



工业废水处理与 资源化技术原理及应用

杨敏 张昱 高迎新 等编著

GONGYE FEISHUI CHULI YU
ZIYUANHUA JISHU YUANLI JI YINGYONG



化学工业出版社



工业废水处理与 资源化技术原理及应用

杨敏 张昱 高迎新 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍了废水处理与资源化的基本单元、石油化工废水处理工艺及工程应用、精细化工废水处理工艺及工程应用、煤化工废水处理工艺及工程应用、发酵类制药废水处理工艺及工程应用、工业园区废水处理工艺及工程应用，以及其他典型行业废水处理工艺与工程案例等内容。

本书理论与实际紧密结合，为读者展示了工业废水处理与资源化技术研发与应用的技术进展，帮助读者提升解决工业废水处理实际问题的能力，不仅适合从事工业废水处理领域的科研人员、技术人员和管理人员阅读，也适合高等学校环境科学与工程及相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业废水处理与资源化技术原理及应用/杨敏等编著.

北京: 化学工业出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-122-33204-2

I. ①工… II. ①杨… III. ①工业废水处理-研究
IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 242294 号

责任编辑: 刘兴春 卢萌萌

责任校对: 王素芹

装帧设计: 王晓宇

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: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 422 千字 2019 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888

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: 86.00 元

版权所有 违者必究

一、把握废水水质特征是解决工业废水处理问题的关键

我从广岛大学博士毕业后，进入奥加诺株式会社综合研究所从事废水处理技术研究，这使我有机会系统地接触实际的工业废水处理。在进入该公司不久的一次废水研究组组会上，一位同事报告了某新建废水处理工程除氟系统不达标的问题。当时我承担的是废水膜处理系统的研发，但出于好奇，我就问了一句：“除氟使用的是什么技术？”同事回答说，就是加消石灰形成氟化钙沉淀。我感到很奇怪，氟化钙沉淀除氟不是一个非常简单的化学过程吗？这么简单的反应怎么还会出现问题呢？当时的组长（现在已经是研究所所长）明贺春树博士接着说，除氟工程确实经常出现问题，你有兴趣就做做试试？这一句话就使我在公司的研究重点转移到除氟技术上了。

首先，我想看看氟离子和钙离子的沉淀反应本身有什么特点，就用氟化钠配制不同浓度的模拟废水，以氯化钙溶液作为钙源进行了几组氟化钙沉淀的烧杯实验。当氟离子浓度达到 100mg/L 以上时，氟化钙沉淀很容易形成，氟离子的去除效果也非常稳定。但是，当氟离子浓度降低至 50mg/L 时，氟离子去除效果就不太稳定，而当氟离子浓度进一步降低到 20mg/L 时，即使钙离子投加量高达 1000mg/L，也观察不到氟化钙的沉淀。这个现象说明，氟化钙沉淀的形成与废水中氟离子的含量有关。氟化钙的沉淀需要两个氟离子与一个钙离子结合，当氟离子浓度较低时，氟离子与钙离子的碰撞概率大幅下降，晶种形成的可能性就很小。只有极大地提高水中钙离子含量才有可能形成有效的晶种。因此，我提出了把所有的钙源投加到一部分（10% ~ 20%）废水中，形成晶种后再与剩余废水混合的含氟废水处理方法，并把这种方法命名为分注法除氟。实验结果表明，这种分注法确实可以显著提高低浓度含氟废水处理的效果和稳定性。

但是，当我们用不同来源的实际含氟废水进行实验时，发现不同的废水有时处理效果会相差很大，这说明除了初始氟离子浓度效应，废水中还存在其他的干扰氟化钙沉淀形成的物质。其实，电子行业的含氟废水主要来自晶片的加工，一般使用氟酸或氟酸-氟化铵混合溶液对晶片进行刻蚀，因此，由此产生的废水组成也应该比较简单。最有可能成为干扰氟化钙沉淀形成的共存物质应该是氟硅酸根离子，这是氟酸与硅酸盐反应的产物。为了验证这一推测，我用氟硅酸钠配置了含氟溶液，同样利用氯化钙作为钙源进行氟化钙沉淀反应。结果发现，氟硅酸钠溶液也可以形成氟化钙沉淀，但与氟化钠溶液相比，氟的残留浓度高出

不少，这证实了含氟废水中氟硅酸根离子的存在会影响除氟效果的假设。

那么，如何消除氟硅酸根离子的这种干扰呢？氟硅酸钙不能沉淀，因此，必须使氟硅酸根离子解离为氟离子，然后通过形成氟化钙沉淀来去除水中的氟元素。考虑到 pH 值是影响离子解离的一个关键因素，我评价了 pH 值对氟硅酸钠溶液除氟效果的影响，发现碱性条件不利于氟元素的去除，该结果也就揭示了实际废水处理工程效果不佳的另外一个原因：一般除氟工程均使用消石灰作为钙源，利用 pH 值进行消石灰投加量的控制——把 pH 值控制终点设置在 11 以上，确保废水中有足够的 Ca^{2+} 。但恰恰是这样一个消石灰投加量控制策略导致了很多工程的失败。

我在奥加诺公司工作了 6 年半的时间，其中，针对组成极其简单的含氟废水的技术研发耗费了 25% ~ 30% 的时间，申请了 15 项专利。而在此之前，日本各公司已经在除氟技术方面申请了 200 项以上的专利。这个例子可能比较特殊，但也充分说明了认识废水水质特征的重要性。基于这样一个深刻的体会，回国后，我一直把认识废水水质特征作为解决工业废水处理问题的核心。在这方面，最典型的例子是针对抗生素废水的研究。

1998 年回国后，有幸认识了华北制药集团环保所原副所长任立人先生，他是我们开展制药行业废水处理技术研究的引路人。起初是从生物脱氮技术研究入手的。当时国家对总氮排放还没有要求，但任先生认为，抗生素行业废水中氨氮含量很高（例如土霉素废母液中氨氮含量高达 1000mg/L 以上），今后必须解决脱氮问题。但土霉素发酵废母液中主要有有机物是草酸，不能作为反硝化的碳源。汤鸿霄先生转给我的博士生马文林承担了这个研究任务，她设计了碳氮同时去除的生物处理工艺，其中一个关键措施是设置了一个水解酸化单元，使用的是颗粒污泥床反应器。在水解酸化过程中，草酸把 SO_4^{2-} 还原为硫化物，而硫化物可以作为电子供体用于反硝化，这就解决了反硝化电子供体不足的问题。然而，在研究中发现，一旦降低废母液的稀释比，生物污泥床中的颗粒污泥就会出现上浮甚至解体的现象，由此想到土霉素废母液中应该残留有不少土霉素。抗生素是抑制细菌生长的物质，利用以细菌为核心的污泥来处理高抗生素含量的废水是一种合理的选择吗？更重要的是，在高浓度抗生素存在下，污泥中的细菌会不会携带抗性基因，从而引起环境和健康风险？

2004 年，我们申请了一个针对制药废水中抗生素和抗性基因研究的基金项目，从北京大学生命学院到我课题组做硕博连读的李栋着手进行这个基金项目的研究，他很快就建立了抗生素和抗药基因的检测方法，并以土霉素和青霉素两种生产废水为对象开展了系统的研究。结果发现，每千克土霉素废母液中土霉素含量达几百到上千毫克，每千克菌渣中其含量更是高达上万毫克；废水处理污泥中相关抗性基因的丰度非常高，筛选出的细菌大多具有多重耐药性，而且针对目标抗生素的耐药性极强。显然，高浓度抗生素的存在不仅会抑制废水处理微生物的活性，而且还会导致大量多重耐药菌的产生和排放。那么，什么水平的抗生素浓度会导致抗性的发展，什么水平又会导致废水处理系统的崩溃？

来自山东大学的硕博连读生张红承担了这个研究任务。她利用 5 个生物膜反应器研究了 4 种抗生素的效应。这是一个周期非常长的研究，反应器连续运行了 600 多天。结果发现，不同的抗生素影响不一样，链霉素、土霉素导致抗性发展的浓度基本上都在 mg/L 水平以下，而导致生物处理效果恶化的浓度水平要高很多。但无论是从抗性发展控制的角度还是废水处理系统稳定的角度，必须在废水进入生化处理系统之前除掉其中的抗生素。博士生李魁晓和其他多位研究者的工作表明，抗生素可以通过各种氧化技术进行去除。但问题是，在大量其他的有机污染物共存的条件下，通过化学氧化方法把抗生素含量降低到 mg/L 水平以下的成本高得企业无法承受。因此，必须建立一种选择性去除抗生素的废水预处理技术。

这项任务落在博士生易其臻的肩上。我们知道很多抗生素都有易水解的特性，当然，这种水解的过程通常很长，最短的半衰期也在数天甚至几十、上百天以上。那么，能不能采取一些措施促进这种水解过程，使得抗生素能在极短的时间内完全水解呢？我们发现，通过加热等方式可以显著加速某些类型抗生素的水解，同时，均相或非均相催化剂会催化这一水解过程。而且，水解后的抗生素几乎都丧失了抑菌效价。为了验证强化水解作为废水预处理技术的有效性，我们在河北省一家生产土霉素的企业进行了为期 3 个月的现场中试。实验非常辛苦，但效果很好。预处理后的废母液可以直接进入 UASB 反应器进行厌氧生物处理，在容积负荷为 $5\sim 6\text{kg}/\text{m}^3$ 的条件下 COD 去除率可达 70%。而同时运行的实际厌氧处理系统，在负荷为 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 的条件下处理 3~4 倍稀释后的废母液，其 COD 去除率不到 50%。更为重要的是，经过预处理后生物处理系统中的抗性发展得到有效控制。厂家也高度认可该技术，采用该技术对现有水处理系统进行了改造，取得了良好的效果。

这是证明深入认识废水水质特征重要性的又一个例证。我国是世界上抗生素原料药的主要生产国，解决抗生素生产过程中的废水处理难题，特别是实现常规污染物和抗性基因的同时控制对于我国抗生素产业的可持续发展具有重要意义。我们发明的这种废母液强化预处理技术是我们对全球环境抗性发展控制的一种重要贡献，我们正在与有关部门和企业合作，努力在全行业推广该技术。同时，我们的研究成果也得到国际同行的高度认可，2017 年 7 月在荷兰召开的世界卫生组织抗性与环境专家研讨会上，张昱研究员作为中方唯一代表参加了会议，介绍了我们在环境抗性控制方面的最新进展和成果。

二、本书的编著目的和意义

中国被称为世界工厂，承担了大量的工业生产任务，高强度的工业生产带来了大量的工业废水排放。近年来，我们在废水治理方面已经取得了很大的进步，但是，精细化工、石油化工、煤化工、制药等高浓度难降解典型工业废水在实现强化提效、降耗及安全处理的目标方面仍然面临诸多挑战。在这样的条件下，如何保障我们的水环境及饮用水安全，是环境工作者必须认真思考的一个重要问题。

本书针对目前我国污染严重、难治理的典型工业废水的突出问题及特点，指出把握废水水质特征在解决工业废水处理问题上的关键作用，聚焦工业废水处理与资源化技术原理及应用中的关键环节，同时结合典型案例分析了编著者在石油化工、精细化工、制药、工业园区等工业废水处理与资源化技术研究及应用方面的思考和进展。本书选用的案例均来自编著者的研究进展、科研项目成果和工程实践，反映了近年来编著者团队及其合作者的研究和实践成果。

近年来我国整体科研实力得到了前所未有的提升，研究条件也得到了显著改善。因此，只要我们采取科学务实的态度来潜心研究，相信这种挑战也将是历史给予我们的一个重大机遇，我们将会在不远的将来成为世界上引领工业废水处理技术发展的一只关键力量。

杨 敏

2018年12月

中国被称为世界工厂，已经成为全球各种大宗化学品的主要生产基地，导致污染物呈现高强度、集中排放的特征。国务院正式发布的“水污染防治行动计划”（即“水十条”）中将“狠抓工业污染防治”列为首条，将专项整治的焦化、原料药制造、制革等十大重点行业废水的达标改造技术、深度处理技术等列为重点工作内容，强调严格环境风险控制，防范环境风险。在这种形势下，确保废水处理实现达标排放已经成为影响企业可持续发展甚至存亡的关键条件。但上述典型工业废水危害大、污染重、治理难，实现强化提效、降耗及安全处理的目标仍然面临诸多挑战，还需要不断探索。

《工业废水处理与资源化技术原理及应用》针对典型工业废水的突出问题及特点，提出把握废水水质特征是解决工业废水处理问题关键的观点，结合典型案例分析介绍了编著者在石油化工、精细化工、制药、工业园区等工业废水处理与资源化技术研究及应用方面的思考和进展。图书内容包括：工业废水相关的废水处理与资源化的基本单元；以苯酚、丙酮和橡胶交联剂生产废水为例的石油化工废水处理工艺及工程应用；以高含硫制药中间体生产废水和磺胺类药物等生产废水为例的精细化工废水处理工艺及工程应用；煤化工焦化废水和煤制气废水处理工艺及工程应用；抗生素生产废水处理中的残留效价及评价，螺旋霉素、6-氨基青霉素烷酸和土霉素等典型发酵类制药废水处理工艺及工程应用；化学制药工业园区和制药综合园区废水的处理工艺及工程应用；其他典型行业包括光伏线切废水处理与资源化、电子工业含氟废水处理与资源化和合成氨冷凝液资源化处理工程等。本书内容具有较强的技术性和可操作性，可供工业废水处理领域的科研人员、技术人员和管理人员阅读，也可供高等学校环境科学与工程及相关专业师生参考。

本书由杨敏、张昱、高迎新等编著，具体编著分工如下：第一章由杨敏、刘媛编著；第二章由丁一泓、丁伟编著；第三章、第四章、第六章第一节，第七章第一节、第三节由高迎新、丁然编著；第五章第一节、第二节、第四节，第六章第二节由张昱编著；第五章第三节、第六章第二节由任立人编著；第七章第二节由杨敏编著。全书最后由张昱统稿、定稿。

本书是笔者及其团队与丁伟博士、任立人先生等的合作结晶，选用的案例均来自编著者的科研项目成果和工程实践；同时，日本奥加诺公司（ORGANO Co. Ltd）也为我们的除氟技术案例慷慨地提供了资料。此外，参与本书校正工作的还有刘媛、唐妹、孙光溪、栾晓

等同志。本书材料在张昱研究员于中国科学院大学资源环境学院开设的《工业废水处理与资源化》专业普及课的授课过程中已经进行了试用，课程学习过程中田野、胡雨晴等对第一章进行了校正，在此一并表示感谢！

限于编著者编著水平和时间，书中不足和疏漏之处在所难免，诚请读者及同行提出修改建议。

编著者

2018年10月

第一章 废水处理与资源化的基本单元

第一节 预处理单元	1
第二节 常规分离单元	2
一、介质过滤	2
二、化学沉淀法	4
三、吸附和离子交换	5
第三节 化工分离技术单元	7
一、结晶法除磷、氟	7
二、吹脱(除氨,氨回收)	10
三、萃取	11
四、蒸发(浓缩、MVR)	13
五、蒸馏	15
第四节 膜分离技术单元	16
一、微滤与超滤膜分离	17
二、反渗透与纳滤膜分离	18
三、特种膜分离技术	19
第五节 生物处理	24
一、厌氧生物处理	24
二、好氧生物处理	29
三、基于厌氧氨氧化的新型脱氮技术	41
四、其他技术	43
第六节 高级氧化技术	46
一、臭氧类氧化法	47
二、Fenton氧化法与类Fenton氧化法	47
三、湿式氧化和湿式催化氧化法	51
四、光催化氧化法	53
五、电化学氧化法	54
六、超临界水氧化法	54
七、等离子体氧化法	56
第七节 其他处理技术	60
一、磁分离技术	60
二、焚烧	61
三、电絮凝与电还原	62
第八节 污泥处理	64
一、污泥浓缩技术	65

二、厌氧污泥消化技术	65
三、污泥脱水技术	66
参考文献	67



第二章 石油化工废水处理工艺及工程应用

第一节 苯酚、丙酮等生产废水	76
一、问题的提出	76
二、工艺流程和技术说明	76
三、实施效果和推广应用	99
四、总结	100
第二节 橡胶交联剂生产废水	101
一、问题的提出	101
二、工艺流程和技术说明	101
三、实施效果和推广应用	110
四、总结	112
参考文献	112



第三章 精细化工废水处理工艺及工程应用

第一节 高含硫制药中间体生产废水	115
一、问题的提出	115
二、工艺流程和技术说明	115
三、实施效果和推广应用	129
四、总结	130
第二节 磺胺类药物等生产废水	130
一、问题的提出	130
二、工艺流程和技术说明	131
三、实施效果和推广应用	137
四、总结	138
参考文献	138



第四章 煤化工废水处理工艺及工程应用

第一节 焦化废水	139
一、问题的提出	139
二、工艺流程和技术说明	140
三、实施效果和推广应用	143
四、总结	149
第二节 煤制气废水	150
一、问题的提出	150
二、工艺流程和技术说明	150
三、实施效果	155

四、总结	156
参考文献	156



第五章 发酵类制药废水处理工艺及工程应用

第一节 抗生素生产废水处理中的残留效价及评价	160
一、问题的提出	160
二、仪器与试剂	161
三、效价测定方法的建立	161
四、抗生素废水中残留效价的评价	164
五、标准参照抗生素的选择与不同抗生素废水效价的比较研究	168
六、总结	173
第二节 螺旋霉素等抗生素生产废水	173
一、问题的提出	173
二、工艺流程和技术说明	174
三、实施效果	183
四、结论	187
第三节 6-氨基青霉素烷酸(6-APA)生产废水	187
一、问题的提出	187
二、工艺流程和技术说明	188
三、实施效果和推广应用	198
四、总结	203
第四节 土霉素生产废水	203
一、问题的提出	203
二、工艺流程和技术说明	204
三、实施效果和推广应用	216
四、总结	218
参考文献	218



第六章 工业园区废水处理工艺及工程应用

第一节 化学制药工业园区废水处理与资源化	220
一、问题的提出	220
二、工艺流程和技术说明	221
三、实施效果	225
四、总结	226
第二节 制药综合园区废水深度处理与资源化	226
一、问题的提出	226
二、工艺流程和技术说明	226
三、实施效果和推广应用	236
四、总结	236
参考文献	236



第七章 其他典型行业废水处理工艺与工程案例

第一节 光伏线切废水处理与资源化	238
一、问题的提出	238
二、工艺流程和技术说明	238
三、实施效果和推广应用	242
四、总结	244
第二节 电子工业含氟废水处理与资源化	244
一、废水来源与组成	244
二、传统处理技术与挑战	244
三、新技术的发展及应用	247
四、总结	250
第三节 合成氨冷凝液资源化处理工程	251
一、问题的提出	251
二、工艺流程和技术说明	251
三、实施效果和推广应用	260
四、总结	263
参考文献	263

第一节 预处理单元

预处理单元主要包括格栅、调节池、混凝沉淀池、气浮池/罐等(图 1-1)^[1]。格栅主要是利用机械筛分的原理来阻拦水中较大的悬浮物或漂浮物,以保障后续处理系统的安全稳定运行。调节池对来水的水质、水量进行调节,削峰填谷,确保后续处理系统能够在合理的负荷条件下进行处理,防止负荷的冲击。混凝沉淀池主要是利用铝系或铁系混凝剂在水中形成絮体,通过吸附、络合、裹带等方式对水中悬浮颗粒物、胶体物质、高分子以及部分阴离子等进行去除,从而实现废水的初步净化,满足后续生物处理、过滤等处理单元的水质要求。气浮处理是通过高度分散的微米级气泡将悬浮颗粒或油滴包裹后浮到水面,从而实现固液或油水分离。与混凝沉淀相比,气浮处理的对象通常是相对密度较小的悬浮颗粒、胶体物质或油脂类,在食品加工、石油化工等行业应用较为广泛。气浮一般对设备要求较高,为保证处理效果,近年来越来越多的工程中采用定型设备。

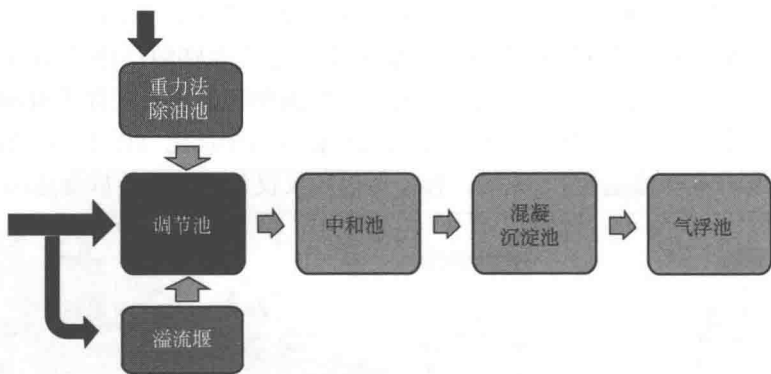


图 1-1 典型预处理工艺流程

此外,当废水 pH 偏酸或偏碱性时,需要对废水的 pH 值进行中和后再进入下一步的处理。为节约成本,优先使用废酸或废碱进行中和。使用药剂进行中和时,一般酸用硫酸或盐酸,碱多用熟石灰。但熟石灰为固体,而且在现场使用时也是泥浆状态,所以在工程中需要考虑泵等设备的选型,否则容易出现故障。

当废水中含有一定的油脂类物质时,通常需要增设一个隔油池对废油进行回收,防止油脂对后续处理工艺的影响。

第二节 常规分离单元

一、介质过滤

介质过滤是利用介质材料拦截水中颗粒物，是一种常用的水处理方法，一般用于去除废水中少量的颗粒物。普通过滤采用粒状滤料，常用的滤料为石英砂、无烟煤和核桃壳，普通过滤出水悬浮物浓度一般可达到 5mg/L ，滤速为 $6\sim 10\text{m/h}$ ^[2]。有时为了提高周期制水量和滤速，也有采用双层滤料的，双层滤料通常由无烟煤和石英砂构成。通常介质过滤采用重力流方式，但为了保证系统密封性或提高滤速，也有采用加压过滤方式的。目前，除了传统的现场浇灌过滤池（V形滤池、D形滤池）外，各种成型的标准化过滤罐的使用也越来越普遍。

近年来，为了提高过滤效率，国内外开发出了各种各样的滤料。纤维束滤池是一种结构先进、性能优良的重力式过滤系统，采用一种新型的纤维束软填料取代传统石英砂作为滤料，替代石英砂发挥过滤作用。纤维滤料的直径可达几十微米甚至几微米，具有比表面积和表面自由能大（纤维束 $d50\mu\text{m}$ ， $80000\text{m}^2/\text{m}^3$ ；石英砂 $d1000\mu\text{m}$ ， $6000\text{m}^2/\text{m}^3$ ）、过滤阻力小、滤速高、截污容量高等优点^[3]。

纤维束滤池由池底、滤料、滤板、布水系统、布气系统、纤维密度调节装置、反冲洗泵等组成^[4]。纤维的一端固定在滤床的底部，废水从上部进入滤床，反冲洗的气和水从底部进入，由于纤维被固定在滤床上，所以反冲洗强度可以很大。在滤池内设有纤维密度调节装置，目的是针对实际运行的水质和过滤要求对纤维束滤料的密度进行调节，以充分发挥纤维滤料的特点。高效纤维滤池运行时，纤维密度调节装置控制一定的滤层压缩量，使滤层孔隙度沿水流方向逐渐缩小，密度逐渐增大，相应滤层孔隙直径逐渐减小，实现了理想的深层过滤。当滤层达到截污容量需清洗再生时，纤维束滤料在气水脉动作用下即可方便地进行清洗，达到有效恢复纤维束滤料过滤性能的目的。滤层的加压及放松过程无需额外动力，均可通过水力自动实现^[4]。日本奥加诺公司研发的长纤维滤料型滤池（图1-2）的滤速可达 $20\sim 100\text{m/h}$ ，是传统石英砂滤池的 $3\sim 8$ 倍，且占地面积仅仅是传统石英砂滤池的 $1/3\sim 1/2$ 。

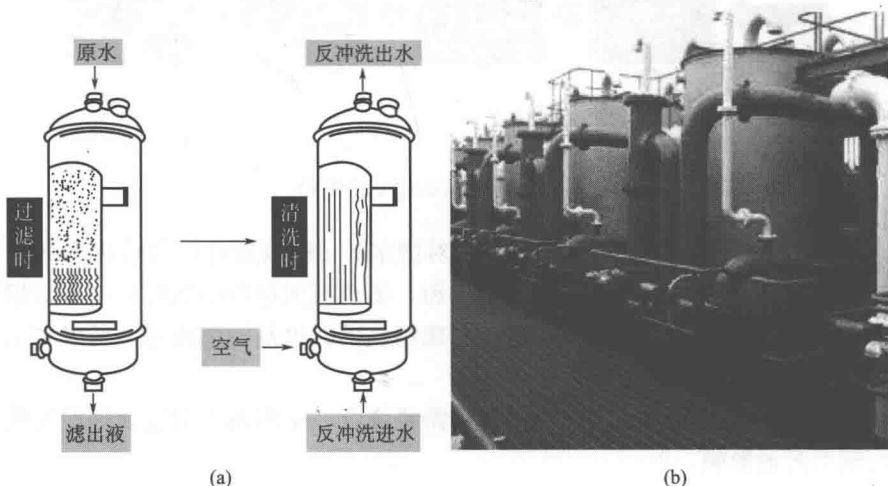


图 1-2 日本奥加诺公司研发的长纤维滤料型滤池

此外,国内近年来采用滤布滤池的情况也越来越多。滤布滤池技术是一种新型表面过滤技术,它使液体通过一层隔膜(滤料)的机械筛滤,去除悬浮于液体中的颗粒物质^[5]。在技术上可以替代传统的深床过滤设备。与传统过滤技术相比,滤布型滤池具有以下特点:结构紧凑、水头损失小(一般水损 $\leq 0.2\text{m}$)、占地面积少(高程上无需前端设置二次提升泵池)、处理费用低、滤布表面清洗效率高、耗水少等^[6]。

滤布滤池的过滤器隔膜材料有金属织物、以不同方式编织的滤布和多种合成材料,也称为滤布转盘过滤器(见图 1-3^[7])。滤盘设在中空管上,通过中空管收集滤后水;反冲洗装置由反冲洗水泵、管配件及控制装置组成;排泥装置由集泥井、排泥管、排泥泵及控制装置组成。其工作原理如下^[5]:待处理水自外而内以重力流进入滤池,通过滤布过滤,过滤液通过中空管收集。过滤中部分污泥吸附于滤布外侧,逐渐形成污泥层。随着滤布上污泥的积聚,滤布过滤阻力增加,滤池水位上升,当达到预设的清洗水位时,滤盘驱动电机启动,转动滤盘,抽吸水泵通过负压抽吸,将滤布外层附着的污物排走,即使在清洗时仍能实现过滤。过滤期间,滤盘处于静态,有利于污泥的池底沉积。

滤布滤池滤盘数量根据滤池设计流量而定,一般为 1~15 片,每片滤盘分成 6 小块,滤布表面清洗效率高,耗水少^[5]。滤布一般采用纤维滤布,平均孔径 $\leq 10\mu\text{m}$ 。其过滤效果与砂滤相当,SS 的一般设计进水浓度为 30mg/L 以下,出水浓度 $\leq 10\text{mg/L}$ ^[6]。一般清洗间隔时间为 1~2h,清洗历时 1min 左右,清洗水量仅为处理水量的 1%~3%。

水处理领域应用较多的滤池有 V 形滤池、D 形滤池、活性砂滤池及转盘滤池等。各种滤池各有优缺点,对各种滤池进行技术经济综合比较,结果见表 1-1^[7]。表 1-1 表明,滤布转盘滤池一次性工程投资较高,但运行费用最低,占地面积小,运行维护管理方便。

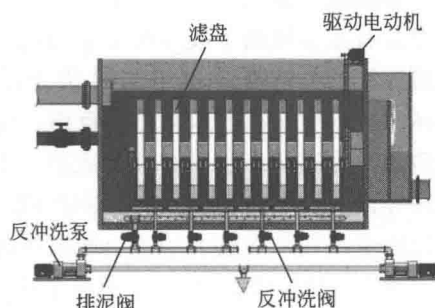


图 1-3 滤布转盘过滤器示意

表 1-1 多种滤池对比

考察项目	V 形滤池	D 形滤池	活性砂滤池	滤布转盘滤池
过滤介质	颗粒滤料	纤维滤料	活性砂滤料	纤维滤布
过滤类型	深床过滤	深床过滤	深床过滤	表面过滤
运行形式	间歇	间歇	连续	连续
反冲洗方式	气水联合反冲洗	气水联合反冲洗	在线洗砂	水反冲洗
自用水量/%	10	5	3	1~3
滤层水头损失/m	1.5~2.5	1~2	0.8~1	约 0.3
占地面积	较大	较大	小	较小
设备运行维护	组件多,集成度低,部分位于池底,维护较复杂	组件多,集成度低,部分位于池底,维护较复杂	组件少,集成度高,维护较简单	组件少,集成度高,维护较简单
工程投资/万元	1376	1570	1505	1852
运行成本	高	较高	较低	最低

二、化学沉淀法

化学沉淀法作为传统的废水处理方法得到了较多的应用,尤其是针对含重金属废水(机械加工业、矿山冶炼和部分化工企业等废水)的处理。除重金属废水的处理以外,化学沉淀法亦被广泛应用在各种工业废水中氮的去除和回收,如:通过将镁盐和磷酸盐加入焦化蒸氨废水中回收氨氮,生成的白色晶体粉末状磷酸铵镁($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)沉淀(又称鸟粪石, MAP)作为高效的缓释肥为植物生长过程提供必需的 N、Mg、P 元素。

根据沉淀类型的不同,针对重金属去除和回收的化学沉淀法可分为中和沉淀法、絮凝沉淀法、硫化物沉淀法和铁氧化体法^[8,9]。

1. 中和沉淀法

中和沉淀法又称氢氧化物沉淀法,是一种应用较广的方法。其原理是:当重金属废水中加入碱后,其中的金属阳离子以氢氧化物或盐(亚磷酸钙、磷酸钙等)的形式沉淀析出。但如果废水中的重金属离子以络合物形式存在,中和沉淀后水中重金属离子含量仍有可能超标。常用的沉淀剂有 NaOH、 CaCO_3 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、CaO 等。从成本角度考虑,一般工业上处理含有重金属离子废水时多采用的沉淀剂为 CaCO_3 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 或 CaO。pH 值是影响重金属沉淀的关键因素之一。pH 值控制过低时,重金属离子不能完全沉淀析出;pH 值控制过高时会出现金属氢氧化物的反溶,使水溶液中的重金属离子含量增高。虽然中和沉淀方法处理含重金属的废水具有技术成熟、投资少、处理成本低、适应性强、管理方便、自动化程度高等诸多优点,但是该方法存在的不足是产生重金属污泥,并可能产生二次污染。沉淀氢氧化物溶度积常数较大的重金属离子时需要将 pH 值调整到 10~11,而处理后排放时又需外加酸将 pH 值调回 6~9,增加了处理成本。

氢氧化物处理废水后的固液分离,完全依赖于沉淀的重力作用,其最终沉降速度取决于沉淀的形状、粒径、密度以及废水的浓度和黏度。如何改善絮凝、混凝沉降效果成为氢氧化物沉淀法的一个研究方向。另外,石灰以石灰粉形式或是分段加入,可改进固液分离效果^[10]。改平流池、浓缩池为斜管、斜板澄清池、加速澄清池等可以提高固液分离效率。为进一步去除上述设备处理后的溢流液中的悬浮物可再加砂滤池等。

目前,处置沉淀渣的方法主要有:送尾矿库与尾矿混堆,送往废石堆堆存,单独建库堆存及综合利用等。综合利用沉淀渣常见的工艺有:①部分沉淀渣泥返回处理流程,如北京矿冶研究总院已完成了多项 HDS(高浓度泥浆)工艺工业实验、工程设计及项目实施,江西铜业集团公司德兴铜矿废水处理站采用 HDS 工艺改造、铜化集团新桥铁矿废水处理站改造、韶关冶炼厂废水处理工业实验、新建葫芦岛锌厂污酸废水处理工程等;②固化沉淀渣,如制砖、水泥等,不仅解决了沉渣的出路,还节省制砖、水泥用土;③充填,如遂昌金矿采用以干尾砂为充填物料,完全用沉淀渣浆作为造浆水的方案,可处理全部沉淀渣浆;④湿法处理沉淀渣以回收有用金属。

2. 絮凝沉淀法

絮凝沉淀法借助加入或利用废水中原有的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 和 Mg^{2+} 等离子,并加入碱且调节 pH 值至适当水平生成氢氧化物胶体,并与水中的重金属离子进一步反应生成难溶盐化合物的方式去除或回收金属。具体的方法有石灰-铝盐法、石灰-高铁法、石灰-亚铁法^[11]。

刘小澜等^[12]采用化学沉淀剂 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (或 $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)与焦化废水中的 NH_4^+ 反应,生成磷酸铵镁沉淀,探讨了不同操作条件对氨氮去除率的影响。在