

基于生命周期评价法的黄磷产品碳足迹分析

王雪萌¹, 安 燕¹, 刘 海², 田蒙奎¹

(1. 贵州大学化学与化工学院, 贵州贵阳 550025; 2. 中低品位磷矿及其伴生资源高效利用国家重点实验室, 贵州贵阳 550016)

摘 要: 黄磷作为高耗能、高碳排放产品, 摸清其碳排放足迹, 促进其低碳发展对中国“双碳”战略具有重要意义。以贵州省某 5 万 t/a 黄磷企业为例, 采用生命周期评价法(Life Cycle Assessment, LCA), 定量分析黄磷产品在其生产过程中的碳足迹(Carbon Footprint), 并为其绿色低碳发展提出相应的节能降碳建议措施。研究表明: 在黄磷生产过程中, 每吨黄磷在其生命周期内碳足迹为 1.580×10^4 kg CO₂; 其碳排放主要集中在尾气处理和电力消耗两个方面, 二者占总量的 90.08%; 依据其碳足迹核算结果提出采用绿色电力生产、合理利用磷矿资源地理位置优势、加强工艺控制、黄磷尾气综合利用等减排措施, 以此达到减少黄磷产品生产过程碳足迹的目的。

关键词: “双碳”战略; 生命周期评价; 黄磷; 碳足迹; 节能降碳

中图分类号: TQ127.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-4990(2023)12-0036-07

Carbon footprint analysis of yellow phosphorus products based on LCA

WANG Xuemeng¹, AN Yan¹, LIU Hai², TIAN Mengkui¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. State Key Laboratory of Efficient Utilization for Low Grade Phosphate Rock and Associated Resources, Guiyang 550016, China)

Abstract: Yellow phosphorus, as a high energy consumption and high carbon emission product, to find out its carbon emission footprint and promote its low carbon development is of great significance to our “double carbon” strategy. Taking a 50 000 t/a yellow phosphorus enterprise in Guizhou province as an example, Life Cycle Assessment (LCA) was adopted to quantitatively analyze the carbon footprint of yellow phosphorus products in the production process, and proposed corresponding energy-saving and carbon reduction measures for its green and low-carbon development. The research results showed that the carbon footprint of each ton of yellow phosphorus in the production process was 1.580×10^4 kg CO₂. The carbon emissions were concentrated in the two aspects of tail gas treatment and power consumption, which was accounted for 90.08% of the total. Based on its carbon footprint accounting results, it was proposed to adopt green power production, rational use of the geographical advantages of phosphorus resources, strengthen process control, and comprehensive utilization of yellow phosphorus tail gas and other emission reduction measures to reduce the carbon footprint of yellow phosphorus production process.

Key words: “dual carbon” strategy; life cycle assessment; yellow phosphorus; carbon footprint; energy conservation and carbon reduction

中国磷矿石资源储量位居世界第二, 是世界最大的磷化工产品生产国, 主要磷化工产品包括磷酸、

引用格式: 王雪萌, 安燕, 刘海, 等. 基于生命周期评价法的黄磷产品碳足迹分析[J]. 无机盐工业, 2023, 55(12): 36-42.

Citation: WANG Xuemeng, AN Yan, LIU Hai, et al. Carbon footprint analysis of yellow phosphorus products based on LCA[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2023, 55(12): 36-42.

基金项目: 国家自然科学基金项目(22162007); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2021]480, 黔科合支撑[2023]379); 瓮福(集团)有限责任公司技术开发项目[WH-220787(YF)]; 贵州省双碳与新能源技术创新发展研究院资助项目(DCRE-2023-05)

收稿日期: 2023-04-17

作者简介: 王雪萌(1997—), 女, 硕士, 主要研究方向为碳排放核算相关; E-mail: 17667396690@163.com。

通讯作者: 田蒙奎(1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为化工新材料、过程装备、绿色低碳等方面; E-mail: tianmk78@126.com。

磷酸一铵、磷酸二铵、黄磷及草甘膦等^[1]。磷化工产品促进了中国经济发展的同时,也消耗了大量的资源和能源,是CO₂的重要排放源头,造成了严重的环境问题。黄磷是中国重要的基础化工原料,2021年全国黄磷有效产能约为143.45万t,云南、四川、贵州产能分别为全国产能的46%、23%、19%。黄磷属于高污染、高耗能行业,随着中国“双碳”、“能耗双控”及环保政策的发布,黄磷的产能和产量均受到严格限制,《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)》中对黄磷行业节能降碳改造升级提出具体实施指南,明确指出,到2025年黄磷领域能效标杆水平以上产能比例要达到30%,能效基准水平以下产能要基本清零^[2]。

中国自2020年9月明确提出2030年CO₂排放达到峰值,2060年力争实现碳中和目标。中国“双碳”目标任务重、时间紧,需要各个行业进行碳排放量的核算,继而制定相应的碳减排措施。但是对于碳排放的研究大多数停留在国家或者行业层面,针对产品生产制造过程的研究相对较少且主要集中在机械加工工艺方面,对于整个磷化工产品的碳足迹核算仍处在起步阶段,本文将针对典型磷化工产品黄磷开展研究工作,进行其生产过程碳足迹的核算与分析^[3-4]。碳足迹的核算与分析是产品进行绿色低碳生产的理论依据,因此正确理解和认识黄磷生产系统内碳排放实际状况,摸清其碳足迹,促进其低碳发展,对黄磷行业及磷化工产业有序推进“双碳”战略具有重要的研究意义和价值。

本文基于生命周期评价法(LCA),采用《PAS 2050:2008 国际标准规范》,结合黄磷生产工艺,对黄磷生产阶段碳足迹进行核算与分析,为黄磷生产系统低碳工艺优化提供理论依据,为黄磷行业绿色

低碳发展和碳中和提出路径建议^[5]。

1 碳足迹、生命周期评价的定义

1.1 碳足迹

碳足迹(Carbon Footprint)指的是产品及活动直接和间接引起的CO₂排放总量,是一种量化碳排放的标准方法^[6-7]。国内外计算碳足迹的方法主要有IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)方法、基于过程分析的生命周期评价法和投入产出分析法三大类^[8-9]。产品碳足迹代表某产品产生的温室气体排放总量,可以根据气候变化的单一影响类别的生命周期评价进行评估^[10]。碳足迹计算的核心就是产品尺度,企业、行业、国家尺度的碳足迹计算都需要以产品碳足迹计算为基础^[11]。PAS 2050采用生命周期评价法来评估与商品或服务相关的温室气体排放,此标准能够将整个产品系统的排放量最小化,因此在国际上应用较广泛^[12]。

1.2 生命周期评价

某个产品从原材料开采开始,经原材料加工、产品生产制造、产品包装、产品运输和销售、消费者使用,最终作为废弃物处理和处置,这一整个过程就是产品的生命周期。生命周期评价(LCA)是一种国际公认的标准化方法,可以用于表征目标产品对环境的影响,适用于微观系统,主要用于量化某一产品在生命周期内所造成CO₂的排放总量^[13-15]。LCA法计算过程详细、准确,需要精准数据支撑,LCA技术框架主要包括目标和范围的确定、清单分析、影响评价、结果解释4个方面^[16-17]。

产品全生命周期的核算边界如图1所示,其中“摇篮到坟墓”,是指原材料开采-产品加工制造-产品使用-产品报废处理的全生命周期阶段;“摇篮到

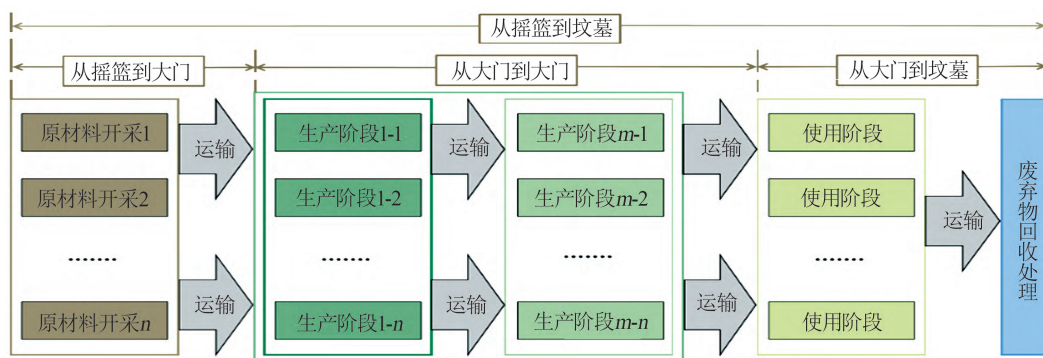


图1 产品LCA研究系统边界

Fig.1 LCA research system boundary of product

表2为黄磷企业尾气数据统计表,假设黄磷尾气处理过程尾气中CO全部燃烧,通过计算可得到黄磷生产过程及尾气处理造成的CO₂排放量。磷渣经过水淬、粒化、脱水后加工成超微粉,表3为企业超微粉加工厂吨黄磷磷渣加工成超微粉的能源消耗统计表,通过计算得到磷渣处理造成的CO₂排放量。整理得到该黄磷企业单位产品生产原材料、能源消耗及CO₂排放清单,详见表4。

表2 企业黄磷实际尾气数据表(年平均值)
Table 2 Enterprise yellow phosphorus actual tail gas data Table(annual average)

黄磷尾气总量/Nm ³	w(CO)/%	w(CO ₂)/%
2 900	85	3.9

表3 企业内超微粉加工厂吨黄磷磷渣处理能耗统计表(平均值)
Table 3 Statistical table of energy consumption of tons of yellow phosphorus slag in ultrafine powder processing plants(average value)

磷渣处理量/t	电力消耗/(kW·h)	热力消耗/GJ
9	364.5	3.93

表4 典型黄磷生产企业单位产品原材料、能源消耗及CO₂排放清单
Table 4 Inventory of raw materials,energy consumption and CO₂ emissions per unit product of typical yellow phosphorus production enterprises

生产单位黄磷的消耗量							
原材料消耗量/t			能源消耗		CO ₂ 排放量/kg		
磷矿石 [w(P ₂ O ₅)≈ 25.45%]	焦炭	硅石	电力消 量/(kW·h)	热力消 耗/GJ	生产 过程	尾气 处理	磷渣 处理
9.29	1.84	1.95	13 051.27	2.24	216.47	7 591.57	617.80

注:磷矿石、焦炭、硅石的运输距离分别为11、13、44 km。

2.2.2 背景数据

碳排放因子表示消耗单位质量或者单位体积的能源、材料所产生的碳排放量,具体排放源碳排放因子及数据来源详见表5。

表5 黄磷生产过程涉及的碳排放因子及其来源
Table 5 Carbon emission factors involved in yellow phosphorus production and their sources

物料名称	碳排放因子	数据来源
磷矿石	0.013 34 kg/kg	CLCD中国生命周期基础数据库
焦炭	0.133 65 kg/kg	CLCD中国生命周期基础数据库
硅石	0.039 30 kg/kg	CLCD中国生命周期基础数据库
运输	0.177 20 kg/(t·km)	ECLC3.0&Encoinvent
电力(南方区域)	0.508 85 kg/(kW·h)	省级温室气体清单编制指南
热力	0.110 00 kg/MJ	CLCD中国生命周期基础数据库

3 碳足迹核算结果与分析

对功能单位黄磷产品进行生命周期内碳足迹的核算,结果如表6和图4所示。此外,还就黄磷生产过程碳足迹贡献比例进行了梳理、计算,结果如图5所示。

表6 案例企业黄磷产品生命周期内碳足迹核算结果
Table 6 Accounting results of carbon footprint of yellow phosphorus products in life cycle of case enterprise

项目	CO ₂ 的排放量/kg	项目	CO ₂ 的排放量/kg
磷矿石	1.293×10 ²	热力	2.464×10 ²
焦炭	2.459×10 ²	过程排放	2.165×10 ²
硅石	76.64	尾气处理	7.592×10 ³
运输	37.55	磷渣处理	6.178×10 ²
电力	6.642×10 ³	总计	1.580×10 ⁴

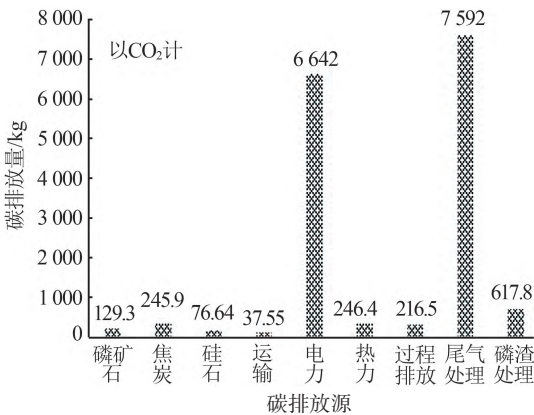


图4 企业黄磷生产过程碳排放量
Fig.4 Carbon emission in yellow phosphorus production process of enterprises

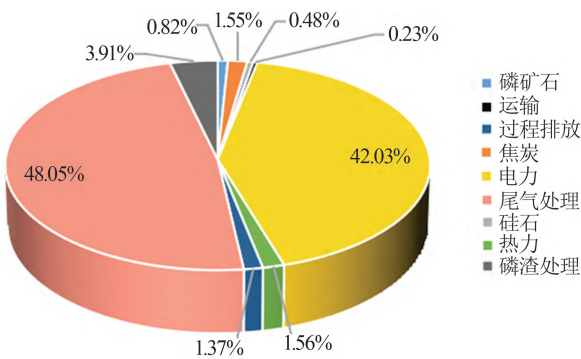


图5 黄磷系统边界内各环节碳足迹占比
Fig.5 Carbon footprint ratio of each link within the boundary of yellow phosphorus system

经计算,1t黄磷生产过程的碳足迹为1.580×10⁴ kg(以CO₂质量计,下同)。其中,尾气处理过程的碳排放量最高,占全过程的48.05%。除去尾气处理造成的碳排放以外,电力、热力等能源碳排放量占比较大,特别是电力消耗的碳排放量,为6 642 kg,贡献了黄磷生产阶段碳足迹的42.03%;原材料磷矿石、焦炭、硅石的生产碳排放量分别为129.3、245.9、

76.64 kg, 占比分别为 0.82%、1.55%、0.48%; 黄磷生产过程由于化学反应造成的过程排放碳排放量为 216.5 kg, 占比为 1.37%; 磷渣处理造成的碳排放量为 617.8 kg, 占比为 3.91%; 原材料运输造成的碳排放量占比最小(37.55 kg)仅为 0.23%。

研究发现, 黄磷生产过程中焦炭作还原剂产生 CO 气体, 因此由化学反应造成的直接碳排放量较少; 碳排放主要是来自于电力、热力等能源消耗造成的间接碳排放, 电力的消耗对生产工艺碳足迹影响最为明显, 是降低黄磷产品碳足迹的最重要环节; 黄磷尾气处理造成的碳排放量占比最大, 但是该企业黄磷尾气用于燃烧发电, 可以达到减少企业碳排放总量的目的。

4 黄磷生产节能降碳措施

产品的碳足迹可以为帮助减少温室气体排放提供理论基础, 有助于确定产品在其生命周期内的减排方向^[22]。结合黄磷生命周期内碳排放量的特点, 对黄磷节能降碳提出以下措施。

4.1 加强工艺控制, 降低单位电耗

加强工艺过程的管理, 工艺数据不同会造成不同的磷炉工况, 并且工艺指标失控会加大能源消耗。因此, 良好的工艺控制可以达到降低单位能耗的目的, 进而降低黄磷产品的碳排放量。

黄磷生产除去主化学反应外还存在次级反应和副反应, 次级反应和副反应的发生并不恒定, 生产每吨黄磷因副反应的发生而增加的电耗在 881~2 729 kW·h, 副反应消耗热量占总能耗的 7.73%^[24-25]。电力和热力的消耗都会增加黄磷生产过程的碳足迹, 因此控制制磷电炉的工艺条件、配料比以达到降低副反应发生的目的, 对降低黄磷单位电耗和碳排放至关重要。

加强原材料的制备、筛分, 可以降低电耗从而减少碳排放^[26]。焦炭在磷炉内一方面做还原剂, 一方面起到导电作用, 选用固定碳含量高、焦丁粒径合适的焦炭, 可以提高制磷电炉的生产状况, 从而降低焦炭消耗量及电炉耗电量, 用于电热法制磷的焦炭质量要求为 $w(\text{固定碳}) > 70\%$ 、 $w(\text{挥发分})$ 为 0.5%~2%、 $w(\text{灰分}) < 15\%$ 、粒度为 3~16 mm^[27-28]。控制磷矿石品位, 磷矿带入电炉的 Fe_2O_3 总量随着磷矿品位的降低而增加, Fe_2O_3 含量增加则电耗增加^[2]。 CO_2 一般以碳酸盐的形式存在于磷矿中, 磷酸盐分解成 CO_2 消耗煤炭, 且 CO_2 还消耗磷元素, 降低黄磷产率,

增加电耗^[29]。为减少生产过程能耗损失, 提升入炉原料品位、降低耗电量, 入炉原料品位每增加 1 个百分点, 可降低电耗 300~350 kW·h, 故选择合适的磷矿为 $w(\text{P}_2\text{O}_5) > 25\%$ 、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) < 2.5\%$ 、 $w(\text{CO}_2) < 2.5\%$ ^[25]。

4.2 利用绿色电力, 降低碳排放

黄磷生产工艺过程中, 电力消耗产生的碳排放量占比最大, 减少电力消耗是黄磷节能降碳的重要措施。在电力企业传统发展模式下, 燃烧化石能源发电造成的高耗能高污染问题较为突出。随着清洁能源的开发与利用, 依靠不同能源进行发电的电力行业逐渐发展起来, 截止 2021 年底, 南方区域风电、光伏装机容量达到 5 580 万 kW, 占总装机容量的 14.1%^[30]。每产生 1 MW·h 的电量, 火力发电的碳排放量为 1.024 6 t(以 CO_2 质量计, 下同)、风电的碳排放量为 0.011 2 t、太阳能发电的碳排放量为 0.072 0 t, 风电、太阳能发电的碳排放量均远小于火力发电, 因此若利用风电、太阳能发电等绿色电力造成的碳排放量可大幅降低, 达到减少黄磷碳足迹的目的^[23]。

4.3 合理利用磷矿资源地理位置优越

中小型制磷电炉分布在全国各省, 但磷矿产地主要集中在云贵川鄂, 黄磷生产中磷矿消耗大, 将西南区域的磷矿运往华东、华北等地区距离远, 运输则会造成大量能源消耗, 西南地区的黄磷企业靠近磷矿产地, 可以减少运输能源消耗, 进而降低碳排放^[29]。案例中黄磷生命周期内运输所占的碳足迹比例最小, 就是得益于企业地理位置优势, 紧靠贵州省黔南州某磷矿区, 降低了原材料运输产生的碳排放。

4.4 黄磷尾气综合利用

生产 1 t 黄磷产生 2 700~3 000 Nm^3 尾气, 尾气中 CO 质量分数为 85%~95%, 热值约为 10 000 kJ/ Nm^3 , 直接排放会造成环境污染及资源浪费, 尾气综合利用可以将尾气中的废能转化为电力, 有效降低能量损失, 进而降低 CO_2 排放量^[31]。磷炉尾气可用于原料烘干、烧锅炉、尾气发电及生产化工产品等, 实现黄磷尾气综合利用, 进而达到节能降碳的目的^[32]。该企业利用黄磷尾气专用锅炉发电工程建成投产后, 经过 3 a 多的运行, 基本达到设计要求。经除尘脱硫后的黄磷尾气送至尾气燃烧器, 产生的高温烟气再通过换热器产生过热蒸汽用于发电, 生产 1 t 黄磷产生的尾气可发电 1 869.06 kW·h, 折合标准煤为 229.71 kg。

5 结论

本研究以贵州省某代表性黄磷生产企业的黄磷生产过程为研究对象,结合企业的实际生产情况,根据黄磷企业典型生产工艺,建立了黄磷企业数据采集清单,核算出1 t黄磷生产过程中碳足迹为 1.580×10^4 kg(以CO₂质量计,下同)。其中尾气处理过程的碳足迹为 7.592×10^3 kg,占比为48.05%;电力、热力等能源消耗碳足迹为 6.888×10^3 kg,占比为43.59%;磷渣处理造成的碳足迹占比为3.91%;原材料焦炭、磷矿石、硅石的生产碳足迹占比分别为1.55%、0.82%、0.48%;黄磷生产过程由于化学反应造成的过程排放碳足迹为216.5 kg,占比为1.37%;原材料运输造成的碳足迹占比仅为0.23%。该研究对黄磷行业及磷化工产业有序推进“双碳”战略具有重要的研究意义和价值。基于黄磷产品碳足迹特点及计算实例分析,可以通过合理利用磷矿资源地理位置优势、加强工艺控制、黄磷尾气综合利用等措施进行碳减排,减少黄磷产品生产过程的碳足迹。

参考文献:

- [1] 王莹,熊先孝,东野脉兴,等.中国磷矿资源预测模型及找矿远景分析[J].中国地质,2022,49(2):435-454.
WANG Ying, XIONG Xianxiao, DONGYE Maixing, et al. Prediction model and exploration prospect analysis of phosphate mineral resources in China[J]. Geology in China, 2022, 49(2): 435-454.
- [2] 国家发展改革委,工业和信息化部,生态环境部,等.高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)[R/OL]. (2022-02-15) [2023-04-17]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/ghnhynjdgzsj/zcwj/202202/t20220217_1315689_ext.html.
- [3] 孙铭蔚,狄飞,李晶莹,等.面向产品制造过程的碳效率评价方法研究[J].机电产品开发与创新,2022,35(3):84-87.
SUN Mingwei, DI Fei, LI Jingying, et al. Research on carbon efficiency evaluation method for product manufacturing process[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2022, 35(3): 84-87.
- [4] 李洪丞,曹华军,刘兰微,等.碳达峰碳中和背景下低碳制造研究现状与技术路径研究[J/OL].机械工程学报,2023:1-16. [2023-02-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20230223.0907.044.html>.
LI Hongcheng, CAO Huajun, LIU Lanwei, et al. Research status and technology path of low-carbon manufacturing under the background of emission peak and carbon neutrality[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 2023: 1-16. [2023-02-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20230223.0907.044.html>.
- [5] 董书恒,逯承鹏,唐呈瑞,等.基于生命周期的原镁生产过程碳足迹分析[J].辽宁大学学报(自然科学版),2020,47(1):34-41.
DONG Shuheng, LU Chengpeng, TANG Chengrui, et al. The carbon footprint in the production process of raw magnesium in China[J]. Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition), 2020, 47(1): 34-41.
- [6] WANG Qiang, GE Shuting. Carbon footprint and water footprint in China: Similarities and differences[J]. Science of the Total Environment, 2020, 739: 140070.
- [7] WIEDMANN T, MINX J C. A definition of carbon footprint[J]. Journal of the Royal Society of Medicine, 2009, 92(4): 193-195.
- [8] 王俊博,李鑫,田继军,等.煤炭开发利用产业碳足迹计算方法及减排措施综述[J/OL].煤炭学报,2022:1-13. [2022-05-17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20220516.1853.002.html>.
WANG Junbo, LI Xin, TIAN Jijun, et al. Summary of carbon footprint calculation methods and emission reduction measures for coal exploitation and utilization industry[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2022: 1-13. [2022-05-17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20220516.1853.002.html>.
- [9] WANG Haiying, WANG Yue, MI Hong, et al. Analysis of carbon emission energy inventory from refrigerant production and recycling carbon compensation[J]. Applied Sciences, 2021, 12(1). Doi: 10.3390/app12010001.
- [10] CHEN Wei, ZHANG Qian, WANG Chengxin, et al. Environmental sustainability challenges of China's steel production: Impact-oriented water, carbon and fossil energy footprints assessment[J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108660.
- [11] 孙群,张为民.基于碳足迹的生产过程分级递阶控制技术研究[J].中国机械工程,2011,22(9):1035-1038,1111.
SUN Qun, ZHANG Weimin. Carbon footprint based multilevel hierarchical production process control[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(9): 1035-1038, 1111.
- [12] 陈广卫,张志智.对二甲苯产品的碳足迹与减排措施[J].化工环保,2021,41(6):774-778.
CHEN Guangwei, ZHANG Zhizhi. Carbon footprint and emission reduction measures of *p*-xylene products[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2021, 41(6): 774-778.
- [13] 张旭辉,郭欢欢,马宏伟,等.基于生命周期的采煤机绿色评价方法研究及应用[J].煤炭科学技术,2021,49(6):205-212.
ZHANG Xuhui, GUO Huanhuan, MA Hongwei, et al. Research and application of green evaluation method for shearer based on life cycle[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 205-212.
- [14] ZHOU Xinying, ZHAI Yijie, REN Ke, et al. Life cycle assessment of polycarbonate production: Proposed optimization toward sustainability[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 189: 106765.
- [15] 来鑫,陈权威,顾黄辉,等.面向“双碳”战略目标的锂离子电池生命周期评价:框架、方法与进展[J].机械工程学报,2022,58(22):3-18.
LAI Xin, CHEN Quanwei, GU Huanghui, et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for carbon-peaking and carbon-neu-

- trality: Framework, methods, and progress [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 3-18.
- [16] ZHAO Yingxin, YANG Zhifan, NIU Jiaojiao, et al. Systematical analysis of sludge treatment and disposal technologies for carbon footprint reduction [J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 128: 224-249.
- [17] 谢明辉, 满贺诚, 段华波, 等. 生命周期影响评价方法及本地化研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(6): 2148-2156.
- XIE Minghui, MAN Hecheng, DUAN Huabo, et al. Research progress on the life cycle impact assessment methods and their localization in China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6): 2148-2156.
- [18] 姜兴宇, 刘傲, 杨国哲, 等. 激光增材制造过程低碳建模与工艺参数优化 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(5): 223-238.
- JIANG Xingyu, LIU Ao, YANG Guozhe, et al. Low-carbon modeling and process parameter optimization in laser additive manufacturing process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(5): 223-238.
- [19] 王辛龙, 许德华, 钟艳君, 等. 中国磷化工行业 60 年发展历程及未来发展趋势 [J]. 无机盐工业, 2020, 52(10): 9-17.
- WANG Xinlong, XU Dehua, ZHONG Yanjun, et al. Future trend and development course of phosphorus chemical industry for sixty years in China [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52(10): 9-17.
- [20] 孟昊, 陆思伟. 电炉法生产黄磷安全风险分析与防范 [J]. 无机盐工业, 2014, 46(6): 56-58.
- MENG Hao, LU Siwei. Safety risks analysis and precautions for yellow phosphorus production with electric furnace process [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2014, 46(6): 56-58.
- [21] GUI Fangzhi, REN Shedong, ZHAO Yanwei, et al. Activity-based allocation and optimization for carbon footprint and cost in product lifecycle [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236: 117627.
- [22] 英国标准协会. PAS 2050: 2008 商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范 [S]. 2008.
- [23] 马越峰, 张铭, 李建忠. 烧结钕铁硼磁性材料碳足迹核算分析 [J]. 稀土, 2021, 42(1): 72-80.
- MA Yuefeng, ZHANG Ming, LI Jianzhong. Assessment of the carbon footprint of sintered PrNdFeB magnetic material based on life cycle assessment [J]. Chinese Rare Earths, 2021, 42(1): 72-80.
- [24] 孙志立. 黄磷生产的节能途径与措施 [J]. 化肥工业, 2015, 42(5): 10-12, 83.
- SUN Zhili. Ways and measures of energy saving in yellow phosphorus production [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2015, 42(5): 10-12, 83.
- [25] 顾志勤. 黄磷生产中的能耗和节能措施综述 (I) [J]. 硫磷设计与粉体工程, 2006(1): 20-27.
- GU Zhiqin. Overview of energy consumption and energy-saving measures in yellow phosphorus production (I) [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2006(1): 20-27.
- [26] 李枫. 黄磷生产的节能途径与措施 [J]. 云南化工, 2018, 45(3): 187-188.
- LI Feng. Energy-saving ways and measures of yellow phosphorus production [J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, 45(3): 187-188.
- [27] 孙志立. 制磷电炉内电流、热量分布对制磷电炉运行的影响分析 [J]. 磷肥与复肥, 2009, 24(5): 50-54.
- SUN Zhili. Study on the distributions of electric current and heat in phosphorus furnace and its effect on the operation of the furnace [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2009, 24(5): 50-54.
- [28] 孙志立. 黄磷生产炭质还原剂的选用 [J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(9): 69-75.
- SUN Zhili. On selection of carbonaceous reductant in yellow phosphorus production [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2013, 35(9): 69-75.
- [29] 陈善继. 磷矿组分对黄磷产品电炉能耗的影响 [J]. 硫磷设计与粉体工程, 2002(2): 13-17.
- CHEN Shanji. The influence of the composition of the phosphate rock on the energy consumption of the electric furnace for phosphorus production [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2002(2): 13-17.
- [30] 梁志飞, 贾旭东. 绿电交易关键问题及政策建议 [J]. 中国电力企业管理, 2022(10): 26-29.
- LIANG Zhifei, JIA Xudong. Key problems and policy suggestions of green electricity trading [J]. China Power Enterprise Management, 2022(10): 26-29.
- [31] 牟晨璐, 丁涛, 周郑洋, 等. 面向碳中和的工业尾气电厂技术综述及其典型案例经济性分析 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 74-84.
- MU Chenlu, DING Tao, ZHOU Zhengyang, et al. Technology review on industrial off-gas power plants for carbon neutral and economic analysis of typical cases [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 74-84.
- [32] 彭元洪, 万源, 刘新坤, 等. 黄磷尾气蒸汽锅炉新技术 [J]. 无机盐工业, 2010, 42(8): 39-40.
- PENG Yuanhong, WAN Yuan, LIU Xinkun, et al. New steam boiler technology for utilization of yellow phosphorus tail gas [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2010, 42(8): 39-40.