

斜板隔油池的计算

郑 远 扬

(华东石油学院北京研究生部)

斜板隔油池是七十年代初发展起来的一种含油污水除油装置^[1],其结构如图 1 所示,主要内构件为由多层波纹板所组成的斜置板组,含油污水在板与板之间所形成的平行流道中流过,由于浮力作用,油滴上浮,碰到板面,即在板下聚集并沿斜板向前移动,至斜板出口,即成大油滴而浮升至水面。由于流道当量直径较小,可在较高处理量下仍保持层流状态,且具有很大的浮升面积,因而除油效率较高,在国内外得到广泛应用^[2,3]。

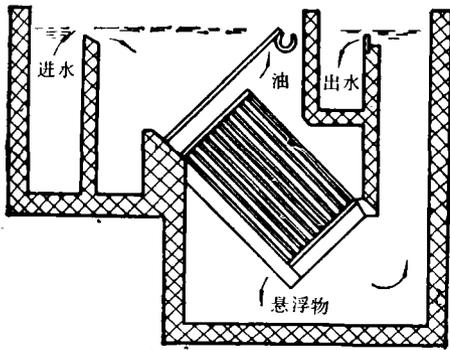


图 1 斜板隔油池

关于斜板隔油池的设计计算,目前还很不完善,缺乏建立在可靠基础上的计算方法。文献上,有的用实验装置的实测值估计工业装置的除油效率^[4],这当然不能适应含油污水中油滴分布不同和操作条件不同所带来的差异;有的只是估计可能脱除的最小油滴粒径^[5],而实际上,在整个油滴粒径分布范围内,不同粒径的油滴均可能被脱除,只不过脱除率不同而已^[6]。至于在流道中,层流流动的液流速度分布对油滴浮升过程的影响,都

未见加以考虑。

本文结合斜板隔油池结构特点,对油滴在流道中的浮升分离过程进行分析,既考虑到速度分布的影响,也考虑到粒径分布的影响,从而提出了一个建立在理论分析基础上的油滴脱除率计算方法。与此相类似的工作,最近 Wiesmann 和 Binder^[7] 针对用于脱除污水中固体悬浮物的斜板沉降装置,计及流道中的速度分布,提出了一个计算污水中固体悬浮物分离效率的公式,但他们并未考虑到固体悬浮物的粒径分布。

一、建立数学模型的基本假定

为了描述含油污水通过斜板隔油池内由多层波纹板所形成的流道时油滴的浮升分离过程,作如下基本假定。

1. 在流道中,液流的流动状态为层流,按平行板间一维层流流动,依据 Navier-Stokes 方程^[8],其速度分布为

$$u(y) = 6u_0 \left[\frac{y}{h} - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中, u 为在纵向位置 y 处的流速; u_0 为平均流速; h 为板间距; y 为以下层板为原点的纵向位置座标。

2. 水中所含油滴均为球形,其粒径分布为对数正态分布^[9]:

$$f(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} x_i \ln \sigma_g} \exp \left[- \left(\frac{\ln \frac{x_i}{x_g}}{\sqrt{2} \ln \sigma_g} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中, $f(x_i)$ 为油滴粒径的体积分布密度函数; x_i 为油滴粒径; x_g 为油滴粒径按体积分

布计的几何均值; σ_g 为几何标准差。

3. 含油污水中油滴浮升的终端速度遵循 Stokes 定理:

$$u_{ii} = \frac{(\rho - \rho_0)gx_i^2}{18\mu} \quad (3)$$

式中, u_{ii} 为粒径为 x_i 的油滴在污水中浮升的终端速度; ρ 、 ρ_0 为污水及油的密度; g 为重力加速度; μ 为污水的粘度。

4. 忽略在油滴浮升过程中的随机碰撞聚结和大油滴对小油滴的捕集聚结。

5. 在流道进口处, 油滴的位置分布是均匀的。

6. 当油滴浮升至每层板的下表面, 即粘附于板面, 并沿着板面前移, 直至流道出口处, 成为大油滴而浮升至水面。因之, 油滴浮升至每层板的下表面, 就可认为是得到脱除。

二、临界油滴粒径

油滴在流道中一边浮升、一边随污水流动。由于斜板隔油池配置方式的不同, 有两种流动情况: 一种是油滴浮升方向与污水流动方向一致, 是为同向流流动; 一种是油滴浮升方向与污水流动方向相反, 是为逆向流流动。无论何种情况, 油滴能否得到分离, 都与该油滴的粒径大小及其在流经流道进口时所处的纵向位置有关, 粒径越大, 在进口所处位置越高, 越易得到脱除。

对一个流道而言(如图 2 所示), 取流道进口处最下端为原点, 横坐标 z 与水流方向平行, 纵坐标 y 与水流方向垂直。如果在水流流经流道进口时, 有一粒径为 x_c 的油滴, 位于最下端 ($z = 0, y = 0$), 在流道中一边浮升、一边随水流前进, 到达出口处, 该油滴恰好浮升至流道顶端 ($z = L, y = h$, L 为板长) 而得到脱除, 则所有粒径为 x_c 的油滴也都能得到脱除。当然, 在此情况下, 粒径 $x_i \geq x_c$ 的油滴都能得到完全脱除, 而粒径 $x_i < x_c$ 的油滴只能部分被脱除。为此, 我们定义能完全被脱除的最小油滴直径 x_c 为临界油滴粒径, 相应, u_{ic} 为其浮升终端速度。

为确定临界油滴粒径 x_c , 分别对两种流动情况进行分析。先看同向流流动(图 2a), 此时油滴在流道中的运动轨迹可用下式描述:

$$\frac{dy}{u_{ii} \cos \theta} = \frac{dz}{u(y) + u_{ii} \sin \theta}$$

即

$$u_{ii} \cos \theta dz = [u(y) + u_{ii} \sin \theta] dy \quad (4a)$$

式中 θ 为斜板与水平面的夹角。

对于粒径为 x_c 的油滴来说, 如在进口处于最低点, 则在出口恰好浮升至顶点, 其运动轨迹的边界条件为: $z = 0$ 时, $y = 0$; $z = L$ 时, $y = h$ 。

将式 (1) 代入式 (4a), 并用 u_{ic} 代替 u_{ii} , 依以上边界条件积分, 得到:

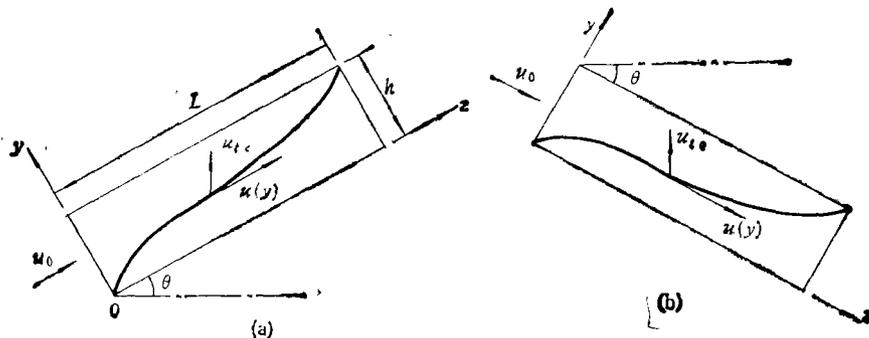


图 2 油滴浮升轨迹 (a) 同向流流动; (b) 逆向流流动

$$u_{ic} = \frac{u_0}{\frac{L}{h} \cos\theta - \sin\theta} \quad (5a)$$

对于逆向流流动(图 2b), 同样也有

$$u_{ii} \cos\theta dz = [u(y) - u_{ii} \sin\theta] dy \quad (4b)$$

及

$$u_{ic} = \frac{u_0}{\frac{L}{h} \cos\theta + \sin\theta} \quad (5b)$$

将式 (5a)、式 (5b) 代入式(3), 就得到临界油滴粒径的计算公式:

$$x_c = \sqrt{\frac{u_0}{K \left(\frac{L}{h} \cos\theta \mp \sin\theta \right)}} \quad (6)$$

式中, 负号用于同向流流动, 正号用于逆向流流动, 且

$$K = \frac{(\rho - \rho_0)g}{18\mu} \quad (7)$$

式(6)表明, 临界油滴粒径与斜板隔油池结构尺寸(板长、板间距及倾角)和操作条件(平均流速、温度, 后者影响到污水的粘度和密度, 以及油滴的密度)密切相关: 板愈长, 板间距愈窄, 流速愈小, 温度愈高, 相应的临界油滴粒径愈小。

三、油滴脱除率

依据临界油滴粒径的定义, 对于粒径 $x_i \geq x_c$ 的油滴, 相对脱除率为 1. 对整个油滴粒径分布而言, 由此而得到的油滴脱除率 E_1 为:

$$E_1 = \int_{x_c}^{\infty} f(x_i) dx_i$$

将式(2)代入, 并加以整理, 得到

$$E_1 = 1 - \varphi_0 \left(\frac{\ln \frac{x_c}{x_g}}{\ln \sigma_g} \right) \quad (8)$$

式中, $\varphi_0 \left(\frac{\ln \frac{x_c}{x_g}}{\ln \sigma_g} \right)$ 为正态分布函数:

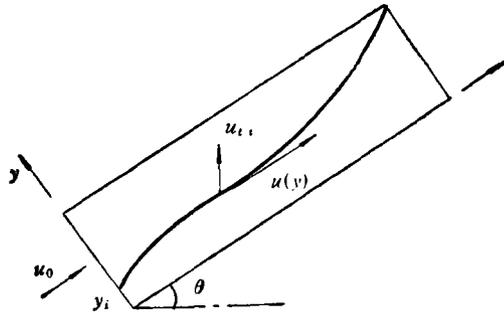


图 3 粒径 $x_i < x_c$ 的油滴运动轨迹

$$\varphi_0(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} \exp\left(-\frac{1}{2} \xi^2\right) d\xi \quad (9)$$

对于粒径 $x_i < x_c$ 的油滴, 只有在流经入口时处于 $y \geq y_i$ 的位置才能在随污水流至出口时到达上板下表面而得以脱除 (如图 3 所示)。由于在入口处油滴的位置分布是均匀的, 因而其相对脱除率 η_i 可表示为:

$$\eta_i = \frac{\int_{y_i}^h u(y) dy}{u_0 h}$$

将式(1)代入, 得到

$$\eta_i = 1 - \left[3 \left(\frac{y_i}{h} \right)^2 - 2 \left(\frac{y_i}{h} \right)^3 \right] \quad (10)$$

又依式 (4a), 对于同向流流动, 有

$$\int_0^L u_{ii} \cos\theta dz = \int_{y_i}^h [u(y) + u_{ii} \sin\theta] dy$$

代入式(1), 积分并加以整理:

$$1 - \left[3 \left(\frac{y_i}{h} \right)^2 - 2 \left(\frac{y_i}{h} \right)^3 \right] = \frac{L}{h} \frac{u_{ii}}{u_0} \cos\theta - \frac{h - y_i}{h} \frac{u_{ii}}{u_0} \sin\theta \quad (11a)$$

同样, 对于逆向流流动, 也可得到

$$1 - \left[3 \left(\frac{y_i}{h} \right)^2 - 2 \left(\frac{y_i}{h} \right)^3 \right] = \frac{L}{h} \frac{u_{ii}}{u_0} \cos\theta + \frac{h - y_i}{h} \frac{u_{ii}}{u_0} \sin\theta \quad (11b)$$

一般工业斜板隔油池, 板长 L 在 2—4m 之间, 而板间距 h 只有 20—40mm, 倾角在

30°—60° 之间,因而式(11a)和式(11b)右端第二项与右端第一项相比可以略去,并与式(10)比较,从而得到对 $x_i < x_c$ 的油滴而言,相对脱除率 η_i 的简化计算公式:

$$\eta_i = \frac{L}{h} \frac{u_{ii}}{u_0} \cos\theta \quad (12)$$

将式(3)代入,即为

$$\eta_i = \frac{L}{h} \frac{K}{u_0} x_i^2 \cos\theta \quad (13)$$

式中, K 值依式(7)计算。

所以,对所有 $x_i < x_c$ 的油滴,其脱除率 E_2 应为

$$E_2 = \int_0^{x_c} \eta_i f(x_i) dx_i$$

将式(13)及式(2)代入,整理,得到

$$E_2 = \frac{L}{h} \frac{K}{u_0} \cos\theta x_c^2 \exp(2 \ln^2 \sigma_g) \varphi_0 \left(\frac{\ln \frac{x_c}{x_g}}{\ln \sigma_g} - 2 \ln \sigma_g \right) \quad (14)$$

式中, $\varphi_0 \left(\frac{\ln \frac{x_c}{x_g}}{\ln \sigma_g} - 2 \ln \sigma_g \right)$ 为正态分布函数,见式(9)。

总的油滴脱除率 E 为 E_1 、 E_2 之和,即

$$E = 1 - \varphi_0 \left(\frac{\ln \frac{x_c}{x_g}}{\ln \sigma_g} \right) + \frac{L}{h} \frac{K}{u_0} \cos\theta x_c^2 \exp(2 \ln^2 \sigma_g) \varphi_0 \left(\frac{\ln \frac{x_c}{x_g}}{\ln \sigma_g} - 2 \ln \sigma_g \right) \quad (15)$$

依式(15),如已知油滴粒径按体积分布的几何均值和几何标准差以及斜板隔油池的结构参数,即可预估污水中油滴的脱除率;反过来,亦可按要求的油滴脱除率确定斜板隔油池的结构参数。

四、计算示例

有一斜板隔油池,板长 2.5m,板宽 1.5

m,板间距 40 mm,共 21 块板,逆向流流动,倾角 45°,处理含油污水的流量为 6.48m³/h,水温 30℃,在此温度下油的密度为 852 kg/m³,进水中油含量为 158 mg/l,进水中油滴粒径的体积分布见表 1,求出水中油含量。

表 1 油滴粒径的体积分布

粒径范围 (μm)	平均粒径 (μm)	体积分率
1.4—2.0	1.7	0.005
2.0—2.8	2.4	0.010
2.8—4.0	3.4	0.015
4.0—5.6	4.8	0.019
5.6—8.0	6.8	0.060
8.0—11.2	9.6	0.136
11.2—16.0	13.6	0.185
16.0—22.4	19.2	0.217
22.4—32.0	27.2	0.183
32.0—44.8	38.4	0.133
44.8—64.0	54.4	0.030
64.0—89.6	76.8	0.007

由表 1 数据,得到油滴粒径分布的几何均值为 $x_g = 17.22 \mu\text{m}$,几何标准差为 $\sigma_g = 1.921$ 。

$$\text{平均流速: } u_0 = \frac{6.48}{3600 \times 1.5 \times 0.04 \times 20} = 1.50 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$\text{当量直径: } d_c = 2h = 0.08 \text{ m}$$

$$\text{水粘度: } \mu = 0.801 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\text{水密度: } \rho = 996 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{雷诺数: } Re = \frac{d_c u_0 \rho}{\mu} = 149$$

临界终端速度:

$$u_{rc} = \frac{u_0}{\frac{L}{h} \cos\theta + \sin\theta}$$

$$= 3.34 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

Stokes 公式中的 K 值:

$$K = \frac{(\rho - \rho_0)g}{18\mu} = 9.80 \times 10^4 \text{ m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$$

临界油滴粒径:

$$x_c = \sqrt{u_{rc}/K} = 18.46 \times 10^{-6} \text{ m}$$

= 18.46μm

因 $\varphi_0 \left(\frac{\ln \frac{x_c}{x_g}}{\ln \sigma_g} \right) = \varphi_0(0.1065) = 0.543$, 故 $x_i \geq x_c$

的油滴脱除率

$E_1 = 1 - \varphi_0 \left(\frac{\ln \frac{x_c}{x_g}}{\ln \sigma_g} \right) = 0.457$

又 $\varphi_0 \left(\frac{\ln \frac{x_c}{x_g}}{\ln \sigma_g} - 2 \ln \sigma_g \right) = \varphi_0(-1.20) = 0.115$ 故 $x_i < x_c$ 的油滴脱除率

$E_2 = \frac{L}{h} \frac{K}{u_0} \cos \theta x_g^2 \exp(2 \ln \sigma_g) \cdot \varphi_0 \left(\frac{\ln \frac{x_c}{x_g}}{\ln \sigma_g} - 2 \ln \sigma_g \right) = 0.231$

油滴总脱除率 $E = E_1 + E_2 = 0.688$

(上接第94页)

用水, 加快地下水循环, 促使其自然净化。否则有可能使已污染的地下水水位(头)上升, 造成污染物扩散的趋势。

对地下水污染防治, 首先应建立严格的卫生防护带, 其范围应包括严禁带和限制带。对于碳酸盐岩含水系统上覆第四纪潜水, 应避免受到污染, 已治理的污水可由无渗漏的排污管道排往一定距离以外的第四纪粘土区。防护带内有化学毒物排放或废水难以治理的工厂, 应实行转产或搬迁。市政部门应该加强对城区排污管道的科学管理和防渗维修。

参 考 文 献

[1] 中国地质学会岩溶专业委员会编, 中国北方岩溶和

出水中油含量为 $158(1-0.688) = 49.3$ mg/l

参 考 文 献

[1] Morrison, J., *J. Oil & Gas*, 68(50), 86(1970).
[2] 石油工业部计划司, 炼油工业环境保护, 104 页, 石油工业出版社, 北京, 1985 年。
[3] Tramier, B., *Proceedings of the Institute of Petroleum*, No. 2, 1P84-011, The Institute of Petroleum London, 1984.
[4] Azad, H. S., *Industrial Wastewater Management Handbook*, pp. 8-31, McGraw-Hill Book Co., New York, 1976.
[5] 井出哲夫等, 水处理工程理论与应用, 张自杰等译, 31 页, 建工出版社, 北京, 1986 年。
[6] Churchill, R. J. & Burkhardt, C. W., *J. Oil & Gas*, 74(24), 76(1976).
[7] Wiesmann, U. & Binder, H., *Filtration & Separation*, 22(5), 302(1985).
[8] Bennett, C. O. & Myers, J. E., *Momentum, Heat and Mass Transfer*, p. 117, McGraw-Hill Book Co., New York, 1982.
[9] Hazlett, R. D. et al., *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 24(1), 101(1985).

岩溶水, 10-13 页, 地质出版社, 1982 年。

[2] G. L. Larson et al., *Ground Water*, 24 (2), 166-172(1986).
[3] 麦克拉伦等著, 闵九康等译, 土壤生物化学, 464 页, 农业出版社, 1984 年。
[4] 王秉忱、杨天行等编著, 地下水污染地下水水质模拟方法, 北京师范学院出版社, 1985 年。
[5] 吉林省图书馆编译, 国外环境标准选编, 57 页, 中国标准出版社, 1984 年。
[6] Bouwer, H., *Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill Book Company, N., Y. 1978.
[7] 丘丘诺娃, 等著, 张先起译, 防止地下水污染的水质预测, 125-145 页, 地质出版社, 1985 年。
[8] Roxburgh, I. S., *Water Resources Research*, 21 (4), 616 (1985).