

引文格式:贺双,王诗溶,陈彪,等.再生铅行业清洁生产工艺碳排放核算研究[J].中国有色冶金,2025,54(4):100-107.
HE Shuang, WANG Shirong, CHEN Biao, et al. Research on carbon emission accounting of clean production technology in recycled lead industry[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(4): 100-107.

再生铅行业清洁生产工艺碳排放核算研究

贺双¹,王诗溶¹,陈彪²,李心晴¹,刘兴旺¹,张俊丰¹

(1.湘潭大学 环境与资源学院,湖南湘潭 411105; 2.湘潭大学 化学学院,湖南湘潭 411105)

[摘要] 建立工业行业二氧化碳排放核算方法对应对气候变化有重要的指导意义,本研究基于再生铅行业碳排放核算标准化发展状况,梳理并确定了再生铅行业碳排放核算方法,并以废铅蓄电池清洁回收技术(自动破碎分选-铅膏预脱硫-低温熔炼)为代表,以各回收工段为核算单元,对全工艺流程进行碳排放核算,填补了再生铅领域碳排放量评价标准的空白,有利于指导和规范再生铅行业的生产和发展。核算结果显示,废铅蓄电池处理能力为15万t/a的机械破碎分选-铅膏预脱硫-低温熔炼的再生铅清洁生产工艺,废铅蓄电池破碎分选阶段、铅栅熔铸阶段、粗铅电解精炼阶段、铅膏预脱硫阶段、脱硫铅膏低温熔炼阶段的碳排放量分别为0.380 t CO₂/h、0.460 t CO₂/h、0.860 t CO₂/h、1.900 t CO₂/h、5.047 t CO₂/h,这些二氧化碳排放指标也可以作为同行业、同类工艺企业的二氧化碳排放核算系数。基于碳排放核算结果,分析了再生铅行业碳排放特征,由燃料燃烧引起的直接排放是再生铅清洁工艺最大的碳排放源,其排放量占总碳排放量的31.57%;低温熔炼工段是再生铅清洁工艺最大的碳排放工段,其碳排放占总碳排放量的58.36%。

[关键词] 再生铅;废铅蓄电池;碳排放;碳核算;碳减排

[中图分类号] TF812; X758 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)04-0100-08

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.04.011

0 引言

废铅蓄电池作为重要的城市矿产资源,再生其中的铅(也称再生铅)较采矿炼铅能耗及污染物产排均低70%以上,一直是全世界大力发展的产业^[1-2]。与原生铅相比,每生产1t再生铅可以节约用煤量659 kg,节约用水量235 m³^[3]。近年来,再生铅行业碳排放核算标准化工作在全球范围内取得进展,尽管在不同国家和地区的推进程度有所不同,但随着生态文明建设和应对全球气候变化进程的加速推进,再生铅行业碳排放管理必将成为关注重点。

当前,我国正加强对工业领域碳达峰碳中和标准体系的建设,在组织温室气体排放量核算方面,《工业领域碳达峰碳中和标准体系建设指南》^[4]提出重点制定再生铅冶炼等有色金属行业重点企业的二氧化碳排放核算标准。根据国家发展和改革委员会等部门发布的《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》^[5]的要求,应加快提升我国电池产品碳足迹管理水平,制定碳足迹核算规则标准,建立和完善电池碳足迹数据库,研究开展电池产品碳标识认证制度,推动碳足迹国际衔接与互认等。再生铅行业的一些组织通过发布行业指导文件和组织培训等方式推动行业内企业的碳排放核算与核查工作,部分再生铅企业自愿进行碳排放核算与核查工作,以降低环境风险和推动产业升级,同时提升企业对外形象。总体而言,再生铅行业碳排放核算标准化工作的必要性和重要性已经取得了共识,并已经有了一定基础,但尚未形成科学规范的技术导则和标准体系。

[收稿日期] 2024-12-20

[第一作者] 贺双(2001—),女,湖南岳阳人,硕士研究生,研究方向为环境规划与管理。

[通信作者] 张俊丰(1976—),男,吉林永吉人,教授,博士生导师,研究方向为铅锂电池资源循环。

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(52070159)。

1 再生铅行业碳排放核算方法

《2006 IPCC 国家温室气体排放清单指南》^[6]是目前国际上使用最为广泛的碳排放核算指导性文件,为能源部门、工业过程、农业部门、LULUCF 和废弃物等部门提供了温室气体排放量评估所需参数和排放系数的参考值。基于 IPCC 方法,2013 年我国发改委出台的首批行业企业温室气体核算办法和报告指引,以及二年后第三批出台的《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)》^[7-8]可以用于指导我国现阶段再生铅行业温室气体(主要包含二氧化碳)的排放量核算。

基于核算的方法与基于计量的方法是目前应用较广泛的两大类碳排放核算方法^[9]。其中,再生铅行业碳排放核算方法(纳入核算范围的温室气体主要为二氧化碳),主要分为温室气体排放因子法、质量平衡法和直接实测法等。这几种方法的主要计算原理、优缺点和适用场景见表 1,便于研究人员根据实际情况选择适宜的核算方法。

表 1 不同碳排放核算方法比较

Table 1 Comparison of different carbon emission accounting methods

方法名称	方法简介	方法优点	方法不足	适用场景
温室气体排放因子法	以活动量乘以相应的排放因子计算碳排放量的方法	①清单指南中的可参考排放因子较为全面;②有较为成熟的核算公式和活动数据;③简单明确,易于理解;④有大量的应用实例可供参考。	①计算比较粗略,部分缺省值的取值范围很大,可能导致较大的误差;②对排放系统自身发生变化时的处理能力较质量平衡法要差。	适用于国家或地区尺度的碳排放核算
质量平衡法	碳排放由输入碳含量减去非二氧化碳的碳输出量得到	①能区分各类设施之间以及单个和部分设备之间的区别;②在排放设备更换频繁、自然排放源复杂的情况下仍然适用。	①需要纳入考虑范围的排放中间过程较多,容易出现系统误差;②数据获取较难。	适用于具备具体设施和工艺流程的碳排放核算
直接实测法	对各环节碳排放进行直接测量,收集实时排放数据和样本	①通过实地监测直接获取数据,中间环节少;②操作得当可以获得最真实准确的碳排放量。	①原始数据获取较困难,成本和设备需求高;②存在设备校准、采样误差等问题。	适用于实地监测,需要具备测量设备和技术

本文采用排放因子法、质量平衡法和直接实测法相结合的方法,尽可能发挥各个方法的优势,补齐短板,对再生铅行业企业碳排放进行更为精细、准确的核算,主要碳排放核算公式见表 2。

2 再生铅清洁回收工艺案例分析

2.1 工艺简介

废铅蓄电池的回收过程可以大致分为以下几个工艺过程^[10-13]:①预处理(废铅蓄电池破碎分选、废铅蓄电池铅膏预脱硫等);②还原回收(废铅蓄电池铅膏火法回收、废铅蓄电池铅膏湿法回收或废铅蓄电池铅膏火法与湿法联合处理新工艺);③粗铅电解精炼或火法生产粗铅;④铅及铅合金精炼等。

国内再生铅行业技术装备有明显的阶段性。2012 年以前缺乏稳定的机械化技术装备,2012 年至 2016 年行业普及了以机械破碎分选-铅料规范高温

熔炼为特征的机械化技术装备。2016 年至今,陆续升级机械化技术装备系统到第二代的清洁技术装备,以自动破碎分选-铅膏预转化-低温熔炼为特征^[13]。第二代清洁技术从源头大幅降低污染源含量,使后续工艺所需冶炼温度下降 400℃左右,大气污染物源头减排显著,铅尘、二氧化硫、氮氧化物、二噁英等源头污染减排 70% 以上^[14],其技术经济指标完全符合《清洁生产标准 废铅酸蓄电池铅回收业》(HJ 510—2009)的要求,是再生铅行业的清洁生产技术。另外,第二代清洁技术的行业覆盖率较高,全国年铅蓄电池报废量 600 多万吨,其中第二代技术覆盖的产能达 220 万 t,占比逾 1/3。本文以第二代清洁技术装备用户代表企业(废铅蓄电池处理能力 15 万 t/a)为模板,开展碳排放核算及其标准化研究。各工序阶段的工艺流程如图 1~3 所示。

2.2 案例企业核算边界及碳排放源识别

废铅蓄电池入厂作为开展碳排放核算的起点,

表2 碳排放量主要核算公式

Table 2 The main accounting formula of carbon emissions

统计类别	CO ₂ 排放量核算
燃料燃烧	$E_{\text{燃烧}} = AD_{\text{燃料}} \times EF_{\text{燃料}}$ $AD_{\text{燃烧}} = NCV_{\text{燃料}} \times FC_{\text{燃料}}$
能源作为原材料	$E_{\text{原材料}} = AD_{\text{还原剂}} \times EF_{\text{还原剂}}$
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	$E_{\text{电}} = AD_{\text{电}} \times EF_{\text{电}}$
净购入热力	$E_{\text{热}} = AD_{\text{热}} \times EF_{\text{热}}$ $AD_{\text{热}} = Ma_{\text{st}} \times (En_{\text{st}} - 83.74) \times 10^{-3}$
其他排放	$E_{\text{其他}}$
总计	$E_i = E_{\text{燃料}} + E_{\text{原材料}} + E_{\text{过程}} + E_{\text{电}} + E_{\text{热}} + E_{\text{其他}}$

注： $FC_{\text{燃料}}$ 表示燃料实际消耗数据，单位为 Nm^3 或 10^4Nm^3 ； AD 表示消耗量，单位为 GJ 或 t 或 $\text{MW}\cdot\text{h}$ ； EF_i 表示二氧化碳排放因子，单位为 $\text{t CO}_2(\text{GJ})^{-1}$ 或 $\text{t CO}_2(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}$ ； $NCV_{\text{燃料}}$ 表示平均燃料低位发热量，单位为 $\text{GJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ ； Ma_{st} 表示蒸汽质量，单位为 t ； En_{st} 表示蒸汽热焓（一定压力和温度下），单位为 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ； E_i 表示各类二氧化碳排放量，单位为 t CO_2 ； $E_{\text{其他}}$ 表示除以上碳排放类别以外的所有碳排放量，单位为 t CO_2 。

电解精炼得到精铅作为核算终点，这种核算边界的确定既可以精准获取回收过程中碳排放的原始数据并进行准确的碳排放核算，又符合回收的技术特点，有利于对各工序段的碳排放开展更精准的核算。根据第二代清洁技术分工序、分段落式的工艺流程特点，本文在从“大门”到“大门”作为核算边界的基础之上，提出以各个工序为划分阶段，进行从“工序”到“工序”的细化核算边界，碳排放核算边界见图4所示，各工序碳排放源汇总见表3。

2.3 核算数据来源及排放因子选择

核算数据主要来源为案例企业的实地调研数据、能源消耗报表、生产统计报表、环评报告等，调研年度为2023年。工艺所涉及的原材料以及产品的采购、运输等过程均由企业相关部门负责，其行为发生所产生的碳数据大多来源各异，此部分碳排放暂未纳入核算。

相关参数缺省值依据最近年份相关国家标准及行业经验数据选取。《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施》^[15]由生态环境部于2021年

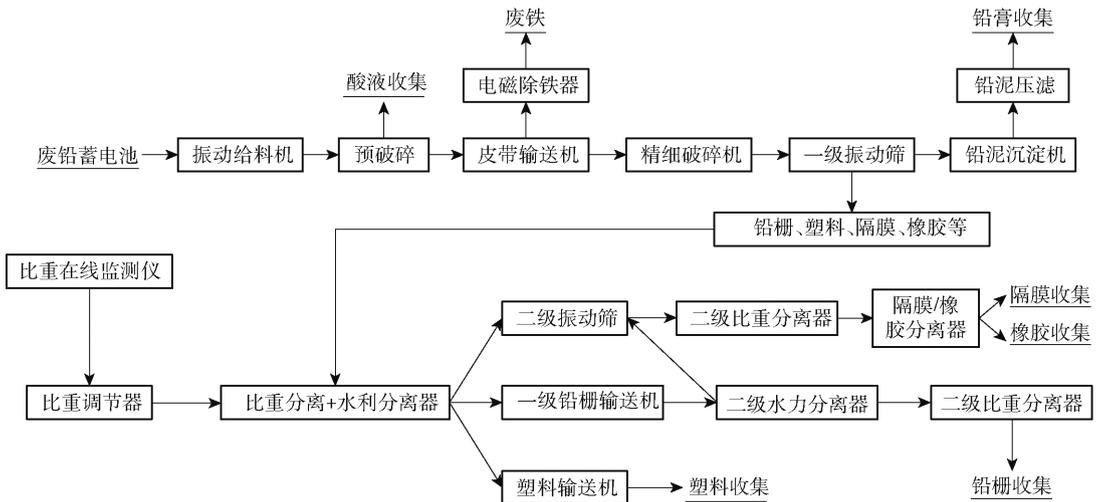


图1 废铅蓄电池破碎分选工艺流程图

Fig. 1 Waste lead battery crushing and sorting process flow chart

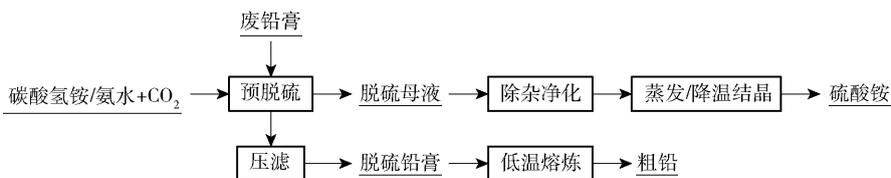


图2 废铅蓄电池铵法预脱硫工艺流程图

Fig. 2 Process flow chart of pre-desulfurization of waste lead battery ammonium method

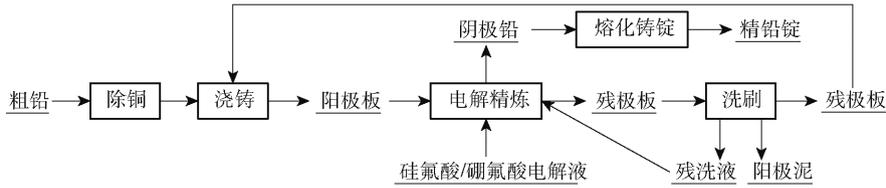


图 3 粗铅电解精炼工艺流程图

Fig. 3 Flow chart of crude lead electrolytic refining process

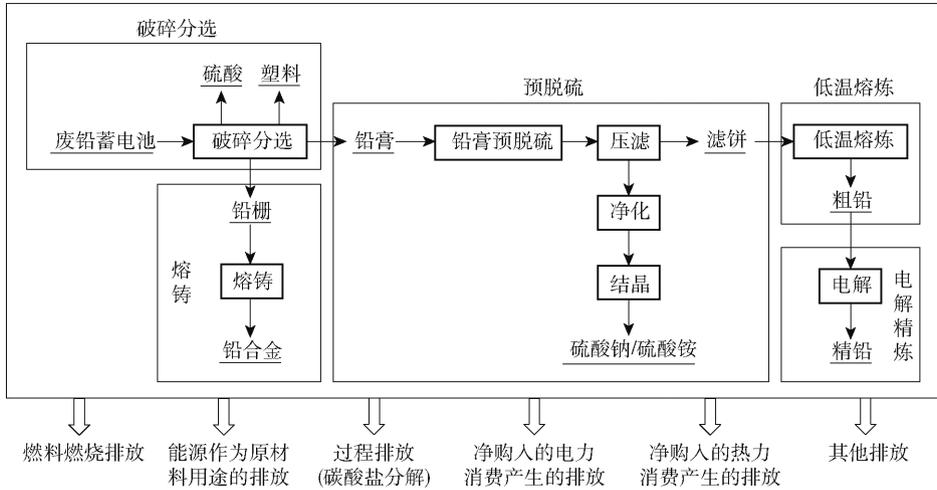


图 4 再生铅企业核算边界示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the accounting boundary of recycled lead enterprises

表 3 各工序排放源汇总表

Table 3 Summary of emission sources of each process

工序	直接排放			间接排放		其他排放
	燃料燃烧排放	能源作为原材料用途的排放	过程排放	净购入的电力消费产生的排放	净购入的热力消费产生的排放	CO ₂ 的其他排放源
破碎分选				√		
熔铸	√	√		√		
预脱硫			√	√	√	√
低温熔炼	√	√	√	√		√
电解精炼	√			√		

发布,规定了企业碳排放核算涉及的电网排放因子为 $0.6101 \text{ t CO}_2 \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$,在此基础上,修订版于 2022 年发布并施行^[16],将企业碳排放核算涉及的电网排放因子调整为 $0.5810 \text{ t CO}_2 \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$,本文调研年度为 2023 年,因而电网排放因子取值 $0.5810 \text{ t CO}_2 \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。焦炭作还原剂的排放因子取值为 $2.862 \text{ t CO}_2 \cdot (\text{t})^{-1}$ 。天然气的二氧化碳排放因子取值为 $0.056 \text{ t CO}_2 \cdot (\text{GJ})^{-1}$ (天然气碳氧化取值为 99%,天然气单位热值含碳量取值为

$15.3 \times 10^{-3} \text{ t C} \cdot (\text{GJ})^{-1}$)。

2.4 碳排放核算结果与分析

基于某再生铅企业 2023 年的实际情况,对废铅蓄电池回收各工序段的碳排放分别进行核算,具体核算结果如图 5 所示。

由图 5 可知,废铅蓄电池破碎分选阶段的总碳排放量为 $0.380 \text{ t CO}_2/\text{h}$,其中其他排放、净购入热力消费产生的间接排放和三大二氧化碳直接排放均可视为零排放,破碎分选阶段的碳排放几乎 100%

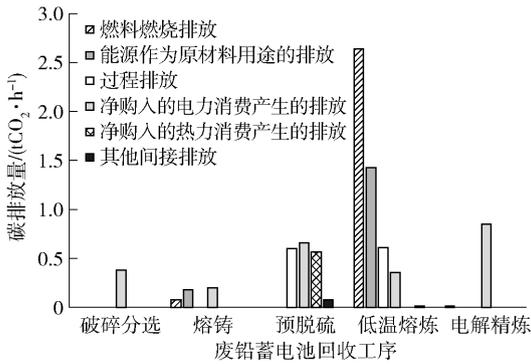


图5 废铅蓄电池回收各工序段的碳排放量 (单位:t CO₂/h)

Fig. 5 Carbon emissions from each process segment of recycling waste lead-acid batteries (unit: t CO₂/h)

来源于净购入电力消费产生的间接排放。此外,破碎分选阶段投加了较多絮凝剂用于铅泥絮凝沉淀,由絮凝剂引起的碳排放量最终在低温熔炼阶段产生,计入低温熔炼阶段的总碳排放量。

铅栅熔铸阶段的总碳排放量为 0.460 t CO₂/h,其中净购入电力消费产生的间接排放、能源(焦炭)作为原材料用途的直接排放和燃料(天然气)燃烧直接排放分别占熔铸阶段总碳排放的 44.37%、38.53%和 17.10%,过程直接排放、净购入热力消费产生的间接排放和其他排放均可视为零排放。

铅膏预脱硫阶段的总碳排放量为 1.900 t CO₂/h,其中净购入电力消费产生的间接排放、过程直接排放(碳酸氢铵分解产生二氧化碳)、净购入热力消费产生的间接排放和其他排放分别占预脱硫阶段总碳排放的 34.67%、31.55%、29.60%和 4.18%,由能源作为原材料用途和燃料燃烧引起的直接排放可视为零排放。此外,预脱硫阶段投加了一些絮凝剂用于脱硫废液的除杂净化,由絮凝剂引起的碳排放量最终在低温熔炼阶段产生,计入低温熔炼阶段的总碳排放量。

脱硫铅膏低温熔炼阶段的总碳排放量为 5.047 t CO₂/h,其中燃料(天然气)燃烧直接排放、能源(焦炭)作为原材料用途的间接排放、过程直接排放(碳酸铅分解产生二氧化碳)、净购入电力消费产生的间接排放和其他排放分别占低温熔炼阶段总碳排放的 52.32%、28.32%、12.18%、7.05%和

0.13%,净购入热力消费产生的间接排放可视为零排放。

粗铅电解精炼阶段的总碳排放量为 0.860 t CO₂/h,其中净购入电力消费产生的间接排放和燃料(天然气)燃烧直接排放分别占电解精炼阶段总碳排放的 98.71%和 1.29%,由工艺过程和能源作为原材料用途引起的直接排放、净购入热力消费产生的间接排放和其他排放可视为零排放。

为进一步分析再生铅行业碳排放特征,将废铅蓄电池回收过程不同碳排放来源的碳排放情况进行统计,结果如图 6 所示;不同工序段碳排放情况统计如图 7 所示。

图 6 表明,燃料燃烧直接排放是该过程中最大的二氧化碳排放源,由其产生的二氧化碳量占回收过程碳排放总量的 31.57%。净购入电力消费产生的间接排放占碳排放总量的 28.31%,是第二大二氧化碳排放源。此外,能源作为原材料用途的直接排放、过程直接排放、净购入热力消费产生的间接排放和其他排放分别占碳排放总量的 18.58%、14.04%、6.50%和 1.00%。

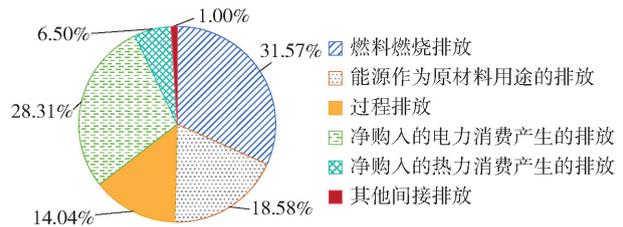


图6 废铅蓄电池回收各碳排放来源碳排放分析
Fig. 6 Analysis of carbon emissions from different sources of carbon emissions from the recycling of used lead batteries

图 7 表明,低温熔炼工段是回收过程中最大的二氧化碳排放工段,该工段产生的二氧化碳量占该过程碳排放总量的 58.36%;其次是预脱硫工段、电解精炼工段、熔铸和破碎分选工段,分别占总排放量的 21.98%、9.95%、5.32%和 4.39%。

以上是按行业占比 90% 的 JY-15 系统核算的碳排放结果,典型工业生产指标为每小时废铅蓄电池处理能力 35 t/h,预脱硫系统铅膏处理能力为 21 t/h,年运行 4 300 h。其他年处理量未达产的情景,依据实际年处理量或者实际运行时长进行折算即可。

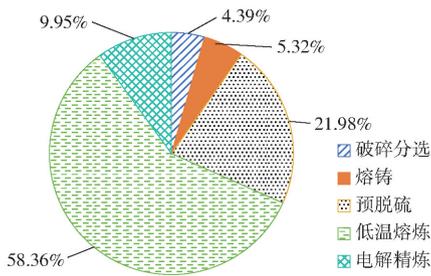


图7 废铅蓄电池回收各工序段碳排放分析

Fig. 7 Analysis of carbon emissions at each stage of the recycling process for used lead batteries

3 总结与展望

本文以废铅蓄电池清洁回收技术为代表,以各回收工段为核算单元,对全工艺流程进行碳排放核算,得出以下结论。

1) 基于机械破碎分选-铅膏预脱硫-低温熔炼的再生铅清洁生产工艺,废铅蓄电池破碎分选阶段、铅栅熔铸阶段、粗铅电解精炼阶段、铅膏预脱硫阶段、脱硫铅膏低温熔炼阶段的碳排放量分别为 $0.380 \text{ t CO}_2/\text{h}$ 、 $0.460 \text{ t CO}_2/\text{h}$ 、 $0.860 \text{ t CO}_2/\text{h}$ 、 $1.900 \text{ t CO}_2/\text{h}$ 、 $5.047 \text{ t CO}_2/\text{h}$,这些二氧化碳排放指标可以作为同行业、同类工艺企业的二氧化碳排放核算系数。

2) 由燃料燃烧引起的直接排放是再生铅清洁工艺最大的碳排放源,其次是净购入电力消费产生的间接排放。燃料燃烧引起的直接排放占总碳排放量的31.57%,涉及3个工序段,其中低温熔炼阶段、熔铸阶段、电解精炼阶段贡献值占比分别为96.71%、2.89%和0.40%。净购入电力消费产生的间接排放占总碳排放量的28.31%,涉及5个工序段,其中电解精炼阶段、预脱硫阶段、破碎分选阶段、低温熔炼阶段和熔铸阶段贡献值占比分别为34.69%、26.91%、15.52%、14.54%和8.34%。

3) 再生铅清洁工艺二氧化碳排放最多工段是低温熔炼工段,其次是预脱硫工段。低温熔炼工段的碳排放占总碳排放量的58.36%,涉及5种碳排放源,其中燃料燃烧直接排放贡献值占比达52.32%,能源作为原材料用途的直接排放、过程直接排放、净购入电力消费产生的间接排放和其他排放贡献值占比分别为28.32%、12.18%、7.05%和0.13%。预脱硫工段的碳排放占总碳排放量的21.98%,涉及4种碳排放源,其中净购入电力消费

产生的间接排放、过程直接排放、净购入热力消费产生的间接排放、其他排放贡献值占比分别为34.67%、31.55%、29.60%和4.18%。

4) 依据本文的碳排放核算方法,对再生铅行业的机械破碎分选-铅膏协同冶炼、机械破碎分选-铅膏高温熔炼、机械破碎分选-铅膏免冶炼转化等典型工艺也可以分别计算碳排放系数。

5) 对行业生产过程中添加碱、冶金助剂等带来的碳排放核算因子缺失问题,后续应当依据核算体系的逐步完善来逐步解决,持续提高碳排放核算的准确性。

[参考文献]

- [1] 中国有色金属工业协会. 2022 中国有色金属发展报告[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2022:61-84.
China Non-Ferrous Metals Industry Association. 2022 China non-ferrous metal development report [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2022:61-84.
- [2] 羊建波. 铅基固废资源区域分布及环境属性分析[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(1): 71-77.
YANG Jianbo. Analysis of regional distribution and environmental attributes of lead-based solid waste resources [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(1): 71-77.
- [3] 嘎日玛盖, 赵卉, 李唯丹. 电动汽车太阳能电源补充系统的研究[J]. 山西电力, 2010(6): 31-33.
GARI Magai, ZHAO Hui, LI Weidan. Studies on solar power replenishment system for electric vehicle [J]. Shanxi Electric Power, 2010(6): 31-33.
- [4] 工业和信息化部办公厅. 工业领域碳达峰碳中和标准体系建设指南(工信厅科[2024]7号)[EB/OL]. [2024-09-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202402/content_6933519.htm, 2024.
General Office of the Ministry of Industry and Information Technology. Guidelines for the construction of carbon neutralisation standard system in the industrial field (Department of Industry and Information Technology Section [2024] No. 7) [EB/OL]. [2024-09-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202402/content_6933519.htm, 2024.
- [5] 国家发展改革委等. 关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见[EB/OL]. [2024-09-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6917087.htm, 2023.
National Development and Reform Commission, etc. Opinions on accelerating the establishment of a product carbon footprint management system [EB/OL]. [2024-09-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6917087.htm, 2023.
- [6] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory [EB/OL]. [2024-09-12]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, 2006.

- [7] 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]. [2024-09-12]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111_963496.html?state=123, 2015.
- General Office of the National Development and Reform Commission. Notice on the issuance of the Third batch of greenhouse gas accounting methods and reporting guidelines for enterprises in 10 industries (trial implementation). (Development and Reform Office Climate[2015]No.1722) [EB/OL]. [2024-09-12]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111_963496.html?state=123, 2015.
- [8] 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]. [2024-09-12]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/W020190905506435474174.pdf>, 2015.
- General Office of the National Development and Reform Commission. Greenhouse gas emission accounting methods and reporting guidelines for other non-ferrous metal smelting and rolling processing enterprises (trial implementation) (Development and Reform Office Climate[2015]No. 1722) [EB/OL]. [2024-09-12]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/W020190905506435474174.pdf>, 2015.
- [9] 边少卿, 杨姗姗, 杨秀, 等. 国际绿色贸易壁垒形势下完善我国碳核算体系的对策研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 1-12.
- BIAN Shaoqing, YANG Shanshan, YANG Xiu, et al. Strategies to improve china's carbon accounting system under international green trade barriers[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 1-12.
- [10] 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.
- [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]. [2024-09-12]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201502/W020150227400557775062.pdf>, 2015.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Technical guide to the prevention and control of pollution in recycled lead smelting [EB/OL]. [2024-09-12]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201502/W020150227400557775062.pdf>, 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.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Application for pollution discharge license and issuance of technical specifications non-ferrous metal industry-recycled metals: HJ 864.3—2018 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
- [13] 张俊丰, 陈彪, 黄妍, 等. 废铅酸蓄电池资源回收行业技术与发展[J]. 中国有色冶金, 2023, 5(1):2-15.
- ZHANG Junfeng, CHEN Biao, HUANG Yan, et al. Current research and future trends of spent/discarded lead-acid batteries recycling technology [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 5(1):2-15.
- [14] 陈彪, 张俊丰, 黄妍, 等. 废铅蓄电池资源循环技术与污染物及 CO₂ 源头减排[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2021, 43:1-7.
- CHEN Biao, ZHANG Junfeng, HUANG Yan, et al. Resource recycling technology for waste lead-acid batteries followed pollutants and CO₂ reducing at source[J]. Journal of Xiangtan University(Natural Science Edition), 2021, 43:1-7.
- [15] 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]. [2024-09-12]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk05/202103/t20210330_826728.html, 2021.
- Ministry of Ecology of the People's Republic of China. Notice of the general office of the ministry of ecology and environment on strengthening the management of greenhouse gas emission reports of enterprises (Environmental Climate[2021]No.9) [EB/OL]. [2024-09-12]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk05/202103/t20210330_826728.html, 2021.
- [16] 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]. [2024-09-12]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html, 2022.
- Ministry of Ecology of the People's Republic of China. Notice on doing a good job in the key work related to the management of enterprise greenhouse gas emission reports in 2022 (Climate Letter of the Environmental Office[2022]No.111) [EB/OL]. [2024-09-12]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html, 2022.

Research on carbon emission accounting of clean production technology in recycled lead industry

HE Shuang¹, WANG Shirong¹, CHEN Biao², LI Xinqing¹, LIU Xingwang¹, ZHANG Junfeng¹

(1. College of Environment and Resource, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. College of Chemistry, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: The establishment of a carbon dioxide emission accounting method in the industrial industry is of important guiding significance for dealing with climate change. Based on the standardised development of carbon emission accounting in the recycled lead industry, the carbon emission accounting method of the recycled lead industry has been sorted out and determined. With the clean recycling technology of waste lead batteries (automatic crushing and sorting-lead paste pre-desulphurisation-low-temperature melting Refining) is represented, and carbon emissions are accounted for the whole process with each recycling section as the accounting unit. We are committed to filling the gap in the carbon emission evaluation standards in the field of recycled lead, which is conducive to guiding and standardising the production and development of the recycled lead industry. The accounting results show that the processing capacity of waste lead batteries is 150 000 t/a of mechanical crushing and sorting-lead paste pre-desulphurisation-low-temperature smelting of recycled lead clean production process, waste lead batteries in the crushing and sorting stage, lead grid melting stage, crude lead electrolytic refining stage, lead paste pre-desulphurisation stage, desulphurisation lead paste low-temperature melting stage carbon The emissions are 0.380 t CO₂/h, 0.460 t CO₂/h, 0.860 t CO₂/h, 1.900 t CO₂/h, 5.047 t CO₂/h respectively. These carbon dioxide emission indicators can also be used as the same industry and similar technology enterprises. The carbon dioxide emission accounting coefficient of the industry. Based on the results of carbon emission accounting, the characteristics of carbon emissions in the recycled lead industry are analysed. Direct emissions caused by fuel combustion are the largest source of carbon emissions in the recycled lead cleaning process, accounting for 31.57% of the total carbon emissions. The low-temperature smelting section is the largest carbon emission section of the recycled lead cleaning process, and its carbon emissions account for 58.36% of the total carbon emissions.

Key words: recycled lead; waste lead-acid batteries; carbon emissions; carbon accounting; carbon emission reduction