

粮 食 食 品 工 艺 学

第一册(二)

无 锡 轻 工 业 学 院

一九八八年十月

第三章 废水处理过程及设备

随着人民生活水平日益提高和城乡工业迅猛发展，废水的排放量亦随之大量增加，如不加以合理的治理，将危及城乡环境包括水系的卫生，这不仅危及人体健康，还会严重影响渔业生产以及农田的灌溉，并造成整个生态平衡的破坏。所以废水治理是一项相当重要的工作，在目前已成为当务之急。

为了让我们更好的了解废水治理的重要性和要求，下列数表以供我们在用水排水方面参考，并重视治理造福人类。

表一： 工业“废水”最高允许排放浓度

序号	有害物质名称	最高允许排放浓度（毫克/升）
1	汞及其无机化合物	0.05（按Hg计）
2	镉及其无机化合物	0.1（按Cd计）
3	六价铬化合物	0.5（按Cr ⁺ 计）
4	砷及其无机化合物	0.5（按As计）
5	铅及其无机化合物	1.0（按Pb计）

表二:

工业“废水”最高允许排放浓度

序号	有害物质或项目名称	最高允许排放浓度
1	P H	5~9
2	悬浮物(水力排压、洗煤水、水力冲渣、尾矿水)	500毫克/升
3	生化需氧量(5天20℃)	60毫克/升
4	化学耗氧量(重铬酸钾法)	100毫克/升
5	硫化物	1毫克/升
6	挥发性酚	0.5毫克/升
7	氰化物(以游离氰根计)	0.5毫克/升
8	有机磷	0.5毫克/升
9	石油类	10毫克/升
10	铜及其化合物	1毫克/升(按C U计)
11	锌及其化合	5毫克/升(按Z H计)
12	氟的无机化合物	10毫克/升(按F计)
13	硝基苯类	5毫克/升
14	苯胺类	3毫克/升

注: (1) 造纸、制革、脱脂棉<300毫克/升

表三：

渔业水域水质标准

序号	项目	标 准
1	色、臭、味	不得使鱼虾贝藻类带有异色、异臭、异味
2	漂浮物质	水面不得出现明显油膜或浮沫
3	悬浮物质	人为增加的量不得超过10毫克/升，而且悬浮物质沉积于底部后，不得对鱼虾贝藻类产生有害的影响。
4	P H 值	淡水6.5~8.5 海水7.0~8.5
5	生化需氧量 (20℃五天)	不超过5毫克/升；冰封期不超过3毫克/升
6	溶解氧	24小时中，16小时以上必须大于5毫克/升，其余任何时候不得低于3毫克/升，对于鲑科鱼类栖息水域冰封期其余任何时候不得低于4毫克/升
7	汞	不超过0.0005毫克/升
8	镉	不超过0.005毫克/升
9	铅	不超过0.1毫克/升
10	铬	不超过1.0毫克/升
11	铜	不超过0.01毫克/升
12	锌	不超过0.1毫克/升
13	镍	不超过0.1毫克/升
14	砷	不超过0.1毫克/升

序号	项目	标准
15	氰化物	不超过0.02毫克/升
16	硫化物	不超过0.2毫克/升
17	氟化物	不超过1.0毫克/升
18	挥发性酚	不超过0.005毫克/升
19	黄磷	不超过0.002毫克/升
20	石油类	不超过0.05毫克/升
21	丙烯晴	不超过0.7毫克/升
22	丙烯醛	不超过0.02毫克/升
23	六六六	不超过0.02毫克/升
24	滴滴涕	不超过0.001毫克/升
25	马拉硫磷	不超过0.005毫克/升
26	五氯酚钠	不超过0.01毫克/升
27	苯胺	不超过0.4毫克/升
28	对硝基氯苯	不超过0.1毫克/升
29	对氨基苯酚	不超过0.1毫克/升
30	水合肼	不超过0.01毫克/升
31	邻苯二甲酸二丁酯	不超过0.06毫克/升
32	松节油	不超过0.3毫克/升
33	1,2,3-三氯苯	不超过0.06毫克/升
34	1,2,3,5-四氯苯	不超过0.02毫克/升

注：放射性物质的标准，应按现行的《放射防护规定》中关于露天源中放射性物质限制浓度的规定执行。

表四:

农田灌溉用水水质标准

序号	项 目	标 准
1	水温	不超过35℃
2	PH值	5.5~8.5
3	全盐量	非盐碱土农田不超过1500毫克/升
4	氯化物	非盐碱土农田不超过300毫克/升 (按Cl计)
5	硫化物	不超过1.0毫克/升(按S计)
6	汞及其化合物	不超过0.001毫克/升(按Hg计)
7	镉及其化合物	不超过0.005毫克/升(按Cd计)
8	砷及其化合物	不超过0.05毫克/升(按As计)
9	六价铬化合物	不超过0.1毫克/升(按Cr+6计)
10	铅及其化合物	不超过0.1毫克/升(按Pb计)
11	铜及其化合物	不超过1.0毫克/升(按Cu计)
12	锌及其化合物	不超过3毫克/升(按Zn计)
13	及其化合物	不超过0.01毫克/升(按Se计)
14	氟化物	不超过3毫克/升(按F计)
15	氰化物	不超过0.5毫克/升(按游离氰根计)
16	石油类	不超过10毫克/升
17	挥发性酚	不超过1毫克/升
18	苯	不超过2.5毫克/升
19	三氯乙烯	不超过0.5/升
20	丙烯醛	不超过0.5毫克/升

注：放射性物质的标准，应按现行的《放射保护规定》中关于露天水源中放射性物质限制浓度的规定执行。

废水处理方法主要可采用三种基本方法，即：物理处理法、化学处理法和生物处理法，下面将逐一讨论各种处理方法的原理及其处理设备。

第一节 废水分离的基本原理

废水物理分离过程包括下沉、上浮、过滤、离心分离和磁力分离等方法。本节介绍下沉、上浮、过滤三个过程的基本原理，有关离心分离和磁力分离方法可参阅其他专著。

一、下沉规律

下沉法是利用重力作用使废水中的悬浮物质沉降，从而净化废水的物理处理方法。工业废水中含有不同的悬浮物，如肉类加工工业和皮革加工工业的废水中含有有机性悬浮物，洗矿和洗煤废水中含有矿石、煤粉等无机悬浮物，这些悬浮物多数是有效物质，用重力分离法进行处理，既可使废水得到一定程度的净化，又可回收有效物质。

(一) 非絮凝分散粒子的沉降

非絮凝分散粒子的经典理论认为，当一个密度为 ρ_P 的球体粒子，在不受其他粒子干扰的情况下，在密度为 ρ 的液体中沉降，粒子很快达到恒定的终端速度 V_P ，作用在粒子上的力有重力 F_G 、浮力 F_B 和曳力 F_D ：

$$F_G = m g \quad (3-1)$$

$$F_B = V_P g = m g \frac{\rho}{\rho_P} \quad (3-2)$$

$$F_D = C_D \rho_P \frac{V_P^2}{2} \quad (3-3)$$

式中 g —重力加速度, 米/秒²;

m —粒子质量, 公斤;

V —粒子体积, m³;

A_P —在沉降垂直方向平面上粒子投影面积, m²;

C_D —曳力系数(无量纲), 在达到终速时,

$$F_G - F_B = F_D \quad (3-4)$$

$$\frac{mg}{\rho_P} (\rho_P - \rho) = C_D \rho \frac{V_P^2}{2} A_P \quad (3-5)$$

因为
$$\frac{m}{\rho_P} = V \quad (3-6)$$

$$V_P^2 = \frac{2g}{C_D} \left(\frac{\rho_P - \rho}{\rho} \right) \frac{V}{A_P} \quad (3-7)$$

对于一个直径为 d 的球体粒子,

$$\frac{V}{A_P} = \frac{\pi d^3}{6} \frac{4}{\pi d^2} = \frac{2d}{3} \quad (3-8)$$

由此可得表示沉降速度的通式为

$$V_P = \left[\frac{4gd}{3C_D} \left(\frac{\rho_P - \rho}{\rho} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

C_D 为雷诺数 Re (无量纲) 的函数, 可参见图 3-1, Re 可从下式计算:

$$Re = \frac{\rho v_p d}{\mu} \quad (3-10)$$

式中 μ — 液体的绝对粘度, 牛顿·秒/米², 和 e 均随温度而改变。

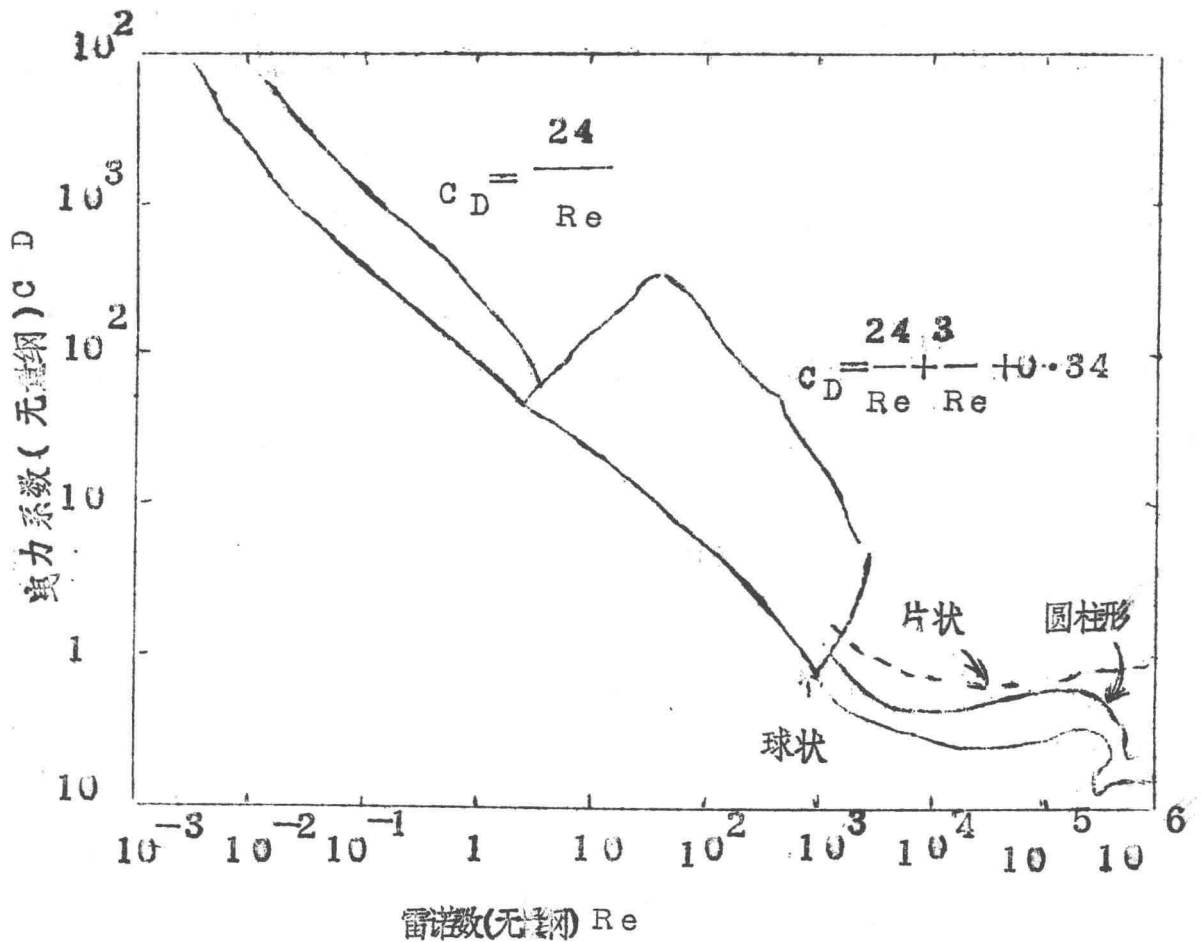


图3-1 曳力系数随雷诺数的变化曲线

当 $R_e < 0.5$ 时,

$$C_D \approx \frac{24}{R_e} \quad (3-11)$$

$$V_P = \frac{g d^2}{18 \nu} \left(\frac{\rho_P - \rho}{\rho} \right) \quad (3-12)$$

式中 ν —液体的动力粘度, $m^2/\text{秒}$, 即

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3-13)$$

$R_e < 0.5$ 的区间即为斯托克斯定律的沉降区间。在 $10^3 < R_e < 10^5$ 区间内, C_D 值与悬浮粒子的形状和相对尺度有关。例如, 球状粒子的 C_D 值为 0.4 。该区间称为牛顿定律沉降区间。对于球形粒子,

$$V_P = \left[\frac{g d}{0.3} \left(\frac{\rho_P - \rho}{\rho} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-14)$$

当 $R_e > 10^5$, 产生液体边界层分离, C_D 达到很低值。对于存在于天然水体中的许多悬浮粒子, 它们的相对密度 (ρ_P/ρ) 和直径可使 R_e 值介于 $0.5 < R_e < 10^3$, 该区间的 C_D 可用下式近似地进行计算:

$$C_D = \frac{24}{R_e} + \frac{3}{R_e} + 0.34 \quad (3-15)$$

要确定 V_P 值，必须用迭代法进行计算。

实际上，水和废水中的悬浮粒子几乎很少成完美的球形，所以，

要解释 $\frac{V}{A_p} < \frac{2d}{3}$ ，必须在式(3-9)中引入各种因子。一个方法

是规定无量纲的球形系数 Φ ，

$$\Phi = \frac{d_s}{d} \quad (3-16)$$

式中 d_s 一直径为 d 的粒子具有相同沉降速度的球状粒子的直径。

可为通过和截留样品的筛孔尺寸的几何平均值； n 个参数 $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$ 的几何平均值为 $(X_1 X_2 X_3 \dots X_n)^{\frac{1}{n}}$ 。不同物料的 Φ 值见表 3-1，可使用下列公式计算非球形粒子的沉降终速：

$$\frac{V}{A_p} = \frac{2}{3} \Phi d \quad (3-17)$$

上式可用于式(3-7)，可用迭代法完成计算，可用乘积 Φd 代替 R_e 计算式中的 d 。

(二) 表面溢流率——设计流速

表面溢流率（或流量/表面积）是沉淀池设计的主要指标。可参照图 3-2 进行计算。进入图 3-2 所示的平流沉淀池的悬浮水柱中含有多种不同尺寸和密度的粒子， P 粒子为其中之一，沉淀池是理想的，无边界效应，也无冲刷作用。O R S T 表示沉淀池的终端，如果 P 粒子在未达到 S T 前沉到池底，可作“除去”论。

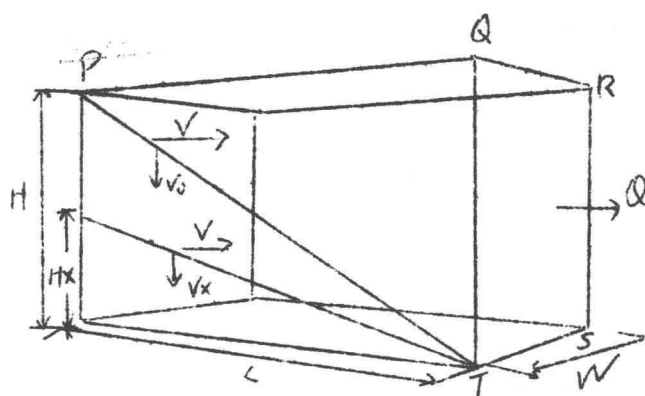


图 3-2 平面沉淀池的理想沉降

表 3-1

几种物料的球形系数 Φ

	Φ	密度 (克/米 ³)
渥太华砂	0.95	
Light On Buzzard 砂	0.80	2650
聚苯乙烯	0.72	1060
英国无烟煤, NC B 3 级	1.00	
	0.62	1040
金刚砂	0.85	3830
燧石砂 (碎)	0.78~0.83	2650

据几何学公式:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{L}{H}$$

(3-18)

式中 V — 前向速度；

L, H — 分别为沉淀池的长度和深度；

V_0 — P 粒子的沉降速度。

但是

$$V = \frac{Q}{WH} \quad (3-19)$$

式中 Q — 进入池内的流速

W — 沉淀池宽度。

由式 (3-18) 和式 (3-19) 可得

$$V_0 = \frac{Q}{WL} = \frac{Q}{A} \quad (3-20)$$

式中 A — 沉淀池表面积。

很明显，速度大于 V_0 的全部粒子必须在池中沉淀，故可把 V_0 作为沉淀池的设计沉速度，故有因为

$$Q \cdot t_r = WHL \quad (3-21)$$

式中 t_r — 沉淀池中的停留时间

$$\frac{H}{t_r} = \frac{Q}{WL} \quad (3-22)$$

式 (3-22) 表明，流量与单位表面积之比等于池深与停留时间之比。令人惊的是沉速与池深无关。

沉速小于 V_0 的那一部分粒子也可在这平流沉淀池中除去。设想有一 P_x 粒子，处于高度 H_x (或低于 H_x)，其沉降速 V_x 足够使它在池内沉出，则，

$$\frac{H \cdot X}{L} = \frac{V_x}{V} \quad (3-23)$$

但是， $V = \frac{L}{H} V_0$ (3-24)

因此， $\frac{H \cdot X}{H} = \frac{V_x}{V_0}$ (3-25)

因为任何一个具有沉速 V 且在池内高度大于或等于 H 的粒子必然会沉出，这种粒子的除去率为 V_x / V_0 ，平流沉淀池中的总去除率 X 可用下式计算：

$$X_T = 1 - X_0 + \int_{X_0}^X \frac{V_x}{V_0} dX \quad (3-26)$$

式中 X_T 一平流沉淀池的总去除率；

X_0 一速度 $\leq V_0$ 的粒子的百分率，由于各种悬浮粒子的种类、尺寸和形状大不一样，计算粒子的沉速较为困难，故可用分批沉淀方法确定

$$\int_{X_0}^X \frac{V_x}{V_0} dX$$

(三) 絮凝物质的沉降

絮凝物质与分散粒子不同，它的密度不定，因为当絮凝物质的微粒增大时，会有不同数量的母液（溶剂）进入絮凝体网格内。据报道，

浑浊河中含有细小的硅石、粘土^淤泥，分散砂粒的密度为2600千克/米³，而含水95%的絮凝泥粒，密度低到1030千克/米³。经过混凝处理的水体，刚沉淀下来的 $Al_2O_3 \cdot 20H_2O$ ，密度为1180千克/米³。 $Fe_2O_3 \cdot 20H_2O$ 的密度为1340千克/米³，含水75%(V/V)的方解石晶体聚集物($CaCO_3$)的密度为1200千克/米³。由于混凝剂形成的含水99%(V/V)的絮凝体，密度低到1002千克/米³。

对于含有几个基本粒子的絮凝体，其半径 r_f 和固体百分率 Ω 可用下式计算：

$$r_f = K_1 n^{0.429} \quad (3-27)$$

$$\Omega = K_2 n^{-0.29} \quad (3-28)$$

式中 K_1 和 K_2 为常数，也可用下式进行计算：

$$(\rho_f - \rho) = K_3 A_P^{-0.333} \quad (3-29)$$

式中 ρ_f —絮凝体密度；

K_3 —常数；

A_P —投影面积（假定絮凝体粒子近于球状）。

鉴于絮凝粒子沉降的复杂性，常用分批沉降实验方法来确定预期的固体去除率。

(四) 层状沉降和压缩

当悬浮物粒子聚集成一个大的集合体，而以“毯状”形式下沉，

此时，下沉污泥与澄清水之间存在明显界面，此种现象称层状沉降。层状沉降往往发生在活性污泥以及絮凝的高浓度悬浮液中。

沉降粒子积聚在沉淀池底部后，积聚物质所产生的结构，限制其进一步固结，这一过程称为“压缩”。压实的污泥支持上面粒子的重量。悬浮物粒子固结的速度数和污泥的最终高度均需通过实验求定。

三 上浮原理

在下沉规律一节中，曾提及斯托克斯定律，水中杂质粒子的沉降速度，通常以下式表示：

$$V_P = \frac{g d^2}{18 \nu} (\rho_p - \rho) \quad (3-30)$$

式中 ν —水的动力粘度系数；

ρ 和 ρ_p —杂质粒子和水的密度；

d —球形粒子的直径

调查，浑浊的地表水中悬浮粒子的密度界于2.65（砂粒）至1.03（有机物及泥浆的凝集粒子）之间，混凝或絮凝后的絮凝体密度约为1.18（氧化铝）至1.34（氧化铁之间）。故密度差（ $\rho_p - \rho$ ）为正值，沉速为正值，即絮凝体粒子下沉，但如絮凝体吸附足够数量的气泡，其表观密度小于水的密度，则密度差（ $\rho_p - \rho$ ）为负值，沉速为负值，则絮凝体粒子上浮至水面。因此，上浮法和沉淀法都是利用重力作用使废水中悬浮物质分离的物理方法。

上浮法可用来去除废水中的不溶性分散颗粒杂质，也用来去除可溶性杂质，如表面活性物质。该法已广泛应用于炼油、人造纤维、造纸、制革、化工、电镀、制药、钢铁等行业的废水处理，也用于生物