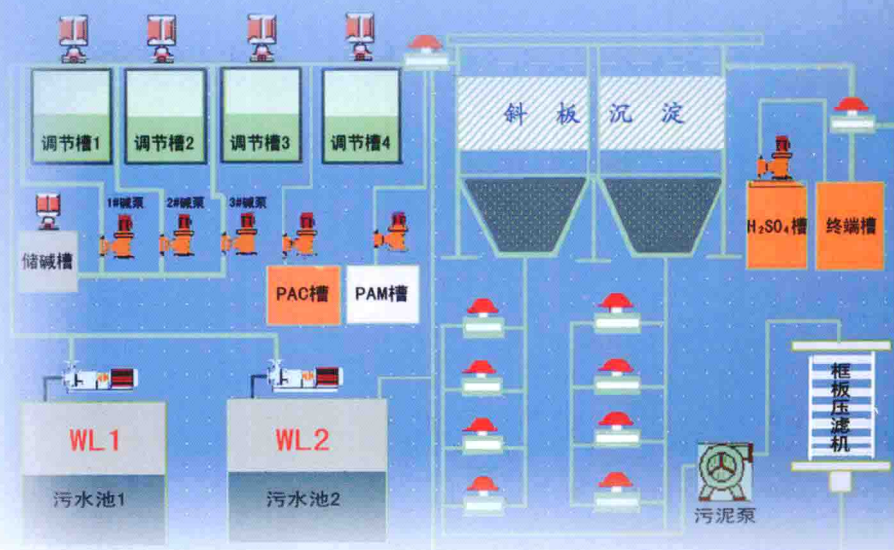


高等学校教材

Principle of Water Treatment

给水处理原理

◎ 主编 李孟 张倩



武汉理工大学出版社

高等学校教材

给水处理原理

Principle of Water Treatment

主编 李孟 张倩

武汉理工大学出版社

【内容简介】

本书是一部高等学校给水处理原理课程教材。对于给水处理方法和理论基础作了较全面的阐述;注重原理和概念表达的严谨性,重视微观分析和数学表达的水平;所用资料新颖。

全书包括绪论,给水处理工艺概述,颗粒分析与混凝,固液分离,气浮,过滤,消毒,吸附,膜分离,离子交换,地下水除铁锰氟砷等十一章内容。

本书可作为市政工程、环境工程等专业的教材,也可供从事以上两学科科研与工程技术的专业人士阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

给水处理原理/李孟,张倩主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2013. 12
ISBN 978-7-5629-4219-1

I. ① 给… II. ① 李… ② 张… III. ① 给水处理 IV. ① TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 266218 号

项目负责人:	田道全	责任编辑:	田道全 万三宝
责任校对:	余士龙	装帧设计:	翰之林
出版发行:	武汉理工大学出版社		
地 址:	武汉市洪山区珞狮路 122 号		
邮 编:	430070		
网 址:	http://www.techbook.com.cn		
经 销 者:	各地新华书店		
印 刷 者:	安陆市鼎鑫印务有限责任公司		
开 本:	787×1092 1/16		
印 张:	13.25		
字 数:	361 千字		
版 次:	2013 年 12 月第 1 版		
印 次:	2013 年 12 月第 1 次印刷		
印 数:	1~1500 册		
定 价:	25.00 元		

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

前 言

随着社会经济的不断发展、科学技术的日新月异以及水源水质的不断恶化,尤其是有机污染物的增加,人们对给水水质的要求也在不断提高。传统的给水处理原理与方法已不能适应当前给水水质的要求。同时,水环境问题对水质标准也造成了根本性的冲击。因此,应从新的角度来完善和深化给水处理原理、工艺和技术。

本教材是在吸收和借鉴美国水行业协会(AWWA)所编写的有关给水处理部分的最新版本标准的基础上,针对目前我国水质复杂的实际情况,对传统的给水处理原理和工艺进行了深入的探讨。同时,大胆地借鉴并融合了适合当前给水处理应用的排水工艺和原理。在教材的编写上力图体现一个“新”字,使教材内容能跟上目前国际最新的发展趋势,尽量让读者接触到目前最先进的工艺和最新的研究思想,培养和激发读者对本专业的学习兴趣。同时,针对一些较经典的给水处理原理和内容作了较深入的理论阐述,尽量做到重点突出、主题明确。注重教材的针对性和综合性,以期适用于当前市政工程和环境工程专业及相关技术人员知识更新。

本教材由李孟、张倩担任主编。具体编写分工如下:第1~6章由李孟、张珍、章蕾、刘晓光编写,第7~11章由张倩、王志强、张彦卿、钱虹、王敏编写。张倩负责全书的统稿工作。周琪、刘晓宇、库辉等人参与了本教材的插图绘制及书稿校对等工作。在本书的编写过程中,编者参考了众多文献,谨向这些文献的作者致以谢意。同时,武汉理工大学出版社对本教材的编写给予了极大的关心和支持,在此也表示衷心的感谢。

鉴于编者水平所限,书中难免有疏漏、不当甚至是错误之处,敬请广大师生和读者提出宝贵意见,以便订正。

编 者

2013年4月于武汉理工大学

目 录

1 绪论	(1)
1.1 水资源的保护	(1)
1.2 饮用水水质标准的完善	(2)
1.2.1 各国水质标准现状	(2)
1.2.2 我国水质标准	(3)
1.3 给水处理的发展趋势	(3)
2 给水处理工艺概述	(5)
2.1 给水处理工艺的发展过程	(5)
2.2 给水处理工艺的类型	(5)
2.3 净水工艺的比较及发展趋势	(6)
3 颗粒分析与混凝	(10)
3.1 颗粒分析方法与絮凝过程的自控技术	(10)
3.1.1 颗粒分析的基本内容	(10)
3.1.2 絮凝过程的光电检测技术	(11)
3.2 双电层模型和絮凝动力学	(12)
3.2.1 胶体表面电荷的来源和 Gouy-Chapman 扩散双电层模型	(12)
3.2.2 胶体间的相互作用位能和 DLVO 理论	(15)
3.2.3 混凝剂的水解反应与混凝机理	(17)
3.2.4 絮凝动力学理论	(20)
3.3 絮凝剂和助凝剂	(25)
3.3.1 无机盐类絮凝剂	(25)
3.3.2 无机高分子絮凝剂	(25)
3.3.3 有机高分子絮凝剂	(27)
3.3.4 新型无机-有机高分子复合絮凝剂的研究进展	(28)
3.3.5 助凝剂	(29)
3.3.6 絮凝剂的卫生安全性	(29)

4 固液分离	(31)
4.1 颗粒沉降基本理论.....	(31)
4.1.1 沉淀工艺的发展史.....	(31)
4.1.2 颗粒的自由沉降速度.....	(31)
4.1.3 自由沉降试验.....	(33)
4.1.4 分层沉淀.....	(35)
4.1.5 沉淀效率.....	(37)
4.2 平流沉淀池简介.....	(41)
4.2.1 平流沉淀池的进出水布置.....	(41)
4.2.2 平流沉淀池的排泥设施.....	(42)
4.3 现行沉淀池的应用.....	(43)
4.3.1 斜板(管)沉淀池.....	(43)
4.3.2 辐流式沉淀池的工作原理.....	(45)
4.3.3 其他新型沉淀池.....	(46)
4.4 澄清池的原理.....	(48)
4.4.1 澄清池的工作原理.....	(48)
4.4.2 机械搅拌澄清池.....	(51)
4.4.3 水力循环澄清池.....	(52)
4.4.4 脉冲澄清池.....	(53)
4.4.5 悬浮澄清池.....	(54)
5 气浮	(56)
5.1 气浮概述.....	(56)
5.1.1 水中杂质颗粒与微气泡相黏附的机理.....	(56)
5.1.2 气浮分离的原理、适用条件及特点.....	(58)
5.2 溶气气浮理论.....	(60)
5.2.1 溶气气浮机理.....	(60)
5.2.2 气浮模型.....	(60)
5.2.3 关于白水收集模型的讨论.....	(63)
5.3 气浮工艺的影响因素.....	(63)
5.3.1 药剂.....	(63)
5.3.2 溶液 pH 值.....	(64)
5.3.3 气泡尺寸.....	(64)
5.3.4 气体流速.....	(64)
5.3.5 气浮工艺的气固比.....	(65)
5.3.6 温度.....	(65)
5.3.7 混凝剂种类.....	(65)
5.3.8 接触反应时间.....	(65)

5.3.9 水流速度	(65)
5.4 气浮法的类型与装置	(66)
5.4.1 电解气浮法	(66)
5.4.2 散气气浮法	(67)
5.4.3 溶气气浮法	(69)
5.5 气浮池	(71)
5.5.1 平流式气浮池	(72)
5.5.2 竖流式气浮池	(72)
6 过滤	(73)
6.1 过滤综述	(73)
6.1.1 过滤概述	(73)
6.1.2 过滤理论	(74)
6.1.3 过滤模型	(77)
6.1.4 快滤池的水力控制系统	(79)
6.2 滤层和承托层	(84)
6.2.1 滤层	(84)
6.2.2 承托层	(89)
6.3 配水系统	(89)
6.3.1 大阻力配水系统	(91)
6.3.2 小阻力配水系统	(93)
6.4 快滤池的冲洗	(96)
6.4.1 冲洗方法	(96)
6.4.2 反冲洗作用机理	(98)
6.4.3 反冲洗构筑物	(100)
6.5 其他形式的滤池	(101)
6.5.1 V型滤池	(101)
6.5.2 虹吸滤池	(101)
6.5.3 移动冲洗罩滤池	(101)
6.5.4 压力滤池	(102)
6.5.5 多级精细过滤装置	(102)
7 消毒	(103)
7.1 消毒工艺的卫生学指标	(104)
7.1.1 指示微生物必须具备的特点	(104)
7.1.2 常用的指示微生物	(104)
7.2 消毒方法的种类	(106)
7.2.1 化学消毒法	(106)
7.2.2 物理消毒法	(107)

7.2.3 机械方法——滤池的筛滤作用	(107)
7.2.4 照射——电磁波或伽马射线	(107)
7.3 消毒方法的选择	(108)
7.4 消毒效率及其影响因素	(108)
7.5 消毒动力学	(110)
7.6 液氯消毒	(112)
7.6.1 氯的性质	(112)
7.6.2 氯消毒的作用机理	(113)
7.6.3 折点加氯法	(113)
7.6.4 加氯点的确定	(114)
7.6.5 折点加氯的意义	(115)
7.6.6 加氯的自动化控制	(115)
7.7 消毒副产物	(115)
7.7.1 各种消毒剂的消毒副产物的特点	(116)
7.7.2 氯消毒副产物控制技术	(117)
7.8 其他消毒方法	(118)
7.8.1 化学消毒法	(118)
7.8.2 物理消毒法	(121)
8 吸附	(123)
8.1 吸附的基本理论	(123)
8.1.1 吸附类型	(123)
8.1.2 吸附平衡	(126)
8.1.3 静态吸附	(127)
8.1.4 动态吸附	(128)
8.1.5 吸附速率	(130)
8.1.6 影响吸附的因素	(131)
8.2 吸附材料	(133)
8.2.1 活性炭	(133)
8.2.2 多孔硅酸盐	(134)
8.2.3 纳米碳材料	(136)
8.2.4 炭气凝胶	(138)
8.2.5 吸附树脂	(139)
9 膜分离	(140)
9.1 膜分离技术概述	(140)
9.1.1 膜分离技术的发展	(140)
9.1.2 膜分离技术的分类	(140)
9.1.3 膜分离技术的优点	(141)

9.1.4 膜分离技术的应用及发展前景	(141)
9.2 微滤和超滤	(142)
9.2.1 过滤模式	(142)
9.2.2 过滤通量的表达式	(142)
9.3 纳滤	(143)
9.3.1 纳滤膜的特点	(143)
9.3.2 纳滤膜的分离机理	(144)
9.4 反渗透	(148)
9.4.1 渗透现象与渗透压	(148)
9.4.2 反渗透	(149)
9.4.3 反渗透膜的分离原理	(149)
9.5 电渗析技术	(150)
9.5.1 电渗析原理及过程	(150)
9.5.2 电渗析过程的基本传质方程	(151)
9.6 其他新型膜分离技术	(153)
9.6.1 电驱动膜分离	(153)
9.6.2 渗透汽化	(154)
9.6.3 膜生物反应器(MBR)	(155)
9.7 膜污染机理和膜污染防治	(158)
9.7.1 浓差极化和膜污染	(158)
9.7.2 膜污染的机理	(159)
9.7.3 膜污染的防治	(159)
9.8 膜分离技术在水处理中的应用	(162)
9.8.1 印染废水处理	(162)
9.8.2 饮用水处理	(163)
9.8.3 废水中重金属离子的去除	(163)
9.8.4 含油废水处理	(163)
9.8.5 城市污水处理	(164)
10 离子交换	(165)
10.1 离子交换剂的种类	(165)
10.1.1 概述	(165)
10.1.2 分类	(165)
10.2 离子交换树脂的结构与选择性	(166)
10.2.1 化学结构	(166)
10.2.2 物理结构	(167)
10.2.3 离子交换树脂的选择性	(168)
10.3 离子交换平衡	(168)
10.3.1 基本概念	(169)

10.3.2	平衡关系表达式	(172)
10.4	离子交换动力学	(175)
10.4.1	离子交换过程的动力学特点	(175)
10.4.2	离子交换动力学模型表达式	(178)
10.5	新型离子交换树脂	(183)
10.5.1	反常规均粒混床树脂	(183)
10.5.2	两性功能基团离子交换树脂	(183)
10.5.3	核级离子交换树脂	(184)
10.5.4	凝胶型碳黑阳离子交换树脂	(184)
10.5.5	变色树脂	(185)
10.6	离子交换法在水处理中的应用	(185)
10.6.1	离子交换软化系统	(185)
10.6.2	离子交换除盐系统	(186)
11	地下水除铁锰氟砷	(189)
11.1	地下水除铁和除锰	(189)
11.1.1	地下水除铁方法	(189)
11.1.2	地下水除锰方法	(191)
11.1.3	生物法除铁除锰	(191)
11.2	地下水除氟和除砷	(195)
11.2.1	水的除氟	(195)
11.2.2	水的除砷	(199)
	参考文献	(202)

1 绪 论

随着人类科学技术的飞跃发展,给水科学与工程的发展必然与社会发展相一致。一些已经出现和正在探索的适应给水处理特点的理论和技术,如纳米技术等,将会在水源防护、给水处理、水厂运行管理中逐步实现广泛应用。

1.1 水资源的保护

我国是一个缺水严重的国家,虽然淡水资源总量为 28000 亿 m^3 ,占全球水资源的 6%,仅次于巴西、俄罗斯和加拿大,居世界第四位,但人均水资源量只有 2300 m^3 ,仅为世界平均水平的 1/4、美国的 1/5,在世界上名列第 121 位,是全球 13 个人均水资源最贫乏的国家之一。扣除难以利用的洪水径流和散布在偏远地区的地下水资源后,我国实际可利用的淡水资源更少,仅为 11000 亿 m^3 左右,人均可利用水资源量约为 900 m^3 ,并且分布极不均匀。20 世纪末,全国 600 多个城市中,已有 400 多个城市存在供水不足问题,其中缺水比较严重的城市达 110 个,全国城市缺水总量为 60 亿 m^3 。

目前,全国多数城市地下水受到一定程度的点状和面状污染,且有逐年加重的趋势。日趋严重的水污染降低了水体的使用功能,进一步加剧了水资源短缺的矛盾,严重威胁到城市居民的饮水安全和人民群众的健康。

迄今为止,已查出的水中污染物超过 2100 种。水污染日趋严重,人类的健康受到了严重威胁。据中国预防医学科学院统计,目前我国全年排污量超过 435 亿 t,其中 80% 以上未经任何处理就直接排入天然水体,全国城市 90% 的水域受到污染。有 7 亿人饮用水的大肠杆菌严重超标,3 亿人饮用水含铁量超标,1.1 亿人饮用高硬度水,0.5 亿人饮用高硝酸盐水,全国 35 个重点城市只有 23% 的居民饮用水基本符合卫生标准。而据水利部预测,2030 年中国人口将达到 16 亿,届时人均水资源量仅有 1750 m^3 。在充分考虑节水的情况下,预计用水总量为 7000 亿 m^3 至 8000 亿 m^3 ,要求供水能力比现在增长 1300 亿 m^3 至 2300 亿 m^3 ,全国实际可利用水资源量接近合理利用水量的上限,水资源开发难度极大。

由于人口增长,对水的需求越来越高,而可供使用的水资源却日趋贫乏,工业化进程造成的水污染问题日益严重,更加剧了水资源的需求矛盾,这一切已越来越为人们所重视。因此,对水资源的保护和再生利用会提出更高的要求。人类只有自身保护水资源,才能获得一个良好的生存环境。

各类污水的再生利用技术的发展,将实现污水处理达到排放标准后的合理分类利用,或进行深度再处理,实现污水资源化。同时经过净化处理的再生水应有相当一部分让其回归自然,继续参与大自然的生态循环,恢复更多的“天然水”,保持良好的生态平衡。

1.2 饮用水水质标准的完善

目前,全世界具有国际权威性、代表性的饮用水水质标准有三部:世界卫生组织(WHO)的《饮用水水质准则》、欧盟(EC)的《饮用水水质指令》以及美国环保局(USEPA)的《国家饮用水水质标准》,其他国家或地区的饮用水标准大多以这三种标准为基础或重要参考,来制订本国国家标准。如东南亚的越南、泰国、马来西亚、印度尼西亚、菲律宾,中国香港,南美的巴西、阿根廷,还有南非、匈牙利和捷克等国家或地区都是采用 WHO 的饮用水标准;欧洲的法国、德国、英国(英格兰、威尔士和苏格兰)等欧盟成员国和中国澳门则均以 EC 指令为指导;其他一些国家如澳大利亚、加拿大、俄罗斯、日本同时参考 WHO、EC、USEPA 标准;我国和我国台湾则有自行的饮用水标准。

1.2.1 各国水质标准现状

英国是第一个对饮用水中的隐孢子虫提出量化标准的国家。法国现行饮用水水质标准,主要参照欧共体 80/778/EC 指令而制定,它是在《法国生活饮用水水质标准》(89—6)的基础上经过几番修订而成,大部分指标值采用的是 EC 标准的最大允许浓度值,有的指标要求高于 EC 的标准(如色度、浊度等),并增加了农药和氧化副产物等指标项目。标准中微生物学指标较全面,还增加了多环芳烃,细化了氯化物的规定,分温度段来定其标准值。德国现行饮用水水质标准包含在饮用水及食品企业用水条例中。该条例对饮用水处理中可以使用的药剂作了明确的规定,包括允许投加浓度、处理后的极限值等,还对各种指标的检验范围与频率作了明确的规定。加拿大现行饮用水水质标准中包括微生物学指标、理化指标和放射性指标等共 139 项,其中最有点的是该标准中规定的放射性指标有 29 项之多。

日本水质标准中规定了 13 项快适性指标,主要是作为水质管理的目标,以求饮用水舒适爽口,其中的要求比下水道法规定的水质标准高得多。澳大利亚现行饮用水水质标准综合了 WHO、EC 和 USEPA 三大标准,包括微生物指标、不规则检测微生物项目指标、物理学指标、无机化学物质指标、有机消毒副产物指标、其他有机化合物指标、农药、饮用水中的放射性指标等总共 248 项,其中有些项目未列出指标值。东南亚国家和南美一些国家的饮用水标准是以 WHO 的《饮用水水质准则》为基础制订的,代表一般发展中国家的水平。巴西和阿根廷基本上是以 WHO 的《饮用水水质准则》为参考,根据本国的国情,考虑气候、用水总量和水源等条件,作了一些调整。

匈牙利、捷克等东欧国家,虽已加入欧盟,但它们的水质标准相当一部分是在在此之前制定的,因此它们并没有以 EC 指令为标准框架,从项目和指标值来看,很大程度是以 WHO 的《饮用水水质准则》为参考制定的,但有些指标比 WHO 要求的更加严格,对嗅和味都做了稀释倍数上的量化规定。俄罗斯的水质标准独具特色,其指标值比 WHO 要求的更高,而且在感官性参数中列出了 47 项,其中的砷、钡、镉、铊、过氧化氢、剩余臭氧等指标项目在其他国家的水质标准中未曾出现。

美国在制订水质标准时十分注重调查分析,内容丰富、翔实。其水质标准各项指标均有最大浓度值(MCLs)及最大浓度目标值(MCLGs),MCLGs 为非强制性目标值,侧重于对人体健康的影响,并不涉及污染物的检出限和水处理技术;对微生物造成的人体健康风险给予高度重

视,微生物学标准共有 7 项之多,其中隐孢子虫、贾第虫、军团菌、病毒等指标在其他国家水质标准中并不常见,体现出美国对致病微生物研究的深入、细致;对消毒副产物十分重视;美国《安全饮用水法》及其修正案奠定了饮用水安全的法律框架,国家一级和二级规则确定了需要控制的水中污染物的详细项目和指标。

1.2.2 我国水质标准

1976 年卫生部(现为:国家卫生和计划生育委员会)制定了我国第一个国家饮用水标准《生活饮用水卫生标准》(TJ 20—76),共有 23 项指标;1985 年修订为《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—1985),共有 35 项指标。此外,2001 年 6 月,原卫生部颁布了《生活饮用水水质卫生规范》(2001)。原建设部(现为:住房和城乡建设部)也于 2005 年 6 月颁布实施了《城市供水水质标准》(CJ/T 206—2005)。2007 年 7 月 1 日,由国家标准化管理委员会和原卫生部联合发布了《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)强制性国家标准。

新《标准》具有以下三个特点:

- (1) 加强了对水质有机物、微生物和水质消毒等方面的要求;
- (2) 统一了城镇和农村饮用水卫生标准;
- (3) 实现饮用水标准与国际接轨。

新《标准》水质项目和指标值的选择,充分考虑了我国实际情况,并参考了 WHO、EC、USEPA、俄罗斯和日本等国的饮用水标准。

相对于原卫生部 2001 年发布的《生活饮用水卫生规范》和原建设部 2005 年实施的《城市供水水质标准》,原卫生部 2007 年发布的《生活饮用水卫生标准》指标更完备,限值上也作了适当调整。这与供水水质的动态变化特别是我国水质有机污染较为突出这一现状相适应。近年来,越来越多的污染物质被检测出来,污染物控制的风险投资分析也提上日程,原标准显然不能满足实际需要;另一方面,国际上饮用水水质标准有了新的发展,确定限量的化学物质数量迅速增加,指标的限值更加严格。

新的《生活饮用水卫生标准》使得水质标准更完善化和严格化,这就必然会采用活性炭吸附、臭氧—活性炭联用、生物预处理、离子交换等新技术,甚至采用膜技术,也必将对我国的给水净化事业提出新的挑战。

1.3 给水处理的发展趋势

给水处理技术的发展宜采用大自然水体自净的模式,引导水处理技术的研究。所做的工作应该是将自然的水体净化过程加速和给予浓缩,以提高净化效率,尽可能避免利用现代工业技术(如超净化处理等)在水处理过程中带来的破坏“天然水”的“生态平衡”问题。纳米技术的深入开发利用,将给给水净化处理技术带来重要的影响,给低温低浊水、高浊度水及其他特种水的处理,去除有选择物质的过滤技术都将会带来突破性进展。给水处理工作者将日益重视对水中有机污染物处理的研究,相应的处理技术将会应运而生。

沉淀(precipitation):由于大多数城市过去的城市基础设施欠账太多,现在才基本满足城市和人民生活需要。因而,无需追求沉淀效率的高指标,而应适当延长沉淀、澄清时间。亦可以考虑原来曾经使用过的“高效率”沉淀、澄清技术(如斜管、斜板),降低其“效率”(负荷率),以

确保处理构筑物出水口浊度降低到一个新水平(与目前又流行起来的平流沉淀技术相比)。为防止化学物质对净化过程的“污染”,应继续加强絮凝、沉淀、澄清技术的研究和天然高分子混凝剂、助凝剂的研究与应用,以减少化学混凝剂的用量。生物技术的应用也可能得到一定的推广。微生物型的水处理制剂及具有新材料和生物技术两者特点的水处理器将会得到发展。

过滤(filtration):除了均质滤料的推广应用外,为降解水中的有机物,生物滤池和慢滤池有可能在遭到有机物污染严重的地区得到应用。创制有利于水处理构型同时兼有生物处理功能的填料、吸附剂、滤料,甚至水处理组件等器材,可以作为可能出现的新材料与生物技术结合利用的例子。多种类型的膜过滤技术,特别是纳米材料的应用将在水处理过滤工艺流程中发挥重要的作用。

消毒(disinfection):消毒后产生的二次污染问题,已被人们所重视。因此探讨新的消毒剂 and 新的消毒方法已迫在眉睫。滤前加氯除了特殊情况外,一般不再作为处理有机物污染的手段。光消毒技术与生物芯片在线检测技术的结合,有可能得到重视,并且会为水消毒技术带来一次质的飞跃。

饮用水的预处理和深度处理技术的发展,将有可能从水的微观状态,到人体的生命、细胞、生殖、遗传、营养等学科进行更为深入的研究,以求获得更能适合人体健康需要的饮用水。

总的来说,当前水源污染日趋严重和给水水质标准提高的双重压力,给给水深度处理提出了更高的要求。继第一代城市饮用水净化工艺——“混凝—沉淀—过滤—氯消毒”、第二代城市饮用水净化工艺——“臭氧—活性炭”深度处理工艺之后,随着饮用水生物安全性问题的日渐突出,以超滤为核心技术的第三代城市饮用水净化工艺已逐步走上供水净化的历史舞台。

2 给水处理工艺概述

2.1 给水处理工艺的发展过程

给水处理的主要任务和目的就是通过必要的处理方法去除水中的杂质,以价格合理、水质优良安全的水供给人们使用,并提供符合质量要求的水用于工业。

给水处理的方法应根据水源水质和用水对象对水质的要求而定。在逐渐认识到饮用水存在水质污染和危害的同时,人们也开始了长期不懈地对饮用水净化技术的研究和应用。到 20 世纪初,饮用水净化技术已基本形成了现在被人们普遍称为常规处理工艺的处理方法,即混凝、沉淀或澄清、过滤和消毒。这种常规处理工艺至今仍被世界上大多数国家所采用,成为目前饮用水处理的主要工艺。

饮用水常规处理工艺的主要目标是去除原水中的悬浮物、胶体杂质和细菌。混凝是向原水中投加混凝剂,使水中难以自然沉淀分离的悬浮物和胶体颗粒互相聚合,形成大颗粒的絮体。沉淀是将混凝后形成的大颗粒絮体通过重力进行分离。过滤则是利用颗粒状滤料(石英砂等)截留经沉淀后水中残留的颗粒物,进一步去除水中杂质,降低水的混浊度。过滤之后采用消毒方法来消灭活水中的致病微生物,从而保证饮用水的卫生安全。

在 20 世纪 70 至 80 年代,给水工程技术人员面临的主要问题是工程的投资效益,即如何以最低的工程总投资来完成简单的处理目标。因此,在这段时期里,研究出了许多比较经济的净水技术和工艺,这些研究包括改进沉淀池设计,斜管沉淀池、斜板沉淀池和气浮池等快速澄清工艺,还有快速过滤工艺和将絮凝、沉淀和过滤工艺组合在一起的专用集成设备的研究。

然而,到了 20 世纪 80 至 90 年代,新的问题出现了,即饮用水中存在的微量有机物对人体健康的长期潜在危害。因此,出现了新的水质污染指标和规定,例如,总三卤甲烷、挥发性有机物和最大污染物浓度等。为了应对这些新情况,满足净水处理要求,工程技术人员和研究人員已经成功地设计出去除水中有机污染物的方法。这些方法,如化学氧化、活性炭吸附和强化混凝处理等,在过去的十多年里一直是主要的研究方向。

2.2 给水处理工艺的类型

综观给水净水工艺的发展历程,我们可以得出结论,即不同水质参数对应不同的水处理工艺。表 2.1 就列出了针对不同水质参数而选择的不同处理方法。

表 2.1 目前最通用的给水处理方法(美国 AWWA,1998 年)

水质参数	工艺组成
浊度	快速砂滤池(常规方式);絮凝;沉淀;过滤
	快速砂滤池(直接过滤方式);絮凝;过滤
	膜过滤
色度	絮凝/快速砂滤池
	吸附;粒状(粉状)活性炭;离子交换树脂
	氧化作用;臭氧;氯;高锰酸钾;二氧化氯
臭味	氧化作用;臭氧;氯;高锰酸钾;二氧化氯
	生物活性炭
挥发性有机物 (VOC)	空气吹脱
	粒状活性炭
	两种(吹脱和粒状活性炭)技术联用
三卤甲烷和腐殖酸	前驱物的去除;强化混凝;粒状活性炭;生物活性炭
	氯化副产物的去除;粒状活性炭;空气吹脱
有机化合物	离子交换树脂
	生物活性炭
	膜过滤
细菌和病毒	过滤(部分去除)
	消毒(灭活);氯;二氧化氯;氯胺;臭氧

从表 2.1 可以看出,结合混凝工艺的快速砂滤池是给水处理中最通用的处理方法。然而,在常规处理工艺基础上增加的预氧化和吸附以及二者的联用,是解决当前水源污染问题的主要方法。另外,在我国生物预处理技术也已经开始得到应用。这里新提出的膜过滤将是未来很有发展前景的净水处理技术。

2.3 净水工艺的比较及发展趋势

常规处理、臭氧活性炭深度处理和膜处理可以称为饮用水净化技术的第一代、第二代和第三代。常规处理通常由混凝、沉淀、过滤和消毒组成,最早于 19 世纪在欧洲开始得到应用,到 20 世纪在全世界得到十分广泛的应用,目前仍然是世界范围内的主流饮用水净化工艺,其主要去除对象为水中悬浮物、胶体物和部分大分子有机物,并杀灭水中绝大部分细菌和病毒,保证饮用水的基本安全。因常规处理工艺的应用对控制水媒传染病的爆发、保障人体健康和公共安全做出的杰出贡献,美国工程院于 2004 年评选 20 世纪对人类生活贡献最大的 20 项重大科技成果时,将饮用水的常规净化工艺列在第 4 位(前 3 位分别为:电、汽车和飞机)。

但是,自 20 世纪 60 年代后随着世界各国工业的发展,水源普遍受到有机物的污染,主要

是小分子、溶解性的合成有机物,包括农药、杀虫剂、除草剂、各种添加剂、内分泌干扰素等。20世纪70年代又发现氯消毒时能与有机物反应生成对人体健康有害的消毒副产物,而常规处理工艺对这些有机物基本无去除能力,饮用水水质对人体健康的影响因此受到极大的关注,迫使人们寻求新的饮用水净化技术,以弥补常规处理工艺的不足。在这种背景下,臭氧活性炭处理技术被开发并在欧洲得到较广泛应用。因此臭氧活性炭可以被称为第二代饮用水净化技术。

各国水处理工作者一致发现,活性炭吸附是从水中去除多种有机物的“最佳实用技术”,可有效地去除嗅、味、色度、氯化有机物、农药、放射性污染物及其他人工合成有机物。水处理中颗粒活性炭(GAC)使用较多,并已发展出球形活性炭、浸透型活性炭、高分子涂层活性炭等多种类型。用活性炭作吸附剂去除水中污染物,虽能取得良好的效果,但其价格较贵,对大部分极性短链含氧有机物,如甲醇、乙醇、甲醛、丙酮、甲酸等不能去除,而且活性炭在使用一定的周期后其吸附能力丧失,需要再生后才能重新使用,因此单纯活性炭的应用受到了很大的限制。

臭氧(O_3)是应用最广泛的新型氧化剂。用于深度处理饮用水,臭氧与活性炭联用有以下优势:

(1) 臭氧的氧化能力较强,可以将大分子有机物分解成小分子有机物,从而增加后续活性炭对有机物的吸附能力;

(2) 臭氧分解为氧气后增加了水中溶解氧浓度,加上臭氧氧化有机物后水中生物可利用的有机物增加,有利于活性炭上微生物的生长,因此活性炭变成生物活性炭,利用活性炭上微生物对有机物的降解作用,提高了对有机物的去除效率,并延长了活性炭的使用周期;

(3) 臭氧消毒反应迅速,杀菌效率高;

(4) 臭氧活性炭能够减少水中氯代消毒副产物的生成量。

但是,臭氧活性炭的应用在21世纪面临新的挑战,主要原因有:

(1) 臭氧氧化副产物问题。采用臭氧氧化工艺,将产生一些臭氧氧化副产物,主要可分为两类:一类是溴酸盐和次溴酸盐,其中溴酸盐具有强致癌性,中国、美国、欧洲、日本和世界卫生组织等都将饮用水中溴酸盐控制标准定为 $10\mu\text{g/L}$ 。2006年1月4日颁布、3月6日正式生效的美国新的《消毒剂/消毒副产物法》(D/DBP rule)规定溴酸盐的目标控制值是 $0\mu\text{g/L}$ 。如果原水中含有一定浓度的溴离子,则有导致臭氧氧化后的水中产生溴酸盐的风险。此外,次溴酸盐是溴仿和溴化有机物的前驱物,而溴代消毒副产物也是饮用水标准严格限制的。另一类是臭氧氧化有机物后产生的小分子有机物,如醛类、脂肪酸、羧酸、酮类、AOC等,这些有机物有些具有较强的生物毒性,不过在经过生物活性炭处理后,由于活性炭的吸附作用和生物降解作用,可在一定程度上将这些有机物分解。

(2) 生物安全性问题。臭氧生物活性炭工艺在活性炭上会生长出大量的微生物,这些微生物将对炭滤后的出水水质产生影响:

① 这些微生物会产生一些胞外分泌物,其中一些胞外分泌物可能具有一定的生物毒性;

② 这些微生物会穿透活性炭床进入到出水中去,而且由于这些微生物经过臭氧消毒工艺后存活下来,对消毒剂一般具有更强的耐受能力,不容易被杀灭;

③ 进入到出水中的微生物往往被包裹在细微颗粒之中,因此很难接触到消毒剂。

这些都造成了后续消毒工艺的困难。此外在南方城市已经发现臭氧生物活性炭工艺出水出现了较多的藻类,如剑水藻等,这些藻类一方面影响了水的感观指标,另一方面也可能出现一些有生物毒性的藻类或藻毒素。