



废气生物净化过程强化技术

Enhanced Biotechnology for Air Pollution Control

陈建孟 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

废气生物净化过程强化技术

陈建孟 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书立足于废气生物净化及其过程强化的理论基础,从高效降解菌剂(反应强化)、优质生物载体(传质和反应强化)和新型工艺及设备(传质强化)这三个方面出发,系统阐述废气生物净化及其过程强化的研究现状、思路及趋势;着重介绍废气生物净化过程强化技术对含氮化合物、含硫化合物、脂肪烃及其含氧衍生物、苯系物及氯代烃废气类等典型气态污染物的去除特性,并探讨废气生物净化过程机理及模型;同时,介绍一些工程案例,力求使读者能对废气生物净化过程强化技术有更为全面和立体的认识。

本书既注重新理论与新技术的总结提炼,又注重研究成果的工程应用,可供从事环境生物技术、大气污染控制工程等研究和学习的科研人员、工程技术人员以及高年级本科生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

废气生物净化过程强化技术/陈建孟著. —北京:科学出版社,2016. 11
ISBN 978-7-03-050657-3

I. ①废… II. ①陈… III. ①废气净化-生物净化-研究 IV. ①X701

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 274281 号

责任编辑:张艳芬 陈 婕 纪四穗 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张:16 插页:4

字数:300 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



序

进入 21 世纪,当我们享受经济高速发展带来的红利时,也面临着环境污染带来的苦恼。大气污染是我国乃至全球当前最突出的环境问题之一,严重危害着人体健康和生态安全,制约着经济发展。如何防治大气污染是当前我国环境保护工作的重要课题。

工业过程是大气污染物的重要来源。多年来,人们开发了诸多控制技术用于能源、石油、化工、医药等典型行业的废气净化,如冷凝、吸附、燃烧等。生物净化技术是近年发展起来的气态污染物控制新技术,因其具有高效低耗的特点而得到快速发展。在荷兰、西班牙、美国、日本等发达国家,针对一些恶臭气体及低浓度工业有机废气的净化,已有许多成功的实践案例。我国在该领域的研究起步较晚,无法满足当前恶臭气体和 VOCs 的污染控制需求,因此亟待开发废气生物净化相关的新材料、新工艺和新设备。相关研究可丰富大气污染控制理论,有助于推动大气环保产业的技术进步。

作为国内较早从事废气生物净化技术研究的团队,20 年来,陈建孟教授课题组持续致力于该领域的研究,已在国内外权威期刊上发表一系列论文,获得数十项国内外发明专利,不少成果被国内外学者广泛引用。该书是陈建孟教授及其课题组在这一领域研究成果的归纳和总结,是一部系统阐述工业废气生物净化过程强化技术的基础研究与工程应用的专著。该书以气态污染物的传质-生物降解过程强化为主线,围绕降解菌(剂)、生物载体和工艺设备等方面,对 VOCs、恶臭废气的净化进行了全面论述,并介绍了一些工程案例。

该书反映了目前该领域的最新研究进展,对于正在从事废气生物净化及其相关研究的科研人员有较好的参考价值。该书的出版必将对大气污染控制领域的研究产生积极影响,并推动我国废气生物净化技术和工业废气污染治理产业的快速发展。



清华大学环境学院

2016 年 6 月

前 言

工业生产过程中排放的挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 是引起城市灰霾、光化学烟雾等区域大气复合污染的主要诱因。2010 年, 国务院转发的《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》将 VOCs 列为重点控制的大气污染物; 2015 年, 财政部、国家发改委、环保部联合印发《挥发性有机物排污收费试点办法》, 对典型行业实行试点收费; 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》提出“在重点区域、重点行业推进挥发性有机物排放总量控制, 全国排放总量下降 10% 以上”。

生物技术在废水处理领域的应用已有百余年的历史, 而在废气净化领域的应用时间则很短。该技术具有设备简单、操作方便、运行费用低、二次污染少等优点, 多用于污水处理过程中产生的易水溶、易降解恶臭气体的净化。工业废气通常具备以下特征: ① VOCs 多具疏水性, 气液传质速率低; ② 部分 VOCs 对生物毒害大, 难被微生物降解; ③ 成分复杂, 组分间存在相互抑制效应。这些特征导致传统生物技术的净化效率低下。因此, 如何提高生物技术对这类工业废气的处理效果, 是亟待解决的重要问题。

作者研究组自 1998 年以来一直致力于废气生物净化理论与应用研究。20 年来, 基于废气生物净化过程中的传质-降解强化理论, 开发新材料、新工艺和新设备, 在国内外权威期刊上发表研究论文 270 余篇, 授权发明专利近 50 项, 在医药化工、石油炼制等多个行业开展了工程应用, 获浙江省科学技术奖等省部级一等奖 4 项。

本书系统总结作者研究组在工业废气生物净化技术领域的主要研究成果, 通过过程强化拓宽传统生物净化技术的应用领域, 较好地实现了工业废气的高效低耗净化, 满足了典型行业废气净化的技术需求。书中的内容力求做到理论与实践并重, 真实反映了该领域当前的研究成果和发展趋势。

全书共 11 章。第 1 章主要介绍废气生物净化技术的原理及其过程强化的发展概况; 第 2~4 章分别围绕菌剂、生物载体和工艺设备展开, 介绍研究思路及内容; 第 5~9 章介绍对含氮、含硫及典型 VOCs 的去除性能, 剖析降解产物和生物膜特征; 第 10 章综述理论模型的最新进展, 并以生物转鼓和填料床为例, 介绍作者在模型修正和完善方面所做的一些探索性工作; 第 11 章介绍该技术在典型行业的工程实践情况。本书内容源于研究组 7 位核心成员和 30 余位研究生的研究工作, 研究成员包括王家德、陈东之、姜理英、成卓韦、陈浚、於建明和叶杰旭, 研究生包括

周玉央、孙一鸣、吴石金、朱润晔、马建锋、张海杰、沙昊雷、倪建国、陶佳、叶峰等(由于篇幅有限,名字未一一列出),在此对所有作出贡献的人表示衷心感谢。

本书的主要研究成果是在科技部 863 计划、国家国际科技合作项目、国家及浙江省自然科学基金、浙江省科技重大专项等研究项目和教育部创新团队发展计划的资助下完成的,在此表示感谢。在研究过程中,作者研究组先后与美国加州大学戴维斯分校、美国杜克大学、西班牙拉克鲁尼亚大学等开展了交流与合作,特向 Daniel Chang 教授、Marc Deshusses 教授、Christian Kennes 教授等表示感谢。感谢国家科学技术学术著作出版基金和浙江工业大学专著与研究生教材出版基金对本书的出版资助,也感谢对本书的出版工作提供帮助以及关注本书的每一个人。

限于作者水平和经验,书中难免存在疏漏和不当之处,敬请读者和业内同仁批评指正。



2016年5月于浙江工业大学

目 录

序

前言

第 1 章 基于过程强化的废气生物净化技术基础	1
1.1 废气生物净化技术发展历史	2
1.2 废气生物净化原理及系统组成	3
1.2.1 净化原理	3
1.2.2 生物净化系统的组成	4
1.3 基于过程强化的废气生物净化技术研究背景	9
1.3.1 过程强化的概念	9
1.3.2 过程强化的分类	10
1.4 基于过程强化的废气生物净化技术发展趋势	11
参考文献	12
第 2 章 高活性降解菌选育及复合菌剂构建	16
2.1 降解菌的选育及鉴定	16
2.1.1 菌种来源	16
2.1.2 源样诱导	16
2.1.3 筛选	17
2.1.4 菌种鉴定	18
2.2 典型气态污染物的高活性降解菌	18
2.2.1 氮氧化物	19
2.2.2 含硫化合物	20
2.2.3 烃类化合物	23
2.2.4 含氯化合物	28
2.2.5 其他气态污染物	32
2.2.6 降解酶及基因工程菌	35
2.3 复合菌剂	37
2.3.1 复合菌剂定义	37
2.3.2 复合菌剂构建	37
2.3.3 复合菌剂研发实例	39
2.4 研究趋势	48

参考文献	48
第3章 高效生物载体开发	52
3.1 早期生物填料	52
3.1.1 泥质类	52
3.1.2 木质类	52
3.1.3 化工填料	53
3.1.4 烧结类	53
3.2 高效生物填料的设计思路	54
3.3 高效生物填料开发实例	56
3.3.1 过滤填料	57
3.3.2 滴滤填料	60
3.3.3 填料使用要点	63
3.4 研究趋势	64
参考文献	64
第4章 新型净化设备与工艺研发	67
4.1 净化设备分类及特点	67
4.1.1 地上式和地下式	67
4.1.2 箱式和塔式	68
4.1.3 分散式和集中式	69
4.2 新型净化设备与工艺研发思路	70
4.2.1 质量传递过程强化——颗粒尺度优化物质场	70
4.2.2 生化反应过程强化——分子尺度优化代谢网	71
4.2.3 传递和反应过程双重强化——设备尺度优化能量场	72
4.3 新型净化设备与工艺实例	73
4.3.1 板式生物净化设备——物质场优化	73
4.3.2 生物转鼓——物质场优化	75
4.3.3 两相分配反应器——代谢网优化	78
4.3.4 以生物净化为核心的化学氧化预处理工艺——能量场优化	81
4.4 研究趋势	91
参考文献	92
第5章 含氮化合物废气的生物净化	95
5.1 生物滤塔处理 NO 废气	96
5.1.1 NO 的去除效果比较	97
5.1.2 NO 的去除机制分析	98
5.2 RDB 净化 NO 废气	100

5.2.1	工艺条件优化	101
5.2.2	N 素转化途径分析	103
5.3	络合吸收协同 RDB 净化 NO 废气	105
5.3.1	络合吸收剂选择	105
5.3.2	Fe ^{II} (EDTA)对 RDB 内微生物群落结构的影响	107
5.4	高温 BioDeNO _x 体系中生物还原过程研究	109
5.4.1	Fe ^{II} (EDTA)-NO 的生物还原	110
5.4.2	Fe ^{III} (EDTA)的生物还原	113
5.5	生物过滤床处理三甲胺废气	116
5.5.1	工艺参数对三甲胺去除效果的影响	116
5.5.2	氨气及臭气的去除	117
	参考文献	119
第 6 章	含硫化合物废气的生物净化	122
6.1	板式生物滴滤塔处理 H ₂ S 废气	123
6.1.1	实验装置	123
6.1.2	运行性能	124
6.1.3	MLBTF 系统微生物相及压降研究	127
6.1.4	长期饥饿状态对 MLBTF 的影响	129
6.2	板式生物滴滤塔处理 H ₂ S 和 VOCs 混合废气	130
6.2.1	挂膜启动	130
6.2.2	稳定运行性能	131
6.2.3	微生物群落结构分析	133
6.2.4	冲击负荷和饥饿状态对去除效果的影响	135
6.3	生物滴滤塔处理有机硫混合废气	138
6.3.1	挂膜启动	138
6.3.2	运行性能	139
6.3.3	混合废气的相互作用	141
6.3.4	饥饿状态的影响	142
	参考文献	143
第 7 章	脂肪烃及其含氧衍生物的生物净化	146
7.1	生物滴滤塔处理四氢呋喃废气	147
7.1.1	运行性能	147
7.1.2	BTF 内微生物活性	149
7.1.3	微生物群落分析	149
7.2	紫外光解-生物滴滤塔处理含 α -萜烯废气	151

7.2.1	运行性能	152
7.2.2	去除负荷比较	153
7.2.3	动力学分析	155
7.3	生物滴滤塔处理丙烯酸乙酯、甲苯和甲醇混合废气	157
7.3.1	运行性能	158
7.3.2	动力学分析	160
	参考文献	161
第8章	含苯废气的生物净化	164
8.1	生物滤塔处理 BTX 混合废气	165
8.1.1	运行性能	165
8.1.2	CO ₂ 生成量分析	168
8.1.3	动力学分析	169
8.2	生物滤塔处理甲苯、邻二甲苯和二氯甲烷混合废气	170
8.2.1	运行性能	170
8.2.2	生物膜特性	172
8.3	微量臭氧强化生物滴滤处理甲苯废气	175
8.3.1	运行性能	176
8.3.2	生物膜特性	178
	参考文献	179
第9章	氯代烃废气的生物净化	183
9.1	生物滴滤塔处理二氯甲烷和二氯乙烷混合废气	185
9.1.1	运行性能	185
9.1.2	Real-time 分析	187
9.2	两相分配生物反应器处理二氯甲烷废气	190
9.2.1	非稳态条件下的运行性能	190
9.2.2	溶氧传质分析	192
9.3	紫外光解-生物滴滤联合处理二氯甲烷废气	194
9.3.1	运行性能	194
9.3.2	污染物及其产物沿床层分布特征	196
9.3.3	高通量测序分析	197
9.4	低温等离子-生物滴滤处理氯苯废气	198
9.4.1	运行性能	198
9.4.2	微生物多样性分析	200
	参考文献	203

第 10 章 废气生物净化机理与模型建构	206
10.1 相关理论及动力学模型概要	206
10.1.1 “吸收-生物膜”理论	207
10.1.2 “吸附-生物膜”理论	208
10.2 模型初探	210
10.2.1 转动床净化机理与模型	210
10.2.2 填料床的热湿迁移机理与模型	217
10.3 模型优化的若干思考	224
参考文献	224
第 11 章 废气生物净化技术工程实践	226
11.1 医药化工行业废气	226
11.1.1 案例 1	226
11.1.2 案例 2	229
11.2 精细化工行业废气	232
11.2.1 案例 1	232
11.2.2 案例 2	234
11.3 食品加工行业废气	236
11.4 石油炼制行业废气	238
11.5 化工园区废气	240

彩图

第 1 章 基于过程强化的废气生物净化技术基础

近年来,大气污染呈现出“全球化”和“复合污染”的趋势。大气氧化性增强、能见度显著下降以及污染物之间的强耦合作用,对人体健康和生态系统构成了威胁。世界卫生组织(WHO)统计数据表明,2012 年全世界因大气污染致死的人数经推测达到了 700 万人以上,占到了全球死亡人数的 1/8^[1],大气污染控制迫在眉睫。

根据净化原理,传统的大气污染控制技术分为沉降、过滤、冷凝、吸附、吸收以及氧化还原等类型,每类技术均有其特定的适用对象和使用场所,如表 1-1 所示^[2]。生物净化技术主要通过生物的代谢活动将污染物分解,从而净化废气,它适合处理潮湿的、低浓度的、多组分混合的废气,被广泛应用于生产过程中及公用污水处理场所排放的有机废气或恶臭气体的处理,具有反应条件温和、设备简单、二次污染小等特点^[3,4]。

表 1-1 大气污染控制技术比较

技术名称	特点	适用对象	使用场所
沉降技术	利用自身重力作用将颗粒物从污染气流中分离	机械除尘: 粒径 $\geq 5\mu\text{m}$ 的颗粒物 电除尘: $1\mu\text{m} \leq \text{粒径} \leq 5\mu\text{m}$ 的颗粒物	燃煤烟气、水泥炉窑等含尘浓度较大的烟气净化
过滤技术	利用过滤材料(如纤维、滤纸等)将颗粒物从污染气流中分离	粒径 $\leq 1\mu\text{m}$ 的颗粒物	通风、空气调节等含尘浓度较低的气流净化
冷凝技术	利用物质在不同温度下具有不同的饱和蒸气压将处于气态的污染物转化为液态并与废气分离	挥发性有机化合物(VOCs)	有回收利用价值有机污染物且废气中该组分的体积分数 $\geq 10^{-2}$
吸收技术	利用污染气体组分在溶剂中溶解度的差异性使其与废气分离	各类气态污染物(如 SO_2 、 NO_x 、VOCs 等)	吸收剂对污染组分吸收容量大且吸收饱和后易实现两者分离
吸附技术	利用吸附剂表面存在的未平衡分子吸引力或化学键作用力将污染组分吸附分离	各类气态污染物(如 SO_2 、VOCs 等)	吸附剂对污染组分具有选择性且吸附饱和后易实现吸附剂再生

续表

技术名称	特点	适用对象	使用场所
氧化还原技术	利用氧化还原反应将废气中的污染组分彻底分解而去除	燃烧法: VOCs 光解/等离子: VOCs 生物法: 各类气态污染物 (如 SO ₂ 、NO _x 、VOCs 等)	无回收利用价值的污染组分或不适用其他技术处理的污染物

1.1 废气生物净化技术发展历史

生物净化技术在废水处理领域的应用已有 100 多年的历史,而在废气净化领域的应用时间较短。最早的雏形出现在 20 世纪 20 年代的德国,那时的废气生物净化是将废水处理厂产生的恶臭气体通过装有泥土的过滤器,使臭味得到明显降低。在当时认为是泥土吸附了气体中的臭味,并未意识到是微生物的作用^[5]。直到 1957 年,美国的 Pomeroy 申请了利用土壤过滤装置处理硫化氢(hydrogen sulfide, H₂S)的专利,并在美国加州污水处理厂成功建立起第一套土壤生物过滤装置^[6,7],这成为生物技术在废气净化领域应用的标志。早期的生物净化技术运用在控制污水处理过程中产生的臭气(主要成分为 H₂S 等)排放,以土壤床作为净化主体,废气经收集后由下而上通过土壤床,利用土壤中微生物的降解作用而得到净化。土壤床在运行初期效果较好,但后期会出现净化效果恶化现象,主要是由土壤酸化、土壤空隙被过量生长的微生物堵塞等造成的。

进入 20 世纪 70 年代后,随着一些国家对环境空气质量和废气排放的要求越来越严格,废气生物处理技术在欧洲有了较快的发展,其应用领域也由 H₂S 等恶臭废气扩展到挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)和其他有毒气态污染物的净化。改良的生物净化装置首先出现在 80 年代的德国和荷兰^[8]。为了克服土壤过滤床的缺点,支撑性的填料(如木屑、堆肥物等)被填充到生物净化装置中,使得床层压实、气流分布不均的缺点得到了有效克服。但填料酸化、因干燥而开裂等现象仍然存在。到了 80 年代末期和 90 年代初期,生物净化技术在欧洲得到了快速发展,出现了以无机滤料(如颗粒活性炭、陶瓷等)作为填料的生物净化装置,这些填料也可以与有机填料混合,能够延长床层填料的使用寿命。同时,在这一时期,荷兰学者 Ottengraf 推导了描述废气生物净化过程的动力学模型^[9],使得之前盲目的研究转变成较为系统的研究。据统计,当时约有近千座装置投入实际运行^[10]。

进入 21 世纪,由于该技术本身具有的经济优势和技术优势,关于其基础和应用的研 究变得异常活跃,研究内容也拓宽到气态污染物微生物代谢机理、混合污染

物处理、微生物生长及营养限制、过程模型推导等方面。生物法在含硫废气(硫醇、硫醚等)以及含 VOCs 废气(如苯系物、卤代烃等)的净化方面都有了不少的应用实例,并取得了较好的效果。据 2008 年统计,在欧洲已有约 8000 座废气生物净化工程装置正在运行,处理气量为 $1000 \sim 150000 \text{m}^3/\text{h}$,大部分 VOCs 处理效率 $\geq 90\%$,恶臭组分净化效率 $\geq 99\%$ ^[11]。

1.2 废气生物净化原理及系统组成

1.2.1 净化原理

20 世纪 70 年代初,Jennings 等在 Monod 方程的基础上提出了表征废气生物净化中单组分、非吸附性、可生化的气态有机物去除率数学模型^[12]。随后,荷兰科学家 Ottengraf 等^[9]依据吸收操作的传统双膜理论,在 Jennings 的数学模型基础上进一步提出了目前世界上影响较大的吸收-生物膜理论(图 1-1)。依据该理论,废气生物净化一般要经历以下几个步骤:

- (1) 废气中的污染物首先同水接触并溶解于水中(即由气膜扩散进入液膜);
- (2) 溶解于液膜中的污染物在浓度差的推动下进一步扩散到生物膜,进而被其中的微生物捕获并吸附;
- (3) 微生物将污染物转化为生物量、新陈代谢副产物以及其他一些无害的物质(如 CO_2 、 H_2O 、 N_2 、 S 和 SO_4^{2-} 等);
- (4) 反应产物 CO_2 、 N_2 等从生物膜表面脱附并反扩散进入气相中,而其他物质(S 和 SO_4^{2-} 等)随营养液排出或保留在生物体内。

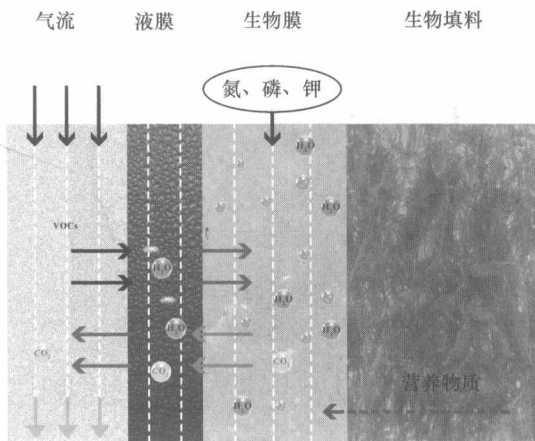
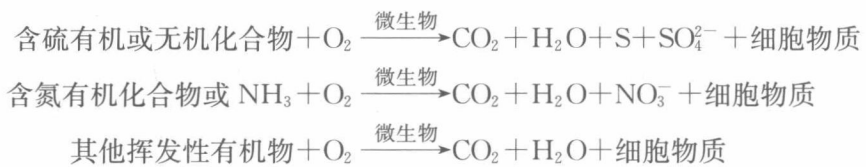


图 1-1 Ottengraf 提出的“吸收-生物膜理论”(后附彩图)

随着研究的深入,传统的吸收-生物膜理论不能很好地描述 VOCs 传质和生物

降解这一复杂的过程,因此一些研究者对该理论进行了优化修正。2002年,孙佩石等针对不溶或难溶于水的 VOCs 生物净化过程,提出了“吸附-生物膜理论”,即废气中的污染物直接扩散至生物载体或生物膜表面,被载体或生物膜吸附,微生物进而将污染物降解^[13,14]。与“吸收-生物膜理论”最大的区别在于,“吸附-生物膜理论”中的污染物可以不经历气液传质过程,解释了增大液体喷淋量并没有强化水溶性差的污染物的净化效果、生物膜表面液体滞留量即液膜厚度造成非水溶性污染物净化效率下降等实验现象。

实际上,废气生物净化是“吸收-生物膜”和“吸附-生物膜”两个理论的综合。在一个真实的废气生物净化系统中,由于受各种因素限制,生物载体表面的液膜分布是不均匀的,生物膜厚度也不一致,局部载体表面甚至无生物膜覆盖,如图 1-2 所示。废气在生物载体床层空隙间流动,气流中污染物质通过溶解(有液膜的地方)或吸附(无液膜的地方)过程,转移至载体或生物体表面,被生物体降解。微生物分解各类污染物的反应式为



通过以上反应可以看出,污染物成分会分解成二氧化碳和水,以及硫酸根、硝酸根、氯离子等无机酸根类物质,因此需要通过适当喷淋从生物载体床层移除这些酸性物质,以维持适宜的微生物生长环境。

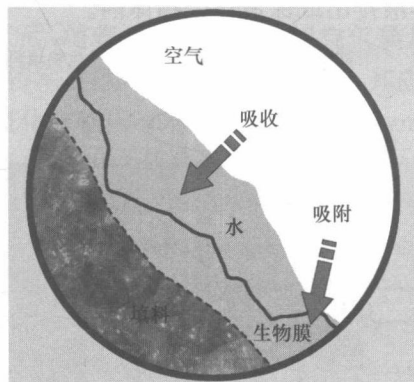


图 1-2 生物载体床层结构示意图(后附彩图)

1.2.2 生物净化系统的组成

一个完整的废气生物净化系统包括主体反应器、填充在反应器内的载体、附着

在载体上的微生物以及其他辅助构件(如气体分布器、液体分布器、营养液槽等)。根据微生物在有机废气处理过程中的存在形式以及液体喷淋量的大小,废气生物净化系统工艺可以分为生物过滤、生物滴滤和生物洗涤。相对而言,生物过滤与生物滴滤是目前研究和应用较多的两类废气生物净化技术,两者的最大区别在于填料类型(天然填料、人工合成填料)和循环液喷淋方式(间歇喷淋和连续喷淋)的不同。喷淋液的作用主要是提供微生物所需的除碳源以外的其他营养物质,调节微生物生长环境的 pH,保证微生物生存的环境湿度,及时移走代谢产物。虽然连续喷淋在一定程度上提高了滴滤工艺的复杂性、操作要求和运行费用,但却具有处理负荷高、适用范围广、运行工况实时调节等优点,因此生物滴滤工艺比生物过滤工艺具有更广的适用范围^[15]。

1. 反应器及净化工艺

1) 生物过滤

生物过滤是研究最早、最为成熟的废气生物净化工艺,早期主要用于减少恶臭气味^[16,17]。20世纪80年代以后,生物过滤工艺的应用范围已扩展到去除易被微生物降解的 VOCs 方面,如短链烃类、单环烃类、氯代烃、醇、醛、酮、羧酸以及含氮有机物等^[18-21],此外还被用于温室气体的降解研究^[22]。传统生物过滤反应器(图 1-3)内部填充或含有一定营养的填料,微生物附着在载体表面,配置增湿反应器。废气经增湿反应器增湿后,进入生物过滤反应器,与载体上附着的微生物接触,其中污染物被生物降解为水、二氧化碳和其他简单化合物,处理后的气体从生物过滤反应器排出。填料主要有土壤、泥炭、碎木块、陶粒、火山岩等,具有一定孔隙和养分。

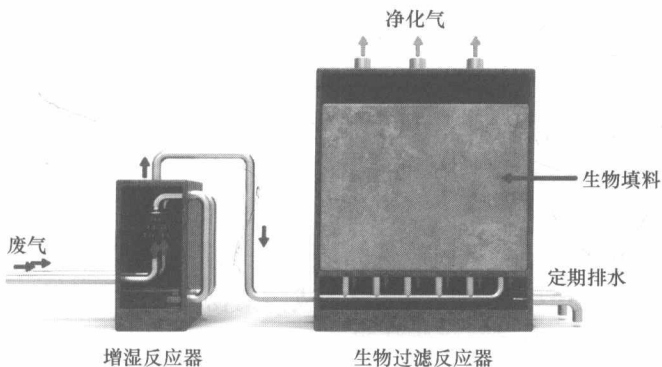


图 1-3 生物过滤工艺(后附彩图)

早期传统的生物过滤工艺无液体喷淋系统,无法原位调节生物载体床层的 pH 以及补充营养等。这种生物过滤系统工艺简单、造价低,但表面负荷小、占地

多,适合处理低浓度的恶臭或有机类废气^[23,24]。经多年研究与实践,现在的生物过滤工艺安装了液体喷淋系统,可以对生物载体床层进行实时补充营养、调节 pH 以及移走代谢产物,应用领域也有一定程度的拓展。

2) 生物滴滤

生物滴滤工艺是在传统生物过滤基础上发展起来的,工艺流程如图 1-4 所示。与传统生物过滤最大的区别是,生物滴滤工艺配置了液体喷淋系统,微生物吸收喷淋液中的养分后而快速繁殖,在载体表面附着,形成一定厚度的膜,废气中污染物与生物膜接触,作为微生物生长所需的能源和营养物质而被分解利用,净化后的气体从反应器排出。生物滴滤反应器使用的填料有粗碎石、各类化工吸收填料、发泡海绵等。这些填料材料呈生物惰性,具有孔隙大、一定的比表面积等特点^[25-27],一方面为污染物与生物膜接触提供了足够的界面,另一方面为气体通过和微生物附着生长提供了空间,减少了因生物生长引起的床层堵塞风险^[28-30]。

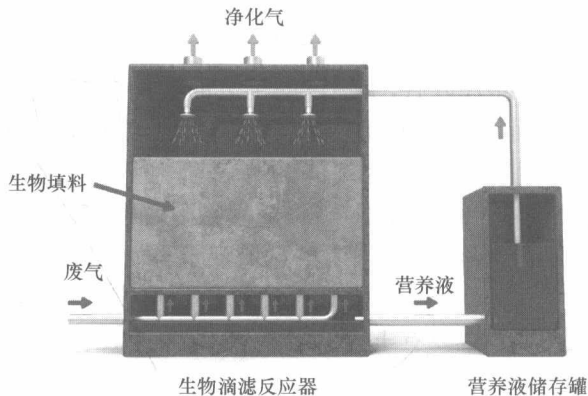


图 1-4 生物滴滤工艺(后附彩图)

由于喷淋液提供养分充足,单位床层生物量大,生物滴滤工艺处理负荷得到大幅提高,适合处理的污染物种类及废气浓度范围也相应扩大,实现了有机硫和卤代烃类废气的高效净化^[31-33]。

3) 生物洗涤

生物洗涤净化工艺由一个吸收洗涤塔和一个生物悬浮反应器构成(图 1-5)。废气首先在吸收洗涤塔中与吸收液接触完成污染物吸收净化过程,处理后的气体从吸收洗涤塔排出。吸收了污染物的吸收液进入生物再生池,通过生物的代谢作用将污染物分解或转化,再生后的吸收液由循环泵送至吸收塔,开始新一轮的吸收过程。

目前,常用的吸收洗涤设备主要有填料喷淋塔、多孔板式塔和鼓泡塔,吸收液依据污染物性质进行选择、配置。吸收液通过生物降解再生,成分以水为主,因此,