

Establishing and Anatomizing with Respect to Inclined-Plate (Pipe) Sedimentation Separation Mathematical Models[#]

Jaxin Fu^{1*}, Jian Zhang^{2,3}, Xianqing Yin¹, Guorong Tan^{2,3}, Wei Zhou^{2,3}

¹College of Chemistry and Environmental Engineering, Yangtze University, Jingzhou

²State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing

³CNOOC Research Institute, Beijing

Email: fujiaxin2011@163.com

Received: Aug. 30th, 2011; revised Sep. 30th, 2011; accepted Oct. 8th, 2011.

Abstract: During oilfield produced water treatment, the inclined-plate (or beehive pipe) deoiling device was used to enhance the effect of oil/water separation, remove exiguous oil droplets from sewage. The design and optimization of the plate (pipe) structure was naturally the key of the degreasing effect. Therefore, according to settlement theory and mathematical analysis, for the 3 kinds of water current forms, this text established 8 kinds of physical models, on this basis, 3 kinds of mathematical models were built to provide quantitative theoretical foundation for optimizing design of the plate (pipe) structure. At the same time, relevant design parameters of the inclined plate (pipe) were probed in the research.

Keywords: Inclined-Plate (Pipe); Settlement Model; Design Parameters; Modeling and Anatomizing

斜板(管)沉降分离数学模型的构建与剖析[#]

付家新^{1*}, 张健^{2,3}, 尹先清¹, 檀国荣^{2,3}, 周薇^{2,3}

¹长江大学化学与环境工程学院, 荆州

²海洋石油高效开发国家重点实验室, 北京

³中海油研究总院, 北京

Email: fujiaxin2011@163.com

收稿日期: 2011年8月30日; 修回日期: 2011年9月30日; 录用日期: 2011年10月8日

摘要: 在油田污水处理过程中, 斜板(或斜管)除油器用于强化油水分离、去除污水中的细小油滴, 斜板(管)工艺结构尺寸的设计与优化是影响斜板(管)除油效率的关键。本文运用沉降理论, 通过数学分析, 针对3种水流形式, 构建了8种物理模型, 在此基础上建立了3套数学模型, 为斜板(管)工艺结构的优化设计提供了可量化的理论依据; 同时, 对斜板(管)相关设计参数也进行了探讨。

关键词: 斜板(管); 沉降模型; 设计参数; 建模与剖析

1. 引言

油田采油污水是一含有固体杂质、液体杂质、溶解气体和溶解盐类等较为复杂的多相体系。按照污水处理的观点, 这些杂质可分为悬浮固体、胶体、油类、溶解物质等几大类。随着聚合物驱、聚-表二元复合驱及三元复合驱的逐步实施, 采出液返聚现象日趋严

重, 这使得原本较为复杂的采出液体系变得更为复杂, 导致油水分离及后续水处理的难度进一步加大^[1,2]。在油田污水处理过程中, 斜板(管)沉降分离器是主要的除油分离设备, 用以除去含油污水中的固体颗粒和液体油滴^[3-6]。

斜板(管)除油提高油水分离效率的依据主要是基于 Stokes 沉降理论, 这种理论忽略了紊流(即认为是层流)、进出口水流的不均匀性(即未考虑流速分布)以及

[#]资助项目: 国家科技重大专项(2011ZX05024-004)。

颗粒下沉和油珠上浮过程中的絮凝聚并(即未考虑加速沉降)等因素,认为颗粒和油滴是在理想状态(即未受干扰)下进行重力沉降而被分离的^[3,7]。

考虑到有关斜板(管)除油分离技术在油田污水处理方面应用的报道甚少,可引用的文献非常有限,本文基于浅池沉淀理论,从斜板(管)除油机理出发,深度剖析了几种典型的沉降模型,并给出了斜板(管)相关设计参数优化的思路,为现场除油器设备设计和改进提供理论上的支持^[3]。

2. 沉降模型

从水流和斜板(管)的倾斜关系来划分,斜板(管)

的布置方式可分为前向流、后向流、上向流、下向流和横向流(侧向流)五种。其中前向流和后向流用得很少,实际意义不大,工程上常用的是上向流、下向流与横向流^[3,7]。现假定: 1) 斜板(管)内水流速度不变,并以平均流速 v 为代表; 2) 颗粒沉速 v_s 不变; 3) 被分离颗粒的临界粒径 d_p 与其沉速 v_s 之间服从 Stokes 定律,即 $d_p^2 = K v_s$ 。针对上向流、下向流和横向流三种流向可建立如下 8 种沉降物理模型(见图 1~图 3)。

沉降物理模型中有关符号说明如下:

w ——斜板(管)区宽度;

n ——斜板(管)间隔数;

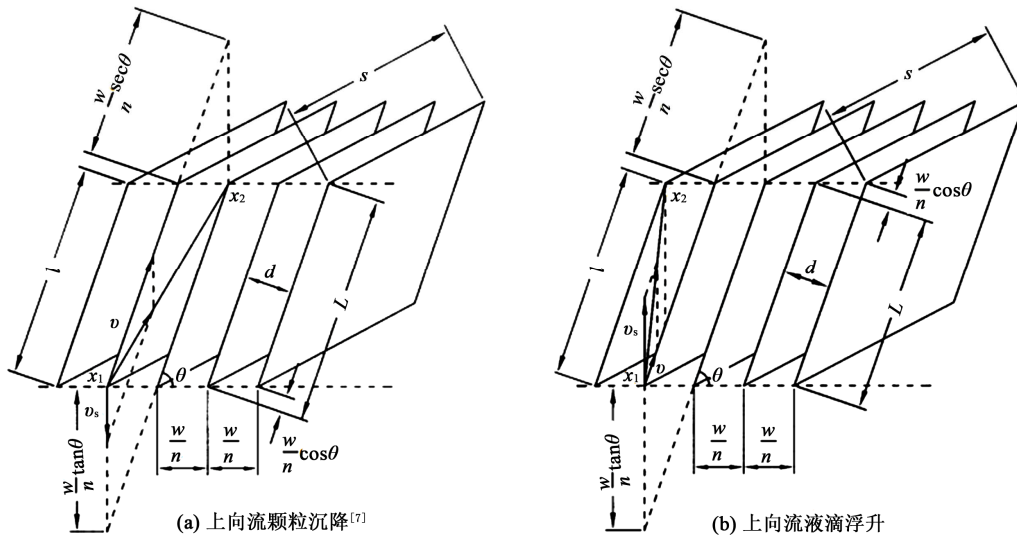


Figure 1. Model of particles settling and liquid-drop rising for upward flow
图 1. 上向流颗粒沉降与液滴浮升模型

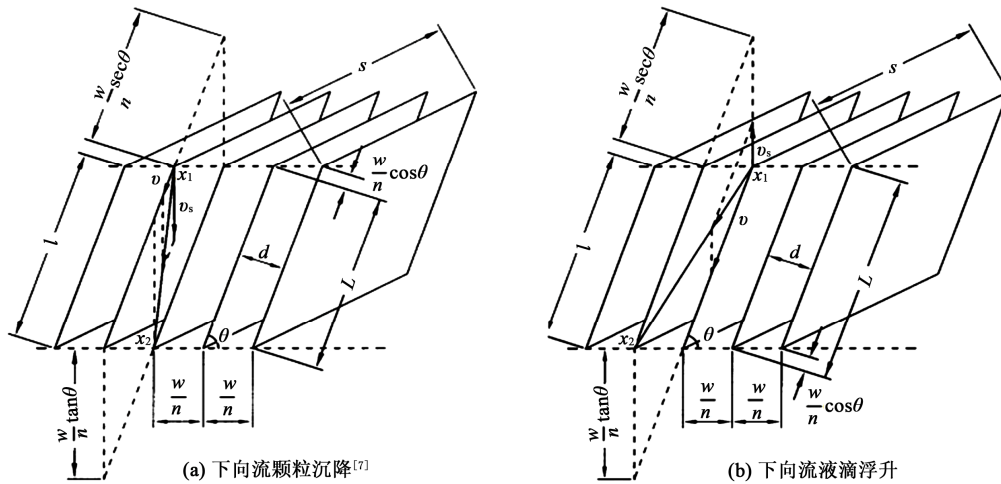


Figure 2. Model of particles settling and liquid-drop rising for downflow
图 2. 下向流颗粒沉降与液滴浮升模型

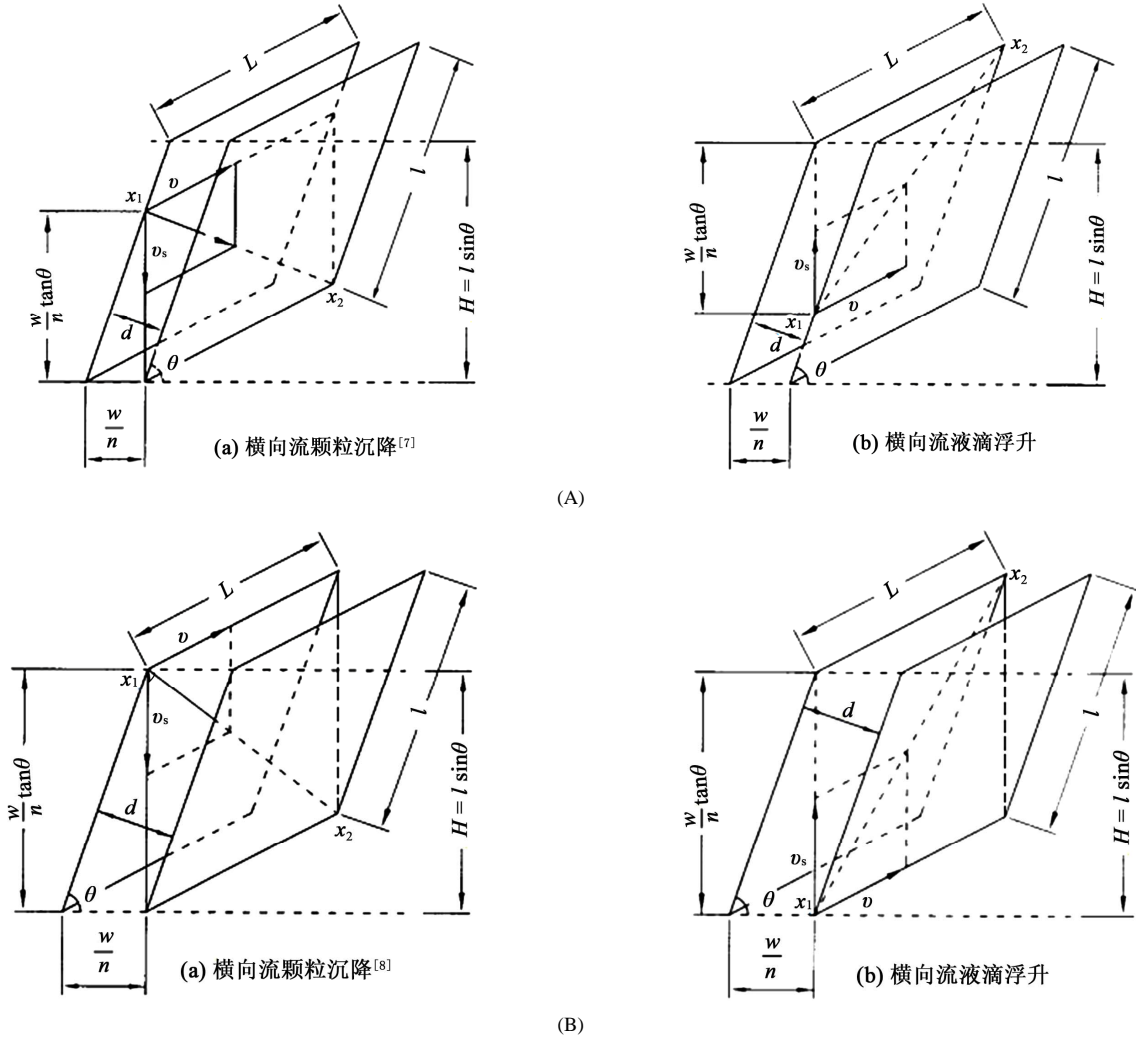


Figure 3. (A) Model of particles settling and liquid-drop rising for lateral flow (generally); (B) Model of particles settling and liquid-drop rising for lateral flow (specially)

图 3. (A) 横向流颗粒沉降与液滴浮升模型(一般情况); (B) 横向流颗粒沉降与液滴浮升模型(特殊情况)

- l ——实际斜板(管)长度;
- l' ——理论斜板(管)长度;
- s ——斜板(管)厚度或深度;
- L ——颗粒沉降或液滴浮升需要的长度;
- d ——斜板垂直间距或斜管直径;
- θ ——斜板(管)倾角;
- v ——斜板(管)中水流平均速度;
- v_s ——颗粒沉降或油滴浮升速度;
- d_p ——颗粒和油珠的粒径;
- A_f ——斜板(管)总投影面积;
- A ——斜板(管)区工作面积;

K ——常数, $K = 18\mu_w / [(\rho_w - \rho_o)g]$, 其中 ρ_w 和 ρ_o 分别为水和油的密度, μ_w 为水的动力黏度; ρ_p 为

颗粒的密度。

现以图 1(a)作说明。当污水在相邻两斜板之间的流道内从下往上流动时, 能被沉降去除的最小颗粒将沿 x_1 向 x_2 运动, 从左边一块斜板的底端走到相邻右边一块斜板的顶端而被捕集, 大于该最小粒径的颗粒将被打在右边斜板顶端下部区域, 这些被打到斜板上的颗粒经不断富集后将沿斜板滚落下来从而被去除, 这就是构建斜板沉降模型的基本思路。

上述模型均建立在水流为层流, 颗粒为自由沉降且沉降处于 Stokes 区, 同时还忽略了水流速度分布及颗粒絮凝聚并对沉降干扰的基础之上。

针对图 1(a), 根据上述假设中的水流速度 v 不变, 颗粒沉速 v_s 不变, 以及污水停留时间 = 颗粒沉降时

间, 并运用几何关系及三角形相似原理, 有:

$$\frac{v_s}{v} = \frac{(w/n)\tan\theta}{l+(w/n)\sec\theta} \quad (1)$$

因斜板(管)中水流速度 $v = \frac{Q}{sw} \times \frac{1}{\sin\theta}$ (暂不考虑斜板(管)壁厚), 又考虑到沉降服从 Stokes 定律, 所以

$$\begin{aligned} v_s &= \frac{(w/n)\tan\theta}{l+(w/n)\sec\theta} \times \frac{Q}{sw} \times \frac{1}{\sin\theta} \\ &= \frac{w\sin\theta/n\cos\theta}{l+w/n\cos\theta} \times \frac{Q}{sw} \times \frac{1}{\sin\theta} \\ &= \frac{Q}{snl\cos\theta+sw} = \frac{Q}{A_t+A} \\ &= \frac{d_p^2(\rho_p-\rho_w)g}{18\mu} \\ d_p^2 &= \frac{18\mu}{(\rho_p-\rho_w)g} \frac{Q}{A_t+A} \end{aligned}$$

亦即

$$d_p^2 = K v_s = K \frac{Q}{A_t+A}$$

式中: $K = \frac{18\mu}{(\rho_p-\rho_w)g}$ 。

若将斜(管)板水平间距 $\frac{w}{n}$ 用斜板垂直间距(或斜管直径) d 表示, 由几何关系得 $\frac{w}{n} = \frac{d}{\sin\theta}$ 。

所以

$$\left. \begin{aligned} \frac{w}{n}\tan\theta &= \frac{d}{\cos\theta} \\ \frac{w}{n}\sec\theta &= \frac{d}{\sin\theta\cos\theta} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得上向流颗粒沉降所需斜板的理论长度:

$$l = \left(\frac{v}{v_s} - \frac{1}{\sin\theta} \right) \frac{d}{\cos\theta} \quad (3)$$

式(3)即为上向流颗粒沉降(也称异向流)所需斜板的理论长度。

颗粒沉降需要的长度

$$L = l + \frac{w}{n}\cos\theta \quad (4)$$

其他模型公式推导与图 1(a)模型公式推导过程相类似, 此处仅给出上述各种沉降模型导出的结果并汇总于表 1。

表 1 中的计算公式是在 3 种假设前提条件下导出的, 使用这些公式时应注意其适用条件。表 1 能给出这样的信息: 1) 表 1 是对图 1~图 3 几种不同沉降模型的数学表达, 表中所列公式是基于 Stokes 沉降原理将水流速度和沉降速度进行合成, 再利用几何学上的相似比和污水停留时间 = 颗粒沉降时间的沉降分离条件推导出来的; 2) 从导出的公式来看, 上向流油滴浮升与下向流颗粒沉降均为同向流, 具有相同的数学表达; 同样, 上向流颗粒沉降与下向流油滴浮升均为

Table 1. Corresponding geometric parameter relation of the flow velocity and the settling velocity in the inclined-plate (tube)
表 1. 斜板(管)几何参数与水流速度和沉降速度之间的对应关系

水流方向	沉降与浮升	流型	L 与 l 的关系	理论板长 l	d_p 与 A_t 和 A 之间的关系
上向流	颗粒沉降	异向流	$L = l + \frac{w}{n}\cos\theta$	$l = \left(\frac{v}{v_s} - \frac{1}{\sin\theta} \right) \frac{d}{\cos\theta}$	$d_p^2 = K \frac{Q}{A_t+A}$
	油滴浮升	同向流	$L = l - \frac{w}{n}\cos\theta$	$l = \left(\frac{v}{v_s} + \frac{1}{\sin\theta} \right) \frac{d}{\cos\theta}$	$d_p^2 = K \frac{Q}{A_t-A}$
下向流	颗粒沉降	同向流	$L = l - \frac{w}{n}\cos\theta$	$l = \left(\frac{v}{v_s} + \frac{1}{\sin\theta} \right) \frac{d}{\cos\theta}$	$d_p^2 = K \frac{Q}{A_t-A}$
	油滴浮升	异向流	$L = l + \frac{w}{n}\cos\theta$	$l = \left(\frac{v}{v_s} - \frac{1}{\sin\theta} \right) \frac{d}{\cos\theta}$	$d_p^2 = K \frac{Q}{A_t+A}$
横向流	颗粒沉降	错向流	$L = \frac{v}{v_s} \frac{d}{\cos\theta}$		$d_p^2 = K \frac{Q}{A_t}$
	油滴浮升	(一般)			
	颗粒沉降	错向流	$L = \frac{v}{v_s} l \sin\alpha$	$l = \frac{d}{\sin\theta\cos\theta}$	$d_p^2 = K \frac{Q}{A_t}$
	油滴浮升	(特殊)			

异向流,亦具有相同的数学表达。因此,设计应用时只需考虑3种情况,即异向流、同向流和错向流模型;3)从表1最右一列公式可以看出,无论是颗粒沉降还是油滴浮升,在 Q 和 A_f 及 A 相同的情况下,就去除率而言,异向流最佳,错向流居中,同向流最差。但就除油效果而言,下向流最好,横向流居中,上向流最差;4)工程应用时,因 A_f 是 A 的十几倍或上百倍(即 $A_f \gg A$),故三种流向的去除效果基本接近;5)如果悬浮固相含量高污泥多,出现污泥滑落不畅容易造成斜板(管)堵塞时,应尽可能采用下向流以发挥颗粒沉降和水力冲刷的作用。

需要说明的是,实际沉降效果不可能达到理论值。因为:1)在数学推导的过程中假定水在板(管)内的流动是均匀一致并且恒定的,并未涉及水流速度在板(管)内流通截面上的分布问题。实际上板(管)内存在流动的边界层,速度梯度的存在会影响沉降分离效果;2)实际过程并非处于完全层流状态,紊流难以避免,板或管内存在流态的干扰,导致沉降效果变差;3)颗粒群之间出现结绒和聚并导致沉速加大或出现加速沉降(并非等速沉降),当然,这对沉降会有一些改善;4)当颗粒浓度较高时,一方面由于颗粒下沉或浮升而使被置换的污水做反向运动,这种反向运动使作用于颗粒上的曳力增加;另一方面,悬浮物系的有效粘度也较纯水为大,阻力较之要大,这些都导致实际沉速较自由沉降时小;5)沉速小的颗粒对沉速大的颗粒有拖曳阻碍作用,且壁效应和端效应不能忽略,这也导致沉速下降;6)存在着斜板(斜管)的结构和具体布置及进出水的影响,即板管两端发展长度的影响;7)积泥问题阻碍颗粒的下沉等。由于沉降过程的复杂性,通常用“有效系数”来表征实际沉降效率与理论沉降

效率之间的差异。

用有效系数 η 来修正表1中的计算公式,主要是考虑了下列两个因素^[8]:1)以断面的平均流速代替各点的实际流速对计算沉降速度和沉淀长度的影响;2)斜板(管)壁厚及进出口等其他因素对颗粒沉降和沉淀长度的影响。经修正后的结果如表2所示。

表1给出的是8种理想情况下的计算公式,实际情况与理想情况肯定存在一定的差距,这种差距经 η 修正后,用表2里边的公式进行表达,能更好地反映实际情况,而且只需考虑3种流型(即同向流、异向流和错向流),这给斜板(管)沉降分离器的设计带来了不小的方便,表1和表2公式的应用实例可参见文献[3]。

3. 设计参数

水流方向:①就去除油滴效果而言,下向流最好(异向流),横向流居中(错向流),上向流(同向流)最差。原因是在 Q 、 A_f 和 A 一定的情况下,采用下向流时所需理论板(管)长 l' 较短,能被完全去除的颗粒直径 d_p 也较小;②就去除固粒效果而言,上向流最好(异向流),横向流居中(错向流),下向流(同向流)最差,原因与①相同。

实际上,三种情况下的去除效果基本接近,如果悬浮固相含量高污泥多,出现污泥滑落不畅容易造成斜板(管)堵塞时,应尽可能采用下向流以发挥重力和水力冲刷的作用。

斜板(管)布置空间:即斜板(管)布置区域的长宽高尺寸。首先应根据负荷量 Q 及液面负荷率 Q/A 确定斜板(管)工作区面积 A ,再根据 A 确定工作区域的长和宽尺寸,最后根据停留时间确定布置空间的高度。实际上布置空间的尺寸受多方面的制约,需通过优化后确定。

Table 2. Corresponding geometric parameter relation of flow velocity, settling velocity and cut diameter in inclined-plate (tube)

表 2. 斜板(管)几何参数与水流速度、沉降速度和分离直径之间的对应关系

流型	理论斜板(管)长 l'	d_p 与 A_f 和 A 之间的关系	修正系数 η ^[8]
异向流	$l' = \frac{1}{\eta} \left(\frac{v}{v_s} - \frac{1}{\sin \theta} \right) \frac{d}{\cos \theta}$	$d_p^2 = K \frac{Q}{\eta(A_f + A)}$	η 取值为 0.7~0.9, 通常以 0.75~0.85 计算
同向流	$l' = \frac{1}{\eta} \left(\frac{v}{v_s} + \frac{1}{\sin \theta} \right) \frac{d}{\cos \theta}$	$d_p^2 = K \frac{Q}{\eta(A_f - A)}$	η 可取 0.8~0.9
错向流		$d_p^2 = K \frac{Q}{\eta A_f}$	η 未知

斜板(管)斜长: 对斜板(管)沉降设备而言, 其斜长越长, 对应的停留时间也越长, 去除效果越好。但是, 一旦布置空间高度和倾角确定, 斜长即为定值。适宜的斜长需首先通过水力学计算(见表 2), 然后再通过经济优化后确定。一般情况下, 其斜长取值约为 1000 mm~1800 mm^[8]。

斜板(管)倾角: 不同的水质和不同结构的除油设备存在不同的最佳倾角, 一般情况下, 倾斜角度越小, 斜板(管)总投影面积越大, 对沉降分离越有利。但倾角越小, 污泥滑脱越困难, 容易造成斜板(管)堵塞。即特定情况下存在一个合适的最佳倾角, 大多数情况下, 斜板(管)的倾角约在 30°~60°之间^[3]。

斜板垂直间距或斜管直径: 斜板垂直间距或斜管直径越小, 在有限空间布置的板管数越多, 当然投影面积就越大, 但出现板(管)堵塞的机会将增大。因此, 斜板垂直间距或斜管直径亦存在一个合适的值。一般情况下, 其取值约为 30 mm~100 mm^[3,8]。

值得强调的是: 关于斜板(管)的水力学特性, 其计算方法目前主要有“分离粒径法、特性参数法和加速沉降法”。分离粒径法它未考虑斜板(管)内的速度分布, 因此计算比较简略, 但因其设计比较成熟, 工程设计中被广泛采用; 特性参数法虽然考虑了斜板(管)内顺水流方向的流速分布情况, 但与分离粒径法一样, 并未考虑凝聚颗粒的加速沉降, 且特性参数的获取有些困难, 使用时受到了一定的局限; 加速沉降法尽管引入了凝聚颗粒的加速沉降因素, 在概念上比前两类计算方法进了一步, 但未考虑颗粒的起始沉速问题, 同时目前缺乏实际应用而没有得到佐证^[7]。

本文采用的是分离粒径法, 通过 d_p 来考察斜板(管)的分离效果。在实际工作中, 很难满足前述假设条件, 以分离粒径 d_p 为界限, 比分离粒径大的颗粒有可能随

出水而流失, 而比分离粒径小的颗粒也有可能混入沉泥中。由于实际沉降与理想沉降之间存在一定的差异, 所以无论采用哪一种计算方法, 其计算结果与实际情况均存在一定的偏差。

4. 结论

1) 斜管沉降常用的进水方式主要有上向流、下向流和横向流三种, 这三种进水方式既可用于固体颗粒的沉降, 又可用于液滴油珠的浮升, 当固粒和液滴同时存在时则表现出 6 种运动方式, 通过数学描述得出 3 组数学模型, 即异向流、同向流和错向流模型。

2) 在 3 种沉降模型中, 无论是固粒沉降还是液滴浮升, 异向流的去除率最好, 横向流居中, 同向流最差。故就除油而言, 以采用下向流为好。

3) 斜板(管)的设计参数主要有斜长、倾角、板间垂直间距或斜管直径、布置区宽度和斜板(管)深度(或厚度)等, 各种参数相互联系相互影响, 除了要满足设计值外, 还需要结合所处理的对象特性进行优化。

参考文献 (References)

- [1] 李化民, 苏显举等. 油田含油污水处理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 4-8.
- [2] 牛瑞霞, 染洪波. 油田水处理新技术的应用进展[J]. 石油化工应用, 2010, 29(1): 1-3.
- [3] 付家新, 向问陶, 周薇等. JZ9-3 平台除油罐斜管结构参数的设计与优化[J]. 化工进展, 2011, 30(9): 2090-2094.
- [4] 尹先清, 游革新等. 斜管沉降罐的设计计算[J]. 油气田地面工程, 1997, 9: 57-58.
- [5] 陈忠喜, 邓述波, 夏福军. 横向流除油器处理油田含油污水的研究[J]. 工业水处理, 2001, 21(1): 31-33.
- [6] 邓述波, 周抚生, 陈忠喜. 聚丙烯酰胺对聚合物驱含油污水中油珠沉降分离的影响[J]. 环境科学, 2002, 23(2): 69-72.
- [7] 上海市政工程设计院编. 斜板斜管沉淀[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1978: 1-43.
- [8] 许保玖. 给水处理理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 234-244.