

现代水处理技术

[美]D. F. 劳勒 等 著

中国环境科学出版社

现代水处理技术

[美]D. F. 劳勒 等 著

中国环境科学出版社

内 容 简 介

本书是据美国化学学会(American Chemical Society)的《环境科学技术》杂志 1986 年 9~12 期、1987 年 1~2 期("Environ. Sci. Technol." Vol. 20 No. 9~12、Vol. 21 No. 1~2)上发表的系列论文"A six-part series on water treatment processes"翻译的。本书的突出特点是内容丰富、叙述精炼,6 篇论文既独立成章,又互相联系,形成一完整系列;6 个专题覆盖了水处理技术的大部分领域。文中既有多种水处理工艺的概要介绍,又涉及许多关键性的理论问题,同时展望了技术的发展,指出了进一步研究的方向。此外,每篇论文后面还附有大量参考文献,可以作为进一步阅读的参考索引。

本书适合广大环境科技工作者、给排水专业的工程技术人员及大专院校有关专业的师生参考、阅读。

Desmond F. Lawler et al.

WATER TREATMENT PROCESSES

A Six-part Series on Wastewater Treatment Processes

American Chemical Society 1986 ~ 1987

现 代 水 处 理 技 术

[美]D. F. 劳勒 等 著

李一虎 译

责任编辑 王晓民

*

中国环境科学出版社出版

北京崇文区东兴隆街 69 号

河北省新城县印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

*

1989 年 10 月第 一 版 开本 787 × 1092 1/32

1989 年 10 月第一次印刷 印张 15/8

印数 1~4 000 字数 101 千字

ISBN 7-80010-500-8/X · 275

定价:2.20 元

出版说明

水处理技术是环境工程学中历史最长也最成熟的一个分支。近一个世纪以来,一方面随着社会的发展不断产生关于水处理工艺的新课题;另一方面,科学技术的飞速发展推动了水处理理论的研究。目前,实用中的水处理工艺不计其数,并且,传统工艺不断改进,新工艺不断出现。为了推动我国水处理技术的发展,向国内广大读者介绍发达国家的现代水处理技术,我们编辑出版了李一虎同志翻译的《现代水处理技术》一书。

本书是据美国化学学会(American Chemical Society)的《环境科学技术》杂志1986年9~12期、1987年1~2期(“Environ. Sci. Technol.” Vol. 20 No. 9~12、Vol. 21 No. 1~2)上发表的系列论文“A six-part series on water treatment processes”翻译的。本书的突出特点是内容丰富、叙述精炼,6篇论文既独立成章,又互相联系,形成一完整系列;6个专题覆盖了水处理技术的大部分领域。文中既有多种水处理工艺的概要介绍,又涉及许多关键性的理论问题,同时展望了技术的发展,指出了进一步研究的方向。此外,每篇论文后面还附有大量参

目 录

0. 前言	(1)
1. 除去水和废水中的颗粒物	(4)
1.1 絮凝(7) 1.2 沉淀(10) 1.3 增稠(12) 1.4 脱水(14) 1.	
5 过滤(15) 1.6 处理工艺系统(16) 1.7 结论(17) 参考文献	
(18)	
2. 除去水中可溶性有机污染物	(20)
2.1 设计基本原理(21) 2.2 化学氧化(24) 2.3 空气清洗(29)	
2.4 吸附(32) 2.5 薄膜分离(38) 2.6 展望(41) 参考文献(43)	
3. 除去水中可溶性无机污染物	(47)
3.1 工艺选择(47) 3.2 化学沉淀(48) 3.3 离子交换和吸附(54)	
3.4 薄膜工艺(64) 参考文献(70)	
4. 废水厌氧处理	(75)
4.1 物质间的氢转移(75) 4.2 生物膜(82) 4.3 反应器的结构	
(85) 4.4 控制 H_2 的研究(86) 4.5 应注意的几个问题(90) 参	
考文献(93)	
5. 污水厌氧处理	(95)
5.1 经济价值(96) 5.2 系统的要求(96) 5.3 历史与现状(100)	
5.4 除去有害的化学物质(109) 5.5 技术状况(109) 5.6 低浓	
度废水的处理(110) 5.7 研究与发展(113) 参考文献(114)	
6. 好氧生物处理	(119)
6.1 主要设计参数(120) 6.2 改进与革新(124) 6.3 新工艺	
(132) 参考文献(139)	

本书各篇论文作者：

1. **Desmond F. Lawler**
University of Texas at Austin
Austin, Tex. 78712
2. **Welter J. Weber, Jr. & Edward H. Smith**
University of Michigan
Ann Arbor, Mich. 48109
3. **Dennis Clifford & Sutesh Subramonian**
University of Houston
Houston, Tex. 77004
Thomas J. Sorg
U. S. Environmental Protection Agency
Cincinnati, Ohio 45268
4. **Perry L. McCarty & Daniel P. Smith** **Stanford**
University Stanford
Stanford, Calif. 94305
5. **William J. Jewell**
Cornell University
Ithaca, N. Y. 14853
6. **Bruce E. Rittmann**
University of Illinois at Urbana-Champaign
Urbana, Ill. 61801

0. 前 言

本书共选编了 6 篇文章,它们概括了目前应用在饮用水、废水和地下水处理方面的工程技术,其中 3 篇文章讨论物理化学工艺,另外 3 篇文章讨论生物技术。每篇文章均由工程技术界专家撰写和审阅。

第一篇文章由德克萨斯大学 (University of Texas at Austin) 的 Desmond F. Lawler 撰写。文章讨论了在饮用水、废水处理装置中,从水中除去颗粒物的方法,介绍了目前如何理解水和废水处理中对除去颗粒物工艺产生影响的一些基本现象,并进一步说明在现代工程设计和处理设备制造中,这些现象该不该考虑。

第二篇是物理化学方面的文章,由密执安大学 (University of Michigan) 的 Walter J. Weber, Jr. 和 Edward H. Smith 撰写。文章讨论了从水中除去可溶性有机污染物的问题,其中包括供城市或工业用地表和地下水供水以及排放前要求处理的废水。集中研究了通常应用在供水和废水处理中最有发展前途的四项技术,即转化技术,化学氧化;气-液分离技术,空气清洗;二种液-固分离技术,活性碳吸附和交换吸附;二种薄膜分离技术,逆渗透和超滤。

从水和废水中除去无机污染物的工程技术在本书中完成了物理化学部分的讨论。该文由休斯顿大学 (University of

Houston)的 Dennis Clifford, Suresh Subramonian 和美国环保局水环境研究中心的 Tom Sorg 撰写。该文作者指出水中可溶性无机污染物可能是周期表中任何元素的离子、原子或分子的阳离子、阴离子和中性状态。他们详细介绍了一般用于除去水和废水中较常见无机污染物的物理化学处理技术,包括沉淀,共沉淀,吸附,离子交换,应用逆渗透和电渗析的薄膜分离或上述技术的组合。没有讨论蒸馏和蒸发,氧化还原也只是在与其他工艺有关的时候才提到。

生物技术的三篇文章,两篇讨论了厌氧技术,一篇是关于水处理的好氧方法。每篇文章对工程实例的现状进行了评论。

书中的第四篇文章讨论了水处理厌氧技术和地下水处理的发展趋势。本文由斯坦福大学(Stanford University)的 Perry L. McCarty 和 Daniel P. Smith 撰写。作者指出厌氧工艺——有机物转变为沼气——应用于高浓度的城市和工业废水处理已一个多世纪了,由于当代处理技术的进步和对微生物工艺基本知识的进一步了解,现在应用范围已扩大到低浓度工业废水的处理。例如,固定膜工艺在处理低浓度废水时比分散生长工艺更稳定。作者指出,固定膜工艺比较稳定的一个因素是双原子氢及其在工艺动力控制作用有关。

本书第五篇文章是关于污水处理的生物厌氧技术。柯内尔大学(Cornell University)的 William J. Jewell 指出废水的厌氧消化或厌氧沼气发酵比废水处理的好氧技术优点更多。他论述了厌氧废水处理的现状及将来的研究内容及发展的需要,纠正了认为厌氧消化作为生物技术对 pH、温度及防止毒物等有严格要求的原有错误观点。他对厌氧技术在废水处理中作用有限,在生活污水处理中没有地位的问题进行了讨论。

本书最后一篇文章讨论了好氧生物处理的发展。伊利诺斯大学(University of Illinois at Urbana-Champaign)的 Bruce E. Rittmann 写到好氧处理的历史能追溯到 19 世纪末期;而到 20 世纪 30 年代,它是废水处理的标准方法;最普通、应用时间最长的好氧技术是活性污泥和滴滤池。虽然每一种工艺进行了同样的氧化反应,积聚了相似的微生物,但它们维持细胞的方式十分不同。Rittmann 讨论了最近所作的改进和革新,并指出需要对控制生物动力的能力和动力的机理作进一步研究。

1. 除去水和废水中的颗粒物

在一般的水和废水处理厂中,大多数污染物是以颗粒物形式除去的,或先使污染物吸附在颗粒物上,然后除去颗粒物。这篇文章的目的是介绍在水和废水处理中,目前是如何理解对去除颗粒物产生影响的某些基本现象的,并解释在现代处理系统的工程技术中为什么要考虑这些现象,而有些时候又不予考虑。

一般处理地表水供饮用或工业用水的方法是絮凝(包括加化学药剂、迅速混合、絮凝),沉降和过滤,如图 1-1。除天然存在的颗粒物外,在沉降过程中为了除去象钙和镁这样的可溶性组分,或为了促进絮凝作用,加入铝或铁的氢氧化物,也常常产生颗粒物。虽然在反应装置中常常发生与颗粒物无关的其它反应,象化学氧化反应,但它们的设计基本上受除去颗粒物能力的制约。

在污水处理厂中,除去颗粒物形式的污染物同样是非常重要的,如图 1-2 所示。一级沉淀、二级沉淀和脱水是直接的固-液分离过程;其次,生物处理的目的可以认为是使原来溶解的有机污染物转变为微生物(颗粒物),然后除去的过程。可供选用的三级处理工艺有:

- 过滤,进一步除去颗粒物;
- 磷酸盐沉淀,固-液分离和

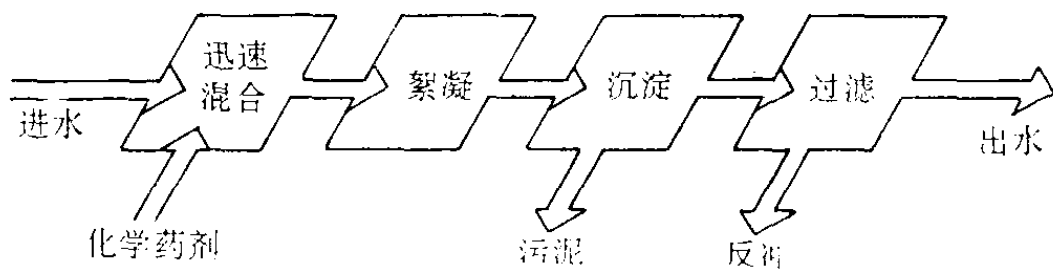


图 1-1 饮用水处理厂

• 氮的硝化和脱氮工艺,污泥沉淀。

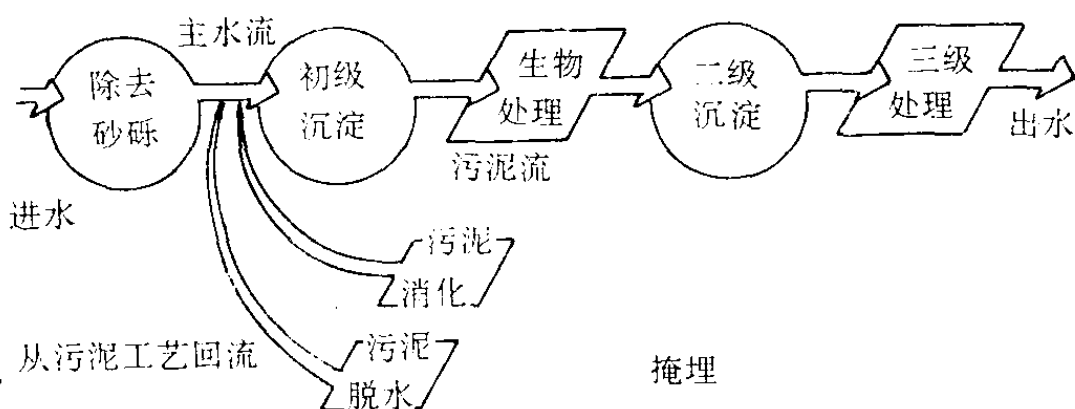


图 1-2 城市污水处理厂

在除去颗粒物的过程中,物理和化学作用是十分重要的。Wirojanagud 的实验结果充分证明了这一点⁽¹⁾。图 1-3 表明在稳流状态连续运行时,颗粒物的起始浓度和表面电荷对沉淀除去悬浮颗粒物的影响。在实验中,Wirojanagud 把同样物质的四种悬浮液以同样的速率连续流入间隔的实验室反应器中。在稳流状态下,浓度较高的悬浮液,颗粒物去除的量较多,而且悬浮液 pH 值在 2.5 时(这些颗粒物电荷为 0)比在 3.5 时去除量多。

引起差异的原因来自与沉淀同时发生的絮凝过程。絮凝程度(影响沉淀程度)受着颗粒物浓度和表面电荷的影响(在

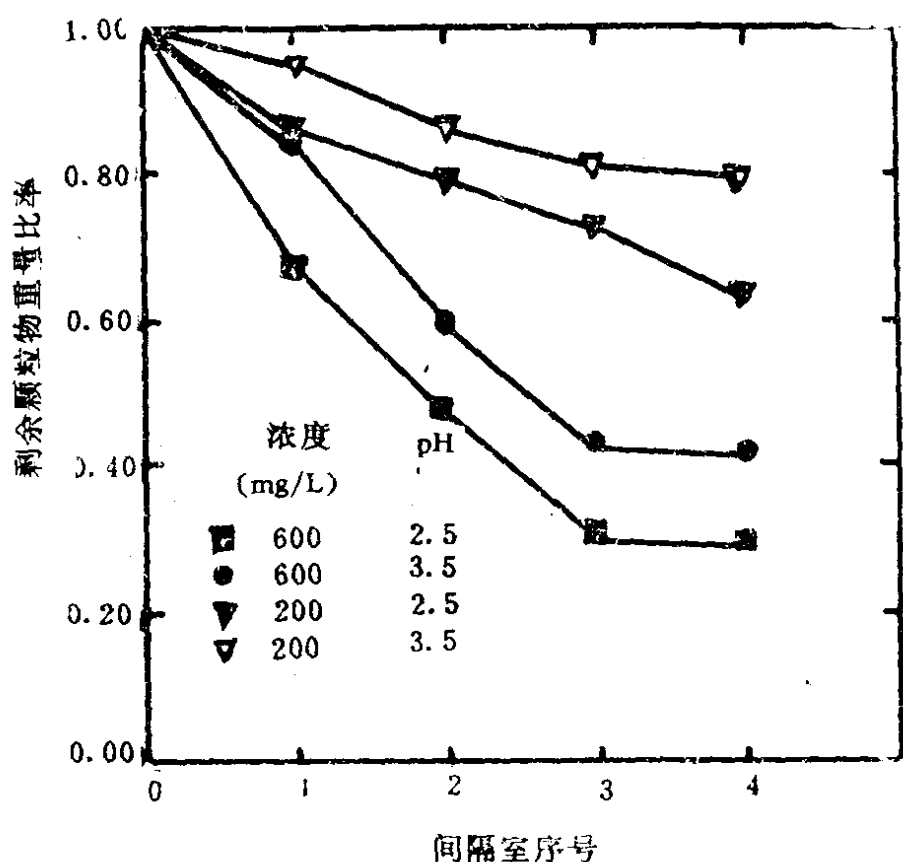


图 1-3 连续水流沉降

a. 起始浓度与表面电荷在稳流状态时对除去悬浮颗粒物的影响。b. 实验在间隔的 130cm 长的池中进行, 水深 30cm。于稳流状态下, 在水中中部采样。pH-2.5 为所用 Min-u-sil 5 种粒子电荷的零点。

这些实验中, 表面电荷由 pH 值控制), 而浓度的影响是物理现象, 因为浓度高的时候, 颗粒与颗粒碰撞机会就多, pH 值的影响则是表面化学现象。

O'Melia 已经分别描述了颗粒物运动和结合时, 其相互作用的物理化学现象⁽²⁾。颗粒物运动引起的相互接触是物理过程, 而颗粒物相互结和则是颗粒物表面化学作用和周围液体化学作用的结果。虽然在颗粒物相互作用中, 无论是物理作用还是化学作用都十分重要, 但本文的重点是讨论颗粒物的物

理特性及其对除去颗粒物的影响。

对于所有固-液分离技术,化学作用都十分重要,如在过滤前加些有机聚合物可提高除去颗粒物的效果(Habibian, O'Melia⁽³⁾, Glaser 和 Edzwald⁽⁴⁾介绍的过滤中化学作用的资料是很有说服力的),同样,脱水前也可加一些化学添加剂。

1.1 絮 凝

用絮凝可以说明在颗粒物相互作用中的一些要考虑的物理因素。由于絮凝仅仅是颗粒物粒径的增长因此它大概是去除颗粒物最简单的工艺了。在分析絮凝过程时,沉渣通常不予考虑,一般在絮凝前要考虑的是沉淀能力。另外,絮凝过程并不复杂,例如,原来存在的颗粒物并不产生抑制作用,也不使过滤压力增加。

在一著名的算式中,Smoluchowski 对絮凝进行了定量描述,说明在一间歇式工艺中,不同粒径颗粒物的每一量值粒子浓度是怎样随时间变化的⁽⁵⁾。用离散形式,Smoluchowski 方程可表达如下:

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \sum_{i+j=k} \beta(i, j) n_i n_j - \alpha n_k \sum_{i=1}^c \beta(i, k) n_i \quad (1 \cdot 1)$$

在式 1·1 中, i, j 和 k 代表粒径; c 是 i, j 或 k 的最大允许值; n 是粒子浓度; t 是时间; $\beta(i, j)$ 是碰撞频率函数, 视作颗粒间不同方式接触的各函数之和; α 为有效碰撞系数(即预计能引起结合的碰撞率)。式 1·1 右边第一项表示由二粒粒径较小的粒子絮凝形成粒径为 k 的粒子的速率, 第二项表示由于粒径为 k 的粒子与任何粒径的粒子絮凝成粒径更大的粒子引起 k 粒径粒子的损失。

水中的颗粒受着几个力的作用,这些力影响着粒子的运动,并引起碰撞。即溶液中分子的热运动导致粒子的布朗运动,液体在外力作用下运动而引起粒子运动及重力作用引起的粒子向下运动。由布朗运动、液体流动和不均匀沉降引起粒子间接触的各碰撞频率函数可推导并分别表达如下:

$$\beta(i, j) = \frac{2\bar{k}T}{3\mu} \left\{ \frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_j} \right\} (d_i + d_j) \quad (1 \cdot 2)$$

$$\beta(i, j) = \frac{1}{6} (d_i + d_j)^3 G \quad (1 \cdot 3)$$

$$\beta(i, j) = \frac{\pi(\rho_p + \rho_l)g}{72\mu} (d_i + d_j)^3 |d_i - d_j| \quad (1 \cdot 4)$$

在式 1·2~1·4 中, d_i 和 d_j 分别是粒子 i 和 j 的直径; $\bar{k}$ 是 Boltzmann 常数; T 是绝对温度; μ 是流体绝对粘度; G 是均方根速度梯度; g 是重力常数; ρ_p 和 ρ_l 分别是粒子和液体的密度。在湍流情况下,速度梯度经常由 $(\varepsilon \times \rho/L)^{1/2}$ 代替,其中 ε 为单位质量消耗。

考虑式 1·1~1·4 的复杂性是必要的。显然,絮凝池的设计者们认为这些方程太复杂了,通常也没有一本环境工程教科书根据这些方程探讨设计问题。一般仅仅考虑上述方程的简单子集的结果,即把所有粒子看成同样大小。在这种情况下,式 1·1 右边二项成为一项,不均匀沉降引起的碰撞频率函数为 0。而且常常认为粒子较大,与液体运动所引起的碰撞相比,布朗运动所引起的粒子碰撞完全可以忽略不计。

不幸的是,设计者们所采用的简单化解并不很真实。Lawler 和 Wilkes 从一运行的絮凝池中测量了粒度分布,测得有效粒子浓度和粒子体积浓度,其粒径在 $1\mu\text{m}$ (他们研究中的测量低限)到 $40\mu\text{m}$ 。从刚好在测量低限以上的范围,随着粒子粒径减小粒子浓度增加的趋势看,有理由认为比 $1\mu\text{m}$ 小的粒

子要多得多,其粒子粒径相差两个数量级。因为流体流动和不均匀沉降所引起的粒子碰撞频率函数方程在粒子直径不同时也十分不同(分别接近三次幂、四次幂),二个数量级的粒径差能导致碰撞频率的很大差异。

显然,从一名设计者的观点看,方程 1·1~1·4 太复杂了,但从粒子相互作用的基本或微观观点来看,它们又太简单了。一个不均匀沉淀碰撞函数的基本推导清楚地说明了这个问题。假设有一半径为 a_i 的粒子,其中心为一坐标系的原点,再假设一个较大的粒子,其半径为 a_j 。如果二粒子刚刚接触,它们的中心距离为 $a_i + a_j$,因此半径为 $a_i + a_j$ 的范围确定为二粒子间的相互作用空间。碰撞频率函数就是 j 粒子 i 粒子的相对速度与球体上半部份水平投影的面积之乘积。用 Stokes 粒子沉降速度表示,其相对速度为:

$$v_i - v_j = \frac{2(\rho_p - \rho_l)g}{9\mu}(a_j^2 - a_i^2) \quad (1 \cdot 5)$$

投影面积等于半径为 $a_i + a_j$ 的圆面积:

$$A = \pi(a_i + a_j)^2 \quad (1 \cdot 6)$$

以此可推导不均匀沉淀碰撞频率函数,得出:

$$\beta(i, j) = \frac{2\pi(\rho_p - \rho_l)g}{9\mu} \cdot (a_i + a_j)^2(a_j^2 - a_i^2) \quad (1 \cdot 7)$$

表达方程式 1·7 时,用直径代替半径,分解最后一项因子就得出式 1·4。该公式推导一个重要不足之处是忽略了一粒子运动对另一粒子运动的影响。它假定,如果两粒粒子在某点相对运动,则其沿轨线不断运动直至碰撞。这一假设显然不能代表真实情况。朝着一粒小粒子向下运动的一粒大粒子,推水让路,当两粒粒子距离变得很小的时候,水又推动小粒子,这样大粒子与小粒子的碰撞比单从几何学考虑所估计的碰撞可能

性要小。

上述公式推导中忽略的流体力学问题,同样在布朗运动和流体运动引起的碰撞频率函数中也忽略了,该公式是由Friedlander 推导的⁽⁷⁾。由于水力的相互作用能阻止碰撞,故式 1·2~1·4 过高的估计了实际碰撞比率。式 1·1 中“2”项可部分地修正这一过高的估计,但还必须考虑象范德华力和电子斥力等。这些力在公式推导中都被忽略了。对于在液体中同样大小粒子间碰撞的水力动力学问题,Mason 和其作者们在数学上和实验上都进行了多年的研究⁽⁸⁾。随后 Adler 进一步进行了多种粒径的研究^(9,10)。Spicelman 进行了布朗运动粒子的水力相互影响的研究。

采用研究粒子的方法确定处理工艺模式的目地是为了根据粒子的基本特点和有关工程技术预测工艺特性。当目地基本达到后,实际系统设计和操作的模式会成为不仅是有用的而且是必不可少的。但目前,在絮凝模式和实际系统的应用间存在着差距。现存的模式从微观来看太简单了,不能反映真实情况,同时又太复杂了(或大概还不够精确),不能应用在常规设计中,还需要努力缩短这一距离。在下面的几个部份中,评价了其它几个处理工艺的模式和设计的现状,但有些方面不如絮凝讨论得那样详细。

1.2 沉 淀

低浓度的悬浮液沉淀模式研究与絮凝相似,它包括相同于式 1·1~1·4 中表达的各项,另外加沉淀表达项。实际上在环境模拟系统中所有沉淀都是絮凝状的;当颗粒沉淀时,同时絮凝,如图 1-3 所示。一般粒子的大小、浓度、密度比较小,

适合 Stokes 定律(式 1·5)。在模式中,理论上把反应器分成几层。每一层每一种粒径的颗粒可用相似于式 1·1 的一个方程式表达,并增加二项,一项表达上一层降入该层的粒子,另一项表达降入下一层的粒子。

对于间歇式操作或理想堵流的情况,微分方程组的数值积分就够了。对于比较复杂的水力情况,Valioulis 和 List 已进行了有限元的研究⁽¹²⁾。有足够的理由说明,该模式是十分先进的,因为它反映了流入水粒子粒径分布、浓度、密度及象溢流率、检测时间、池深等设计考虑,这些对去除颗粒物能产生重要的影响。

例如,用这种方法制定的沉淀模式表明,颗粒物去除率随着流入水浓度降低而减少,现在这一结果在现代的工艺中得到了反映。在低浊度水处理中,絮凝和过滤工序间没有沉淀池,因为沉淀不仅是不必要的而且也是无效的。

习惯上,沉淀池中去除颗粒物的效率用去除量进行测算。由于各粒径粒子的密度不变,从颗粒物体积分布也可测算各粒径质量分布。Wikes 在一软水处理厂(投入石灰得到 CaCO_3 沉淀)一运行的沉淀池中得到了粒径分布的测算结果⁽¹³⁾。例如,图 1-4 所示德克萨斯州 Austin 的 Davis 水处理厂沉淀池颗粒物体积分布情况。

每一条曲线下方的面积代表粒子总体积浓度;从面积的减少,显然可以说明液体通过沉淀池(从测点 1 到测点 3)发生了沉淀。图中粒径最小的一些粒子体积增加是由于更小粒子絮凝的结果。进一步提高沉淀池的效率是困难的,因为流入口附近(测点 1)大多数粒子的粒径在 $20\mu\text{m} < d_p < 60\mu\text{m}$ 之间 ($1.3 < \log d_p < 1.8$),但流出口附近(测点 3)的粒子粒径大多数为 $7.9\mu\text{m} < d_p < 15.8\mu\text{m}$ ($0.90 < \log d_p < 1.20$)。