

孙艳丽,邹桢,曾庆东,等.基于 LCA 法评价铁尾矿资源化利用对环境的影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(3):301-307.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.2023.03.006

SUN Yanli,ZOU Zhen,ZENG Qingdong,et al.Environmental impact of iron tailings resource utilization based on LCA method[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2023,42(3):301-307.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.2023.03.006

基于 LCA 法评价铁尾矿资源化利用对环境的影响

孙艳丽, 邹 桢, 曾庆东, 和 秀, 刘雪媛

(沈阳建筑大学 管理学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 为研究铁尾矿资源化利用所带来的环境影响,运用生命周期评价(LCA)法,基于终点损害模型对 3 种不同的铁尾矿资源化方案所产生的环境影响进行评价。对 9 种环境影响类型进行了评价,对气候变化、初级能源消耗、水资源消耗 3 种环境影响类型进行了灵敏度分析。研究结果表明:与传统方案相比,3 种铁尾矿资源化利用方案均能降低对环境的影响程度。其中,方案 1 对气候变化影响最大的是 CO₂ 的排放,方案 2 对初级能源消耗影响最大的是电力消耗,方案 3 对水资源消耗影响最大的为去离子水消耗。评估 3 种铁尾矿资源化利用的环境影响,为铁尾矿的高附加值利用提供理论依据。

关键词: 铁尾矿; 终点损害模型; 生命周期评价; 环境影响类型; 灵敏度分析

中图分类号: X 754

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2023)03-0301-07

Environmental impact of iron tailings resource utilization based on LCA method

SUN Yanli, ZOU Zhen, ZENG Qingdong, HE Xiu, LIU Xueyuan

(School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to study the environmental impact of iron tailings resource utilization, the method of life cycle assessment (LCA) was used to evaluate the environmental impact of three different iron tailings utilization scheme based on the terminal damage model. Nine environmental impact types were evaluated, and sensitivity analysis was carried out on three environmental impact types: climate change, primary energy consumption and water consumption. The results show that compared to traditional solutions, three kinds of iron tailings resource utilization scheme can reduce the degree of impact on the environment. Among them, the plan 1 to the climate change is most affected by CO₂ emissions, plan 2 is the greatest influence on the primary energy consumption electricity consumption, and plan 3 is the biggest influence on water consumption deionized water consumption. The environmental impact of the three kinds of iron tailings resource utilization was assessed to provide a theoretical basis for the high value-added utilization of iron tailings.

Key words: iron tailings; end point damage model; life cycle assessment; environmental impact category; sensitivity analysis

0 引言

随着国内矿产行业持续发展,铁矿山被大规模

开采,铁尾矿作为铁矿山排放的主要副产物之一^[1],大量堆存,未得到充分的利用^[2]。铁尾矿的大量积存不但占用了土地资源,而且还会产生潜在的隐患^[3-4]

收稿日期: 2022-04-16

基金项目: 辽宁省科技厅公益基金项目(2020JH4/10100048); 辽宁省社科规划基金项目(L18BJY030)

作者简介: 孙艳丽(1971-),女,辽宁本溪人,硕士,教授,主要从事固体废弃物有机生化处理方面的研究。

和环境污染问题^[5-6]。

近年来,许多学者针对铁尾矿资源化利用进行了研究。顾晓薇等^[7]、路畅等^[8]提出利用铁尾矿制备建筑材料、陶瓷装饰材料、复合保温材料等,初步实现铁尾矿的二次利用。董越等^[9]利用铁尾矿多孔隙的特性,基于 MATLAB 平台,对试样截面进行图像处理,制备出符合国家标准规定的 A3.5、B06 级加气混凝土。陈永亮等^[10]以铁尾矿、稻壳、膨润土为原料,长石为助熔剂,利用正交试验和单因素试验,烧结制备轻质保温墙体材料。刘俊杰等^[11]以铁尾矿为原料,掺入标准砂、熟石灰和水泥等制备轻质免烧砖,满足《烧结普通砖》(GB/T 5101—2017)中 MU10 的强度等级要求。

现有研究主要关注铁尾矿资源化的可行性,研究铁尾矿资源化利用后的使用性能参数,对铁尾矿资源化利用过程中所产生的环境影响的研究较少。因此本文在林锦等^[12]、张芸等^[13]提出的固体废弃物资源化利用的生命周期评价的基础上,详尽地了解铁尾矿资源化过程对环境的影响,运用生命周期评价法,选取 3 种不同的铁尾矿资源化处理方案,分别构建 LCA 模型,评估不同资源化利用方案的环境影响类型,对比铁尾矿资源化利用过程中所产生的环境影响差异,为铁尾矿固废资源化利用提供理论依据。

1 LCA 方法介绍

1.1 目标和范围定义

以铁尾矿作为研究对象,基于终点损害模型对 3 种资源化方案的环境影响进行分析。方案 1:利用铁尾矿粉替代 17% (质量分数) 的含铁物料制备普通硅酸盐水泥熟料^[14];方案 2:利用铁尾矿砂替代 40% (质量分数) 的河砂制备新型超高性能混凝土 (UHPC)^[15];方案 3:利用铁尾矿替代黏土制备新型烧结砖^[16]。

研究范围:铁尾矿在资源化利用过程中代替或消耗的部分燃料、原材料的开采、运输、能源消耗等。取 1 t 铁尾矿为一个功能单位,其余数据以该单位为准进行换算。铁尾矿资源化利用的系统边界如下。方案 1 以石灰石、钢渣、铁尾矿原材料为起点,将配方生料搅拌混匀,经过加水搅拌、圆盘造粒形

成 3~5 mm 球粒,烘箱 110 ℃干燥 2 h,再经石灰石预分解 (高温炉炉温 950 ℃煅烧 30 min)、高温炉升温至 1 400 ℃、煅烧 25 min、急冷至室温、粉磨封装等过程,以铁尾矿水泥熟料产品为终点。方案 2 以铁尾矿砂、粉煤灰、硅灰、水泥、河砂原材料制备水泥生料为起点,将均化后的水泥生料置于搅拌锅中低速搅拌 30 s 后,加铁尾矿砂和河砂,高速搅拌 60 s,振捣 60 s;装入尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的三联式钢模中,浇筑后的试件在温度 (20±2) ℃,相对湿度不小于 95% 的标准条件下养护 1 d 后脱模,而后再在水中养护至 28 d,以铁尾矿 UHPC 产品为终点。方案 3 以铁尾矿、粉煤灰和废玻璃原材料为起点,将生料按比例混合加入去离子水,使坯料含水率为 10%;坯料成型,成型压力为 15 MPa;将砖坯置于 105 ℃烘箱中干燥 24 h,将烘干后的砖坯转置马弗炉中,设定升温速度为 5 ℃/min,升温到 1 200 ℃后保温 2 h;以铁尾矿烧结砖产品为终点。只考虑 3 种资源化利用过程中铁尾矿及其替换原料的厂内货车运输过程的环境影响,不考虑资源化利用后产品的运输、存储、使用、废弃等过程的环境影响。

1.2 清单分析

生命周期清单由资源输入、能源输入和污染物排放 3 个部分构成,清单中使用的数据^[17]主要来源于熟料水泥生产相关文献、中国生命周期基础数据库 (CLCD)、欧盟 ELCD 数据库和瑞士的 Ecoinvent 数据库,部分数据借鉴文献^[18]和文献^[19]的评估和计算。原材料数据取舍原则采用 ISO140 系列国际标准中的 cut-off 原则,即以生产过程中各项原材料投入量与产品质量的比为数据取舍依据。铁尾矿属于低价值废料,可忽略其上游生产数据,不在清单中列出。对 3 种铁尾矿资源化过程的消耗和排放情况进行统计,记录 3 种处理方案过程输入、输出情况,结果见表 1。

运输中铁尾矿和其替换原料 (钢渣、粉煤灰、硅灰、废玻璃等) 由柴油货车运输,铁尾矿的运输区间为本溪市歪头山到沈阳市皇姑区。铁粉、砂、黏土运输信息不可得,为了保证运输过程对环境的影响数据具有对比性,设三者的运输数据保持一致。而粉煤灰、石灰石、废玻璃等原料的运输由场

外承担，不在系统范围内。3 种处理方案生产过程运输信息见表 2，运输数据上游数据来源于 CLCD 数据库。

表 1 3 种方案的生命周期清单

Tab.1 life cycle checklist for 3 scenarios

项目	清单名称	数值
方案 1 处理过程输入	柴油货车（8 t）运输/(kg·km)	3.00×10 ¹
	石灰石质量/kg	1.16×10 ³
	钢渣质量/kg	2.16×10 ²
	铁尾矿质量/kg	2.82×10 ²
	自来水质量/t	3.00×10 ⁻¹
	电力消耗/(kW·h)	2.90×10 ¹
方案 1 避免过程输入	柴油货车（8 t）运输/(kg·km)	1.80×10 ¹
	铁粉质量/kg	2.90×10 ¹
	电力消耗/(kW·h)	5.24×10 ⁰
	石灰石质量/kg	1.09×10 ¹
	废气体积（排放到大气）/m ³	7.98×10 ¹
	总颗粒物质量（排放到大气）/kg	8.30×10 ⁻²
方案 1 避免过程输出	二氧化碳质量（排放到大气）/kg	2.39×10 ¹
	氮氧化物质量（排放到大气）/kg	2.70×10 ⁻²
	二氧化硫质量（排放到大气）/kg	3.60×10 ⁻²
	柴油货车（8 t）运输/(kg·km)	3.00×10 ¹
	电力消耗/(kW·h)	4.25×10 ¹
	水泥质量/kg	1.80×10 ³
方案 2 处理过程输入	粉煤灰质量/kg	4.10×10 ²
	硅灰质量/kg	3.60×10 ²
	铁尾矿砂质量/kg	1.00×10 ³
	砂质量/kg	1.49×10 ³
	自来水质量/kg	4.75×10 ²
	减水剂质量/kg	8.50×10 ¹
方案 2 避免过程输入	柴油货车（8 t）运输/(kg·km)	1.80×10 ¹
	砂质量/kg	1.00×10 ³
	废气体积（排放到大气）/m ³	3.70×10 ²
	总颗粒物质量（排放到大气）/g	2.15×10 ¹
	废气体积（排放到大气）/m ³	2.85×10 ²
	总颗粒物质量（排放到大气）/g	1.20×10 ¹
方案 3 处理过程输入	柴油货车（8 t）运输/(kg·km)	3.00×10 ¹
	电力消耗/(kW·h)	2.35×10 ¹
	铁尾矿质量/kg	1.00×10 ³
	废玻璃质量/kg	3.34×10 ²
	粉煤灰质量/kg	3.34×10 ²
	煤粉质量/kg	1.80×10 ³
方案 3 避免过程输出	去离子水质量/kg	1.67×10 ²

续表 1

项目	清单名称	数值
方案 3 避免过程输入	柴油货车（8 t）运输/(kg·km)	1.80×10 ¹
	黏土质量/kg	1.00×10 ³
	自来水质量/kg	8.62×10 ¹
	电力消耗/(kW·h)	3.20×10 ⁰
方案 3 避免过程输出	煤粉质量/kg	2.60×10 ¹
	二氧化碳质量（排放到大气）/kg	2.17×10 ⁴
	一氧化碳质量（排放到大气）/kg	7.47×10 ⁻¹
	氮氧化物质量（排放到大气）kg	4.21×10 ⁻²

表 2 3 种资源化处理方案生产过程运输信息

Tab.2 3 kinds of resource processing scheme production process transportation information

物料名称	净质量/kg	运输起点	运输终点	运输距离/km	运输工具
铁尾矿	1 000	本溪歪头山	加工厂	30	柴油货车（8 t）运输
铁粉	290	原料库	熟料厂	18	柴油货车（8 t）运输
砂	998	砂石场	混凝土厂	18	柴油货车（8 t）运输
黏土	880	黏土市场	烧结砖厂	18	柴油货车（8 t）运输

2 评价与结果

2.1 环境影响的计算模型

生命周期评价方法主要分为中间影响类和终点影响类，目前国外应用较多的为中点法（CML）和终点法（ReCipe），而国内学者常用的生命周期评价方法主要是王洪涛^[20]提出的节能减排综合评价方法（ECER）和杨建新等^[21]提出的产品生命周期评价方法（LCLA-Y）。本文根据铁矿资源化利用环境影响特点，在李雪迎等^[22]提出的终点损害类别的生命周期评价模型的基础上，根据 3 种铁尾矿资源化方案生产过程的资源耗用和排放特点，确定了 9 种关系密切的环境影响类型：气候变化（GWP）、初级能源消耗（PED）、水资源消耗（WU）、酸化（AP）、非生物资源消耗潜值（ADP）、富营养化潜值（EP）、可吸入无机物（RI）、臭氧层消耗（ODP）、光化学臭氧合成（POFP），将终点损害类别的权重确定方法由专家打分法^[23]替换为由影响潜力系数和环境影响类型的人均基准值共同确定的方法，进一步提升终点损害模型权重的客观性。环境影响终点损害模型如下。

环境影响类别的人均基准值为

$$b_n = \sum_{i=1}^q \frac{a_{ni} \cdot p_{ni}}{r}, \tag{1}$$

式中： n 为各环境影响类型； a_{ni} 为环境影响类型 n 对应的能源（或污染物） i 在 2017 年的产量（或排放量）^[24]； p_{ni} 为环境影响类型 n 对应的能源（或污染物） i 的损害因子。损害因子选择根据第二次全国污染源普查中国家重点关注的污染物，选取与生产生活关联较大、环境影响较突出的其他污染物，参考 Eco-indicator 99^[25]、ReCipe 评价体系^[26]； r 为截至 2017 年末中国总人口数^[27]。

环境影响潜力系数为

$$d_n = (c_n \cdot a_{ni}) / \sum_{n=1}^9 \sum_{i=1}^q (c_n \cdot a_{ni}), \tag{2}$$

式中， c_n 为环境影响类型 n 对应的影响潜力，其取值参考既往的研究成果^[28-29]。

环境影响类型权重为

$$w_n = \sum b_n \cdot d_n, \tag{3}$$

式中， w_n 为环境影响类型 n 对应归一化权重，环境影响类型权重见表 3。

表 3 环境影响类型权重的计算
Tab.3 calculation of environmental impact type weights

环境影响类型	污染物	损害因子	人均基准值	影响潜力	归一化权重
GWP	CO ₂	9.28×10 ⁻⁷ DALY/kg	7.62×10 ⁻³ DALY	0.220	0.23
PED	原油	5.90 MJ/kg	2.02×10 ² MJ	1.429	0.25
	煤炭	0.25 MJ/kg		0.714	
WU	用水量	1.35×10 ⁻⁸ DALY/kg	5.87×10 ⁻⁶ DALY	0.310	0.13
AP	SO ₂	2.12×10 ⁻⁷ DALY/kg	5.77×10 ⁻⁶ DALY	1.000	0.05
ADP	锑	1.35×10 ⁻⁹ DALY/kg	2.41×10 ⁻⁵ DALY	0.120	0.08
EP	COD	1.70×10 ⁻⁸ DALY/kg	1.56×10 ⁻⁷ DALY	0.230	0.07
RI	PM _{2.5}	6.29×10 ⁻⁴ DALY/kg	1.08×10 ⁻² DALY	0.570	0.08
ODP	CFC-11	1.29×10 ⁻⁷ DALY/kg	1.32×10 ⁻⁵ DALY	0.030	0.03
POFP	VOC	3.74×10 ⁻⁸ DALY/kg	1.99×10 ⁻⁶ DALY	0.500	0.08

注：DALY(disability adjusted life years)为伤残调整寿命年。

环境影响类型潜值为

$$E_n = \sum_{n=1}^9 \sum_{i=1}^q \frac{a_{ni} \cdot q_{ni}}{b_n} \cdot w_n. \tag{4}$$

基于终点损害模型计算得出 3 种资源化利用方案的 LCA 结果，见表 4。对铁尾矿资源化利用的环境影响类型和主要环境影响类型的敏感度进行评价，得到各方案在 9 个环境影响类别产生的差异。正值代表环境影响；负值代表环境效益。资源化利用前后 LCA 的变化值见表 5。表 4、表 5 中影响类型指标单位“kg CO₂ eq”为用 CO₂ 当量来表示 GWP 的影响潜力。

由表 4 可以看出，方案 1 中 GWP、PED、WU 的 LCA 结果为正值，其余环境影响类型的 LCA 结果为负值。从表 5 可以看出，与资源化利用前相比，GWP 降低了 34 kg CO₂ eq，PED 降低了 450 MJ，WU 降低了 47 kg。主要原因是铁尾矿代替铁粉作为铁调节剂，其中的硅铝质成分有效降低熟料煅烧中碱性成分^[30]，降低了熟料的煅烧温度，间接减少煅烧过程中燃料的消耗以及 CO₂ 的排放。但在熟料煅烧过程中，仍需要消耗大量的煤粉、石灰石和电力等能源和物质，产生大量 CO₂，尽管方案 1 能减少部分 CO₂ 的排放，但仍有减排空间。

方案 2 中 GWP、PED、WU、AP 的 LCA 结果为正值，其余环境影响类型的 LCA 结果为负值。由表 5 可知，PED 下降明显，降低了 200 MJ，GWP 降低了 40 kg CO₂ eq，WU 增加了 90 kg。WU、AP 分别上升 6.3%和 4.1%，主要原因为铁尾矿代替河砂做细骨料时需水量较大，同时铁尾矿中 SO₄²⁻、CO₃²⁻与内部 Ca(OH)₂ 反应生成 CaSO₄ 和 CaCO₃ 等酸化产物^[31]，影响酸化（AP）值。由于在制备浆料时有水泥的参与，水泥的使用难免会造成环境影响，如果在制备浆料时能寻找到更加环保的材料来代替水泥，那么方案 2 对于环境的影响将会进一步降低。

方案 3 中 ADP 和 ODP 的 LCA 结果为负值，其余环境影响类型的 LCA 结果均为正值；对比资源化前 PED 降幅明显，降低了 460 MJ，GWP 降低了 6 000kg CO₂ eq，WU 降低了 1 800 kg，主要原因是铁尾矿代替黏土，两者矿物组成和化学成分相似，铁尾矿中钙、镁、钾氧化物可起到助熔作用^[32]；另一方面，铁尾矿颗粒细，比表面积大，在磨碎过程中降低了电力和燃料的耗用量。方案 3 在制备砖坯时，消耗大量水资源，砖坯在马弗炉中需要高温烘干，势必会大量消耗初级能源。因此，方案 3 中

改进烧结设备，提升能源利用效率，是实现减排的有效途径。

表 4 3 种铁尾矿资源化方案的 LCA 结果

Tab.4 LCA results of three iron tailings resource schemes

环境影响类型指标	影响类型指标单位	LCA 结果		
		方案 1	方案 2	方案 3
GWP	kg CO ₂ eq	0.91×10 ²	1.20×10 ³	6.59×10 ⁵
PED	MJ	4.25×10 ³	7.39×10 ³	7.67×10 ⁵
WU	kg	0.57×10 ³	1.48×10 ³	1.01×10 ⁸
AP	kg SO ₂ eq	-2.25×10 ⁻³	2.75×10 ⁰	9.61×10 ³
ADP	kg Sb eq	-4.05×10 ⁻⁶	-6.91×10 ⁻³	-4.38×10 ¹
EP	kg PO ₄ ³⁻ eq	-2.74×10 ⁻⁴	-3.52×10 ⁻¹	8.99×10 ²
RI	kg PM _{2.5} eq	-4.83×10 ⁻⁴	-8.95×10 ⁻¹	2.05×10 ³
ODP	kg CFC-11 eq	-6.38×10 ⁻¹⁰	-1.04×10 ⁻⁶	-3.74×10 ⁻²
POFP	kg NMVOC eq	-1.85×10 ⁻⁴	-2.33×10 ⁰	3.95×10 ³

表 5 3 种铁尾矿资源化利用前后 LCA 的变化

Tab.5 changes of LCA before and after resource utilization of three iron tailings

环境影响类型指标	影响类型指标单位	资源化利用前后变化值		
		方案 1	方案 2	方案 3
GWP	kg CO ₂ eq	-3.4×10 ¹	-4.0×10 ¹	-4.6×10 ²
PED	MJ	-4.5×10 ²	-2.0×10 ²	-6.0×10 ³
WU	kg	-4.7×10 ¹	9.0×10 ¹	-1.8×10 ³
AP	kg SO ₂ eq	-1.1×10 ⁻¹	8.0×10 ⁻²	-1.1×10 ⁻¹
ADP	kg Sb eq	-2.5×10 ⁻⁵	-1.0×10 ⁻⁵	-1.3×10 ⁻³
EP	kg PO ₄ ³⁻ eq	-9.0×10 ⁻²	-1.0×10 ⁻²	-1.4×10 ⁻¹
RI	kg PM _{2.5} eq	-3.2×10 ⁻²	-2.0×10 ⁻²	-2.8×10 ⁻²
ODP	kg CFC-11 eq	-1.3×10 ⁻¹⁰	-2.0×10 ⁻²	-7.5×10 ⁻³
POFP	kg NMVOC eq	-1.0×10 ⁻¹	-7.0×10 ⁻²	-2.0×10 ⁻⁴

2.2 灵敏度分析

根据上述分析，发现在 3 个方案中 GWP、PED、WU 都产生环境影响。因此，本研究主要对 GWP、PED、WU 的清单数据灵敏度进行分析，对比资源化前后这 3 种影响类型指标，计算出变化值。利用亿科环境（IKE）科技有限公司研发的在线 LCA 分析软件 eFootprint 计算出 GWP、PED、WU 的最高灵敏度，找出具体产生环境影响的过程和因素，以便提出改善方案。灵敏度分析结果见表 6。

由表 6 可见，方案 1 在熟料煅烧过程中对气候变化（GWP）影响最大的是 CO₂ 的排放，贡献率为 88.73%；方案 2 在生料均化过程中对初级能源消耗（PED）影响最大的是电力消耗，贡献率为 89.26%；

方案 3 在砖坯烧结过程中对水资源消耗（WU）影响最大的是去离子水消耗，贡献率为 90.48%。结合表 4 可知，在 3 种资源化方案中，对环境的影响类型为初级能源消耗（PED），其次为气候变化（GWP）、水资源消耗（WU）。因此，在后续的研究中应更多关注初级能源消耗（PED）、气候变化（GWP）以及水资源消耗（WU），降低对环境的影响。

表 6 环境影响类型清单数据灵敏度分析

Tab.6 environmental impact type inventory data sensitivity analysis

项目	环境影响类型	敏感因素	贡献率/%
方案 1	GWP	二氧化碳	88.73
	PED	煤粉	75.66
	WU	自来水	54.02
方案 2	GWP	水泥	50.57
	PED	电力	89.26
	WU	自来水	67.20
方案 3	GWP	废玻璃	42.61
	PED	煤粉	80.47
	WU	去离子水	90.48

3 结论

通过分析 3 种铁尾矿资源化利用的生命周期环境影响类型，得出如下结论。

（1）方案 1 利用铁尾矿制备水泥熟料过程中，对比 9 种环境影响类型指标，产生的环境影响大小顺序为 PED>WU>GWP，产生的环境效益大小顺序为 AP>RI>EP>POFP>ADP>ODP。熟料煅烧过程中煤粉、石灰石和电力的使用增加了初级能源的消耗量；熟料煅烧产生大量 CO₂，加剧温室效应。因此，需要考虑对熟料煅烧阶段的物质能源消耗过程进行优化，提高热能量利用效率来减少燃料使用量。

（2）方案 2 利用铁尾矿制备 UHPC 产生的环境影响大小顺序为 PED>WU>GWP>AP，产生的环境效益大小顺序为 POFP>RI>EP>ADP>ODP。浆料制备过程中的水泥使用、电力消耗间接增加了整个生产过程中初级能源和水资源消耗量。因此，可以考虑采用环境影响较小的环保物料代替水泥，减少水泥生产过程中物质能源消耗和污染排放。

（3）方案 3 利用铁尾矿制备烧结砖产生的环境影响的大小顺序为 WU>PED>GWP>AP>POFP>

RI>EP, 产生的环境效益的大小顺序为 ADP>ODP。制备砖坯过程直接增加水资源消耗量, 马弗炉烘干过程直接增加初级能源的消耗量; 砖坯生料中废玻璃、粉煤灰的使用间接增加水资源和初级能源的消耗量。因此, 可以考虑水资源的循环利用或者提高烧结设备对化石燃料燃烧的效率, 实现节能减排。

参考文献 (References):

- [1] WU R D, LIU J H. Experimental study on the concrete with compound admixture of iron tailings and slag powder under low cement clinker system[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(29): 1-7.
- [2] KINNUNEN P, ISMAILOV A, SOLISMAA S, et al. Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics – a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174(10): 634-649.
- [3] 刘文博, 姚彦彦, 王静峰, 等. 铁尾矿资源化综合利用现状[J]. *材料导报*, 2020, 34(S1): 268-270.
- LIU Wenbo, YAO Huayan, WANG Jingfeng, et al. Current situation of comprehensive utilization of iron tailings[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(S1): 268-270.
- [4] 舒敏, 刘昆, 李德军, 等. 铁尾矿资源化利用标准化现状及对策研究[J]. *中国标准化*, 2021(11): 154-158.
- SHU Min, LIU Kun, LI Dejun, et al. Study on standardization status and countermeasures of iron tailings resource utilization[J]. *China Standardization*, 2021(11): 154-158.
- [5] 胡敬平, 梁智霖, 侯慧杰, 等. 固废资源化中的风险识别与调控机理研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(4): 112-121.
- HU Jingping, LIANG Zhilin, HOU Huijie, et al. Study on risk identification and regulation mechanism in solid waste recycling[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2023, 51(4): 112-121.
- [6] SINGO N K, KRAMERS J D. Retreatability analysis of the Musina copper mine tailings in South Africa: an exploratory study[J]. *SN Applied Sciences*, 2020, 2(10): 1-12.
- [7] 顾晓薇, 艾莹莹, 赵昀奇, 等. 铁尾矿资源化利用现状[J/OL]. *中国有色金属学报*: 1-29(2022-01-13)[2022-04-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20220112.1844.002.html>.
- GU Xiaowei, AI Yingying, ZHAO Yunqi, et al. Status quo of resource utilization of iron ore tailings[J/OL]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*: 1-29(2022-01-13)[2022-04-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20220112.1844.002.html>.
- [8] 路畅, 陈洪运, 傅梁杰, 等. 铁尾矿制备新型建筑材料的国内外进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(5): 5011-5026.
- LU Chang, CHEN Hongyun, FU Liangjie, et al. Research progress on the preparation of new building materials using iron tailings[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(5): 5011-5026.
- [9] 董越, 杨志强, 高谦, 等. MATLAB 孔隙特征对铁尾矿加气混凝土性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(1): 42-48.
- DONG Yue, YANG Zhiqiang, GAO Qian, et al. Effect of MATLAB pore characteristics on performance of aerated concrete prepared with iron tailings[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(1): 42-48.
- [10] 陈永亮, 石磊, 杜金洋, 等. 铁尾矿轻质保温墙体材料的制备及性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(5): 721-729.
- CHEN Yongliang, SHI Lei, DU Jinyang, et al. Preparation and properties of the lightweight thermal insulation wall materials with iron tailings[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(5): 721-729.
- [11] 刘俊杰, 梁珏, 曾宇, 等. 利用铁尾矿制备免烧砖的研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(5): 136-141.
- LIU Junjie, LIANG Yu, ZENG Yu, et al. Preparation of baking-free bricks by iron tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(5): 136-141.
- [12] 林锦, 陈云嫩, 陆柳鲜, 等. 基于生命周期评价法的铜尾矿资源化利用的环境效益分析[J]. *有色金属科学与工程*, 2021, 12(3): 106-112, 121.
- LIN Jin, CHEN Yunnan, LU Liuxian, et al. Environmental benefit evaluation of copper tailings resource utilization based on LCA[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2021, 12(3): 106-112, 121.
- [13] 张芸, 秦承露, 侯昊晨, 等. 基于生命周期评价法的贝壳资源化利用环境效益分析——以大连市为例[J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(1): 124-128.
- ZHANG Yun, QIN Chenglu, HOU Haochen, et al. Environmental benefit evaluation of shell resource utilization based on LCA: a case study of Dalian[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(1): 124-128.
- [14] 徐庆荣. 利用铁尾矿烧制硅酸盐水泥熟料[J]. *现代矿业*, 2018, 34(5): 165-168.
- XU Qingrong. Calcining portland cement clinker with iron tailings[J]. *Modern Mining*, 2018, 34(5): 165-168.
- [15] 顾晓薇, 徐建宇, 贾泽藩, 等. 极细高硅型铁尾矿制备超高性能混凝土研究[J]. *金属矿山*, 2022(1): 71-75.
- GU Xiaowei, XU Jianyu, JIA Zefan, et al. The study on preparation of ultra-high performance concrete utilizing ultra-fine silicon iron tailings[J]. *Metal Mine*, 2022(1): 71-75.
- [16] 周伟伦, 廖正家, 陈涛, 等. 利用铁尾矿制备烧结砖的可行性及烧结固化机理[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(5): 1670-1678.
- ZHOU Weilun, LIAO Zhengjia, CHEN Tao, et al. Feasibility of using iron tailings to prepare sintering brick and sintering solidification mechanism[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(5): 1670-1678.
- [17] 季尚行, 刘伟, 周燕华. 江西玉山 2×2 500t/d 熟料水泥生产线设计概述

- [J].水泥,2005(1):20-22.
- JI Shangxing,LIU wei,ZHOU Yanhua.Design overview of 2×2 500t/d clinker cement production line in Yushan, Jiangxi[J].Cement,2005(1):20-22.
- [18] SUBRAMANIAN K,CHOPRA S S,CAKIN E, et al. Environmental life cycle assessment of textile bio-recycling-valorizing cotton-polyester textile waste to pet fiber and glucose syrup[J].Resources,Conservation and Recycling,2020,161:104989.
- [19] 刘夏璐,王洪涛,陈建,等.中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J].环境科学学报,2010,30(10):2136-2144.
- LIU Xialu,WANG Hongtao,CHEN Jian,et al.Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2010,30(10):2136-2144.
- [20] 王洪涛.通往节能减排目标的新途径——生命周期节能减排评价方法[J].高科技与产业化,2011(8):49-53.
- WANG Hongtao.A new approach to energy conservation and emission reduction targets:life cycle energy conservation and emission reduction Evaluation method[J].High-Technology & Commercialization,2011(8):49-53.
- [21] 杨建新,王如松,刘晶茹.中国产品生命周期影响评价方法研究[J].环境科学学报,2001,21(2):234-237.
- YANG Jianxin, WANG Rusong, LIU Jingru.Methodology of life cycle impact assessment for Chinese products[J].Acta Scientiae Circumstantiae, 2001,21(2):234-237.
- [22] 李雪迎,白璐,杨庆榜,等.我国终点型生命周期影响评价模型及基准值初步研究[J].环境科学研究,2021,34(11):2778-2786.
- LI Xueying,BAI Lu,YANG Qingbang,et al.Preliminary study on endpoint life cycle impact assessment model and normalisation value in China[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(11):2778-2786.
- [23] 孙雪辉,申人升,王超,等.生命周期评价中权重确定方法研究[J].科学技术创新,2021(33):194-196.
- SUN Xuehui,SHEN Rensheng,WANG Chao, et al. Research on weight determination method in life cycle assessment[J].Science and Technology Innovation,2021(33):194-196.
- [24] 生态环境部.中国环境统计年鉴 2018[M].北京:中国统计出版社,2018:26-33.
- [25] GOEDKOOP M,SPRIENSMA R.The eco-indicator 99:A damage oriented method for life cycle impact assessment[R].Amersfoort,The Netherlands:PRé Consultants b.v.,2001.
- [26] HUIJBREGTS M A J,STEINMANN Z J N,ELSHOUT P M F,et al.ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level[J].International Journal of Life Cycle Assessment,2016,22(2):138-147.
- [27] 国家统计局.中国统计年鉴 2018[M].北京:中国统计出版社,2018:37.
- [28] 宋晓勇,高文君,田航飞,等.不同粪污处理模式的潜在环境影响和经济效益评价[J].黑龙江畜牧兽医,2021,(24):8-14,19.
- SONG Xiaoyong,GAO Wenjun,TIAN Hangfei,et al.Environmental impact and economic benefit evaluation of different treatment modes of manure[J].Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2021,(24):8-14,19.
- [29] 籍春蕾.规模化养殖场两种粪便处理系统环境影响生命周期评价——以养牛场为例[D].南京:南京农业大学,2011:45-46.
- [30] 易龙生,吴倩,米宏成,等.利用铁尾矿制备发泡水泥[J].非金属矿, 2021,44(1):1-4.
- YI Longsheng,WU Qian,MI Hongcheng,et al.Preparation of foamed cement using iron tailings[J].Non-metallic Mines,2021,44(1):1-4.
- [31] 张信龙,顾晓薇,刘庆东,等.冻融-酸雨耦合作用对铁尾矿砂混凝土耐久性的影响[J].混凝土,2021,375(1):107-109,114.
- ZHANG Xinlong,GU Xiaowei,LIU Qingdong,et al.Coupling effect of freeze-thaw-acid rain on durability of iron tailings concrete[J].Concrete,2021,375(1):107-109,114.
- [32] 鹿晓斌.基于铁尾矿制备烧结泡沫材料的研究[D].大连:大连理工大学,2009:47-50.