

要科学配置植物群落。期间,可以遵循功能导向原则,将伴生植物引入。比如,基于工业区种植国槐及栾树等抗污染树种,对PM_{2.5}与二氧化硫起到吸附作用。适量种植柿子、核桃等果树,兼顾生态与经济效益^[4]。为了使园林植物群落的科学性提升,还可以采取垂直分层配置措施,使复层结构有效形成。首先,上层配置乔木,提供遮荫与食物,包括油松、国槐等。其次,中层配置灌木,使景观层次增加,如红端木、紫丁香等。再次,下层配置地被,如麦冬、常春藤等,覆盖地表,使水土流失减少。在“乔木+灌木+花卉+地被”复层配置基础上,使海棠景观达到与特色花景有效形成,实现“城绿交融”生态美景,提升园林的生态景观效果。

4.2 加强资源节约型施工与养护

为保护生态园林环境,有必要加强资源节约型施工与养护。通过节水技术的合理应用,利用滴灌、微喷系统,并结合土壤湿度传感器,实现精准灌溉。并引进节能材料,如太阳能路灯等可再生能源以及透水铺装措施,使热岛效应减少。并通过废弃物循环利用,如分类回收施工废弃物,包括枝叶、木屑等,可作用于堆肥,使填埋压力减轻,并达到降低生态园林施工污染程度的作用。

需注意,在生态园林资源节约型施工与养护过程中,需结合相关地区生态园林施工项目实际情况,采取针对性资源节约型施工与养护措施。如北京市大兴区园林绿化局承接的平原生态林精准提升工程项目,由于早期造林密度偏高,树种存在单一化的问题,且生物多样性不足。因此,需疏伐过密的林木,将元宝枫、黄栌等彩叶树种引入,使“乔木+灌木+地被”复层结构有效形成。并在养护过程中,通过生物多样性保育小区的构建,每1000亩林地设置1处,配备本杰士堆、昆虫旅馆,对野生动物栖息起到吸引作用。结果显示,在加强资源节约型施工及养护的基础上,林分蓄积量提升15%,鸟类种类增加到20多种,年固碳量增加30%。由此说明,做好生态园林环境保护工作,加强资源节约型施工与养护至关重要。

4.3 合理利用生态修复技术

为加强生态园林环境保护,还需合理利用生态修复技术。除上述提到的土壤改良与保护技术,还可以采取生物防治技术,通过释放天敌,如利用瓢虫防止蚜虫,或者应用性信息素诱捕器,使园林使用化学农药的量减少。也可以采取补种复绿技术,针对园林受损区域进行生态修复处理,尤其是滥伐园林,可采取补种桉树的方式,使园林功能逐步恢复。

此外,因不同的生态园林面临不同的环境污染问题,所以需遵循因地制宜原则,合理利用生态修复技术。如北京市大兴区西红门生态公园,面对大规模的建筑垃圾填埋场,堆积废弃物>200万m³,土壤重金属超标3倍。在此情况下,为改善、保护园林生态环境,需采取针对性生态修复技术。一方面,在土壤修复过程中,利用“电动修复+微生物强化”技术,在电场迁移的条件下,将重金属去除,并添加适量的嗜酸菌对有机物起到降解作用。另一方面,在植被重建过程中,通过耐旱乡土树种的种植,如国槐、紫丁香等,搭配二月兰、麦冬等地被植物,使复层结构有效形成。此外,规范配置生态设施,通过小微湿度(3处)、本杰士堆(12个)的构建,使园林区域内的黄鼠狼、野兔等动物具备安全舒适的栖息地。结果显示,采取针对性的生态修复技术措施后,土壤有机质含量提升0.5%,植被覆盖率达95%,动物种类增加到15种,成为当地示范园林生态修复项目。由此说明,在生态园林环境保护工作开展期间,生态修复技术的合理利用非常关键。

5 结语

综上,生态园林建设是系统化的工作,涉及的内容要点多,复杂程度较高,需做好生态园林施工养护管理及环境保护工作。在生态园林施工养护管理过程中,需加强土壤改良与保护、优化植物选择与配置、加强施工过程节水灌溉管理。在环境保护过程中,需对植物群落科学配置、加强资源节约型施工与养护、合理利用生态修复技术。比如,对土壤修复、植被重建、生态设施构建等生态修复技术合理应用,有效保护园林生态环境。总之,需多措并举,做好生态园林施工养护管理及环境保护工作,全面提升生态园林施工养护质量,改善园林生态环境,促进生态园林建设事业高质量、稳定可持续发展。

参考文献

- [1] 顾灵.园林绿化种植施工与养护管理技术[J].居舍,2024,(12):150-153.
- [2] 李林.生态风景园林工程施工和养护技术探究[J].中国住宅设施,2024,(09):175-177.
- [3] 范玥秋.园林工程生态保护措施探究[J].特种经济动植物,2023,26(06):172-174+187.
- [4] 韦丹.浅析生态环境保护中风景园林施工与治理存在的问题及对策[J].福建建材,2024,(07):110-112+126.

A Comprehensive Overview on recycling and regeneration of spent lithium iron phosphate batteries

Yangyang Hou

Xinzhou District Branch of Wuhan Municipal Ecology and Environment Bureau, Wuhan, Hubei, 430499, China

Abstract

This review summarizes the existing recycling technologies for spent lithium iron phosphate (LFP) batteries. It briefly introduces the failure mechanisms of LFP batteries, the pretreatment of black mass after dismantling, and resource recovery technologies. The review particularly highlights research progress in selective lithium recovery from black mass and the regeneration technologies of lithium iron phosphate cathode materials. By comparing the advantages and disadvantages of different technical routes, future development trends in lithium extraction from spent LFP batteries are discussed.

Keywords

Spent power batteries; Lithium iron phosphate; Cathode material; Selective lithium extraction; Regeneration; Pretreatment

废旧磷酸铁锂电池回收与材料再生研究进展

后阳阳

武汉市生态环境局新洲区分局, 中国 · 湖北 武汉 430499

摘 要

对现有废旧磷酸铁锂电池回收技术进行了总结, 简要介绍了磷酸铁锂电池的失效原因、拆解后黑粉预处理和资源化回收处理技术, 重点评述了黑粉材料的选择性回收锂, 以及磷酸铁锂正极材料再生技术的研究进展。通过对比不同技术方案的优劣势, 对废旧磷酸铁锂电池回收提锂技术发展趋势进行了展望。

关键词

废旧动力电池; 磷酸铁锂; 正极材料; 选择性提锂; 再生修复; 预处理

1 引言

为应对全球气候变化带来的严峻挑战, 多个国家已通过政策框架与产业扶持计划, 积极推动可再生能源对传统化石燃料的替代。在此背景下, 电动汽车产业呈快速增长态势, 进而驱动锂离子电池市场需求爆发。根据国际能源署 (IEA) 于《2024 年全球电动汽车展望》中发布的数据, 2023 年全球电动汽车销量接近 1400 万辆, 同比增长 35%, 占汽车总销售量的 18%。至 2030 年, 全球锂离子电池年需求量将增至 5600 GWh。然而, 锂离子电池普遍使用寿命为 5 至 8 年, 并进入报废阶段。随着电动汽车普及率持续提高, 废旧锂离子电池的产生量预计将显著增加。研究表明, 到 2030 年, 全球报废锂离子电池总量预计将达到 1100 万吨, 相应回收市场的规模可能超过 1000 亿美元^[1]。因此, 废旧锂离子电池的高效回收与资源化利用, 已成为当前能源与环境领域面临的一项重要课题。

2 废旧磷酸铁锂电池危害性及资源性

废旧锂电池中含有电解液 (主要成分为六氟磷酸锂, LiPF_6)、有机粘接剂 (如聚偏氟乙烯, PVDF) 以及多种重金属 (如镍、钴、铁等)^[2]。其中, 电解液中的六氟磷酸锂遇水易分解, 产生高毒性氟化氢, 存在显著环境与健康风险; 重金属组分则可能随雨水迁移并进入地表水系统, 造成水体污染。此外, 在焚烧处理过程中, 聚偏氟乙烯可能生成全氟辛酸 (PFOA) 等持久性有机污染物, 这类物质具有长期残留性和生物累积性, 能够通过土壤-地下水-生物链进行跨介质迁移, 对生态系统和人体健康构成严重威胁。

另一方面, 废旧锂电池中富含锂、镍、钴等高价金属元素。随着废旧电池存量持续增加, 若未能实现有效回收, 大量有价金属资源将被滞留于废弃物中, 不仅加剧资源浪费, 也导致供应链风险上升, 关键原材料供应趋于紧张, 进而制约锂电池产业的可持续发展。因此, 推进废旧锂电池的高效回收与资源化利用, 兼具环境治理与资源循环的双重意义。

【作者简介】后阳阳 (1988-), 女, 中国湖北随州人, 本科, 助理工程师, 从事危险废物利用与管理研究。

3 废旧磷酸铁锂电池失效机制

锂电池的失效通常表现为在充放电循环过程中容量逐渐衰减,直至低于额定标准,无法满足正常使用需求。失效原因分为外部因素和内部机制:外部包括环境温度波动、过度充放电以及充放电倍率不当;内部则涉及正负极活性材料失效、电解质消耗和隔膜损伤等^[3]。

正极材料的活性衰退是容量衰减的核心原因。在长期循环中, Li^+ 的反复嵌入和脱出会引发正极晶体结构发生相变、产生裂纹甚至坍塌,阻碍离子传输通道,降低容量。同时,电解液在高电位下分解产生活性氧(如 $\cdot\text{O}_2^-$),腐蚀正极表面,形成电化学惰性的岩盐相绝缘层,并引发过渡金属(如Mn、Co)溶出,进一步破坏晶格稳定性,减少活性面积。正极颗粒在循环中发生的各向异性体积变化也会导致内应力集中和裂纹扩展,加速电解液渗入并加剧副反应,从而恶化 Li^+ 扩散动力学。

石墨负极的失效主要表现为结构损伤和活性损失。过充或低温充电条件下, Li^+ 易在负极表面不均匀沉积形成锂枝晶,不仅消耗活性锂,还可能刺穿隔膜引发内短路。电解液作为离子传输介质,在高温或高电压下会发生分解,产生气体及其他副产物,引起电池膨胀和性能衰退。其长期挥发、分解或受水分/杂质影响,均会降低离子电导率并促进副反应。隔膜在枝晶生长、外力挤压或高温环境下可能发生收缩或破损,造成严重内短路。

4 废旧磷酸铁锂电池预处理

从电动汽车上拆下的废旧锂电池除内部电芯外,外层还包裹着电池壳、线路板,需要通过机械或手动拆除。拆除后得到的电池电芯不能直接作为资源化回收的原材料,通常要经过化学法、热处理法和物理法等方法处理才能得到废旧锂电池黑粉^[4]。

4.1 化学法

采用氢氧化钠溶液浸泡是去除正极材料中铝箔的常用方法。该方法基于铝箔与氢氧化钠溶液发生化学反应,而正极活性物质(LiFePO_4 等)则保持化学惰性,不会与碱液发生反应。然而,该方法虽然能够有效溶解铝箔集流体,但正极材料中的有机粘结剂仍会残留,对后续回收其中有价金属仍有影响。部分研究采用碳酸二甲酯(DMC)和二甲基乙酰胺(DMAC)等有机溶剂实现铝箔和正极材料的分离,优先去除正极材料中的有机粘结剂组分。通过这种预处理方式,能够有效降低后续活性物质与铝箔集流体的分离难度,从而提高整体回收效率。

4.2 热处理法

其主要目的是去除导电碳黑和有机粘结剂,实现活性物质的分离。在高温条件下,粘结剂能够被有效分解,同时促使活性金属粉末从铝箔集流体上剥离。尽管热处理工艺操作简便、易规模化,但该工艺存在着能耗较高,产生氢氟酸等有毒气体等问题。因此,在实际工业生产中必须配置完善

的废气处理系统,以有效控制和处理这些有害物质的排放。

4.3 物理法

工业上通常采用机械和物理预处理相结合的方法来分离废旧锂电池各部分。先手动拆解废旧锂电池外部结构,包括不锈钢、铝、塑料等外壳以及线路板,获得内部电芯。然后,通过破碎和分选等方法对电芯进行处理,从而得到可以进行锂回收的正极黑粉原料。然而,这种预处理工艺难以实现正负极材料的精确分离,导致拆解回收的废旧锂电池黑粉中不仅存在正极材料,还存在石墨及其他杂质,从而影响后续的资源化回收。

5 选择性回收锂

锂是锂电池的核心元素,价格昂贵且需求持续增长。选择性提取锂可以最大化回收这一稀缺资源。选择性提取锂后,剩余材料(如钴、镍、锰)的回收工艺可以更简单高效,减少后续步骤中酸、碱等试剂的使用量,降低整体回收成本。此外,选择性提取锂可以得到高纯度的锂化合物(如碳酸锂、氢氧化锂),可直接用于新电池生产,提高经济效益。常见的选择性回收方法包括高温煅烧法、酸浸法和 CO_2 浸取法等。

5.1 高温煅烧法

在一定高温下将废旧锂电池中金属氧化物进行氧化还原反应,破坏正极材料原有晶体结构,从而实现锂元素的回收,因其操作简单、能够应对复杂成分原料在工业上曾被广泛使用。张等利用氢氧化钠辅助焙烧将 LiFePO_4 转化为 Fe_3O_4 、 NaLi_2PO_4 和 $\text{LiNa}_5(\text{PO}_4)_2$,在 600°C 时92.7%的锂被提取,残渣中的铁可以通过磁选分离出来^[5]。

然而,废旧锂电池正极材料稳定的晶体结构导致回收时反应温度过高增加回收能耗。同时焙烧后合金仍需要通过湿法冶金流程分别提取镍、钴、锰等金属,不仅增加了流程,还产生酸性废液污染,并不能实现环境友好型回收。

5.2 酸浸法

利用酸性物质(无机酸或有机酸)将正极材料溶解,再通过沉淀、电解或其他化学方法从溶液中逐步分离、回收各种金属资源。无机酸金属回收工艺被广泛用于工业化回收废旧锂电池正极材料中锂元素。但在回收过程中酸浸产生酸性废水,以及后续分离工序产生的大量含盐废水对生态环境有着严重的威胁。同时无机酸的强酸性和腐蚀性在提取锂的同时也溶解了其他有价金属,降低了锂提取的选择性,使后续分离变得复杂。有机酸浸取有着良好的选择性,能够有选择地提取正极材料中锂元素,避免后续分离和提纯,是一种环境友好型湿法冶金工艺^[6]。常见的用于湿法冶金的有机酸包括有抗坏血酸、柠檬酸、苹果酸、草酸等。但有机酸浸出速率慢,选择性浸出效果受酸的种类、金属离子的性质以及反应条件的限制,且相比较于无机酸成本较高,不利于工业化生产。

5.3 CO_2 浸取法

利用加压 CO_2 在水中形成的碳酸(H_2CO_3)与含锂矿物或材料发生反应,将锂以可溶性锂盐的形式浸出。该方法