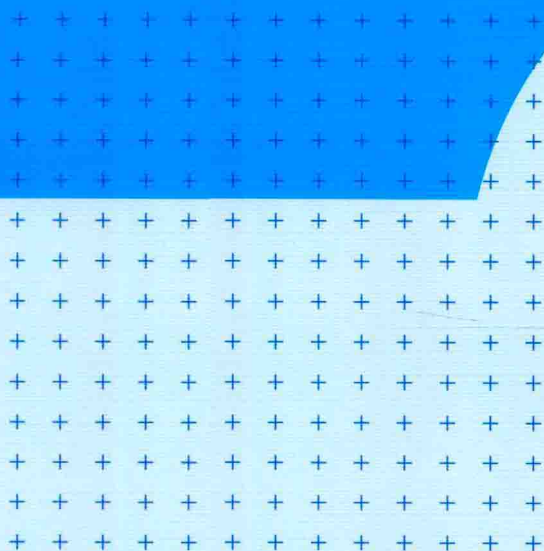




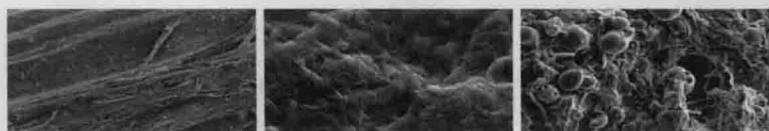
王 灿 席劲瑛 胡洪营 著 <<<<<<

工业有机废气紫外-生物联合处理技术 研究与工程实践

Research and Application of a Combined Ultraviolet-Biofilter System
for Industrial Organic Emission Treatment



化学工业出版社

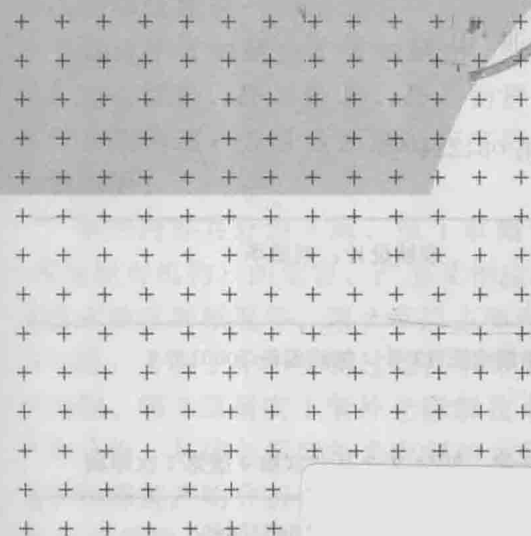


王 灿 席劲瑛 胡洪营 著



工业有机废气紫外-生物联合处理技术 研究与工程实践

Research and Application of a Combined Ultraviolet-Biofilter System
for Industrial Organic Emission Treatment



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是国内首部系统介绍紫外-生物联合技术理论及其在工业有机废气处理方面应用的专著。作者针对单一生物处理技术处理存在的不足,提出了紫外-生物联合技术,并围绕紫外-生物联合技术的处理效果、组合优势、作用机理、微生物群落解析、模型建立和工程应用等方面展开叙述。本书内容共分为9章,包括绪论、生物过滤塔对典型挥发性有机物(氯苯)的去除性能、紫外光降解对氯苯的去除特性及其产物分析、紫外-生物联合工艺对氯苯的去除性能、紫外光降解对生物过滤塔运行性能的影响机理、生物过滤塔中微生物的代谢特性及其群落结构、紫外-生物联合工艺的运行性能模拟、紫外-生物联合工艺处理有机废气的工程实践以及结论与建议。

本书可供从事废气处理技术研究的科研人员阅读,还可供环境科学与工程、大气污染控制工程、环境微生物学等专业的高校师生及相关学科研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业有机废气紫外-生物联合处理技术研究与工程实践/
王灿,席劲瑛,胡洪营著. —北京:化学工业出版社,
2014.5

ISBN 978-7-122-20495-0

I. ①工… II. ①王… ②席… ③胡… III. ①紫外线-
应用-工业废气-废气治理 IV. ①X701

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第081224号

责任编辑:满悦芝
责任校对:蒋宇

装帧设计:刘丽华

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)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张9¼ 字数181千字 2014年7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:38.00元

版权所有 违者必究

前言

工业有机废气已经成为重要的环境污染问题之一，其中含有多种有毒有害物质，危害着人体健康和生态环境。生物技术是一类重要的工业有机废气处理技术，它具有设备简单、操作方便、投资少、运行费用低、二次污染小、可同时处理多种不同性质组分混合气体等优点，但在实际的应用中仍存在一定的局限性，主要表现为处理构筑物占地面积较大、生物降解速率有限、承受负荷不能过高、对难生物降解的有机物处理效果较差等方面。因此，如何提高生物技术对难降解、高浓度有机废气的去除性能成为目前亟待解决的课题。

本书提出了新型的紫外-生物联合技术，即在传统生物工艺前增加紫外光降解预处理单元，通过紫外光降解的预处理，将部分难降解物质转化成可生化性较高的有机产物，一方面降低后续生物处理工艺的有机负荷，另一方面提高微生物对有机物的去除性能。该联合技术的提出，是对传统有机废气生物处理技术的变革和创新，推动了有机废气生物处理技术的发展。

目前，国内外对于工业有机废气的紫外-生物联合技术的理论研究和实际应用都处在进一步的发展之中，还没有专门的书籍对此进行系统介绍。本书结合作者的研究成果和工作经历，围绕紫外-生物联合技术的处理效果、组合优势、作用机理、微生物群落解析、模型建立和工程应用等方面展开系统阐述，力求做到理论与实践并重，反映该领域当前的研究成果和发展趋势。

本书内容共分为 9 章。第 1 章绪论，主要介绍工业有机废气主要成分（挥发性有机物）的危害、产生及相应的控制技术，并介绍了有机废气生物处理技术的发展概况等。第 2 章以主要有机废气生物处理技术（生物过滤技术）为对象，考察了单一生物过滤技术对典型挥发性有机物的处理性能及其存在的问题。第 3 章研究了紫外光降解技术对典型挥发性有机物的去除特性及其产物分析，具体包括紫外光降解的运行参数优化、典型挥发性有机物光降解途径和降解产物分析以及对光降解产物的生物毒性评价。第 4 章系统阐述了紫外-生物联合技术对典型挥发性有机物的去除性能和组合优势。第 5 章深入揭示了紫外光降解对生物工艺运行性能的影响机理。第 6 章介绍了生物工艺中微生物的代谢特性及其群落结构变化特征。第 7 章建立了紫外-生物联合技术的数学模型，模拟了联合技术对典型挥发性有机物的去除性能。第 8 章介

绍了紫外-生物联合技术处理有机废气的工程实践情况。第9章是对相关研究的建议和展望。

本书内容在研究过程中，得到了清华大学姚远、马超、沈茹乔、刘一平、刘云、于茵和天津大学张馨月、孔鑫等同学的帮助。同时，本书的部分研究成果也得到了国家自然科学基金委的项目支持。另外，化学工业出版社对本书的出版做了大量的工作，付出了辛勤的劳动，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，时间仓促，难免有疏漏和错误，敬请广大读者批评指正。

王 灿

2014年4月于北洋园

主要符号对照表

a	过滤塔填料层比表面积
A_{BF}	生物过滤单元横截面积
BF	生物过滤塔(Biofilter)
c_{A0}, c_{UVin}	紫外单元进口氯苯浓度
c_{A1}, c_{UVout}	紫外单元出口氯苯浓度
c_{A2}, c_{BFout}	生物过滤塔出口氯苯浓度
D	水中氯苯的扩散系数
D_f	生物膜中氯苯的扩散系数
d_e	填料层当量直径
ϵ	过滤塔填料层空隙率
ϵ_A	摩尔消光系数
EPS	胞外多聚物(extracell polymer substance)
EBRT	生物单元空塔停留时间(empty bed residence time)
h	普朗克常数
H	紫外反应器高度
H'	氯苯的亨利系数
I_{ave}	紫外反应器辐射能吸收速率
J_x	气相内氯苯进入水膜的扩散通量
K_s	饱和常数
l	生物过滤塔填料层高度
N	阿伏伽德罗常数
NH_3-N	氨氮(Ammonia nitrogen)
O_3	臭氧(Ozone)
O_3-BF	臭氧作用下的生物过滤塔(Ozone-Biofilter)
$\cdot OH$	羟基自由基(Hydroxy-group free radical)
Q	气体流量
$-r_{UV}$	紫外单元氯苯去除速率
$-r_{BF}$	生物过滤单元(塔)氯苯去除速率
$-r_{UV-BF}$	联合工艺氯苯总去除速率
RH	相对湿度(Relative Humidity)
TOC	总有机碳(Total Organic Carbon)
UV	紫外单元(Ultraviolet)
UV-BF	紫外-生物过滤联合工艺(Ultraviolet-Biofilter process)

UVRT	紫外单元空塔停留时间(UV reactor Residence Time)
V_{UV}	紫外光单元体积
V_{BF}	生物过滤单元体积
VOCs	挥发性有机物(Volatile Organic Compounds)
ν_m	最大比基质降解速率
X_f	生物膜内微生物浓度
Φ	量子效率
δ_b	生物膜平均厚度
ψ	增强因子

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 挥发性有机物的产生与控制	1
1.1.1 挥发性有机物的定义与分类	1
1.1.2 挥发性有机物的产生与危害	1
1.1.3 挥发性有机物的控制技术	2
1.1.4 挥发性有机物生物处理技术的原理与特点	3
1.2 废气生物处理技术的发展历史	3
1.3 描述生物反应器性能的基本概念	4
1.3.1 气体的流量、空塔流速、空塔停留时间	4
1.3.2 污染物的浓度、负荷	5
1.3.3 去除率和去除速率	5
1.3.4 反应器的压降	5
1.4 传统的气体生物处理工艺	6
1.4.1 生物过滤塔	6
1.4.2 生物洗涤塔	9
1.4.3 生物滴滤塔	10
1.4.4 活性污泥法	10
1.4.5 传统生物处理反应器的比较	11
1.5 紫外-生物过滤联合工艺的提出	11
1.6 紫外-生物过滤联合工艺研究进展	12
1.7 未来面临的问题	13
1.8 紫外-生物过滤联合工艺的研究思路与内容	14
1.8.1 研究目的	14
1.8.2 典型 VOCs 的选择	14
1.8.3 研究内容	15
1.8.4 技术路线	15
第 2 章 生物过滤塔对氯苯气体的去除性能	17
2.1 单一生物过滤系统及其研究方法	17

2.1.1	微生物的来源与驯化培养	17
2.1.2	实验装置	18
2.1.3	操作条件	19
2.1.4	分析方法	19
2.2	生物过滤塔对氯苯气体的去除效果	20
2.3	生物过滤塔运行性能的影响因素	21
2.3.1	营养液氮源的影响	21
2.3.2	空塔停留时间的影响	22
2.3.3	进口浓度的影响	23
2.4	生物过滤塔运行过程中存在的问题	24
2.4.1	高浓度底物的抑制作用	24
2.4.2	抗冲击负荷的能力	24
2.4.3	生物量的积累	25
2.4.4	生物气溶胶的形成	26
2.5	结论	27
第3章	紫外光降解对氯苯的去除特性及其产物分析	28
3.1	紫外光降解系统及其研究方法	28
3.1.1	试剂和紫外光源	28
3.1.2	实验装置和操作条件	29
3.1.3	氯苯紫外光降解(副)产物的捕集方法	29
3.1.4	分析方法	29
3.2	氯苯紫外光降解的影响因素	31
3.2.1	紫外光源的选择	31
3.2.2	进口浓度的影响	32
3.2.3	空塔停留时间的影响	32
3.2.4	气体湿度的影响	33
3.2.5	辐射功率的影响	34
3.3	氯苯紫外光降解的主要产物	34
3.3.1	水吸收液的溶解性组分	34
3.3.2	水吸收液的三维荧光光谱解析	35
3.3.3	水吸收液的主要阴离子	37
3.3.4	水吸收液的主要有机物	37
3.3.5	非水溶性(副)产物	39
3.4	氯苯紫外光降解途径	40
3.5	氯苯紫外光降解产物的定量分析	41

3.6	氯苯紫外光降解产物的生物毒性	42
3.7	结论	43
第4章	紫外-生物过滤联合工艺对氯苯的去除性能	44
4.1	紫外-生物过滤联合系统及其研究方法	44
4.1.1	实验装置	44
4.1.2	操作条件	45
4.1.3	分析方法	46
4.1.4	数据计算方法	46
4.2	紫外-生物过滤联合工艺对氯苯的去除性能	47
4.2.1	联合工艺氯苯去除性能随时间的变化	47
4.2.2	氯苯去除速率随进口负荷的变化	48
4.2.3	气体流量的影响	49
4.2.4	进口氯苯浓度的影响	49
4.2.5	UVRT/EBRT 的影响	50
4.2.6	冲击负荷的影响	50
4.3	紫外单元对生物过滤单元去除性能的影响	51
4.4	氯苯去除途径分析	52
4.5	紫外-生物过滤联合工艺的其他优势	55
4.5.1	联合工艺对尾气生物毒性的去除	55
4.5.2	联合工艺对臭氧的去除	56
4.5.3	联合工艺对尾气生物气溶胶的控制	56
4.5.4	联合工艺对生物量的控制	57
4.6	结论	58
第5章	紫外光降解对生物过滤塔运行性能的影响机理	59
5.1	紫外光降解产物-生物过滤系统及其研究方法	59
5.1.1	实验装置	59
5.1.2	操作条件	59
5.1.3	分析方法	60
5.2	紫外光降解产物对生物过滤塔运行性能的影响	62
5.2.1	生物过滤塔运行性能随时间的变化	62
5.2.2	酸类物质对生物过滤塔运行性能的影响	63
5.2.3	酚类物质对生物过滤塔运行性能的影响	64
5.3	紫外副产物（臭氧）对生物过滤塔运行性能的影响	65

5.4	紫外副产物（臭氧）对氯苯的直接去除效果	66
5.5	紫外光降解对填料层 pH 的影响	66
5.6	紫外光降解对生物膜特性的影响	67
5.6.1	紫外光降解对生物膜厚度的影响	67
5.6.2	紫外光降解对生物膜形态的影响	67
5.6.3	紫外光降解对 EPS 的影响	68
5.7	紫外光降解对填料层结构特性的影响	69
5.8	紫外单元对生物过滤单元的影响途径分析	71
5.9	结论	72

第 6 章 生物过滤塔中微生物的代谢特性及其群落结构 73

6.1	Biolog 方法和醣指纹法简介	73
6.2	实验装置与分析方法	74
6.2.1	实验装置与操作条件	74
6.2.2	微生物样品处理与 Biolog 分析	74
6.2.3	微生物醣的提取与分析	75
6.2.4	数据分析方法	78
6.3	微生物代谢特性分析	80
6.3.1	微生物代谢活性随时间的变化	80
6.3.2	微生物对不同碳源的代谢能力	81
6.3.3	微生物代谢特性的多样性和非相似性	83
6.3.4	微生物代谢特性的变化规律	84
6.4	微生物群落结构分析	85
6.4.1	微生物群落的醣指纹谱图	85
6.4.2	微生物群落的醣指纹变化	86
6.4.3	微生物群落的多样性和均一性变化	87
6.4.4	微生物群落结构的演变过程	88
6.5	微生物代谢特性与群落结构的相关性分析	89
6.6	小结	89

第 7 章 紫外-生物过滤联合工艺的运行性能模拟 91

7.1	紫外单元子模型	91
7.1.1	子模型的建立	91
7.1.2	子模型参数的确定与求解	93
7.1.3	子模型的计算过程	98

7.1.4	子模型的验证	98
7.2	生物过滤塔子模型	99
7.2.1	子模型的建立	99
7.2.2	子模型的简化与参数求解	100
7.2.3	子模型的计算过程	102
7.2.4	子模型的验证	103
7.3	联合工艺模型的建立	104
7.3.1	基于子模型的联合工艺运行性能的模拟	104
7.3.2	增强因子的引入及其确定	104
7.4	联合工艺运行性能的模拟与结果分析	106
7.5	主要参数敏感性分析	107
7.6	模型的应用	108
7.6.1	操作参数对运行性能的影响	108
7.6.2	主要设计参数的确定	109
7.6.3	联合工艺经济性初步分析	110
7.7	小结	113
第8章	紫外-生物过滤联合工艺处理有机废气的工程实践	115
8.1	工程概述	115
8.2	设计依据	115
8.2.1	废气中污染物种类、浓度和理化特性	115
8.2.2	设计规模	116
8.2.3	工程目标	118
8.2.4	设计相关资料与参考标准	118
8.3	工艺系统设计	118
8.3.1	设计原则	118
8.3.2	废气处理方法选择	118
8.3.3	系统工艺流程	119
8.3.4	工程选址	119
8.4	工艺单元与主要设备说明	121
8.4.1	紫外单元	121
8.4.2	生物单元	121
8.4.3	占地面积	122
8.4.4	主要设备表	122
8.5	运行效果	122
8.5.1	装置对总挥发性有机物的去除性能	122

8.5.2 温度对气体相对湿度的影响	123
8.5.3 进口负荷对处理单元的影响	124
8.6 工程投资	124
8.6.1 建设投资	124
8.6.2 运行成本	125
8.7 小结	125

第9章 结论与展望

9.1 研究结论	126
9.2 未来展望	128

参考文献

1. 王... ..	129
2. 王... ..	129
3. 王... ..	129
4. 王... ..	129
5. 王... ..	129
6. 王... ..	129
7. 王... ..	129
8. 王... ..	129
9. 王... ..	129
10. 王... ..	129
11. 王... ..	129
12. 王... ..	129
13. 王... ..	129
14. 王... ..	129
15. 王... ..	129
16. 王... ..	129
17. 王... ..	129
18. 王... ..	129
19. 王... ..	129
20. 王... ..	129
21. 王... ..	129
22. 王... ..	129
23. 王... ..	129
24. 王... ..	129
25. 王... ..	129
26. 王... ..	129
27. 王... ..	129
28. 王... ..	129
29. 王... ..	129
30. 王... ..	129
31. 王... ..	129
32. 王... ..	129
33. 王... ..	129
34. 王... ..	129
35. 王... ..	129
36. 王... ..	129
37. 王... ..	129
38. 王... ..	129
39. 王... ..	129
40. 王... ..	129
41. 王... ..	129
42. 王... ..	129
43. 王... ..	129
44. 王... ..	129
45. 王... ..	129
46. 王... ..	129
47. 王... ..	129
48. 王... ..	129
49. 王... ..	129
50. 王... ..	129
51. 王... ..	129
52. 王... ..	129
53. 王... ..	129
54. 王... ..	129
55. 王... ..	129
56. 王... ..	129
57. 王... ..	129
58. 王... ..	129
59. 王... ..	129
60. 王... ..	129
61. 王... ..	129
62. 王... ..	129
63. 王... ..	129
64. 王... ..	129
65. 王... ..	129
66. 王... ..	129
67. 王... ..	129
68. 王... ..	129
69. 王... ..	129
70. 王... ..	129
71. 王... ..	129
72. 王... ..	129
73. 王... ..	129
74. 王... ..	129
75. 王... ..	129
76. 王... ..	129
77. 王... ..	129
78. 王... ..	129
79. 王... ..	129
80. 王... ..	129
81. 王... ..	129
82. 王... ..	129
83. 王... ..	129
84. 王... ..	129
85. 王... ..	129
86. 王... ..	129
87. 王... ..	129
88. 王... ..	129
89. 王... ..	129
90. 王... ..	129
91. 王... ..	129
92. 王... ..	129
93. 王... ..	129
94. 王... ..	129
95. 王... ..	129
96. 王... ..	129
97. 王... ..	129
98. 王... ..	129
99. 王... ..	129
100. 王... ..	129

第1章

绪论

1.1 挥发性有机物的产生与控制

1.1.1 挥发性有机物的定义与分类

挥发性有机物（Volatile Organic Compounds, VOCs）是一类易挥发有机物的总称，通常是指常温下饱和蒸气压大于 70Pa，常压下沸点在 260℃ 以下的有机化合物（Noel, 2000）。

按照有机物的结构，可将 VOCs 分为芳香烃、芳香烃衍生物、脂肪烃、脂肪烃衍生物四种类型，如表 1.1 所示。

表 1.1 挥发性有机物的分类

类 型	典型物质
芳香烃	苯 甲苯 乙苯 二甲苯 氯苯 氟苯
芳香烃衍生物	苯酚 苯胺 氯酚
脂肪烃	乙烯 环戊烯 正己烷 二氯甲烷 三氯乙烯
脂肪烃衍生物	异戊二醇 甲醛 丙酮 丙酸 醋酸丁酯

1.1.2 挥发性有机物的产生与危害

VOCs 种类繁多，来源广泛，从排放量来看，已成为目前仅次于 CO_x、NO_x 和 SO_x 的第四大类大气污染物（郝吉明等，2002）。其主要来源如表 1.2 所示。

由于 VOCs 的成分复杂，其表现出的毒性、刺激性、致癌作用和具有的特殊气味能导致人体呈现种种不适反应，并对人体健康造成较大影响。挥发性有机物污染的危害主要表现在以下两个方面。

① 危害人体健康。许多 VOCs 对人体或生物体具有致病性和毒性，如苯和甲苯会导致神经障碍，氯苯类物质会干扰人的免疫系统，有些 VOCs 甚至会对人体

产生致癌作用。表 1.3 列举了 VOCs 对人体产生的各类不良影响。

② 造成环境污染。VOCs 可能会引起全球性大气污染问题，如氯氟碳（CFCs）等物质会导致温室效应和臭氧层破坏；部分 VOCs 可能引起光化学烟雾；一些有毒 VOCs 通过气体迁移，在土壤和地下水中累积，破坏生态环境。

■ 表 1.2 挥发性有机物的主要来源（席劲瑛，2005）

类别	子类别	典型行业
工业源	化工产品生产和储运	炼油、炼焦、合成制药、合成橡胶、汽油补给
	有机溶剂使用	涂料、表面喷涂、干洗、溶剂脱脂、油墨印刷、冶金铸造
	化石燃料燃烧	火力发电
	食品加工	屠宰、肉类加工、水产加工
	废物处理	污水处理、垃圾填埋与焚烧
交通源	交通工具排放	
农业源	畜禽养殖	养鸡、养猪、养牛
生活源	室内装修	
自然源	森林火灾	

■ 表 1.3 VOCs 对人体产生的各类不良影响（李建，2002）

影响	症状	可致病的 VOCs
自律神经障碍	出汗异常、手足发冷、易疲劳	丁醇、丙酮、烃类
神经障碍	失眠、烦躁、痴呆、没精神	苯、甲苯、环己酮
末梢神经障碍	运动障碍、四肢末端感觉异常	丙酮
呼吸道障碍	喉痛、口干、咳嗽	醋酸丁酯、200 号溶剂
消化器官障碍	腹泻、便秘、恶心	甲醛、200 号溶剂、甲苯、二甲苯
视觉障碍	结膜发炎	醋酸丁酯、甲醛、丙酮
免疫系统障碍	皮炎、哮喘、自身免疫病变	氯苯、200 号溶剂

1.1.3 挥发性有机物的控制技术

目前，VOCs 的控制技术种类较多，从控制的目的进行划分，可以分为分解技术和回收技术两大类。其中，回收技术主要以物理控制技术为主，具体包括吸附法、冷凝浓缩法和膜分离法等。而分解技术从性质上又可以分为物化控制技术和生物控制技术。各类技术的具体工艺和方法如表 1.4 所示。

■ 表 1.4 VOCs 控制技术分类（席劲瑛，2005）

分类	子类	处理技术
分解技术	物化处理方法	焚烧、催化氧化、光分解、等离子体分解
	生物处理方法	生物过滤法、生物滴滤法、生物洗涤法
回收技术	物理处理方法	吸附、吸收、冷凝浓缩、膜分离

在选择具体的处理工艺和方法时,应该考虑的因素包括:污染源特性(气体流量,污染物浓度,排放温度),目标污染物的回收潜力,处理目标,不同技术的处理效果、投资和运行成本、占地大小等。

1.1.4 挥发性有机物生物处理技术的原理与特点

各种 VOCs 处理技术的适用范围如图 1.1 所示。从图中可以看出, VOCs 的生物处理技术一般适于低浓度、大流量气体的处理,这种情况下废气中的 VOCs 难以或不宜再进行回收。与其他物理、化学处理方法相比, VOCs 气体的生物处理技术利用了不同微生物的代谢功能,将目标污染物分解为基本无害的小分子物质(如水、二氧化碳等)。其优点主要有:设备简单、操作方便;投资少、运行费用低;二次污染小、可处理含不同性质组分的混合气体等。截至 1994 年,德国 78% 的有机恶臭废气处理设施都采用了生物处理技术(Burgess, et al, 2001),表明该技术是 VOCs 处理中一类较为常用的技术(席劲瑛, 2005)。

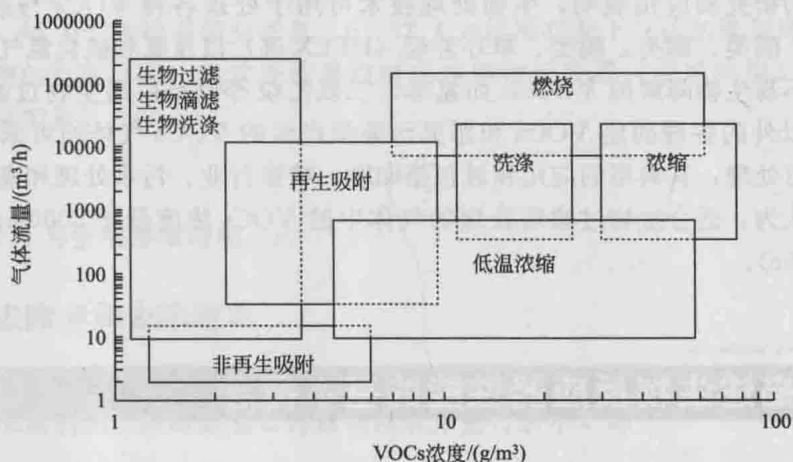


图 1.1 各种 VOCs 处理技术的适用范围(来源: Noel de Nevers, 2000)

废气生物处理基本原理比较复杂,污染物的去除过程包括从气相到水相的转移,从水相到生物膜的扩散,进入生物膜的污染物可能会被生物膜中的细胞或细胞本身所分泌的胞外多聚物所吸收,或者被反应器内部的介质(填料)所吸附。最后,这些污染物通过微生物的代谢,转化为生物质、二氧化碳和水或者其他的代谢副产物。如果废气中含有氯或硫元素,产物中还会出现氯化物和硫酸盐。其中,生物降解过程往往通过一个复杂的生态系统得以实现,其中涉及多种不同类型的微生物。

1.2 废气生物处理技术的发展历史

与其他废气处理技术相比,生物处理技术具有较长的发展历史。20 世纪 50 年

代,在美国加利福尼亚州和欧洲的西德建成了一些土壤过滤床,并被用于处理污水处理厂散发出的含硫化氢的恶臭气体。早期的形式是敞开式的土壤生物滤床,后来发展为封闭式的生物过滤塔。

进入 20 世纪 60 年代和 70 年代,在欧洲的一些国家,尤其是西德和荷兰,生物过滤塔被认为是一种最具实用性的有机废气控制技术,并得以广泛应用。其处理对象主要是喷涂、堆肥、食品加工、畜禽养殖、污水处理等过程产生的恶臭气体和 VOCs 气体。

20 世纪 80 年代后,生物处理技术的应用领域扩展到控制 VOCs 和其他含有毒污染物的废气,如化工厂和印刷车间排放的气体等。除欧美国家外,世界其他各国的研究者也先后对此工艺展开了研究和应用。

我国一些研究单位从 20 世纪 90 年代中后期开始,先后开展了废气生物处理技术的研究,并出现了一些工程应用实例。天津大学、清华大学、同济大学、昆明理工大学、西安建筑大学等单位都曾进行过 VOCs 生物处理技术的研究。

已有的研究和应用表明,生物处理技术可用于处理各种 VOCs 与恶臭气体,包括醇类、醛类、酮类、酯类、单环芳烃(BTEX 等)以及氨和硫化氢气体等。其中,一些不易生物降解的 VOCs,如氯苯、二氯乙烷等也可以用生物过滤塔处理。除交通源以外的各种固定 VOCs 和恶臭污染源产生的 VOCs 气体均可采用生物处理技术进行处理,其典型的应用领域包括印刷、喷涂行业、污水处理和畜禽养殖业等。一般认为,适合生物过滤塔处理的气体中的 VOCs 浓度低于 $3000\text{mg}/\text{m}^3$ (席劲瑛, 2005c)。

1.3 描述生物反应器性能的基本概念

1.3.1 气体的流量、空塔流速、空塔停留时间

衡量反应器处理废气风量的能力,可以用气体流量、空塔流速或者空塔停留时间来表示。

气体流量(Q)是指单位时间内通过反应器的气体体积。

$$Q = \frac{V}{t}$$

式中, V 为风量, m^3 ; t 为时间, h 。

空塔流速(u)是指反应器断面上通过的气体流速。

$$u = \frac{Q}{A}$$

式中, A 为反应器断面面积, m^2 。

空塔停留时间(τ)是指单位体积气体通过反应器的平均时间。