

XIANDAI GEISHUI CHULI
GOUZHUWU
YU
GONGYI XITONG
SHEJI JISUAN

现代给水处理构筑物与 工艺系统设计计算

张玉先 邓慧萍 张硕 等编



化学工业出版社

现代给水处理构筑物与 工艺系统设计计算

张玉先 邓慧萍 张 硕 等编



化学工业出版社

·北京·

本书包括给水工程勘察设计、混凝、沉淀、气浮、澄清、过滤、微污染源水处理、消毒、给水处理工艺系统和水厂设计等内容。书中按照水处理的工艺流程详细地论述了各种类型处理构筑物的原理、计算方法，并列举了大量算例和工程案例，配以工程设计图。根据给水处理工艺的发展，除了传统的水处理构筑物外，书中还论述了近年来出现的新型构筑物的设计计算，如均质滤料滤池、翻板滤池等。针对微污染源水处理，本书论述了生物氧化处理构筑物、化学预氧化工艺以及活性炭滤池的设计计算，并列举了微污染源水处理工程实例。

本书可作为高等院校给排水专业学生学习给水工程理论和毕业设计的参考书，也可供从事给水处理工程设计的人员阅读使用，还可作为给排水工程师参加全国注册公用设备工程师执业资格考试的复习教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代给水处理构筑物与工艺系统设计计算/张玉先, 邓慧萍, 张硕等编. —北京: 化学工业出版社, 2009. 10
ISBN 978-7-122-06185-0

I. 现… II. ①张…②邓…③张… III. ①水处理-技术
②给水工程-工程设计 IV. TU991

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 112632 号

责任编辑: 徐娟 陈丽
责任校对: 王素芹

文字编辑: 荣世芳
装帧设计: 周遥

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 15½ 字数 442 千字 2010 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

前 言

我国工业发展较快，排放污水治理不力，致使我国大部分的饮用水水源受到不同程度的污染。为保证人民身体健康，我国已颁布和实施了新的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)，这对城市供水企业和从事饮用水处理理论与技术研究的工程技术人员、研究人员提出了更高的要求。

饮用水处理构筑物的设计和计算是城市供水工程和自来水厂设计的重要组成部分，近年来有不少新型水处理构筑物在工程实践中应用，为了总结近年来给水处理研究成果，我们结合多年教学经验编写了此书。

本书主要介绍给水处理的基本理论、给水构筑物设计计算方法和工程案例，既有科研成果总结，又有工程实践应用实例。全书共分为8章，包括给水工程勘察设计、混凝、沉淀、气浮、澄清、过滤、微污染水源水处理、消毒、给水处理工艺系统和水厂设计等内容。按照水处理的工艺流程详细地论述了各种类型处理构筑物的原理、计算方法，并列举了大量算例和工程案例，配以工程设计图。本书根据给水处理工艺的发展，除了传统的水处理构筑物外，还论述了近年来出现的新型构筑物的设计计算，如均质滤料滤池、翻板滤池等。针对微污染水源水处理，论述了生物氧化处理构筑物、化学预氧化工艺以及活性炭滤池的设计计算，并列举了微污染水源水处理工程实例。本书可作为高等院校给排水专业学生学习给水工程理论和毕业设计的参考书，也可供从事给水处理工程设计的人员阅读使用，还可作为给排水工程师参加全国注册公用设备工程师执业资格考试的复习教材。

本书在编写过程中得到了严煦世教授、范瑾初教授的指导，张硕、周莉珺、陈欣、张怡、张亮、周舒月、包卫彬、杜尔登等为本书的出版做出了许多贡献，在此表示感谢。

书中引用了一些文献资料，文献名未一一列出，特做声明，并向这些文献作者表示感谢！

给水处理技术发展很快，由于编者水平和编写时间有限，不妥之处在所难免，恳请读者提出宝贵意见。

编 者
2009年2月

目 录

1 给水工程勘察设计	1
1.1 给水工程设计程序	1
1.2 预可行性研究	1
1.3 可行性研究	2
1.4 初步设计	2
1.5 施工图设计	3
1.6 工程勘察	3
2 混凝	4
2.1 混凝剂	4
2.1.1 混凝剂选用	4
2.1.2 混凝剂投加	8
2.1.3 加药间设计	14
2.2 混合	16
2.2.1 水泵混合	17
2.2.2 管式混合	17
2.2.3 机械搅拌混合	19
2.2.4 水力混合池	20
2.3 絮凝	21
2.3.1 絮凝原理	21
2.3.2 隔板絮凝池	24
2.3.3 折板絮凝池	27
2.3.4 机械搅拌絮凝池	33
2.3.5 网格栅条絮凝池	38
2.3.6 不同形式絮凝池组合	41
3 沉淀、气浮	42
3.1 沉淀	42
3.1.1 沉淀分类	42
3.1.2 天然悬浮颗粒在静水中自由沉淀	42
3.1.3 絮凝颗粒在静水中自由沉淀	44
3.2 平流式沉淀池	45
3.2.1 常用沉淀池的特点	45
3.2.2 平流式沉淀池的表面负荷	45
3.2.3 平流式沉淀池的构造和适用条件	46
3.2.4 设计要点	49
3.2.5 国内部分平流式沉淀池设计参数	50
3.2.6 设计计算	50
3.2.7 沉淀池集水系统	52
3.3 斜管(板)沉淀池	55
3.3.1 斜板、斜管沉淀池沉淀原理	55
3.3.2 斜管沉淀池基本形式	57
3.3.3 斜管(板)沉淀池适用条件和设计要求	57
3.4 其他沉淀池	62

3.4.1	辐流式沉淀池	62
3.4.2	高密度沉淀池	63
3.4.3	预沉池	65
3.4.4	沉砂池	65
3.5	气浮	67
3.5.1	气浮分离原理和气浮池类型	67
3.5.2	溶解空气气浮设备	70
3.5.3	气浮池设计计算	72
4	澄清	76
4.1	澄清池澄清原理	76
4.1.1	澄清原理	76
4.1.2	澄清池分类	76
4.2	机械搅拌澄清池	79
4.2.1	工艺特点	79
4.2.2	设计要点	80
4.2.3	设计计算	80
4.3	水力循环澄清池	86
4.3.1	工艺特点	86
4.3.2	设计要点	87
4.3.3	设计计算	88
4.4	脉冲澄清池	94
4.4.1	工艺特点	94
4.4.2	设计要求	95
5	过滤	98
5.1	滤池类型及特点	98
5.1.1	滤池类型	98
5.1.2	滤池特点和适用条件	100
5.2	滤池构造及工艺流程	101
5.2.1	构造与工艺流程	101
5.2.2	滤料和承托层	106
5.2.3	滤池冲洗	109
5.2.4	滤池的配水配气系统	113
5.3	普通快滤池	119
5.3.1	构造与工艺特点	119
5.3.2	设计要点	120
5.3.3	设计计算	123
5.4	双阀滤池	127
5.4.1	构造与工艺流程	127
5.4.2	设计要点	127
5.4.3	虹吸管设计计算	127
5.5	虹吸滤池	128
5.5.1	构造与工艺流程	128
5.5.2	设计要点	131
5.5.3	计算例题	133
5.6	重力式无阀滤池	134

5.6.1	构造和工艺流程	134
5.6.2	设计计算	136
5.6.3	计算实例	140
5.7	压力式无阀滤池	143
5.7.1	构造与工艺流程	143
5.7.2	设计要点	143
5.8	均质滤料滤池	144
5.8.1	构造与工艺特点	144
5.8.2	设计要点	147
5.8.3	计算实例	151
5.9	移动罩滤池	157
5.9.1	构造与工艺流程	157
5.9.2	移动罩滤池工艺特点	157
5.9.3	设计要点	158
5.10	压力滤池	160
5.10.1	构造与工艺流程	161
5.10.2	设计要点	161
5.11	翻板阀滤池	161
5.11.1	翻板阀滤池构造	161
5.11.2	翻板阀滤池的运行	162
5.11.3	翻板阀滤池的主要特点	163
5.11.4	翻板阀滤池设计要点	164
6	微污染源水处理	165
6.1	微污染源水	165
6.1.1	微污染源水质特点	165
6.1.2	微污染源的基本处理方法	166
6.2	生物氧化	168
6.2.1	生物氧化构筑物	168
6.2.2	生物接触氧化池设计要点	171
6.2.3	生物接触氧化池设计计算	172
6.3	预加氯氧化	173
6.3.1	氯的物理化学性质	173
6.3.2	氯氧化在微污染源水处理中的应用	174
6.3.3	预加氯氧化加氯量确定	175
6.4	二氧化氯氧化	175
6.4.1	二氧化氯物理化学性质	175
6.4.2	二氧化氯在受污染源水处理中的应用	177
6.4.3	二氧化氯的制备	178
6.5	高锰酸钾氧化	179
6.5.1	高锰酸钾性质	179
6.5.2	高锰酸钾氧化在受污染源水处理中的应用	180
6.6	臭氧氧化	180
6.6.1	臭氧物理化学性质	180
6.6.2	臭氧在水处理中的应用	181
6.6.3	臭氧的制备	182

6.6.4	臭氧接触氧化池设计和尾气处理	184
6.6.5	臭氧氧化系统设计	187
6.6.6	臭氧氧化应注意的问题	188
6.7	活性炭吸附	189
6.7.1	活性炭性能	189
6.7.2	活性炭在水处理中的应用	193
6.7.3	活性炭吸附滤池	194
6.8	微污染水源水处理工程实例	196
7	消毒	202
7.1	消毒剂和消毒方法	202
7.2	氯消毒	203
7.2.1	氯消毒原理	203
7.2.2	加氯量	204
7.2.3	加氯设备	206
7.2.4	安全用氯对策	211
7.2.5	加氯间设计要求	212
7.3	漂白粉消毒	212
7.4	氯胺消毒	213
7.5	次氯酸钠消毒	214
7.6	二氧化氯消毒	215
7.6.1	二氧化氯消毒说明	215
7.6.2	二氧化氯消毒设计注意事项	215
7.7	臭氧消毒	216
7.8	紫外线消毒	217
7.8.1	紫外线消毒原理	217
7.8.2	紫外线消毒系统	219
8	给水处理工艺系统和水厂设计	221
8.1	给水处理工艺系统	221
8.1.1	给水预处理工艺系统	221
8.1.2	常规处理工艺系统	223
8.1.3	饮用水深度处理工艺系统	224
8.1.4	排泥水处理处置工艺系统	226
8.2	给水处理构筑物选择	230
8.2.1	不同水源水质处理构筑物选择	230
8.2.2	不同规模处理构筑物选择	230
8.3	水厂设计	231
8.3.1	水厂平面设计	231
8.3.2	水厂高程设计	234
8.3.3	水厂管线设计	235
8.4	水厂生产过程检测和控制	237
8.4.1	生产过程检测的内容	237
8.4.2	水厂分级调度控制	238
	参考文献	239

1 给水工程勘察设计

1.1 给水工程设计程序

给水工程是把江河、湖泊、水库地表水源水或地下水取出，再经处理或加工成为符合生活饮用水或工业使用所要求的水质。根据水源水质和用水水质特点，确定需要采用的处理方法，有的只需一种方法即可达到要求，有的则要几种方法结合使用。就目前常用的处理构筑物而言，主要是去除浊度，同时也间接去除一些附着在粒子上的菌类、有机物和色度。

给水工程包括取水工程、输配水工程和水处理工程。给水处理构筑物可能是一座或多座，组成给水处理厂（站）。其建设是形成新的固定资产的经济活动，也称为固定资产扩大再生产的基本建设。从决策到设计、施工、竣工验收，整个过程就是建设的程序。

一项给水工程、一座水厂或一座大型给水处理构筑物，从计划建设到建成投入运行，一般经过立项、工程设计、施工和验收几个阶段，常常涉及城市规划、水质标准、水源选择、供电、征地、环境保护等多方面的因素。按照科学管理方法分出先后次序，可避免盲目建设和拖长工期，保证工程建设质量，减少事故，降低造价。给水处理构筑物工程设计是该项工程建设的主要内容，其设计程序需严格按照建设程序进行。根据工程量大小、建设投资、建设的重要性，在工程设计前通常进行预可行性研究，在此基础上，由主管部门或建设单位组织编写项目建议书。经上级主管部门批准后，进行可行性研究、设计招标，继而开展工程初步设计及施工图设计。

1.2 预可行性研究

一座大型给水处理构筑物或自来水厂在编制项目建议书之前，先进行预可行性研究，有些工程可仅进行可行性研究。预可行性研究的主要任务是阐明建设项目的必要性、所采用的技术标准，计算建设规模，构思准备选用的工艺方案，进行工程投资估算及简要的经济、社会环境效益分析。

预可行性研究报告通常由总说明、投资估算和简单设计图纸组成，应满足编制项目建议书要求。各章节基本内容如下。

① 概述。包括工程项目背景和研究工作过程，编制依据，编制资料，编制原则，采用的规范和标准，研究结论。

② 概况。包括工程区域概况及自然条件，供水现状，存在的主要问题及工程建设必要性等。

③ 方案论证。对城市用水量预测后，说明建设规模及目标、分期建设规模、水质水压要求。提出工程系统方案，简单说明处理厂（站）位置、工艺选择、配水系统等。

④ 工程方案内容。包括水、电、土建、仪表、设备的设计与选择。

⑤ 环境保护措施。

⑥ 劳动保护措施。

⑦ 节能措施。

⑧ 消防。

⑨ 管理机构劳动定员。

⑩ 投资估算及资金筹措。

⑪ 经济评价。

⑫ 结论与建议。

⑬ 附图、附件。

1.3 可行性研究

可行性研究主要根据项目建议书内容，运用多种科研成果对建设项目建设决策进行较深入的技术经济论证。研究兴建项目技术上是否先进、适用、可行，经济上是否合理，实施后效益如何，经过方案比较和评价后提出本项目的推荐方案和进一步科研的内容。一些小型工程涉及面不大，投资不足 1000 万元人民币，有时可简化为方案设计。

和预可行性研究报告一样，可行性研究报告一般由总说明、投资估算和设计图纸组成，比预可行性研究报告进行更深入的分析论证，主要章节如下。

① 概述。说明工程项目背景、建设项目的必要性、编制可行性研究报告的过程。

编制依据包括：工程立项的有关文件，主管部门批准的项目建议书，编制可行性研究委托书、合同或协议，国家和本地区有关建设的方针政策方面的文件，城市规划文件，环境影响评价报告书，所采用的规范和标准，主要研究结论。

② 概况。说明工程区域性质及规模、自然条件，城市总体规划及给水规划，工程范围和有关区域供水现状，现有水厂规模及实际供水能力，输水管网现状，水压现状以及供水存在的主要问题等。

③ 需水量预测和供需平衡。

④ 工程目标。确定工程使用年限、工程总规模和分期建设规模，出水水质目标，最小管网服务水头等。

⑤ 水源论证。对现有水源、开发利用的新水源按不同保证率对水量、水质进行论证，确定水源和取水位置。

⑥ 工程设计方案论证。提出水厂厂址（或构筑物位置）选择，进行系统方案比较、工艺设计方案比较。

⑦ 推荐工艺设计方案，排泥水处理方案以及相关的建筑、结构、电气、仪表和自控、暖通的工艺设计，设备，辅助设施，平面布置等。

⑧ 环境保护。环境现状、环境保护措施及效果。

⑨ 劳动保护。所在地区的安全卫生现状、劳动保护措施及效果。

⑩ 节能。能耗指标、节能措施和效益评估。

⑪ 消防。火灾隐患分析及对策。

⑫ 新技术应用及建议科研项目。

⑬ 工程项目实施计划和管理。

⑭ 投资估算及资金筹措。

⑮ 经济评价。

⑯ 结论和建议。

⑰ 附图。

⑱ 其他附件。

1.4 初步设计

工程设计是一门涉及科学、经济、方针政策等多方面的综合性应用的技术科学。一般建设项目分为初步设计和施工图设计两个阶段。对于技术复杂而又缺乏设计经验的项目，需要进行技术设计及必要的科学实验。初步设计是根据批准的可行性研究报告编写的，应满足以下要求。

① 设计方案比较和选定。

② 主要设备材料订货。

- ③ 土地征用。
- ④ 投资控制。
- ⑤ 施工图设计。
- ⑥ 施工组织和生产准备。

初步设计包括文字说明、图纸、工程数量、主要材料设备、工程概算等内容。

1.5 施工图设计

施工图设计主要根据批准的初步设计，绘制出正确、完整、详细的工艺、设备安装、非标设备加工、建筑、土建方面的图纸。应满足工程招标施工安装、设备材料订货、非标设备制造、土建施工要求，并据此图纸进行管理和工程验收。

施工图设计一般有设计说明和设计图纸、主要材料设备表，如有协议，设计单位还应编制施工图预算。需要提交的设计文件及要求如下。

- ① 设计说明书。
- ② 主要材料及设备表。
- ③ 工程概算修改报告或施工图预算。
- ④ 施工图设计图纸。

1.6 工程勘察

设计一座水厂或一座水处理构筑物时，一定要明确其所在位置和其他固定建筑物（构筑物）的距离以及地基承载能力。为此，设计前需进行工程勘察。工程勘察不是地质资源（矿藏、石油、煤田）钻探，而是包括工程测量、水文地质勘察和工程地质勘察等内容的工程勘察。主要是查明工程项目建设地点的地形地貌、地质构造和水文条件，通过测量测绘、钻探、试验鉴定等综合评价，为建设项目厂址选择、工程设计、施工安排提供科学的依据。

对于取水泵房、给水处理构筑物设计，工程勘察的主要内容是工程测量、水文地质勘察、工程地质勘察。工程测量大多进行平面控制测量、高程控制测量、地形测量、线路测量和绘图，以满足各设计阶段的设计要求和施工要求。水文地质勘察用来查明水文地质条件，提出地下水资源评价报告，进行水源选择方案比较。工程地质勘察主要是查明构筑物范围内地层结构、岩石和土的物理力学性质，并对地基稳定性及承载能力做出评价；提出不良地质现象的防治工程所需要的计算指标和资料；查明地下水埋藏条件和侵蚀性，判定地基岩石、土和地下水在工程施工和使用期间可能产生的变化及影响，并提出防治措施。

如果新建构筑物是在原有构筑物拆除后的基础上建造时，可参照原构筑物处地基钻探资料，决定是否再进行地质勘察，但不能用拆除构筑物设计图纸作为新建构筑物的地质勘察资料和设计依据。

2 混 凝

自来水厂所去除的杂质主要是悬浮物和胶体颗粒。通过投加电解质可以使水中胶体颗粒与细小的悬浮颗粒相互聚结，这一过程称为混凝。通常涉及水中胶体颗粒和细小悬浮物的性质、投加的电解质（混凝剂）水解聚合产物的基本性质以及胶体颗粒与混凝剂的作用。在整个混凝过程中，一般把混凝剂水解后和胶体颗粒碰撞，改变胶体颗粒的性质，使其脱稳，称为“凝聚”。在外界水力扰动条件下，脱稳后颗粒相互聚结称为“絮凝”。混凝包括凝聚、絮凝的整个过程，也有将凝聚、絮凝、混凝概念相互通用。本书沿用混凝即为凝聚和絮凝的概念。

在水处理中，混凝是影响处理效果最为关键的因素。混凝的作用不仅能够使处于悬浮状态的胶体和细小悬浮物聚结成容易沉淀分离的颗粒，而且能够部分地去除色度、无机污染物和有机污染物，以及铁、锰形成的胶体络合物，同时也能去除一些放射性物质、浮游生物和藻类。

混凝涉及混凝剂选择、混凝剂水解聚合条件及原水中所含杂质性质。絮凝也就是通常所说的反应。扰动水体、变化水流速度梯度、创造较好的水力条件，使絮凝颗粒粒径逐渐增大，既不破碎又不沉淀的构筑物就是絮凝构筑物。

2.1 混凝剂

2.1.1 混凝剂选用

2.1.1.1 常用混凝剂

应用于饮用水处理的混凝剂应符合以下基本要求：混凝效果良好；对人体健康无害；使用方便；货源充足，价格低廉。

混凝剂种类很多，据目前所知，不少于 200~300 种。按化学成分可分为无机和有机两大类，按分子量大小又分为无机盐混凝剂和高分子混凝剂。无机混凝剂品种很少，目前主要是铁盐和铝盐及其聚合物，在水处理中用得最多。有机混凝剂品种很多，主要是高分子物质，但在水处理中的应用比无机的少。下面介绍常用的几种混凝剂，其特点和使用要求见表 2-1。

表 2-1 常用混凝剂特点和使用要求

混凝剂名称	特点和使用要求
硫酸铝 [Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18H ₂ O]	①固、液两种形态，固态硫酸铝又分为精制和粗制。精制硫酸铝为白色结晶体，相对密度 1.62，Al ₂ O ₃ 含量 15% 以上。粗制硫酸铝含 Al ₂ O ₃ 10.5%~16.5%，不溶解杂质占 20%~30% ②硫酸铝经水解、聚合，最后生成[Al ₂ (SO ₄) ₃] _x 。在水解聚合过程中发挥电中和压缩水中胶体颗粒双电层作用，最后形成的高分子发挥吸附架桥作用，用于处理浊度在 500NTU 以下、水温在 5℃ 以上的原水效果更好
三氯化铁 (FeCl ₃ · 6H ₂ O)	①黑褐色结晶体，有金属光泽，纯度 45% 左右，易潮解 ②水解聚合过程同硫酸铝，但比硫酸铝能适应更宽的水温、pH 值条件。因 Cl ⁻ 的作用，比硫酸铝有更强的腐蚀性。由于 Fe 的原子量大于 Al，故和水中胶体颗粒形成的沉淀颗粒较重，常在水温较低的冬天使用
硫酸亚铁 (FeSO ₄ · 7H ₂ O)	①半透明淡蓝色结晶体，纯度 95% 左右 ②水解聚合产物是[Fe(OH) ₂] _x ，Fe ²⁺ 所带电荷低于 Fe ³⁺ 、Al ³⁺ ，电中和作用弱，且生成[Fe(OH) ₂] _x 聚合物，在 pH>12 时才能很好发挥吸附架桥作用。故一般自来水厂投加 FeSO ₄ · 7H ₂ O 时，同时投加氯气，氧化为 Fe ₂ (SO ₄) ₃ 、FeCl ₃ 。氧化 FeSO ₄ 的氯气用量为 $\frac{1}{8}$ (FeSO ₄ · 7H ₂ O) + (1.5~2.0)mg/L

续表

混凝剂名称	特点和使用要求
聚丙烯酰胺 PAM $(-\text{CH}_2-\underset{\text{CONH}_2}{\text{CH}_2}-)_n$	①由丙烯酰胺聚合而成,无色、无味、无腐蚀性,相对分子质量 $(1.5\sim 6)\times 10^6$,溶于水后成线形结构,分子链长 10000nm 左右,借助氢键作用和长链的吸附表面积发挥吸附架桥作用 ②主要用于悬浮物多、浊度高或含藻难絮凝的原水混凝以及水厂排泥水处理 ③使用时可先用 NaOH 将其水解为阴离子混凝剂。水解时常产生氨气,用以判断是否水解,水解度取 30%
聚合氯化铝 $[\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}]_m$	①属于无机高分子混凝剂 ②以含铝矿物(铝土矿、煤矸石)或废铝灰为原料,加入碱液或盐酸熟化而生成,这实际上是氯化铝(AlCl_3)经水解逐渐形成氢氧化铝过程的中间产物聚合成的无机高分子化合物,化学表达式通常写作 $[\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}]_m$,或称为碱式氯化铝,可看作以铝离子为核的多核羟基络合物 $[\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}]$ 的聚合物,或表示为 $\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{3n-m}$ 。属较复杂的多核多羟基络合物 ③聚合氯化物在生产过程中尽量避免了低效能聚合物出现,所以比硫酸铝水解聚合生成的无机高分子有更好的絮凝效果
聚合硫酸铁 PFS $[\text{Fe}_2(\text{OH})_n(\text{SO}_4)_{3-n/2}]_m$	①属于无机高分子混凝剂 ②利用钢铁工业、机械制造业生产过程中排出的大量含铁废液提取硫酸亚铁,经加碱中和、水解,制取硫酸亚铁,其表达式为 $[\text{Fe}_2(\text{OH})_n(\text{SO}_4)_{3-n/2}]_m$,式中 $m=f(n), n=2$ 。目前的制品呈褐色黏稠液体状态,容重 $1.45\text{g}/\text{cm}^3$, Fe^{3+} 浓度 $160\text{mg}/\text{L}$ 。因已成为双核多羟基的长链节聚合物,混凝效果优于硫酸亚铁,且能适应水质变化较大的原水
聚合氯化铁 PFC $[\text{Fe}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}]_m$	由三氯化铁制备,具有单体铁离子,低、中、高分子量聚合体共同组成的聚合氯化铁,可同时发挥电中和、吸附架桥作用,具有比三氯化铁更好的絮凝作用

在选用投加硫酸亚铁($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)时,同时投加氯气,其用量按照 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投加量计算。

【例题 2-1】 使用硫酸亚铁作为混凝剂时常同时投加氯气进行亚铁氧化,如果硫酸亚铁混凝剂($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)投加量为 $21\text{mg}/\text{L}$,则应同时投加多少氯气(计入氯气余量 $1.5\text{mg}/\text{L}$)?

【解】 根据硫酸亚铁混凝剂氯气氧化反应式,每氧化 $1\text{mg}/\text{L}$ 硫酸亚铁($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)需要氯气 $7.83\text{mg}/\text{L}$ 。一般取理论投氯量等于硫酸亚铁($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)投加量的 $1/8$,并增加适当余量,则应同时投加的氯气量是:

$$\text{氯气量} = \frac{1}{8} \times \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O 投量} + \text{余量} = \frac{1}{8} \times 21 + 1.5 = 4.125\text{mg}/\text{L}$$

聚合氯化铝 $[\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}]_m$ 中的 m 为聚合度,单体 $\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}$ 是羟基配合物。该高分子混凝剂在投入水中之前的制备阶段已发生水解聚合,投入水中有可能发生一些变化,但聚合物成分基本稳定。聚合物成分和效果主要取决于碱化度(羟基和铝物质的量之比)。

【例题 2-2】 聚合氯化铝混凝剂化学表达式为 $[\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}]_m$,其中, $n=4, m=8$,该聚合氯化铝碱化度为多少?

$$\text{【解】 聚合氯化铝碱化度 } B = \frac{\text{羟基物质的量}}{\text{铝物质的量}} = \frac{nm}{3 \times 2 \times m} = \frac{4}{6} = 66.6\%$$

聚合铁包括聚合硫酸铁(PFS)和聚合氯化铁(PFC)。聚合氯化铁目前尚在研究之中。聚合硫酸铁已投入生产使用。

聚合硫酸铁是碱式硫酸铁的聚合物,其化学式(表 2-1)中的 $n \leq 2, m \geq 10$ 。它是一种红褐色的黏性液体。制备聚合硫酸铁有好几种方法,但目前基本上都是以硫酸亚铁 FeSO_4 为原料,采用不同氧化方法将硫酸亚铁氧化成硫酸铁,同时控制总硫酸根和总铁的摩尔数之比,使氧化过程中部分羟基取代部分硫酸根而形成碱式硫酸铁 $\text{Fe}_2(\text{OH})_n(\text{SO}_4)_{3-n/2}$ 。碱式硫酸铁易于聚合而产生聚合硫酸铁 $[\text{Fe}_2(\text{OH})_n(\text{SO}_4)_{3-n/2}]_m$ 。

聚合铝和聚合铁虽属于高分子混凝剂,但聚合度不大,远小于有机高分子混凝剂,且在使用过程中仍存在一定程度水解反应的不稳定性。为了提高无机高分子混凝剂的聚合度,近年来国内

外专家研究开发了多种新型无机高分子混凝剂——复合型无机高分子混凝剂。目前，这类混凝剂主要是含有铝、铁、硅成分的聚合物，也就是聚硅酸金属盐。所谓“复合”，即指两种以上具有混凝作用、特性互补的成分集中于一种混凝剂中。例如，用聚硅酸与硫酸铝复合反应，可制成聚硅硫酸铝 (PSiAS)。用聚硅酸与氯化铝或聚合氯化铝进行复合或共聚反应，可制成聚硅氯化铝 (PASiC)，其余类似。这类混凝剂的分子量较聚合铝或聚合铁大 (可达 10 万以上)，且当各组分配合适当时，不同成分具有优势互补作用。如活化硅酸 (聚硅酸的一种形态) 是聚合度较大的阴离子型聚合物，对水中负电性胶体仅起架桥作用，常作为铝盐或铁盐混凝剂的助凝剂。当聚硅酸中引入铝离子或铁离子后，就变成带有一定正电荷的阳离子型聚合物，可以发挥电中和及吸附架桥的综合作用。而且当铁、铝与聚硅酸复合后，还提高了聚硅酸的稳定性，即形成冻胶前的稳定期得到延长，不必像活化硅酸那样需要现场配制，即日使用，从而可成独立商品。

有的复合型无机高分子混凝剂的化学式和结构形态已经得出。如聚硅硫酸铝 (PSiAS)，分子式基本形式为： $Al_m(OH)_n(SO_4)_p(SiO_x)_q(H_2O)_y$ ，其中， $m=1.0$ ， $n=0.75\sim 2.0$ ， $p=0.3\sim 1.12$ ， $q=0.05\sim 0.1$ ， $2<x<4$ 。当配位水分子个数 $y>8$ 时，该混凝剂呈现液体状态，当配位水分子个数 $y<8$ 时，该混凝剂呈现固体状态。其他复合型高分子混凝剂化学式和结构形态尚不十分清楚，有待研究。目前已经知道这类混凝剂的制备工艺和不同成分的配比直接影响混凝效果。例如，在聚硅氯化铝 (PASiC) 中，若 Al/Si (物质的量比，下同) 较小，即硅酸多，虽然分子量大，但正电荷弱，甚至仍为阴离子型聚合物；反之，若 Al/Si 比较大，虽然正电荷强，但分子量小。汤鸿霄等研究认为，聚硅氯化铝 (PASiC) 中的 Al/Si=5，聚硅氯化铁 (PFSiC) 中的 Fe/Si=1.0 较为合适。此外，在相同的铝、铁、硅摩尔比之下，共聚法所制备的聚硅氯化铝 (PASiC) 混凝效果优于复合法。在聚合氯化铝铁 (PAFC) 中，有的研究认为 Al/Fe 在 1.0~0.5 范围效果较好。因此，应根据原水水质和处理要求选择复合混凝剂的最佳配比和制备工艺。

由于复合型无机高分子混凝剂混凝效果优于无机盐和聚合铁 (铝)，其价格较有机高分子低，故有广阔的开发应用前景。实际上，目前已有部分产品投入生产应用。

上述几种混凝剂的混凝效果并非都能适合任何一种水质，因此选用混凝剂时应针对不同季节的水质变化有所不同。一般说来，以降低浊度为主的水质，选用无机盐混凝剂，并注意适当调整水的 pH 值，即有较好的混凝效果。如能在投加无机盐混凝剂后，再投加无机高分子混凝剂效果更佳。对于经过预沉后的河水，浊度已明显降低，投加无机高分子混凝剂具有良好效果。当水的浊度较高 (浊度在 500NTU 以上)，单纯使用无机高分子混凝剂效果不佳时，可考虑使用有机高分子混凝剂。

2.1.1.2 助凝剂

由于水源水质多变，除含有不同浓度的胶体颗粒之外，还含有大量其他有机污染物。这时，需要投加两种以上的混凝剂，发挥加成作用，或者投加一些辅助药剂如助凝剂，用以提高混凝效果。

助凝剂的主要作用是改善混凝剂水解条件，消除影响絮凝体聚结的水化膜，或者改善絮凝体结构，促使聚结成粗大、密实的颗粒。常用助凝剂基本特性和适用条件见表 2-2。

表 2-2 常用助凝剂基本特性及适用条件

名称	分子式	基本特性和作用	适用条件
活化硅酸	$Na_2O \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$	<p>① 含 20%~30% SiO₂ 的水玻璃稀释为 1%~2% SiO₂ 含量后，加入硝酸、盐酸、硫酸等活化剂，活化 (即缩聚) 1~1.5h，控制剩余碱度 (CaCO₃ 计) 1000~2100mg/L，可制成活化硅酸</p> <p>② 加酸活化后游离出来的 SiO₂ 发生聚合反应，生成的聚合硅酸是发挥助凝的主要成分，当聚合硅酸相对分子质量在 10⁴~10⁷ 时，助凝效果最好</p> <p>③ 制备好的聚合硅酸助凝剂，加入 3~5 倍体积水稀释后可减缓活化作用，在 12h 之内用完，不会影响助凝效果</p>	<p>① 低温低浊度水处理时，可使絮凝体聚结密实，沉降性能提高</p> <p>② 与 FeSO₄ 和 Al₂(SO₄)₃ 一起使用，能发挥吸附架桥、相辅相成作用</p> <p>③ 在与 FeSO₄、Al₂(SO₄)₃ 混合使用时，其投加量约为 FeSO₄ 投加量的一半，Al₂(SO₄)₃ 的 5%~10%。作为助滤剂使用时，可投加 2~4mg/L</p> <p>④ 根据水质及使用其他助凝剂状况，活化硅酸可投加在其他混凝剂之前</p>

续表

名称	分子式	基本特性和作用	适用条件
骨胶		①由动物骨骼加工而成,呈片状或粒状,无毒无腐蚀性,易溶于水 ②调配成0.5%~1.0%的骨胶溶液投加在水中,主要配合其他混凝剂发挥吸附架桥作用,减少混凝剂投量	①多与 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 配合使用,投加量是 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的10%~20% ②夏天水温较高时,用量较大
石灰	CaO 或 Ca(OH)_2	①调配好的 Ca(OH)_2 上清液,不易堵塞加药管道,具有一定腐蚀性 ②货源充沛,价格便宜	主要用于原水碱度不足时,中和混凝剂水解过程中产生的 H^+ ,每投加 1mg/L $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 需投加 0.25mg/L CaO
氢氧化钠	NaOH	具有较强的腐蚀性	采用浓度小于30%的液体商品,中和混凝剂水解过程中产生的 H^+
氯	Cl_2	强氧化剂	①用以氧化水中有机物,减弱胶体颗粒表面水化膜作用,一般投加量 $2\sim 4\text{mg/L}$ ②原水中含有少量 NH_4^+-N 时,可被氧化脱氨
臭氧	O_3	强氧化剂	①可代替氯作为预氧化剂,提高混凝效果 ②投加量 $1.0\sim 1.5\text{mg/L}$,生成的絮凝体预氯化助凝时密实

2.1.1.3 混凝剂和助凝剂的选择

选用什么样的混凝剂、助凝剂,要充分考虑水源水质状况。如果原水色度较高,说明水中含有大分子有机物及藻类。此类杂质一般带有羟基(—OH)、氨基(—NH₂)基团,且带有负电荷。这时适当调整使 $\text{pH}<6$,投加无机盐混凝剂时可不生成高聚合度的络合物,达到降低电荷促进凝聚的作用,同时投加无机高分子混凝剂会有明显絮凝效果。当以上方法均不能有效去除色度、低含量藻类,需要加入氧化剂氧化有机物时,可选用高锰酸钾(KMnO_4)或氯(Cl_2)氧化水中有机物,再行投加无机盐、无机高分子混凝剂。当预投加氯生成的卤代化合物增多时,应控制氯的投加量。

一般湖泊、水库水源水碱度偏低,在使用硫酸铝混凝剂时,常常引起水的 pH 值下降以至影响混凝剂继续水解。为此,应投加碱剂(如石灰、氢氧化钠)以中和混凝剂水解过程中所产生的 H^+ ,反应如下:



应当注意,投加的碱性物质不可过量,否则形成的 Al(OH)_3 会溶解为负离子 Al(OH)_4^- 而恶化混凝效果。由式(2-1)可知,每投加 1mmol/L 的 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$,需投加 3mmol/L 的 CaO ,将水中原有碱度考虑在内,石灰投量按下式估算:

$$[\text{CaO}] = 3a - x + [\delta] \quad (2-3)$$

式中, $[\text{CaO}]$ 为纯石灰 CaO 投加量, mmol/L ; a 为混凝剂投加量, mmol/L ; x 为原水碱度,按 CaO 计, mmol/L ; d 为保证反应顺利进行的剩余碱度,一般取 $0.25\sim 0.5\text{mmol/L}$ (CaO)。

一般情况下,石灰投量最好通过试验决定。

【例题 2-3】 某地表水源水的总碱度以 CaO 计,为 0.2mmol/L 。市售精制硫酸铝(含 Al_2O_3 约16%)投量 28mg/L ,试估算石灰(市售品纯度为50%)投量。

【解】 投药量折合 Al_2O_3 为 $28 \times 16\% = 4.48\text{mg/L}$, Al_2O_3 相对分子质量为102,故投药量相当

于 $\frac{4.48}{102} = 0.044 \text{mmol/L}$ 。

剩余碱度取 0.37mmol/L ，则得：

$$[\text{CaO}] = 3 \times 0.044 - 0.2 + 0.37 = 0.3 \text{mmol/L}$$

CaO 相对分子质量为 56，则市售石灰投量为： $0.3 \times \frac{56}{0.5} = 33.6 \text{mg/L}$

投加氢氧化钠 (NaOH) 调节水的 pH 值和投加石灰 (CaO) 调节水的 pH 值计算原理相同。

【例题 2-4】 有一座小型自来水厂水源水碱度为 0.2mmol/L ，投加精制硫酸铝 $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$ 28mg/L 后并投加少量氢氧化钠 (NaOH) 调节水的 pH 值，取剩余碱度 $\delta = 0.1 \text{mmol/L}$ ，则至少投加多少 30% 的 NaOH [NaOH 相对分子质量为 40， $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 相对分子质量为 342]？

【解】 根据反应式 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{NaOH} = 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{Na}_2\text{SO}_4$ 可知，每投加 1mmol/L 的 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 需要投加 6mmol/L 的 NaOH，计入水源水中的碱度 0.2mmol/L ，则氢氧化钠投加量计算为：

$$[\text{NaOH}] = \left(6 \times \frac{28}{342} - 0.2 + 0.1 \right) \times \frac{40}{30\%} = 52.16 \text{mg/L}$$

2.1.2 混凝剂投加

混凝剂生产厂家在生产过程中，大多由液态加工成固体，以便于运输储存。为了计量准确，自来水厂通常把固体再经溶解，调配成一定浓度的溶液投加在水中。于是，便涉及混凝剂的溶解、溶液调配和投加系统。

2.1.2.1 混凝剂溶解调配

混凝剂溶解多在混凝土溶解池中进行，小型水厂也有采用玻璃钢、钢板焊接的溶解池，为了加速溶解，配有搅拌设备。

对于容易溶解的混凝剂（如 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ），用水力搅拌或高压水冲溶即可达到要求。溶解设备的选择往往取决于水厂规模和混凝剂品种。大、中型水厂通常建造混凝土溶解池并配以搅拌装置。搅拌是为了加速药剂溶解。搅拌装置有机械搅拌、压缩空气搅拌及水力搅拌等。其中机械搅拌用得较多，它是以电动机驱动涡轮或桨板搅动溶液。压缩空气搅拌常用于大型水厂，它是通过穿孔布气管向溶解池内通入压缩空气进行搅拌，优点是没有与溶液直接接触的机械设备，使用维修方便，但与机械搅拌相比，动力消耗大，溶解速度稍慢，并需专设一套压缩空气系统。用水泵自溶解池抽水再送回溶解池，是一种水力搅拌，水力搅拌也可用水厂二级泵站高压水冲动药剂，此方式一般仅用于中、小型水厂和易溶混凝剂。

溶解池、搅拌设备及管配件等，均应有防腐设施或采用防腐材料，使用 FeCl_3 时尤需注意。而且 FeCl_3 溶解时放出热量，当溶液浓度为 20% 时，溶液温度可达 50°C 左右，这一点也应引起重视。当直接使用液态混凝剂时，溶解池不必要。

(1) 机械搅拌 目前混凝剂溶解较多采用机械搅拌，以电动机驱动桨板或涡轮变速带动搅拌桨搅拌。当溶解池容积大于 1m^3 以上时，为防止搅拌力矩过大，可采用电动机驱动涡轮变速搅拌，搅拌机转速 $100 \sim 200 \text{r/min}$ 。较小的溶解池，可采用全速搅拌，搅拌机转速 $970 \sim 1450 \text{r/min}$ 。搅拌轴可采用不锈钢，桨板用不锈钢或木板叶片。叶片面积为溶解池竖向断面积的 15% ~ 20%，见图 2-1。

(2) 空气搅拌 为减少机械维修，防止腐蚀搅拌机叶片，也可以采用空气搅拌，搅拌池底部安装不锈钢或 ABS 耐腐蚀穿孔管，基本设计数据如下：空气供给强度 $8 \sim 10 \text{L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ；布气管间距 $400 \sim 500 \text{mm}$ ；布气支管空气流速 $8 \sim 10 \text{m/s}$ ；供气干管空气流速 $10 \sim 15 \text{m/s}$ ；布气支管孔眼流速 $15 \sim 20 \text{m/s}$ ；布气支管孔眼直径 $3 \sim 4 \text{mm}$ 。

压缩空气由空气压缩机或鼓风机供给。为防止溶解池水倒流进入空气压缩供给设备或水流在存水弯中增加空气输送压力，供气干管应不低于布气支管，并有一段高出溶解池最高水位 0.30m

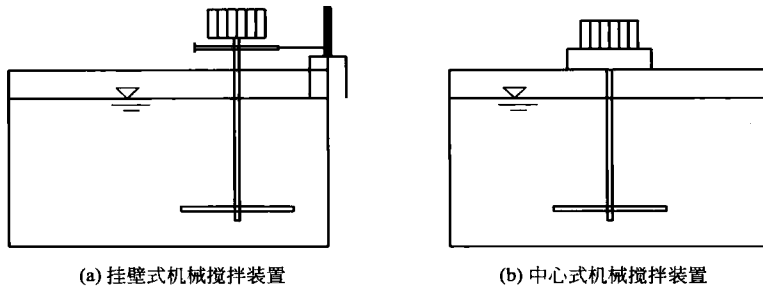


图 2-1 机械搅拌溶解池

以上。

混凝剂溶解池一般建于地下或建成半地下式，为了不使溶液调配池埋地过深，也有的建于地面以上，但需综合考虑设置操作平台、搬运设施，以利于混凝剂方便地投入溶解池中。

溶解池容积 W_1 按下式计算：

$$W_1 = (0.2 \sim 0.3)W_2 \quad (2-4)$$

式中， W_1 为溶解池容积， m^3 ； W_2 为溶液调配池容积， m^3 。

按式(2-4) 计算出的溶解池容积一般很小，如果不足 $1m^3$ ，采用机械搅拌时，可设计成 $1m^3$ 左右。

采用混凝土建造的溶解池应控制溶液浓度，防止混凝剂溶解放热引起池壁开裂。三氯化铁 ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) 混凝剂浓度以 $10\% \sim 15\%$ 为宜，硫酸铝 [$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$] 混凝剂浓度以 $10\% \sim 20\%$ 为宜。

溶解后的混凝剂溶液经重力流或用耐腐蚀泵提升到溶液调配池中，再稀释调配到一定浓度，以备投加。溶液调配容积按下式计算：

$$W_2 = \frac{24 \times 100aQ}{1000 \times 1000cn} = \frac{aQ}{417cn} \quad (2-5)$$

式中， W_2 为溶液调配池容积， m^3 ； Q 为处理水量， m^3/h ； a 为混凝剂最大投加量， mg/L ； c 为溶液调配浓度，可采用 $5\% \sim 20\%$ ， $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 采用 $5\% \sim 10\%$ ，计算时 c 值直接取 % 前的数值代入； n 为每日调配次数， $n \leq 3$ 。

分母中 1000×1000 代表 $1000g/kg$ 、溶液容重为 $1000kg/m^3$ 的换算关系。

溶液池调配浓度不宜过低，防止发生水解堵塞管道。相反，调配浓度大于 20% 以上，常常计量不易准确。用计量泵投加时，溶液浓度可适当增大到 $20\% \sim 25\%$ 。

溶液池大多设置在地面以上，安装水位显示装置和稀释搅拌混合装置，有的水厂根据混凝剂溶解量、调配浓度，计算出稀释水量后，冲水到对应水位。

2.1.2.2 混凝剂投加

混凝剂投加到絮凝池前的方法有三种。

(1) 泵前投加 药液投加在水泵吸水管或吸水喇叭口处，见图 2-2。这种投加方式安全可靠，操作简单，一般适用于取水泵房距水厂较近的小型水厂。图中水封箱是为防止空气进入而设置的。药液注入管道方式见图 2-3。

(2) 高位溶液池重力投加 当取水泵房距水厂较远者，应建造高架溶液池利用重力将药液投入水泵压水管上，见图 2-4。或者投加在混合池入口处。这种投加方式安全可靠，但溶液池位置较高，多适用于小型水厂。

(3) 水射器投加 利用高压水通过水射器喷嘴和喉管之间的真空抽吸作用将药液吸入，同时随水的余压注入原水管中，见图 2-5。这种投加方式设备简单、使用方便，溶液池高度不受太大限制，但水射器效率较低，且易磨损。该方式适用于自动化程度不高的小型水厂。