

生命周期评价在电子废弃物管理中的应用前景展望

陈泓江, 黎俊德, 张伟浩, 朱云硕, 邓杰光,
林嘉威, 陈大柱, 王进, 黎晓华, 刘新科*

(深圳大学 材料学院, 广东 深圳 518060)

[摘要] 当今电子废弃物已经成为不容忽视的环境废物, 电子废弃物的回收也逐渐成为越来越重要的课题, 其对于环境的保护以及资源的回收利用有着重要的作用。基于以上背景, 本文总结了通过生命周期评价(LCA)方法在电子废弃物管理中的应用与使用现状, 其中包括用 LCA 分析废弃手机回收过程的环境绩效, 利用 LCA 分析回收废旧电路板的环境与经济效益, 采用 LCA 全面完善电子废弃物管理以及基于人工智能的电子废弃物管理, 从多个方面总结分析了 LCA 在电子废弃物回收管理中的应用, 并对未来 LCA 在该领域的发展方向做出了展望。

[关键词] 电子废弃物; LCA; 环境材料; 生命周期评价; WEEE

[中图分类号] TQ

[文献标识码] A

[文章编号] 1007-1865(2021)16-0173-05

Prospects for the Application Prospects of Life Cycle Assessment in Electronic Waste Management

Chen Hongjiang, Li Junde, Zhang Weihao, Zhu Yunshuo, Deng Jieguang, Lin Jiawei, Chen Dazhu, Wang Jin, Li Xiaohua, Liu Xinke*
(College of Materials Science and Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Nowadays, e-waste has become an environmental waste that cannot be ignored, and the recycling of e-waste has gradually become an increasingly important topic. It plays an important role in environmental protection and resource recycling. Based on the above background, this article summarizes the application and use of life cycle assessment (LCA) methods in the management of electronic waste, including the use of LCA to analyze the environmental performance of the recycling process of discarded mobile phones, and the use of LCA to analyze the environment and the recycling of discarded circuit boards. Economic benefits, the use of LCA to comprehensively improve e-waste management and artificial intelligence-based e-waste management, summarizes and analyzes the application of LCA in e-waste recycling management from multiple aspects, and makes future development directions for LCA in this field Outlook.

Keywords: E-waste; LCA; environmental materials; life cycle assessment; WEEE

1 引言

电子废弃物, 俗称电子垃圾, 包括各种废旧电脑、通信设备、打印机、复印机、电视机、电冰箱、空调、洗衣机等, 也包括构成这些产品的零部件、元器件及潜在材料。作为一种特殊的再生资源, 电子废弃物具有数量多、危害大及潜在价值高等特点。由于电子废弃物种类繁多且含有大量重金属及其他有毒有害物质, 近年来受到国内外广泛关注。联合国开发计划署(UNDP)的报告指出, 全球每年投放市场的电子产品数量巨大, 且每年都在快速上升。^[1]越来越多的电子废弃物通过错误的回收和处理技术对环境和公众健康造成有害影响。这些非正式的回收做法在一些发展中国家很常见, 在这些国家, 回收方法还很简陋, 相当一部分电子废弃物的组成部分最终都被放在不卫生填埋场和露天倾倒地。要建立有效的电子垃圾管理系统, 发展中国家可以利用现有的城市垃圾处理基础设施, 如垃圾收集、填埋场和回收设施。除此之外, 城市生活垃圾和电子垃圾这两种废物流中的公共部分可以一起处理, 而残渣可在填埋场进行处理, 这样可以实现电子垃圾的综合管理。^[2]

2 背景介绍

尽管电子垃圾产生量如此之大, 但电子垃圾的回收和处置并没有得到很好的实施: 大量电子垃圾被转移到其他地区, 由于缺乏回收渠道, 没有得到有效的再利用或回收。

在过去 30 年里, 人们提出了各种模型来评估不同系统或过程的经济、技术和环境特征。其中包括能值会计、生命周期评估(LCA)、能量分析、有效能分析、环境风险评估和成本效益分析等。^[3]大部分电子废弃物都被弃置于堆填区。有效的再处理技术, 即在对环境影响最小的情况下回收有价值的材料, 其成本是昂贵的。因此, 尽管这种行为在《巴塞尔公约》下是非法的, 但富国仍向穷国出口数量不详的电子废物, 在穷国, 回收技术几乎全是在强酸中燃烧和溶解, 几乎没有采取任何措施保护人类健康和环境。这种再处理最初会导致极端局部污染, 随后污染物迁移到接收水体和食物链中。负责电子垃圾处理的工人通过皮肤接触和吸入遭受负面健康影响, 而社区则通过烟雾、灰尘、饮用水和食物接触到污染物被污染。有证据表明, 与电子废物相关的污染物可能存在于一些用于出口的产品或制成品中。^[4]

[收稿日期] 2021-06-17

[基金项目] 《环境材料》课堂教学模式创新研究与实践(JG2018052)

[作者简介] *为通讯作者: 刘新科(1985-), 男, 广东深圳人, 硕士生导师, 主要研究方向为材料科学与器件。

2020年3月30日, 对话网(The Conversation)发布报道称, 新加坡南洋理工大学“新加坡CEA循环经济研究联盟”(SCARCE)一项新技术可以回收电子废弃物中的关键金属, 并将回收率大幅提升至早期回收率的100倍。该套微流体方法是模块化的, 这意味着每个模块都可以在其他情况下发挥作用, 例如, 液-液萃取模块可以用于有机分子萃取过程的研究; 红外光谱模块可用于在线监测农业食品或制药过程。研究人员目前正在研究以很小的规模将这些研究结果转换为工业生产层面的工具, 预计在之后的电子废弃物回收中会有不错的应用。^[5]

3 应用研究

电气和电子设备的废物(WEEE或e-waste)在废弃物管理领域越来越重要, 根据我们所搜集资料显示, 预计全球电子废弃物产量从2009年的2000万吨/年将上升至2016年的近4500万吨/年^[9], 近些年技术的进步导致了电气和电子设备(EEE)的持续发展, 并使它们得到广泛的运用, 若是不能有效地处理那些已废弃的电气和电子设备, 这不光是一种资源的浪费, 也是一种环境的污染。近些年, 已经有许多采用LCA生命周期评价方法去评价或优化电子废弃物回收过程的研究开展了。

3.1 用LCA分析废弃手机回收过程的环境绩效

赵迪等人^[6]通过生命周期分析方法研究1000 kg废弃手机从回收到的全部过程, 来进行它的环境绩效评估以及潜在改进可能。其废弃手机来源主要由两部分组成, 80%来自于传统的回收方法, 20%来自于新兴的互联网回收。

通过他们实验结果可以得到, 如图1所示, 在实际的处理过程中, 1000 kg的废弃手机通过材料的再生可获得632.6 kg的再生材料, 它的总价值为27618元; 除此之外可再使用得元器件与液晶屏的再使用价值约为4312元。通过特定的指标计算公式可以得到1000千克的废弃手机的部件再使用率为9.51%, 再生材料产出率为63.23%, 物质代谢价值生产力为0.0319。

通过生命周期评价可以发现, 废弃手机回收处理系统表现出较好的物质代谢效率, 但是在生态环境效益方面仍具有优化的可能。其中的主要原因在于回收过程中的电力使用、运输过程污染颗粒物的排放、再生材料产出过程的资源消耗与污染物排放等因素导致了较显著的环境影响。

针对此种结果，他们做了优化假设如图2所示，模拟结果表明配套区域产业链假设情况下运输距离的减少仅对人体健康改善指标起到优化效果；鼓励再使用部件和采用先进的资源化技术的假设情境可显著提升废弃手机回收系统的环境绩效，但前者优化的结果主要表现在生态环境效益上，后者优化的结果则更加均衡。

除了以上研究，宋小龙等人^[7]还更细致的通过生命周期评价方法来分析废弃手机回收过程中的能耗与碳足迹。他们分析了

100部废弃手机，经过实验与分析，这些废弃手机回收处理的全过程生命周期能耗和碳足迹分别为-1069.86 MJ 和 -60.38 kg CO₂-eq。其中产出再生材料的过程是降低它们的最主要贡献，进一步通过敏感性分析，若是互联网回收的日回收量得到提高，或拆解部件和元器件的再次回收使用的比例升高，可以有效地降低废弃手机回收处理系统的生命周期能耗和碳足迹。

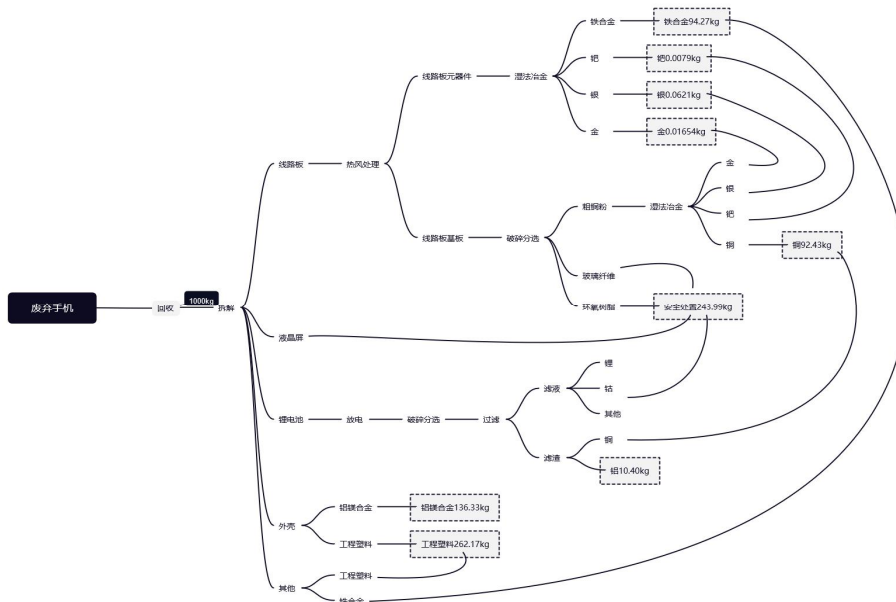


图1 废弃手机回收处理系统物质代谢过程
Fig.1 Material metabolism process of waste mobile phone recycling system



图2 废弃手机回收处理系统优化情景设置
Fig.2 Optimized scenario setting for discarded mobile phone recycling system

3.2 利用 LCA 分析回收废旧电路板的环境与经济效益

Prakash Pokhrel 等人^[8]通过 LCA 分析回收的 1 吨废弃印刷电路板(PCBs)，通过本研究以评估废弃 PCBs 对环境影响的类型和范围。

根据他们的所做的调查，现回收废弃印刷电路板的主要工艺有两种，分别是机械分离和净化，前一种方法只使用电力作为能源，其排放量微不足道，后者则使用强酸和其他对环境产生重大影响的化学物质。

本研究中所调查研究的 1 t 废弃 PCBs 拆解得到的金属与非金属数据来自于他们先前在台湾所做的研究，而其他所需数据则来源于当地其他企业。生命周期评价从当地一个回收工厂预收集废

弃 PCBs 的时候开始进行，该回收工厂每小时可处理 700 kg 电子废物，其中废弃 PCBs 占 3%。废弃 PCBs 先采用机械工艺进行处理，其中包括破碎机、筛分器、风分离器、磁性分离器和涡流分离器(图 3)，通过此步骤消耗的电能与获得的金属与非金属回收物见(图 3)。

机械工艺分离 1 吨废弃 PCBs 所需要的总耗电量为 196.27 kWh，其中风选机所消耗的电量最高达 68 kWh，而通过机械分离 1 吨 PCBs 可得到 422.082 kg 的玻璃纤维、281.388 kg 的树脂，150.32 kg 的铜，除此之外还可得到 1.59 kg、0.31 kg 的银与金这两类贵金属。

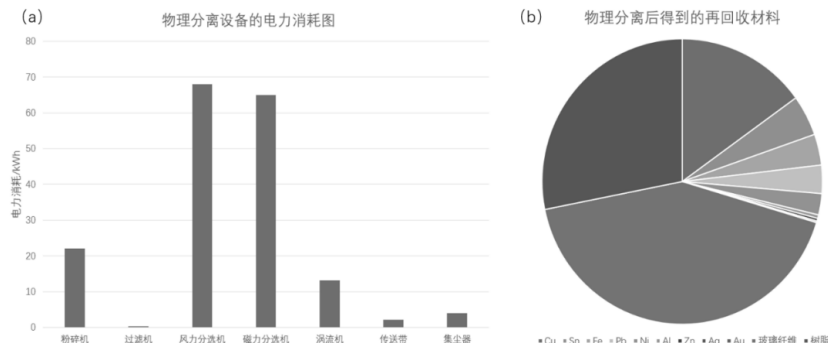


图3 (a)机械处理各工艺耗电图; (b)机械处理后得到的再回收材料分布图
Fig.3 (a)Power consumption diagram of each process of mechanical treatment;
(b)Distribution diagram of recycled materials obtained after mechanical treatment

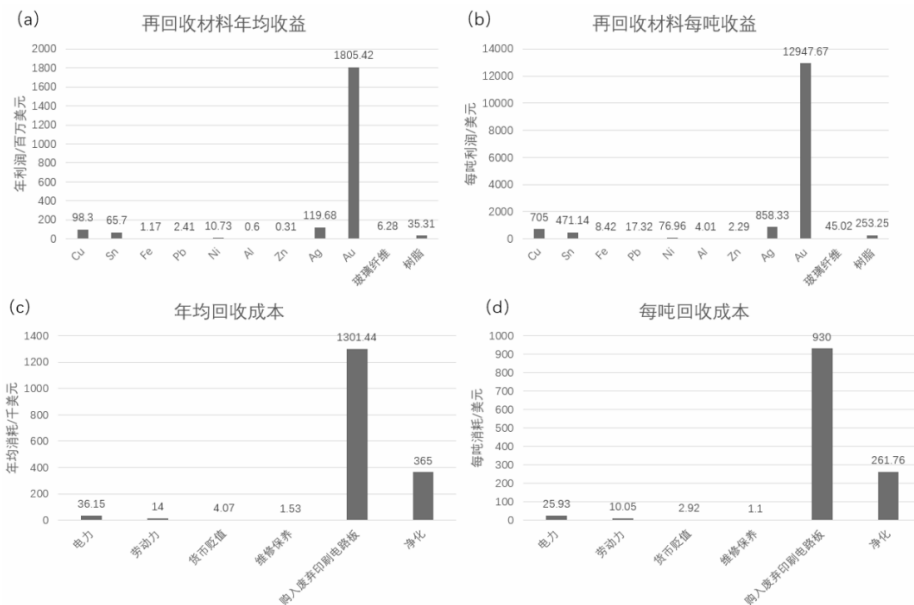


图4 (a)再回收产物年均收益柱状图; (b)每吨再回收产物收益柱状图;
(c)回收过程年均成本分布柱状图; (d)每吨材料回收过程成本分布柱状图

Fig.4 (a)Histogram of average annual revenue of recycled products; (b)Histogram of revenue per ton of recycled products;
(c)Histogram of average annual cost distribution of recycling process; (d) Histogram of cost distribution of recycling process per ton of material

通过进一步的分析与研究发现, 与传统的从矿井中开采这些金属相比, 从废弃 PCBs 中回收金对环境的影响较小, 但若是回收其他金属时, 此种办法与传统开采矿石相比起来对环境的影响更大, 其中回收铜对环境的影响最大。于此同时, 在回收废弃 PCBs 时需要做好人类健康保护, 如带好 N95 口罩等措施以防止疾病。

尽管对于环境角度而言, 回收 PCBs 有两面性, 但在经济上它是十分有益的。通过调查与模拟研究可发现, 从废弃 PCBs 中回收金属、树脂和玻璃纤维的收入高于回收过程的成本如图 4 所示。其中贵金属黄金对年均总收入的贡献最高(18 亿美元), 其次

是贵金属白银(1.19 亿美元), 除此之外铜和锡对总收入的贡献分别排第三和第四(9830 万美元/6570 万美元)。从另一个角度来说, 回收 PCBs 的成本主要由两部分组成, 即购买废弃 PCBs, 它年均需花费 130 万美元即总支出的 75.57%, 其次是购买净化添加剂, 年均需 36.5 万美元即总支出的 21.19%, 回收过程总的年均支出约为 170 万美元, 而年均回收所获得的收益为 21 亿美元, 所以它的年均净收益约为 21 亿美元, 每吨约为 14158 万美元净收益(图 5)。

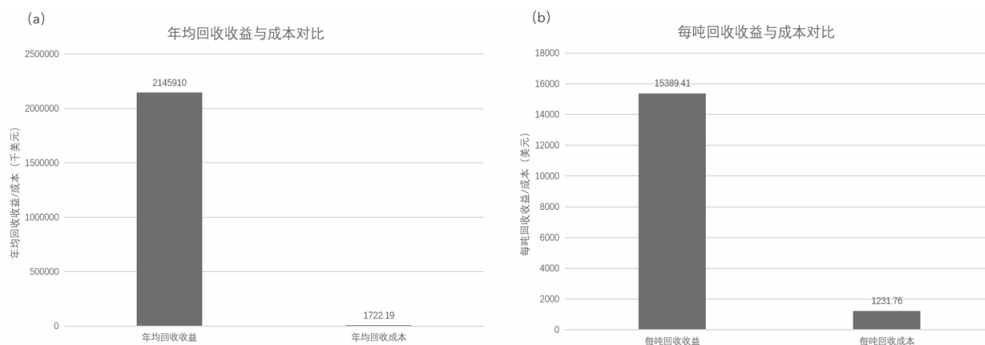


图5 (a)年均回收收益与成本对比柱状图; (b)每吨回收物收益与成本对比柱状图

Fig.5 (a)Histogram of average annual recovery revenue and cost comparison;
(b)Histogram of revenue and cost comparison per ton of recycled materials

环境性能结果表明, 仅从废物多氯联苯中回收金是对环境有益的。但回收其他金属对环境的影响比从各自的矿石中获得这些金属有更高的影响。所以, 若是只回收贵金属金, 这些企业每年仍可受益 18 亿美元, 即每吨 12014 美元。

通过 LCA 分析回收废弃 PCBs 的过程可以发现, 其中人体健康、淡水生态毒性、矿物化石等自然资源的消耗是环境影响类别中的主要因素, 且若是从废弃 PCBs 中回收铜、锡、铁和铅对环境的影响比从相应矿石中开采大得多; 但是通过调查以及模拟研究发现, 从废弃 PCBs 中回收贵金属金则有着比从矿石中开采更好的环境效益, 且光是回收金企业所得到收益便极为可观。由此得出结论, 考虑到环境保护, 金更多的从废弃 PCBs 中回收利用, 它对环境造成的影响比从采矿过程中造成的更少, 且仍然可以提供可观的经济效益。

3.3 采用 LCA 全面完善电子废弃物管理

Silvia Fiore 等人^[9]将电子废弃物分为三类(R1-冷却设备、R2-大型家用电器、R3-电视和屏幕)并通过物质流以及 LCA 评价方法分析整个意大利的废弃设施处理状况, 以评估欧洲发达国家的工业过程。本次 LCA 分析基于两种寿命结束选择: S₀—部分回收有价值的部分其余部分进行填埋处理, 这是意大利的传统电子垃圾处理方法; S₁—完全回收有价值部分, 进行有限的焚烧处理以及有限的填埋剩余材料。

根据调研, 在 2016 年间意大利待处理的电子设备总重 9906 吨, 若仅考虑 R1、R2 和 R3 的处理线(总输入 7298 t), 则超过了总回收率的 91 %。经过处理后产生的二次原材有 6651 吨, 其中有 55.6 %铁和钢、16.6 %的塑料、14.1 %的玻璃、9.5 %的混凝土、2.5 %的铜、1.6 %的铝、0.1 %的从印刷电路板中得到的铅和贵金属、以及木材、石棉。除此之外, 还有 646 t 的材料送往最终处理, 其中 555 t 的聚氨酯(PU)和橡胶进行焚烧处理, 91 t 的电容器垃圾进行填埋处理。

在 2016 年, R1 类别的冰箱、冰柜、空调废弃设备的输入量就达到 3298 t, 考虑到 R1 的整体质量平衡和 R1 处理流水线的项目终止(EOL)方案(见图 6)。若采用 S₀ 方案, 回收率仅占 39 %, 而其他产出物被焚烧和填埋。S₁ 方案达到 80 %的回收率(金属、塑料、玻璃和石棉), 大约 16 %的产出物被送到焚烧场, 剩下的 4 %被送到垃圾填埋场。R2 类别的洗衣机、洗碗机、烘干机、炉灶和烤箱废弃设备的输入量达到 2782 吨。考虑到 R2 的整体质量平衡和 R2 处理流水线的 EOL 方案(图 7)。若采用 S₀ 方案, 回收率仅有 63 %, 其他产出物被焚烧和填埋。而 S₁ 方案回收率达到 99 % (金属、混凝土、塑料和玻璃), 其中 0.6 %的产出物送往焚烧厂, 其余 0.1 %送往垃圾填埋场。R3 类别的 CRT、平板电视和显示器废弃物输入量达 1560 t。考虑到 R3 处理流水线的整体质量平衡和 EOL 方案(图 8)。S₀ 方案对玻璃、塑料、钢和铁的回收率仅有 64.6 %, 其他产出物被焚烧和填埋。S₁ 方案回收率则达到 91.06 % (玻璃、塑料、金属), 其中 0.6 %的产出物被送到焚烧场, 其余 0.58 % 送到垃圾填埋场。

总体上 R1、R2 和 R3 电子废弃物有 91.2 %的回收利用率, 7.6 %进行焚烧处理(主要为聚氨酯和橡胶), 1.2 %进行垃圾填埋处理(主要为电容器和荧光粉)。当采用 S₁ 方案时, 即采用本研究中所倡导的回收方案时, 进行三条单独处理流水线分析时, R1 类别的废弃物回收率(RR)为 80 %, R2 为 99 %, R3 为 91 %, 值得注意的是, 只有 R1 类别的废弃物进行了焚烧或填埋处理(R2、R3 可忽略不计); 此外, 当采用 S₀ 方案时, 即传统的回收方法, R1 的 RR 值不超过 40 %, R2 不超过 65 %, R3 不超过 86 %。以上结果表明了这两种情况下“最可回收”的电子废物类别, R2 和 R3 类别呈现出最佳结果, R1 回收利用效率较低。总之, 若想进一步提高整体的废弃电子产物的管理, 还需要进一步努力改进 R1 的 RR, 特别是为聚氨酯回收找到一个合适的方法, 以降低进行焚烧处理的比例。

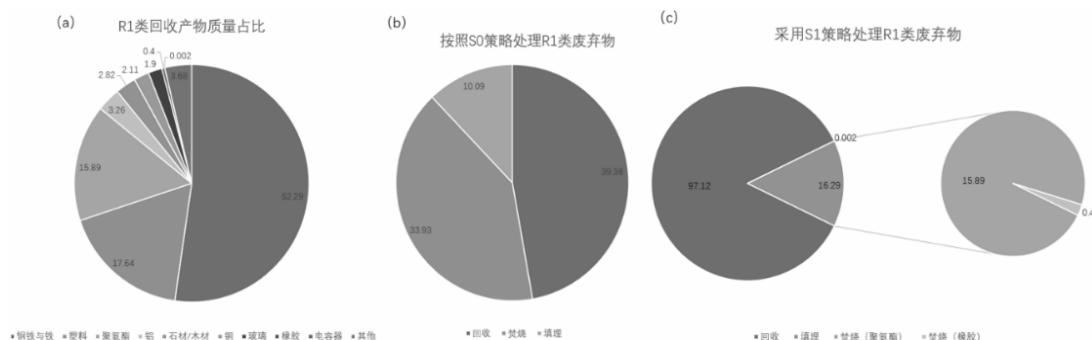


图 6 (a)R1 类电子废弃物各回收产物质量占比; (b)采用 S0 策略处理 R1 类废弃物各处理方式占比; (c)采用 S1 策略处理 R1 类废弃物各处理方式占比

Fig.6 (a)Proportion of the quality of each recycled product of R1 e-waste; (b)Proportion of each treatment method using S0 strategy to treat R1 waste; (c)Proportion of each treatment method using S1 strategy to treat R1 waste

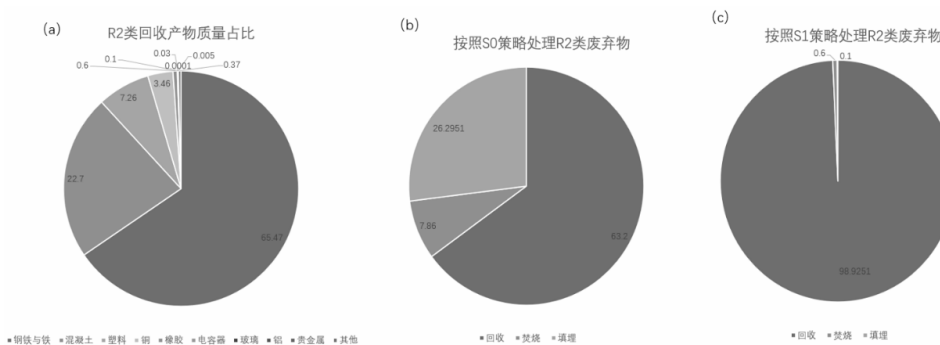


图 7 (a)R2 类电子废弃物各回收产物质量占比; (b)采用 S0 策略处理 R2 类废弃物各处理方式占比; (c)采用 S1 策略处理 R2 类废弃物各处理方式占比

Fig.7 (a)The proportion of the quality of each recycled product of R2 e-waste; (b)The proportion of each treatment method that uses S0 strategy to treat R2 waste; (c)The proportion of each treatment method that uses S1 strategy to treat R2 waste

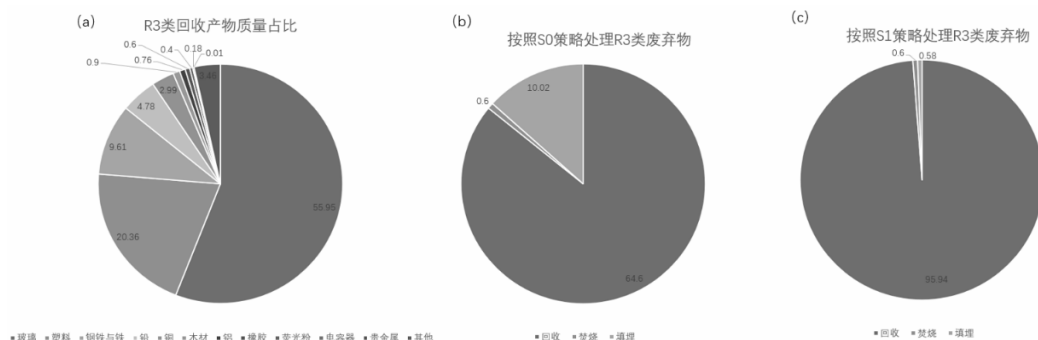


图8 (a)R3类电子废弃物各回收产物质量占比;
(b)采用S0策略处理R3类废弃物各处理方式占比;(c)采用S1策略处理R3类废弃物各处理方式占比

Fig.8 (a)Proportion of the quality of each recycled product of R3 e-waste; (b)Proportion of each treatment method using S0 strategy to treat R3 waste; (c)Proportion of each treatment method using S1 strategy to treat R3 waste

3.4 基于人工智能的电子废物管理

Jie Chen 等人^[10]在本研究中提出了一种人工智能技术(AIT), 结合 LCA、MCA 以及 EPR 评价方法来分析电子废物中的有害污染物及其对某些国家的气候、人类健康和管理政策的影响。

本研究中采用的 AIT 模型具有多层次的集群结构, 其简化了概念扩展和评估方法。开发了三个主要的分组, 表明它们是否属于医疗废物, 是否具有电子废物的特征, 还是被定义为有毒大气污染物。

其中电子废物的物理状态由材料类别来定义, 这是最重要和最动态的单元, 因为在这个 AIT 的 c 模块中, 具体情况通常决定了所收集的电子废弃物的负载效率, 并且可以识别与输入变量的最大相关性。接下来首先输入由电子废弃物产生的负面变化这个变量, 包括传染性疾病; 其次输入当前废弃物物理状态的子系统。通过实时监控这些数据, AIT 可以模拟计算出气候变化、污染物、毒素。在这之后的第二级模块用于描述中毒模型。其中因子表明个体的平均的极端程度、平均的持续时间, 以及它如何愈发严重。最后第三级模块组件利用了集成的环境使用因子。基于经验的影响与现实和严重性结合分析, 这个集成很重要, 因为它将会影响在现实中实施的可能性。

此研究实现了一种基于 LSA 和 MCA 的层次化 AIT 模型, 用以估计基于人工智能的实时电子废物处理量的危险水平。该项目通过定制的危险模型不断实时分析安全情况, 以跟踪动态变化。它可以通过协调待各个模块, 适当的时候采取“保护生者”措施来避免危机。所提出的模型结合了 MCA 方法与工作模式的好处。这确保了模型可以从数值复杂性的角度进行定制修改, 可以适应不完整的、具有缺陷的, 甚至缺乏必要认知时的情况, 此外还可以响应暂时性的介入测试。分层集群模型布局将灵活地响应各种情况。如果有必要, 错误的数量可以被纳入模型中的新细节所引用。在不可预知的情况下, 所提出的模型可以在任何给定的时刻运行。根据研究发现, AIT 中的规则数量在附有代表着主要人口统计学模块的几个独立实例外, 最高可降低至模型的 50%, 这也就是使得进行评估的速度远远快于最初的预计基础。其总性能可以缩短约 35%。

该研究集合了现发展火热的人工智能技术与最受关注的环境优化问题, 给广大研究者们提供了一条新思路, 通过人工智能来模拟 LCA 可大大缩短研究周期, 且只要模型合理, 其所得到的最终结果也更准确更具有指导意义。

4 结论

LCA 是一种合适的比较产品整个生命周期的不同阶段的环境影响的技术。通常将生命周期评估框架的四个阶段分别应用于不同开发阶段的产品系统, 即目标和范围定义、生命周期清单(LCI)、生命周期影响评估(LCIA)和解释。生命周期评估的结果不仅可以用来比较竞争技术对环境的相对影响, 也可以帮助专注于改善某一特定技术。这些 LCA 结果为每个影响类别提供了单独的分析, 制造商或研究结果的任何用户可以关注任何感兴趣的特定领域。对于感兴趣的影响类别, 企业可以识别驱动影响的材料或过程, 并极大地帮助用户改进工作^[11]。

生命周期评价方法可以评估新兴技术的预先应用, 在技术发展之始便带去了系统性的严谨和完备。应用 LCA 框架不仅在空间上扩大了研究的范围, 而且在时间上引入了一种系统的方法和长期的视角。利用 LCA 技术对电子废弃物的产品管理进行分析, 以下建议可被视为中国的相关制定者坚持可持续发展的优先行动领域。第一、在生命终(End-of-Life, EoL)处理阶段, “最先进的”

处置所产生的环境效益几乎与最坏情况下的环境影响一样高。针对对现有系统的低效率, 一个针对 EoL 电子产品的综合回收系统是不可或缺的, 包括收集、拆卸、材料和能源回收, 以及对危险部件的合理处置^[12]。为了充分发挥 EoL 处理所提供的潜力, EoL 治疗方法必须进行改革。第二, 推广更环保的产品, 即生态设计, 重点是要减少整体能源消耗。第三、促进向环保能源的过渡和在不同生命周期阶段提高能源效率。第四、对于未来的电子垃圾处理, 由于废弃物含大量贵重材料, 应尽量避免焚烧, 也不应该直接填埋。通过 LCA 评估的正确的电子垃圾处理方式, 应该扩大到中国乃至世界的更多地区; 同时, 还应提高电子垃圾处理技术的回收再利用效率和品质。

5 建议和展望

现阶段, 全球每年产生的电子废弃物越来越多, 需要正确地进行无害化处理收金属, 其中回收有价值金属的过程是整个资源化利用的核心环节, 是近年来研究的重点, 但这个环节还是存在一些不足之处, 需进一步改进与优化, 施行更好的法规。^[13]

2020年9月, 新《固废法》正式施行, 正式标志着生活垃圾分类制度、电子电器等产品生产者责任延伸制度、危废产生单位建立危废管理台账等多项原则被纳入法律, 各类固废应进行全生命周期管控, 此外, 技术体系、制度体系等保障措施的增加, 为电子废弃物回收处理行业释放巨大的政策红利^[14]。由于废弃电器电子产品回收处理正属于起步阶段, 且技术秘密及企业人为限制等原因, 中国迄今还没有一套完整的数据库可以参考, 导致生命周期评价所需的数据来源不统一, 无法利用真实准确和完整的数据进行生命周期分析^[1]。真实可靠的数据清单是生命周期评价的基础, 为了让 LCA 评价方法充分发挥作用, 国家和企业应相互配合, 紧密联系, 建立起适合中国发展的电子废弃物生命周期清单数据库。

文章通过总结各类电子废弃物的 LCA 评价结果, 不仅是为了判断和识别电子废弃物的污染特征, 更加希望能够消除源头性污染和生命终(EoL)污染, 推广产品设计中“摇篮到摇篮”的一体化、全方位的理念, 真正实现产品从生产到回收的全生命的绿色可持续发展。作为开发设计工具, LCA 在产品生命周期中的应用, 除了具有巨大的服务性功能之外, 更重要的是, 可以进一步改进今后的产品开发、应用以及处理^[15]。这种方法提供了一个合理的、可应用于未来的、有效的模型, 还提供了许多有用的临时见解。LCA 的成果更应该被视为一种对技术发展的贡献。

参考文献

- [1]洪梅, 宋博宇, 丁琼, 等. 生命周期评价在电子废弃物管理中的应用前景科技导报[J]. 2012, 30(33): 62-67.
- [2]Ikhlayel M. An integrated approach to establish e-waste management systems for developing countries[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 170: 119-130.
- [3]Song Q, Wang Z, Li J. Sustainability evaluation of e-waste treatment based on energy analysis and the LCA method: A case study of a trial project in Macau[J]. Ecological Indicators, 2013, 30: 138-147.
- [4]Robinson B H. E-waste: an assessment of global production and environmental impacts[J]. Sci Total Environ, 2009, 408(2): 183-91.
- [5]刘文浩. 新技术可回收电子废弃物中的关键金属[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(02): 245.

(下转第 206 页)

表4 2020年循环水系统挂片监测结果

测试时间	碳钢/(mm/a)	黄铜/(mm/a)	不锈钢/(mm/a)
	KPI≤0.075	KPI≤0.005	KPI≤0.005
1月	0.022	0.0015	0.0001
2月	0.074	0.0007	0.0004
3月	0.15	0.009	0.0003
4月	0.085	0.0001	0.0002
5月	0.056	0.0006	0.0001
6月	0.017	0.0003	0.0003
7月	0.004	0.0008	0.0006
8月	0.012	0.0002	0.0002
9月	0.005	0.0007	0.0001
10月	0.008	0.0008	0.0006
11月	0.009	0.0029	0.0027
12月	0.005	0.0006	0.0003
平均值	0.037	0.0014	0.0004

除了水质监控外, 纳尔科技术服务团队还积极配合客户一起监测现场换热器运行参数, 定期监测换热器流速和传热效率的变化, 评估换热器运行状况。2020年, 在装置运行工况基本相同的前提下, 换热器泄漏台次比2019年度下降50%的好成绩。

4 结论

通过纳尔科公司循环冷却水实验室动态模拟、现场中试以及在回用含油污水的炼油循环冷却水系统的实际应用的综合效果来看, 纳尔科新一代循环冷却水无磷缓蚀阻垢方案可以比较严苛的条件下, 实现极好的系统控制。并通过纳尔科3D TRASAR数字化平台强大的在线监控技术以及现场团队及时有效的服务能力, 可以确保在实际现场系统出现一定波动的情况下, 新无磷方案处理效果得到保证, 从而帮助循环冷却水系统和换热器达到较好的工作状态。

参考文献

- [1]郭亚丽, 杨元民, 奴尔江, 等. 石化企业循环水处理现状及发展趋势[J]. 全面腐蚀控制, 2014, 28(1): 52-54.
- [2]李晨光. 循环水低磷和无磷水处理药剂应用研究[J]. 工业水处理, 2014, 34(2): 65-67.
- [3]李巍, 窦泽权. 无磷缓蚀阻垢剂的应用研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(7): 68-70.
- [4]高嵩, 李本高, 赵锐. 美国炼油厂循环冷却水处理与污水回用现状[J]. 化工环保, 2017, 37(2): 129-135.
- [5]GB/T 50050-2017 工业循环冷却水处理设计规范[S].

(本文文献格式: 龚卓仪, 吕骏腾, 杨帆. 新无磷方案在炼油污水回用循环水系统成功应用[J]. 广东化工, 2021, 48(16): 202-206)

(上接第177页)

- [6]赵迪, 宋小龙, 杨东, 等. 电子废弃物回收处理系统环境绩效评估方法及应用[J]. 生态经济, 2020, 36(05): 182-187+207.
- [7]宋小龙, 李博, 吕彬, 等. 废弃手机回收处理系统生命周期能耗与碳足迹分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(06): 2393-2400.
- [8]Pokhrel P, Lin S L, Tsai C T. Environmental and economic performance analysis of recycling waste printed circuit boards using life cycle assessment[J]. J Environ Manage, 2020, 276: 111276.
- [9]Fiore S, Ibanescu D, Teodosiu C, et al. Improving waste electric and electronic equipment management at full-scale by using material flow analysis and life cycle assessment[J]. Sci Total Environ, 2019, 659: 928-939.
- [10]Chen J, Huang S, Balamurugan S, et al. Artificial intelligence based e-waste management for environmental planning[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2021, 87.
- [11]Song Q, Wang Z, Li J, et al. Life cycle assessment of TV sets in China: a case study of the impacts of CRT monitors[J]. Waste Manag, 2012, 32(10): 1926-36.

- [12]Duan H, Eugster M, Hischer R, et al. Life cycle assessment study of a Chinese desktop personal computer[J]. Sci Total Environ, 2009, 407(5): 1755-64.
- [13]杨涛, 陶天一, 白皓, 等. 电子废弃物机械-物理协同强化资源化利用的研究进展[J]. 过程工程学报, 2020, 20(12): 1363-1376.
- [14]梁龙妮, 曾祥专. 广东省电子废弃物产生量预测及管理策略研究[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(11): 1-6.
- [15]Villares M, İşildar A, Van Der Giesen C, et al. Does ex ante application enhance the usefulness of LCA? A case study on an emerging technology for metal recovery from e-waste[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2017, 22(10): 1618-1633.

(本文文献格式: 陈泓江, 黎俊德, 张伟浩, 等. 生命周期评价在电子废弃物管理中的应用前景展望[J]. 广东化工, 2021, 48(16): 173-177)

(上接第184页)

处理能力 100 m³/h。
池体形式: 碳钢防腐。

4.10 臭气处理

除臭工艺的的第一个重点是建立臭气收集系统, 理想的臭气收集系统是对臭气污染源在最小的范围内进行封闭和直接收集。为了减少臭气对周围环境的影响, 对产生臭气的构筑物 and 建筑物采取加盖封闭措施。

由于本项目为地上池体, 设计时调节池、初沉池、水解酸化池、排污泥池等均加盖。

臭气的处理方案:

针对不同的臭气成分和浓度, 我公司拟采用洗涤-生物滤床过滤联合除臭装置进行处理。主要特征: 前级采用水或NaOH溶液对废气进行预处理, 然后采用生物滤床过滤使废气中的有害成分被生物滤床中得微生物分解和吸收, 确保经除臭装置排放的气体符合国家排放标准。值得注意的是, 在处理废气量的计算时, 要考虑气相、液相平衡, 只要保证废气不外泄, 尽可能不要人为的扩大废气处理量, 以降低投资成本和运行成本。

5 出水水质

印染废水经过该工艺处理后, 出水水质较为稳定: pH为6~9, COD≤30 mg/L, SS≤10 mg/L, 氨氮≤1.5 mg/L, BOD₅≤6 mg/L, 满足《地表水环境质量标准》中IV类水质排放标准。

6 结论

采用“混凝-水解酸化-生物接触氧化-臭氧催化氧化+曝气生物滤池深度处理”的主体处理工艺处理印染废水, 处理效果较好, 出水水质达到排放要求, 处理后的废水可回用于生产车间。

参考文献

- [1]黄兴华, 杜崇鑫, 谢冰, 等. 印染工业废水的中水回用技术研究进展综述[J]. 净水技术, 2017(2): 16-20.
- [2]景江, 肖秀蝉, 周笋, 等. 印染废水深度处理技术研究进展[J]. 印染助剂, 2018, 35(6): 8-12.
- [3]崔俊峰, 王俊, 段文杰, 等. 印染废水处理及达标排放工程改造实例[J]. 水处理技术, 2020, 46(12): 138-140.
- [4]计建洪, 庄惠生. 印染废水处理工程改造实例[J]. 印染, 2020, 46(11): 59-62.
- [5]张彩吉, 美国强, 徐富. 800 m³/d 毛毯印染废水工程实例[J]. 广东化工, 2020, 47(08): 126-127.

(本文文献格式: 裴小兴. 印染企业废水处理工程实例[J]. 广东化工, 2021, 48(16): 183-184)