

废弃 AI 导盲电子设备中稀贵金属回收技术研究进展

闫雅清

(黑龙江大学, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要 新型 AI 导盲设备作为视障群体的数字化出行载体,其规模化应用伴生大量的电子废弃污染物(E-waste),作为“城市矿山”富含 Au、Ag、Li 等有价金属,开发潜力显著。本文基于“污染治理—资源再生”协同视角,系统综述多种回收技术的特征与能效。针对设备高度集成化、柔性化及数据化的特征,分析了技术瓶颈并优化方案。此外,结合格林美典型回收案例,剖析了 AI 导盲设备 E-waste 回收的潜在环境—资源—经济效益,以期为 AI 智能类 E-waste 回收提供新见解。

关键词 AI 导盲设备; 电子废弃物; 稀贵金属回收

中图分类号: TP272; TU51

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.001

0 引言

当前,我国盲人数量约为 500 ~ 700 万人,约占全球盲人总数的 18%^[1]。若纳入低视力人群,则中国现存视力障碍人数高达 1 731 万,且数字不断攀升。然而,当下城市的无障碍设施覆盖率低,传统导盲设备又面临感知维度单一、定位精度不足等缺陷。因此,具备环境感知增强及实时路径规划功能的 AI 导盲设备市场需求攀升。然而,其规模化的应用在缓解盲人出行难题的同时也成为电子废弃物(E-waste)的污染源。此类 E-waste 中存在大量的重金属和有机污染物,处理不当将对环境造成严重污染。在直面 AI 导盲设备 E-waste 环境威胁的同时,也需认识到其作为城市矿山的重要潜力。其蕴含稀贵金属的含量和品位都远超原矿,且其多元化价值组合远超单一矿种的开发效益。以设备核心组件为例,1 吨线路板就含有 0.08 ~ 1.5 千克 Au 和 160 ~ 210 千克 Cu,分别为原矿石的 40 ~ 800 倍和 30 ~ 40 倍。从 E-waste 回收稀贵金属不但可以减少其对环境的污染,还可带来巨大的收益,缓解国内矿产储量不足的危机。这既符合《“十四五”循环经济发展规划》中“2025 年再生资源循环利用量达 4.5 亿吨”的要求,又能降低设备制造商的原材料采购成本,形成环境保护与资源、经济的三重增益。综上所述,以

资源化的手段实现 AI 导盲设备衍生 E-waste 的回收具有重要意义(表 1 为 AI 导盲设备 E-waste 中的典型金属含量)^[2]。

1 AI 导盲设备电子废弃物的主要回收技术及挑战

AI 导盲设备衍生 E-waste 的高效回收有望弥补当下资源短缺的现状。然而,当前仅 20% 左右的废物流得到有效回收,其余 80% 则不受控制。除了效率低下,高达 70% 的有害物质占比也严重阻碍了回收过程^[3]。这一严峻形势对回收技术提出了双重需求:提升回收率且阻断有毒物质迁移。现有解决方案主要围绕机械回收法、火法冶金回收法和生物浸出法等技术展开。

1.1 机械回收法

机械回收法是利用各组分间物理性质的差异,基于多级工艺(拆解、破碎和分选)实现资源的高效回收。拆解过程可分离目标组件并移除有害物;破碎过程将粒径控制至 2 mm 以下以实现金属完全解离^[4];分选过程则通过干法(磁选、电选等)与湿法(重介质法、浮选等)的互补,实现金属回收。同时,可结合近红外光谱技术建立塑料、玻璃等材料的分选模型,最终实现 E-waste 全组分资源化回收。其优势在于环境友好,物相保留率高。

然而,该方法仍存在较大的局限性,尤其是对于

表 1 AI 导盲设备 E-waste 中的典型金属含量

金属	Au	Ag	Pd	Cu	Ni	Pb	Sn	Fe	Zn	Al
含量(wt%)	0.56	0.33	0.02	38.46	2.00	1.28	2.19	1.60	0.86	4.00

高度集成化且贴身应用的AI导盲设备。首先, AI导盲设备中含有大量的毫微级触觉传感器和柔性印刷电路板等集成化组分, 其中包含铂族(Pt、Ir)金属的微型触点在破碎阶段易形成超越分选阈值的超细颗粒, 造成高价稀贵金属的流失。其次, 作为贴身使用的工具, 设备包含大量的硅胶等亲肤材料, 并于金属组分紧密熔融结合, 大量金属因无法分离而随聚合物组分填埋流失。最后, AI智能设备包含大量的语言或数字模块, 未完全破碎的芯片模块存在隐私泄露隐患。

为应对日益增长的AI导盲设备废物流回收需求, 机械回收法需进行针对性升级: (1) 应研发毫微级分选装备(如纳米级静电场), 结合图像识别提升微型元件的解离效率及金属的回收率; (2) 开发组件解离新技术(如低温等离子处理高效破坏化学键), 通过物理化学协同作用高效剥离金属/非金属复合材料; (3) 构建隐私信息消除单元, 可集成物理消磁与纳米破碎机制, 确保数据安全。尽管技术改造预计增加应用成本, 但这些改进将显著提升机械回收法在AI导盲设备等新兴E-waste处理领域的适用性与安全性, 有利于可持续发展。

1.2 火法冶金回收法

火法冶金回收是利用金属与非金属熔点差异完成相分离与金属富集。主要工艺包括三段式过程: 焙烧脱除有机组分、熔融富集金属、等离子体高温裂解难熔金属^[5]。焙烧过程在无氧或缺氧条件下促进有机组分气化解或形成炉渣去除; 高温熔融则使金属以液态形式富集流出; 部分难熔金属(W、Mo等)以及纳米分散贵金属(Au、Pt等)则需要进一步的等离子体高温裂解过程, 实现E-waste中资源的高效回收。其优势在于处理量大, 回收率高且更易分离出贵金属。且针对AI导盲设备衍生的E-waste, 高温反应可彻底分解有机材料, 选择性实现金属资源的回收。同时熔融过程可破坏硅基存储介质晶格结构, 实现数据销毁。

然而, 该技术除面临能耗高、二次污染严重等瓶颈外, 针对集成化的AI导盲设备, 含量丰富的贵金属(Au、Ag等)会在高温中出现显著的挥发损失。种类多样且分布广泛的金属在熔融时会产生复杂的固溶体(合金), 这种贵金属/贱金属的高度混合会严重阻碍资源的回收与再利用。

因此, 火法冶金回收AI导盲设备E-waste需进行几点改进: (1) 引入金属挥发抑制剂防止金属流失, 如熔炼前喷涂Al₂O₃溶胶, 形成的致密层可降低Ag的挥发扩散系数; (2) 添加CaCO₃、Fe₂O₃可以控制溴化

化合物等排放。还应增加精密元件的分离模块, 例如液氮脆化(收缩差异)或高频超声(空化效应)处理基材, 以预先剥离微型触点等; (3) 添加晶核剂, 通过异相成核促进分散的金属聚集, 如SiC可作为Au纳米颗粒的成核基体。

1.3 生物浸出法

生物浸出法是通过微生物与金属的界面反应(酸解、氧化还原分解等)实现E-waste中有价金属的选择性浸出, 可分为直接或间接机制。直接浸出依赖微生物与E-waste的直接接触传递电子, 将不溶性金属氧化为可溶性金属离子回收。间接浸出是通过游离代谢物(有机酸、Fe³⁺等)的化学作用溶解金属。其中, 间接浸出得益于游离菌群的高效电子转移而成为主流。其优势在于低能耗、环境友好及金属溶解率高。特别是针对高度集成的AI导盲设备, 生物浸出法通过针对性的固液界面氧化还原反应, 可大幅度提升微型触点中金属的回收效率并破坏数据储存单元。

然而, 生物法普遍运行周期长, 微生物活性波动大, 且针对AI导盲设备衍生的E-waste回收还面临以下几点瓶颈: (1) 生物群落对亲肤有机材料的降解效率较高, 浸出液中有机物浓度高会破坏产物纯度; (2) 焊料等含Pb部件的生物毒性会显著抑制整体功效; (3) 多元金属协同浸出引发的共混会阻碍资源分离。基于此, 生物浸出法的升级路径如下: (1) 优化菌种选育(如基因改造)及浸出剂配方(如添加柠檬酸), 提高浸出速率和纯度; (2) 引入白腐真菌等构建复合菌种体系, 可利用木质素过氧化物酶针对性降解—吸收有机物; (3) 设计多室生物反应器以进行pH梯度调控, 如pH按1.5~5.5的梯度设计可实现Fe、Cu、Al等金属的顺序浸出。

2 案例分析

格林美企业以“城市矿山开采+新能源材料制造”的双轨驱动模式建成了覆盖全国的7大E-waste绿色处理中心。基于物理—化学协同工艺, 企业实现了从废弃物回收到高附加值产品再生的全链条协同。城市矿山开发领域, 企业年E-waste处理量近百万吨(占全国10%), 涉及30余种战略金属的回收, 形成显著的资源替代效应。其中, Au、Ag等贵金属年回收处理量超10吨; 2023年Ni、Co即分别回收2万吨(原镍开采量的20%以上)和8000吨(原钴开采量的3.5倍以上); 在新能源材料制造领域, 企业年废电池(全国10%, 中国废电池回收量预测, 见图1)的循环实现钴锰(NCM)/镍钴铝(NCA)原料年产5000吨, CoO

年产 2 000 吨。企业同步推进废塑料再生业务，多年稳居行业第一，年产能达 10 万吨。经核算，格林美在 2023 年通过废弃资源综合利用链条可实现减碳量约 71.56 万吨（见图 2），系统性证实了“城市矿山”开发对双碳目标的支撑价值。

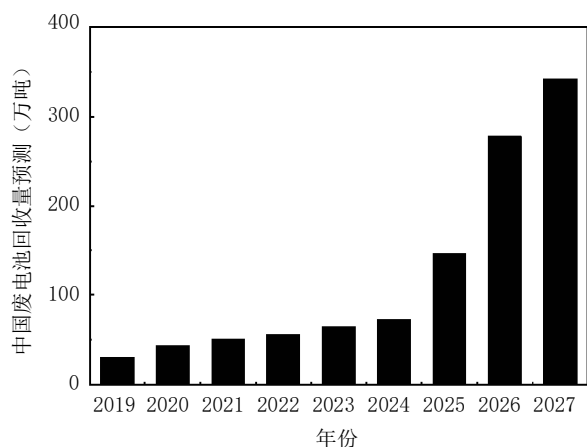


图 1 中国废电池回收量预测

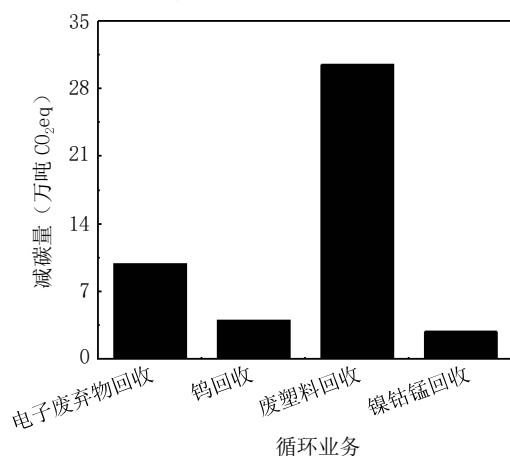


图 2 2023 格林美循环业务减碳量

得益于城市矿山开采的高收益性，2017-2019 年企业营收从 107.52 亿元增至 143.54 亿元。虽受钴价波动和疫情影响短期回调（124.66 亿元），但企业通过瑞交所上市，依托“技术迭代+产能本地化”模式，海外营收从 2020 年 25.97 亿元跃升至 99.36 亿元，全球份额提升至 7.3%。面对 2023 年以来全球贸易壁垒与经济增长放缓的冲击，企业 2024 年海外营收稳定在 45.55 亿元，仍较疫情时期（2020 年）增长 75.4%，印证 E-waste 高质量回收的商业韧性。

格林美的技术经济验证了“高复杂度电子废弃物—高附加值再生材料”转化路径的可行性，并提供了可复用的商业范式。对于 AI 导盲设备 E-waste，借鉴其运行模式，有望针对性实现金属提纯、金属/非金属

分离以及数据消除，推动资源再生。但处理高度集成化的 AI 导盲设备 E-waste 需升级工艺，这不可避免会增加难度与成本。一方面，需构建全生命周期成本—收益等模型对整体运行进行充分评估（包括资源回收率、能耗等）。另一方面，应给予政策扶持以强化企业的业务开展，如增加再生资源的回收价值以及相应的碳税减免等。总体来看，从 AI 导盲设备 E-waste 中回收丰富资源具有显著的开发空间。

3 结束语

本研究首先全面剖析了 AI 导盲设备 E-waste 的污染负荷和资源价值。然后系统评估了三大技术路径：（1）虽然物理法可以有效分选金属，但处理精度有限。需研发毫微级分选装备并利用低温等离子技术实现资源的高效精确提取，物理消磁与纳米破碎机制的引入可以进一步确保数据安全；（2）火法可以高效回收金属，但易造成金属流失并产生二次污染。可通过添加金属挥发抑制剂来防止金属流失，添加 CaCO_3 、 Fe_2O_3 防止污染物排放；（3）生物法虽然绿色环保，但运行周期长，浸出效率较低。可优化菌群及浸出液，并设计 pH 梯度多腔反应器等强化金属分离效率。最后通过格林美案例验证 AI 导盲设备 E-waste “回收—再生”模式的可行性。但高成本制约产业化，需通过适当的财政补贴与政策扶持（如再生资源高价回收与碳税减免）等激励行业发展。本研究为实现 AI 导盲设备 E-waste 治理体系从末端处置向“城市矿山”开发转变提供了思路，有利于资源高效利用与低碳发展协同。

参考文献：

- [1] 李云飞, 魏霞, 蔡鑫, 等. TCTP-YOLO: 盲人出行的典型障碍物及交通标识检测方法 [J/OL]. 计算机科学与探索, 1-18[2025-04-27]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5602.tp.20250224.1002.002>
- [2] 刘雨浓, 张贺然, 于可利. 我国主要电子废弃物拆解产生的废电路板产生量及流向分析 [J]. 资源再生, 2022(02): 38-40.
- [3] Islam A, Ahmed T, Awual R M, et al. Advances in sustainable approaches to recover metals from e-waste-A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(244): 118815.
- [4] Ding Y, Zhang S, Liu B, et al. Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2019(141): 284-298.
- [5] Cui J, Zhang L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,158(2-3):228-256.