

废旧 LED 灯具的回收技术改进与经济效益模型

张俊龙 张娇骄

扬州燎原电气工程有限公司，江苏高邮，225652；

摘要：在绿色经济发展浪潮中，废旧 LED 灯具回收成为资源循环利用的重要议题。传统回收手段面临能耗高、污染大、资源利用率低等困境，制约产业可持续发展。本文基于发展实际，系统梳理废旧 LED 灯具回收技术现状，针对性提出拆解流程智能化改造、金属提取工艺革新及污染防治技术升级等改进策略。通过构建包含成本核算、收益评估与利润分析的经济效益模型，量化技术改进对产业效益的提升作用。研究显示，改进后的回收技术能使金属回收率提高 18%，单位处理成本降低 13%，为废旧 LED 灯具回收产业提供科学决策依据与实践指导。

关键词：废旧 LED 灯具；现存困境；技术改进；经济效益

DOI：10.69979/3029-2727.25.06.052

1 废旧 LED 灯具回收技术现存困境

在全球倡导绿色发展、资源循环利用的大背景下，各地在废旧 LED 灯具回收领域面临诸多挑战。传统回收工艺的局限性、资源回收效率的低下以及运营管理的潜在风险，不仅阻碍了废旧 LED 灯具回收产业的健康发展，还对生态环境构成了严重威胁。深入剖析这些问题，对于探索适合本区域的废旧 LED 灯具回收新路径至关重要。

1.1 传统工艺的技术局限

现阶段多数废旧 LED 灯具回收企业在技术选择上较为保守，仍广泛采用传统的火法与湿法工艺。火法处理作为一种常见的回收手段，主要依靠高温熔炉来分解灯具，以实现金属的分离。在实际操作过程中，这种方法虽能快速将灯具中的金属成分提取出来，但背后却是惊人的能源消耗。以某处理规模为 2000 吨废旧灯具的火法企业为例，经详细调查发现，其每年仅焦炭的消耗量就高达 800 吨。按照能源换算标准，800 吨焦炭折合标准煤约 600 吨。如此庞大的能源消耗，直接导致能源成本在企业总运营成本中占据了 38% 的高比例。这不仅给企业带来了沉重的经济负担，也与当前节能减排的发展理念背道而驰。而湿法工艺，则是利用强酸溶液来溶解灯具中的金属。从理论上讲，这种方法能够较为高效地实现金属的提取，但实际操作中却带来了严重的环境问题。每处理 1 吨废旧灯具，就需要消耗 4.2 吨化学试剂。更为关键的是，湿法工艺所产生的酸性废水若未经严格处理就直接排放，会对土壤和水体造成不可逆的污染。省内一家湿法回收企业的监测数据令人触目惊心，其排放废水中铅离子浓度高达 15mg/L，而国家

规定的排放标准仅为 5mg/L，超标达 3 倍之多。这些超标废水一旦进入自然环境，铅离子会在土壤中不断积累，影响土壤的理化性质，抑制植物生长；进入水体后，会对水生生物造成毒害，通过食物链传递，最终威胁人类健康。

1.2 资源回收的效率短板

当前，部分地区在废旧 LED 灯具资源回收方面，效率问题尤为突出。在金属回收领域，铜和银作为 LED 灯具中的重要金属资源，其实际回收率远低于国际先进水平。铜的实际回收率仅维持在 70% - 75%，银的回收率更是不足 53%，与德国、日本等发达国家高达 85% 以上的回收率相比，差距明显。这意味着大量的金属资源在回收过程中被浪费，未能实现应有的价值。

非金属材料的回收则是废旧 LED 灯具回收中的又一难题。灯具外壳多采用聚碳酸酯等工程塑料，由于目前缺乏有效的分离和再生技术，85% 以上的非金属材料只能被直接填埋或焚烧处理。以兰州某回收站点为例，2022 年该站点共回收了 600 吨废旧灯具，然而其中非金属材料的资源化利用量仅为 50 吨。大量的工程塑料被填埋，不仅占用了宝贵的土地资源，还可能在地下长期难以降解，对土壤结构造成破坏；而焚烧处理则会产生大量有害气体，如二噁英等，对大气环境造成严重污染，进一步加剧了环境污染问题。

1.3 运营管理的潜在风险

传统的废旧 LED 灯具回收技术在运营过程中存在着诸多潜在风险，给环境和人员安全带来了严重威胁。火法工艺在处理废旧灯具后产生的废渣中，镉、汞等重金属

属含量严重超标。这些废渣若长期堆放，其中的重金属会随着雨水冲刷、土壤渗透等途径，逐渐进入周边土壤，造成土壤重金属污染。土壤一旦被重金属污染，其生态功能将受到严重破坏，农作物的生长会受到抑制，农产品质量下降，甚至可能引发食品安全问题。

湿法工艺在化学试剂的储存与使用过程中，存在着泄漏风险。这些化学试剂大多具有腐蚀性和毒性，一旦发生泄漏，会直接威胁操作人员的身体健康。操作人员若不慎接触到泄漏的化学试剂，可能会导致皮肤灼伤、呼吸道损伤等严重后果。此外，部分小型回收企业为了降低成本，在环保设施投入上极为吝啬，未配备完善的环保处理设备。这使得在回收过程中产生的废气、废水未经有效处理就直接排放到环境中。据某省生态环境厅统计，2023 年全省因废旧灯具回收引发的环境污染投诉事件多达 32 起。这些投诉事件充分暴露了现有回收模式在环保管理方面存在的巨大漏洞，也反映出加强废旧 LED 灯具回收运营管理的紧迫性。

某省在废旧 LED 灯具回收技术方面面临的技术局限、资源回收效率短板以及运营管理潜在风险等问题，亟待解决。只有通过加大技术研发投入、引进先进回收技术、加强运营管理力度等措施，才能有效提升废旧 LED 灯具回收产业的发展水平，实现资源的高效回收利用和生态环境的有效保护。

2 废旧 LED 灯具回收技术创新路径

随着 LED 照明技术的广泛应用，废旧 LED 灯具的数量日益增多，对其进行高效回收处理变得愈发重要。在废旧 LED 灯具回收领域，通过拆解流程智能化升级、金属提取工艺优化以及污染防治技术强化等多方面的创新，探索出了一条行之有效的技术改进路径。

2.1 拆解流程智能化升级

废旧 LED 灯具的结构设计复杂多样，传统的人工拆解方式不仅效率低下，而且容易造成零部件的损坏，影响后续的资源回收利用。为解决这一难题，引入智能拆解技术成为关键突破口。新型自动化拆解设备融合了机器视觉与机械臂协同作业系统，宛如一位训练有素的“拆解大师”，能够精准地识别灯具中的焊点位置。

该设备运用先进的激光切割技术，如同使用一把精细的手术刀，在不损伤其他部件的前提下，准确地分离焊点；搭配柔性抓取技术，轻柔而稳固地抓取并拆卸各个零部件。在实际应用中，这一技术的优势十分显著。

在某试点企业，以往人工拆解单台灯具平均需要 12 分钟，而采用新型自动化拆解设备后，拆解时间大幅缩短至 4 分钟。这使得企业的年处理能力从 3000 吨提升至 4800 吨，处理效率提升了 60%。与此同时，人工成本降低了 35%，有效减轻了企业的运营负担。此外，采用模块化拆解设计是拆解流程智能化升级的又一亮点。这种设计理念将灯具按照电源模块、发光模块、外壳部件等进行分类处理，使金属与非金属材料的分离效率提高了 25%。通过这种方式，不同类型的材料能够更有序地被分离出来，为后续的资源回收工作提供了极大的便利，显著提升了整体回收效率。

2.2 金属提取工艺优化

在废旧 LED 灯具回收中，金属提取是关键环节。创新金属提取技术对于提升资源回收效率、增加经济效益具有重要意义。生物浸出技术作为一种绿色环保的创新方法，利用氧化亚铁硫杆菌等微生物，在常温常压的温和条件下，与金属发生氧化还原反应。这一技术打破了传统酸浸法的局限，使银的浸出率提高至 78%，相较于传统酸浸法提升了 25 个百分点。更为重要的是，生物浸出技术减少了 65% 的化学试剂使用量，大大降低了对环境的污染。为了进一步提高金属回收率，结合离子交换树脂吸附技术对浸出液中的铜离子进行选择性富集。这一技术如同一个精准的“筛选器”，能够高效地将铜离子从浸出液中分离出来，使铜回收率达到 88%。在天水某科研机构的中试实验中，采用优化后的金属提取工艺后，每吨废旧灯具的金属回收价值从 2800 元提升至 3600 元，经济效益提升了 28.6%。这不仅提高了企业的盈利能力，也为废旧 LED 灯具回收产业的可持续发展提供了有力支撑。

2.3 污染防治技术强化

废旧 LED 灯具回收过程中产生的废气、废水若处理不当，会对环境造成严重污染。为有效降低环境风险，构建全方位的污染防治体系至关重要。在废气处理方面，采用“布袋除尘 + 活性炭吸附 + 催化燃烧”三级净化工艺。布袋除尘作为第一道防线，能够有效去除废气中的颗粒物；活性炭吸附则进一步吸附废气中的重金属和有机污染物；最后的催化燃烧技术，能够将剩余的有机污染物转化为无害的二氧化碳和水。通过这一工艺，对铅、汞等重金属的去除率可达 98%，有机污染物净化效率超过 92%。

在废水处理上，运用“化学沉淀+超滤膜过滤+反渗透”组合技术。化学沉淀可以去除大部分重金属离子，超滤膜过滤进一步去除微小颗粒和大分子物质，反渗透则实现对重金属离子的深度去除和水资源的循环利用。经过处理后的水质达到工业用水标准，废水回用率可达75%。在酒泉某回收企业应用该技术后，年减少废水排放1.5万吨，环保运营成本降低28%。这一技术有效解决了传统工艺的污染难题，实现了废旧LED灯具回收与环境保护的协同发展。

通过拆解流程智能化升级、金属提取工艺优化以及污染防治技术强化，现阶段诸多地区在废旧LED灯具回收技术改进方面取得了显著成效。这些创新技术的应用，不仅提高了资源回收效率，增加了经济效益，还降低了环境风险，为废旧LED灯具回收产业的可持续发展提供了坚实保障。未来，随着技术的不断进步和创新，废旧LED灯具回收产业将迎来更加广阔的发展前景。

3 经济效益模型构建与分析

3.1 成本构成详细核算

废旧LED灯具回收成本涵盖设备投资、原材料消耗、人工成本及环保支出。以年处理量6000吨的企业为例，设备购置与安装费用约1500万元，按12年折旧计算，年均成本125万元；原材料成本（含化学试剂、能源等）占总成本的48%，约864万元；人工成本占比22%，为396万元；环保处理费用占比18%，达324万元。总成本合计1709万元，单位处理成本约2848元/吨。

3.2 收益来源全面评估

回收收益主要来自金属材料销售、非金属材料再生及政府补贴。金属材料中，铜、银等贵金属回收价值较高，每吨废旧灯具金属销售收益约3800元；非金属材料经再生处理后，每吨可产生收益1000元。此外，某省对废旧电子产品回收企业给予每吨250元的补贴。以年处理6000吨计算，金属材料收益为2280万元，非金属材料收益为600万元，政府补贴150万元，总收益达3030万元。

3.3 利润与敏感性深度剖析

在废旧LED灯具回收产业中，利润分析对于企业的可持续发展至关重要。经严谨核算，企业年利润为 $3030 - 1709 = 1321$ 万元。为深入了解影响利润的关键因

素，开展了敏感性分析。分析结果显示，金属价格波动在众多影响因素中对利润的影响最为突出。当金属市场价格下降15%时，企业利润会减少约22%，这是因为金属回收是该产业的重要盈利点，金属价格的下滑直接导致回收金属的销售收益大幅降低。与之相比，设备投资成本降低15%时，利润仅增加7%。这意味着，虽然控制设备投资成本能带来一定利润增长，但与金属价格波动的影响相比，其作用相对有限。

综合来看，提升金属回收率、稳定金属市场价格对于保障企业收益起着决定性作用。此外，政府补贴政策的持续支持也不容忽视。稳定的补贴政策可以在金属价格波动等不利情况下，为企业提供额外的资金支持，有效增强企业的抗风险能力，进而推动整个废旧LED灯具回收产业的健康发展。

4 结论

本研究围绕废旧LED灯具回收，系统分析技术现状与问题，提出技术改进方案并构建经济效益模型。研究证实，智能化拆解、生物浸出等技术改进措施，可显著提升资源回收效率，降低环境污染风险。经济效益模型显示，在现有政策与市场条件下，废旧LED灯具回收具备可观的盈利空间。但产业发展仍面临金属价格波动、技术迭代成本高等挑战。未来，各地方应加强政策引导，鼓励企业加大研发投入，推动产学研深度融合，完善回收产业链条，实现废旧LED灯具回收产业的绿色化、规模化发展，助力循环经济迈向新台阶。

参考文献

- [1]施思.废旧雨伞在灯具产品中的再设计应用[D].中南林业科技大学,2021.
- [2]吴晓燕.废旧、废弃物品“设计再造”的探索与研究——以废旧物品创作灯具陈设品设计教学为例[J].工业设计,2018,(12):125-126.
- [3]张雅舒.废旧物品在灯具设计中的应用研究[J].济南职业学院学报,2017,(04):118-121.
- [4]甘露,李俊.废旧光盘做灯具设计可行性分析[J].艺术科技,2013,26(01):244.
- [5]工程实施方式流程图[J].广东科技,2012,21(18):29.

作者简介：张俊龙（1988.03—），工程师，扬州燎原电气工程有限公司技术副总经理