

异波折板絮凝池絮凝的机理与絮凝常数

孙友勋¹, 时 钧¹, 范瑾初², 刘新超²

(1. 南京化工大学 化工学院, 江苏 南京 210009)

(2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要:在模型试验的基础上考察异波折板絮凝池的絮凝机理与动力学研究。异波折板絮凝池可用串联完全混合反应器模型(S-CSTR)来描述。模型试验表明, 对于板长为 100 mm, 夹角为 45° 的模型絮凝池, 混凝剂采用聚合硫酸铁时, 可取 $K_A = 1.3 \times 10^{-4}$ 。

关键词:絮凝机理; 絮凝动力学; 异波折板絮凝池

中图分类号: TU991.22

文献标识码: A

文章编号: 1007-7537(2001)03-0019-04

折板絮凝池是我国水处理技术人员在隔板絮凝池基础上发展起来的新型絮凝设施。1977 年建成日产水量 5 000 m³ 的竖流人字折板絮凝池(中试); 1980、1981 年在镇江金山水厂建成 12 500 m³/d 的竖流异波折板及竖流平板絮凝池。这种折板絮凝池总絮凝时间由以往的 20~30 min(隔板絮凝池)缩减至 6~10 min, 单位药耗有所降低, 絮凝效果良好。

虽然在实际生产中, 折板絮凝池得到了广泛的应用, 也有文献对其水头损失作了初步研究^[1], 但是关于絮凝机理问题仍缺乏系统的理论研究。本研究拟在模型试验的基础上对异波折板絮凝池的絮凝机理作简要的探讨。

1 异波折板絮凝机理

对絮凝的数学描述一般分为两个独立的过程: 迁移和粘附。迁移过程产生颗粒的碰撞。迁移是由水中颗粒的速度差异引起。在异波折板絮凝池中, 速度差异认为是以下 3 种因素造成:

- (1) 颗粒的布朗运动(异向絮凝中起主要作用)
- (2) 紊流涡旋(同向絮凝)
- (3) 颗粒间沉降速度的差异(差速絮凝)

粘附作用取决于和颗粒物本身表面性质有关

的瞬时作用力。

可以用以下数学形式描述粒径为 i 和 j 的颗粒物的有效碰撞速率:

$$\text{絮凝速率} = \alpha \beta(i, j) C_i C_j \quad (1)$$

其中 α —碰撞效率,

$\beta(i, j)$ —粒径为 i 和 j 的颗粒间的碰撞频率,

C_i, C_j —粒径为 i 和 j 的颗粒的浓度, 碰撞频率

β 是絮凝方式(异向絮凝、同向絮凝、差速沉降)的函数, 碰撞效率 α 是颗粒脱稳程度的函数。因此, 实际上 β 是产生碰撞的迁移效率的度量, 而 α 是产生粘附作用的有效碰撞的百分率。

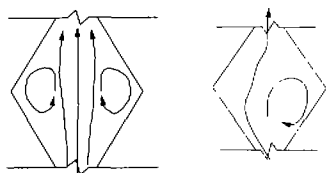
异波折板单元本身的水力特性对絮体颗粒碰撞的影响主要表现在: 折板单元的造涡作用、连续均匀的单元设置改善了紊动能耗的分布, 从而提高了 $\beta(i, j)$ 的数值, 因此提高了絮凝效果。水流通过折板单元, 在渐扩段与渐缩段的作用下, 可以形成对称涡旋及单侧涡旋(图 1)。波峰处水流边界层的分离是产生涡旋的动因。根据涡旋的扩散性, 会进一步分解为小尺度的涡旋, 直到与水流微团相关的雷诺数低到不能再产生更小的涡旋为止。同时, 大尺度的涡旋从主流吸取动能, 在运动过程中传递给较小尺度的涡旋, 这样逐级传递, 一直到微尺度的涡。在较大尺度的涡运动中, 流体粘性几乎不起作用, 可忽略不计, 因而在动能传递中几乎没有能

收稿日期: 2000-10-27

基金项目: 镇江市自来水公司资助

作者简介: 孙友勋(1972-), 男, 山东泗水人, 博士后, 现在南京化工大学化学工程博士后流动站从事膜分离水处理技术研究工作。

耗;而在微尺度的涡运动中,流体粘性将起主要作用,传送到这些最低级涡旋的能量就会通过粘性作用转化为热能。水流中同时存在无数大大小小的涡旋,产生一系列的脉动频率,具有连续的频谱。



A: 对称涡旋 B: 单侧涡旋
图 1 异波折板单元流态简图

Fig. 1 Fluid diagram of opposite folded plate flocculator unit

众多的水处理工作者均认为:具有与颗粒尺寸相同数量级的涡旋才对碰撞有效,其它的不起作用。由于实际的絮体颗粒尺寸变化幅度可以从 1~1 000 μm ,因此,有很大一段的涡旋起作用,不能严格划分大小涡旋的界限。紊动的扩散作用主要取决于大尺度的紊动。大涡旋的尺度可以认为与折板单元的尺度数量级相同。对于板长 100 mm 夹角 45° 的模型絮凝池,对称涡旋的大涡旋直径约为 30 mm,单侧涡旋的约为 100 mm。生产中采用板长 500 mm,大涡旋尺度应在 200~500 mm。

对于以水为流体的絮凝过程来讲,微尺度取决于单位时间单位体积内的有效能耗 ε ,而 $\varepsilon = k\varepsilon_0$, ε_0 为总能耗, k 为能耗有效利用系数,根据丹保伦的研究, $k = 0.1 \sim 0.2$ 。异波折板单元连续的缩放,使水流形成大量不同尺度的涡旋,促进了水流内部絮体颗粒间的相对运动,增加了碰撞机会,所以相对于隔板絮凝池,絮凝效果大大提高。

异波折板絮凝池的参数:板长 l 、夹角 α 、流速 v 是控制水流形态的重要因素。调整它们的参数组合,可以间接的控制反应区造涡强度和涡旋的传递衰减过程。

2 异波折板絮凝动力学

将异波折板单元视为完全混合连续式反应器(CSTR 型),则整个絮凝池可看作多个完全混合反

应器的串联。假设有 n 只完全相同的单元,如图 2 所示。

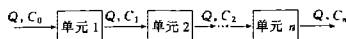


图 2 串联完全混合反应器模型示意图

Fig. 2 Model of CSTR

Levich 在 1962 年提出紊流下的絮凝速率公式:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{12\pi}{\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\gamma}} d^3 C^2 \quad (2)$$

式中: C - 单位体积原水中所含颗粒总数,个/ m^3 ;

d - 颗粒直径, m ;

γ - 水的运动粘性系数, m^2/s 。

假定单位体积水体中所含颗粒的体积(称体积浓度或体积分数)以 Φ 表示,且颗粒为性质均匀的球形,则:

$$\Phi = \frac{\pi}{6} d^3 C \quad (3)$$

在混凝过程中,颗粒数由多变少,而总体积不变,故在一定的水质中, Φ 为常数,代入公式(2)中:

$$\frac{dC}{dt} = -\Phi \frac{72}{\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\gamma}} C \quad (4)$$

因此,在水质及输入能量一定的条件下,絮凝速度仅与颗粒浓度的一次方成正比,为一级反应。

设絮凝单元体积为 V ,设计流量为 Q ,进水颗粒数量浓度为 C_0 ,出水为 C_n ,有 n 个相同的单元串联(如模型各段单独试验时)。第一个单元出水颗粒数量浓度为 C_1 ,由于涡旋的作用,单元内颗粒浓度与出水相同,在进出水颗粒浓度保持不变的情况下,根据物料平衡原理,可得:

$$QC_0 = QC_1 + V\Phi \frac{72}{\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\gamma}} C_1 \quad (5)$$

V 为单元体积,由于 $V = Qt$ (t 为 1 只单元的絮凝时间),代入上式整理得:

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{1}{1 + \Phi \frac{72}{\sqrt{15}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\gamma}} t} \quad (6)$$

式中, $\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\gamma}}$ 即为通常所说的 G ,令 $K_A =$

$\Phi \frac{72}{\sqrt{15}}$, K_A 称为絮凝常数(无因次),则公式变为:

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{1}{1 + K_A G t} \quad (7)$$

第二个单元的进水为第一个单元的出水,同理

$$\text{可得: } \frac{C_2}{C_1} = \frac{1}{1 + K_A G t}, \text{ 依此类推, } \frac{C_3}{C_2} = \frac{1}{1 + K_A G t}$$

$$\dots\dots \frac{C_n}{C_{n-1}} = \frac{1}{1 + K_A G t}$$

$$\text{故: } \frac{C_n}{C_0} = \left(\frac{1}{1 + K_A G t} \right)^n \quad (8)$$

模型试验中采用高岭土配制的悬浊液作为原水,由于高岭土的粒径分布及密度相同时,颗粒数量浓度与质量浓度有一定的相关性,而浊度与质量浓度也存在较好的相关性。因此,可以近似用浊度指标代替颗粒数量浓度,而不影响结果的真实性。由于试验中 C_0 、 C_n 、 n 、 G 及 t 均可测得或计算得到,故可以反推求 K_A 。

3 模型试验器材与设备

为了验证上述絮凝模型,特地设计了4只异波折板絮凝模型,模型参数见表1。板材用平板玻璃,硅胶填缝。

表1 折板模型设计参数表

Table 1 Design parameters of opposite folded plate model

模型 编号	板长 L/mm	夹角 /°	单元数目 /个	波峰流速 /(m/s)	设计流量 /(m³/h)	反应时间 /min
M1	100	45	50	0.3	0.54	3.0
M2	100	60	50	0.3	0.54	3.0
M3	100	45	44	0.2	0.54	3.0
M4	100	45	41	0.1	0.54	3.0

以聚合硫酸铁为絮凝剂。原水用分析纯高岭土加自来水配制,浊度约50 NTU,烧杯搅拌试验确定最佳投药量为15 mg/L。试验中采用了两种流量,分别为0.54和0.72 m³/h。

4 试验结果

S-CSTR模型的关键在于确定 K_A , 根据文献[2],对于粘土颗粒,以硫酸铝作混凝剂时,在数量级上, $K_A = 10^{-4.3}$ 。实际上,不同的悬浮物含量和不同的脱稳程度, K_A 将不同。以模型M1~M4的试验结果推求的 K_A 值见表2。

由模型试验结果来看,对于板长为100 mm,夹角为45°的模型,混凝剂采用聚合硫酸铁时,可取 $K_A = 1.3 \cdot 10^{-4}$ 。

表2 模型试验的 K_A 值

Table 2 K_A of model test

模型 编号	流量 /(m³/s)	进水浊度 NTU	出水浊度 NTU	波峰流速 /(m/s)	水头损失 /cm	K_A ($\times 10^5$)
1	0.54	60.0	3.50	0.3	31.0	13.0
2	0.54	58.0	7.50	0.3	21.0	11.8
2	0.72	60.0	10.0	0.4	35.5	9.1
3	0.54	58.0	7.50	0.2	10.0	16.8
3	0.72	54.0	8.0	0.27	19.0	13.1
4	0.54	60.0	17.0	0.1	1.8	23.2
4	0.72	60.0	27.0	0.13	2.5	14.3

注:进出水浊度均取平均值。

由公式(8)可知,絮凝效果与 G 密切相关,由于 G 值存在理论上的缺陷性,本研究试图以其它参数

取代之。因 $G = \sqrt{\frac{\rho g h}{\mu T}} = \sqrt{\frac{h}{\gamma T}}$, $T = nt$, n 为折板单元数目, t 为一个单元的停留时间, T 为总絮凝时间,其中单位采用 kg, m, s, 代入公式(8),可得:

$$\frac{C_n}{C_0} = \left(\frac{1}{1 + \frac{K_A}{n} \sqrt{\frac{h}{\gamma T}}} \right)^n \quad (9)$$

h —絮凝池总水头损失, m。

虽然水力絮凝池产生的水头损失并不会全部转化为对絮凝起作用的有效能耗,即 $h = k' h_{(总)}$, k' 为能量利用系数,但 k' 可包含到 K_A 中,故仍可利用总水头损失来计算。而异波折板单元的水头损失与其水力特性参数(板长、流速、夹角)紧密相关,从一定意义上讲,确定了异波折板单元的参数也就决定了它的除浊能力。

5 结论

异波折板絮凝池通过折板单元连续的缩放产生交变的对称或单侧涡旋,良好的造涡能力增大了絮体颗粒间的接触碰撞频率,从而提高了絮凝效果。它可用串联完全混合反应器模型(S-CSTR)来描述。模型试验表明,对于板长为100 mm,夹角为45°的模型,混凝剂采用聚合硫酸铁时,可取 $K_A = 1.3 \cdot 10^{-4}$ 。

参考文献:

- [1] 孙友勋,谭康荣,范瑾初,等. 异波折板絮凝池单元水头损失的计算公式[J]. 中国给排水, 1999, 15(10): 29-33.
- [2] 范瑾初编著. 混凝技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992, 37-39.

Flocculation mechanism and coagulation index of opposite folded plate flocculator

SUN You-xun¹, SHI Jun¹, FAN Jin-chu², LIU Xin-chao²

(1. College of Chemical Engineering, Nanjing University of Chemical Technology, Nanjing 210009, China;

2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The flocculation mechanism and kinetics of opposite folded plate flocculator (OPFF) was studied on model test. OPFF can be seen as S-CSTR. Model test showed that, at the plate length = 100 mm, inclined angle = 45° and using poly iron sulphate as coagulant, the flocculator parameter $K_A = 1.3 \times 10^{-4}$.

Key words: flocculation mechanism; flocculation kinetics; opposite folded plate flocculator

简 讯

《自然》杂志选稿原则

原创性:《自然》杂志录用论文最重要的标准是, 研究论文必须是原始的, 必须是作者的独立工作, 其中心部分的任何内容不得向其他刊物投稿(《自然》杂志对在其他刊物上发表相关或类似论文有专门规定, 欲知详情, 请访问 www.nature.com, 参阅《作者须知》)。

重要性: 论文所反映的研究工作对于同一领域的科学家来说必须是重要的。这种判断通常是由《自然》杂志的编辑在审稿人的帮助下做出的, 审稿人既可通过正式报告反映自己对稿件的意见, 也可通过电话或发 email 的形式非正式地向编辑提出建议。很多投稿未经审稿就被退回, 是因为这些稿件只是一个新的概念形成过程中的中间步骤, 而不是因为《自然》杂志的编辑认为它们的学术论点不正确。

交叉性: 投给《自然》杂志的论文还必须能够让其他学科领域的科研人员感兴趣。作为综合性科学刊物, 杂志希望有很大比例的读者会对自己领域之外的研究工作产生浓厚兴趣。

可读性: 《自然》杂志要求自己发表的论文能够让读者比较容易地看懂。这一要求与其说是语言问题或文风问题, 倒不如说是条理问题和表述问题。中国科学家的第一语言不是英语, 但他们并没有因为自己的论文偶尔会出现语法错误而受到歧视。《自然》杂志希望发表的是能够反映最重要的科研成果的论文, 其编辑乐于帮助作者以正确的英文来表述自己的研究工作。《自然》杂志的编辑中有许多人来自非英语国家。对于那些英语不是很熟练的人来说, 最重要的是, 当他们投稿时, 要做到尽可能简单而明了地在其论文中解释自己的研究工作。

新颖性: 作为一个周刊, 《自然》杂志必须选择其结果包含某种新颖成分的研究论文。这样的论文既可以是对以前人们不知道的某种现象的描述, 也可以是向以前被人们广为接受的某个假设提出质疑。例如, 一篇能够令人信服地证明永恒运动的论文相对于一篇证明永恒运动是不可能的论文来说, 前者就会被《自然》杂志优先考虑。

巧妙性: 《自然》杂志优先考虑那些新颖、别致巧妙的研究工作, 包括那些通过一个非常简单的路径、通过对方法的巧妙改进而得到某种可靠结果的研究工作, 以及那些将一个领域的知识巧妙应用于另一领域的研究工作。虽然《自然》杂志发表的每一篇论文并非都要包括以上全部要素, 但他们通常要满足其中不止一个条件。《自然》杂志并不排除发表那些专业性很强, 但非常重要的论文, 也不排除发表那些介绍目前还无法解释的有趣现象的论文。但由于版面有限, 这些类型的论文被录用的机会相对来说要小一些。

(外事委员会供稿)