

废电路板中铜的资源化利用研究

肖梦晨^{1,2}, 张晓光^{1,2}

(1. 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124; 2. 北京工业大学材料循环低碳再生全国重点实验室, 北京 100124)

摘要: 随着电子信息技术的快速发展与电子产品更新换代的加速, 废弃电子电气设备(waste electrical and electronic equipment, WEEE)产生量不断增长, 已成为全球关注的重要环境与资源问题。废弃印刷电路板(waste printed circuit boards, WPCBs)是WEEE中金属含量较高的典型组成部分, 其中铜资源的高效回收具有重要意义。本文以WPCBs中铜的资源化利用为研究对象, 系统梳理了当前主要回收技术路径, 包括物理机械处理、热处理、湿法处理及超临界流体处理等方法, 并从资源回收率、环境影响、经济效益和技术可行性等方面对其应用效果进行了比较分析。结果表明, 各类技术在铜回收方面各具优势, 部分新兴技术在提升回收效率、降低能耗及减少二次污染方面表现出良好前景。在此基础上, 本文提出了提升WPCBs资源化水平的策略建议, 包括开展多维度技术评估、加大政策支持与资金投入、推进示范工程建设、发展本土化绿色处理工艺以及健全回收体系等。本研究的创新点在于将多种处理技术进行横向对比, 综合评估其在铜资源回收中的适应性, 并结合中国国情提出了具有实践指导意义的系统性对策, 为WPCBs的高值化利用提供了理论依据与技术支持。

关键词: 废电路板; 电子废弃物; 资源化利用; 铜回收; 新兴技术

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.012

中图分类号: X705; TF811; TG146.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)01-0126-13

随着电子科技的迅猛发展及电子电气市场的不断拓展, 废弃电子电气设备(waste electrical and electronic equipment, WEEE)的管理与回收已成为全球面临的环境保护与资源利用难题。大量废弃电子设备若得不到妥善处理 and 高效回收, 将对社会的可持续发展构成严重威胁。据统计, 2022年全球WEEE总量达到创纪录的 6.2×10^7 t, 相较三年前增加了 8.4×10^6 t, 其增长速度已远超正规收集和回收能力的提升速度。在技术进步、消费需求增长、维修渠道受限、产品生命周期缩短、电子化程度加深以及废弃物管理基础薄弱等多重因素共同影响下, 尽管整体回收率有所提高, 但废弃物的产生总量与增速已明显超出无害化回收资源化利用体系的能力增长, 使得WEEE管理与回收系统依然面临严峻挑战。预测到2030年, 全球WEEE将达到 8.2×10^7 t^[1]。在中国, WEEE涵盖了被弃置、停用和丢弃的电子电气设备及其所有组成部分, 同时也包括生产、流通过程中产生的不合格、报废及过期产品^[2]。相较于欧洲, 中国对WEEE的分类更为宽泛, 涵盖了11个

类别^[3]。

长期以来, 中国曾是“洋垃圾”主要接受国, 接收了全球超过70%的电子废弃物^[4]。WEEE含有多种可回收的金属资源, 包括基础金属、贵金属和稀土金属^[5], 同时也含有Pb, Hg, Cr, Cd以及溴系阻燃剂等有害物质^[6-7]。这些物质如果没有得到适当处理, 将对人类健康和自然环境构成严峻威胁, 甚至可能引发一系列社会问题。中国的矿产资源相对不足, 人均矿产资源占有量仅达世界平均水平一半, 因此, WPCBs的资源化利用不仅关系到环境保护, 更是一个至关重要的资源战略议题。

1 来源和特征

印刷电路板(PCB)是电子产品的关键组件, 是电子设备不可或缺的组成部分。随着信息技术的快速发展, 电路板的市场需求持续攀升。数据显示, 全球电路板行业的年均增长率达到8.7%, 其中中国的增长率高达14.4%。此外, 全球近40%的电路板生产活动集中在中国, 凸显了中国在该领域的重要

收稿日期: 2025-07-24; 修订日期: 2026-01-12

基金项目: 北京市科学技术协会青年托举工程项目(BYESS2023070)资助

作者简介: 肖梦晨(2001—), 男, 山东德州人, 硕士, 研究方向: 战略金属提取分离与资源化利用, E-mail: xiaomengchen163@163.com;

通信作者: 张晓光, 研究员, E-mail: zhangxg@bjut.edu.cn

地位^[8]。

废弃印刷电路板(waste printed circuit boards, WPCBs)具有“污染性”和“资源性”的双重特点。若WPCBs中的重金属、塑料成分及溴化阻燃剂等有害物质未经妥善管理,被随意丢弃或采用简单粗糙的手段处理,将对周围空气、水资源及土壤带来深度污染,严重威胁人类健康^[9-11]。广东贵屿某回收厂采用露天焚烧和使用强酸清洗的方式处理WPCBs,致使该镇及其邻近区域的空气与土壤遭受严重污染,重金属含量远远超出安全标准^[12-13]。

电路板中的金属含量远远超过天然矿石,其金属品位是普通矿石的几十倍甚至上百倍,因此从电路板中回收金属的成本远低于矿产开发。例如,1 t电脑主板中大约含有0.2 t铜和250 g金,铜的含量是铜矿的20~40倍,金的含量是金矿的25~250倍^[5]。中国作为一个人口众多且资源相对匮乏的国家,资源利用率相对较低,再生资源的利用率仅为世界先进水平的30%,环境污染和资源不足的问题日益凸显^[14]。近年来,中国的铜消费量不断增加,铜矿资源日益紧张,每年都需要进口大量的铜、铝等有色金属来缓解国内的供需矛盾。然而,WPCBs中还有大量的有色金属资源尚未得到有效利用和开发,造成巨大的战略资源浪费^[15]。因此,采用专用技术从WPCBs中回收金属具有良好的前景。

从国际视角来看,发达国家在WPCBs资源化处理方面已形成较为成熟的体系。欧盟早在2003年即实施《废弃电气电子设备指令(WEEE Directive)》,建立了以生产者责任延伸(EPR)为核心的闭环回收体系。其主流企业如Umicore(比利时)和Boliden(瑞典)采用火法-湿法联合工艺,在高温熔炼阶段高效富集Cu, Au, Ag, Pd等金属,再通过电解精炼实现高纯度回收,整体金属回收率超过98%,并实现了尾气与废液的全循环利用。日本则依托Panasonic, Dowa Eco-System等企业,发展出以高效机械分选与自动化湿法提取为核心的智能化处理体系,通过精细破碎与分级分选,实现不同材质电路板的差异化回收,其设备自动化程度与能耗控制均处于国际领先水平。

相比之下,中国WPCBs资源化利用虽起步较早,目前发展状况与世界先进水平仍存在明显差

距。首先,在技术层面以单元工艺研究为主,缺乏火法、湿法与生物法等多技术协同的系统集成;其次,在产业层面尚未形成稳定的回收网络与高附加值利用链,部分中小企业仍停留在低端拆解与酸浸处理阶段。此外,在政策执行与监管体系方面仍需加强,EPR制度覆盖率较低,绿色认证体系尚不完善。总体而言,中国正处于从“单工艺驱动”向“系统化、智能化、绿色化”转型的关键阶段。

2 铜资源化利用

当前,WPCBs中有价值成分的回收技术涵盖了物理分离、热解法处理、湿法冶金、生物降解以及超临界流体萃取等多种方法^[16-18]。物理机械处理法操作简单、成本低,环境污染小,但金属回收率相对较低,且可能产生噪音和粉尘。热处理技术通过焚烧和热解方式能有效分离金属和非金属,但存在环境污染和能耗大等问题。湿法处理技术使用酸试剂浸出有价金属,具有回收周期短、原料适应性强等优点,但工艺复杂,且浸出液处理成本高^[19]。

值得注意的是,不同类型WPCBs的金属组成差异对工艺选择有重要影响。消费电子类WPCBs(如手机、笔记本电脑)铜含量一般在15%~20%,适合采用物理分选与湿法冶金结合的工艺路径,以兼顾经济性与伴生金属的回收;而工业控制板、通信设备等高端电路板铜含量可达25%~30%,更适合通过火法冶金或高效湿法浸出实现规模化和高效回收。由此可见,WPCBs的分类识别不仅有助于资源潜力评估,也为处理工艺优化提供了决策依据。

此外,生物浸出技术和离子液体浸出法作为新兴技术,具有环境污染小和成本低的优势,但目前仍处于实验研究阶段。超临界处理技术则提供了一种新的高效回收金属的可能性,但设备成本高和设计基础数据不足限制了其应用。总体而言,各种技术都有其优势和局限性,选择合适的处理方法需要综合考虑经济性、环保性、资源特性以及技术成熟度。未来,随着技术的进步和环保要求的提高,更高效、环保的处理技术有望得到进一步的发展和应用。

2.1 物理机械处理法

采用物理机械方法处理WPCBs,具有操作简

便、工艺流程简洁、投资和运行成本较低以及环境污染较小等优势。然而,该方法的金属回收率通常偏低,总体为30%~70%,对不同金属的分离效果差异明显。常见的设备包括破碎机和分选机。破碎所得材料多为初步产品或中间产品,仍需结合火法或湿法冶金进一步提纯,以实现高价值金属的有效回收。在具体分选效果上,铜的回收率一般可达60%~70%,但贵金属(如Au, Ag)回收率往往不足40%,而钯、铂等稀贵金属在物理方法中的分选效率更低,通常不足20%。相比之下,非金属部分如玻璃纤维和树脂难以实现高效回收,往往作为填埋或低值利用材料处理。因此,物理方法更多用于前处理阶段,其关键在于将电路板有效解离。由于电路板兼具高硬度和韧性,破碎作业面临较大挑战,通常需将粒度细化至0.6 mm以下,才能获得理想的金属解离度,从而提高后续湿法或火法工艺的分离与提取效率。

WPCBs的物理机械处理方法基于材料物理特性差异(如密度、磁性、电导性及颗粒大小)来分离和回收金属与非金属成分。该方法首先通过破碎将WPCBs粉碎为小颗粒,再经过筛分分级按颗粒尺寸分类,并利用磁选、静电分离、密度分离和涡电流分离等手段提取有价值物质。磁选主要回收铁磁性金属。静电分离用于提取导电性金属,如铜合金。密度分离通过气流或水力实现金属与非金属的分离,如将WPCBs破碎至适当粒度后,利用水作为媒介,通过摇床实现金属(主要为Cu)与非金属(主要为树脂粉末)的有效分离^[20]。涡电流分离则适合非铁磁性金属(如Al, Cu)的分离过程,部分环节还可应用超声波分离技术以进一步提纯金属。物理机械处理法的整个过程环保高效,无需使用化学试剂,成本低、资源回收率高,但也存在金属纯度不足、粉尘与噪声污染以及非金属成分利用率偏低等问题。

刘方方等^[21]利用破碎、磁选和摇床等物理分离技术,成功制得金属品位为99.89%的合金粉末,铜含量高达94.72%。浙江丰利粉碎设备有限公司的FXS系列设备能高效分离金属与非金属,金属回收率达97%,且设备运行能耗低,处理能力达5 t/h^[8]。瑞典Scandinavian回收公司采用旋转剪切破碎机

和风力分选技术提纯WPCBs中的金属^[22]。德国Daimler Benz Ulm研究中心则将WPCBs通过磁选后用液氮冷脆处理,再碾压粉碎细化成粉末,以低温粉碎工艺防止有毒物分解,以静电分选彻底分离金属与非金属,但运营成本较高^[23]。

2.2 热处理技术

2.2.1 焚烧处理

焚烧处理WPCBs是一种通过高温分解有机物并回收金属资源的技术。该方法将电路板中的树脂和玻璃纤维等有机物在700~1200 °C高温下燃烧分解,保留金属组分以进行回收。工艺包括预处理(破碎减小体积以提升效率)、燃烧分解、烟气净化(如脱硫、脱硝及去除颗粒物以减少污染)以及金属回收(利用磁选、重力分离或湿法冶金提取金属)^[24]。焚烧处理的优势在于金属回收效率高、体积减小明显和处理速度快,但其不足之处包括污染风险高(如二噁英和重金属排放)、部分金属氧化挥发造成资源损失、能耗高及残渣处理复杂等。改进措施包括采用高效烟气净化装置、优化焚烧炉设计以减少金属损耗、结合湿法冶金提高回收率,或探索低温热解等替代方案。尽管存在局限性,焚烧处理仍因其效率高、适用于复杂废料而在WPCBs回收中占据重要地位。

2.2.2 热解技术

高温热解是一种在无氧或缺氧条件下利用高温分解有机物的技术,已广泛应用于废弃物资源化处理领域^[25]。在处理WPCBs的应用中,高温热解通常生成三类主要产物:热解气体、热解油和固体残渣,这些产物均可通过后续工艺进行回收与利用。其中气体与液体可作为能源或化工原料,固体残渣则便于进一步回收金属与玻璃纤维^[26-27]。相比传统处理方式,热解过程污染较低且具有高值化利用潜力,尤其是在催化剂作用下可显著优化产物组成与质量。

如图1所示,高温热解装置主要由进料系统、热解系统、中控系统、冷却系统、出料系统和尾气处理系统构成^[28]。该流程设计保证了原料的连续投放与反应环境受控,并可通过冷却与尾气净化实现对能量与污染物的高效管理,从而使产物得到有效利用并减少二次排放。

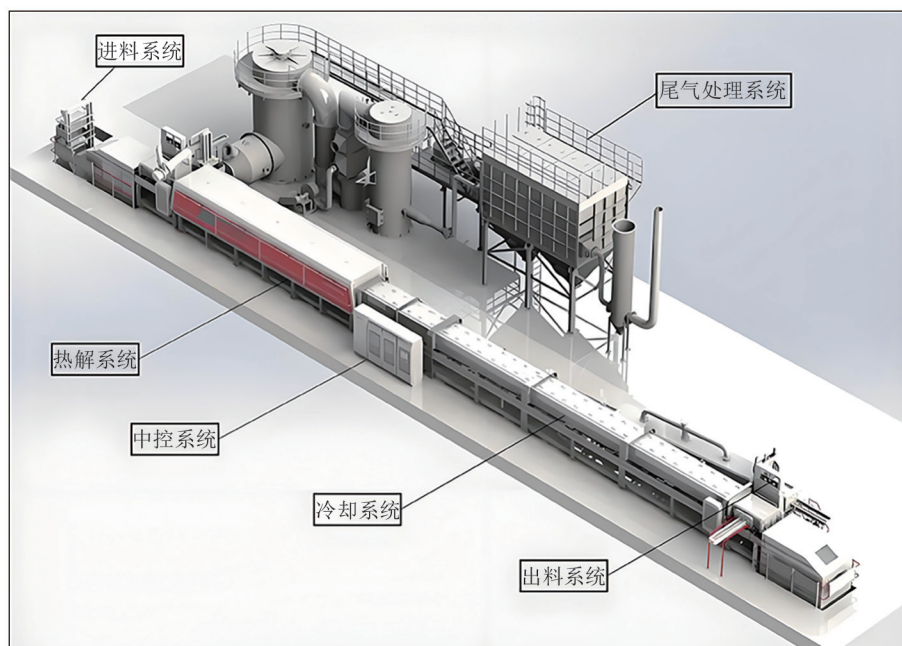


图1 热解系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pyrolysis system^[28]

为进一步提高金属回收效率并降低能耗,研究者尝试在热解过程中引入固体掺杂剂,如石墨粉、CaO、Fe₂O₃及ZSM-5等催化剂。郭勤等^[29]研究发现,石墨粉在微波热解中可显著增强加热均匀性并降低能耗,而CaO等金属氧化物不仅能吸附酸性气体、减少二次污染,还可与金属氧化物或卤化物反应生成低熔点化合物,从而促进金属释放与富集。通过这种“热解—固体掺杂协同”方式,可有效提升铜、锡、镍等有色金属的回收率。热解后固体残渣中的金属主要以单质或氧化物形式存在,可进一步通过酸浸、生物浸出或电化学沉积等方式高效回收铜、金、银、钯等贵金属^[30]。

此外,热解过程也为WPCBs中非金属组分,尤其是玻璃纤维的资源化利用创造了条件。玻璃纤维在高温热解后得以从树脂基体中释放,其化学稳定性高、机械强度高,具备较高的再利用价值。目前,热解残渣中玻璃纤维的回收方式主要包括物理分离、表面化学改性及再熔融造粒等途径。物理回收后的玻璃纤维可直接作为建筑材料填料或路基增强材料。经硅烷偶联剂或碱处理改性后,其表面活性增强,可作为再生复合材料的增强相。通过与热塑性树脂共混造粒,还可制备新型玻纤增强塑料(GFRP),应用于汽车、家电等领域^[30]。虽然玻璃纤

维的高值化利用仍处于发展阶段,但其潜力巨大,已成为WPCBs全组分回收体系中不可忽视的重要环节。

高温热解技术因其在资源回收和环境保护方面的优势,被视为WPCBs处理的理想方法之一。然而,该技术要实现大规模的工业应用,仍需攻克多方面的科学和技术难题。首先,需深入研究热解过程中复杂的化学反应机理,以指导反应器的设计和优化,提高能量利用效率和资源回收率。其次,由于WPCBs中广泛使用含溴阻燃剂,其在高温热解时可能释放有害物质,因此需系统分析溴化物的热分解行为、迁移规律及生成产物^[27]。目前的研究聚焦于特定温度条件下溴系化合物的转化路径和环境影响^[31]。例如,肖菡曦等^[32]通过热重分析和动力学建模,明确了HBr等气体的释放机制,为有效控制污染物提供了理论基础。此外,引入催化剂或吸附材料已被证明能够显著降低溴化物的排放,同时还可提高有机物的分解效率和油气产物的质量。

2.2.3 直接冶炼

直接冶炼法是一种将WPCBs高温熔炼以回收金属资源的处理技术,因具有较高的金属回收率而受到广泛关注。在这一方法中,破碎后的电路板原料无需复杂预处理,可直接进入熔炼设备,通过高

温还原反应将金属组分从废料中分离出来。典型的熔炼设备包括鼓风炉、卡尔多炉和顶吹炉等，各自具有不同的适应性和特点^[29]。

鼓风炉工艺通过向炉内添加还原剂(如焦炭)和造渣剂(如石灰)进行高温熔炼，可生成粗铜和其他贵金属产品，但其能耗高、环境影响较大^[33]。相比之下，卡尔多炉凭借更高的密闭性和灵活的原料适应性，能够有效减少烟气和粉尘的排放，但因投资成本较高，更适用于高铜含量电路板的处理。顶吹炉则通过高温熔化铜金属，使其沉积于炉底后提取，工艺简洁高效，适合处理大批量废料。其中，鼓风炉工艺在中国的应用较广泛。

近年来，针对直接冶炼法的优化研究较多。例如，宋珍珍^[34]通过富氧侧吹熔池熔炼技术创造富氧环境来提高熔炼效率，并通过协同回收废气与热值显著降低能耗，同时实现了铜、锡等金属的高回收率(见图2)。此外，一种基于特定渣体系的冶炼方法，通过优化熔炼条件(如温度、时间、熔剂比例等)，有效提升了多种金属的提取效率。彭浩^[35]提出了一种WPCBs还原熔炼的新工艺，该工艺基于

FeO-SiO₂-Al₂O₃-CaO渣体系进行，使得WPCBs中铜和锡的回收率分别达到91.98%和86.30%。此方法虽然运行成本较高，但在提高金属回收效率方面具有显著优势。

2.3 湿法处理技术

湿法处理技术在WPCBs金属回收中具有重要地位，其核心优势在于可实现多金属的高效浸出与选择性分离。该方法通过酸碱体系溶解金属，再结合溶剂萃取、离子交换、电解沉积和化学沉淀等工艺完成分离与回收^[36-38]。与火法工艺相比，湿法工艺能耗较低、环境影响相对较小，尤其在贵金属和稀有金属的高选择性回收方面具有明显优势。然而，其瓶颈在于废液和残渣处理、试剂消耗及二次污染风险。当前湿法工艺处理WPCBs的研究集中于绿色浸出剂、高效分离材料和流程优化，旨在推动湿法技术向低环境负荷和高资源利用率方向发展。

2.3.1 酸浸法处理

铜在一定条件下可与硝酸、硫酸等无机氧化性强酸反应，转化为可溶性铜盐并进入酸浸液中^[39]。Jadhav等^[40]发现在1 mol/L H₂SO₄常温常压下浸出

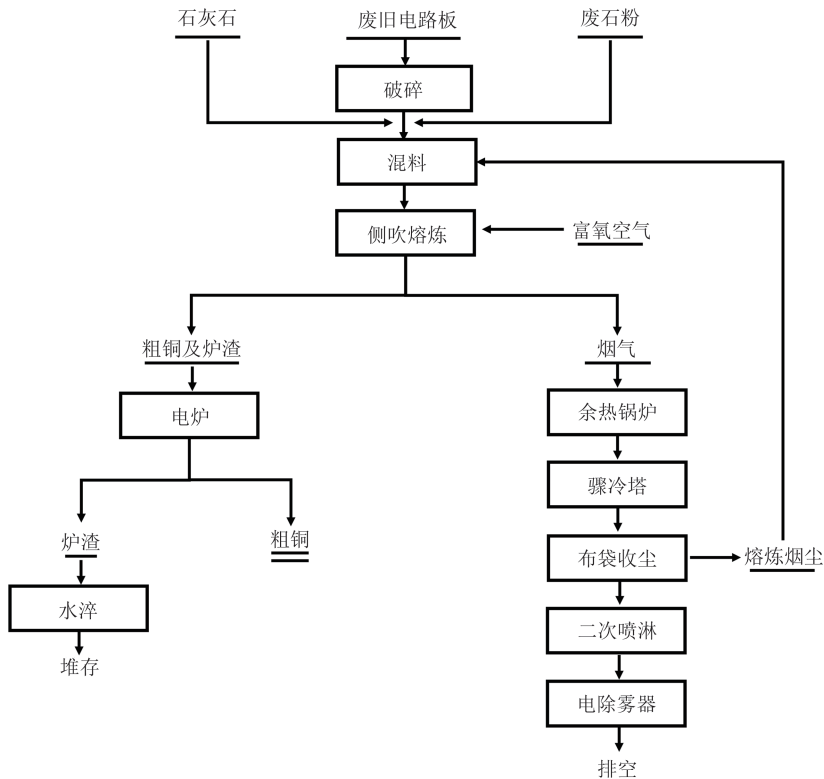


图2 侧吹熔炼示意图
Fig. 2 Flow diagram of side-blown smelting^[34]

96 h后,铜的浸出率仅为8.8%。但Altansukh等^[41]发现在2 MPa, 120 °C条件下,Cu和其他杂质金属如Ni, Zn, Fe等浸出率均接近100%。周葵^[42]研究发现利用乙酸和柠檬酸均能浸出铜,且浸出率较高,利用超声波辅助浸出能够进一步提高浸出速率。此外,加入氧化剂如 Fe^{3+} , H_2O_2 等可在常温下实现WPCBs中铜的酸浸出。Birloaga等^[43-44]采用硫酸-双氧水体系浸出WPCBs中的铜,浸出率接近100%。王保仁^[45]采用双氧水-硫酸体系对WPCBs中金、银、铜进行湿法回收研究,在特定条件下铜浸出率达到99.14%。刘昭成等^[46]发现酸浸出铜的能力依次为硝酸>盐酸>硫酸。这些研究为湿法回收工艺优化及金属高效提取提供了理论支持。酸浸法的优点包括回收周期短、原料适应性强、便于进行分离提纯等,但其工艺流程较为复杂,浸出液无害化处理成本高,浸出工艺和浸出效率受原料纯度和成分限制。

2.3.2 氨浸法处理

氨浸法是一种利用氨水和氨盐溶液选择性溶解WPCBs中金属铜的湿法回收技术,具有高效、环保的特点。氨浸法的基本原理是铜被溶解氧或 H_2O_2 氧化,进而与氨形成稳定的氨配离子 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$,并进入氨浸液中^[47]。李静^[48]以空气为氧化剂,采用 $\text{NH}_3\text{-(NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系浸出WPCBs中的铜,发现在常温下浸出4 h,铜的浸出率便达到了96.7%。缪畅等^[49]采用低浓度氨水浸出,以草酸盐沉淀回收WPCBs中的铜(图3),铜沉淀率达到98.15%。

由于WPCBs中含量较高的Fe, Al, Mg等金属,在碱性反应条件下会形成沉淀,因此采用氨浸法得到的浸出液相对于酸浸法来说,纯净度更高,杂质含量更低,浸出剂用量更少。但氨水的易挥发性使得损耗问题和环境污染问题较为突出。

2.3.3 光催化浸出处理

光催化浸出的基本原理是光催化剂在一定波长的光线照射下受激生成电子-空穴对,进而与光催化剂表面吸附的溶剂反应生成羟基、超氧自由基,从而具备极强的氧化作用,可将WPCBs上的金属元素氧化并剥离到溶剂中^[50]。Chen等^[51]采用 TiO_2 作为光催化剂,乙腈为溶剂,成功从电路板、三元催化剂、铜矿石中浸出了Cu, Au, Ag等金属,其中Al, Fe等杂质金属浸出率基本为零。光催化浸出技术具

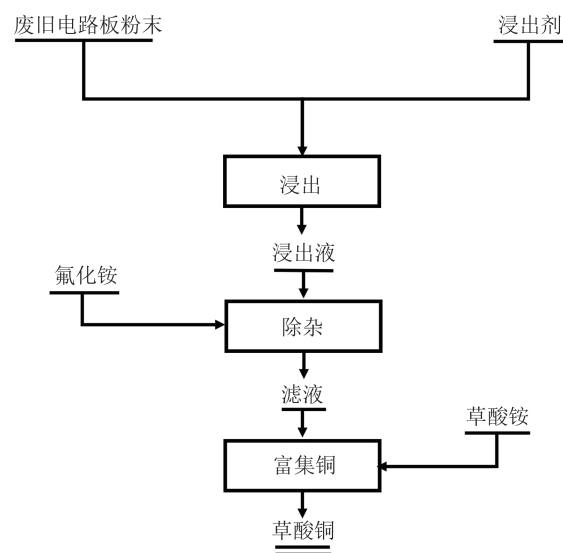


图3 氨浸实验流程图

Fig. 3 Flow chart of ammonia immersion experiment^[49]

备反应条件温和、氧化能力强、无二次污染的优点,已成为物理、环境、能源等多学科的热点研究领域。但是该技术浸出时间较长,且对紫外光强度、催化性质和溶剂透光度都有较高的要求。

2.3.4 生物浸出技术处理

生物处理技术在WPCBs的金属回收中扮演着重要角色,其核心是利用微生物及其代谢产物通过吸附、络合和溶解等作用,从WPCBs中提取出有价金属。这种技术常被称为微生物湿法冶金,因其环境友好和选择性强,特别适用于贵金属的回收和富集。

根据代谢特性,微生物可分为两类:硫杆菌和氰细菌。硫杆菌主要通过氧化作用促进金属浸出,利用 Fe^{3+} 和 H_2SO_4 等代谢产物加速铜、铅、锌、镍和铝等活泼金属的溶解过程,而氰细菌通过其代谢产生的氰根 CN^- 与特定金属形成稳定的络合物,从而实现金和银等贵金属的高效浸出。这种方法避免了传统湿法冶金中使用剧毒化学品的需求,大幅减少了环境污染。在生物浸出过程中,不同类型的混合细菌相互作用和协同工作,以提高其代谢活动和金属提取率。微生物的协同作用机制包括铁氧化细菌和硫氧化细菌的协同、自养细菌和异养细菌的协同、吸附细菌和自由细菌的协同以及中温细菌和嗜热细菌的协同^[52-53]。

在实际应用中,Gu等^[54]使用嗜酸性氧化亚铁硫杆菌浸出WPCBs粉末中的铜,实现了74%的铜

浸出率。通过加入 0.8 g/L 石墨烯作为催化剂, 浸出率可以提升至 84%^[54]。Thacker 等^[55] 利用以钩端螺旋体为主的氧化亚铁硫杆菌浸出 WPCBs 中的铜, 发现 NaOH 预处理能显著提高生物浸出的效果, 铜浸出率最高可达 96.86%。Erust 等^[56] 采用氧化铁二硫

硫杆菌浸出 WPCBs 中的铜, 在 10 天内浸出率超过了 95%。Erust 等还对比了从 WPCBs 生物浸出液中电沉积回收铜的三种工艺路线: 直接电沉积; 针铁矿沉淀除铁后电沉积; 氢氧化铁沉淀-溶剂置换结晶 (SDC) 预处理后电沉积。工艺路线如图 4 所示。

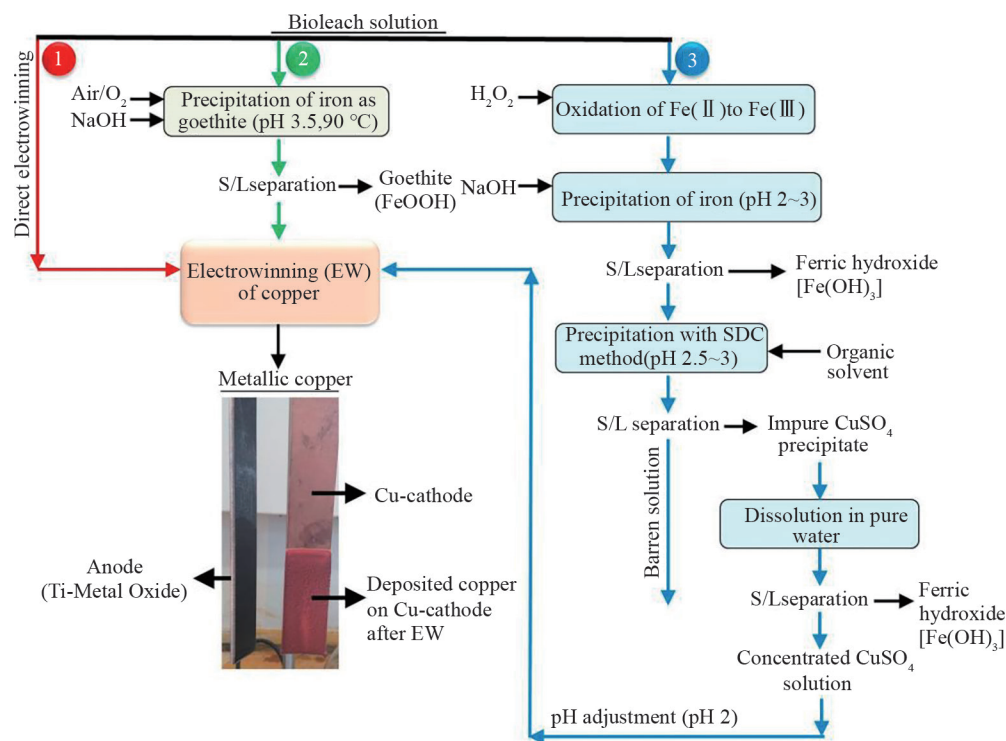


图 4 从半中试规模 WPCBs 生物浸出液中通过电沉积回收铜的 3 种不同工艺路线示意图

Fig. 4 Three process routes for copper recovery from semi-pilot scale WPCBs bioleaching solution via electrodeposition^[56]

尽管生物法在回收 WPCBs 金属中表现出工艺简洁、成本低廉以及对环境友好的显著优势, 但其实际应用仍面临一系列挑战。目前, 生物法应用的主要限制在于浸出过程耗时较长, 金属回收效率难以满足工业化需求, 同时微生物对生长环境和操作条件的要求较高, 使得工艺的稳定性 and 适用性受到一定制约。因此, 该技术目前仍集中于实验室研究阶段, 尚未大规模推广和产业化应用。

随着研究的深入, 研究者们正致力于通过改进微生物菌株、优化培养条件和反应参数, 以及开发复合生物技术来克服这些局限性。未来, 若能实现生物法效率的显著提升并降低其对外部条件的依赖, 这一绿色技术有望在 WPCBs 金属回收领域中实现更广泛的应用。

2.3.5 离子液体浸出法处理

离子液体是由离子构成的液态物质, 对众多无

机和有机化合物展现出优异的溶解性能, 并且具备溶剂和催化剂的双重作用。Huang 等^[57] 首次探索使用离子液体法来提取 WPCBs 中的铜。研究发现, 离子液体 [Bmim]HSO₄ (1-丁基-3-甲基咪唑硫酸氢盐) 对 WPCBs 中铜的浸出效率极高, 接近 100%。Chen 等^[58] 探索了 6 种离子液体对 WPCBs 中铜的浸出效果, 发现铜离子浸出率均接近 100%。与无机酸不同的是, 离子液体对铜的浸出效果主要受扩散作用影响, 而无机酸浸出效果则主要受表面反应控制。Zhang 等^[59] 以几种酸性离子液体为浸出剂, 研究了粉碎铜的粒度、使用的离子液体类型、过氧化氢用量、固液比、浸出温度、浸出时间等参数对 WPCBs 中铜浸出率的影响。如图 5 所示。

实验结果表明, 随着浸出温度的升高, 铜的浸出速率增大; 随着浸出时间、过氧化氢用量和固液比的增加, 浸出速率先增大后减小。最佳浸出条件

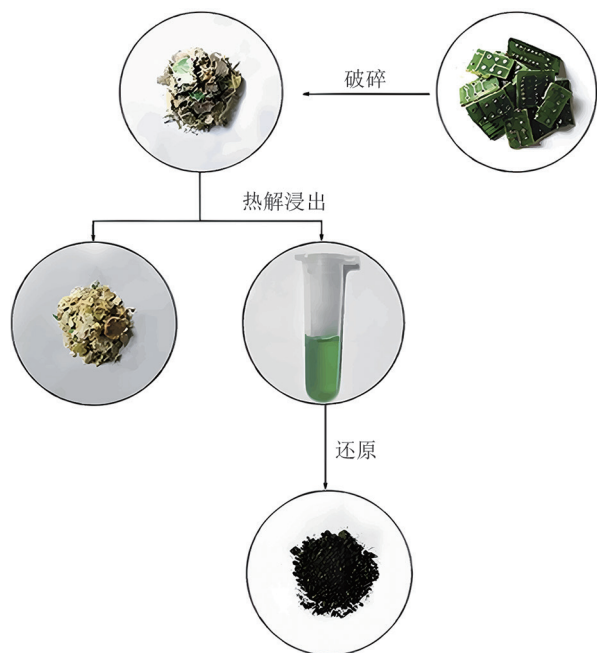


图5 使用离子液体从WPCB中回收金属的流程示意图

Fig. 5 Flow diagram of recovering metals from WPCB using ionic liquids^[59]

下铜浸出率可达98.31%。离子液体法是一种新兴的绿色浸出工艺,但其极易吸收空气中水分进而导致功能下降的问题仍难以解决,限制了其产业化应用。

2.3.6 电化学回收技术

WPCBs电化学回收技术是一种基于电化学原理,从废弃电路板中高效、环保地回收金属资源(尤其是铜)的前沿方法。近年来,该技术因能耗低、污染小、金属回收率高等优势,受到电子废弃物处理领域的广泛关注,被视为解决电子废弃物污染与资源浪费问题的重要途径之一^[60]。该技术主要包括四个核心步骤:1)预处理阶段,将废弃电路板破碎、分选,富集金属组分;2)溶解阶段,通过化学或电化学方式将金属(如铜)溶解为离子态(如铜氨络合物);3)电沉积回收阶段,在电解槽中通过阴极还原反应将金属离子沉积为金属单质,实现高纯度回收;4)电解液再生阶段,利用热再生或电再生等方式恢复电解液活性,实现循环使用。例如,基于热再生氨电池(TRAB)的“溶解—热再生—电沉积”三步法,利用低温余热驱动铜的溶解与沉积过程,能够显著降低系统能耗并获得高纯度铜产品。该技术的主要优势包括:高选择性,可针对铜等特定金属

实现高效回收;低能耗与高环保性,部分系统可利用低温余热或自发反应产电,避免了传统火法和强酸浸出造成的污染;高纯度产品,所得金属铜纯度可达99%以上。同时,整个电化学过程通常在常温常压下进行,操作条件温和,设备腐蚀小,具有良好的工业化潜力。

在实际应用中,Fogarasi等^[61-62]提出以 FeCl_3 为氧化剂的介导电化学工艺,在 4 mA/cm^2 , 0.37 mol/L 条件下获得纯度为99.04%的铜,能耗为 1.75 kWh/kg ,金富集25倍且无需机械预处理。之后改用三室反应器并优化流速至 400 mL/min ,铜纯度升至99.95%,能耗降至 1.59 kWh/kg ,金、银分别富集15倍与10倍,验证了同步回收铜与贵金属的高效性与工业化潜力。重庆大学团队开发的TRAB系统结合热再生与电沉积,实现了绿色、低能耗的铜回收过程,适用于多类型废弃电路板。这些研究表明,电化学回收技术在资源循环利用与环境保护方面具有显著优势和应用前景。

然而,该技术在发展过程中仍面临诸多挑战,如电解液稳定性与循环效率不足、工业化放大过程中设备与工艺尚需优化、多金属协同回收体系尚未完善等。此外,电极材料的耐久性、电解槽结构设计及其与其他回收工艺的集成优化,均是未来的重要研究方向。

综上,WPCBs电化学回收技术是一种前景广阔的绿色回收工艺,特别适用于铜等有色金属的高效与清洁回收。随着电解液再生技术、系统集成与自动化控制技术的不断进步,该技术有望成为电子废弃物绿色处理与资源化利用的重要发展方向。

2.4 超临界处理技术

超临界流体指的是物质在温度和压力均超过临界值时所呈现的一种特殊状态,兼具液体的高密度和溶解能力,以及气体的高扩散性和低黏度。这种独特的物理化学性质使超临界流体在多个领域具有广泛的应用潜力。超临界二氧化碳常被用于萃取和分离有机化合物,具有无毒、可回收和条件温和等优势,广泛应用于食品加工、医药提纯和废弃物处理。而超临界水因其在高温高压下具有非极性特性,能够溶解多种有机物并快速促进化学反应,特别适用于有机废物降解和危险废弃物的无害化处理。

随着技术的不断进步,超临界处理技术正向更加高效和经济化的方向发展,为实现资源高效利用和环境保护提供了新思路,同时也推动了绿色化工技术的创新和产业化应用。在WPCBs处理领域,超临界水技术主要分为超临界水氧化和超临界水解聚两种方法^[63-64]。如图6所示。

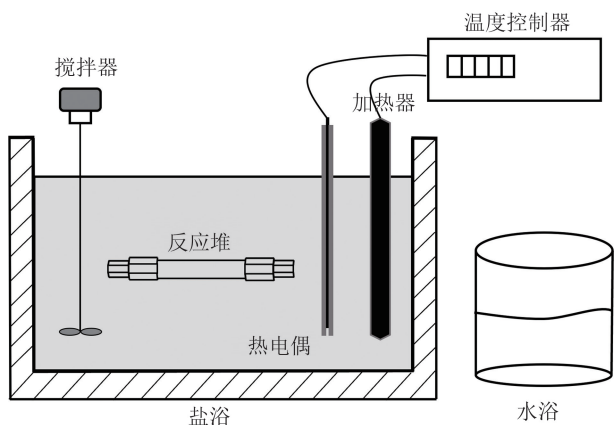


图6 水热技术实验装置

Fig. 6 Hydrothermal technology experimental apparatus^[63]

Xiu等^[65]通过超临界水氧化处理WPCBs,在420℃条件下,Cu的回收率达到99.8%,而Zn和Cr等杂质金属的回收率几乎为零。这种方法为高效回收WPCBs中的金属提供了新的可能性。Calgaro等^[66]使用超临界CO₂作为溶剂,辅以H₂SO₄和H₂O₂,在7.7 MPa和35℃的条件下,20 min内Cu的浸出率达到了88.79%。

超临界二氧化碳技术可高效分解WPCBs中的树脂层,从而实现铜箔和玻璃纤维的分离。其主要优势在于反应彻底且效率高,通过氧化降解有机物避免了二次污染,同时提高了金属与非金属组分的分离质量。这一技术在废弃电子产品资源化方面展现出巨大的应用潜力。

尽管超临界二氧化碳技术具有环保和高效的优势,但在实际应用中仍存在瓶颈。首先,超临界设备制造和运行的高成本制约了其工业化推广;其次,缺乏成熟设计的基础数据使得工艺优化难度较大。此外,分离后所得的金属组分仍需进一步纯化和回收处理,这增加了整个流程的复杂性和成本。因此,该技术的广泛应用仍需在设备开发、工艺优化和成本控制等方面进行深入研究,为实现工业化提供支持。

2.5 组合工艺及工业应用分析

在实际工业应用中,单一技术往往难以同时兼顾经济性、回收率和环境友好性,因此“组合工艺”成为主流选择。不同技术路线在WPCBs铜回收中的对比分析见表1。组合工艺通过不同技术的优势互补,可实现更高效和更绿色的资源回收路径。

常见组合模式为物理机械处理与湿法冶金相结合的模式。这类“组合工艺”先通过破碎与分选提高金属解离度,再利用湿法实现铜及伴生贵金属的高效浸出与提纯,适用于低品位或中品位WPCBs,是目前应用最广的工艺路径。其中:热解或焚烧结合湿法冶金可通过热处理去除树脂并富集金属,降低湿法试剂消耗,同时减少有机物对分离过程的干扰,适合大规模工业处理;生物浸出结合电化学回收则利用微生物代谢产物选择性溶出金属,再通过电沉积实现高纯度回收和绿色环保,这一“组合工艺”目前还处于中试阶段;超临界流体结合湿法处理在实验室研究中表现出优异前景,可在超临界条件下分解树脂和玻璃纤维,提高金属暴露度,从而实现高效分离。

尽管这些组合工艺在回收率、能耗和环境友好性方面具有显著优势,但目前研究仍存在一些不足。一方面,大多数文献仅报告单一技术或组合工艺在实验条件下的表现,缺乏在相同原料和工业条件下的系统对比,难以量化比较不同工艺的经济性和可操作性。另一方面,现有研究多关注技术本身的回收效率或环境指标,缺少对整个工艺链(包括前处理、尾渣处理、废液管理等环节)的全流程评估。此外,部分新兴组合工艺仍停留在实验室或中试阶段,工业化推广面临成本、设备兼容性及安全性等问题,同时缺少模块化设计与智能优化,使得工艺链的灵活性和适应性受限。

值得注意的是,超临界流体处理、离子液体浸出和生物浸出等新兴工艺虽然在实验室层面展现出优异的分选性能和绿色发展潜力,但其工程化仍面临多方面约束。例如:超临界流体系统设备投资高、运行压力大,对密封性和安全性要求严苛;离子液体体系成本较高且部分液体存在毒性与回收困难问题;生物浸出过程周期长、微生物活性受温度和pH等环境因素影响显著,放大效应不稳定。此外,从

表1 不同技术路线在WPCBs铜回收中的对比分析

Table 1 Comparative analysis of different technical routes for copper recovery from WPCBs

技术路线	铜回收率	能耗	二次污染风险	成本水平	适用场景	主要缺点
物理机械处理	30%~70%	低	粉尘/噪声	低	前处理、粗分选	金属纯度不足，贵金属难回收
热处理(焚烧/热解)	70%~90%	高	二噁英、溴化物	高	大批量复杂板	能耗高，残渣处理复杂
湿法冶金	80%~99%	中	废液排放	中	贵金属、稀有金属	试剂消耗大，废液处理难
生物浸出	50%~95%	低	低	低	贵金属选择性回收	浸出周期长，工业化不足
超临界流体	85%~99%	中-高	低	高	树脂分解+金属分离	设备投资高，缺乏数据
组合工艺	>90%	中	可控	中	工业主流应用	流程复杂，需精细化管理

产业链角度看，这些工艺缺乏成熟的工程放大经验与配套装备，难以实现与现有湿法或热处理系统的无缝衔接，导致产业化路径受限。

综上所述，未来研究应在文献分析的基础上，结合工业实践对不同组合工艺进行系统梳理与评价，明确其优缺点和适用条件，重点关注新兴工艺的设备投资、放大约束与产业链匹配问题，并探索模块化、智能化的工艺链设计，以推动WPCBs高效、绿色的资源化利用。

3 总结与展望

随着电子科技的迅猛发展及电子电气市场的不断扩大，WEEE的管理与回收已成为全球性环境保护与资源利用难题。WPCBs作为WEEE的重要组成部分，其资源化利用的难题更加突出。物理机械处理法、热处理技术、湿法处理技术以及超临界处理技术对WPCBs中铜的资源化利用具有良好的效果。推动这些技术实现工业化应用，提升WPCBs资源化利用水平，可重点从以下几个方面着手：

1)全面评估处理技术

在对比不同技术时，不仅应从经济、环境和技术可行性三个维度展开，还需建立多指标评价体系，例如以“能耗(kWh/kg)、金属回收率(%)、二次污染物排放(mg/L或g/t)、处理成本(元/kg)”作为核心评价参数。同时，建议建设中试平台，对生物浸出、超临界流体处理等新兴技术进行规模化验证，形成数据库支撑后续产业推广。

2)加大政策支持力度

在国家层面，除设立“废弃电子产品资源化专项基金”外，还可探索建立“绿色回收技术目录”，对入选技术给予财政补贴与绿色信贷支持，重点扶持高效分选、电化学回收、超临界流体处理等关键

技术的中试放大与示范应用。同时，可通过绿色信贷、碳减排激励等金融工具，引导企业建设绿色循环工厂。地方政府可在产业园区推行差异化电价和税收优惠政策，吸引企业落地。建议建立碳减排核算体系，将WPCBs回收产生的碳减排效益纳入企业碳排放考核指标，以进一步提升企业参与动力。

3)构建示范工程与试点项目

应加快建设区域性资源化示范工程，形成可复制、可推广的产业化模式。例如，在长三角、珠三角等电子产业集中区，建立“废弃电路板绿色处理示范园”，实现原料收集、分选、回收、再制造全流程闭环管理。同时，建议在广西、贵州等有色金属资源集中地区，依托现有冶金企业建设区域性WPCBs绿色回收示范基地。基地应配备前端智能分选系统、规模化湿法冶金装置以及废液闭路循环处理系统，并通过试点项目探索标准化流程，形成“产学研政”协同创新机制。试点运行过程中，应定期发布环境监测与经济评估报告，以支撑全国推广。

4)结合中国实际推动本土化技术创新

在技术创新方向上，应重点突破低酸耗深共熔溶剂体系、耐高盐生物菌株筛选、自动化拆解与分选装备等核心环节技术，推动绿色、高效、智能化的技术集成与应用。在产业化路径上，可建立“冶金+回收”产业联盟，形成纵向协同的资源化利用体系。联盟的上游，由电子废物拆解企业负责废电路板的分类、破碎与初级分选，确保金属富集物的稳定供应；中游，由冶金企业开展湿法或电化学精炼，实现铜及伴生贵金属的高纯度回收；下游，则由材料加工与电子制造企业负责再生金属的再利用与高值化应用，形成“废弃物—资源—产品”的闭环循环链条。科研机构在联盟中承担技术攻关与工艺优化任务，为工艺放大、设备升级及环境管理提

供技术支撑。这一模式可实现不同主体间的功能互补与资源高效流动,构建以技术创新驱动的协同发展格局。此外,建议逐步建立国内绿色回收工艺的专利池与标准体系,推动技术成果共享与知识产权保护,提升中国在WPCBs资源化领域国际标准制定中的话语权与竞争力。

5)加强公众与企业参与意识

除宣传教育外,还可推动建设线上回收平台,通过积分奖励或绿色认证,提升公众参与积极性。在行业层面,建议建立电子信息企业回收责任延伸机制(EPR),推动生产企业在产品设计阶段考虑可回收性。同时,可依托行业协会制定WPCBs分级分类与资源化利用指南,提升全行业的合规意识与执行力。

参考文献:

- [1] BALDE C, KUEHR R, DEUBZER O, et al. GEM 2024 18-03 web page per page web [M]. 2024.
- [2] 废弃电器电子产品处理污染控制技术规范[J]. 中国资源综合利用, 2010, 28(3): 7-12.
- [3] EUROPEAN PARLIAMENT, COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) [Z]. Official Journal of the European Union, 2003, L series(37): 24-38.
- [4] ISLAM M T, IYER-RANIGA U. Life cycle assessment of e-waste management system in Australia: case of waste printed circuit board (PCB)[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 418: 138082.
- [5] TANSKANEN P. Management and recycling of electronic waste [J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 1001-1011.
- [6] OGUNSEITAN O A, SCHOENUNG J M, SAPHORES J M, et al. The electronics revolution: from E-wonderland to E-wasteland [J]. Science, 2009, 326(5953): 670-671.
- [7] SONG Q B, LI J H. A systematic review of the human body burden of e-waste exposure in China [J]. Environment International, 2014, 68: 82-93.
- [8] 吴宏富. 我国废旧线路板回收利用与无害化处理技术获得重大进展[J]. 再生资源研究, 2005(1): 4-5.
- [9] ZHANG B, GUO M, LIANG M Y, et al. PCDD/F and DL-PCB exposure among residents upwind and downwind of municipal solid waste incinerators and source identification [J]. Environmental Pollution, 2023, 331: 121840.
- [10] SANTA-MARINA L, IRIZAR A, BARROETA Z, et al.

Serum levels of PCDDs, PCDFs and dl-PCBs in general population residing far and near from an urban waste treatment plant under construction in Gipuzkoa, Basque Country (Spain)[J]. Environmental Research, 2023, 236: 116721.

- [11] 王治民, 孙建薇, 张吉, 等. 废旧线路板回收的污染防治技术综述[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(8): 61-64, 111.
- [12] QIN Y F, LIU Y Q, WANG J B, et al. Emission of PAHs, PCBs, PBDEs and heavy metals in air, water and soil around a waste plastic recycling factory in an industrial park, Eastern China [J]. Chemosphere, 2022, 294: 133734.
- [13] LIN C M, ZENG Z J, XU R B, et al. Risk assessment of PBDEs and PCBs in dust from an e-waste recycling area of China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 803: 150016.
- [14] TAKATA N, LEE S H, TSUJI N. Ultrafine grained copper alloy sheets having both high strength and high electric conductivity [J]. Materials Letters, 2009, 63(21): 1757-1760.
- [15] CHEN L W, SHI Q N, CHEN D Q, et al. Research of textures of ultrafine grains pure copper produced by accumulative roll-bonding [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 508(1/2): 37-42.
- [16] WU C F, AWASTHI A K, QIN W Q, et al. Recycling value materials from waste PCBs focus on electronic components: technologies, obstruction and prospects [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(5): 108516.
- [17] VAKILCHAP F, MOUSAVI S M. Structural study and metal speciation assessments of waste PCBs and environmental implications: outlooks for choosing efficient recycling routes [J]. Waste Management, 2022, 151: 181-194.
- [18] 张世镖, 李健, 赵国惠, 等. 废弃线路板中金属循环利用技术研究进展[J]. 黄金, 2021, 42(3): 79-82.
- [19] 舒波, 余彬, 任军祥, 等. 我国废旧电路板物理分选工艺现状及展望[J]. 铜业工程, 2023(3): 178-186.
- [20] 张希忠. 废电路板处理技术评析[J]. 资源再生, 2008(3): 46-49.
- [21] 刘方方. 物理法从废线路板中回收铜合金粉末新技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [22] 马小垒. 废弃线路板资源化利用研究[J]. 能源与节能, 2021(7): 187-190.
- [23] 沈志刚. 废印刷电路板回收处理技术进展[J]. 新材料产业, 2006(10): 43-46.
- [24] 柳林, 刘红召, 王威, 等. 废旧线路板综合回收利用技术研究进展[J]. 现代矿业, 2024, 40(6): 203-208.

- [25] 蔡灿, 许佳琦, 杨聪仁, 等. FR4环氧树脂覆铜板热解动力学及产物组成[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(7): 2284-2294.
- [26] SØRMO E, KRAHN K M, FLATABØ G Ø, et al. Distribution of PAHs, PCBs, and PCDD/Fs in products from full-scale relevant pyrolysis of diverse contaminated organic waste[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 461: 132546.
- [27] 李红军, 孙水裕, 邓丰, 等. 热解处理废旧线路板方法的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2009, 27(4): 15-18.
- [28] 湖南顶立科技有限公司. 漆包线连续热解提纯设备 电子垃圾处理设备[Z]. 长沙: 湖南顶立科技有限公司, 2023.
- [29] 郭勤, 苗瑾超, 苏鹏, 等. 微波技术回收废弃电路板中的金属离子[J]. 再生资源与循环经济, 2018, 11(12): 28-31.
- [30] 袁浩, 刘佳兴, 韩百岁. 废旧电路板中有价金属回收技术研究现状与展望[J/OL]. 矿产综合利用, 2025: 1-12.
- [31] 袁勇涛, 袁荣, 李春田, 等. 废旧电路板综合回收利用及脱溴研究进展[J]. 中国有色冶金, 2025, 54(3): 14-22.
- [32] 肖菡曦, 游裕盛, 石雪, 等. 废弃印刷电路板燃烧动力学及Br释放扩散研究[J]. 山东化工, 2022, 51(23): 223-227.
- [33] 杨璧玮, 刘维, 焦芬, 等. 富氧侧吹熔池熔炼工艺处理固体废物的研究进展[J]. 化工环保, 2023, 43(6): 715-720.
- [34] 宋珍珍. 废旧线路板搭配含铜固废处理新工艺[J]. 有色设备, 2019(3): 25-27, 83.
- [35] 彭浩. 电路板还原熔炼综合回收有价金属实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [36] 王宝胜. 废旧线路板湿法浸出金的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(7): 94-96.
- [37] 王志辉, 苑舒琪, 刘景昊, 等. 废旧线路板中贵金属湿法浸出技术研究进展[J]. 环境化学, 2021, 40(3): 886-895.
- [38] 李彬. 废旧线路板无氰全湿回收工艺及其机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [39] 周全法, 尚通明. 废电子元器件与材料的回收利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [40] JADHAV U, HOCHENG H. Hydrometallurgical recovery of metals from large printed circuit board pieces[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14574.
- [41] ALTANSUKH B, HAGA K, ARIUNBOLOR N, et al. Leaching and adsorption of gold from waste printed circuit boards using iodine-iodide solution and activated carbon[J]. Engineering Journal, 2016, 20(4): 29-40.
- [42] 周葵. 超声波辅助有机酸浸提废弃手机线路板中铜的试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [43] BIRLOAGA I, COMAN V, KOPACEK B, et al. An advanced study on the hydrometallurgical processing of waste computer printed circuit boards to extract their valuable content of metals[J]. Waste Management, 2014, 34(12): 2581-2586.
- [44] BIRLOAGA I, VEGLIÓ F. Simulation and economic analysis of a hydrometallurgical approach developed for the treatment of waste printed circuit boards (WPCB)[J]. Global NEST Journal, 2018, 20(4): 695-709.
- [45] 王保仁. 电子线路板材料有价金属浸出新工艺的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [46] 刘昭成, 王继钦, 陈梦君, 等. 废旧印刷电路板硝酸/盐酸/硫酸浸提过程中铜、铅、锌的相关性分析[J]. 西南科技大学学报, 2018, 33(2): 54-58, 64.
- [47] SUN Z H I, XIAO Y, SIETSMAN J, et al. Selective copper recovery from complex mixtures of end-of-life electronic products with ammonia-based solution[J]. Hydrometallurgy, 2015, 152: 91-99.
- [48] 李静. 从废旧印刷电路板中回收铜并制备超细铜粉新工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [49] 缪畅, 张志欣, 王脂胭, 等. 氨浸-草酸盐沉淀法回收废弃线路板中金属铜的工艺研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(5): 84-86.
- [50] 王耀彬, 徐德福, 廖晨曦. 纳米TiO₂光催化技术及其在环境污染治理中的应用探讨[J]. 环境与发展, 2019, 31(4): 111, 113.
- [51] CHEN Y, XU M J, WEN J Y, et al. Selective recovery of precious metals through photocatalysis[J]. Nature Sustainability, 2021, 4(7): 618-626.
- [52] 余润兰, 石丽娟, 周丹, 等. 生物浸出过程中微生物协同作用机制的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(10): 3006-3014.
- [53] 苏涛. 废旧印刷电路板细菌浸出液中铜的电沉积回收研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.
- [54] GU W H, BAI J F, DONG B, et al. Catalytic effect of graphene in bioleaching copper from waste printed circuit boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* [J]. Hydrometallurgy, 2017, 171: 172-178.
- [55] THACKER S C, NAYAK N S, TIPRE D R, et al. Multi-metal mining from waste cell phone printed circuit boards using lixiviant produced by a consortium of acidophilic iron oxidizers[J]. Environmental Engineering Science, 2022, 39(3): 287-295.
- [56] ERUST C, AKCIL A, TUNCUK A, et al. A novel approach based on solvent displacement crystallisation for iron removal and copper recovery from solutions of semi-pilot scale bioleaching of WPCBs [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 294: 126346.
- [57] HUANG J X, CHEN M J, CHEN H Y, et al. Leaching behavior of copper from waste printed circuit boards with Brønsted acidic ionic liquid[J]. Waste Management, 2014, 34(2): 483-488.

- [58] CHEN M J, HUANG J X, OGUNSEITAN O A, et al. Comparative study on copper leaching from waste printed circuit boards by typical ionic liquid acids [J]. Waste Management, 2015, 41: 142-147.
- [59] ZHANG D J, DONG L, LI Y T, et al. Copper leaching from waste printed circuit boards using typical acidic ionic liquids recovery of e-wastes' surplus value [J]. Waste Management, 2018, 78: 191-197.
- [60] 梁倩. 废手机板铜二次资源碱性矿浆电解循环利用研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
- [61] FOGARASI S, IMRE-LUCACI F, IMRE-LUCACI Á, et al. Copper recovery and gold enrichment from waste printed circuit boards by mediated electrochemical oxidation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 273: 215-221.
- [62] FOGARASI S, IMRE-LUCACI F, EGEDY A, et al. Eco-friendly copper recovery process from waste printed circuit boards using $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ redox system [J]. Waste Management, 2015, 40: 136-143.
- [63] YIN J, LI G M, HE W Z, et al. Hydrothermal decomposition of brominated epoxy resin in waste printed circuit boards [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2011, 92(1): 131-136.
- [64] CHIEN Y C, WANG H P, LIN K S, et al. Oxidation of printed circuit board wastes in supercritical water [J]. Water Research, 2000, 34(17): 4279-4283.
- [65] XIU F R, QI Y Y, ZHANG F S. Recovery of metals from waste printed circuit boards by supercritical water pre-treatment combined with acid leaching process [J]. Waste Management, 2013, 33(5): 1251-1257.
- [66] CALGARO C O, SCHLEMMER D F, DA SILVA M D C R, et al. Fast copper extraction from printed circuit boards using supercritical carbon dioxide [J]. Waste Management, 2015, 45: 289-297.

Resource Utilization of Copper in Waste Printed Circuit Boards

XIAO Mengchen^{1,2}, ZHANG Xiaoguang^{1,2}

(1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Materials Low-Carbon Recycling, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: With the rapid advancement of electronic information technology and accelerated replacement of electronic products, the generation of waste electrical and electronic equipment (WEEE) has continued to increase, becoming a major environmental and resource challenge worldwide. Efficient copper recovery from waste printed circuit boards (WPCBs), a representative component of WEEE with high metal content, is particularly essential. This study focused on resource recovery of copper from WPCBs and systematically reviewed the main technological pathways currently applied, including physical-mechanical separation, thermal treatment, hydrometallurgical processing, and supercritical fluid extraction. Their performance was comparatively analyzed in terms of recovery efficiency, environmental impact, economic feasibility, and technical maturity. Results indicated that each technology exhibited distinct advantages in copper recovery, while several emerging technologies demonstrated strong potential to enhance recovery efficiency, reduce energy consumption, and mitigate secondary pollution. Based on these findings, the study proposed strategies to advance the high-value recycling of WPCBs, such as implementing multi-dimensional technology assessments, strengthening policy and financial support, establishing regional demonstration projects, developing localized green processes, and optimizing the recycling infrastructure. The novelty of this work lay in comparative analysis of multiple treatment technologies, comprehensive evaluation of their applicability to copper recovery, and formulation of systematic, context-specific countermeasures for China's WPCB recycling sector. These findings provided theoretical insights and technical guidance for promoting the sustainable and high-value utilization of WPCBs.

Key words: waste printed circuit board; electronic waste; resource utilization; copper recovery; emerging technology

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.012

引文格式: 肖梦晨, 张晓光. 废电路板中铜的资源化利用研究 [J]. 铜业工程, 2026(1): 126-138.

XIAO Mengchen, ZHANG Xiaoguang. Resource utilization of copper in waste printed circuit boards [J]. Copper Engineering, 2026(1): 126-138.