

吸收法高效处理含苯系物废气的工艺研究

蒋宇轩^{1,2*}, 赵礼弢^{1,2}, 赵敏^{1,2#}, 王瑞雪^{1,2}, 张承龙^{1,2}, 王景伟^{1,2#}

¹上海第二工业大学资源与环境工程学院, 上海

²上海电子废弃物资源化协同创新中心, 上海

收稿日期: 2022年2月18日; 录用日期: 2022年3月17日; 发布日期: 2022年3月24日

摘要

热风工艺拆解印刷电路板上电子元器件过程中会释放多种苯系化合物, 选用甲苯作为典型污染物, 开发吸收法高效去除VOCs的工艺, 以三种化学试剂水溶液作为高效吸收液的遴选目标, 包括Tween-20水溶液, Tween-80水溶液及柠檬酸钠水溶液, 考察了三种吸收液的吸收率及成本, 发现0.3% Tween-80浓度的吸收液对甲苯的平均吸收率为91.30%, 1.0% Tween-20浓度的吸收液的平均吸收率为95.47%, 0.3% Tween-80吸收液成本比1.0% Tween-20吸收液低约80%, 柠檬酸钠吸收液的平均吸收率为92.73%, 成本约为Tween-80吸收液的3倍, 表明Tween-80可作为较理想的高效吸收甲苯挥发物吸收液的有效组分。

关键词

甲苯, 吸收法, 非离子表面活性剂, 吐温, 柠檬酸钠

Process Study on Efficient Treatment of Benzene-Containing Waste Gas by Absorption Method

Yuxuan Jiang^{1,2*}, Litao Zhao^{1,2}, Min Zhao^{1,2#}, Ruixue Wang^{1,2}, Chenglong Zhang^{1,2}, Jingwei Wang^{1,2#}

¹School of Resources and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai

²Shanghai Collaborative Innovation Center of WEEE Recycling, Shanghai

Received: Feb. 18th, 2022; accepted: Mar. 17th, 2022; published: Mar. 24th, 2022

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 蒋宇轩, 赵礼弢, 赵敏, 王瑞雪, 张承龙, 王景伟. 吸收法高效处理含苯系物废气的工艺研究[J]. 化学工程与技术, 2022, 12(2): 108-115. DOI: 10.12677/hjct.2022.122016

Abstract

The process of dismantling electronic components on printed circuit boards by hot air process will release a variety of benzene compounds. In this paper, toluene was selected as a typical pollutant to develop an efficient volatile organic compounds (VOCs) removal process by absorption method. The absorption rate and cost of the three chemical reagent aqueous solutions were investigated as the selection target (including Tween-20 aqueous solution, Tween-80 aqueous solution and sodium citrate aqueous solution) for the efficient absorbent solution, and it was found that the average absorption rate of toluene was 91.30% for the absorbent solution with 0.3% Tween-80 concentration, 95.47% for the absorbent solution with 1% Tween-20 concentration, and the cost of 0.3% Tween-80 absorbent solution was about 80% lower than that of 1% Tween-20 absorbent solution. The average absorption rate of sodium citrate absorbent was 92.73%, and the cost was about three times of that of Tween-80 absorbent. It showed that Tween-80 can be used as an effective component of a more ideal and efficient absorbent for toluene volatiles.

Keywords

Toluene, Absorption Method, Nonionic Surfactants, Tween, Sodium Citrate

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2020 年全球手机数量达到每百人 107.52 部[1], 中国每百人 113.9 部[2]。巨大的保有量及更快的更新换代速率[3]使 2020 年中国手机理论报废量达到 34921.96 万台[4], 废旧手机的资源化处理日益受到关注。废旧印刷线路板(Waste Printed Circuit Board, WPCB)是废旧手机的核心组件, 也最具有回收价值[5] [6], 当对 WPCBs 的电子元器件进行热风脱焊拆解时, 会释放多种挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs), 研究表明, 250℃时挥发物中检测出的苯、乙苯、间二甲苯、苯乙烯、邻二甲苯、萘等多环芳香族有机化合物, 升高拆解温度会使此类挥发性有机物成倍增长[7] [8] [9] [10], 对周边环境带来污染并增加相关从业人员职业健康风险。

目前的 VOCs 处理技术按其原理可分为物理法(冷凝法、吸附法、吸收法、膜分离技术等[11]); 化学法(催化氧化法[12]、低温等离子体法[13]等)以及生物法[14]。针对 VOCs 浓度较小的特点, 选取表面活性剂水溶液对拆解过程中产生的废气进行吸收处理具有一定的实际意义。表面活性剂吸收液的吸收效果与液体胶束增容能力相关[15], 水溶液中表面活性剂浓度逐渐增大, 溶液表面完全被表面活性剂分子所覆盖即达到临界胶束浓度(CMC)后, 继续增加表面活性剂浓度时会在溶液中形成一种亲水基向外, 疏水基团向内的结构, 即“胶束”, 可将水中的表面活性剂疏水端与周围水分子间斥力降至最低, 能够稳定溶解在水中, 如图 1 所示; 使原本难溶于水或微溶于水的有机物可进入到与它自身性质相似的胶束核中, 使溶解度显著上升[16]。

本研究选取 Tween-20, Tween-80 及柠檬酸钠三种化学药剂作为遴选目标, 均为非离子表面活性剂, 非离子表面活性剂的临界胶束浓度较低, 将其配制成较低浓度的水溶液, 并利用其进行吸收实验研究。Tween 系列表面活性剂主要成分为失水山梨醇脂肪酸聚氧乙烯醚, 是一种无毒无刺激的黄色油状液体或

蜡状固体，具有良好的分散、润湿、乳化、渗透性能；柠檬酸钠是一种广泛应用于食品、化工及医药领域的表面活性剂，均对环境友好，不易造成二次污染。

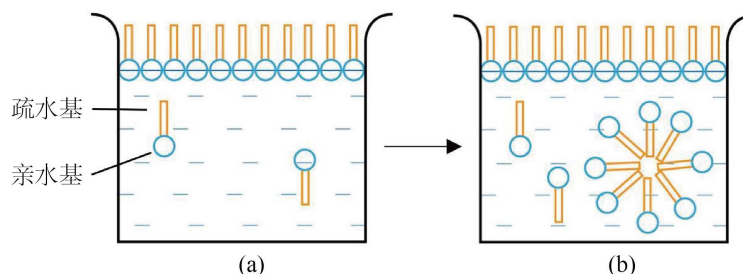


Figure 1. Surfactant micellization process
图 1. 表面活性剂胶束化过程

2. 材料及方法

2.1. 药品及仪器

甲苯，无水柠檬酸，柠檬酸钠，磷酸钠，碳酸钠，硅酸钠，正丁胺，聚乙二醇(5800)均为分析纯，Tween-20 (Bioss)，Tween-80 (青岛日水)为工业级。

Honeywell MiniRAE 3000 + 手持 VOCs 检测仪，sartoriusPB-10 pH 计，Signal 蠕动泵。

2.2. 实验方法

使用蠕动泵将干洁空气鼓入装有甲苯液体的鼓泡瓶，使用一个三通连接件分别连接鼓泡瓶产生的高浓度甲苯气体，空气压缩机产生的高压干洁气体，出气口经过气体流量计连接吸收瓶，分别调节蠕动泵转速及空气压缩机气体流量，稳定甲苯浓度及气体流量。吸收前后甲苯废气浓度使用手持 VOCs 检测仪检测，具体流程如图 2 所示。

吸收瓶添加 75 ml 吸收液，实验气体流量为 20 L/h，气体及吸收液温度为室温 20℃，模拟甲苯废气浓度为 380 ppm，每次实验时预通模拟甲苯废气 30 min，并用检测仪持续监测气体浓度变化，浓度值稳定后开始实验。

1) 不同浓度 Tween-20，Tween-80 溶液的甲苯吸收率

分别配制 0.2%，0.5%，1.0%，5.0%浓度的 Tween-20 溶液和 0.3%，0.2%，0.5%，1.0%浓度的 Tween-80 溶液，添加 1.0%正丁胺作为助表面活性剂。测量通过气体吸收瓶前后气体 VOCs 浓度，甲苯吸收率使用下式进行计算。

$$\eta = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 η ——吸收率(%)；

C_0 ——甲苯吸收前浓度(ppm)；

C_1 ——甲苯吸收后浓度(ppm)。

2) 不同浓度柠檬酸钠水溶液的甲苯吸收率

分别配制 2%，5%，8%浓度柠檬酸钠溶液，添加无机盐助剂及聚乙二醇(PEG)，并使用柠檬酸调节 pH = 6，增加柠檬酸钠水溶液的净化效率，具体配比为：0.05%硅酸钠，0.1%碳酸钠，0.1%磷酸钠，0.1%聚乙二醇。选取吸收效果最佳的柠檬酸钠浓度，将聚乙二醇替换为 1% Tween-20 (通过实验 1 得出的最佳

浓度), 其余无机盐助剂添加量及 pH 值相同。甲苯去除率使用式(1)进行计算。

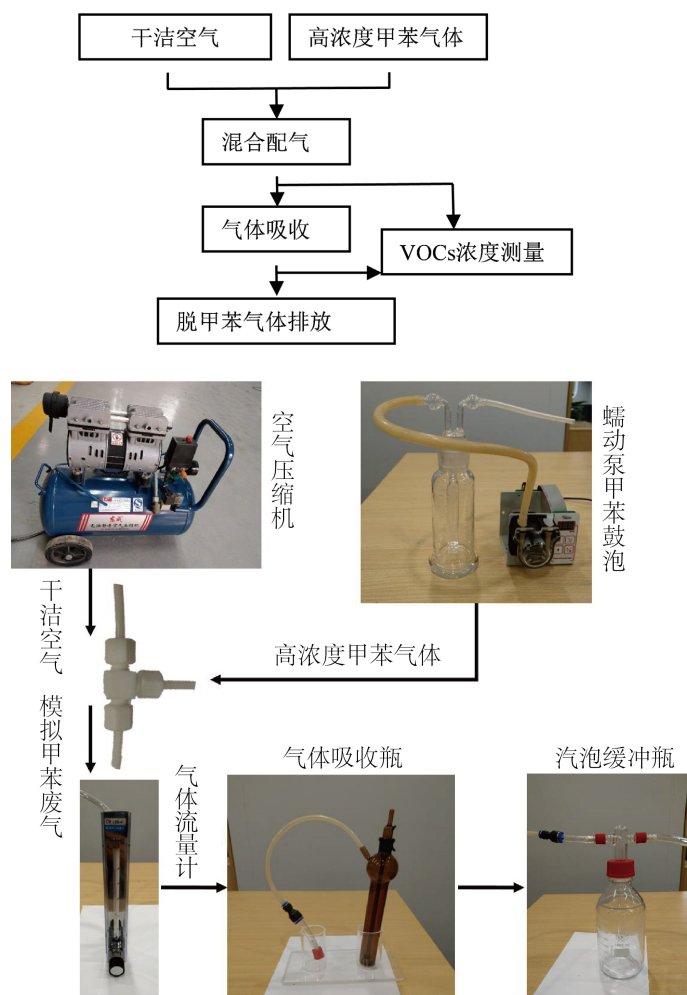


Figure 2. Exhaust gas absorption simulation process
图 2. 废气吸收模拟流程

3. 结果及讨论

由于吸收瓶缓冲区域较小, 一段时间后吸收瓶内液体会全部变为气泡逐渐溢出吸收瓶, 进入缓冲瓶内, 无法保证所有气体充分接触吸收液, 如图 3 所示。因此在吸收瓶内吸收液全部鼓泡成为气泡后 2 min 即停止实验, 仅比对充分接触吸收液时的各吸收液对甲苯气体的吸收率。

3.1. 不同浓度 Tween-20 对甲苯的吸收率

不同浓度 Tween-20 和 Tween-80 水溶液对甲苯气体的吸收率如图 4 所示。

Tween-20 浓度为 0.5% 及 1.0% 时(图 4 左), 吸收液对甲苯气体的吸收效率均较高, 最高达到 98.33%, 0.2% 和 5.0% 的浓度对甲苯的吸收效率均不够理想; 当 Tween-20 的水溶液浓度为 1.0% 时, 吸收效果最好。配置不同浓度的 Tween-80 溶液进行甲苯吸收效率研究(图 4 右), 当浓度为 0.3% 时, Tween-80 水溶液、气泡与甲苯气体间的传质效果较好, 吸收率较高, 最高达到 94.50%, 适度提升 Tween-80 浓度, 其吸收率会大幅下降, 比 Tween-20 具有较高吸收率浓度区间范围更窄。两组吸收液吸收效果随吸收液浓度上升



Figure 3. Absorbent liquid is converted into bubble overflow

图 3. 吸收液全部转化为气泡溢出

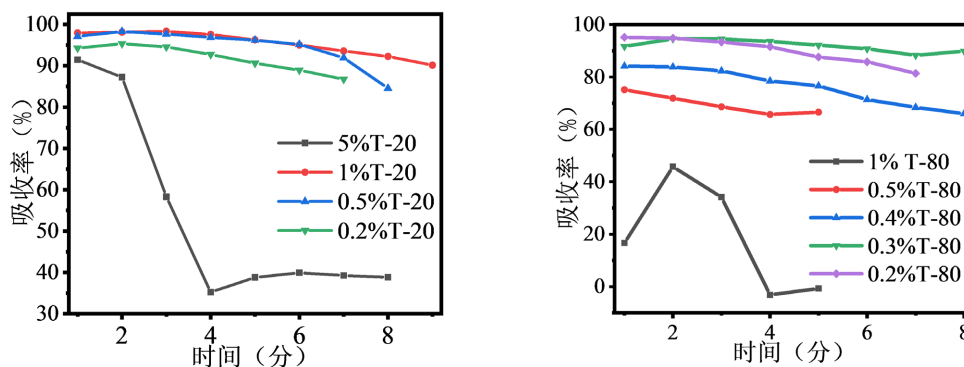


Figure 4. Absorption rate of toluene gas by aqueous solutions of Tween-20 (left) and Tween-80 (right) at different concentrations

图 4. 不同浓度 Tween-20 (左)和 Tween-80 (右)水溶液对甲苯气体的吸收率

呈现先上升后下降的趋势，与溶液表面张力随表面活性剂浓度增加而先下降后略微上升规律类似，吸收液浓度达到临界胶束浓度后，继续增加浓度会增加吸收效果，但当吸收液浓度过高时，可能由于形成了过多的胶束后，溶液表面已完全被甲苯分子布满，达到吸附饱和和状态，而更多的表面活性剂没有接触水，甲苯在接触到表面活性剂的疏水端后虽被其吸附，但并没有溶解于水中，导致甲苯与水的传质效率下降，跟随气泡上升后，压力降低，处于相对饱和和状态的甲苯又被重新释放，造成吸附效率呈现下降的趋势；1.0% Tween-80 水溶液在 2 分钟左右吸收率有明显上升，此浓度下所产生的气泡量大且不易消泡，污染物被包覆于气泡内而表现出吸收率上升，但一段时间后，气泡逐渐破裂，释放出气泡内部大量未溶解的甲苯废气，仪器检测值上升，吸收率下降。

3.2. 不同浓度柠檬酸钠水溶液对甲苯的吸收率

不同浓度柠檬酸钠水溶液对甲苯的吸收率如图 5 所示。

如图 5 所示，柠檬酸钠水溶液对于甲苯气体的吸收率随着柠檬酸钠浓度升高而呈现先上升后下降的趋势，当柠檬酸钠浓度为 5.0% 时，甲苯气体的吸收率最优，最高达到 97.93%，当溶液中作为进一步降低溶液表面张力，用 Tween-20 替换聚乙二醇时对于甲苯气体的吸收率无显著的促进作用。

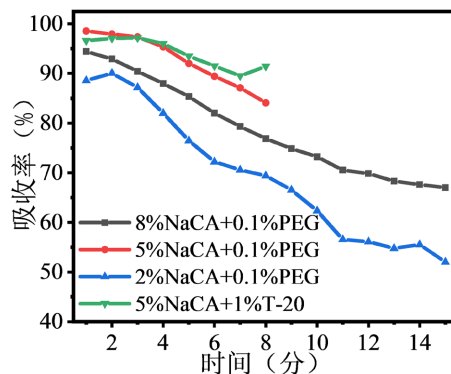


Figure 5. Absorption rate of toluene in aqueous solutions of different concentrations of sodium citrate
图 5. 不同浓度柠檬酸钠水溶液中甲苯的吸收率

3.3. 各体系水溶液对于甲苯的吸收率对比

Tween-20, Tween-80 及柠檬酸钠体系水溶液对于甲苯的最高吸收率组对比如图 6 所示。

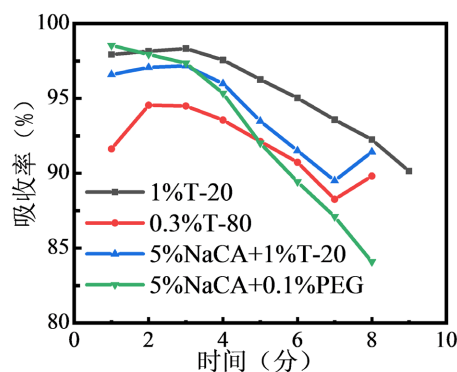


Figure 6. Comparison of absorption efficiency of different absorption solutions
图 6. 不同吸收液吸收效率对比

如图 6 所示, 1.0% Tween-20 水溶液对于甲苯气体的吸收效率最优, 且吸收效率曲线相对比较平稳, 将 5.0% 柠檬酸钠吸收体系中的聚乙二醇替换为 1.0% 的 Tween-20 后, 其吸收率上升, 其吸收率曲线数据略高于 0.3% Tween-80, 曲线形状类似, 但整体上仍低于单一 1.0% 浓度的 Tween-20 吸收液的吸收率。

3.4. 各体系吸收液试剂成本对比分析

对比各吸收液体系配置 50 L 吸收液所需总价, 具体如表 1 所示。

Table 1. The price required for each absorption liquid system configuration 50 L absorption liquid
表 1. 各吸收液体系配置 50 L 吸收液所需价格

名称	Tween-20		Tween-80		柠檬酸钠吸收液				
	Tween-20	正丁胺	Tween-80	柠檬酸钠	柠檬酸	碳酸钠	磷酸钠	硅酸钠	聚乙二醇
单价(元/500 毫升或克)	290.89	87	527.15	105	63	187	65	169	47
含量(%)	1	1	0.3	5	1	0.1	0.1	0.05	0.1
总价(元)	449.04		245.15		626.35				

配置 50 L 吸收液时, 柠檬酸钠吸收液价格明显高于 Tween 系列, 且吸收效率相较于 Tween 系列并无优势, 因此在实际应用中不推荐柠檬酸钠作为吸收液的配制药剂; Tween-20 相较于 Tween-80 添加量大, 配置相同体积的吸收液成本高约 83.17%, 10 min 平均吸收率高约 4.17% (Tween-20 为 95.47%, Tween-80 为 91.30%), 因此在对排放要求较为严格时应使用 Tween-20 配置吸收液, 而当污染物浓度较小, 在满足相关排放标准前提下, 采用 Tween-80 作为吸收液具有一定的使用成本优势。

4. 结论

1) 对比各组 Tween-20 水溶液, Tween-80 水溶液及柠檬酸钠水溶液对于甲苯气体的吸收效果, 1.0% Tween-20 添加 1.0% 正丁胺作为助表面活性剂的吸收效果最优, 最高吸收率达到 98% 以上, 且 10 min 平均吸收率达到 95% 以上。

2) 配置相同容量的吸收液时, 单价最低为 Tween-80 水溶液, 较 Tween-20 低 83.17%, 吸收率低 4.17%, 在满足排放要求的前提下, 采用 Tween-80 作为吸收液药剂, 其使用成本较低。

基金项目

国家重点研发项目: 废旧移动终端无损拆解与元器件自动化精细分选技术及装备 (No. 2018YFC1902303)。

参考文献

- [1] World Bank (2020) Mobile Cellular Subscriptions (Per 100 People). <https://data.worldbank.org.cn/indicator/IT.CEL.SETS.P2?view=chart>
- [2] 中国工业和信息化部. 2020 年通信业统计公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/shuju/2021-01/26/content_5582523.htm
- [3] Deng, W.J., et al. (2017) End-of-Life (EoL) Mobile Phone Management in Hong Kong Households. *Journal of Environmental Management*, **200**, 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.056>
- [4] 中国废弃电器电子产品回收处理及综合利用行业白皮书 2020 [J]. 家用电器, 2021(6): 68-87.
- [5] Cucchiella, F., et al. (2016) A Profitability Assessment of European Recycling Processes Treating Printed Circuit Boards from Waste Electrical and Electronic Equipments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **64**, 749-760. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.057>
- [6] Wang, J.B., Guo, J. and Xu, Z.M. (2016) An Environmentally Friendly Technology of Disassembling Electronic Components from Waste Printed Circuit Boards. *Waste Management*, **53**, 218-224. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.036>
- [7] Huang, K., Guo, J. and Xu, Z.M. (2009) Recycling of Waste Printed Circuit Boards: A Review of Current Technologies and Treatment Status in China. *Journal of Hazardous Materials*, **164**, 399-408. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.051>
- [8] Stone, R. (2009) Confronting a Toxic Blowback from the Electronics Trade. *Science*, **325**, 1055. https://doi.org/10.1126/science.325_1055
- [9] Guo, J., Zhang, R. and Xu, Z. (2015) PBDEs Emission from Waste Printed Wiring Boards during Thermal Process. *Environmental Science & Technology*, **49**, 2716-2723. <https://doi.org/10.1021/es5053599>
- [10] 白建峰, 冀豪栋, 张承龙, 关杰, 王景伟, 谢洪勇. 熔锡炉加热法分离废弃电路板元器件过程的有害挥发物组成[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(3): 66-70.
- [11] Khan, F. and Ghoshal, A. (2000) Removal of Volatile Organic Compounds from Polluted Air. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **13**, 527-545. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(00\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(00)00007-3)
- [12] Li, W.B., Wang, J.X. and Gong, H. (2009) Catalytic Combustion of VOCs on Non-Noble Metal Catalysts. *Catalysis Today*, **148**, 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.03.007>
- [13] Vandenbroucke, A., et al. (2011) Non-Thermal Plasmas for Non-Catalytic and Catalytic VOC Abatement. *Journal of Hazardous Materials*, **195**, 30-54. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.060>
- [14] Kennes, C., Rene, E. and Veiga, M. (2009) Bioprocesses for Air Pollution Control. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **84**, 1419-1436. <https://doi.org/10.1002/jctb.2216>

-
- [15] Vane, L. and Giroux, E. (1999) Henry's Law Constants and Micellar Partitioning of Volatile Organic Compounds in Surfactant Solutions. *Journal of Chemical & Engineering Data*, **45**, 38-47. <https://doi.org/10.1021/jc990195u>
- [16] 蒋庆哲, 宋昭峥, 赵密福, 等. 表面活性剂科学与应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006: 128-137.