

LOW TEMPERATURE PLASMA TECHNOLOGY FOR
ORGANIC WASTE GAS PURIFICATION

低温等离子体 净化有机废气技术

杜长明 编著

非外借



化学工业出版社

LOW TEMPERATURE PLASMA TECHNOLOGY FOR
ORGANIC WASTE GAS PURIFICATION

低温等离子体 净化有机废气技术

杜长明 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以有机废气与恶臭气体等离子体净化的前沿研究成果为主要内容，共分为 21 章。主要介绍了挥发性有机物与有机废气，等离子体与等离子体净化有机废气，电子束净化器、辉光放电等离子体净化器、介质阻挡放电等离子体净化器、电晕放电等离子体净化器、滑动弧放电等离子体净化器、射频放电等离子体净化器、微波等离子体净化器，等离子体与其他方法的联合技术，包括等离子体协同光催化技术、吸附与等离子体组合净化技术、等离子体与生物过滤组合处理技术，基于有机废气的结构分类介绍等离子体净化效果，包括等离子体分解烷类气体、等离子体净化醛类气体、等离子体净化苯系物、等离子体净化醇类气体、等离子体净化酮类气体、等离子体净化含氟烃类化合物、等离子体净化含氯烃类化合物、等离子体净化含氮恶臭气体、等离子体净化含硫恶臭气体。

本书具有较强的技术性和针对性，可作为从事环境、能源等领域的科研人员和工程技术人员的参考书，也可作为高等学校环境科学与工程、能源工程及相关专业师生的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

低温等离子体净化有机废气技术/杜长明编著. —北京:
化学工业出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-122-31022-4

I. ①低… II. ①杜… III. ①低温-等离子体-应用-工业
废气-废气净化 IV. ①X701

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 284122 号

责任编辑: 刘兴春 刘 婧
责任校对: 王 静

装帧设计: 韩 飞

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 24¼ 字数 594 千字 2017 年 12 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: 98.00 元

版权所有 违者必究

前言

随着工业发展和城市化进程,世界范围内的大气污染越来越严重。大气污染物质中,除颗粒性污染物(烟尘、粉尘、总悬浮颗粒)外,气态污染物(CO_2 、 SO_2 、 NO_x 和烃类化合物)是主要污染成分。挥发性有机物(VOCs)作为碳化合物污染之一,给生态环境和人体健康(致畸、致癌等)带来了严重危害,对全球经济发展乃至人类的生存带来了严峻的挑战。有机废气净化技术的选择取决于多项参数,如污染物种类、浓度、气体流速、法规标准。若回用成本低于采购原料挥发性有机物成本,在这种情况下,非破坏性方法是较好的选择,如冷凝、膜分离、吸收、吸附等。若挥发性有机物无明显回用价值,或在挥发性有机物与有毒化合物混合的情况下,需选用销毁方法,如热氧化、催化氧化、生物过滤法、光催化和低温等离子体等。

低温等离子体是一种可以减少挥发性有机物排放和其他工业废气的新兴技术,已经在大规模的排放物处理中得到有效应用,包括脂肪族烃、氯氟烃、甲基腈、碳酰氯、甲醛、硫和有机磷化合物、硫和氮氧化物,这样的等离子体可以通过各种放电(辉光放电、电晕放电、介质阻挡放电、射频放电、滑动弧放电等)产生。气体放电产生等离子体,其中主要的电能(大于99%)用于产生高能电子,而不是加热全部的气流。这些高能电子通过载气分子的电子轰击分裂、激发、电离产生激发粒子、自由基、离子和额外的电子。这些活性粒子则可氧化、还原或分解污染物分子,并不需要加热全部气流来破坏污染物。另外,低温等离子体技术具有高选择性和相对低的维护要求,高选择性使其在排放控制时有相对低的能耗,而低的维护要求减少了每年的维护费。

本书对放电等离子体发生的基本原理和机理、发生器类型、物理化学特征到有机物降解机理与副产物风险、工程案例均做了详细论述。

编著者一直致力于环境等离子体技术的研发工作,积累了大量公开发表和未发表的等离子体技术资料和丰富的工程实践经验。现将等离子体处理有机废气的原理与技术前沿成果汇总,供与读者参考,希望有更多的研究者关注环境等离子体技术。

感谢国家自然科学基金(50908237)、广东省科技计划项目(2015A020215013)、广州市科技计划项目(201709010070)和中山大学本科教学改革与教学质量工程项目“重点教材建设”项目的研究资助;同时感谢给予帮助和鼓励的老师、同事和同行。另外,还要感谢课题组研究生所付出的辛勤劳动。

限于编著者水平,不妥与疏漏之处在所难免,恳请读者及同行谅解和帮助指正。

杜长明
2017年6月

目 录

第 1 章 挥发性有机物与有机废气

1

1.1 挥发性有机物	1
1.1.1 挥发性有机物定义	1
1.1.2 挥发性有机物来源	4
1.1.3 挥发性有机物危害	5
1.2 我国挥发性有机物的污染状况及法规	6
1.3 挥发性有机物源强核算	7
1.3.1 挥发性有机物产生源强的核算方法	7
1.3.2 挥发性有机物排放源强的核算方法	8
1.4 有机废气治理技术	8
1.4.1 冷凝法	8
1.4.2 膜分离法	9
1.4.3 吸收法	9
1.4.4 吸附法	9
1.4.5 热氧化法	9
1.4.6 催化氧化法	9
1.4.7 生物过滤法	10
1.4.8 光催化法	10
1.4.9 低温等离子体法	10
参考文献	11

第 2 章 等离子体与等离子体净化有机废气

12

2.1 等离子体	12
2.1.1 等离子体定义与特征	12
2.1.2 等离子体分类	12
2.1.3 低温等离子体应用	14
2.2 低温等离子体净化有机废气	14
参考文献	15

第 3 章 电子束净化器

17

3.1 电子束原理	17
-----------------	----

3.2 电子束反应器类型	18
3.2.1 电子束反应器	19
3.2.2 电子束协同催化反应器	20
3.3 电子束净化有机废气影响参数	23
3.3.1 初始浓度	23
3.3.2 湿度	23
3.3.3 背景气体	23
3.3.4 辐照剂量	24
3.4 电子束处理 VOCs 机理	24
3.5 工业应用实例	25
3.6 展望	26
参考文献	27

第4章 辉光放电等离子体净化器

30

4.1 辉光放电原理	30
4.2 辉光放电反应器类型	32
4.2.1 针板型放电	32
4.2.2 微空心阴极管放电	33
4.2.3 毛细管辉光放电	35
4.3 辉光放电净化有机废气影响参数	38
4.3.1 进气流速和停留时间	38
4.3.2 初始浓度	38
4.3.3 针数的影响	39
4.3.4 能量密度	39
4.4 辉光放电处理 VOCs 机理	40
4.5 辉光等离子体处理系统的比较分析	41
参考文献	42

第5章 介质阻挡放电等离子体净化器

45

5.1 介质阻挡放电的发展历程	45
5.2 介质阻挡放电原理	46
5.3 介质阻挡放电反应器	47
5.3.1 线筒型	47
5.3.2 筒筒型	49
5.3.3 板板型	50
5.3.4 催化剂填充型	51
5.3.5 吸附剂填充型	54
5.3.6 多级串联型	56

5.3.7 多级并联型	58
5.4 技术影响参数	58
5.4.1 气体流速	58
5.4.2 VOCs 初始浓度	58
5.4.3 水汽湿度	59
5.4.4 背景气体成分	60
5.4.5 反应器结构	60
5.4.6 供给电压和频率	61
5.4.7 电极尺寸和材料	61
5.4.8 介质性质	62
5.4.9 温度	62
5.4.10 催化剂种类	63
5.4.11 催化剂位置	64
5.4.12 UV 光源	64
5.4.13 能量密度	65
5.4.14 VOCs 混合物	65
5.5 降解产物	69
5.5.1 气态产物分析	69
5.5.2 液态和固态产物分析	71
5.5.3 能耗和能效	72
5.6 VOCs 降解机理	73
5.6.1 活性粒子生成	73
5.6.2 VOCs 的分解机理	74
5.7 工程案例	78
5.7.1 沥青烟气净化	78
5.7.2 H_2S 和 CS_2 净化	79
5.8 结论和展望	81
参考文献	81

第6章 电晕放电等离子体净化器

90

6.1 电晕放电原理	91
6.2 电晕放电等离子体反应器类型	92
6.2.1 正电晕和反电晕	92
6.2.2 脉冲电晕	93
6.2.3 线板电极	96
6.2.4 线筒电极	97
6.2.5 针板电极	99
6.2.6 线圈式电极	100
6.2.7 喷嘴式电极	100

6.2.8	刀板电极	101
6.2.9	串并联多极系统	102
6.3	技术影响参数	104
6.3.1	反应器结构	104
6.3.2	电极形状与材料	104
6.3.3	串并联级数	105
6.3.4	峰值电压	106
6.3.5	水汽湿度	106
6.3.6	背景气体氧气浓度	107
6.3.7	填充介质	107
6.3.8	反应器温度	108
6.4	降解结果分析	108
6.4.1	气态产物分析	108
6.4.2	液态或固态产物副产物分析	110
6.5	能耗与能效分析	111
6.6	技术与经济结果分析	112
6.7	电晕放电放电降解 VOCs 机理	112
6.8	工业应用案例	116
6.8.1	烟气净化	116
6.8.2	造纸废气处理	117
6.8.3	垃圾焚烧尾气净化	118
6.9	电晕放电等离子体净化器对比与展望	118
	参考文献	121

第 7 章 滑动弧放电等离子体净化器

127

7.1	滑动弧放电原理	127
7.2	滑动弧放电等离子体反应器	129
7.2.1	刀形电极	129
7.2.2	多电极	132
7.2.3	旋转电弧放电	135
7.2.4	龙旋风电弧放电	138
7.2.5	缩放电极电弧放电	140
7.2.6	滑动弧放电联合其他技术	140
7.3	技术参量	143
7.3.1	气体流速	143
7.3.2	VOCs 初始浓度	144
7.3.3	水汽湿度	144
7.3.4	背景气体成分	145
7.3.5	反应器结构	146

7.3.6	供给电压和频率	147
7.3.7	电极尺寸和材料	148
7.4	降解产物	148
7.4.1	气态产物分析	148
7.4.2	液态和固态产物分析	150
7.5	能耗和能效分析	152
7.6	滑动弧放电等离子体降解 VOCs 机理	153
7.7	工程案例	157
7.8	比较和展望	159
	参考文献	162

第 8 章 射频放电等离子体净化器

167

8.1	射频放电原理	167
8.2	射频放电等离子体反应器	169
8.2.1	电感耦合等离子体反应器 (ICP)	169
8.2.2	电容耦合等离子体反应器 (CCP)	171
8.3	技术影响参数与降解结果	173
8.3.1	操作压力	173
8.3.2	输入功率	174
8.3.3	辅助气体	175
8.3.4	电极材料和结构	175
8.3.5	气态产物结果分析	176
8.3.6	固态产物分析	177
8.4	射频放电降解 VOCs 机理	177
8.5	展望	178
	参考文献	178

第 9 章 微波等离子体净化器

181

9.1	微波放电原理	181
9.2	微波放电等离子体反应器类型	182
9.2.1	常规微波等离子体炬射流	182
9.2.2	阶梯型谐振腔微波等离子体射流	184
9.2.3	微波等离子体燃烧器	186
9.2.4	改进的低压微波等离子体反应器	186
9.2.5	双焦等离子体源微波反应器	187
9.3	技术影响参数	188
9.3.1	微波功率	188
9.3.2	背景气体	189

9.3.3	初始浓度	189
9.3.4	喷嘴内径与气体流速	190
9.3.5	水蒸气的含量	190
9.3.6	处理温度	190
9.4	产物分析	191
9.4.1	气态产物	191
9.4.2	固态产物	191
9.5	微波放电降解 VOCs 机理	192
9.6	不同微波等离子体放电处理效果评价	193
	参考文献	194

第10章 等离子体协同光催化技术

197

10.1	等离子体-紫外光催化技术机理	197
10.2	等离子体-紫外光催化反应器	198
10.3	工艺影响参数	199
10.3.1	入口浓度	199
10.3.2	湿度	200
10.3.3	输入功率	200
10.3.4	处理顺序	200
10.4	工程案例	201
10.5	总结与展望	202
	参考文献	203

第11章 吸附与等离子体组合净化技术

204

11.1	吸附与等离子体组合关键技术	204
11.1.1	吸附-分离浓缩-等离子体分解	204
11.1.2	吸附富集-等离子体原位分解再生	205
11.2	吸附与等离子体耦合机制	209
11.3	净化效果影响因素分析	210
11.3.1	吸附剂	210
11.3.2	解吸气体	210
11.3.3	放电功率	211
11.3.4	放电处理时间	211
11.3.5	污染物种类和浓度	211
11.4	工程实例	212
11.4.1	吸附-分离浓缩-等离子体分解系统的应用	212
11.4.2	吸附富集-等离子体原位分解再生系统的应用	212
11.5	结论与展望	213

参考文献	213
------------	-----

第12章	等离子体与生物过滤组合处理技术	215
-------------	------------------------	------------

12.1	等离子体与生物过滤耦合机理	215
12.2	等离子体与生物过滤组合反应器结构	216
12.2.1	塔式等离子体-生物过滤组合系统	217
12.2.2	滤池式等离子体-生物过滤组合系统	218
12.3	工艺影响参数	219
12.3.1	污染物浓度	219
12.3.2	运行和停留时间	219
12.4	结论和展望	220
参考文献		220

第13章	等离子体分解烷类气体	222
-------------	-------------------	------------

13.1	含烷类气体的危害	222
13.2	等离子体处理含烷类气体系统	222
13.2.1	电晕放电	222
13.2.2	介质阻挡放电	223
13.2.3	滑动弧放电	223
13.2.4	射频放电	224
13.3	技术影响参数	225
13.3.1	初始浓度	225
13.3.2	气体流量	225
13.3.3	催化剂	225
13.3.4	温度	226
13.3.5	比能耗	226
13.3.6	放电功率	227
13.3.7	烃类化学结构	227
13.3.8	空气湿度	227
13.3.9	氧气浓度	227
13.3.10	载气	228
13.4	降解产物与降解机理	228
13.5	展望	229
参考文献		229

第14章	等离子体净化醛类气体	231
-------------	-------------------	------------

14.1	含醛废气的来源与处理	231
------	------------------	-----

14.2	等离子体处理含醛气体系统	231
14.2.1	电晕放电	231
14.2.2	介质阻挡放电	232
14.2.3	高频电容耦合放电	232
14.3	净化技术影响参数	232
14.3.1	反应器结构	232
14.3.2	电压	233
14.3.3	VOCs 初始浓度	234
14.3.4	背景气体成分	234
14.3.5	VOCs 化学结构	235
14.3.6	催化剂	236
14.3.7	气体流速	237
14.3.8	温度	237
14.3.9	输入能量	238
14.4	降解产物与降解机理	239
14.5	展望	242
	参考文献	243

第15章 等离子体净化苯系物

245

15.1	苯系物挥发性有机物的来源与处理	245
15.1.1	来源	245
15.1.2	危害	245
15.1.3	处理技术	246
15.2	等离子体处理苯系物系统	247
15.2.1	电晕放电	247
15.2.2	介质阻挡放电	248
15.2.3	滑动弧放电	249
15.2.4	射频放电	249
15.2.5	辉光放电	249
15.2.6	表面放电	250
15.3	净化技术影响参数	250
15.3.1	施加电压与电场强度	250
15.3.2	输入电流	251
15.3.3	频率	252
15.3.4	输入能耗	252
15.3.5	反应器类型	253
15.3.6	反应器尺寸与材料	254
15.3.7	电极形状	255
15.3.8	电极材料	255

15.3.9	载气	256
15.3.10	气体停留时间和气体流速	256
15.3.11	苯系物种类	257
15.3.12	单独 VOCs 与混合 VOCs	258
15.3.13	初始浓度	258
15.3.14	湿度	259
15.3.15	催化剂	260
15.3.16	各反应条件影响程度比较	264
15.4	降解过程产物与降解机理	264
15.4.1	苯降解机理	264
15.4.2	甲苯降解机理	266
15.4.3	对二甲苯降解机理	271
15.4.4	邻二甲苯降解机理	272
15.4.5	苯乙烯降解机理	272
15.5	风险评价	274
15.5.1	苯降解副产物	274
15.5.2	苯乙烯和邻二甲苯降解副产物	275
15.6	应用测试	275
	参考文献	276

第16章 等离子体净化醇类气体

284

16.1	醇类气体的特征与净化	284
16.1.1	来源与特征	284
16.1.2	净化技术	284
16.2	等离子体处理含醇气体系统	285
16.2.1	电晕放电	285
16.2.2	介质阻挡放电	286
16.2.3	微波放电	287
16.2.4	射频放电	287
16.3	降解产物与降解机理	287
16.4	净化技术影响参数	289
16.4.1	初始浓度	289
16.4.2	温度	289
16.4.3	含水量	289
16.4.4	连续吸附/再生和连续处理	290
16.4.5	输入功率	290
16.4.6	催化剂	291
16.4.7	气体流速	291
16.4.8	载气成分	292

16.4.9 放电电压	292
16.4.10 放电频率	292
16.4.11 背景气体	292
16.5 展望	292
参考文献	293

第17章 等离子体净化酮类气体 295

17.1 含酮气的来源与处理	295
17.2 等离子体处理含酮气体系统	295
17.2.1 电晕放电	295
17.2.2 介质阻挡放电	296
17.2.3 高压辉光放电	296
17.3 净化技术影响参数	296
17.3.1 反应器结构	296
17.3.2 电流	298
17.3.3 湿度	298
17.3.4 背景气体成分	299
17.3.5 输入功率	299
17.3.6 能量密度	300
17.3.7 催化剂	301
17.4 降解产物与降解机理	302
17.5 展望	305
参考文献	306

第18章 等离子体净化含氟烃类化合物 308

18.1 含氟挥发性有机物的来源与处理	308
18.2 等离子体处理含氟挥发性有机物系统	308
18.2.1 介质阻挡放电	308
18.2.2 滑动弧放电	309
18.2.3 电晕放电	309
18.2.4 微波放电	309
18.2.5 辉光放电	309
18.3 净化技术影响参数	310
18.3.1 施加电压	310
18.3.2 输入能量	311
18.3.3 反应器结构	311
18.3.4 背景气体	312
18.3.5 气体流速	312

18.3.6	初始浓度	313
18.3.7	停留时间	313
18.3.8	催化剂	314
18.3.9	湿度	314
18.3.10	温度	314
18.4	降解过程产物与降解机理	315
18.4.1	C_2F_6 的分解机理	315
18.4.2	CCl_2-CClF_2 的分解机理	315
18.4.3	CF_4 的分解机理	316
18.4.4	$C_2H_2F_4$ 的分解机理	317
18.4.5	SO_2F_2 的分解机理	319
18.4.6	CF_2Br_2 的分解机理	319
18.4.7	NF_3 的分解机理	320
18.4.8	SF_6 的分解机理	322
18.5	展望	322
	参考文献	323

第19章 等离子体净化含氯烃类化合物

325

19.1	含氯挥发性有机物的来源与处理	325
19.2	等离子体处理含氯挥发性有机物系统	325
19.2.1	电晕放电	325
19.2.2	介质阻挡放电	326
19.2.3	滑动弧放电	326
19.2.4	微波放电	326
19.2.5	辉光放电	326
19.3	净化技术影响参数	327
19.3.1	背景气体	327
19.3.2	温度	327
19.3.3	初始浓度	327
19.3.4	含水量	328
19.3.5	放电功率	328
19.3.6	气体流速	329
19.3.7	催化剂	330
19.3.8	能量密度	330
19.3.9	处理时间	331
19.3.10	施加电压	332
19.3.11	脉冲与频率	332
19.3.12	污染物种类	333
19.3.13	气体检测器管子长度	333

19.4	降解机理分析	333
19.4.1	C_2HCl_3 分解机理	333
19.4.2	CH_2Cl_2 分解机理	335
19.4.3	$C_2H_3Cl_3$ 分解机理	335
19.4.4	CCl_4 和 $CHCl_3$ 分解	335
19.5	副产物风险评价	337
	参考文献	337

第20章 等离子体净化含氮恶臭气体 341

20.1	含氮类恶臭气的来源与特征	341
20.2	含氮类恶臭气的处理技术	341
20.3	等离子体处理含氮恶臭气体系统	342
20.3.1	电晕放电	342
20.3.2	介质阻挡放电	342
20.3.3	滑动弧放电	343
20.3.4	微等离子体	343
20.4	净化技术影响参数	343
20.4.1	反应器结构	343
20.4.2	电压	345
20.4.3	背景气体成分	345
20.4.4	气体流速	346
20.4.5	VOCs 初始浓度	346
20.4.6	温度	347
20.4.7	湿度	348
20.4.8	催化剂	349
20.5	降解产物与降解机理	350
20.6	展望	353
	参考文献	353

第21章 等离子体净化含硫恶臭气体 355

21.1	含硫类恶臭气的来源与特征	355
21.2	含硫类恶臭气的处理技术	355
21.3	等离子体处理含硫恶臭气体系统	356
21.3.1	电晕放电	356
21.3.2	介质阻挡放电	356
21.3.3	滑动弧放电	357
21.3.4	射频放电	358
21.4	净化技术影响参数	358

21.4.1	反应器结构	358
21.4.2	电压	359
21.4.3	电源频率	360
21.4.4	气体流速	361
21.4.5	背景气体成分	361
21.4.6	VOCs 初始浓度	362
21.4.7	湿度	363
21.4.8	温度	363
21.4.9	催化剂	364
21.5	降解产物与降解机理	365
21.5.1	硫化氢	365
21.5.2	硫醇类	366
21.5.3	二硫化碳	368
21.5.4	二甲基硫	368
21.6	工程案例	369
21.7	展望	369
	参考文献	370