



文章栏目：相关研究

DOI 10.12030/j.cjee.202112188 中图分类号 X511 文献标识码 A

周聪, 郭剑波, 杨春明, 等. 废铅蓄电池回收的节能降碳案例分析[J]. 环境工程学报, 2022, 16(10): 3469-3477. [ZHOU Cong, GUO Jianbo, YANG Chunming, et al. Analysis of Energy conservation and carbon emission reduction in waste lead-acid battery recycling[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(10): 3469-3477.]

废铅蓄电池回收的节能降碳案例分析

周聪^{1,2}, 郭剑波², 杨春明³, 马永刚³, 陈扬^{1,2}, 冯钦忠², 崔皓², 刘俐媛^{2,✉}

1. 东华理工大学, 南昌 330013; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 江苏新春兴再生资源有限责任公司, 邳州 221300

摘要 为了解我国废铅蓄电池回收过程的节能降碳现状, 以典型废铅蓄电池回收工艺为研究对象, 分析了废铅蓄电池回收过程的产品综合能耗和碳排放情况。结果表明, 案例企业的单位产品综合能耗(当量能耗)为 98.35 kgce·t⁻¹; 天然气消耗是最大的能耗来源; 铅膏熔炼工序是废铅蓄电池回收过程中产品综合能耗和碳排放量最大的工序; 焦粉作为还原剂进入熔炼工序的排放是最主要的碳排放源。在燃料燃烧、能源作为原材料、净购入电力和热力方面, 能耗和碳排放量核算是线性相关的, 在上述方面寻求节能措施可使废铅蓄电池回收企业实现同时降碳。此外, 碳酸盐引起的过程排放和耗能工质也会影响企业的节能降碳效果, 建议在后续的核算指南中进行统一规定。本研究结果可为废铅蓄电池回收过程的节能降碳提供参考。

关键词 废铅蓄电池回收; 再生铅; 综合能耗; 碳排放; 节能降碳

再生资源产业作为循环经济的重要组成部分, 已经逐渐成为全球绿色低碳发展和应对气候变化的重要途径^[1-3]。再生铅作为我国再生资源产业十分重要的组成部分, 自 2015 年以来一直呈快速增长趋势; 到 2020 年, 再生铅产量已增长至 2.4×10⁶ t, 占铅总产量的比例维持在 34%~44%^[4-5]。根据《“十四五”循环经济发展规划》^[3]提出的到 2025 年我国再生铅产量达到 2.9×10⁶ t 的展望, 再生铅行业在未来一段时间内仍将保持增长态势。与原生铅冶炼相比, 生产每吨再生铅的单位产品综合能耗可节能约 82.7%^[6-7]。某些废铅蓄电池回收企业的单位产品综合能耗甚至可达到 100 kgce·t⁻¹ 以下^[8-9]。中国每年 80% 左右的精铅产量用于生产铅蓄电池^[6]。因此, 废铅蓄电池的回收利用是铅资源再生循环利用重要的领域之一^[10], 废铅蓄电池回收过程的节能降耗将推动整个铅资源行业的碳减排工作。

废铅蓄电池的回收过程可分为预处理(拆解、破碎、分选、预脱硫等)、还原回收(火法、湿法或火法与湿法联合)、火法/电解精炼过程生产粗铅、精炼铅及铅合金等过程^[11-12]。短窑熔炼、富氧(底吹、侧吹、顶吹)熔炼、多室熔炼、板栅低温熔炼等都是常用的火法熔炼工艺^[13-15]。与湿法工艺相比, 火法冶炼工艺应用最广且可实现较高的铅回收率, 但也存在高耗能和高排放的问题^[16]。自 2009 年以来, 国家相关管理部门先后出台了多项技术标准、政策规定了废铅蓄电池回收的单位产品能耗要求。其中, 《清洁生产标准 废铅酸蓄电池铅回收业》(HJ 510-2009)^[17]规定了火法冶炼类

收稿日期: 2021-12-23; 录用日期: 2022-09-24

基金项目: 全球环境基金资助项目(6492)

第一作者: 周聪(1995—), 男, 硕士研究生, 873264793@qq.com; ✉通信作者: 刘俐媛(1985—), 女, 博士, 副教授, liuliyuan@ucas.ac.cn

企业单位综合能耗的一级、二级、三级要求分别为 <100 、 <120 、 $<130 \text{ kgce}\cdot\text{t}^{-1}$ (以粗铅计)；而湿法冶金类企业单位综合能耗的一级、二级、三级要求分别为 ≤ 280 、 ≤ 320 、 $\leq 360 \text{ kgce}\cdot\text{t}^{-1}$ (以电铅计)。在该标准中，一级为国际清洁生产先进水平，二级为国内清洁生产先进水平，三级为国内清洁生产基本水平。由于该标准中火法冶炼与湿法冶炼企业单位综合能耗计算的产品并不统一，因此在之后发布的《再生铅行业清洁生产评价指标体系》(国家发展和改革委员会公告2015年第36号)^[18]中进一步统一了不同工艺以再生铅产品产量计算的单位产品综合能耗，该体系规定了废铅蓄电池破碎分选-还原熔炼-火法精炼或电解精炼工艺单位产品综合能耗I级、II级、III级基准值分别为 ≤ 100 、 ≤ 120 、 $\leq 130 \text{ kgce}\cdot\text{t}^{-1}$ ；废铅蓄电池破碎分选-湿法冶炼工艺单位产品综合能耗I级、II级、III级基准值均为 $\leq 130 \text{ kgce}\cdot\text{t}^{-1}$ 。在该体系中，I级为国际清洁生产领先水平，II级为国内清洁生产先进水平，III级为国内清洁生产基本水平。《综合能耗计算通则》(GB/T 2589-2020)^[19]则规定了综合能耗计算原则、边界划分、计算范围、计算方法以及折算为标准煤的要求。随着国家对废铅蓄电池回收技术的不断升级和对单位产品能耗的要求提高，除了规定废铅蓄电池回收总体工艺的单位产品能耗，部分标准和政策也规定了废铅蓄电池回收工序的单位产品能耗。《再生铅单位产品能源消耗限额》(GB 25323-2010)^[20]规定了新建再生铅冶炼企业的能耗限额准入值为 $\leq 130 \text{ kgce}\cdot\text{t}^{-1}$ ，破碎、铅膏脱硫、铅膏冶炼和铅屑冶炼工序的能耗限额准入值分别为 ≤ 3.5 、 ≤ 1 、 ≤ 280 、 $\leq 35 \text{ kgce}\cdot\text{t}^{-1}$ ；再生铅冶炼企业单位产品能耗限额的先进值为 $\leq 120 \text{ kgce}\cdot\text{t}^{-1}$ ，破碎、铅膏脱硫、铅膏冶炼和铅屑冶炼工序的能耗限额准入值分别为 ≤ 3 、 ≤ 1 、 ≤ 220 、 $\leq 30 \text{ kgce}\cdot\text{t}^{-1}$ 。其中，工序能源单耗按照工序产出的或者中间品最终转换为再生铅的总量计算。《再生铅行业规范条件》(工信部2016年第60号)^[21]规定预处理-熔炼企业熔炼工艺能耗应低于 $125 \text{ kgce}\cdot\text{t}^{-1}$ ，精炼工序能耗应低于 $22 \text{ kgce}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

废铅蓄电池回收过程的碳排放核算方法可按照IPCC方法^[22]、生命周期核算法^[23-24]和实测法等进行核算。IPCC于2006年发布的《2006 IPCC国家温室气体清单指南》(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory)^[22]推荐了铅生产过程3种碳排放强度的计算方法，其中给出了铅生产过程中部分材料的碳含量以及再生铅过程的碳排放因子建议值($0.2 \text{ tCO}_2\cdot\text{t}^{-1}$)。《IPCC2006年国家温室气体清单指南2019修订版》(2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory)^[25]继续沿用了上述计算方法和排放因子。2015年国家发改委在IPCC方法基础上发布了3批24个行业的企业温室气体核算方法与报告指南^[26]。我国废铅蓄电池回收过程的温室气体排放核算目前参照《其他有色金属冶炼和压延加工业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[27]进行核算，核算的温室气体主要为 CO_2 。由于电力碳排在废铅蓄电池回收过程中占据较大比例，因此电网排放因子的取值对企业的碳排放核算有较大影响。生态环境部先后发布了《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施》^[28]和《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施(2022年修订版)》^[29]，指南规定核算2021及2022年碳排放量时，电网排放因子由 $0.6101 \text{ tCO}_2\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}$ 调整为 $0.5810 \text{ tCO}_2\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

当前，我国将“双碳”工作纳入生态文明建设整体布局 and 经济社会发展全局后，如何更好地将能源消耗与碳排放2个指标关联起来，以实现节能减碳目标的协调统一，是值得关注和研究的问题^[30]。废铅蓄电池回收相关企业也在积极寻求新型节能降碳技术，推动企业迈向绿色低碳发展的新征程。但目前尚缺乏基于废铅蓄电池回收过程的节能降碳分析。因此，通过计算产品综合能耗和碳排放水平，拟提出废铅蓄电池回收过程的节能降碳方向，以为废铅蓄电池回收过程的节能降碳措施和行业绿色节能降碳发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验方法

1) 目标与范围确定。研究企业的核算边界如图 1 所示，核算边界包括企业的主要生产系统、辅助生产系统和附属系统^[19]。该废铅蓄电池回收企业具有 85×10^4 t 的废铅蓄电池处理能力，具体流程包括破碎分选、预脱硫、铅膏熔炼、精炼、合金配制等。废铅蓄电池经过破碎机和水力分选分离出铅泥、铅头、板栅、塑料和隔板纸。铅泥经预脱硫进入熔炼锅(多室熔炼炉)生产粗铅，分选后的铅头、板栅直接与粗铅一同除杂后精炼成精铅，再通过合金配制铸造铅钙合金、铅锡合金、铅硒合金和格栅板等产品。

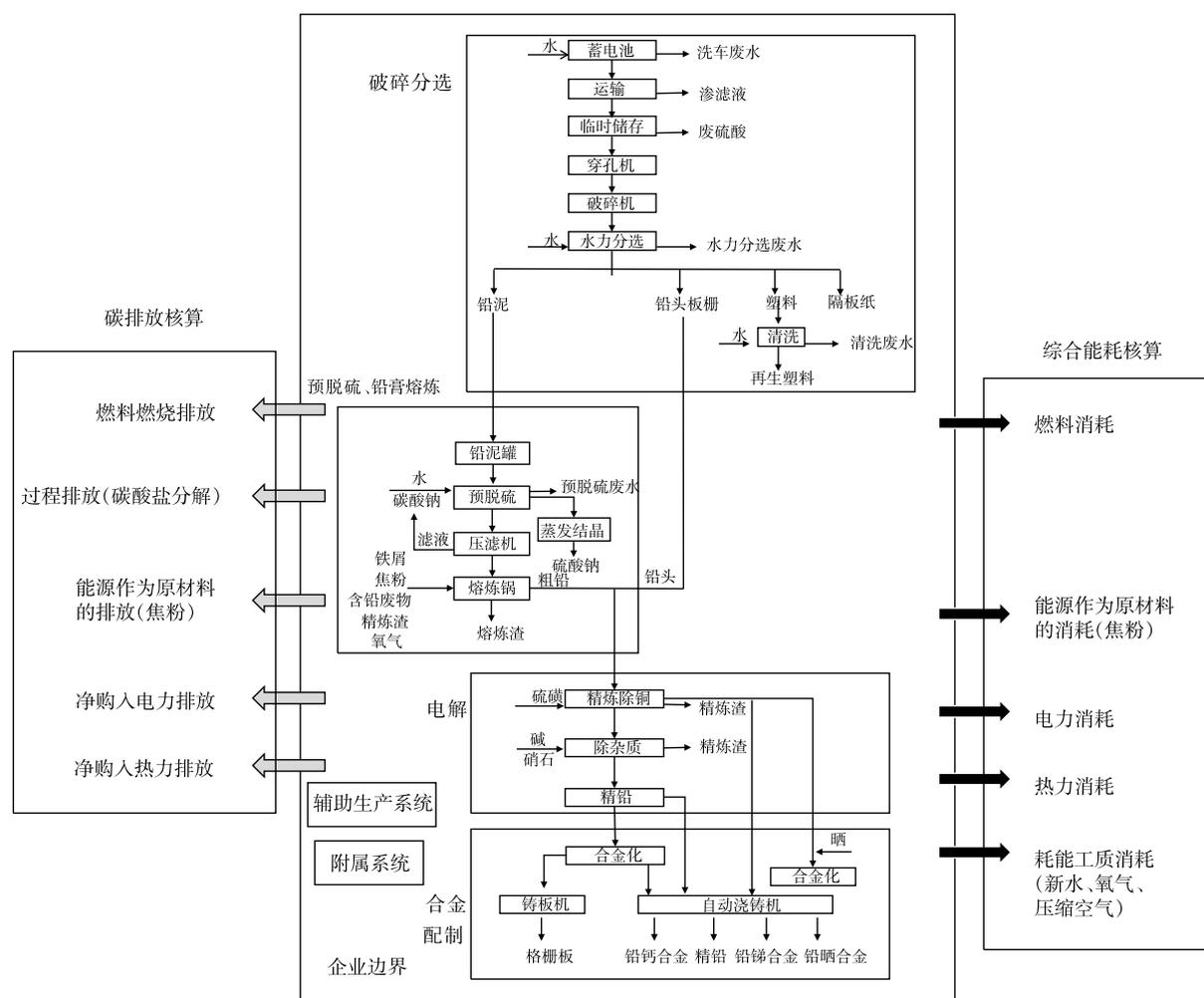


图 1 废铅蓄电池回收企业核算边界示意图

Fig. 1 Diagram of accounting boundary for secondary lead enterprises

2) 数据来源。数据来源主要为研究企业的生产统计报表、能源消耗报表、环评报告及实地调研数据，调研年度为 2019 年。

1.2 综合能耗和 CO₂ 排放核算

废铅蓄电池回收过程的产品综合能耗核算和工序综合能耗核算主要依据《综合能耗计算通则》(GB/T 2589-2020)^[19]和《再生铅单位产品能源消耗限额》(GB 25323-2010)^[20]进行核算。核算能源包括企业的一次能源(天然气)和二次能源(电力)消耗情况。废铅蓄电池回收企业的 CO₂ 排放

量则依据《其他有色金属冶炼和压延加工业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[27]和《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[31]进行核算,包括企业边界内所有生产系统的化石燃料燃烧排放量、能源作为原材料用途的排放量、过程排放量、企业净购入的电力和热力消费的排放量之和。废铅蓄电池回收过程的综合能耗和CO₂排放量的核算方法和参数选取如表1所示。

表1 废铅蓄电池回收过程的能耗与CO₂排放量核算方法

Table 1 Energy consumption and CO₂ emission accounting methods in secondary lead production process

统计类别	产品综合能耗核算 ^[20]	CO ₂ 排放量核算 ^[27]
燃料燃烧	$E_{\text{燃料}} = FC_{\text{燃料}} \times k_{\text{燃料}}$	$E_{\text{燃烧}} = AD_{\text{燃料}} \times EF_{\text{燃料}}$ $AD_{\text{燃料}} = NCV_{\text{燃料}} \times FC_{\text{燃料}}$
能源作为原材料	$E_{\text{能源}} = AD_{\text{能源}} \times k_{\text{能源}}$	$E_{\text{原材料}} = AD_{\text{还原剂}} \times EF_{\text{还原剂}}$
生产过程	—	$E_{\text{过程}} = \sum(AD_{\text{碳酸盐}} \times EF_{\text{碳酸盐}})$
净购入电力	$E_{\text{电力}} = AD_{\text{电力}} \times k_{\text{电力}}$	$E_{\text{电}} = AD_{\text{电}} \times EF_{\text{电}}^{\text{[28]}}$
净购入热力	$E_{\text{热力}} = AD_{\text{热力}} \times k_{\text{热力}}$ $AD_{\text{热力}} = Ma_{\text{st}} \times (En_{\text{st}} - 83.74)^{\text{[31]}}$	$E_{\text{热}} = AD_{\text{热}} \times EF_{\text{热}}^{\text{[31]}}$ $AD_{\text{热}} = Ma_{\text{st}} \times (En_{\text{st}} - 83.74) \times 10^{-3}^{\text{[31]}}$
净购入耗能工质	$E_{\text{耗能工质}} = AD_{\text{耗能工质}} \times k_{\text{耗能工质}}$	—
总计	$E_i = E_{\text{燃料}} + E_{\text{能源}} + E_{\text{电力}} + E_{\text{热力}} + E_{\text{耗能工质}}$	$E_j = E_{\text{燃烧}} + E_{\text{原材料}} + E_{\text{过程}} + E_{\text{电}} + E_{\text{热}}$

注: $FC_{\text{燃料}}$ 为企业实际消耗的燃料数据, Nm^3 或 10^4Nm^3 ; k_i 为第*i*种统计类别消耗物质的折标煤系数, kgce m^{-3} 或 kgce kg^{-1} 或 $\text{kgce kW} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $\text{kgce} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 或 $\text{kgce} \cdot \text{t}^{-1}$; AD 为活动水平数据(即消耗量), GJ 或 t 或 $\text{MW} \cdot \text{h}$; EF_i 为CO₂排放因子, $\text{tCO}_2 (\text{GJ})^{-1}$ 或 $\text{tCO}_2 \text{t}^{-1}$ 或 $\text{tCO}_2 (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$; $NCV_{\text{燃料}}$ 为燃料的平均低位发热量, $\text{GJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$; Ma_{st} 为蒸汽的质量, t ; En_{st} 为蒸汽所对应的温度、压力下每千克蒸汽的热焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; E_i 为各统计类别对应的能耗, kgce ; E_j 为对应的二氧化碳排放量, tCO_2 。

2 结果与讨论

2.1 废铅蓄电池回收过程的综合能耗核算

基于企业2019年的实际情况,按照表1可计算出企业2019年产品的综合能耗,具体信息如表2所示。

表2 企业产品综合能耗核算(2019年)

Table 2 Energy consumption calculations for products in 2019

产品名称	能源类别	主要生产系统能耗/tce	辅助、附属系统能耗/tce	损失分摊/tce	产品综合能耗/tce	单位产品综合能耗/kgce·t ⁻¹
再生铅(电解铅、精铅及铅合金)	当量能耗	34 291.99	7 010.03	298.35	41 600.37	98.35

由表2可知,案例企业单位产品综合能耗(当量能耗)为 $98.35 \text{kgce} \cdot \text{t}^{-1}$ 。其中,主要生产系统、辅助生产系统、附属系统和损耗分别占综合能耗的82.43%、16.39%、0.46%和0.72%;辅助生产系统的能耗主要用于空压机和制氧站的电耗,附属系统主要用于食堂的电耗和天然气消耗,损耗主要来自变压器及线损。天然气消耗占产品综合能耗的71.64%,是最主要的能耗类别。与《再生铅行业规范条件》^[21]规定的单位产品综合能耗(预处理-熔炼企业熔炼工艺)相比,案例企业的单位产品综合能耗可节约 $26.65 \text{kgce} \cdot \text{t}^{-1}$,实现单位产品综合能耗减排21.32%。

基于企业破碎分选工序、铅膏熔炼工序、精炼工序和合金工序的实际能源消耗情况和产品产量,按照表1计算了废铅蓄电池回收过程各工序的单位产品综合能耗(表3)。

表 3 工序单位产品综合能耗计算 (当量能耗)

Table 3 Comprehensive energy consumption calculation by different process (Equivalent energy consumption)

工序名称	主要生产系统能耗/tce	辅助、附属系统能耗/tce	损失分摊/tce	合计产品能耗/tce	单位产品综合能耗/kgce·t ⁻¹
破碎分选工序	1 020.27	408.67	89.51	1 518.44	3.38
铅膏熔炼工序	24 959.22	4 794.57	104.42	29 858.22	69.72
精炼工序	480.55	272.45	59.67	812.67	18.71
合金工序	7 831.95	1 534.34	44.75	9 411.04	24.79

由表 3 可知, 破碎分选、铅膏熔炼、精炼和合金工序的单位产品综合能耗分别为 3.38、69.72、18.71 和 24.79 kgce·t⁻¹, 铅膏熔炼是单位产品综合能耗最大的工序。案例企业采用的多室熔炼工艺可实现热能多级互换利用, 在改善渣型也可实现脱硫; 同时, 采用先进的自动化控制水平代替了高耗能的人力操作等, 极大提高了能源利用效率。相比于《再生铅单位产品能源消耗限额》规定的新建企业工序能耗限额准入值^[19], 案例企业的铅膏熔炼工序可节能 210.28 kgce·t⁻¹, 但熔炼工序仍然具有较大的节能潜力。

2.2 废铅蓄电池回收过程的碳排放核算

根据表 1 计算案例企业的碳排放总量, 按照不同的碳排放来源统计如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 焦粉作为原材料进入生产过程引起的碳排放占据了总碳排放量的 49.81%, 是最大的碳排放源。燃料燃烧、净购入电力和过程排放分别占碳排放总量的 30.62%、12.18% 和 7.40%。根据表 1 计算不同工序的碳排放情况如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 铅膏熔炼工序是最大的二氧化碳排放工序, 占整个废铅蓄电池回收过程碳排放总量的 87.92%; 其次是合金、破碎分选和精炼工序, 分别占总排放量的 9.68%、1.56% 和 0.84%。而在铅膏熔炼工序中, 焦粉作为还原剂进入熔炼工序的排放是最主要的碳排放类别。

2.3 废铅蓄电池回收过程的节能降碳分析

通过分析案例企业各统计类别和工序的能耗和碳排放情况, 废铅蓄电池回收过程的节能降碳工作可从以下 3 个方面开展。

1) 燃料燃烧、能源作为原材料、净购入电力和热力。由表 1 可计算出废铅蓄电池回收过程的产品综合能耗与碳排放量的比值, 具体如表 4 所示。在燃料燃烧、能源作为原材料、购入电力和热力这 4 个类别上, 能耗和 CO₂ 排放量的比值是常量, 也就是说这 2 个值通常是线性相关的, 在这些统计类别下的节能措施同样可以减少 CO₂ 的排放。

燃料燃烧主要集中在铅膏熔炼和精炼过程。在案例企业的工艺路线中, 熔炼炉放出的粗铅在

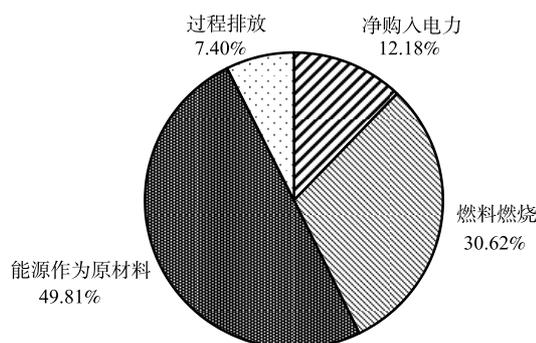


图 2 废铅蓄电池回收过程不同统计类别的碳排放情况

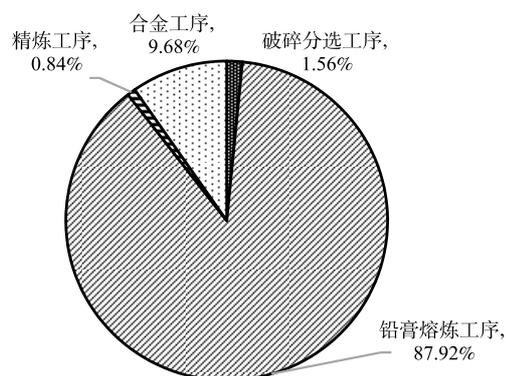
Fig. 2 CO₂ emissions of different statistical categories in secondary lead production

图 3 废铅蓄电池回收过程不同工序的碳排放情况

Fig. 3 CO₂ emissions of different process in secondary lead production

容器内经运输送至精炼锅直接添加,省去了冷却再加热熔化的环节,精简了加热熔化环节,节省了天然气 $5 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$,实现了 $10.81 \text{ kgCO}_2 \cdot \text{t}^{-1}$ 的减排和 $6.07 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$ 的节能。但天然气燃烧的能耗和碳排放分别占总量的 71.64% 和 30.62%,提高熔炼炉效率和减少天然气的消耗,仍然是废铅蓄电池回收过程的重点节能降碳方向。建议废铅蓄电池回收企业建立天然气在线监测系统,完善能耗在线监测系统,以实现对企业的能源生产、输送、分配、使用各环节进行集中监控管理,提升能源管理信息化水平;同时,设接入端系统并按时接入省级重点用能单位能耗在线监测平台。

焦粉作为原材料进入生产过程是废铅蓄电池回收过程中最大的碳排放类别。以往研究表明^[32],相对于高温熔炼法,通过减少白煤的使用量,钠法和铵法预脱硫-低温熔炼工艺的总碳排放量分别可降低 38.9% 和 25.6%。能源作为原材料的部分具有很大的节能降碳空间,建议在后续研发过程中,关注温室气体排放较少的原材料替代白煤、焦粉等高排放的原材料。

电力消耗产生的碳排放也不容忽视,以往研究表明,高温熔炼、钠法、铵法预脱硫-低温熔炼工艺的电力消耗引起的碳排放量分别占总排放量的 9.8%、24.1%、20.4%^[32]。案例企业电力消耗引起的碳排放量占总排放量的 12.18%。但案例企业制氧系统的能耗约占全厂总能耗的 47.88%,因此,降低制氧系统电力消耗是企业节能工作的重中之重。离心式空压机是制氧系统电力消耗的主要部分,其能耗主要与入口流量与额定流量之比(负荷)、泄漏、各级出口压力、各级入口温度以及压降有关^[33]。企业应当摸索总结负荷、压力、水温、水量、空气温度等参数对系统阻力的影响,延长机组运行周期,减少开、停车次数和加温吹除次数,节约能源消耗和减少碳排放。此外,通过对离心风机的改造,也可减少风机机械能损失,增大风机风压,提高风机效率,可实现 $1.09 \text{ kgCO}_2 \cdot \text{t}^{-1}$ 的减排和 $5.18 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$ 的节能,具有较大的复制和推广潜力。

案例企业由于在熔炼炉后配备余热锅炉进行烟气余热利用,因此购入热力部分并未产生碳排放,但仍有一定的能耗。熔炼炉烟气全部进行余热回收后,可产生蒸汽量为 $33.3 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$,实现 CO_2 减排 $82.58 \text{ kgCO}_2 \cdot \text{t}^{-1}$ 和节能 $26.70 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$,是节能降碳潜力最大的改造措施。

2) 碳酸钠等碳酸盐进入生产过程。碳酸钠是国内外废铅蓄电池回收过程普遍采用的铅膏脱硫剂^[32]。废铅蓄电池回收过程一般会将碳酸钠加入铅膏中进行预脱硫,也就是利用碳酸钠将 PbSO_4 转化为 PbCO_3 ,然后再将 PbCO_3 进行低温熔炼分解释放出 CO_2 。碳酸盐在生产过程的直接排放不计入产品综合能耗核算中,因此,这部分碳排放量很容易被忽视。除了碳酸钠, NH_4HCO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ^[34-35]、柠檬酸和柠檬酸钠^[36-37]也可以作为铅膏的转化剂,但他们也都会产生 CO_2 排放。以往研究表明,在钠法和铵法预脱硫低温熔炼工艺中,因碳酸盐分解产生的碳排放量,分别占其碳足迹的 21% 和 34%^[32],远高于案例企业脱硫剂所占的比例(7.4%)。此外,如果企业在烟气脱硫过程中采用石灰石等碳酸盐作为脱硫剂,也需考虑到碳排放核算过程中去^[38]。使用碳排放量低的脱硫剂取代碳酸钠、石灰石等碳酸盐,是废铅蓄电池回收企业需要考虑的问题。

3) 耗能工质(新鲜水、氧气和压缩空气等)。根据《综合能耗计算通则》(GB/T 2589-2020)^[19]的要求,耗能工质主要包括新水、软化水、压缩空气、氧气和氮气等。在废铅蓄电池回收过程的熔炼工序中,会用到氧气、压缩空气等耗能工质。由表 1 可知,如果氧气等耗能工质为自产,则

表 4 废铅蓄电池回收过程中能耗与碳排放的比值
Table 4 Ratio of energy consumption and CO_2 emission in secondary lead production process

统计类别	产品综合能耗与碳排放量的比值
燃料燃烧	$\frac{E_{\text{燃料}}}{E_{\text{燃烧}}} = \frac{k_{\text{燃料}}}{10^4 \times \text{NCV}_{\text{燃料}} \times \text{EF}_{\text{燃料}}}$
能源作为原材料	$\frac{E_{\text{能源}}}{E_{\text{原材料}}} = \frac{k_{\text{能源}}}{\text{EF}_{\text{还原剂}}}$
净购入电力	$\frac{E_{\text{电力}}}{E_{\text{电}}} = \frac{k_{\text{电力}}}{\text{EF}_{\text{电}}}$
净购入热力	$\frac{E_{\text{热力}}}{E_{\text{热}}} = 10^3 \times \frac{k_{\text{热力}}}{\text{EF}_{\text{热}}}$

这部分产生的电力消耗等类别将计入碳排放核算范围; 而外购的耗能工质则不计入碳排放核算范围。而能耗核算则没有自产和外购的差别, 都计入能耗核算范围内。这种情况有可能导致 2 种综合能耗基本相同的生产工艺, 碳排放量确存在很大差异。

3 结语

1) 采用多室熔炼炉回收铅及其产品的单位产品能耗为 $98.35 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$, 天然气消耗占产品综合能耗的 71.64%, 是最主要的能耗类别, 铅膏熔炼工序是产品综合能耗最大的工序。建议废铅蓄电池回收企业按照国家相关节能降碳要求及企业自身发展的需要, 进一步细化能源统计工作, 对照工序用能情况进行统计和对标分析, 将节能工作重点放在天然气消耗上。同时, 应重点从熔炼工序节能工艺着手, 合理选用更先进、更节能的生产设备, 提高熔炼效率, 减少电力和其他耗能工质的消耗。

2) 焦粉作为原材料进入生产过程引起的碳排放占据了总碳排放量的 49.81%, 是最大的碳排放源。在燃料燃烧、能源作为原材料、购入电力和热力方面, 能耗和 CO_2 排放量核算是线性相关的。减少能源材料进入生产过程, 同时兼顾精炼及破碎分选等工序节能技术改造, 优化用能结构, 加强余热利用, 可使废铅蓄电池回收企业实现同时节能降碳。

3) 碳酸盐在生产过程的直接排放不计入产品综合能耗核算中, 因此, 这部分碳排放量很容易被忽视。使用低碳脱硫剂取代碳酸钠、石灰石等碳酸盐脱硫剂, 也是废铅蓄电池回收企业需要关注的问题。此外, 目前尚未统一废铅蓄电池回收企业自产和外购耗能工质的核算方法, 不利于推动行业企业实施节能降碳的统筹协调, 建议在后续的核算指南中进行统一规定。

参 考 文 献

- [1] 国家发展改革委. “十四五”循环经济发展规划(发改环资〔2021〕969号)[EB/OL]. [2022-07-07]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202107/t20210707_1285527.html?code=&state=123, 2021.
- [2] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于印发“十四五”循环经济发展规划的通知[J]. 再生资源与循环经济, 2021, 14(7): 1-5.
- [3] 中华人民共和国商务部. 中国再生资源回收行业发展报告(2020)[EB/OL]. [2022-07-07]. <http://images.mofcom.gov.cn/ltfzs/202106/20210630093358717.pdf>, 2021.
- [4] 中华人民共和国商务部. 2013-2020年中国再生资源回收行业发展报告 [EB/OL]. [2022-07-07]. <http://ltfzs.mofcom.gov.cn/article/ztznn/202106/20210603171351.shtml>, 2021.
- [5] 中华人民共和国国家统计局. 2014-2021年国家统计局年鉴[M]. 北京, 中国统计出版社, 2015-2022.
- [6] 王成彦, 陈永强. 中国铅锌冶金技术状况及发展趋势: 节能潜力[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(3): 1-6.
- [7] 郑舒, 王树新, 王梦娇. 废旧铅酸蓄电池的清洁回收工艺[J]. 蓄电池, 2019, 56(2): 55-59.
- [8] 工业和信息化部, 国家市场监督管理总局. 2021年重点用能行业能效“领跑者”企业名单(中华人民共和国工业和信息化部 国家市场监督管理总局公告2022年第3号)[EB/OL]. [2022-07-07]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/xydt/art/2022/art_53896a63777c48e5844c92d27aac89c5.html, 2022.
- [9] 工业和信息化部, 国家市场监督管理总局. 2020年重点用能行业能效“领跑者”企业名单(中华人民共和国工业和信息化部 国家市场监督管理总局公告2021年第56号)[EB/OL][2022-07-07]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2021/art_fb61f4b9829e406a8a7278aecf274c1d.html, 2021.
- [10] 许健明, 李颖. 2020年-2035年全球铅供需格局分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 14-20,24.
- [11] 中华人民共和国环境保护部. 再生铅冶炼污染防治可行技术指南 [EB/OL]. [2022-07-07]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201502/t20150227_296184.htm, 2015.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 排污许可证申请与核发技术规范 有色金属工业-再生金属: HJ 864.3-2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [13] 詹光, 黄草明. 废铅酸蓄电池铅膏回收利用技术的现状与发展[J]. 有色矿冶, 2016, 32(1): 48-52.
- [14] 程宇, 胡琪卉. 废铅膏的回收再利用研究进展[J]. 蓄电池, 2015, 52(5): 247-250.
- [15] Mingyang L, Jiakuan Y, Sha L, et al. Review on clean recovery of discarded/spent lead-acid battery and trends of recycled products[J]. Journal of Power Sources, 2019, 436(10): 226853.
- [16] 黄鸿, 陈烁娜, 韩伟江, 等. 废铅膏回收利用技术及污染分析[J]. 无机盐工业, 2022, 54(7): 35-41.

- [17] 中华人民共和国环境保护部. 清洁生产标准 废铅酸蓄电池铅回收业: HJ 510-2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 再生铅行业清洁生产评价指标体系[EB/OL]. [2022-07-07]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/gg/201601/W020190905485574841411.pdf>, 2016.
- [19] 全国能源基础与管理标准化技术委员会. 综合能耗计算通则: GB/T 2589-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [20] 国家标准化管理委员会. 再生铅单位产品能源消耗限额: GB 25323-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [21] 中华人民共和国工业和信息化部. 再生铅行业规范条件[EB/OL]. [2022-07-07]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zwj/wjfb/gg/art/2020/art_d77532f477274f4bb45fa42a37a8d0c1.html, 2016.
- [22] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory[EB/OL]. [2022-07-07]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, 2006.
- [23] 王琢璞, 温宗国. 废铅酸电池回收制取再生铅合金技术的生命周期评价[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1245-1255.
- [24] 张晗, 王红梅, 马聪丽, 等. 铅酸蓄电池生命周期评价[J]. 中国环境管理, 2013, 5(3): 39-48.
- [25] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory[EB/OL]. [2022-07-07]. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>, 2019.
- [26] 国家发展改革委办公厅. 关于印发第三批10个行业企业温室气体核算方法与报告指南(试行)的通知.(发改办气候〔2015〕1722号)[EB/OL]. [2022-07-07]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111_963496.html?code=&state=123, 2015.
- [27] 国家发展改革委办公厅. 其他有色金属冶炼和压延加工企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)(发改办气候〔2015〕1722号)[EB/OL]. [2022-07-07]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111_963496_ext.html, 2015.
- [28] 中华人民共和国生态环境部. 《生态环境部办公厅关于加强企业温室气体排放报告管理相关工作的通知》(环办气候〔2021〕9号)[EB/OL]. [2022-07-07]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk05/202103/t20210330_826728.html, 2021.
- [29] 中华人民共和国生态环境部. 关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知(环办气候函〔2022〕111号)[EB/OL]. [2022-07-07]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html, 2022.
- [30] 刘诚, 陈瑞英, 王满仓, 等. 铜冶炼能耗核算与碳排放量核算差异性和相关性分析[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(4): 1-6.
- [31] 国家发展改革委办公厅. 工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)(发改办气候〔2015〕1722号)[EB/OL]. [2022-07-07]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111_963496_ext.html, 2015.
- [32] 李文豪. 铅膏再生过程的碳足迹分析与碳减排技术研究[D]. 湖南: 湘潭大学, 2021.
- [33] 李中, 王庆锋, 刘翔宇, 等. 离心式空压机能耗关键影响因素的分析[J]. 流体机械, 2018, 46(12): 54-59.
- [34] 郭光辉, 曹新, 刘芳芳. 化学转化法处理废铅酸电池铅膏制备超细氧化铅[J]. 现代化工, 2015, 35(7): 66-68, 70.
- [35] 舒月红, 马成, 高倩, 等. 碳酸盐对废铅酸蓄电池中铅膏脱硫转化的研究[J]. 蓄电池, 2014, 51(6): 248-252, 257.
- [36] SONMEZ M S, KUMAR R V. Leaching of waste battery paste components. Part 1: Lead citrate synthesis from PbO and PbO₂[J]. Hydrometallurgy, 2009, 95(1/2): 53-60.
- [37] SONMEZ M S, KUMAR R V. Leaching of waste battery paste components. Part 2: Leaching and desulphurisation of PbSO₄ by citric acid and sodium citrate solution[J]. Hydrometallurgy, 2009, 95(1/2): 82-86.
- [38] 中华人民共和国生态环境部. 《工业企业污染治理设施污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行)》(环办科技[2017]73号)[EB/OL]. [2017-09-05]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201709/t20170913_421402.htm, 2017.

(责任编辑: 金曙光)

Analysis of Energy conservation and carbon emission reduction in waste lead-acid battery recycling

ZHOU Cong^{1,2}, GUO Jianbo², YANG Chunming³, MA Yonggang³, CHEN Yang^{1,2}, FENG Qinzhong², CUI Hao², LIU Liyuan^{2,*}

1. Donghua University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jiangsu New Chunxing Resource Recycling Co., Ltd. Jiangsu 221300, China

*Corresponding author, E-mail: liuliyuan@ucas.ac.cn

Abstract In order to understand the energy saving and carbon reduction of the spent lead-acid battery recycling process in China, a typical spent lead-acid battery recycling process was used as a research object to analyze the comprehensive product energy consumption and carbon emission of the spent lead battery recycling process. The results showed that the integrated energy consumption per unit of product (equivalent energy consumption) of the case enterprise was $98.35 \text{ kgce}\cdot\text{t}^{-1}$, while the natural gas consumption was the largest source of energy consumption. The lead paste melting process was the largest integrated energy consumption and carbon emission process in the spent lead-acid battery recycling enterprise. Emissions from coke powder entering the smelting process as a reducing agent were the most significant source of carbon emissions. Energy consumption and carbon emissions was linearly correlated in terms of fuel combustion, energy as a raw material, purchased electricity and heat. At the same time, process emissions caused by carbonates and energy-consuming substances can also affect the energy efficiency and carbon emission, and it was recommended that they should be uniformly specified in the subsequent guidelines. This study can provide a reference for the other energy saving and carbon reduction in spent lead-acid battery recycling processes.

Keywords spent lead-acid battery recycling; secondary lead; combined energy consumption; carbon emission; energy saving and carbon emission reduction