

● 冯权莉 宁平 唐光明 著

微波—活性炭纤维 处理有机废气

Study the Volatile Organic Gas on
Activated Carbon Fiber and Microwave



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

微波-活性炭纤维处理有机废气

冯权莉 宁平 唐光明 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2017

内 容 提 要

本书以印刷过程中产生的有机废气乙醇和甲苯为研究对象,以微波-活性炭为研究手段和方法,分析研究了活性炭吸附乙醇和甲苯的原理,研究设计了载乙醇活性炭在氮气氛围中微波解吸及真空微波解吸两套实验流程,探索了其最佳工艺实验条件。对反应器的设计、微波场中的温度测量进行了探讨,对吸附过程及解吸过程的影响因素、规律进行了实验研究和理论分析。建立了吸附等温线方程,以 D-R 方程作为纯组分吸附等温线对数值积分的精度进行研究,对 AHEL 模型的合理应用与纯组分 Unilan 吸附等温线进行了研究。

本书可供有机废气处理的研究人员、工程技术人员和管理人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波-活性炭纤维处理有机废气/冯权莉等著. —北京:
冶金工业出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-5024-7563-5

I. ①微… II. ①冯… III. ①废物处理 IV. ①X7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 141484 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 姜晓辉 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7563-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017 年 6 月第 1 版, 2017 年 6 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 8.25 印张; 157 千字; 119 页

48.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

有机废气 (VOCs) 一般指的是挥发性有机化合物, 即在常温下饱和蒸气压大于 70Pa, 常压下沸点在 260℃ 的有机化合物。其主要来源于石油、制药、化工、涂料、印刷等工业生产过程。随着工业的快速发展以及人们生活水平的提高, 挥发性有机物的排放不断增加, 并具有范围广、排放量大等特点。由于 VOCs 是一种有毒、有害的气体, 它们释放到空气中不仅会造成严重的环境污染, 而且如果人体长期接触、吸入, 将对神经系统及造血功能带来严重危害, 甚至引发癌变及其他严重疾病甚至死亡。如何处理挥发性有机气体已成为了人们研究的焦点问题。

目前, 在印刷过程中大量使用的油墨主要是溶剂型油墨, 油墨用的溶剂主要是乙醇。在印品干燥时, 挥发性组分的总含量为 70%~80%。乙醇废气通过固化设备的排气系统排出, 排出的废气未经妥善处理即排入大气, 不但浪费资源, 而且给工人的健康和大气环境造成危害。因此, 有效地回收废气中的乙醇不仅可以减少其对环境的危害, 同时也可以实现其资源化利用, 减少资源浪费, 降低企业的生产成本。

活性炭纤维 (Activated carbon Fiber), 是继粉末活性炭 (PAC) 和颗粒活性炭 (GAC) 之后的第三代活性炭产品, 其内部有丰富的微孔, 有许多的表面官能团, 具有发达的比表面积, 一般可达到 $1000 \sim 3000 \text{ m}^2/\text{g}$ 。对气体的吸附、脱附速率快, 吸附容量大, 吸附性能优于颗粒活性炭, 再生后可以实现资源的重复利用, 具有良好的应用前景。

活性炭纤维的再生使用采用最多的方法是加热再生, 而在不同的加热源中微波具有独特的加热性能, 具有如下优点: (1) 穿透性加热, 加热速度快; (2) 节能省电; (3) 热源与加热材料不直接接触; (4) 能进行选择性的加热; (5) 便于控制, 无废物生成。而且微波加热与传统加热技术相比, 微波加热还有另外一个重要的优势, 微波是向

被加热活性炭内部辐射微波电磁场,属于内部加热,微波场中无温度梯度存在,活性炭的再生时间短,解吸气体浓度高,利于回收高品质的有机气体。

本书采用微波作为热源取代传统热源进行活性炭纤维的再生研究,通过对乙醇气体的活性炭纤维吸附及微波解吸回收乙醇的实验,研究微波再生吸附乙醇活性炭纤维技术,探讨一种经济实用载乙醇活性炭纤维再生的方法,为微波再生活性炭纤维实际应用提供一定的理论和实验基础。

活性炭吸附法经济可行的决定因素除了吸附过程的理论研究基础外,活性炭再生方式的选择及其理论研究也同样重要,否则势必会带来治理成本高,造成二次污染,治理不彻底等问题。

随着活性炭吸附法的应用范围日趋广泛,活性炭的回收开始得到人们的重视。活性炭吸附法的经济性主要取决于再生方式。目前,活性炭再生方法主要有加热再生法、药剂再生法、生物再生法、化学再生法、湿式氧化再生法等几大类。其中,加热再生法是各种再生方法中应用、研究最多也是最成熟的一种方法。传统变温解吸可通过间接加热吸附剂或直接与热气体接触来实现。对活性炭,常利用水蒸气来解吸,由于活性炭热传导系数较低,要使整个固定床加热到吸附质被解吸的温度,需加热的时间很长。变温解吸的另一缺点是能量消耗大,再生不仅需要将吸附质提升到解吸所需温度,而且为使吸附剂进一步活化,还需将温度进一步升到吸附剂的活化温度,且经多次加热冷却后,烧损严重。如果利用过热蒸汽再生,固定床在重新吸附前还要再干燥。如果解吸的有机物含水,还须设置水和有机物的分离设备。

与传统的热再生方法相比,微波加热解吸再生有以下优点:(1)微波对反应物起深层加热作用;(2)微波加热温度均匀;(3)解吸速度快;(4)在微波辐照下,各种被蒸发的吸附质的电子损失不同,因此能实现对吸附质的选择加热。

有效地回收印刷废气中的乙醇,使其循环利用,对实现印刷行业的节能降耗和清洁生产具有重要意义与作用。本书是作者多年研究成果的总结。这些研究包括:

(1) 考察活性炭纤维在不同吸附时间、吸附温度、吸附压力和活

性碳纤维的质量下对乙醇废气的动态吸附性能。

(2) 采用不同的改性方法处理活性炭纤维, 考察浸渍浓度、浸渍时间、碳化时间和碳化温度等因素对活性炭纤维吸附性能的影响。

(3) 采用氮气氛围下对载乙醇活性炭纤维进行解吸。采用正交实验讨论微波功率、载气(氮气)线速、微波辐照时间和活性炭纤维量等四个因素对解吸率的影响程度; 其中每个因素3个水平, 以乙醇解吸率作为指标做 $L_9(3^4)$ 正交实验, 确定实验条件下的最佳解吸工艺条件。

(4) 采用真空氛围下对载乙醇活性炭纤维进行解吸。采用正交实验讨论微波功率、载气(氮气)线速、微波辐照时间和活性炭纤维量等四个因素对解吸率的影响程度; 其中每个因素3个水平, 以乙醇解吸率作为指标做 $L_9(3^4)$ 正交实验, 确定实验条件下的最佳解吸工艺条件。

(5) 考察不同解吸条件下活性炭纤维的质量损耗率。通过多次吸附、解吸以及通过分析仪器检测再生前后活性炭纤维的吸附性能和表面结构差异, 考察解吸对活性炭纤维性能的影响, 通过这一过程验证活性炭纤维再生利用的可行性。

(6) 提出的 IAS 理论需要大量数值模拟, 包括数值积分。当以 D-R 方程作纯组分吸附等温线时, 该理论对数值积分的精度要求严格。AHEL 模型的合理应用与纯组分 Unilan 吸附等温线的参数有关。

在本书即将付梓之际, 我要感谢博士生导师宁平、我的同事王学谦, 和我的学生王晨旭、孙创等。感谢化工学院梅毅院长对我学习和工作的支持, 感谢在我求学路上所有帮助和支持我的老师、同学和朋友。特别感谢我的家人多年来对我学习、工作、生活上的理解、关心、支持和帮助。

限于著者水平, 书中未能尽善之处, 还期盼读者多加指正。

冯权莉

2016年12月

目 录

1 活性炭吸附与微波加热基础理论	1
1.1 活性炭吸附基础理论	1
1.1.1 活性炭纤维的制备	1
1.1.2 活性炭纤维的基团及微观结构	2
1.1.3 活性炭纤维的应用	4
1.1.4 吸附理论及活性炭纤维再生方式	4
1.1.5 活性炭纤维的改性及功能化	6
1.2 微波加热基础理论	6
1.2.1 微波与材料的相互作用	7
1.2.2 微波加热原理	8
1.2.3 微波加热与常规加热的区别及其特点 ^[12,33]	10
1.3 微波再生活性炭的原理和特点	11
1.3.1 微波再生原理	11
1.3.2 微波再生特点	11
参考文献	12
2 有机废气处理及有机废气处理现状	15
2.1 有机废气的危害及其主要来源	15
2.2 印刷行业有机废气	16
2.3 VOCs 的处理现状	16
2.3.1 热破坏法处理 VOCs	17
2.3.2 生物法处理 VOCs	17
2.3.3 膜分离技术处理 VOCs ^[10]	18
2.3.4 冷凝法处理 VOCs	18
2.3.5 吸收法处理 VOCs ^[11]	19
2.3.6 电晕法处理 VOCs	20
2.3.7 光催化氧化处理 VOCs	20
2.3.8 吸附法处理 VOCs	22

参考文献	22
3 实验仪器、药品、方法及实验装置	24
3.1 实验仪器、药品	24
3.2 实验装置	26
3.3 主要分析测定方法	27
3.3.1 活性炭吸附和解吸的测定方法	27
3.3.2 再生碳纤维质量损耗率的计算公式	28
3.3.3 微波辐照解吸效果的表征	28
3.4 微波泄露的防护方法	29
3.4.1 常用的微波防护方法	29
3.4.2 本实验采取的微波防护措施	29
4 活性炭纤维对含乙醇印刷有机废气处理	30
4.1 活性炭纤维对含乙醇印刷有机废气吸附研究	30
4.1.1 实验流程	30
4.1.2 实验结果与讨论	30
4.1.3 小结	35
4.2 载乙醇活性炭纤维在氮气氛围中微波解吸研究	36
4.2.1 载气的选择	36
4.2.2 载乙醇活性炭纤维在氮气氛围中微波解吸的工艺流程	37
4.2.3 单因素实验结果与讨论	38
4.2.4 正交实验结果与讨论	41
4.2.5 乙醇出口浓度	44
4.2.6 小结	44
4.3 载乙醇活性炭纤维在真空氛围中微波解吸	45
4.3.1 真空解吸的特点	45
4.3.2 载乙醇活性炭纤维真空微波解吸的工艺流程	46
4.3.3 单因素实验结果与讨论	47
4.3.4 正交实验结果与讨论	51
4.3.5 乙醇出口浓度	52
4.3.6 多次吸附解吸对活性炭吸附的影响	52
4.3.7 小结	54
4.4 活性炭纤维的改性研究	54
4.4.1 浸渍剂的确定	55

4.4.2	不同改性条件对活性炭纤维吸附性能的影响	56
4.4.3	改性活性炭纤维的结构性能	60
4.4.4	小结	62
	参考文献	63
5	活性炭纤维对含乙醇和甲苯印刷有机废气处理	65
5.1	活性炭纤维对乙醇和甲苯的动态吸附性能测定	67
5.1.1	甲苯和乙醇的物化性质	67
5.1.2	吸附柱中的吸附现象	67
5.1.3	活性炭纤维吸附含有机物气体的动态吸附试验	68
5.1.4	小结	74
5.2	乙醇和甲苯的静态吸附动力学分析	75
5.2.1	吸附热力学平衡模型以及吸附动力学模型	75
5.2.2	吸附动力学实验设计	76
5.2.3	乙醇吸附动力学实验	76
5.2.4	甲苯吸附动力学实验	81
5.2.5	小结	85
5.3	载有机组分的活性炭纤维的微波辐照解吸	86
5.3.1	微波辐照解吸的特点	86
5.3.2	载气的选择	87
5.3.3	解吸实验流程	88
5.3.4	载乙醇活性炭纤维解吸实验	88
5.3.5	载甲苯活性炭纤维解吸实验	93
5.3.6	小结	97
5.4	微波辐照对活性炭纤维性能的影响及阻燃剂的负载	98
5.4.1	分析仪器	98
5.4.2	微波辐照再生载乙醇活性炭纤维的分析	98
5.4.3	微波辐照再生载甲苯活性炭纤维的分析	100
5.4.4	阻燃剂负载对甲苯解吸的影响	101
5.4.5	红外分析	103
5.4.6	小结	104
6	吸附模型及模拟	105
6.1	非均相扩展 Langmuir 模型	105
6.1.1	解析非均相扩展 Langmuir 模型	105

6.1.2 结果和讨论	106
6.2 理想吸附溶液理论中的数值模拟	110
6.2.1 理想吸附溶液理论	111
6.2.2 结果和讨论	111
6.3 本章小结	112
6.4 本章符号说明 (Nomenclature)	113
7 结论、创新点及建议	115
7.1 研究成果和结论	115
7.1.1 活性炭纤维对含乙醇印刷有机废气处理	115
7.1.2 活性炭纤维对含乙醇和甲苯印刷有机废气处理	116
7.1.3 吸附模型及模拟	118
7.2 创新点	119
7.3 建议	119

1 活性炭吸附与微波加热基础理论

1.1 活性炭吸附基础理论

固体表面由于存在着未平衡的分子引力或化学键力,而使所接触的气体或溶质被吸引并保持在固体表面上,这种表面现象称为吸附^[1]。固体都有一定的吸附作用,但具有实用价值的吸附剂是比表面积较大的多孔性固体。

依据吸附剂再生方式的不同,吸附法又可分为变温吸附(Temperature Swing Adsorption, TSA)和变压吸附(Pressure Swing Adsorption, PSA)。

TSA 主要是根据各吸附等温线的斜率不同,在低温下吸附剂的吸附容量增大而吸附,当压力不变而温度升高时,吸附剂的吸附容量减少而解吸。同时,吸附剂再生。加热吸附剂床层的方法可以采用过热水蒸气、烟道气和电感加热,以提高吸附剂的温度,但加热后的终温需控制,以免吸附剂失活或晶体结构破坏。

PSA 指的是气体组分或液态溶液经气化后的气体,由于其吸附等温线斜率的变化和弯曲度的大小,在系统压力变化的情况下,被吸附剂吸附分离。在 PSA 循环过程中,系统不断地加压、减压或抽真空,消耗了大量的能量。因此,在操作时必须控制加压和抽真空后系统的压力,以期取得最佳的操作条件,减少能量的消耗。

纤维状活性炭纤维是在 20 世纪 70 年代在碳纤维基础上发展起来的,是继粉末状和颗粒状(GAC)活性炭之后的第三代活性炭吸附剂,相比于粉末状和颗粒状活性炭,活性炭纤维具有更大的比表面积、更广的孔径分布以及易压制成型等一系列的优点。此外,活性炭纤维孔径发达,主要以微孔形式分布在纤维丝外表面,其孔径以 2.0nm 的为主,分布比较均匀,从而形成丰富的纳米孔径分布,因而具有较大的比表面积。因此,活性炭纤维相比于前两种活性炭吸附材料在性能和应用范围方面都得到了较大的提升,但是材料制备的原料和工艺要求都提高了,一定程度上提高了吸附剂的成本。

1.1.1 活性炭纤维的制备

在工业生产中,活性炭纤维主要以酚醛纤维、粘胶纤维、沥青纤维、聚乙烯醇纤维、聚丙烯腈纤维以及各种木质素等纤维材料作为原料制得。这些作为原料

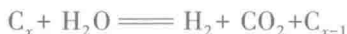
的纤维通常具有较高的纯度,通过不同工艺和条件制成的活性炭纤维在性能方面都各有区别。

在纤维丝制成活性炭纤维的工艺主要可分为以下几个步骤,即预处理、炭化以及活化。不同的预处理工艺以及选择不同的活化剂和活化工艺,都会对活性炭纤维的性能有较大的影响。

通过预处理可以提高纤维材料在高温炭化时的稳定性,根据原料的不同活性炭纤维的预处理工艺存在着一定的差异,可分为无机盐预处理和空气预氧化。例如粘胶纤维的预处理主要通过磷酸盐、硫酸盐等无机盐浸渍的无机盐预处理得以实现,沥青纤维和聚丙烯腈纤维则需要通过在 200~400℃ 的程序升温进行空气预氧化。

炭化是在高温环境下将纤维中的非碳成分除去,形成一定的孔状结构。研究表明,适中的炭化温度有利于得到高比表面积较大的孔容和孔径^[2]。

活化则是进一步增大活性炭纤维的孔结构,可以通过无机盐或碱浸渍氢氧化钾、氯化锌、硫酸盐、碳酸盐、磷酸或者磷酸盐等浸渍原料纤维丝后,在惰性气体保护下进行加热加以活化,在 CO₂ 和 H₂O 的气态环境下加热到 700~1000℃ 也可以对碳纤维进行活化,活化作用改善活性炭纤维的吸附性能^[3-5]。当二氧化碳和水蒸气为活化剂时,分别发生以下反应:



此外,浸渍法和气态法协同进行得到较好的活化效果。

1.1.2 活性炭纤维的基团及微观结构

影响活性炭纤维吸附性能的包括其表面的化学结构以及表面的孔状结构,国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)将孔隙分为三类,即:孔径小于 2nm 的微孔,孔径在 2~50nm 范围内的中孔,孔径大于 50nm 的大孔^[6]。活性炭纤维丝直径为 5~30μm,与活性炭含有微孔、中孔与大孔不同的是,活性炭纤维孔径结构主要为分布较为狭窄且较均匀的微孔,孔径主要分布为 0.5~1.5nm。微孔总量通常为活性炭纤维孔径的 90% 以上。因此,活性炭纤维的比表面积通常为 1000~2500m²/g。

活性炭纤维表面的碳原子和微晶内的碳原子存在方式有所不同,具有不饱和键,易于以结合碳成分以外的原子和原子团^[7]。活性炭纤维的表面存在一些活性官能团,主要有酚羟基、羧基、醌基和内酯基等含氧官能团。此外,还有少量含 P、N、S 以及卤素等官能团。这些官能团的形式和数量与生产活性炭纤维的原料和工艺密切相关。

活化方法的不同,活性炭纤维表面含氧官能团的种类与分布也有所差异。不同的活化工艺,使其表面具有不同的酸碱性,而表面酸碱性则直接影响着活性炭

纤维的选择性吸附以及活性炭纤维的吸附容量等吸附性能。含氧基团使活性炭纤维具有较强的氧化还原性能，在有水存在的环境下，活性炭纤维具有更强的氧化还原能力。这些性能是由于其表面有着类似于蒽、菲、萘基团上的 H，或是 C-H 等官能团，而在有水的条件下这类官能团易被氧化为 C-OH 官能团，这就使得活性炭纤维表面单位面积内含氧官能团数量增加，因而使其氧化还原能力有所增大。活性炭纤维表面的含氧官能团如图 1-1 所示。

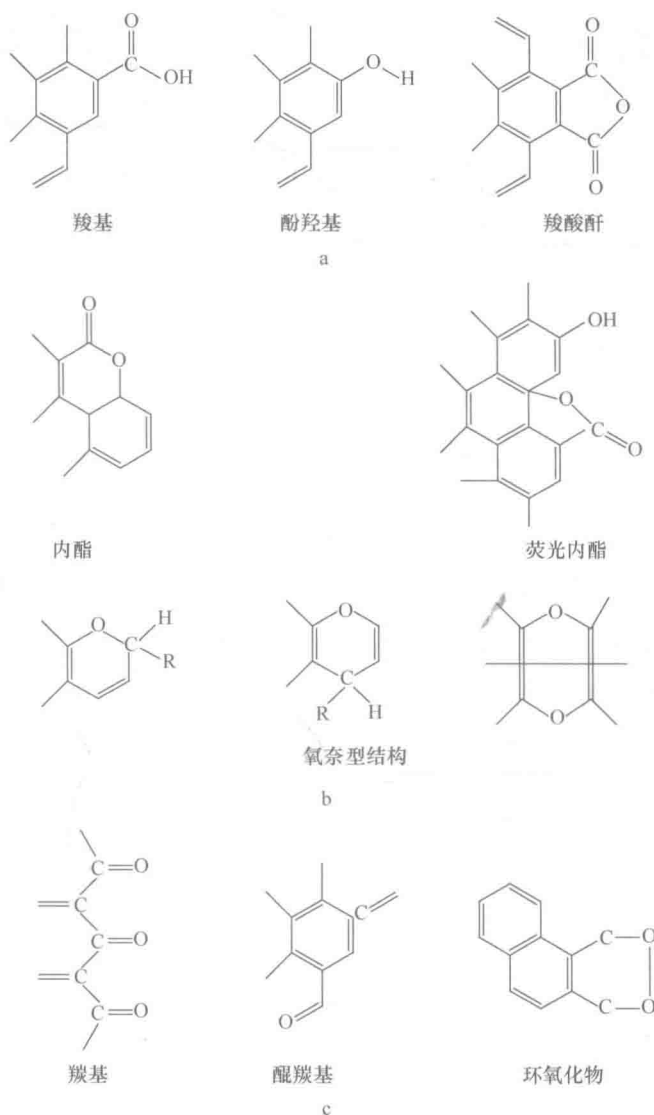


图 1-1 ACF 表面含氧官能团

a—酸性含氧官能团；b—碱性含氧官能团；c—中性含氧官能团

1.1.3 活性炭纤维的应用

颗粒状活性炭形态较为稳定，易于回收，主要应用于水处理和和气体处理方面，颗粒状活性炭在填充方面需根据填料塔和吸附质的特点进行选择，通常这种填充孔隙率较大，这就一定程度上会影响吸附的效果；粉末状活性炭则由于粒度较小不易回收，主要应用于水处理中，通常使用后都与淤泥一起处理掉。由于活性炭纤维具有比表面积大和易成型的优点，这就使得活性炭纤维具有较大的吸附容量，兼具了颗粒活性炭和粉末活性炭的优点，活性炭纤维就有了较为广泛的应用前景。作为吸附剂活性炭纤维堆积的孔隙远小于颗粒状活性炭，这使得活性炭纤维的吸附相对于颗粒状活性炭较为彻底。相比于粉末状活性炭，活性炭纤维由于其易成型的特点，在回收和再生过程中都具备粉末状活性炭不可比拟的优势。活性炭纤维由于其高效的吸附性能、电化学特性和孔径分布特点不仅局限于废水和废气处理领域的应用^[8]，还可以被用作催化剂或催化剂载体物质运用于催化等领域。

马晓爽^[9]以高效吸附树脂和活性炭纤维作为吸附剂和微生物的载体应用于高浓度含苯酚废水的处理，得到了较好的处理效果。此外，活性炭纤维由于其良好的电化学性能也被运用于储能材料，曾凡龙等^[10]将非稀有贵金属 Ni 和 Mn 负载在活性炭纤维上制备了活性炭纤维/NiO/MnO₂ 复合电极，该电极比电容高和循环性能好，而且成本低，具有广阔的应用前景。

1.1.4 吸附理论及活性炭纤维再生方式

根据不同的吸附作用机理可以将吸附现象分为化学吸附和物理吸附，表 1-1 比较了两种吸附行为的差异。

表 1-1 物理吸附与化学吸附的比较

比较项	化学吸附	物理吸附
吸附质选择性	有选择性	无选择性或较差
固体表面物性变化	显著	可以忽略
吸附力	化学键力	范德华力
吸附速度	吸附速度较慢	吸附速度较快
吸附热	大（相当于反应热）	小（与冷凝热相近）
吸附分子层数	单分子层吸附	单分子层或多分子层吸附
吸附可逆性	大多数情况下为不可逆过程	有可逆性

由于基团结构的相似性，活性炭纤维的吸附机理类似于活性炭，理论上认为活性炭对有机物的吸附通常通过 $\pi-\pi$ 色散力作用机理、氢键形成机理、给电子-

受电子复合物形成机理 3 种机理作用而成^[11]。

吸附剂使用后,通过对吸附剂进行再生不但可以达到循环利用资源,节约资源的目的,同时通过选择合适的再生方式可以避免对环境产生二次污染。吸附吸附质后的活性炭纤维可以通过对吸附质物理脱附或分解消除的方式对活性炭纤维进行解吸再生,解吸再生的方式很多,通常可以通过热解吸法再生、电化学分解法再生以及溶剂法解吸再生等再生方式进行吸附剂再生^[12~16]。再生方法中最常用的同时也是最为传统的方式是热解吸。活性炭纤维吸附和再生机理与活性炭相似,再生方法则可以以活性炭再生方式作为参考,下面就在吸附剂的解吸方面做一些简介。

1.1.4.1 热解吸^[12]

热解吸是最为传统的解吸方法,热解吸一般采用热空气或者水蒸气吹扫的方式对吸附剂和吸附质进行加热的方式,通过升高温度将吸附质从吸附剂上脱附下来。这一解吸方法由于热空气的比热较小因此传热效率有限,如采用比热较高的水蒸气则会产生水溶性吸附质与水的分离的后续过程。一般情况下,热解吸是一种耗能较高的解吸方式,选择一种行之有效的节能解吸方式对环保节能方面都具有较大的现实意义。

1.1.4.2 电化学分解

电化学分解是运用吸附技术和电晕法相结合的用于分解吸附剂中的吸附质,由于活性炭纤维具有较好的电化性能以及发达的孔径结构,在电晕作用下有利于有机物催化裂解为活性较高的自由基实现活性炭纤维上吸附质的解吸,从而实现了挥发性有机气体的净化过程。电化学分解实现了较为彻底有机物的净化,但不利于需要回收再利用的有机物的回收。傅宝林等^[14]探究了利用活性炭纤维处理含油废水,并利用电化学再生法处理吸附饱和活性炭纤维,得到了较好的实验效果。此外运用电化学解吸除了考虑解吸性能以外,还需考虑解吸对活性炭性能的影响,You X 等^[15]研究了活性炭吸附 EDTA 并利用电化学方式进行对有机吸附质进行催化分解实验,不仅考查了活性炭的解吸性能,实验还表明在一定的解吸条件下,活性炭的催化活性也得以恢复。

1.1.4.3 化学试剂解吸

化学试剂解吸是利用化学试剂对吸附剂进行再生,因此又称为溶剂解吸法,该方法是通过运用对吸附质具有较好溶解性的试剂通过浸取的方式将吸附质从吸附剂上脱附。李中华等^[16]利用 CS₂ 对活性炭管吸附的正己烷、苯、甲苯、间二甲苯等有机物进行溶剂解吸,结果表明该方法具有较好的解吸效率,多种有机物通过溶剂法解吸都可以接近完全解吸。

但溶剂解吸有机物也具有明显的弊端。首先溶剂通常为对吸附质具有较好的溶解性,这就加大了溶剂与溶质的分离回收难度。此外,吸附剂通常对溶剂具有

较好的吸附性能,这就造成吸附剂污染与浪费的问题。因为这些问题的存在溶剂解吸通常被运用于不需要分离回收的吸附质的解吸以及吸附理论的研究,同时这些问题也一定制约了这种解吸方法的运用和推广。

1.1.4.4 微波辐照解吸^[17~18]

微波辐照解吸是一种新型的吸附剂解吸方法,微波辐照解吸通过运用微波能辐照载有机组分的活性炭纤维,通过内加热的方式,实现吸附质与吸附剂的分离,通过合适的载气(同时也是保护气)将高浓度的有机物带出,冷凝分离。微波对极性物质具有良好的加热效果,利用微波加热解吸不同于传统的热解吸,微波加热不需要传热介质,通过电磁波与极性物质的相互作用达到加热的目的。因此,微波加热解决了传统热解吸方法中水蒸气等热载体分离难、温度分布差异大等一系列的问题,是一种较为理想的载有机物吸附剂的再生方式。同时,微波加热后由于脱附后的有机气体具有较高的浓度,有利于分离回收再利用是一种较为理想的有机废气的分离回收方式。

1.1.5 活性炭纤维的改性及功能化

在吸附过程中,活性炭纤维对吸附质分子吸附途径短,吸附质可以直接进入微孔,具有较好的吸附性能,通过化学和物理改性的方式可以改变活性炭纤维的孔径大小或表面化学性质,这些方面已有较多文献报导^[19~20]。活性炭纤维改性分为孔隙结构改性和表面化学改性。孔隙结构改性通过改变孔结构大小以增加吸附容量,表面化学改性可以根据吸附质类型或吸附环境通过化学方法改变基团类型以及基团的含量,以改善活性炭纤维的极性改善其特定的吸附性能。

在活性炭纤维改性方面也有不少相关的文献做出了论述。王秀丽等^[21]采用硝酸、磷酸、磷酸二氢铵和硝酸铜水溶液对聚丙烯腈基活性炭纤维(PAN-ACF)进行浸渍改性,改性后活性炭纤维表面含氧酸性官能团明显增加,其零电荷点相应降低,比表面积和微孔孔容都得到增大,其对铜离子的吸附容量提高了3.6倍。Seul-Yi L等^[22]通过运用氢氧化钾对ACF进行改性提高了活性炭纤维对CO₂的吸附性能。

此外,活性炭纤维由于其高度发达的孔隙结构同时具有较好的电化学性能,可以作为光催化等催化环境的载体物质使用。

1.2 微波加热基础理论

微波是频率在300MHz~300GHz的电磁波,大约100亿年前,从我们这个宇宙诞生以来微波就已经存在了。1965年,AT&T贝尔实验室的阿诺·彭齐亚斯Arno Penzias和罗伯特·威尔逊Robert Wilson发现了几乎各向同性的和等温的宇

宙背景辐射,他们发现的辐射场即由低能微波组成^[23]。

由于微波加热是一种内加热,具有加热速度快、加热均匀、对加热物质有选择性、无滞后效应等特点,在有机合成、无机材料制备、物料干燥、食品工业和医药行业中有着十分广泛的应用。甚至在环境工程领域,微波在气体污染物处理、固体废弃物的处理、土壤修复、油水分离等方面也显示出独特的效果^[24]。

因为微波的应用极为广泛,为了避免相互间的干扰,供工业、科学及医学使用的微波频段是不同的。目前,最常用的两个频率是 915MHz 和 2450MHz。电能转化为 2450MHz 微波能的效率约为 50%,转化为 915MHz 微波能的效率约为 85%。家用微波炉选用的频率一般为 2450MHz;在工业上,由于所需要的微波谐振腔体积较大,一般选用 915MHz。微波辐射技术已经显示出其无与伦比的优越性,可以预见在未来的工业应用中具有广阔的应用前景。

1.2.1 微波与材料的相互作用

当微波在传输过程中遇到不同材料时,会产生反射、吸收和穿透现象。这些作用和其程度、效果取决于材料本身的几个主要的固有特性:相对介电常数(ϵ_r),介质损耗角正切($\tan\delta$,简称介质损耗)、比热容、形状、含水量的大小等。

1.2.1.1 微波与常用材料的相互作用

在微波加工系统中,常用的材料有导体、绝缘体、介质、极性和磁性化合物几类。

(1) 导体。一定厚度以上的导体,如铜、银、铝之类的金属,能够反射微波。因此在微波系统中,常利用导体反射微波的这种特殊的形式来传播微波能量。例如,微波装置中常用的波导管,就是矩形或圆形的金属管,通常由铝或黄铜制成。它们像光纤传导光线一样,是微波的通路。

(2) 绝缘体。在微波系统中,绝缘体有其完全不同于普通电路中的地位。绝缘体可透过微波,并且它吸收的微波功率很小。微波和绝缘体相互间的影响,就像光线和玻璃的关系一样,玻璃使光线部分地反射,但大部分则透过,只有很少部分被吸收。在微波系统中,根据不同情况使用着玻璃、陶瓷、聚四氟乙烯、聚丙烯塑料之类的绝缘体,它们常作为反应器的材料。由于这种“透明”特性,在微波工程中也常用绝缘体材料来防止污物进入某些要害部位,这时的绝缘体就成为有效的屏障。

(3) 介质。对微波而言,介质具有吸收、穿透和反射的性能。介质通常就是被加工的物料,它们不同程度地吸收微波的能量,这类物料也称为有耗介质。特别是含水和含脂肪的食品,它们不同程度地吸收微波能并将其转变为热量。

(4) 极性和磁性化合物。这类材料的一般性能非常像介质材料,也反射、