水质指标，它的存在不但使水质浑浊，而且使管道及设备阻塞、磨损，干扰废水处理及回收设备的工作。由于大多数废水中都有悬浮物，因此去除悬浮物是废水处理的一项基本任务。

浊度是对水的光传导性能的一种测量，其值可表征废水中胶体和悬浮物的含量。

固体污染物在水中以三种状态存在：溶解态（直径小于1nm）、胶体态（直径介于1~100nm）和悬浮态（直径大于100nm）。水质分析中把固体物质分为两部分：能透过滤膜（孔径约3~10 μ m）的叫溶解固体（DS）；不能透过的叫悬浮固体或悬浮物（SS），两者合称为总固体（TS）。必须指出，这种分类仅仅是为了水处理技术的需要。

（二）需氧污染物

废水中能通过生物化学和化学作用而消耗水中溶解氧的物质，统称为需氧污染物。

绝大多数的需氧污染物是有机物，无机物主要有Fe、Fe²⁺、S²⁻、CN⁻等。因而在一般

式中 $\frac{dL}{dt}$ ——BOD 去除速率, [质量]·[容积]⁻¹·[时间]⁻¹;

L ——在 t 时间水中剩余的 BOD 浓度, [质量]·[容积]⁻¹;

k ——BOD 反应速率常数, [时间]⁻¹。

假定在 $t=0$ 时, $L=L_a$

对式 (1-1) 积分得:
$$\frac{L}{L_a} = e^{-k't} = 10^{-k_1 t} \quad (1-2)$$

式中 $k_1 = k'_1 \lg e = 0.434 k'_1$, 从而可求得任何时日水中剩余的 BOD 为:

$$L = L_a e^{-k_1 t} = L_a 10^{-k_1 t} \quad (1-3)$$

以 BOD_t 为 t 时日反应消耗的溶解氧, 则

$$BOD_t = L_a - L = L_a (1 - 10^{-k_1 t}) \quad (1-4)$$

经验表明, 在水温 20°C 及有充足的溶解氧和经驯化的微生物量时, $k_1 = 0.1 \text{ d}^{-1}$ 。当温度变化时, k_1 值与温度有如下关系:

$$k_1(T) = k_{1(20)} \theta^{(T-20)} \quad (1-5)$$

当 $T=10\sim 30^\circ\text{C}$ 时, θ 值可取 1.047。

对于一定水样, 不但耗氧常数 K_1 随温度上升而加大, 同时 L_a 也随温度增加而增大, 可认为 L_a 与 k_1 呈正比关系, 得:

$$L_{a(T')} = L_{a(T)} [1 + \beta(T' - T)] \quad (1-6)$$

当 $T=20^\circ\text{C}$ 时, $\beta=0.02$

$$L_{a(T')} = L_a (0.02T' + 0.6) \quad (1-7)$$

习惯写成:
$$L_{a(T)} = L_a (0.02T + 0.6) \quad (1-8)$$

2. 化学需氧量 (COD)

化学需氧量是指在酸性条件下, 用强氧化剂将有机物氧化为 CO_2 、 H_2O 所消耗的氧量。氧化剂一般采用重铬酸钾。由于重铬酸钾氧化作用很强, 所以能够较完全地氧化水中大部分有机物和无机性还原物质 (但不包括硝化所需的氧量), 此时化学需氧量用 COD_{Cr} 或 COD 表示。如采用高锰酸钾作为氧化剂, 则写作 COD_{Mn} 。

与 BOD_5 相比, COD_{Cr} 能够在较短的时间内 (规定为 2h) 较精确地测出废水中耗氧物质的含量, 不受水质限制。缺点是不能表示可被微生物氧化的有机物质, 此外废水中的还原性无机物也能消耗部分氧, 造成一定误差。

如果废水中各种成分相对稳定, 那么 COD 与 BOD 之间应有一定的比例关系。一般说来, $\text{COD} > \text{BOD}_{20} > \text{BOD}_5 > \text{COD}_{\text{Mn}}$ 。其中 BOD_5/COD 比值可作为废水是否适宜生化法处理的一个衡量指标。比值越大, 越容易被生化处理。一般认为 BOD_5/COD 大于 0.3 的废水才适宜采用生化处理。

3. 总需氧量 (TOD)

有机物主要元素是 C、H、O、N、S 等。在高温下燃烧后, 将分别产生 CO_2 、 H_2O 、 NO_2 和 SO_2 , 所消耗的氧量称为总需氧量 TOD。TOD 的值一般大于 COD 的值。

TOD 的测定方法是: 向氧含量已知的氧气流中注入定量的水样, 并将其送入以铂为触媒的燃烧管中, 在 900°C 高温下燃烧, 水样中的有机物即被氧化, 消耗掉氧气流中的氧气, 剩余氧量可用电极测定并自动记录。氧气流原有氧量减去剩余氧量即得总需氧量 TOD。TOD 的测定仅需几分钟。

4. 总有机碳 (TOC)

有机物都含有碳,通过测定废水中的总含碳量可以表示有机物含量。总有机碳 (TOC) 的测定方法是:向氧含量已知的氧气流中注入定量的水样,并将其送入以铂为触媒的燃烧管中,在 900℃ 高温下燃烧,用红外气体分析仪测定在燃烧过程中产生的 CO_2 量,再折算出其中的含碳量,就是总有机碳 TOC 值。为排除无机碳酸盐的干扰,应先将水样酸化,再通过压缩空气吹脱水中的碳酸盐。TOC 的测定时间也仅需几分钟。

(三) 营养性污染物

废水中所含的 N 和 P 是植物和微生物的主要营养物质。当废水排入受纳水体,使水中 N 和 P 的浓度分别超过 0.2mg/L 和 0.02mg/L 时,就会引起受纳水体的富营养化,促进各种水生生物(主要是藻类)的活性,刺激它们的异常增殖,这样会造成一系列的危害。

① 藻类占据的空间越来越大,使鱼类活动空间越来越小,衰死藻类将沉积水底,增加水体有机物量。

② 藻类种类逐渐减少,从以硅藻和绿藻为主转为以迅速繁殖的蓝藻为主,蓝藻不是鱼类的良好饲料,并且有些还会产生出毒素。

③ 藻类过度生长,将造成水中溶解氧的急剧减少,使水体处于严重缺氧状态,造成鱼类死亡,水体腐败发臭。

N 的主要来源是氮肥厂、洗毛厂、制革厂、造纸厂、印染厂、食品厂和饲养厂等。P 的主要来源是磷肥厂和含磷洗涤剂等。生活污水经普通生化法处理,也会转化出无机 N 和 P。此外 BOD、温度、维生素类物质也能促进和触发营养性污染。

(四) 酸碱污染物

酸碱污染物主要由工业废水排放的酸碱以及酸雨带来。水质标准中以 pH 值来反映其含量水平。

酸碱污染物使水体的 pH 值发生变化,破坏自然缓冲作用,抑制微生物生长,妨碍水体自净,使水质恶化、土壤酸化或盐碱化。各种生物都有自己的 pH 值适应范围,超过该范围,就会影响其生存。对渔业水体而言,pH 值不得低于 6 或高于 9.2,当 pH 值为 5.5 时,一些鱼类就不能生存或生殖率下降。农业灌溉用水的 pH 值应为 5.5~8.5。此外酸性废水也对金属和混凝土材料造成腐蚀。

(五) 有毒污染物

废水中能对生物引起毒性反应的化学物质,称有毒污染物。工业上使用的有毒化学物已经超过 12000 种,而且每年以 500 种的速度递增。

毒物是重要的水质指标,各类水质标准对主要的毒物都规定了限值。

废水中的毒物可分为三大类:无机化学毒物、有机化学毒物和放射性物质。

1. 无机化学毒物

无机化学毒物包括金属和非金属两类。金属毒物主要为汞、铬、镉、铅、锌、镍、铜、钴、锰、钛、钒、钼和铋等,特别是前几种危害更大。如汞进入人体后被转化为甲基汞,在脑组织内积累,破坏神经功能,无法用药物治疗,严重时能造成死亡。镉中毒时引起全身疼痛、腰关节受损、骨节变形,有时还会引起心血管病。

金属毒物具有以下特点:①不能被微生物降解,只能在各种形态间相互转化、分散,如

无机汞能在微生物作用下，转化为毒性更大的甲基汞；②其毒性以离子态存在时最严重，金属离子在水中容易被带负电荷的胶体吸附，吸附金属离子的胶体可随水流迁移，但大多数会迅速沉降，因此重金属一般都富集在排污口下游一定范围内的底泥中；③能被生物富集于体内，既危害生物，又通过食物链危害人体。如淡水鱼能将汞富集1000倍、镉300倍、铬200倍等；④重金属进入人体后，能够和生理高分子物质，如蛋白质和酶等发生作用而使这些生理高分子物质失去活性，也可能在人体的某些器官积累，造成慢性中毒，其危害，有时需10~20年才能显露出来。

重要的非金属毒物有砷、硒、氰、氟、硫、亚硝酸根等。如砷中毒时能引起中枢神经紊乱，诱发皮肤癌等。亚硝酸盐在人体内还能与仲胺生成亚硝胺，具有强烈的致癌作用。

必须指出的是许多毒物元素，往往是生物体所必需的微量元素，只是在超过一定限值时才会致毒。

2. 有机化学毒物

这类毒物大多是人工合成有机物，难以被生化降解，并且大多是较强的三致物质（致癌、致突变、致畸），毒性很大。主要有：农药（DDT、有机氯、有机磷等）、酚类化合物、聚氯联苯、稠环芳烃（如苯并芘）、芳香族氨基化合物等。以有机氯农药为例，首先其具有很强的化学稳定性，在自然环境中的半衰期为十几年到几十年，其次它们都可能通过食物链在人体内富集，危害人体健康。如DDT能蓄积于鱼脂中，浓度可比水体中高12500倍。

3. 放射性物质

放射性是指原子核衰变而释放射线的物质属性。主要包括X射线、 α 射线、 β 射线、 γ 射线及质子束等。废水中的放射性物质主要来自铀、镭等放射性金属生产和使用过程，如核试验、核燃料再处理、原料冶炼厂等。其浓度一般较低，主要引起慢性辐射和后期效应，如诱发癌症、对孕妇和婴儿产生损伤、引起遗传性伤害等。

（六）油类污染物

油类污染物包括“石油类”和“动植物油”两项。油类污染物能在水面上形成油膜，隔绝大气与水面，破坏水体的复氧条件。它还能附着于土壤颗粒表面和动植物体表，影响养分的吸收和废物的排出。当水中含油0.01~0.1mg/L，对鱼类和水生生物就会产生影响。当水中含油0.3~0.5mg/L，就会产生石油气味，不适合饮用。

（七）生物污染物

生物污染物主要是指废水中的致病性微生物，它包括致病细菌、病虫卵和病毒。未污染的天然水中细菌含量很低，当城市污水、垃圾淋溶水、医院污水等排入后将带入各种病原微生物。如生活污水中可能含有能引起肝炎、伤寒、霍乱、痢疾、脑炎的病毒和细菌以及蛔虫卵和钩虫卵等。生物污染物污染的特点是数量大，分布广，存活时间长，繁殖速度快。必须予以高度重视。

水质标准中的卫生学指标有细菌总数和总大肠菌群数两项，后者反映水体受到动物粪便污染的状况。

（八）感官性污染物

废水中能引起异色、浑浊、泡沫、恶臭等现象的物质，虽无严重危害，但能引起人们感官上的极度不快，被称为感官性污染物。对于供游览和文体活动的水体而言，感官性污染物

的危害则较大。

异色、浑浊的废水主要来源于印染厂、纺织厂、造纸厂、焦化厂、煤气厂等。恶臭废水来源于炼油厂、石化厂、橡胶厂、制药厂、屠宰厂、皮革厂等。当废水中含有表面活性物质时，在流动和曝气过程中将产生泡沫，如造纸废水、纺织废水等。

各类水质标准中，对色度、臭味、浊度、漂浮物等指标都作了相应的规定。

(九) 热污染

废水温度过高而引起的危害，叫做热污染，热污染的主要危害有以下几点。

① 由于水温升高，使水体溶解氧浓度降低，相应的亏氧量随之减少，故大气中的氧向水体传递的速率也减慢；另一方面，水温升高会导致生物耗氧速度加快，促使水体中溶解氧更快被耗尽，水质迅速恶化，造成鱼类和水生生物因缺氧而死亡。

② 由于水温升高，加快藻类繁殖，从而加快水体富营养化进程。

③ 由于水温升高，导致水体中的化学反应加快，使水体的物化性质如离子浓度、电导率、腐蚀性发生变化，可能对管道和容器造成腐蚀。

④ 由于水温升高，加速细菌生长繁殖，增加后续水处理的费用。如取该水体作为给水水源，则需要增加混凝剂和氯的投加量，且使水中的有机氯化物量增加。

第二节 水质标准

水体是国家的宝贵资源，必须严格保护，免受污染。因此当废水需要排入水体时，应处理到允许排入水体的程度，以降低或消除其对水体水质的不利影响。我国有关部门为此制定了废水的各种排放标准。可分为一般排放标准与行业排放标准两类。

一般排放标准有《工业“三废”排放试行标准（GB J 4—73）》、《污水综合排放标准（GB 8978—96）》、《农用污泥中污染物控制标准（GB 4284—84）》等。行业排放标准涉及各种行业，标准很多，如《石油炼制工业水污染物排放标准（GB 3551—83）》、《石油化工水污染物排放标准（GB 4281—84）》、《工业炼制工业水污染物排放标准（GB 3551—83）》、《制革工业水污染物排放标准（GB 3549—83）》、《医院污水排放标准（GB J 48—83）》、《造纸工业水污染物排放标准（GB 3544—2001）》、《钢铁工业水污染物排放标准（GB 13456—92）》、《纺织染整工业水污染物排放标准（GB 4287—92）》、《肉类加工工业水污染物排放标准（GB 13457—92）》、《合成氨工业水污染物排放标准（GWPB 4—1999）》、《电影洗片水水污染排放标准（GB 3553—83）》等，可作为规划、设计、管理与监测的依据。

此外，当废水作为某种用途时，应满足相应的用水水质标准，如《农田灌溉水质标准（GB 5084—92）》、《渔业水质标准（GB 11607—89）》等。

下面重点介绍一下应用最广泛的《污水综合排放标准（GB 8978—96）》。该标准根据废水污染物危害程度把污染物分为两类。

第一类污染物能在环境或在动植物体内积蓄，对人类健康产生长远的影响。规定含此类污染物的污水必须在车间或车间处理设施排放口处取样分析，同时其含量必须符合表 1-1 的规定。第二类污染物的长远影响小于第一类，规定的取样地点为排污单位的排出口，其最高允许排放浓度要按地面水使用功能的要求和污水排放去向，分别执行表 1-2 中的一、二、三级标准。

表 1-1 第一类污染物最高允许排放浓度/(mg/L)

污 染 物	最高允许排放浓度/(mg/L)	污 染 物	最高允许排放浓度/(mg/L)	污 染 物	最高允许排放浓度/(mg/L)
1 总汞	0.05 ^①	4 总铬	1.5	7 总铅	1.0
2 烷基汞	不得检出	5 六价铬	0.5	8 总镍	1.0
3 总镉	0.1	6 总砷	0.5	9 苯并芘 ^②	0.00003

① 烧碱行业（新建、扩建、改建企业）采用 0.005mg/L。

② 为试行标准，二级、三级标准区暂不考核。

表 1-2 第二类污染物最高允许排放浓度/(mg/L)

标准 分 级		一 级 标 准		二 级 标 准		三 级 标 准
标准值 污 染 物	规 模	新 扩 改	现 有	新 扩 改	现 有	
		1 pH 值	6~9	6~9	6~9	
2 色度(稀释倍数)		50	80	80	100	
3 悬浮物		70	100	200	250 ^②	400
4 生化需氧量(BOD ₅)		30	60	60	80	300 ^③
5 化学需氧量(COD _{Cr})		100	150	150	200	500 ^③
6 石油类		10	15	10	20	30
7 动植物油		20	30	20	40	100
8 挥发酚		0.5	1.0	0.5	1.0	2.0
9 氰化物		0.5	0.5	0.5	0.5	1.0
10 硫化物		1.0	1.0	1.0	2.0	2.0
11 氨 氮		15	25	25	40	
12 氟化物		10	15	10	15	20
				20 ^④	30 ^④	
13 磷酸盐(以 P 计) ^⑤		0.5	1.0	1.0	2.0	
14 甲醛		1.0	2.0	2.0	3.0	
15 苯胺类		1.0	2.0	2.0	3.0	5.0
16 硝基苯类		2.0	3.0	3.0	5.0	5.0
17 阴离子合成洗涤剂(LAS)		5.0	10	10	15	20
18 铜		0.5	0.5	1.0	1.0	2.0
19 锌		2.0	2.0	4.0	5.0	5.0
20 锰		2.0	5.0	2.0 ^⑥	5.0 ^⑥	5.0

① 现有火电厂和黏胶纤维工业，二级标准 pH 值放宽到 9.5。

② 磷肥工业悬浮物放宽至 300mg/L。

③ 对排入带有二级污水处理厂的城镇下水道的造纸、皮革、食品、洗毛、酿造、发酵、生物制药、肉类加工、纤维板等工业废水，BOD₅ 可放宽至 600mg/L；COD_{Cr} 可放宽至 1000mg/L。具体限度还可以与市政部门协商。

④ 为低氟地区（系指水体含氟量 < 0.5mg/L）容许排放浓度。

⑤ 为排入蓄水河流和封闭性水域的控制指标。

⑥ 合成脂肪酸工业新扩改为 5mg/L，现有企业为 7.5mg/L。

上面提到的排放标准都是浓度标准。这类标准存在明显的缺陷：它不论废水接纳水体的大小和状况，不论污染源的大小，都采取同一个标准。因此即使满足排放标准，如果排放总量大大超过接纳水体的环境容量，也会对水体造成不可逆的严重后果。此外，浓度标准也无

法防止某些工厂用清水稀释来降低排放浓度以满足排放标准的现象。

针对这一状况，近年来总量控制标准受到了重视。这种标准根据一定范围内的水体环境容量和自净能力，计算出允许排入该水域的污染物总量，然后再按照一定的原则，将这些允许的排污总量合理地分配给区内各污染源。

按照适用范围的大小，总量控制可分几个层次：规定一个工厂（或企业）每个排放口的排污总量；规定一个范围内（包括若干工厂）的排污总量，由各厂协商分配，只要各厂总量不超过该范围所允许的排放总量即可；一条河流的流域往往在地理上与若干城市有关，可以规定流经某城市的河段所允许的排污总量。

总量控制可以避免浓度标准的缺点，但要实行总量控制先需做很多基础工作，如污染源调查，环境质量评价，水体自净规律和污染物迁移转化规律的研究、污染治理边际费用研究等。在没有这些条件以前，总量控制难以实施或奏效。

第三节 废水处理方法综述

废水处理方法按对污染物实施的作用不同，大体上可分为两类：一类是通过各种外力作用，把有害物从废水中分离出来，称为分离法。另一类是通过化学或生化的作用，使其转化为无害的物质或可分离的物质，后者再经过分离予以除去，称为转化法。习惯上也按处理原理不同，将处理方法分为物理法、化学法、物理化学法和生物化学法四类。

一、分离法

废水中的污染物有各种存在形式，大致有离子态、分子态、胶体和悬浮物。存在形式的多样性和污染物特性的各异性，决定了分离方法的多样性，详见表 1-3。

表 1-3 分离法分类一览表

污染物存在形式	分离方法
离子态	离子交换法、电解法、电渗析法、离子吸附法、离子浮选法
分子态	萃取法、结晶法、精馏法、吸附法、浮选法、反渗透法、蒸发法
胶体	混凝法、气浮法、吸附法、过滤法
悬浮物	重力分离法、离心分离法、磁力分离法、筛滤法、气浮法

二、转化法

转化法可分为化学转化和生化转化两类。具体见表 1-4。

表 1-4 转化法分类一览表

方法原理	转化方法
化学转化	中和法、氧化还原法、化学沉淀法、电化学法
生化转化	活性污泥法、生物膜法、厌氧生物处理法、生物塘等

现代废水处理技术，按处理程度划分，可分为一级、二级和三级处理。

一级处理，主要去除废水中悬浮固体和漂浮物质，同时还通过中和或均衡等预处理对废水进

行调节以便排入接纳水体或二级处理装置。主要包括筛滤、沉淀等物理处理方法。经过一级处理后，废水的 BOD 一般只去除 30% 左右，达不到排放标准，仍需进行二级处理。

二级处理，主要去除废水中呈胶体和溶解状态的有机污染物质，主要采用各种生物处理

方法，BOD 去除率可达 90% 以上，处理水可以达标排放。

三级处理，是在一级、二级处理的基础上，对难降解的有机物、磷、氮等营养性物质进一步处理。采用的方法可能有混凝、过滤、离子交换、反渗透、超滤、消毒等。

废水中的污染物组成相当复杂，往往需要采用几种方法的组合流程，才能达到处理要求。对于某种废水，采用哪几种处理方法组合，要根据废水的水质、水量，回收其中有用物质的可能性，经过技术和经济的比较后才能决定，必要时还需进行试验。

图 1-2 是城市污水处理的典型流程。

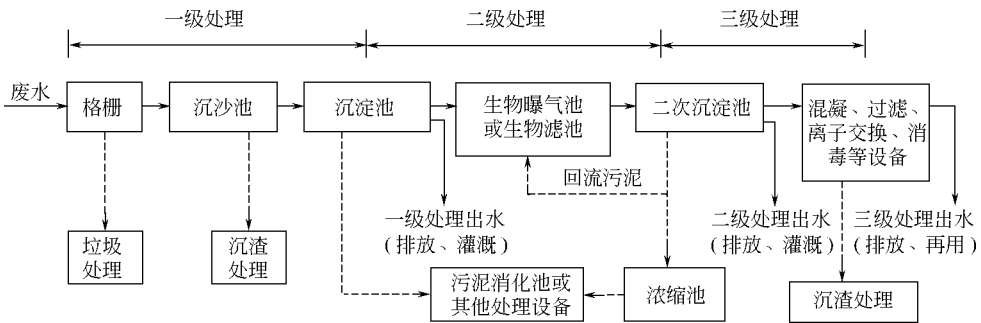


图 1-2 城市污水典型处理流程

第四节 废水处理反应器及动力学基础

废水处理中所用的构筑物与设备均可视做某一类型的反应器。例如，水处理中的快速混合适用连续流搅拌反应器基本原理；推流反应器基本原理可应用于沉淀、过滤、吸附以及离子交换等处理系统；活性污泥法则具有连续流搅拌反应器或推流反应器的特征。学习和运用反应器及动力学知识，将有助于提高水处理理论水平，对水处理设备的设计、改进、操作管理、问题分析等都是有益的。

一、水力混合方式

物料在反应器中的流动，一般分为层流和湍流（或紊流）两种流态，这是由流动的方向和速度的分布来区分的。流速不同，物料粒子在反应器中的停留时间则不同，称之为“返混”。

反应器存在两种典型的水力混合方式，即：推流式和完全混合式。理想的推流式反应器的水流特征是：通过反应器的混合液沿流向以一个整体的形式向前流动，在垂直于液流运动方向上的任一截面上，混合液流动速率和性质是均匀的，任一液流单元（或液流中的所有组分）在反应器中的停留时间都是相同的，反应器中不存在返混现象。理想的完全混合流的水力特征是：液流一进入反应器即和反应器内所有的混合液完全混合，反应器中各点的水质都是均一的，即返混达到了最大限度。因而稳态运行条件下，反应器出流的成分和反应器内的液体完全相同。应说明的是这两种混合方式都是在极限状态下才存在的，实际的水力混合方式都是处在上述两种理想方式之间，我们可统称之为非理想流态。但是为了方便起见，工程计算上常把接近于上述理想混合方式的情况当做理想方式来处理。

二、反应器形式

用于废水处理的反应器，按其水力特性可划分为：（1）间歇反应器；（2）推流反应器；

(3) 连续流搅拌反应器；(4) 任意流反应器。这四种反应器进行的都是均相反应，另外还有两种非均相反应器：填料床反应器和流化床反应器。对这些反应器的说明见表 1-5。

表 1-5 废水处理中的主要反应器形式

反应器形式	说 明
间歇反应器	间歇式反应器采用一次加料，搅拌反应，待反应结束后再同时放出，所有物料反应时间相同，且浓度均匀，但随时间而变化，因而是在非稳态条件下操作的
推流反应器	物料按前后顺序沿流动方向推流，反应时间是反应器长度的函数，因而反应物浓度沿路程而变化。但在反应器内所有物料的停留时间相同
连续流搅拌反应器	连续流搅拌反应器又称全混式反应器。物料边进边出，连续流动，因充分搅拌，各处浓度均匀，出口浓度与反应器内浓度一致。在稳态条件下，整个系统不随时间而变化
任意流反应器	任意流是介于推流和连续流搅拌反应器之间的某种程度的局部混合流
填料床	填料床反应器是在反应器内装入填料。填料或者完全充满液体（如厌氧滤池），或者间断接受废水（如生物滤池）
流化床	流化床反应器在许多方面都与填料床反应器类似，只是在流体向上流动时，填料处于流化状态，并可通过调节流体的速度改变填料的孔隙率

三、动力学基础

对于任一反应器系统，其物料衡算式均可表示为：

$$A \text{ 的质量净变化率} = A \text{ 的质量输入率} - A \text{ 的质量输出率} - \text{反应消耗 } A \text{ 的速率}$$

物料衡算通常以某一组分为基准。若反应器组成均匀，物料衡算可在整个反应器范围内进行；若组成不均匀，则应对反应器中某微元体积作物料衡算，以推导出反应器基本设计方程。为简便起见，本节中反应速率均假设为一级。

(一) 间歇式反应器

间歇式反应器是一种全混的封闭系统，在反应期间，系统无物料出入，其物料衡算可简化为：

$$\text{反应物 } A \text{ 的质量净变化率} = \text{反应消耗 } A \text{ 的速率}$$

设反应器容积为 V ，反应物 A 初始浓度 c_0 。转化率为 x_A ，反应速率以 kc 表示，代入物料衡算式

$$\begin{aligned}
 & \frac{dc}{dt} = -kc \\
 \text{积分得} & \quad -c_0 \frac{dx_A}{dt} = -kc \\
 & \quad t = c_0 \int_0^{x_A} \frac{dx_A}{kc} \qquad (1-9)
 \end{aligned}$$

式中， t 为使反应物 A 的转化率达到 x_A 时所需的反应时间； c 为反应物浓度； k 为反应速率常数。由于 $x_A = (c_0 - c)/c_0$ 代入式 (1-9)，有

$$t = -\frac{1}{k} \ln \frac{c}{c_0}$$

最后得：

$$c = c_0 \exp(-kt) \quad (1-10)$$

该式表示间歇反应器内反应物浓度随时间变化的关系。

(二) 连续流搅拌反应器

连续流搅拌反应器示意图见图 1-3，反应器体积为 V ，进入反应器的反应物流率为 Q ，由此可写出其物料衡算式：

$$V \frac{dc}{dt} = Qc_0 - Qc - V(kc) \quad (1-11)$$

1. 在稳态条件下， $V \frac{dc}{dt} = 0$ ，上式简化为

$$Qc_0 - Qc - V(kc) = 0$$

即

$$\frac{c}{c_0} = \frac{Q}{Q + kV}$$

上式可改写成

$$c = \frac{c_0}{1 + \theta K} \quad \text{或} \quad \theta = \frac{1}{k} \left(\frac{c_0}{c} - 1 \right) \quad (1-12)$$

式中 $\theta = V/Q$ ，表示物料在反应器内的水力停留时间。

2. 在非稳态条件下，式 (1-11) 可改写成

$$\frac{dc}{c_0 - (1 + \theta K)c} = \frac{1}{\theta} dt$$

积分得

$$c = \frac{1}{(1 + \theta K)} c_0 \{ 1 - \exp[-(1 + \theta K)(t/\theta)] \} \quad (1-13)$$

由式 (1-13) 可看出，达到稳态条件首先与 t/θ 有关，当 t 值相当大时，上式指数项可忽略不计，此时式 (1-13) 可简化为式 (1-12)，即处于稳态条件；其次与 θK 有关， θK 越大，越易达到稳态条件，结果见图 1-4。

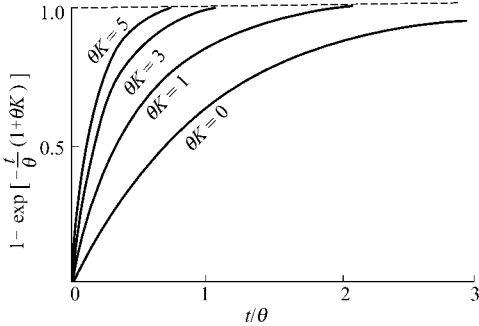


图 1-4 连续流搅拌反应器达到稳态的时间

(三) 推流反应器

在理想的推流反应器中，各反应物在流动方向上不存在混合现象，但却由于反应而使浓度发生变化。因此反应物的浓度随空间和时间而变化，这是与连续流搅拌反应器不同的。推流反应器示意图如图 1-5 所示。由此可对微元列出物料衡算如下：

$$(F\Delta Z) \frac{\partial c_z}{\partial t} = Qc_z - Qc_{z+\Delta Z} - (F\Delta Z)kc_z$$

$\Delta Z \rightarrow dZ$ 时，上式可写成

$$\frac{\partial c_z}{\partial t} = -\frac{Q}{F} \frac{\partial c_z}{\partial Z} - kc_z$$

式中 F 为反应器截面积。

略去下标 Z ，并用水平流速 V 代替 Q/F ，上式

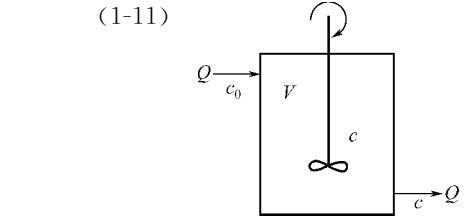


图 1-3 连续流搅拌反应器

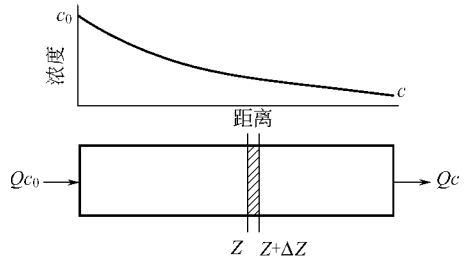


图 1-5 推流反应器

可写成

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -V \frac{\partial c}{\partial Z} - kc$$

在稳态条件下, $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$, 则有

$$V \frac{dc}{dZ} = -kc$$

积分得

$$c = c_0 \exp(-K\theta) \quad (1-14)$$

式中, $\theta = Z/V$ 表示反应物推流到距离 Z 所需的时间, 当 θ 等于反应器理论停留时间时, c 即为出口浓度。

比较式 (1-14) 与式 (1-10) 即可发现, 两式在形式上完全相同, 只是一个为反应物推流到距离 Z 时所需的时间 θ , 一个为反应时间 t 。因此, 可以把推流反应器看做是一个沿水流方向运动的间歇式反应器, 亦即推流反应器中的位置变量 Z 对应于间歇式反应器中的时间变量 t 。

(四) 串联连续流搅拌反应器

对串联连续流搅拌反应器的研究可从两个容积相同的连续流搅拌反应器开始 (见图 1-6)。在稳态条件下, 由前文分析可知, 有

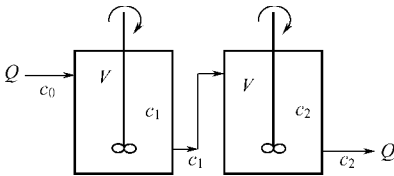


图 1-6 串联连续流搅拌反应器

$$\frac{c_1}{c_0} = \frac{1}{1+\theta K} \quad \text{和} \quad \frac{c_2}{c_1} = \frac{1}{1+\theta K}$$

于是有

$$\frac{c_2}{c_0} = \left(\frac{1}{1+\theta K} \right)^2$$

依此类推, 对 n 个等积串联反应器, 有

$$\frac{c_n}{c_0} = \left(\frac{1}{1+\theta K} \right)^n \quad (1-15)$$

对于 n 个等积串联反应器, 其总容积 $V' = nV$, 总停留时间 $\theta' = n\theta$, 代入式 (1-15), 当 $n \rightarrow \infty$, 则有

$$c_n = \frac{c_0}{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{\theta' K}{n} \right)^n} = c_0 \exp(-\theta' K) \quad (1-16)$$

式 (1-16) 与推流反应器公式 (1-14) 相同, 这说明, 串联的连续流搅拌反应器数目越多, 其效果就越接近于总容积和停留时间与之相同的推流反应器。

另外, 式 (1-15) 可改写为

$$\theta = \frac{1}{k} \left[\left(\frac{c_0}{c_n} \right)^{1/n} - 1 \right] \quad \text{或} \quad V = \frac{Q}{k} \left[\left(\frac{c_0}{c_n} \right)^{1/n} - 1 \right] \quad (1-17)$$

由上式可看出, 在出口浓度 c_n 给定的前提下, n 值越大, 则每个反应器所需的容积及停留时间就越小。此外, 由于每个反应器的反应物平均浓度高于单一反应器 (体积为 nV) 浓度, 因而平均反应速率要大些, 而所需的反应时间则相应地减少, 因此反应器总的容积和总的停留时间亦小于单个反应器。

四、水力特性

反应器水力特性的测定方法采用的是示踪响应法, 即在反应器的进口处加入一定量的示

踪剂（如放射性同位素、有色颜料、惰性物质等），同时测定反应器出口处示踪剂浓度随时间的变化。示踪剂的加入有两种方法，一种为连续加入，一种为脉冲加入。

以推流反应器为例，如连续加入浓度为 c_0 的示踪剂，则示踪剂从理论停留时间 t_0 (V/Q) 起，以浓度 c_0 流出反应器，而在 t_0 之前，示踪剂浓度为 0。如用脉冲加入浓度为 c_0 的示踪剂，则反应器出口只在 t_0 时刻能测出示踪剂，且浓度仍为 c_0 。具体见图 1-7。图 1-7 同时还描述了连续流搅拌反应器和任意流反应器的水力特性。

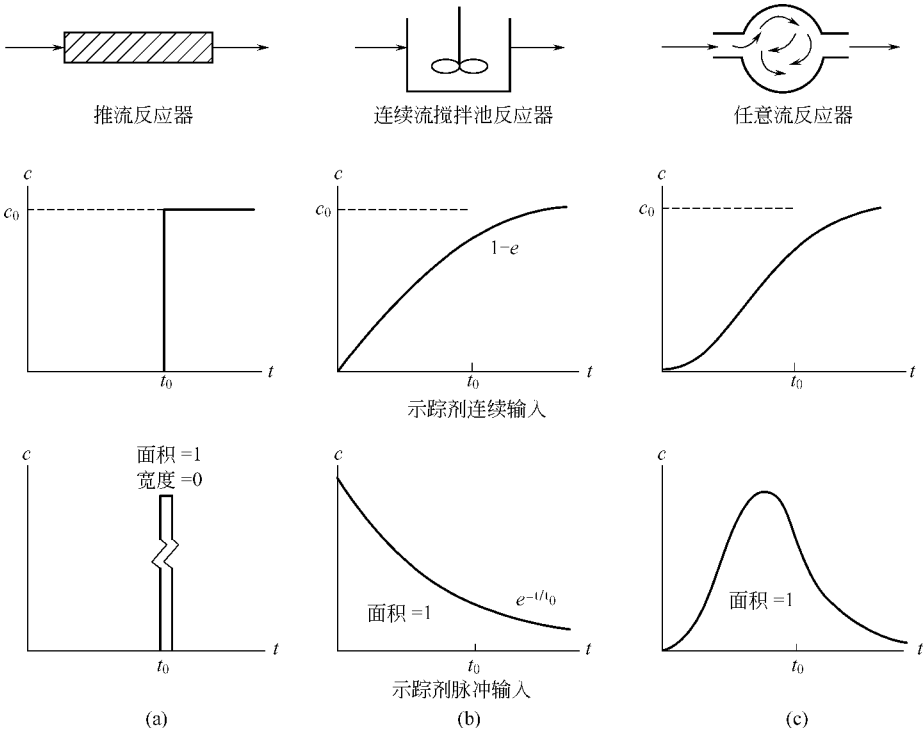


图 1-7 废水处理领域中常见反应器的水力特性

五、反应器设计中的若干问题

在反应器设计过程中，首先要考虑的是反应器的选型。选型的影响因素有：(1) 过程要求；(2) 反应动力学；(3) 废水水质；(4) 经济性等。由于各因素的重要性随具体过程而异，所以在选型时，对各因素要分别考虑。

在设计反应器时，还需考虑如何达到或接近所假设的理想状态。以设计连续流搅拌反应器为例，实际情况是总在某种程度上偏离理想状态，这时应考虑如何引入水流以达到理论上即刻和完全混合的要求。

短路是影响反应器性能的另一个常见问题。由于短路，反应器的有效容积减小，或混合不完全，或停留时间不够，从而影响处理效果。为防止反应器内产生短路，可能需要在反应器内设置折流板，或者，如短路是由温差引起的异重流所导致，则需要以某种形式输入能量使温度均衡。为此，常采用机械搅拌和空气搅拌两种方法。

思考题与习题

1. 在污水处理中，主要有哪些水质指标？什么叫生化需氧量？试比较生化需氧量和化学需氧量。
2. 试述水污染控制方法的分类及其特点。
3. 污水处理一般分为三级，每级的主要处理对象是什么？
4. 有机物的生物氧化过程一般分哪两个阶段进行？是否任何有机物的生物氧化都是如此？为什么 BOD_5 一般已有一定代表性？
5. 已知某一废水 $BOD_5 = 200\text{mg/L}$ ， $k = 0.15\text{d}^{-1}$ ，求好氧微生物在有氧条件下降解 10 天后剩余的 BOD 值 ($t = 20^\circ\text{C}$)。
6. 某厂生活污水在 20°C 时 5 天测得 BOD_5 为 25mg/L ，试问在 30°C 时测定生化需氧量为多少？2 天 30°C 的生化需氧量又为多少？
7. 理想流主要有哪几种流态？它们的主要特点是什么？设计中希望平流式沉淀池、水质调节池、水质水量调节池、混凝反应池、普通快滤池、固定床吸附柱等水流流态各为哪一种流态，为什么？

第二章 预 处 理

第一节 水质和水量调节

废水的水量和水质并不总是恒定均匀的，往往随着时间的推移而变化。生活污水随生活作息规律而变化，工业废水的水量水质随生产过程而变化。水量和水质的变化使得处理设备不能在最佳的工艺条件下运行，严重时甚至使设备无法工作，为此需要设置调节池，对水量和水质进行调节。

一、水量调节

废水处理中单纯的水量调节有两种方式：一种为线内调节（见图 2-1），进水一般采用重力流，出水用泵提升。调节池的容积可采用图解法计算，具体参见设计手册。实际上，由于废水流量的变化往往规律性差，所以调节池容积的设计一般凭经验确定。

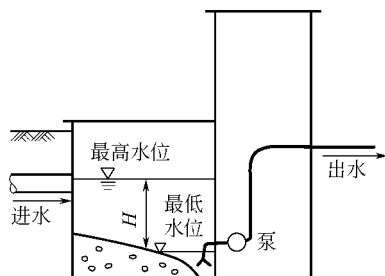


图 2-1 水量调节池

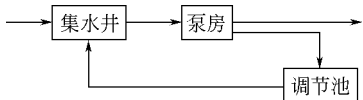


图 2-2 线外调节方式

另一种为线外调节（见图 2-2）。调节池设在旁路上，当废水流量过高时，多余废水用泵打入调节池，当流量低于设计流量时，再从调节池回流至集水井，并送去后续处理。

线外调节与线内调节相比，其调节池不受进水管高度限制，但被调节水量需要两次提升，消耗动力大。

二、水质调节

水质调节的任务是对不同时间或不同来源的废水进行混合，使流出水质比较均匀，水质调节池也称均和池或匀质池。

水质调节的基本方法有两种。

① 利用外加动力（如叶轮搅拌、空气搅拌、水泵循环）而进行的强制调节，它设备较简单，效果较好，但运行费用高。

② 利用差流方式使不同时间和不同浓度的废水进行自身水力混合，基本没有运行费，但设备结构较复杂。

图 2-3 为一种外加动力的水质调节池，采用压缩空气搅拌。在池底设有曝气管，在空气搅拌作用下，使不同时间进入池内的废水得以混合。这种调节池构造简单，效果较好，并可防止悬浮物沉积于池内。最适宜在废水流量不大、处理工艺中需要预曝气以及有现成压缩空气的情况下使用。如废水中存在易挥发的有害物质，则不宜使用该类调节池，此时可使用叶轮搅拌。

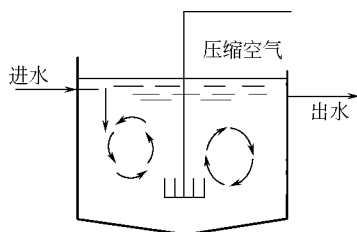


图 2-3 曝气均和池