



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

# 环保设备 原理与设计

第三版

Principle and Design of  
Environmental Protection  
Equipment

陈家庆 编著 ▶▶



中国石化出版社

HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM

“十一五”国家级规划教材  
北京高等教育精品教材

# 环保设备原理与设计

(第三版)

陈家庆 编著



中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，同时也是北京高等教育精品教材，具有较强的系统性、较高的理论性和较新的技术性。

主要内容有：不溶态污染物的分离技术与设备、典型的化学/物化法水处理技术与设备、生化法水处理工艺与设备、污泥集运/处理技术与设备、尘粒污染物控制技术、气态污染物净化技术与设备、环保过程钢制容器与塔设备设计、环境污染控制工程系统配套设备。文字通俗易懂、图文并茂，在兼顾实用性的同时尽可能准确地体现了国内外的先进技术和发展趋势。

本书可供高等院校环保类专业师生阅读，对投身环保产业的管理和技术人员也具有很高的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

环保设备原理与设计 / 陈家庆编著. —3 版.  
—北京:中国石化出版社,2019.3  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
北京高等教育精品教材  
ISBN 978-7-5114-5246-7

I.环… II.陈… III.①环境保护设施-高等学校-教材 IV.X505

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 040965 号

未经本社书面授权，本书任何部分不得被复制、抄袭，或者以任何形式或任何方式传播。版权所有，侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号  
邮编:100020 电话:(010)59964500  
发行部电话:(010)59964526  
<http://www.sinopec-press.com>  
E-mail:press@sinopec.com  
北京富泰印刷有限责任公司印刷  
全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 50.5 印张 1282 千字  
2019 年 3 月第 3 版 2019 年 3 月第 1 次印刷  
定价:88.00 元

## 第三版前言

随着“改善环境质量、推动绿色发展”逐步成为中国国内广泛的社会共识，以环保科技创新为引领，大力发展绿色环保产业的重要性显得愈加突出；大气、水和土壤三大污染防治行动计划的全面实施，必将助推环保产业成为我国国民经济新的支柱产业和新的增长点。由于环保设备为改善环境质量和推动绿色发展提供了重要的物质基础和技术保障，发达国家大多对其格外重视，相应的综合技术水平较高、创新发展速度较快。但总体而言，我国的环保设备在设计方法、材料选用、安装调试、运行维护、自动控制、安全可靠性等方面与发达国家相比尚存在较大差距。

从国内外环保产业发展对从业人员的要求来看，即便是环保工程项目的招标投标和运营管理等，也都需要用到环保设备等方面的知识与技能，而目前多数高校环境工程及相关专业本科毕业生在这方面的知识储备都略显欠缺。为此，国内高校近十多年来大体上采用三种方式来尝试培养环保设备类高级专业技术人才：一是在环境工程及相关专业中设置环保设备类课程，二是从环境工程及相关专业中分流出环保设备专业方向，三是开办“环保设备工程”(082505T)本科专业。无论相关高校采用哪一种方式，都需要配套使用环保设备方面的专业教材；同时鉴于高校教材自身的内涵要求，专业教材应该体现出较好的系统性、较高的理论性和较强的技术性。

时光荏苒，出于贯彻落实北京石油化工学院环境工程专业“兼顾常规环境工程专业共性培养，突出环保设备特色”办学定位的需要，作者于2004年开始了“环保设备原理与设计”本科教材的编写工作，中国石化出版社于2005年9月出版了本书的第一版。2006年年底，本书被评为北京高等教育精品教材；2007年6月，作者基于本书开设的环境工程专业主干课《环保设备原理与设计》被评为北京市高等学校精品课程。借入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材选题之东风，作者对本书的内容体系进行了较为彻底的修订，并于2008年9月出版了第二版。作者负责具体申办建设的北京石油化工学院环境工程本科专业在此前后也取得了一系列标志性成果：2008年9月，环境工程专业成为北京市级特色专业建设点；2009年5月，“一般本科院校环境工程专业应用型人才培养体系的研究与实践”荣获北京市高等教育教学成果一等奖；2009年8月，环境工程教学与实验中心入选北京市级实验教学示范中心；2010年4月，“环境治理与调控技术教学团队”被评为北京市优秀教学团队；2010年7月，环境工程专业入选教育部第六批高等学校特色专业建设点；2013年6月，环境工程专业入选教育部地方高校本科专业综合改革试点；2017年6月通过国家工程教育专业认证，同年首批入选北京市属高校一流专业。

十多年来，承蒙兄弟院校同行的抬爱和认可，本书被选作环境工程及相关本科专业的课程配套教材；不少环保产业从业人员也对本书给予了极大关注。这一切虽使作者产生了些许欣慰和自信，但更多感觉到的是压力——因为随着自身在环境工程领域学习认识和科研实践活动的不断增长，越发意识到本书的瑕疵颇多，每每想象直面读者便有一种“诚惶诚恐、如履薄冰”的感觉。但因自感准备不够充分和慎之又慎等缘故，将“十二五”期间本应完成的修订出版任务不知不觉拖延到了“十三五”中期。

纵向溯源，本书第一版的内容编排涉及水、大气、噪声三大污染控制的主要设备，仅固体废弃物处理与处置设备限于篇幅未作专门阐述；当时聘请清华大学环境科学与工程系的卜城教授负责组织审阅，该系的徐康富研究员、傅立新教授、袁光钰教授对本书提出了许多宝贵意见和建议。本书修订第二版时，本着“纳新弃错，突出重点和特色，不求面面俱到”的原则，在内容编排上进行了较大幅度的调整，不仅涉及水、大气两大污染控制的主要设备，而且在整合化学法、物化法水处理技术与设备的基础上，增加了“环保过程钢制容器与塔设备的设计”以及“环境污染控制工程系统配套设备”等章节；当时聘请四川大学环境科学与工程系的杨平教授、湖南大学环境科学与工程学院环境工程系的杨春平教授同时独立组织审阅，西南科技大学环境与资源学院的薛勇教授等也对本书提出了许多宝贵意见和建议。基于作者本人十多年来主讲《环保设备原理与设计》本科必修课程使用本书的亲身体会以及与各届学子的持续交流反馈，同时听取兄弟院校中使用过本书同行以及环境工程领域诸多专家学者的意见和建议，决定第三版修订时全面继承沿用第二版的框架体系，但下大力气重点关注教材的内涵质量、强调与时俱进、树立工程观念、突出设计思维，努力使之成为名副其实的精品教材。

本着“尊重原有贡献、顺应传承发展”的思想，此次修订工作并未兴师动众，詹敏述博士参加了第五章的部分修订工作，朱玲教授和王建宏高级实验师参加了第六章的部分修订工作，全部章节均由陈家庆教授负责修订审校。作者在修订工作过程中力求文字通俗易懂、表达准确到位、内容图文并茂，在兼顾内容实用性的同时尽可能体现国内外环保设备的最新技术水平和发展趋势动向。跨度数年的修订工作先后得到了北京市属高等学校环境治理与调控技术优秀教学团队项目、北京市高层次创新创业人才支持计划——教学名师项目、北京市高水平创新团队建设计划项目(No. IDHT20170507)等的支持；在本书面世至今十多年的时间里，作者所在学校的各级领导以多种方式和途径给予了关心和支持，所在基层学术组织——环境工程系暨环境工程北京市级实验教学示范中心的新老同事也对新版修订工作提出了许多宝贵意见和建议，教育部环境科学与工程教学指导委员会部分委员、中国石化出版社装备综合编辑室等对本书的修订多次给予鼓励和鞭策，在此表示诚挚感谢。在资料收集、整理分析、内容更新的

过程中，作者直接参考引用了一些国内外知名环保设备生产厂商的网站资料，同时也引用了一些教学科研、工程设计等领域专家学者所撰写的论文、论著和手册，无论是否在参考文献目录中得以一一罗列，在此均深表谢意。

本书的学习最好以工程力学、环境工程原理、机械设计基础或环保设备设计基础等类似课程的部分知识作为基础和铺垫，各高校可根据相关专业培养目标和培养方案的实际情况选择性讲授。当然，作者不仅希望本书能够作为高等院校环境工程及相关专业师生的教学用书，而且更希望本书能够为从事环保设备设计制造、环保项目规划评价、环保工程建设管理等环保产业相关工作的人员提供有益参考，以共同促进环保设备设计研发和运行管理水平的提高，进而提升我国环保产业的整体发展水平。作者还欣喜地看到，近几年的出版市场上已经出现了数本以环保设备为内容题材的教科书，这表明各高校对环保设备在环境工程及相关专业人才培养中重要性的认识已经上升到了一个新阶段。本着共同提升该类课程教育教学质量、推动“新工科”建设步伐的目的，特将与本书内容配套的部分多媒体课件、讲课视频以及相关学习素材上传到《环保设备原理与设计》北京市精品课程独立网站供在线浏览，读者也可以通过申请加入该课程雨课堂的方式浏览最新的配套PPT课件。

虽然作者力求在第三版的修订工作中做得更好，但限于学术水平和行业底蕴，书中的疏漏和不足之处难免尚存，敬请各位读者海涵并批评指正，作者冀盼凭藉日后的字斟句酌和持续改进以略表其诚。

或许能斗胆借用科学巨人伊萨克·牛顿爵士的名言来描述作者近几年看待本书的心境并作为序尾：

我不知道世人怎样看我，但我自己以为我不过像一个在海边玩耍的孩子，不时为发现比寻常更为美丽的一块卵石或一片贝壳而沾沾自喜，至于展现在我面前的浩瀚的真理海洋，却全然没有发现。

陈家庆

2018年12月于北京大兴

# 目 录

绪论 .....	( 1 )
----------	-------

## 第一篇 水处理设备原理与设计

第一章 不溶态污染物的分离技术与设备 .....	( 11 )
§ 1.1 预处理设备(拦污) .....	( 11 )
§ 1.2 预处理设备(沉砂) .....	( 33 )
§ 1.3 重力沉降规律及其设备 .....	( 48 )
§ 1.4 浮力浮上法分离原理与设备 .....	( 59 )
§ 1.5 过滤分离机理及其设备设计 .....	( 86 )
§ 1.6 离心分离规律及其设备 .....	( 107 )
第二章 典型的化学/物化法水处理技术与设备 .....	( 128 )
§ 2.1 加药混凝与反应澄清设备 .....	( 128 )
§ 2.2 氧化还原和消毒设备 .....	( 149 )
§ 2.3 吸附理论与水处理用吸附设备 .....	( 172 )
§ 2.4 离子交换的基本理论与设备 .....	( 187 )
§ 2.5 膜分离技术与设备 .....	( 196 )
§ 2.6 其他物化法处理技术与设备 .....	( 211 )
第三章 生化法水处理工艺与设备 .....	( 227 )
§ 3.1 常规活性污泥法工艺与主体构筑物 .....	( 227 )
§ 3.2 曝气原理与水下曝气、搅拌设备 .....	( 243 )
§ 3.3 氧化沟系列工艺与表面曝气机 .....	( 260 )
§ 3.4 SBR 系列工艺与专用滗水器 .....	( 292 )
§ 3.5 好氧生物膜法系列工艺与设备 .....	( 312 )
§ 3.6 厌氧法系列工艺与设备 .....	( 334 )
§ 3.7 组合式污水处理设备 .....	( 350 )
第四章 污泥集运、处理技术与设备 .....	( 364 )
§ 4.1 排泥设备及其设计 .....	( 365 )
§ 4.2 污泥输送设备 .....	( 400 )
§ 4.3 污泥浓缩设备 .....	( 416 )
§ 4.4 污泥消化稳定设备 .....	( 428 )
§ 4.5 污泥机械脱水设备 .....	( 445 )
§ 4.6 污泥干化、热化学处理技术与设备 .....	( 471 )

## 第二篇 大气污染控制技术与设备

第五章 尘粒污染物控制技术与设备 .....	( 499 )
§ 5.1 机械式除尘器(一) .....	( 499 )

§ 5.2	机械式除尘器(二)	(509)
§ 5.3	过滤式除尘器	(524)
§ 5.4	湿式除尘器	(551)
§ 5.5	电除尘器	(566)
<b>第六章</b>	<b>气态污染物净化技术与设备</b>	<b>(588)</b>
§ 6.1	吸收法净化技术与设备	(588)
§ 6.2	吸附法净化技术与设备	(617)
§ 6.3	冷凝法净化技术与设备	(628)
§ 6.4	催化法净化技术与设备	(636)
§ 6.5	燃烧法净化技术与设备	(650)
§ 6.6	气态污染物的其他净化技术	(660)

### **第三篇 环境污染控制工程通用及配套设备**

<b>第七章</b>	<b>环保过程钢制容器与塔设备的设计</b>	<b>(675)</b>
§ 7.1	容器与塔设备概述	(675)
§ 7.2	内压容器的设计	(681)
§ 7.3	外压容器的设计	(687)
§ 7.4	容器零部件结构设计	(693)
§ 7.5	钢制常压容器的设计	(704)
§ 7.6	塔设备的结构强度设计	(717)
<b>第八章</b>	<b>环境污染控制工程系统配套设备</b>	<b>(733)</b>
§ 8.1	常用泵的选型与应用基础	(733)
§ 8.2	水处理系统管路设计	(746)
§ 8.3	常用风机的选型与应用基础	(755)
§ 8.4	集气罩及其设计	(767)
§ 8.5	气体输送管道系统设计	(776)
§ 8.6	污染控制工程中的自控技术	(784)
<b>参考文献</b>		<b>(796)</b>

# 绪 论

## 0.1 环保产业与环保设备

### 1. 环保产业的内涵与现状

随着科技的发展、生产力的提高以及人口的增加，人类社会对环境的压力不断增大，环境保护问题越来越引起世界各国的普遍关注。虽然环保产业基本上与人类的环保意识同步形成和发展，但不同国家对其内涵的理解各不相同。美国的环保产业起始于 19 世纪的城市给排水系统管理、卫生工程和废物收集，目前分为环保服务、环保设备和环境资源三大类。国际经济合作发展组织(OECD)认为，环保产业是指在防治水、空气、土壤污染及噪声，缩减和处理废物及保护生态系统方面提供产品和服务的部门。按日本环境省的产业划分，环保产业可以分为污染防治、碳减排、资源循环、自然环境保护四大领域；而根据日本机械工业联合会的《环境产业调查报告书》，日本环保产业可分为公害防止和水利用、废弃物处理和回收利用、环境修复和环境创造、环境调和型能源、其他环保产品共五大类。随着科学技术与经济社会的发展，环保产业的内涵越来越丰富，更为广义的理解甚至还包括生产中的清洁技术、节能技术，以及产品的回收、安全处置与再利用等，是对产品从“生”到“死”的全生命周期绿色呵护。

环保产业作为范围广泛、门类众多的巨大产业体系，曾被誉为“朝阳产业”。据统计，全球环保产业的市场规模 1992 年为 2500 亿美元、2008 年为 6000 亿美元，年均增长率 8%，远远超过当时的全球经济增长率。自 2008 年暴发全球经济危机以来，在联合国的倡导下，以环保产业为核心的绿色经济成为各国刺激经济发展、摆脱经济危机的着眼点。进入 21 世纪以来，全球环保产业逐渐成为支撑产业经济效益增长的重要力量，并正在成为许多国家革新和调整产业结构的重要目标，美国、欧盟和日本的环保产业成为全球环保市场的主要力量。

1973 年全国第一次环境保护工作会议开创了中国的环境保护事业，环保产业也应运而生。按照国家经贸委 1999 年的定义，我国的环保产业是以防治污染、改善环境为目的所进行的各种生产经营活动，主要包括三个方面：一是环保设备(产品)生产与经营，主要指水污染治理设备、大气污染治理设备、固体废弃物处理处置设备、噪声控制设备、放射性与电磁波污染防护设备、环保监测分析仪器、环保药剂等的生产经营；二是资源综合利用，指利用废弃资源回收的各种产品，废渣综合利用、废液(水)综合利用、废气综合利用、废旧物资回收利用；三是环境服务，指为环境保护提供技术、管理与工程设计和施工等各种服务。2010 年国家将节能环保列为七大战略新兴产业的首要领域；“十二五”期间我国节能环保产业以 15%~20% 的速度增长，环保投资 3.4 万亿元，比“十一五”期间增长了 62%，占到 GDP 的 3.5%。但产业规模相对较小，与发达国家之间的差距较大，仍然可以用“盘子小、市场散、实力弱”来概括。随着新《环境保护法》2015 年 1 月 1 日起施行、《大气污染防治行动计划》(国发[2013]37 号)、《水污染防治行动计划》(国发[2015]17 号)、《土壤污染防治行动计划》(国发[2016]31 号)的相继发布实施，环保产业面临着难得的发展机遇。

### 2. 环保设备的分类

搞好环境保护，除了制定法规、强化管理外，最终要靠先进的技术和优良的设备，亦即

环保产业的发展离不开环保设备。一般而言，环保设备是指为防治环境污染、改善环境质量而由工业生产部门或建筑安装部门制造或建造出来的机械产品、构筑物或系统，当然也可以用于资源与能源循环利用、用于控制污染的清洁生产工艺过程和改善环境质量的机械产品、构筑物或系统。

### (1) 按照设备的功能分类

1996年颁布实施的中华人民共和国环境保护行业标准《环境保护设备分类与命名》(HJ/T 11—1996)中规定，环保设备是水污染治理设备、空气污染治理设备、固体废物处理处置设备、噪声与振动控制设备、放射性与电磁波污染防护设备的总称，可以按照类别、亚类别、组别和型别四个层次分类表示。实际上，在以上四个层次分类的基础上，环保设备的每一种型别，还可以分为许多具体的型号和规格，这些型号和规格有的由国家或行业管理部门统一规定，有的则由设计单位或生产企业自行确定。

### (2) 按照设备的性质分类

#### ① 机械类设备

主要指包含运动构件的动设备，可以分为通用机械设备和专用机械设备，目前在环保设备中种类最广、型号最多、应用最普遍。通用机械设备是指在若干行业可以使用的机械类设备，也称为标准设备或定型设备，是按照国家标准或行业标准规定大批量、系列化生产的，有较为定型的规格牌号，可以在市场上较为方便地购置，如减速器、泵、阀门启闭机、风机、板框式压滤机、离心机等。专用机械设备则主要在环境保护行业使用，也是环保产业界自身研制开发的重点，如除尘器、格栅除污机、刮泥机、表面曝气机等。

#### ② 容器类设备

一般指没有运动构件的静设备，设备的外部壳体多采用金属材料制作，呈立式或卧式的圆筒状或箱体状，并与化工单元过程操作中的容器、塔器类设备具有较大的关联性，如沼气储罐、吸收塔、吸附塔等。按照其承压情况可分为常压容器、中低压容器和高压容器。

#### ③ 仪器仪表类设备

指各种用于环境监测及环境工程实验的仪器仪表，如各种电化学分析、光学分析、色谱分析仪器、各种采样器、各种自动监测仪器、在线监测系统等。据统计，每个城市污水处理厂大约需要使用40多种在线控制仪器仪表，如在线超声波明渠流量计、超声波管道流量计、电磁流量计、在线溶解氧(DO)测定仪、在线COD测定仪、在线pH测定仪等。

#### ④ 构筑物

构筑物一般是指钢筋混凝土结构件，但也有用玻璃钢、钢板、不锈钢板、工程塑料或者其他材料建造。与压力容器不同，构筑物一般仅承受其内介质的静压力，或介质的工作压力 $\leq 0.1\text{MPa}$ 。一般不设上盖，主要用来储存物料或充作常压反应容器的壳体，有时也为其上附带的机械类设备提供支撑和固定作用。常被冠以槽、罐、箱、池、器等名称，如各种沉砂池、沉淀池、隔油池、气浮池、曝气池、贮泥池等。

构筑物类设备大多是非标设备，应该根据处理工艺、处理量以及具体施工场合的实际要求逐一进行设计，然后在施工现场建造。

### (3) 按照设备构成的复杂程度分类

#### ① 单体设备

单体设备指独立设置且具有一种或多种功能的环保设备，是环保设备的主体，如各种除尘器、单体水处理设备等。单体设备可以是单个机械类设备，如各种格栅除污机、破碎机、

筛分机等；也可以是单个容器类设备，甚至可以是单体构筑物，如沉砂池、沉淀池、曝气池、吸声器等。可以采用金属材料加工制造，也可以采用非金属材料（如玻璃钢）或混凝土等建造。

### ② 成套设备

成套设备指以单体设备为主，同时包含各种附属设备（如风机、电机等）组成的整体，有时也被称为工业联合装置。每一种成套设备中都包含若干种（台）单体设备，这些单体设备的属性可能各不相同，有的为机械类设备，有的为容器类设备。

### ③ 生产线

生产线指由一台或多台单体设备、各种附属设备、管线和控制系统（手动控制、自动控制）所组成的联合体。待处理物料从进入处理现场开始，经过多级处理、运送、化验分析、分质外排等一系列工序所构成的路线，如固体废物处理处置生产线、纯净水处理生产线等。

## 3. 环保设备的特点

### (1) 产品体系庞大

由于环境污染物种类和形态的多样性，为适应治理各种污水、废气、固体废物、噪声、有害振动和辐射污染的需要，环保设备已经形成了庞大的产品体系，拥有数千个品种和数万种型号规格。大多数产品之间的结构差异大，专用性强，标准化难度大，较难形成批量化生产。

### (2) 设备与工艺之间的配套性强

由于污染源不同，污染物质的成分、状态以及排放量等都存在着较大的差异，因此必须结合现场数据进行专门的工艺设计，相应采用最经济合理的工艺方法和设备，因此设备与工艺之间的配套要求较高。

### (3) 设备工作条件差异大

由于各种污染源的具体情况不同，环保设备在污染源中的工作条件有较大差异，相当多的设备在室外、潮湿环境甚至污水里连续运行，要求设备具有良好的工作稳定性和可靠的控制系统。有些设备在高温、强腐蚀、重磨损、大载荷的条件下运行，要求设备应具备耐高温、耐腐蚀、抗磨损、高强度等技术性能。某些大型成套设备如大型垃圾焚烧炉、大型除尘设备、大型脱硫脱硝装置等，系统庞大、结构复杂，任何一个环节出了问题都会影响整个系统的正常运行，因此对系统的综合技术水平要求较高。

### (4) 部分设备具有兼用性

部分环保设备与其他行业的机械设备结构相似，可以相互兼用，即环保设备可以应用于其他行业，其他行业的有关机械设备也可以应用于环境污染治理。也有人称其为通用设备，如石油、化工、矿山、轻工等行业的蒸发器、塔器、搅拌机、分离机、萃取机、破碎机、筛分机、分选机等机械设备都可以与环保设备中的同类设备兼用。

## 0.2 我国环保设备行业的发展现状与趋势

### 1. 我国环保设备行业的发展现状

随着我国环境治理要求的日益严格，环保设备市场需求巨大。2014年全国环保装备制造业实现产值5111亿元，提前一年完成《环保装备“十二五”发展规划》提出的目标。根据中国环保机械行业协会对2014年纳入统计口径的1320家环保设备制造企业统计，环保设备行业的发展呈现如下几个特点。

#### (1) 行业规模逐步扩大，结构逐步优化

截至2010年年底，全国从事环保设备制造的企业有5000家左右，工业总产值近2000

亿元，是 2005 年的 3.5 倍，从业人数 50 万以上。2014 年实现工业增加值 3067.04 亿元，同比增长 14% 左右。由单一污染物治理转向针对系统整体污染防治集成开发的产业技术创新战略联盟成为趋势。行业骨干企业逐步转型为提供装备制造、工程总承包、运营服务等一体化综合服务。

### (2) 形成了门类相对齐全的产品体系，技术水平显著提高

目前我国已经有了比较齐全的环保设备设计制造体系，已经拥有一批较为成熟的常规环保技术和设备，产品种类达到 10000 种以上，形成了包括大气污染治理、水污染治理、固体废物处理、噪声与振动控制、资源综合利用、环境监测专用仪器仪表、环境污染治理配套材料和药剂等门类相对齐全的产品体系，基本满足国内市场对常规环保设备的需求。一批拥有自主知识产权的成套环保技术装备取得突破，炉排炉垃圾焚烧发电、污泥干化发电、城市污水处理厂成套设备等部分关键共性技术已经实现产业化，工业废水治理和消烟除尘技术已达到国际先进水平，脱硫技术装备逐步占据国内脱硫市场的主体地位，电除尘及袋式除尘的技术水平位居世界前列，在满足国内需求的同时还出口到 30 多个国家和地区。

### (3) 国家政策层面持续予以高度关注，发展后劲足

为加快提升我国环保技术装备发展，国家发展改革委、工业和信息化部、科学技术部、财政部、环境保护部等五部委联合于 2014 年 9 月 9 日发布的《重大环保技术装备与产品产业化工程实施方案》中要求：环保装备制造业年均增速保持在 20% 以上，到 2016 年实现环保装备工业增加值 7000 亿元，基本满足国内市场需求。随着“水十条”“大气十条”“土壤十条”等政策陆续出台，环保设备行业必将迎来良好的发展机遇。《国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》提出实施工业污染源全面达标排放、大气环境治理、水环境治理、土壤环境治理等六大环境治理保护重点工程；《中国制造 2025》要求加大先进节能环保技术、工艺和装备的研发力度，加快制造业绿色改造升级，推进资源高效循环利用；《“十三五”节能环保产业发展规划》将着力提高节能环保产业供给水平，全面提升装备产品的绿色竞争力，在环保技术装备方面关注大气污染防治、水污染防治、土壤污染防治、城镇生活垃圾和危险废物处理处置、噪声和振动控制、环境大数据；《工业绿色发展规划(2016—2020 年)》提出实施能效提升工程、绿色清洁生产推进工程、资源高效循环利用工程、工业低碳发展工程、绿色制造体系创建工程等五大工程。

## 2. 我国环保设备行业存在的问题

总的来看，我国的环保设备行业起步较晚，发展现状基本上反映了国内工业的平均发展水平。与国外相比的差距主要表现在以下几个方面。

### (1) 企业规模较小，集中度偏低

总的来看，工业发达国家环保设备生产企业可分为以下几种类型：①大型跨国环保产业公司，历史悠久、实力雄厚，具备工艺研究、设备开发、系统集成和工程承包的综合能力，能够投入大量研发力量，保持环保业务在世界上的领先地位，如法国 Veolia 集团下属的丹麦克鲁格公司(Krüger A/S)、法国 Suez 集团下属的得利满技术(Degrémont Technologies)、北美 GLV 集团下属的美国沃威沃(Ovivo)公司(2002 年收购美国水处理专用设备制造商 Eimco Water Technologies)等；②国际知名环保设备专业厂家，往往一个产品要持续研发完善几十年，不断赋予传统产品以新的技术生命，使之成为世界范围内工程建设的首选产品，占据了较大的市场份额，如美国 Wallace & Tiernan(即 W&T)公司的加药加氯设备、德国福乐伟(Flottweg GmbH)的污泥离心脱水机、德国 Huber 公司的 ROTAMAT 系列不锈钢固液分离设

备、德国西派克(Seepex)公司的单螺杆泵等；③大型国际垄断企业的环保设备子公司或部门，这些企业涉及面广、技术全面、适应性强，在承包各类工程中直接配套环保工程，同时也能单项提供环保服务，如美国 Babcock & Wilcox(即 B&W)公司、美国懿华水技术公司(Evoqua Water Technologies LLC)、德国鲁奇公司(Lurgi GmbH)、奥地利安德里茨集团(Andritz Group)、瑞典阿法拉伐(Alfa Laval)、日本三菱重工(MHI)、日本石川岛播磨重工业公司(IHI)、瑞士苏尔寿(Sulzer)集团等。目前，大型跨国环保公司已经成为新型环保设备工程化、市场化的主体，设备分包商将承担系统的二次设计(包括工艺概念设计)、设备集成、安装调试、操作培训等多方面义务。除法国 Veolia 集团、法国 Suez 集团之外，荷兰 DHV 集团(德和威集团)、瑞典洛克比水务集团(Läckeby Water Group)、奥地利瓦巴格集团(WABAG Group)等在中国都有成功的工程案例，具有很强的国际竞争力。

相比之下，当前国内环保设备企业普遍规模较小，布局不太合理，发展比较分散，集聚发展不够，缺乏一批拥有自主知识产权和核心竞争力、市场份额大、具有系统集成和工程承包能力的大企业集团。目前产值 20 亿元以上的环保设备专营企业屈指可数，众多中小企业专业化特色发展不突出，企业分布比较分散，技术落后，生产社会化协作尚未形成规模。

### (2) 企业技术创新能力不强，技术创新机制尚不健全

目前，我国环保设备生产企业的原始创新能力匮乏，技术集成和再创新能力较弱，推广应用自主研发技术或产品的力量也不足，产品总体水平低。产品水平低首先反映在技术性能指标较国外同类产品要低，如外观、效率、可靠性、精度、能耗、使用寿命、泄漏、噪声、可维修性、耐蚀、耐磨、耐高温等，有些指标与国外相比要差很多；其次体现在产品系列的技术含量上，目前初级产品仍占较大比例，一些常用、技术含量较低的设备发展较快，如旋风除尘器、刮吸泥机、格栅、曝气器、砂水分离器、阀门、闸门等。

技术创新机制尚不健全，“产学研用”有机结合的技术创新体系建设进展迟缓。高校和科研院所是目前的技术研发主体，企业创新能力不足，更是缺乏国际竞争力。技术研发与应用转化脱节问题突出，自主研发技术多处于小试或中试阶段，较少进入产业化阶段。

### (3) 品种不够丰富，关键成套设备依赖进口

目前技术含量及附加值低的单项、常规设备相对过剩，而部分市场急需、高效节能的成套设备和核心关键部件的自主化率不高，尤其缺乏大型成套环保设备以及一些特殊品种的环保设备。前者如火电厂脱硝关键设备、电厂超临界机组电除尘器、大型垃圾焚烧炉、居民小区粪便污水处理系统等；后者如废旧橡胶回收再生设备、污泥处理处置设备、新能源汽车动力蓄电池环保处置设备，一些在线环境监测专用仪器仪表及监测系统等。这些环保设备的潜在市场很大，但无法形成自主的产品系列。

环保设备品种不丰富还表现在整个环保产业界存在“重污水轻大气”、“重污水轻污泥”、“重规模增长轻提质增效”、“重污水处理轻再生利用”等问题。不少高校在制订环境工程及相关专业的本科培养方案时，在水污染控制工程领域设置的学时和学分较多，而在大气污染治理、固体废弃物处理与处置、物理性污染控制工程领域设置的学时和学分相对较少，致使这些领域的高级工程技术人员相对匮乏；在水污染控制工程领域则更为关注市政水处理，工业水处理关注得相对较少，实际上工业用水占全球总用水量的 15%~20%、城镇居民用水仅占 5%~8%。此外，水污染控制工程项目的投资和建设重点主要集中在污水处理厂的建设上，对污泥处理与处置关注不够。国外大型污水处理厂在采用消化、机械脱水的情况下，污

水处理与污泥处理的投资比约 1 : 1.7, 远高于我国。

#### (4) 标准体系不完善, 缺乏产品质量认证

虽然已经初步构建了环保产品(设备)标准体系框架, 但标准数量较少, 分布不均衡, 标准对行业发展的规范和引领作用发挥不够。环保设备运行效果评价指标体系尚未建立, 缺乏质量监督和认证机制, 产品质量低下的问题较为突出, 运行效果难以保证。截至 2016 年年底, 国家环境保护部仅批准并发布了 100 多项《环境保护产品技术要求》, 环保产品标准体系尚不完善, 部分产品标准处于空白状态。此外, 不同行业所颁布的标准中重复现象严重, 使得同样的产品在规格、型号、名称上不统一, 给用户选择及工程项目招投标带来了困难。

### 3. 我国环保设备行业的发展趋势

发展环保设备是实现我国环境保护目标的必然要求, 是加快培育发展节能环保产业的重要内容, 是提高产业竞争力的重要举措。随着一批实力较强的大中型企业受政策的鼓励逐步进入环保设备行业, 可以预测环保设备行业的发展趋势如下。

#### (1) 环保设备的新品种迅速增加

在末端污染治理设备方面, 通过产品先进制造技术、产品可靠性技术、轻量化设计和模块化技术, 新型水污染治理设备、空气污染治理设备、固体废物处理设备、资源综合利用设备、环境应急设备、土壤污染治理与修复设备将会得到迅速发展, 新品种不断增加。如超旋磁氧曝气污水处理装置、燃煤烟气 CO<sub>2</sub> 捕集和精制成套设备、空调系统污染物(PM10)捕集装置、热解吸污染土壤治理设备等。

进入 21 世纪以来, 随着公众对环境质量要求日趋严格, 复合型污染、人群健康风险、生态安全等成为环境领域的研究重点。在源头污染预防设备方面, 通过开发新的清洁生产工艺和新设备来减少污染排放。为落实《中国制造 2025》的部署和要求, 工信部、发改委、科技部、财政部等四部委于 2016 年 8 月 19 日正式联合印发了制造业创新中心建设、工业强基、智能制造、绿色制造和高端装备创新等五大工程的实施指南, 其中绿色制造工程提出: 重点行业主要污染物排放强度比 2015 年下降 20%, 工业固体废物综合利用率达到 73%。

#### (2) 推进环保设备的“标准化、系列化、成套化”

发展产品成套技术、工程成套技术以及系统集成技术, 实施零部件标准化、同类产品系列化、环境工程项目成套化, 进一步提高产品的技术和质量水平, 增加品种, 降低生产成本, 以增强对环境工程项目所需设备的成套供应能力。

为落实《中国制造 2025》的部署和要求, 切实发挥标准化和质量工作对装备制造业的引领和支撑作用, 国家质检总局、国家标准委、工信部共同于 2016 年 8 月发布了《装备制造业标准化和质量提升规划》, 其中“实施绿色制造标准化和质量提升工程”与环保装备制造业密切相关。

#### (3) 与相关行业领域的交叉融合逐步加深

科学与技术之间、不同学科之间的交叉、渗透、融合如今已成为必然趋势, 多学科联合攻关、跨学科融合创新已经成为解决重大科技问题的方法和途径。与此相对应, 环保设备行业的发展离不开加工制造、能源化工、材料冶金、医疗卫生、土木建筑等行业的发展, 必须及时吸收和应用这些行业领域的新技术, 开发新型环保设备, 提高已有环保设备的技术水平和科技含量。尤其是随着分子技术、生物技术、新材料、信息技术、云计算和大数据等在环

境领域应用的不断拓展和深入，必将推动突破一批改善生态环境的关键技术，带动环保产业大发展。

#### (4) 计算机在环保设备行业中的应用不断扩大

扩大应用 CAD/CAE、计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)、计算机辅助工艺过程设计(Computer Aided Process Planning, CAPP)、计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)、产品生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)、增材制造(3D 打印)等技术，并将计算机应用于环保设备自动化和环保工程项目的自动化控制和运行状态检测，推广普及 PLC、DCS 等控制系统以及物联网、大数据等技术，使环保设备及仪表控制达到转换程序控制、联锁保护、信息传输、遥测遥控、数据处理、计算机控制以及自寻优故障诊断的水平，实现智能工厂、数字化工厂、智能制造甚至“智慧环保”。

### 0.3 本课程的任务及学习方法

目前我国高等环境教育已形成学科门类较为齐全、办学层次多样化的专门教育体系，但从环境工程及相关专业现行的人才培养方案来看，对环保设备类专门人才的培养相对较为滞后。尽管所有的设备都由相应的工艺要求所决定并为其服务，但各种工程项目投产运行后工艺基本不变而直接受设备运行状况影响却是一个不争的事实，有时甚至决定了污染治理工艺的先进性和可靠性。

本课程站在工科高级应用型人才培养的角度，系统讲述目前国内外各种主要环境污染末端治理设备的原理与设计问题，尤其是各种单体设备的原理与设计问题。以此加深学生对各种环境污染治理问题的认识与理解，使之具备设计一些主要单体环保设备的能力，进而满足目前环境污染治理工程实际对高层次从业人员的需要。为了学好本课程，建议注意以下几个方面的问题。

#### 1. 处理好学习工艺与设备之间的辩证关系

工艺与设备历来就应该相辅相成，工艺对设备提出要求，工艺的技术性能指标由设备来实现，因此建议读者要主动将二者有机结合。一方面，只有清楚所依托环境工程项目的工艺参数和工况条件，并熟练了解特定污染治理工艺需要使用具备哪些性能和特点的处理设备，才能正确进行项目工艺所需配套设备的设计或选型，才能把握设备的发展方向，洞悉相关设备的安装调试和运行管理问题。另一方面，提供技术可行、性能先进和操作简便的环保设备，并保证其低碳节能和高可靠性运行，也是环保设备从业人员的职责和任务。建设“新工科”专业、培养复合型人才，注重学科专业的实用性、交叉性与综合性，应该成为新形势、新业态下全社会的共识。

#### 2. 注意理论与实践相结合，在反复参与实践中学好理论

参与实践，一是到已建成的环境污染治理工程参观实习时，用心观察所采用的配套设备；二是到专业环保设备生产制造厂家去参观学习或实习时，潜心观察体会设备的加工制造工艺；三是开展相关的课程设计等实践训练环节时，在搞好设备选型设计和商务调研的基础上进行成本核算；四是创造条件参与环保设备的拆装测绘、安装调试、运行管理等工作，取得切身实践经验，同时要在实践中弄懂、弄通、用活有关理论。

#### 3. 注意向国内外的先进技术学习

由于全球范围内环境科技的发展呈现出从单要素研究向多要素综合研究转变、从局部地区污染防治向区域尺度和全球尺度生态环境问题研究转变，因此要借助便捷、发达的网络信

息资源，密切关注世界范围内环保设备行业的最新发展动态，获得国外环保设备企业的第一手产品资料或专利文献资料，以尽可能提高我国自主研发环保设备的起点和层次。

#### 4. 注意培养工程观念和创新意识

环境工程专业是一个实用性较强的工科专业，因此满足工程实际需要、服务工程实际是构建该专业知识体系时一个不可忽略的重要因素，只有在平时的理论学习、实习实训中刻意培养并不断强化工程意识和工程观念，才能在踏上工作岗位后满足环保产业发展的需要。与此同时，勇于创新、勇于探索是尽快提高我国工程技术发展水平的必然要求。要大胆借鉴机械工程、化学工程与技术、动力工程及工程热物理、材料科学与工程、控制科学与工程、生物工程、土木工程等相关学科的技术，将其创造性地应用于环境污染治理，研发具有自主知识产权的高端智能化环保设备。

# 第一篇 水处理设备原理与设计

水处理的目的是将原水中所含的污染物分离出来或将其转化为无害的物质,从而使水质得以净化。从作用原理来看,可分为不溶态污染物的分离技术(简称物理法)、污染物的化学转化技术(简称化学法)、溶解态污染物的物理化学转换技术(简称物化法)、污染物的生物化学转换技术(简称生化法)等4大类;按照水质净化要求,污水处理技术可分为一级处理、二级处理、深度处理。一级处理常用筛滤法、重力沉降法、浮力上浮法、预曝气法等,能去除悬浮固体(SS)约50%~60%、 $BOD_5$ 约20%~30%,但一般不能去除污水中呈溶解态和呈胶体态的大量有机污染物以及氯化物、硫化物等有毒物质。二级处理用于在一级处理的基础上继续去除污水中的大量有机污染物,生化法是污水二级处理常用的主体工艺,也有将化学法或物化法作为二级处理的主体工艺;处理效果介于一级和二级处理之间的一般称为强化一级处理、一级半处理或不完全二级处理,主要有高负荷生物处理法和化学法两大类, $BOD_5$ 去除率45%~75%。这里需要指出的是,到了20世纪60~70年代,人们发现仅仅去除污水中的 $BOD_5$ 和SS还不够,氨氮的存在依然导致水体黑臭或溶解氧浓度过低,这一问题的出现使二级生化处理技术从单纯的有机污染物去除发展到有机污染物和氨氮的联合去除,即污水的硝化处理;到了20世纪70~80年代,由于水质富营养化问题的日益严重,对污水中氮磷去除的需要使二级生化处理技术进入到具有除磷脱氮功能的新阶段(二级强化处理)。深度处理是为了进一步去除二级处理残留的污染物,如细小固体悬浮物、病毒和病原菌类微生物、难降解有机物、氮/磷等可溶性无机物以及重金属等,工艺流程和组成单元可以根据处理出水具体去向的不同(如回用)而采用三级处理或多级处理工艺。常用的深度处理方法包括:活性炭吸附、臭氧氧化、膜分离、离子交换、湿式氧化、催化氧化、蒸发浓缩等物化法以及生物脱氮、除磷等,处理每吨水的费用约为一级处理费用的4~5倍以上。

从处理排放标准的角度来看,目前我国县级以上的城市污水处理厂一般都按《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级B标准作为设计要求。但在我国的三河三湖(如太湖、巢湖、滇池)、松花江水系的辽河流域、南水北调的重点区域以及北方缺水地区(如河北省、山西省、内蒙古自治区)等地,应执行一级A标准;其他地区若将城镇污水处理厂出水作为回用水或“将出水引入稀释能力较小的河湖作为城市景观用水”也应执行一级A标准。为解决这些重点地区污水综合治理、污水回用或城市景观用水的需求,新建污水处理厂必须在二级处理(脱氮除磷)的基础上增加三级处理或深度处理,一次建成达到一级A标准;已建二级处理的城镇市政污水处理厂要求升级改造,在解决脱氮除磷基础上增加三级处理或深度处理,由一级B标准升级改造达到一级A标准。

水处理设备主要分为通用设备和专用设备两大类,前者如泵类、阀类、风机类等;后者如拦污机械设备、除砂及刮泥设备、曝气及搅拌设备、加药及消毒设备、污泥浓缩及脱水设备、氧化脱盐设备等,近年来又增加了滗水器、膜处理设备、污泥处理处置设备等。专用设备投资一般占设备总投资的60%~65%,因此是水处理行业的重点配套产品。一般而言,专用设备又可分为单元处理设备、组合处理设备两大类,是本篇介绍的重点。