

基于生命周期评价的钨尾矿再选回收钨精矿的环境影响分析

林 锦, 陈云嫩, 陆柳鲜, 刘 俊, 王俊峰, 邱廷省

(江西理工大学江西省矿冶环境污染控制重点实验室, 江西 赣州 341000)

摘要: 钨尾矿堆积不仅占用土地, 还对生态环境造成影响。钨尾矿再选回收钨精矿能减少钨尾矿堆存带来的环境污染, 其附加值较高。本文利用生命周期评价方法, 对比分析全浮选工艺及重选-浮选联合工艺, 定性定量地研究钨尾矿再选回收钨精矿的环境影响, 并通过 eFootprint 在线分析软件对两种工艺的生命周期评价进行建模。研究选取的功能单位是 1 kg 钨精矿, 系统边界包含再选回收钨精矿过程的主要工序。结果表明, 从环境影响评价指标来看, 评价对象对初级能源消耗 (PED)、水资源消耗 (WU) 和全球变暖潜值 (GWP) 的累计贡献值较大, 其中全浮选工艺的环境影响评价结果分别为 46.8 MJ、38.3 kg、2.9 kg, 重选-浮选联合工艺的环境影响评价结果分别为 41.9 MJ、46.0 kg、2.5 kg。与全浮选工艺相比, 重选-浮选联合工艺通过离心预富集, 使得浮选药剂用量减少、需要处理的浮选废水量减少, 再选回收钨精矿过程对环境的影响更小, 故应优先选用重选-浮选联合工艺, 切实保护环境。

关键词: 钨尾矿; 回收; 生命周期评价; 环境影响; eFootprint 在线分析软件

中图分类号: TF845 文献标识码: A 文章编号: 1008-9500(2022)12-0107-08

DOI:10.3969/j.issn.1008-9500.2022.12.031

Environmental Impact Analysis on Recovery of Tungsten Concentrate from Tungsten Tailings by Reconcentration Based on Life Cycle Assessment

LIN Jin, CHEN Yunnan, LU Liuxian, LIU Jun, WANG Junfeng, QIU Tingsheng

(Jiangxi Key Laboratory of Mining & Metallurgy Environmental Pollution Control, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The accumulation of tungsten tailings not only occupies land, but also affects the ecological environment. The recovery of tungsten concentrate from tungsten tailings by reconcentration can reduce the environmental pollution caused by tungsten tailings stockpiling, and its added value is high. In this paper, the life cycle assessment method is used to compare and analyze the full flotation process and the gravity concentration-flotation combined process, the environmental impact of tungsten tailings reconcentration to recover tungsten concentrate is qualitatively and quantitatively studied, and the life cycle assessment of the two processes is modelled through eFootprint online analysis software. The functional unit selected in the study is 1 kg tungsten concentrate, and the system boundary includes the main working procedures in the process of reconcentration and recovery of tungsten concentrate. The results show that from the perspective of environmental impact assessment indicators, the cumulative contribution value of the assessment object to the primary energy demand (PED), water use (WU) and global warming potential (GWP) is large, among them, the environmental impact assessment results

收稿日期: 2022-10-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC1903401)。

作者简介: 林锦 (1995—), 女, 福建宁德人, 硕士研究生。研究方向: 固体废物与资源化。

通信作者: 陈云嫩 (1970—), 女, 江西泰和人, 博士, 教授。研究方向: 废水处理及固体废物资源化利用。

of the full flotation process are 46.8 MJ, 38.3 kg and 2.9 kg respectively, and the environmental impact assessment results of the gravity concentration-flotation combined process are 41.9 MJ, 46.0 kg and 2.5 kg respectively. Compared with the full flotation process, the gravity concentration-flotation combined process reduces the amount of flotation reagents and the amount of flotation waste water to be treated by centrifugal preconcentration, and the process of recovering tungsten concentrate by reconcentration has less impact on the environment, therefore, the gravity concentration-flotation combined process should be preferred to effectively protect the environment.

Keywords: tungsten tailings; recovery; life cycle assessment; environmental impact; eFootprint online analysis software

钨尾矿的堆积造成大量有价金属与非金属资源流失, 而选矿、非金属材料技术的进步为钨尾矿资源化利用奠定坚实的技术基础^[1-3]。邓巧娟等^[4]采用浮选-磁选-浮选的工艺流程对钨尾矿进行综合回收, 得到回收率及品位较高的铜锌混合精矿和黑钨精矿。徐敬吟^[5]采用悬振锥面选矿机对低品位黑钨细泥尾矿进行回收, 经“一粗一精”选矿工艺流程, 获得回收率及品位较高的钨精矿, 减少了钨资源消耗, 增加了经济效益。钨尾矿再选回收钨精矿的附加值高, 但再选过程可能产生的环境污染不能忽略^[6-7]。只有全面了解钨尾矿再选回收钨精矿的资源消耗和环境影响, 才能取得最大的环境效益和经济效益。

生命周期评价(LCA)是一种对所评价产品产生的环境影响进行识别与量化的工具, 可以从再选回收钨的原料来源到生产产品的生命周期各个阶段进行有关环境负荷与影响的评价, 有针对性地进行技术改进, 实现再选回收过程的绿色化^[8-9]。本文基于生命周期评价, 分别衡量全浮选工艺和重选-浮选联合工艺再选回收钨精矿过程产生的环境负荷, 以优化再选回收钨精矿的技术方案, 降低再选回收钨精矿的环境影响。

1 生命周期评价流程及工具

借鉴国际标准化组织颁布的《环境管理 生命周期评价 原则与框架》(ISO 14040—2006), 将生命周期评价分为目标与范围确定、清单分析、影响评价和结果解释 4 部分, 具体流程如图 1 所示^[10-11]。

为了评价钨尾矿再选回收钨精矿的环境影响, 本研究采用 eFootprint 在线分析软件作为评价工具。它是成都亿科环境科技有限公司开发的在线数据填报与分析平台, 为钨尾矿再选回收钨精矿过程的清单建立提供了可靠的来源, 缩短了收集上游数据的时间^[12-14]。

2 目标与范围确定

本研究以再选回收 1 kg 钨精矿(含 WO_3 21% ± 2%) 为功能单位, 分别采用全浮选工艺、重选-浮选联合工艺再选回收钨精矿。其中, 全浮选工艺的研究范围包括浮选(脱硫浮选、钨浮选)和浓缩烘干 2 个单元, 重选-浮选联合工艺的研究范围包括离心重选、浮选(脱硫浮选、钨浮选)和浓缩烘干 3 个单元, 不包括钨精矿的售卖过程。根据研究目标进行范围界定, 两种再选回收钨精矿工艺的系统边界图如图 2 所示。

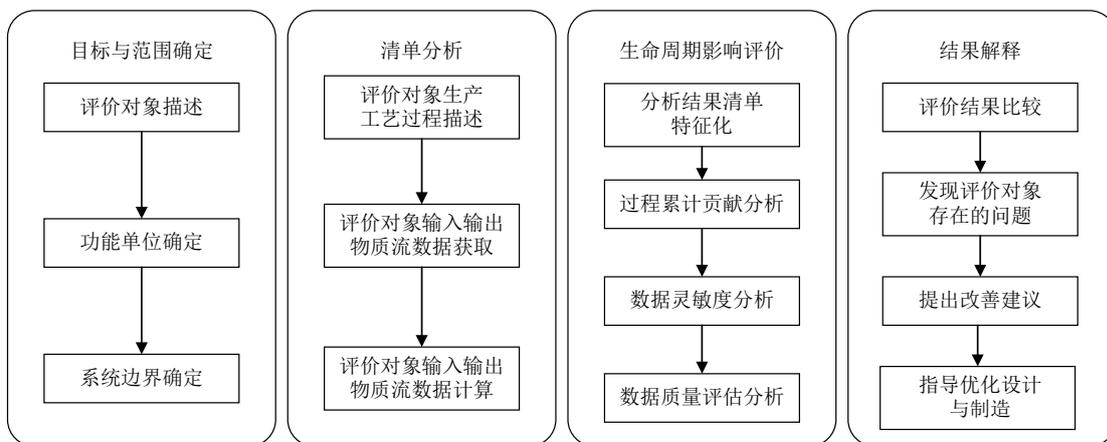
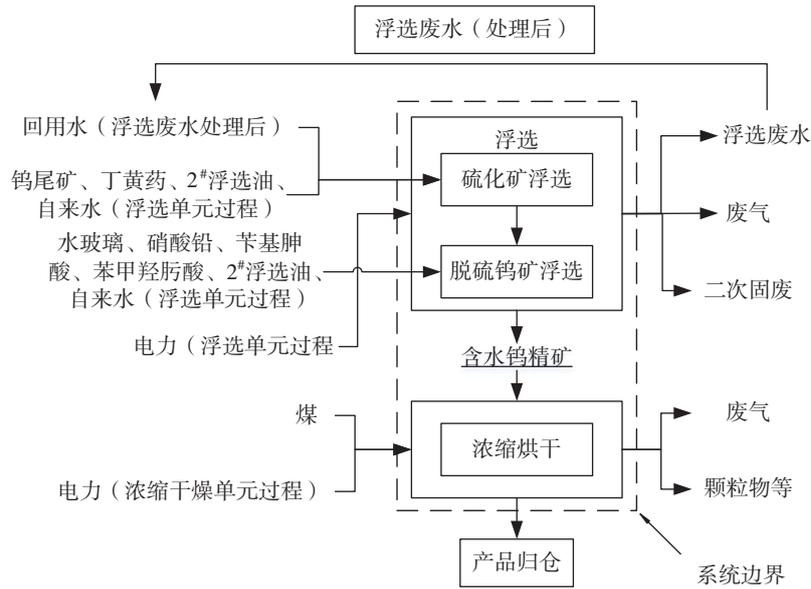
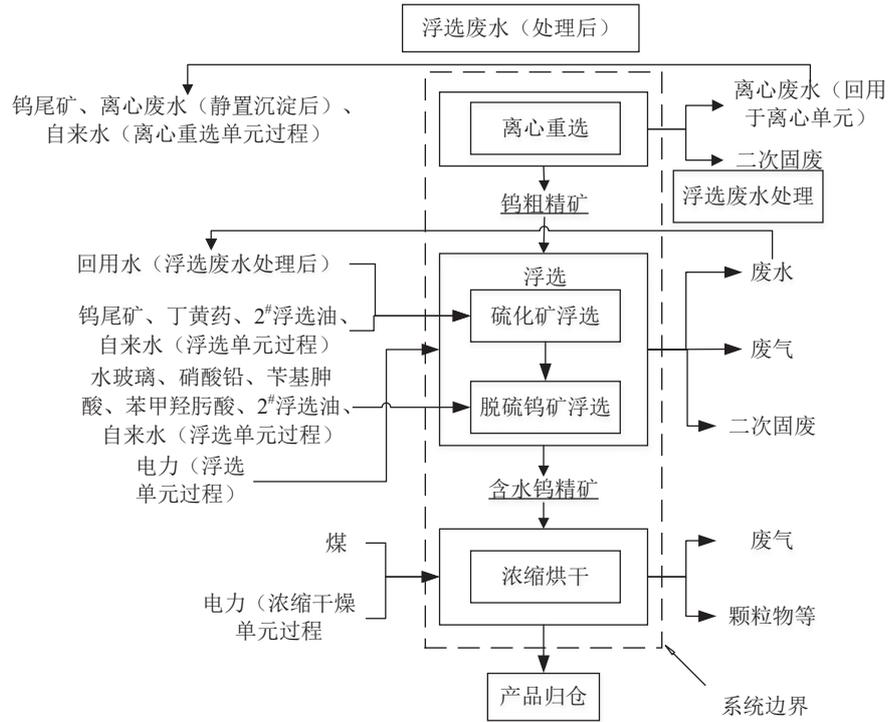


图 1 生命周期评价流程



(a) 全浮选工艺系统边界图



(b) 重选-浮选联合工艺系统边界图

图 2 两种再选回收钨精矿工艺的系统边界

3 投入-产出清单分析

在钨尾矿再选回收钨精矿的过程中,利用 eFootprint 在线分析软件构建模型。输入相应参数,模型便可对钨尾矿再选回收钨精矿过程的环境影响指标进行量化^[15-16]。本研究以再选回收 1 kg 钨精矿为功能单位,生命周期评价清单以企业数据、文献数据和实测数据为基础,取具有代表性的数据进行整理。

3.1 离心重选单元清单分析

离心预富集可以大幅提高进入浮选单元的矿浆品位,进而提高浮选单元的回收率^[17]。离心重选单元投加钨尾矿 184.82 kg,进入离心机的钨尾矿矿浆浓度为 10%。离心重选单元产生的重选废水静置沉淀后可以直接回用。该单元需要添加自来水,主要原因是二次固废和钨粗精矿会带离部分水。离心重选单元的

主要环境影响来自电力和自来水的消耗，其投入 - 产出清单如表 1 所示。

表 1 离心重选单元投入 - 产出清单

项目	子目	单位	数量
投入	钨尾矿	kg	184.82
	离心废水（静置沉淀后）	kg	2 661.41
	自来水（离心重选单元）	kg	18.03
	电力（离心重选单元）	kW · h	1.33
产出	二次固废	kg	140.31
	钨粗精矿	kg	62.54
	离心废水	kg	2 661.41

3.2 浮选单元清单分析

全浮选工艺和重选 - 浮选联合工艺涉及的浮选单元包括脱硫浮选和钨浮选。全浮选工艺中，投加浓度 18% 的钨尾矿矿浆进入浮选单元，然后投加浮选药剂，经过一粗选、三精选、二扫选，得到钨精矿；重选 - 浮选联合工艺中，往离心重选单元得到的钨粗精矿中投加浮选药剂，经过一粗选、二精选、一扫选，得到钨精矿。

根据进入浮选单元的矿浆量，合理投加浮选药剂，浮选药剂的浓度为 6%，其中精选和扫选只投加一次浮选药剂。该单元需要添加自来水，主要原因是硫化矿、二次固废以及钨精矿会带离部分水。浮选单元产生的废水含有浮选药剂，不能直接回用，需要经过处理才可回用于浮选单元，处理 1 t 浮选废水的投入 - 产出清单如表 2 所示。

表 2 浮选废水处理的投入 - 产出清单

项目	子目	单位	数量
投入	浮选废水	kg	1 000
	石灰	g	600
	聚合氯化铁	g	16
	活性炭	g	200
	电力	kW · h	0.46
产出	回用水（浮选废水处理）	kg	1 000

根据所投加的浮选药剂、废水处理试剂以及浮选单元消耗的资源，两种工艺的浮选单元投入 - 产出清单如表 3 和表 4 所示。

3.3 浓缩干燥单元清单分析

浮选单元得到的含水钨精矿（含水率 80%）先通过浓密机浓缩，得到含水率 50% 的钨精矿，再经压滤得到含水率 13% 的钨精矿滤饼，最后对滤饼进行干燥处理，使钨精矿含水率小于 1%。经浓缩干燥单元后，两种工艺均得到钨精矿 1 kg（含水率小于 1%），故浓缩干燥单元的投入 - 产出清单相同。根

据浓缩干燥单元消耗的能源及产生的污染物，得到投入 - 产出结果，如表 5 所示。

表 3 全浮选工艺浮选单元投入 - 产出清单

项目	子目	单位	数量
投入	钨尾矿	kg	135.50
	回用水（浮选废水处理）	kg	802.69
	丁黄药	g	45.17
	2# 浮选油	g	21.61
	水玻璃	g	868.47
	硝酸铅	g	260.54
	苯基砷酸	g	771.57
	苯甲羟肟酸	g	257.19
	自来水（浮选单元）	kg	17.00
	电力（浮选单元）	kW · h	0.63
产出	二次固废	kg	141.76
	废气（恶臭）	m ³	1.17
	浮选废水	kg	802.69
	硫化矿	kg	5.74
	钨精矿	kg	5.00

表 4 重选 - 浮选联合工艺浮选单元投入 - 产出清单

项目	子目	单位	数量
投入	钨粗精矿	kg	62.54
	丁黄药	g	17.09
	2# 浮选油	g	8.19
	水玻璃	g	325.06
	硝酸铅	g	97.52
	苯基砷酸	g	292.55
	苯甲羟肟酸	g	3.69
	浮选废水（试剂处理后）	kg	290.92
	自来水（浮选单元）	kg	15.04
	电力（浮选单元）	kW · h	0.33
产出	二次固废	kg	58.24
	废气（恶臭）	m ³	1.17
	浮选废水	kg	290.92
	硫化矿	kg	3.08
	钨精矿	kg	5.00

表 5 浓缩干燥单元投入 - 产出清单

项目	子目	单位	数量
投入	钨精矿	kg	5.00
	电力（浓缩干燥单元）	kW · h	0.04
产出	煤	kg	0.44
	钨精矿	kg	1.00
	废气（水蒸气等）	m ³	2.60
	颗粒物	mg	30.56
	二氧化硫	mg	5.94
	氮氧化物	mg	1.19

4 钨尾矿再选回收钨精矿的环境影响评价

4.1 生命周期评价结果

为了更好地分析钨尾矿再选回收钨精矿的环境影响,首先要对清单的投入因子、产出因子进行分

类^[18-19]。根据清单中资源和污染物的潜在环境影响,确定 10 个环境影响评价指标,包括初级能源消耗 (PED)、水资源消耗 (WU) 和全球变暖潜值 (GWP) 等^[20],具体情况如表 6 所示。

表 6 环境影响评价指标

指标名称	指标单位	主要清单物质
初级能源消耗 (PED)	MJ	硬煤、褐煤、天然气
非生物资源消耗 (ADP)	kg	铁、铜、钨
水资源消耗 (WU)	kg	淡水、地表水、地下水
全球变暖潜值 (GWP)	kg	CO ₂ 、N ₂ O
环境酸化潜值 (AP)	kg	SO ₂ 、NO _x 、NH ₃
可吸入无机物 (RI)	kg	细颗粒物 (PM _{2.5})
光化学臭氧合成潜值 (POFP)	kg	O ₃
水体富营养化潜值 (EP)	kg	NO _x 、NH ₃ 、NO ₃ -N
生态毒性 (ET)	CTUe	重金属
人体毒性 (HT)	CTUh	有机毒物

基于 eFootprint 在线分析软件及数据库,将清单分析结果特征化,得到生命周期评价结果,明确环境影响,如表 7 所示。由表 7 可知,两种再选回收工艺均在 GWP、WU 和 PED 三个方面对环境的影响较大,而在 ADP、AP 和 POFP 等七个方面对环境的影响较小,因此应重点分析 GWP、WU 和 PED 这三个方面的环境影响。

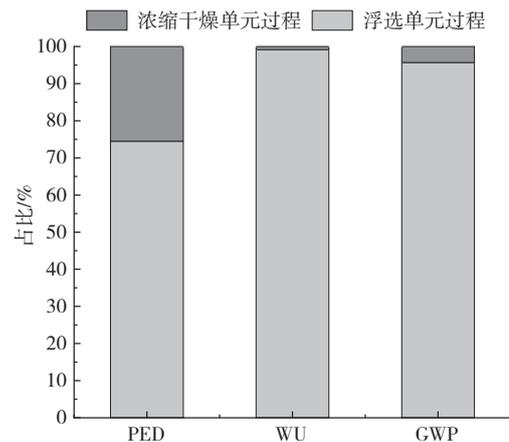
表 7 全浮选工艺和重选-浮选联合工艺的环境影响评价结果

指标名称	指标单位	评价结果	
		全浮选工艺	重选-浮选联合工艺
PED	MJ	46.8	41.9
ADP	kg	3.36×10^{-6}	2.32×10^{-6}
WU	kg	38.3	46.0
GWP	kg	2.98	2.47
AP	kg	0.021 2	0.015 0
RI	kg	7.76×10^{-3}	4.90×10^{-3}
POFP	kg	1.76×10^{-3}	1.21×10^{-3}
EP	kg	2.74×10^{-3}	1.49×10^{-3}
ET	CTUe	0.057 4	0.025 1
HT	CTUh	1.09×10^{-8}	4.99×10^{-9}

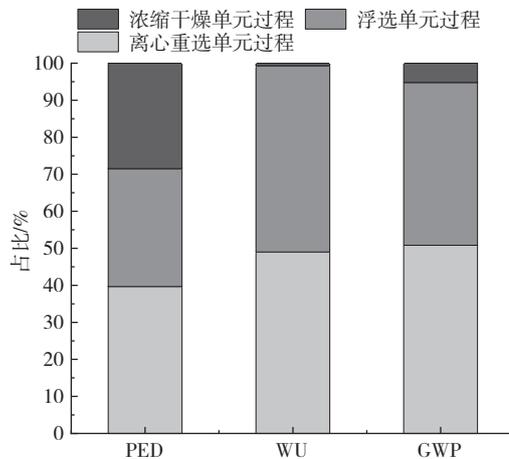
4.2 累计贡献分析

累计贡献是指某一工艺单元直接贡献及其所有上游工艺单元的贡献(原料消耗所有贡献)的累加值。在两种工艺再选回收钨精矿的过程中,重选废水在上游进行循环利用,钨尾矿在上游进行废物利用,故二者环境影响忽略;丁黄药、2# 浮选油等单一浮选药剂的环境影响较小,故将浮选单元涉及的 6 种浮选药剂

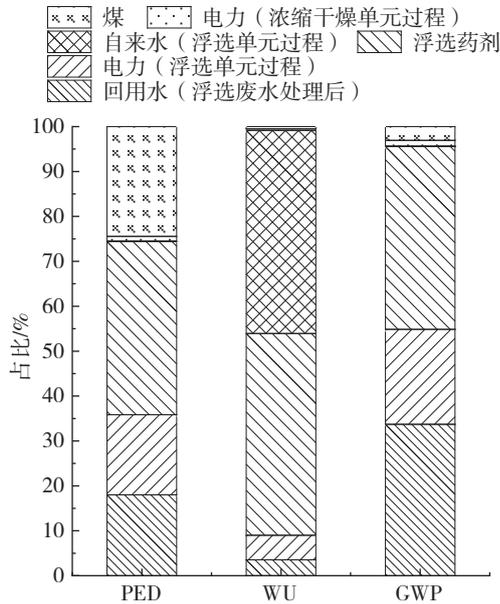
整合,简化后仅用单一的浮选药剂指标进行评价,全浮选工艺和重选-浮选联合工艺对环境影响的累计贡献如图 3 所示。



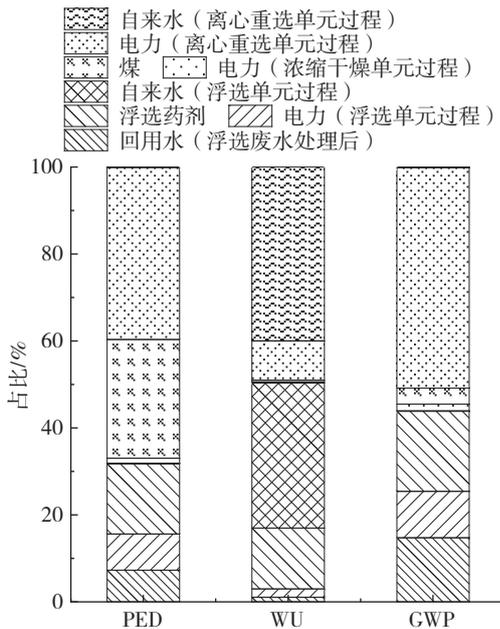
(a) 全浮选工艺的单元累计贡献



(b) 重选-浮选联合工艺的单元累计贡献



(c) 全浮选工艺的投入-产出累计贡献



(d) 重选-浮选联合工艺的投入-产出累计贡献

图 3 两种再选回收钨精矿工艺对环境影响的累计贡献

由图 3(a)、图 3(b) 可知, 从 PED、WU 和 GWP 来看, 浮选单元是全浮选工艺中造成环境主要环节, 而离心重选单元是重选-浮选联合工艺中造成环境主要环节。由图 3(c) 可知, 在全浮选工艺的浮选单元中, 浮选药剂消耗是对 PED 及 GWP 影响最大的因素, 浮选药剂和自来水消耗对 WU 的影响较大。为了减少浮选药剂及自来水消耗对环境的影响, 可以探索环境友好的浮选药剂, 优化工艺和设备^[21-22]。由图 3(d) 可知, 电耗是重选-浮

选联合工艺中对 PED 和 GWP 影响最大的因素, 因为我电力生产以火力发电为主, 其对环境的影响很大^[23-24], 自来水消耗是对 WU 影响最大的因素。为了减少自来水和电力消耗对环境的影响, 可以优化工艺和设备, 使用清洁能源^[25-26]。浓缩烘干过程需要消耗大量煤炭, 环境影响较大, 温室气体、酸性气体、颗粒物等排放量均较高, 可使用清洁能源降低耗煤的环境影响^[27-28]。相比全浮选工艺, 重选-浮选联合工艺较少消耗浮选药剂, 环境影响较小。

4.3 数据质量评估

采用 eFootprint 在线分析软件, 评估全浮选工艺和重选-浮选联合工艺再选回收钨精矿的模型清单数据不确定度, 得到两种工艺的数据质量评估结果^[29], 如表 8 所示。全浮选工艺数据质量评估结果的不确定度在 16% 以内, 重选-浮选联合工艺数据质量评估结果的不确定度在 13% 以内。从基础数据来源、引用数据的年份、样本大小、各项技术的差异等角度考虑, 全浮选工艺和重选-浮选联合工艺的数据质量评估结果的不确定度浮动偏差处于正常范围, 数据具有参考价值^[30]。

表 8 两种再选回收钨精矿工艺的数据质量评估结果

指标名称	全浮选工艺结果 不确定度 %	重选-浮选联合工艺结果 不确定度 %
PED	9.98	9.57
ADP	6.26	6.74
WU	14.85	12.28
GWP	9.24	9.49
ODP	7.55	5.59
AP	11.00	7.42
RI	13.57	9.41
POFP	7.82	6.75
EP	14.65	9.40
ET	8.13	5.02
HT(致癌)	15.27	9.35
HT(非致癌)	7.01	4.13

5 结论

本文采用生命周期评价, 对比分析全浮选工艺和重选-浮选联合工艺再选回收钨精矿的环境影响。结果表明, 相比全浮选工艺, 重选-浮选联合工艺对环境的影响更小, 因此优先选用重选-浮选联合工艺。分析发现, 全浮选工艺中, 浮选单元消耗大量浮选药剂, 对 PED、WU 和 GWP 的累计贡献最大; 重选-

浮选联合工艺中,离心重选单元消耗的电力较多,对 PED 和 GWP 的累计贡献大,自来水消耗对 WU 的累计贡献最大。在再选回收钨精矿时,生产工艺和资源消耗对环境的影响较大。在保证产品质量的前提下,可以探索环境友好的浮选药剂,优化工艺和设备,使用清洁能源,降低负面环境影响。钨尾矿资源化的生命周期评价结果显示,合理改进钨尾矿再选回收钨精矿工艺,可以减少资源消耗,降低生产成本,减少环境压力。但是,钨尾矿再选回收钨精矿的研究目前仍具有一定局限性,今后需要持续推进。

参 考 文 献

- MULENSHI J, CHELGANI S C, ROSENKRANZ J. Mechanochemical Treatment of Historical Tungsten Tailings: Leaching While Grinding for Tungsten Extraction Using NaOH[J]. Sustainability, 2021(6): 1-13.
- 彭 康. 钨尾矿高值化加工与利用的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014: 15-16.
- 兰志强, 蓝卓越, 张镜翠. 钨尾矿资源综合利用研究进展[J]. 中国钨业, 2016(2): 37-42.
- 邓巧娟, 车小奎, 郑 其, 等. 某钨尾矿综合回收钨铜锌的试验研究[J]. 稀有金属, 2019(5): 541-550.
- 徐敬吟. 某低品位黑钨细泥尾矿回收试验研究[J]. 中国钨业, 2018(3): 33-36.
- 李付杰. 柿竹园钨钼铋多金属矿钨尾矿综合利用技术研究[D]. 福州: 福州大学, 2018: 11-12.
- 卢元伟, 杨志洪, 刘 容. 沃溪金锑钨尾矿回收金钨的探讨[J]. 湖南有色金属, 2016(2): 18-21.
- 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述: 兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报, 2015(7): 1232-1242.
- HAANSTRA W, BRAAKSMA A J J, VAN Dongen L M. Designing a hybrid methodology for the Life Cycle Valuation of capital goods[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021(32): 382-395.
- 国际标准化组织. 环境管理 生命周期评估 原则与框架: ISO 14040—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- FINKBEINER M, INABA A, TAN R B H, et al. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2006(2): 80-85.
- 王珊珊, 张 寒, 杨红强. 中国人造板行业的生命周期碳足迹和能源耗用评估[J]. 资源科学, 2019(3): 521-531.
- 黄 娜, 王志慧, 朱永光, 等. 产品生命周期环境管理集成解决方案的研发[J]. 家用电器, 2012(4): 31-35.
- 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(10): 2136-2144.
- 周昭志. 垃圾热解气化过程中氯的转化与控制特性及生命周期可持续性评价方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 21-22.
- MEDIBOYINA M K, BANUVALLI B K, CHAUHAN V S, et al. Comparative life cycle assessment of autotrophic cultivation of Scenedesmus dimorphus in raceway pond coupled to biodiesel and biogas production[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2020(2): 233-247.
- 卢 臣. 内蒙古某金矿离心重选-浸出工艺优化试验研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020: 11-12.
- YANG N N, ZHANG W W, YE C, et al. Nanobiopolymers Fabrication and Their Life Cycle Assessments[J]. Biotechnology Journal, 2019(1): 1-13.
- WANG L, JIAO G H, LU H S, et al. Life Cycle Assessment of Integrated Exploitation Technology for Tailings in Bayan Obo Mine, China[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019(2): 4343-4359.
- 肖汉雄, 杨丹辉. 基于产品生命周期的环境影响评价方法及应用[J]. 城市与环境研究, 2018(1): 88-105.
- 王介良, 曹 钊, 李 解, 等. 包钢稀土选矿厂稀土浮选药剂优化[J]. 金属矿山, 2013(11): 74-76.
- 吕 凯. 新庄孜选煤厂浮选药剂优化实践[D]. 淮

(下转第 129 页)

使用溶剂回收、吸附剂再生等手段，提高区域 VOCs 治理效率。项目建设中，进一步加强 VOCs 原料储存、运输与使用管理，规范 VOCs 排放。

4.2.2 精准管控

首先，每年制定广东省 VOCs 重点监管企业清单，确定辖区内 VOCs 控制的重点监管企业和特征因子，因地制宜、依企施策，指导各地对企业进行有效管控。其次，提高 VOCs 监控水平，推进重点排污单位安装 VOCs 在线监控设备并将数据传输至生态环境部门。推进广东省涉 VOCs 排放企业过程监控，实现涉 VOCs 企业生产及污染治理过程的有效监督，及时发现企业污染治理设施擅自停运、非正常运转等异常情况，检查停产限产等污染应急措施落实情况，推动广东省工业企业 VOCs 排放的精准化、智能化监管。再者，以清洁生产审核技术体系支撑工业源 VOCs 问题精准排查、措施精准制定和精准治理绩效分级评价^[7]，深化广东省涉 VOCs 重点企业绩效分级工作。在日常帮扶和绩效评级中，监管部门要深入企业，帮助企业梳理和解答问题，提出改进建议，加强指导，支撑工业源 VOCs 精准治理。另外，通过日常双随机、执法检查等手段，监督企业落实环保责任，严厉查处涉 VOCs 企业违法行为。

5 结语

大气污染治理是生态文明建设的重要内容，“十四五”时期，广东省要做好工业源 VOCs 的精准

治理，优化治理路径，切实改善人居环境。工业源企业要从源头替代、过程控制、末端治理等角度入手，抓好 VOCs 精准治理，监管部门要对涉 VOCs 企业进行精准管控和指导，两者共同发力，才能促进大气污染防治取得显著成效。

参 考 文 献

- 1 吕红, 环久峰, 王玉, 等. 大连市工业源挥发性有机物排放调查及减排分析 [J]. 环境污染与防治, 2021 (7): 847-850.
 - 2 马红妍. 工业源挥发性有机物治理技术及管理对策研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2022 (2): 24-26.
 - 3 蒋卫兵. 工业固定源挥发性有机物治理技术效果研究 [J]. 资源节约与环保, 2020 (1): 1-3.
 - 4 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 等. 2011—2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 [J]. 环境科学, 2021 (11): 5169-5179.
 - 5 李佳. 工业固定源挥发性有机物治理研究 [J]. 区域治理, 2021 (11): 109-110.
 - 6 徐梦晏. 工业挥发性有机物 VOCs 的危害及治理技术研究 [J]. 科技创新与应用, 2021 (12): 143-145.
 - 7 郭亚静, 方刚, 韩桂梅, 等. 清洁生产审核技术体系支撑工业源 VOCs 精准治理的路径探析 [J]. 环境保护, 2021 (11): 39-42.
-
- (上接第 113 页)
- 南: 安徽理工大学, 2016: 17-19.
 - 23 杨莉坤. 环境规制对火力发电环境治理效率影响研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 7-8.
 - 24 BASSI V, PEREIRA-BONVALLET E, ABU ABDULLAH M, et al. Cycling Impact Assessment of Renewable Energy Generation in the Costs of Conventional Generators [J]. Energies, 2018 (7): 1-17.
 - 25 白青峰. 可再生能源发电与核电协调调度及发展 [J]. 中国电力, 2020 (2): 105-111.
 - 26 张玉卓. 中国清洁能源的战略研究及发展对策 [J]. 中国科学院院刊, 2014 (4): 429-436.
 - 27 LIU J C, YIN Y. Research on self-organizing evolution mechanism of clean energy value co-creation system in China [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2021 (4): 1-16.
 - 28 杨麟, 王杨. 工业锅炉清洁能源替代 (煤改气) 现状分析与建议 [J]. 工业锅炉, 2017 (4): 29-32.
 - 29 范闪. 皮革及其终端产品的全生命周期评价研究 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2020: 11-12.
 - 30 黄娜, 王洪涛, 范辞冬, 等. 基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法 [J]. 环境科学学报, 2012 (6): 1529-1536.