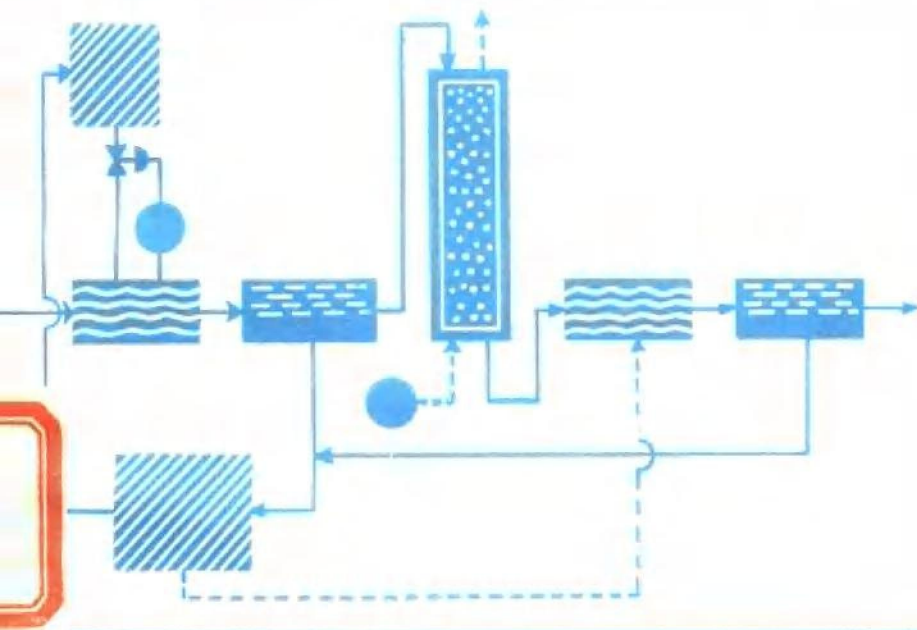


# 污水除磷脱氮技术

〔日〕宗宫 功 编著



中国环境科学出版社

# 污水除磷脱氮技术

[日] 宗宫 功 编著

张荪楠 吴之丽 译

中国环境科学出版社

1987

## 内 容 简 介

本书在总结日、美两国的大量实例和实验的基础上，系统介绍了污水除磷脱氮技术。其中包括混凝沉淀法、结晶法和生物法除磷技术，吹脱法、离子交换法、不连续点氯化法和生物硝化法脱氮技术。对于每一种工艺，都介绍了处理原理、处理流程、设计操作因素、处理效果，并对大量实例和部分工艺的技术经济分析结果作了介绍。

本书可供广大工程技术人员和管理人员在污水处理设计运行中参考，亦可作为环境工程，给排水专业大专院校师生的参考书。

## 下水中の磷および窒素 の除去法

### 污水除磷脱氮技术

〔日〕宗官 功 编著

张荪楠 吴之丽 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

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1987年10月第一版 开本 787×1092 1/32

1987年10月第一次印刷 印张 5 1/8 插页 1

印数 0001—5 000 字数 113千字

ISBN 7-80010-066-9/X0066

统一书号：13239·0124

定价：1.25元

# 目 录

第一章 污水除磷技术 .....	( 1 )
第一节 混凝沉淀法和投加混凝剂的活性污泥法 .....	( 1 )
一、概述 .....	( 1 )
二、原理 .....	( 3 )
三、处理流程 .....	( 5 )
四、处理效果 .....	( 7 )
五、影响操作的因素 .....	( 13 )
六、运行管理费用 .....	( 16 )
第二节 结晶法 .....	( 19 )
一、原理 .....	( 19 )
二、处理流程 .....	( 20 )
三、处理效果 .....	( 21 )
四、影响操作的因素 .....	( 24 )
五、污泥产生量 .....	( 30 )
六、运行管理费用 .....	( 31 )
第三节 生物除磷法 .....	( 33 )
一、原理及概述 .....	( 33 )
二、设计·操作影响因素 .....	( 35 )
三、处理效率的实例 .....	( 43 )
四、费用 .....	( 67 )
第二章 污水脱氮技术 .....	( 70 )
第一节 氨的吹脱法 .....	( 70 )
一、原理和概述 .....	( 70 )
二、处理流程 .....	( 72 )
三、设计·操作因素 .....	( 73 )
四、去除率和设计·操作因素的关系 .....	( 76 )
第二节 不连续点氯化处理法 .....	( 93 )

40088

一、概述 .....	( 93 )
二、基本反应机理 .....	( 94 )
三、有关不连续点氯化处理的操作参数 .....	( 95 )
四、采用活性炭过滤法去除余氯 .....	( 100 )
五、不连续点氯化处理和活性炭过滤联合工艺 .....	( 101 )
六、结束语 .....	( 105 )
<b>第三节 离子交换法 (用沸石去除氨氮) .....</b>	<b>( 106 )</b>
一、概述 .....	( 106 )
二、沸石的基本性质 .....	( 107 )
三、影响沸石对氨吸附的因素及设计·操作因素 .....	( 109 )
四、沸石的再生及再生后的吸附能力 .....	( 120 )
五、结束语 .....	( 125 )
<b>第四节 生物硝化·脱氮法 .....</b>	<b>( 130 )</b>
一、概述 .....	( 130 )
二、硝化反应和脱氮反应 .....	( 130 )
三、硝化·脱氮工艺 .....	( 138 )
四、从过去的研究实例探索最佳设计及操作条件 .....	( 144 )
五、同时除磷脱氮法 .....	( 153 )
六、结束语 .....	( 155 )

# 第一章 污水除磷技术

## 第一节 混凝沉淀法和投加混凝剂的活性污泥法

### 一、概 述

混凝沉淀法是向污水中投加药剂，使水中磷酸离子生成难溶性的盐，形成絮凝体与水分离，从而去除污水中所含磷的一种物理化学方法。这种方法按使用的药剂可分为石灰、金属盐两种，也可按投药的位置分：向一级处理（初沉池）投加、向二级处理（曝气池）投加、向三级处理（混凝池）投加三种方式。这几种处理方式的特点如表1-1、表1-2所示。1), 2)

表1-1 一级、二级、三级处理采用混凝除磷法的  
优缺点比较

类别	优 点	缺 点
一 级 处 理	1. 适用于所有的处理场 2. 提高 BOD、SS 的去除率，减轻二级处理的负荷 3. 出水中金属盐泄漏率最低 4. 采用石灰时，可以补充二级处理硝化所需的碱度	1. 金属盐的利用率最低 2. 絮凝时必须要有聚合物 3. 采用金属盐时，形成的污泥比初沉池污泥脱水困难； 4. 当采用金属盐时，二级处理硝化还须投加一定量的碱

续表

类别	优点	缺点
二级处理	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 为除磷而改建设备所需费用最低</li> <li>2. 比一级处理所需投加的混凝剂量少</li> <li>3. 使活性污泥处理稳定</li> <li>4. 一般不需要聚合物</li> <li>5. 根据测定的磷浓度, 容易调节和控制摩尔比</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 当<math>P &lt; 0.5 \text{mg/l}</math>时, 必须认真控制 pH 值</li> <li>2. 过量投加金属盐, pH 值降低, 影响活性污泥处理效果</li> <li>3. 投加石灰, pH 值上升, 影响处理效果</li> <li>4. 为进行硝化反应, 需增加碱量</li> </ol>
三级处理	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 出水中磷的浓度最低</li> <li>2. 污水中所含不纯物最少, 则采用金属盐最有效</li> <li>3. 有可能将一级处理、二级处理的污泥分离, 分别按不同用途处置</li> <li>4. 采用石灰时, 可考虑石灰回收再利用</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 建设费用比一级处理、二级处理有大幅度增加</li> <li>2. 采用金属盐时, 在处理水中金属的泄漏率最高</li> <li>3. 为得到澄清的处理水, 需要添加聚合物, 再经过滤池处理</li> </ol>

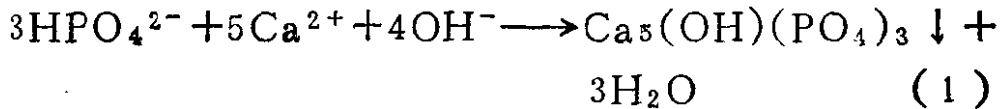
表1-2 石灰混凝和金属盐混凝法比较

	石灰混凝	金属盐混凝
混凝剂的必要投加量	根据碱度, 将 pH 值调至一定值所需混凝剂量	按与磷的摩尔比
从沉淀物中再生混凝剂	可以	不可以
污泥产生量	多	少
处理·处置	容易	困难
处理水中的溶解盐	不增加	增加
最适宜的 pH 值范围	广泛 (某一定值以上)	较窄
适用的处理规模	大	所有规模
其它	同时进行氨的解吸是经济的, 但会生成水垢, 导致事故发生	投加的药剂对生物处理有利

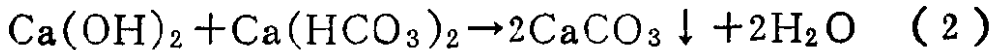
## 二、原 理

### 1. 石灰混凝

正磷酸在有氢氧根离子存在的条件下，与钙离子反应生成碱式磷酸钙沉淀：



在这个反应中，pH值越高，磷的去除率越高。应考虑到污水中的碱度、镁也与石灰反应而消耗石灰用量：



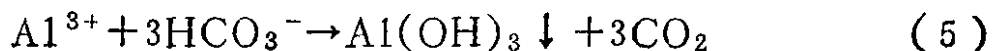
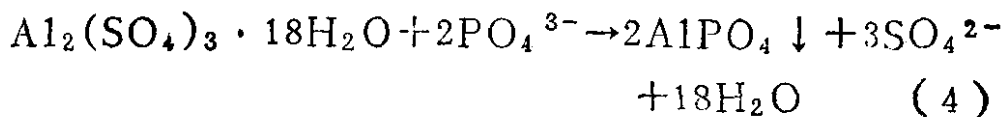
这个反应中 $\text{CaCO}_3$ 能提高絮凝体的沉淀性能，而 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 能去除重磷，所以磷的总去除率是较高的。

这种方法的主要因素是投加石灰而使污水pH值升高，如图1-1(1)、(2)所示，随pH值的上升，处理水中总磷量减少，当pH值为11左右时，总磷浓度大致在 $0.5\text{mg}/1$ 以下<sup>3)</sup>。投加石灰是为了提高污水中的pH值而去除磷，所以为克服污水本身的缓冲能力，使pH达到所要求的数值，必须投加一定量的石灰。采用M碱度作为缓冲能力的指标。图1-1(3)表示当 $\text{pH} \geq 11.0$ 时，M碱度与石灰投加量之间的关系。

### 2. 金属盐混凝

采用的混凝剂有铝盐(硫酸铝、聚合氯化铝)、铁盐(氯化亚铁、氯化铁 硫酸亚铁、硫酸铁)等。

硫酸铝与磷反应如下：





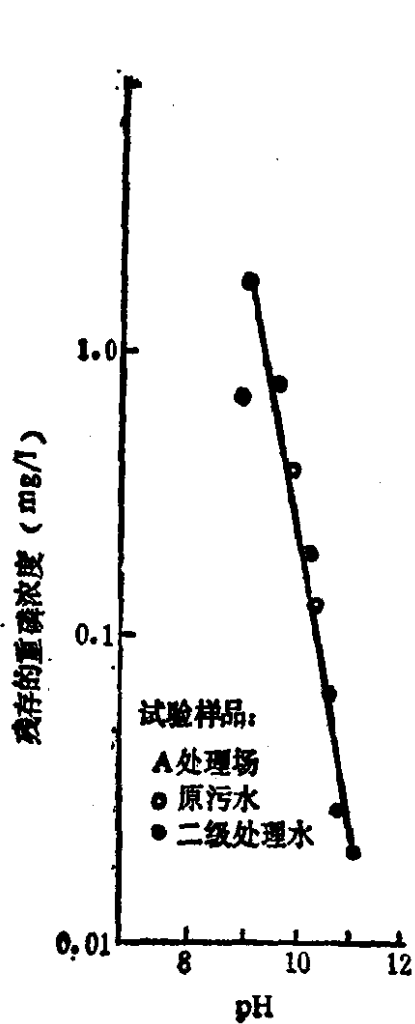


图1-1(1) 石灰混凝沉淀时, pH值与残存磷浓度的关系

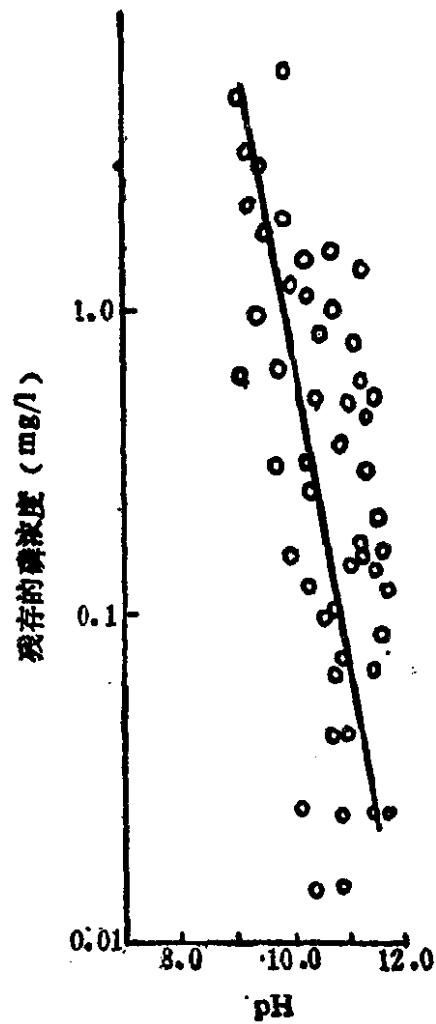


图1-1(2) 石灰混凝沉淀时, pH值与残存磷浓度的关系  
 (八个城市污水处理场, 23个试验样品)

金属和磷的摩尔比为理论值的两倍以上。从沉淀物的溶解度看, 最适宜的pH值范围是: 铝盐pH值为6, 亚铁盐及铁盐pH值分别为8和4.5。

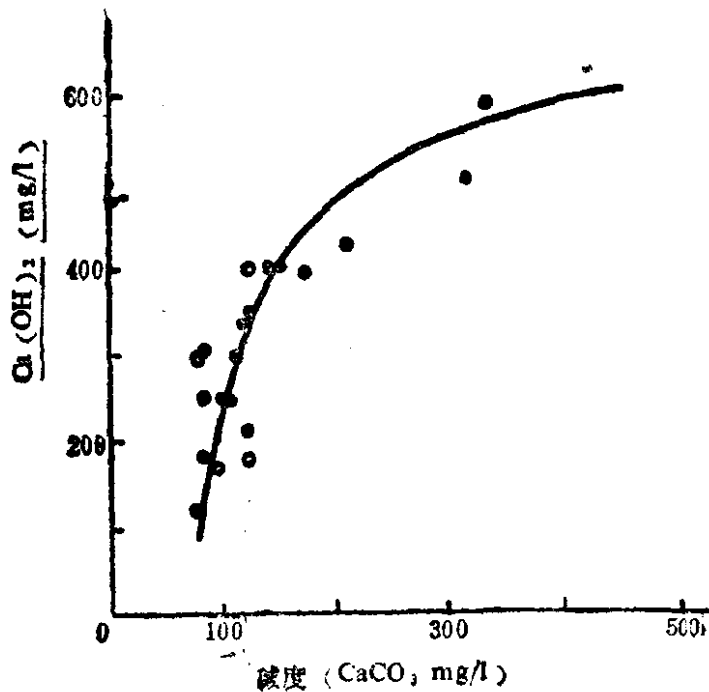


图1-1(3)  $\text{pH} \geq 11.0$ 时所需的石灰用量

### 三、处理流程

#### 1. 石灰混凝法

(1) 在一级处理中投加石灰，流程如图1-2所示。往往不设混凝池，而利用泵的压水将石灰混入污水。

(2) 在三级处理中投加石灰，流程如图1-3。工艺中使用的是消石灰。也可以利用烧成炉的排气( $\text{CO}_2$ 气含量约10%左右)做再碳酸化的 $\text{CO}_2$ 气源。

#### 2. 金属盐混凝法

如图1-4所示，为去除磷，在通常的污水处理流程中，

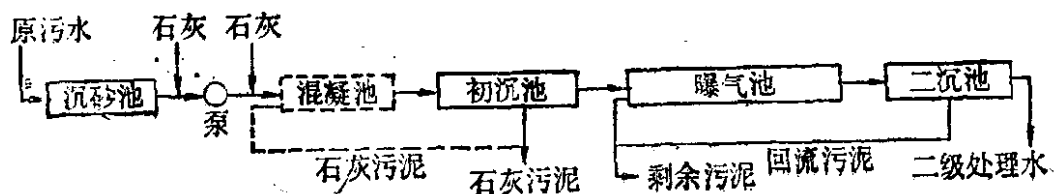


图1-2 石灰混凝法(向一级处理中投加)

在图中标出序号的位置上投加金属盐。

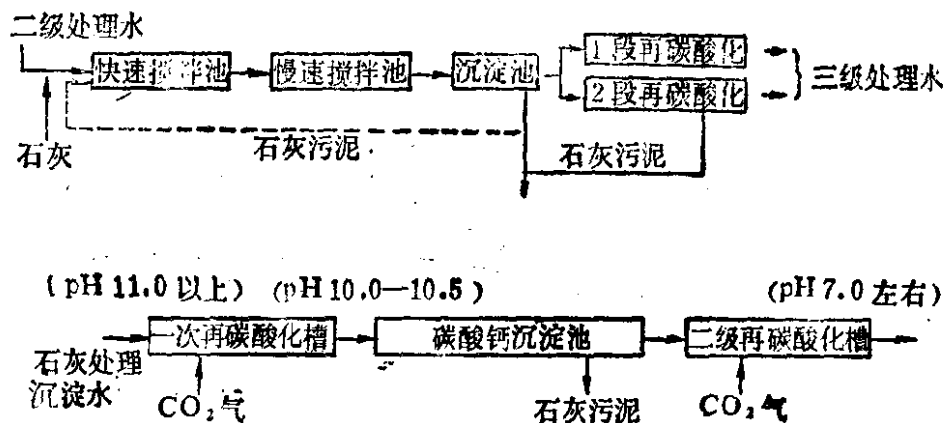


图1-3 石灰混凝法（向三级处理投加）

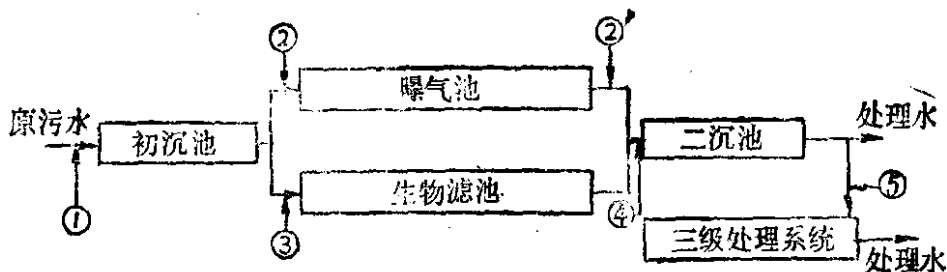


图1-4 金属盐混凝法

注：○表示投加金属盐的位置。

(1) 向一级处理投加金属盐，是一种投加混凝剂容易，混合与停留时间最佳，同时又能去除BOD、SS等的方法。缺点是处理过程中磷还没能形成正磷酸形式，磷的去除率不很高。所以应按以下要求有效地投加混凝剂：

- a. 无机混凝剂与原水应充分混合；
- b. 混凝时间最少需5分钟；
- c. 快速搅拌20—60秒后，添加阴离子有机聚合物；
- d. 机械或空气曝气1—5分钟；
- e. 将形成的絮凝体液体缓慢送往初沉池。

(2) 在二级处理中投加金属盐，据有关资料报导，铝的

投加量按摩尔比计 $Al : P = 2.44 : 1$ ，pH值在6以上，曝气池、搅拌混合池及二沉池总的停留时间为4.16小时，经处理后磷的去除率为95%。投加无机盐的活性污泥除磷的机理是沉淀、吸附、离子交换、混凝相互作用的结果，其主要影响因素是pH值及离子的状态。

本法除磷所需费用取决于处理水中允许残留的磷含量的要求，缺点是有溶解性物质生成。至于药剂投加位置，因为在生物处理过程中，有机磷、重磷水解生成正磷，所以从理论上讲，在出水处投加药剂效果最好。

(3) 在三级处理中投加金属盐，除磷装置由搅拌池、絮凝沉淀池及过滤池组成。采用硫酸铝时， $Al : P$ 的摩尔比为 $1 : 1 - 2 : 1$ 。采用铝盐时，pH控制为6左右，铁盐为5.0左右<sup>4)</sup>。

#### 四、处理效果

##### 1. 一级处理

采用图1-5所示工艺流程，投加石灰时，原水中磷的去除率为80%，BOD的去除率为60—70%，沉淀物浓度为500—2000mg/l<sup>5)</sup>。投加铁盐时如表1-3所示的美国运行实例，总的去除率达60~90%<sup>4)</sup>。

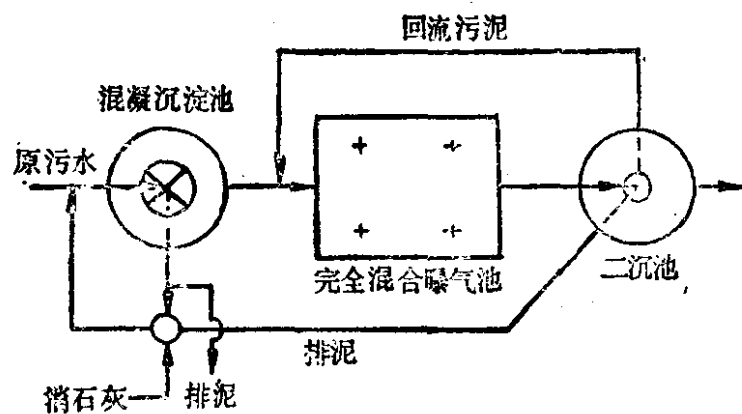


图1-5 磷酸盐去除法

表1-3 投加铁对除磷效果的影响

处 理 场	研究规模	使用的铁盐	Fe(mg/l) 或 Fe:P(重量比)	碱 (mg/l)	聚 合 物 (mg/l)	初沉池中 磷的去除率 (%)
密执安州 格雷灵 (Grayling Michigan)	工厂规模	FeCl <sub>2</sub>	15—25	30—50 (NaOH)	0.3	60—80
密执安州 敖德萨湖 (Lake Odessa, Michigan)	工厂规模	FeCl <sub>2</sub>	15—25	30—50 (NaOH)	0.3	75—93
密执安州 贝城 (Bay City Michigan)	实验室规模	FeCl <sub>2</sub>	10, 1.8:1	30 (CaO)	0.5	80
密执安州 埃斯卡诺巴 (Escanaba Michigan)	实验室规模	Fe(I) Fe(II)	2.2:1 1.1:1	0 40(CaO)	0 0.35	80 80
密执安州 怀俄明 (Wyoming Michigan)	实验室规模	Fe(I) Fe(II)	10 10	30(CaO)	0.7 0.4	80 80
本顿哈伯街, 约瑟夫 Benton Harborst. Joseph	实验室规模	FeCl <sub>2</sub>	20		0.3	最佳效果
密执安州 Michigan	2000m <sup>3</sup> /d (剩余污泥回 到初沉池)	FeCl <sub>2</sub>	21		0.26	89.7
	2000m <sup>3</sup> /d (剩余污泥回 流到初沉池)	FeCl <sub>2</sub>	21		0.26	65.3 90.9

续表

处 理 场	研究规模	使用的铁盐	Fe(mg/l) 或 Fe : P (重量比)	碱 (mg/l)	聚 合 物 (mg/l)	初沉池中 磷的去除率 (%)
俄亥俄州克利夫兰 (Cleveland, Ohio)	132000m <sup>3</sup> /d (初沉池是般 霍夫池)	Fe(II)	20		0.5	78
密执安州 沃兰 (Warren, Michigan)	130000m <sup>3</sup> /d	FeCl <sub>3</sub>	15			80
俄亥俄州 莱巴嫩 (Lebanon, Ohio)	3800m <sup>3</sup> /d	FeCl <sub>3</sub>	45, 1.76 : 1		0.5*	68
	3200m <sup>3</sup> /d	FeCl <sub>3</sub>	90, 3.46 : 1		0.5*	91
俄亥俄州 亨特 (Henter, Ohio)	实 验 室 15000m <sup>3</sup> /d	FeCl <sub>2</sub> FeCl <sub>2</sub>	60 3.1 : 1	80(CaO) CaO : Fe = 1.9 : 1 (重量比, pH调 至7.5~8.0)		>80 80

注: \*为Atlasep 2A2, anionic聚合物, 其余为Dow A23, anionic.

表1-4 投加硫酸铝时磷的去除情况

MLSS(mg/l)	1000—1500										2500左右
	1975, 9—10	1975, 10	1976, 1	1976, 1—2	1976, 2—3	1976, 4	1976, 5—6	1976, 6—7	1976, 9—10	1976, 11	
曝气池进水中T-P浓度(mg/l)	2.15	3.00	3.04	3.44	3.12	2.90	2.57	2.69	3.09	2.78	3.67
S-T-P 浓度(mg/l)	1.28	1.71	1.95	2.35	1.80	1.94	2.02	1.76	1.91	2.28	2.37
铝的投加率(mg/l)	8	6	4	4	3	3	4	6	3	6	8
Al与S-T-P 摩尔比	7.2	4.0	2.4	2.0	1.9	1.8	2.3	3.9	1.8	3.0	3.9
处理水中T-P浓度(mg/l)	0.27	0.17	0.53	0.52	0.75	0.63	0.48	0.27	1.37	0.67	0.31
处理水中S-T-P浓度(mg/l)	0.17	0.05	0.17	0.19	0.09	0.08	0.04	0.05	0.38	0.03	0.08

注: T-P: 总磷; S-T-P: 可溶性总磷。

## 2. 二级处理

表1-4、表1-5是在实际处理场的曝气池中投加混凝剂的实例。表1-4是采用硫酸铝的情况。当铝的投加量为6—7mg/l时，处理水中总磷含量最少，平均去除率为82%。表1-5是采用硫酸亚铁的情况。随铁盐投加率的提高，处理水中的溶解性总磷浓度下降，平均去除率为86%。当采用亚铁盐时，为促进亚铁氧化成铁盐，一般在曝气池进口处投加药剂为宜。

表1-5 投加硫酸亚铁时磷的去除情况

日期(年,月)	1978, 4—6	1979, 1—2	3	4	5
曝气池进水中T-P浓度(mg/l)	3.39	3.86	3.80	4.36	2.98
S-T-P浓度(mg/l)	2.34	2.83	2.76	2.86	2.07
Fe投加率(mg/l)	11	7.9	20.0	25.0	4.3
Fe与S-T-P摩尔比	2.6	1.6	4.0	4.9	1.2
处理水中T-P浓度(mg/l)	0.62	0.49	0.35	0.19	0.81
处理水中S-T-P浓度(mg/l)	0.30	0.30	0.25	0.11	0.60

## 3. 三级处理

用作三级处理的混凝沉淀，投加石灰时要注意石灰的投加量。横须贺市实例，投加量为1000 mgCa(OH)<sub>2</sub>/l，处理结果如表1-6所示<sup>6)</sup>。控制pH值为11左右时，进行混凝沉淀，经两层过滤后出水中总磷浓度平均为0.044mg/l。

表1-7所示是适用于工厂排水的一个实例，污水中有75%是非磷酸态的磷，在混凝沉淀中，磷大体上没有被去除<sup>7)</sup>。表1-8所示是用于处理粪便污水的实例：硫酸铝投加量为0.4—80mg/l，高分子絮凝剂投加量为1—2.4mg/l，磷酸离子的去除率为54—97%。投加氯化亚铁110—400mg/l、高分子絮凝剂0—22mg/l时，磷酸离子的去除率为93—99%<sup>8)</sup>。



表1-6 石灰混凝沉淀的除磷效果 (石灰投加量(CaOH)<sub>2</sub>以1000mg/l计)

类别	试样 数值类别 项目	原水			石灰混凝沉淀出水			经两层过滤后出水		
		最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均
1	pH	8.25	6.90	7.58	11.90	10.40	11.16	8.30	5.90	6.77
	总磷(mg/l)	1.985	0.756	1.331	0.384	0.007	0.060	0.148	0.007	0.030
	正磷(mg/l)	1.443	0.675	1.152	0.023	0.004	0.013	0.015	0.002	0.006
2	pH	7.43	7.00	7.20	11.30	10.05	10.85	9.00	6.70	7.10
	总磷(mg/l)	4.351	0.878	2.102	0.628	0.022	0.111	0.109	0.004	0.035
	正磷(mg/l)	2.798	0.836	1.861	0.390	0.006	0.069	0.040	0.004	0.016
3	pH	7.65	7.20	7.36	1.240	10.09	11.02	8.80	6.70	7.85
	总磷(mg/l)	2.091	0.786	1.228	0.177	0.007	0.087	0.194	0.013	0.052
	正磷(mg/l)	1.875	0.735	1.086	0.486	0.004	0.094	0.139	0.009	0.036
4	pH	7.82	7.05	7.46	11.07	10.10	10.39	9.80	6.40	7.26
	总磷(mg/l)	1.883	0.702	1.473	0.696	0.024	0.182	0.201	0.007	0.075
	正磷(mg/l)	1.600	0.450	1.043	0.182	0.019	0.093	0.152	0.017	0.050
5	pH	7.75	7.15	7.32	11.20	10.10	10.65	9.92	5.80	7.40
	总磷(mg/l)	1.862	0.756	1.276	1.862	0.756	1.276	0.070	0.011	0.034
	正磷(mg/l)	1.688	0.454	1.153	0.223	0.011	0.068	0.017	0.004	0.009