

电子废弃物物理分选与化学浸出耦合资源化 利用关键技术突破

李晓庆

运城市生态环境保护综合行政执法队平陆分队 山西 运城 044000

摘要：伴随电子产业高速发展，电子废弃物产量激增，其兼具资源与危害双重属性。物理分选与化学浸出耦合技术是实现电子废弃物资源化利用的有效手段。本文阐述该耦合技术中物理分选各类方法原理、化学浸出工艺要点，分析应用挑战与策略，展望发展趋势，旨在推动电子废弃物资源化产业可持续发展。

关键词：电子废弃物；物理分选；化学浸出；耦合技术；资源化利用

1 电子废弃物物理分选技术

电子废弃物（简称“电子垃圾”）物理分选技术是基于废弃物中不同组分的物理性质（如粒度、密度、磁性、导电性、表面特性等）差异，通过机械、物理场作用实现材料分离的技术体系，是电子废弃物资源化回收的关键环节^[1]。电子废弃物成分复杂，包含金属（铜、铝、金等）、塑料（聚氯乙烯、聚苯乙烯等）、玻璃、陶瓷及复合材料等，物理分选技术的核心在于利用各组分物理特性的差异实现高效分离。其主要技术路径包括以下几类：机械破碎与筛分是物理分选的预处理基础。通过破碎机（如颚式破碎机、锤式破碎机）将电子废弃物破碎至合适粒度，再利用振动筛、滚筒筛等设备按颗粒大小筛分，使不同材质的碎片初步分离。例如，线路板经破碎后，金属颗粒与非金属粉末可通过筛分初步分级，但需注意破碎过程中避免金属氧化及粉尘污染。磁选技术利用物质磁性差异分离磁性材料与非磁性材料。电子废弃物中的铁磁性金属（如铁、镍合金）可通过永磁体或电磁体产生的磁场吸附，实现与塑料、玻璃等非磁性物质的分离。例如，在废旧家电拆解产物中，磁选可快速回收钢铁部件，提高后续金属提炼效率。静电分选基于材料导电性差异，在高压电场中，导体颗粒与非导体颗粒的带电特性不同：导体颗粒易导电并被电极吸引，非导体颗粒则因绝缘性滞留或被气流带走。该技术常用于分离金属与塑料，如从破碎后的线路板粉末中回收铜、铝等金属颗粒，分选效率可达90%以上，但需控制物料含水率以避免静电失效。涡流分选针对非磁性金属（如铝、铜），利用交变磁场产生的涡流效应使金属颗粒受排斥力而与非金属分离。当导电金属颗粒通过交变磁场时，内部产生涡流并形成感应磁场，与原磁场相互作用导致金属颗粒弹射出去，而非金属颗粒则随传送

带运动，该技术在废旧汽车散热器、易拉罐回收中应用广泛。密度分选包括重力分选与风力分选，前者利用物料密度差异在介质（水或空气）中沉降速度不同实现分离，如摇床分选可分离密度较大的金属与密度较小的塑料；后者通过气流吹送，使轻质塑料、纸屑与重质金属颗粒分离，常用于电子废弃物破碎后的粗分选。物理分选技术的优势在于操作相对简单、能耗较低、无化学污染，符合绿色回收理念。但实际应用中仍面临挑战：电子废弃物组分复杂，需多级分选工艺协同（如破碎→筛分→磁选→涡流分选→静电分选的组合流程）；细小颗粒的分选效率有待提升，部分技术（如静电分选）对物料预处理要求较高。随着技术发展，智能化分选设备（如结合图像识别的自动分拣机）与复合分选技术（如磁选-涡流分选联用）正逐步应用，推动电子废弃物物理分选向高效化、精细化方向发展。该技术不仅为金属资源回收提供了基础，也为电子废弃物的减量化、无害化处理奠定了重要基础，在循环经济中具有不可替代的作用。

2 电子废弃物化学浸出技术

2.1 浸出剂的选择

化学浸出是提取电子废弃物中有价金属的核心技术环节，其浸出剂的选择直接影响金属回收率与环境负荷。传统浸出体系以无机酸和强氧化剂为主：硫酸因来源广泛、价格低廉成为工业首选，其在酸性环境中解离出的大量氢离子，能够有效溶解铜、锌、铁等常见金属氧化物，但对贵金属浸出效果有限；盐酸凭借氯离子的强络合能力，展现出优异的浸出效能，然而其易挥发特性不仅造成试剂损耗，还会产生刺激性气体污染；硝酸可通过氧化作用溶解金、银等贵金属，但伴随氮氧化物等二次污染气体的排放；王水作为由浓盐酸与浓硝酸按3：1体积比混合而成的强氧化性试剂，虽能溶解几乎所

有金属,但超高腐蚀性对设备材质要求严苛,且反应过程产生的大量氮氧化物和重金属废水,使环境治理成本剧增;双氧水在酸性体系中作为绿色氧化剂,可通过产生羟基自由基协同提升金属浸出效率,同时分解产物仅为水,符合清洁生产理念^[3]。

近年来,环境友好型浸出剂研究取得显著进展。以柠檬酸、草酸为代表的新型有机酸,凭借可生物降解性和低腐蚀性优势,在处理电子废弃物时既能减少环境污染,又能通过控制络合反应选择性浸出目标金属。生物浸出技术利用微生物代谢活动溶解金属,具有能耗低、污染小等特点,然而其浸出周期通常长达数天至数周,远低于传统化学浸出的反应速率,且微生物生长对环境条件极为敏感,成为制约该技术工业化应用的瓶颈。如何平衡浸出效率与环境友好性,仍是当前化学浸出技术亟待突破的关键问题^[2]。

2.2 浸出条件的优化

浸出温度、时间、液固比、搅拌速度和溶液pH值是影响金属浸出率的关键工艺参数,各因素间存在复杂的协同作用关系。

2.2.1 在温度控制方面

热力学研究表明,温度每升高10℃,金属浸出反应速率常数约提高2-4倍,可显著缩短反应达到平衡的时间。但当温度超过60℃时,硝酸、盐酸等强氧化性浸出剂挥发速率呈指数级增长,不仅造成试剂浪费,还会引发酸雾污染。以钴酸锂正极材料浸出为例,55℃时钴浸出率可达92%,而温度升至70℃时,虽然浸出率提升至95%,但酸耗增加40%,且需要额外配备冷凝回收装置。

2.2.2 浸出时间

浸出时间的优化需兼顾资源回收率与能耗成本。动力学曲线显示,反应初期金属浸出速率较快,90%以上的目标金属可在1-2小时内溶出,但继续延长虽能提升浸出率,边际效益却呈递减趋势。某废弃线路板处理厂的实践数据表明,将浸出时间从3小时延长至5小时,铜浸出率仅提高3.2%,而能耗成本增加28%。

2.2.3 液固比

液固比直接决定固液两相的传质效率,过高或过低均不利于浸出。理论上当液固比为5:1时,固体颗粒可实现充分分散,保证浸出剂与物料的有效接触面积。但实际工业应用中,需综合考虑后续浓缩成本,对于高品位原料,可采用3:1的较低液固比;而处理复杂低品位物料时,常将液固比提升至8:1以确保反应充分。

2.2.4 搅拌速度

搅拌速度通过影响边界层厚度调节传质过程,存在

最佳操作区间。研究显示,搅拌速度从200rpm提升至400rpm时,传质系数提高1.8倍,但超过600rpm后,剧烈搅拌导致固体颗粒过度破碎,形成细泥包裹现象,反而降低浸出效率。某锂离子电池回收项目中,450rpm的搅拌速度使镍钴锰总浸出率达到98.7%,相比300rpm时提升12个百分点。

2.2.5 溶液pH值

溶液pH值对两性金属(如铝、锌)和变价金属(如锰、铁)的浸出行为具有显著调控作用。对于含铝电子废弃物,在pH=10的碱性体系中,铝以偏铝酸盐形式高效浸出,而其他金属保持稳定;处理含锰物料时,通过添加柠檬酸调节pH至3-4,可有效抑制锰的过氧化反应。实际生产中,常采用磷酸盐、柠檬酸盐等缓冲体系,将pH波动范围控制在±0.2以内,以保证浸出过程的稳定性。

2.3 浸出过程中的影响因素

物料粒度是影响化学浸出速率的关键因素,其本质是通过改变固液接触比表面积调节传质效率。研究表明,当物料粒度从500μm细化至100μm时,浸出速率可提升30%-50%,但过度粉磨会显著增加能耗成本(每吨处理成本增加约80-120元),且可能导致细粒级物料团聚影响浸出均匀性。因此需基于目标金属浸出动力学模型,结合球磨-分级工艺实现粒度分布的精准控制。

杂质元素的存在对目标金属浸出构成双重挑战:一方面,杂质与目标金属在浸出体系中形成竞争关系,例如铜阳极泥中的铁元素会优先消耗硫酸浸出剂,使金、银浸出率下降15%-20%;另一方面,杂质溶解产生的金属离子可能与目标金属形成络合物,干扰后续分离工序。通过磁选、浮选等物理预富集手段去除磁性杂质,或采用选择性络合剂(如巯基乙酸抑制铁浸出),可将目标金属浸出选择性提高至90%以上。

浸出过程中的副反应机制复杂且影响深远:浸出剂分解(如盐酸体系中Cl⁻在高温下氧化生成Cl₂,导致酸耗增加20%-30%)会显著提升生产成本;金属离子水解聚合(如Fe³⁺在pH>1.5时发生水解形成氢氧化铁胶体)不仅降低浸出效率,还会堵塞过滤设备造成生产中断。通过添加缓蚀剂(如硫脲抑制盐酸分解)、调控氧化还原电位(控制E°在0.5-0.8V区间)及优化液固比(建议维持在5:1-8:1)等手段,可将副反应抑制率提升至85%以上,显著改善浸出体系稳定性与后续金属分离效率。

3 物理分选与化学浸出耦合技术

3.1 耦合技术的优势

耦合技术通过创新集成模式,深度融合物理分选初步分离与化学浸出深度提取两大核心工艺优势。在预处

理阶段,物理分选技术借助重力分选、磁选、静电分选等多元化手段,精准分离电子废弃物中的塑料、玻璃等非金属杂质,不仅有效降低化学浸出过程中浸出剂的消耗量(经实测可减少20%-35%),还能规避杂质对目标金属浸出的干扰效应,从而显著提升化学浸出效率。对于物理分选难以处理的微细粒级金属、金属氧化物及合金体系,化学浸出技术通过优化浸出剂配方(如新型螯合剂、生物浸出制剂)与工艺参数(温度、时间、液固比),可实现金、银、铜等高价金属95%以上的高效回收^[4]。

从成本控制与环境友好视角来看,该耦合技术展现出显著优势。物理分选环节以机械力驱动为主,相比传统火法冶金能耗降低40%以上,且无高温煅烧产生的二噁英等污染物排放;同时,物理分选预富集的金属物料大幅减少化学浸出过程中废渣、废水的产生量(处理量减少30%-50%),配合配套的废水循环利用与废渣无害化处理系统,可实现资源利用率最大化与废弃物排放最小化的双重目标,形成闭环式绿色处理体系。

3.2 耦合工艺的流程设计

耦合工艺采用“预处理-物理分选-化学浸出-金属提取-残渣处理”的闭环式处理流程。首先对电子废弃物进行精细化拆解,将不同材质组件分离,随后通过多级破碎设备将物料粒径控制在1-5mm范围内,为后续分选创造条件。物理分选阶段构建了“筛分分级-磁选除铁-摇床重选-高压电选”的梯度分离体系:通过振动筛将物料按粒度分级,利用强磁选机分离铁磁性物质,采用摇床根据密度差异富集有色金属颗粒,最后通过高压电选实现导体与非导体物料的高效分离^[5]。

对于物理分选获得的富含铜、金、钯等目标金属的物料,采用硫酸-双氧水体系或氰化钠溶液进行选择性化学浸出,通过调控反应温度(50-80℃)、pH值(1-3)和反应时间(2-4h),实现目标金属的高效溶出。浸出液经板框压滤机进行固液分离后,采用Cyanex 923等萃

取剂进行多级逆流萃取,结合反萃取工艺,将目标金属浓度富集至10-20g/L,最后通过电积或置换工艺得到纯度 $\geq 99.9\%$ 的金属产品。浸出渣则采用高温熔融玻璃化技术进行无害化处理,通过添加碳酸钠等助熔剂,在1300-1500℃条件下形成稳定玻璃体,同时利用酸浸-生物吸附联合工艺对残留的微量有价金属进行二次回收,实现资源利用效率最大化。整个工艺链通过PLC自动控制系统实现参数实时监测与动态调整,确保各环节工艺参数的精准匹配与协同优化。

4 结束语

物理分选与化学浸出耦合技术为电子废弃物资源化利用提供重要途径,可实现资源回收与有害处理。虽面临成分复杂、环境风险、效率待提升等挑战,但通过加强研究、研发绿色技术、优化工艺等策略有望克服。未来,该技术将在电子废弃物处理领域发挥更大作用,推动资源节约与环境友好型社会建设,同时需政策、产业、公众多方协同促进产业可持续发展。

参考文献

- [1]温雪峰,范英宏,赵跃民,等.用静电选的方法从废弃电路板中回收金属富集体的研究[J].环境工程.2004,(2). DOI:10.3969/j.issn.1000-8942.2004.02.026.
- [2]白庆中,王晖,韩洁,等.世界废弃印刷电路板的机械处理技术现状[J].环境污染治理技术与设备.2001,(1). DOI:10.3969/j.issn.1673-9108.2001.01.018.
- [3]胡天觉,曾光明,袁兴中.从家用电器废物中回收贵金属[J].中国资源综合利用.2001,(7).DOI:10.3969/j.issn. 1008-9500.2001.07.013.
- [4]林茂.金矿堆浸提金工艺参数分析[J].中国资源综合利用.2021,(5).DOI:10.3969/j.issn.1008-9500.2021.05.003.
- [5]宗磊.废旧电路板中有色金属的机械物理回收技术[J].造纸装备及材料.2021,50(9).DOI:10.3969/j.issn. 1672-3066.2021.09.027.