

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2023.01.017

二次进风与折流对电子废弃物干法分选的影响

杨凡,柳忠彬,董泽宇,雷国强,王文强,薛建勇

(四川轻化工大学机械工程学院,四川宜宾644000)

摘要:基于电子废弃物高效、物理分离的回收需求,建立了电子废弃物颗粒干法分选模型,在常规一次气流分选的基础上增加折流与二次进风强化电子废弃物颗粒气固耦合分离特征,研究表明结果,折流角度与二次进风风速对电子废弃物颗粒迁移轨迹和分离行为有显著影响,当进风开口大小为35 mm,一次进风速度为3.2 m/s,二次进风速度为3.6 m/s且折流角度为25°时,金的回收率达99.66%,金品位达84.35%,铜的回收率达77.91%,铜品位达88.28%,富集比为4.41,且塑料颗粒与金、铜颗粒分离效果最佳。说明在控制适当二次进风气流速度与颗粒折流角度下可显著提高电子废弃物分选的经济性,且分离环境友好,研究成果为电子废弃物无污染回收提供了一种新的参考。

关键词:电子废弃物;二次进风;折流

中图分类号:TD952;TD922 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-9492(2023)01-0104-06

Effect of Secondary Air Intake and Folding on Dry Sorting of Electronic Waste

YANG Fan, LIU Zhongbin, DONG Zeyu, LEI Guoqiang,

WANG Wenqiang, XUE Jianyong

(College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, Sichuan, China)

Abstract: Based on the recovery needs of efficient and physical separation of electronic waste, a dry sorting model of electronic waste particles was established. The gas-structured separation characteristics of secondary air intake and folding are added on the basis of conventional primary airflow sorting. And the results showed that the folding angle and secondary air intake velocity had a significant impact on the migration trajectory and separation behavior of E-waste particles. When the size of the air intake opening was 35 mm, the primary air intake speed was 3.2 m/s, the secondary air inlet speed was 3.6 m/s and the folding angle was 25°. The recovery of gold was 99.66%, the grade was 84.35%. The recovery of copper was 77.91%, the grade was 88.28% and the enrichment ratio was 4.41. The separation effect between plastic particles and gold and copper particles was the best. It showed that under the control of the appropriate secondary air intake velocity and particle folding angle, the economics of E-waste sorting can be significantly improved and the separation was environmentally friendly. The research results provided a new reference for the pollution-free recycling of E-waste.

Key words: E-waste; secondary air intake; folding

飞速发展的科学技术环境缩短了电子产品更新换代的周期,致使电子废弃物逐年增长,现已是世界上增速最快的城市垃圾^[1]。据统计,现阶段我国每年将产生近200万t电子废弃物,有专家预测我国电

子废弃物产量在2030年将超过2700万t。由手机和电脑拆解出的废弃电路板中具有高达1600亿元的贵金属^[2]。电子废弃物是报废的电子产品经拆解、分拣、破碎后的产物,又称“电子垃圾”^[3-4]。内含

收稿日期:2022-06-06

基金项目:四川省重点研发计划项目(2021YFG264);过程装备与控制工程四川省高校重点实验室项目(GK202109)

作者简介:杨凡(1997-),女,贵州六盘水人,硕士研究生,主要从事分离机械、流体机械研究。

通信作者:柳忠彬(1972-),男,四川彭州人,博士,教授,主要从事过滤与分离研究。

铜、铁、锡、铅及铝等大量贵金属和有色金属,其中铜作为废电路板中的重要成分,含量高达 20%^[4]。另在采矿行业中,1 t 金矿石中金含量超 5 g 的矿石就具备开采价值,而 1 t 电路板含金量高达 80~1 500 g,日渐增长的电子废弃物犹如一座座蕴含了丰富矿产资源的“城市矿山”。由此可见,电子废弃物资源再生技术的研究具有极为重要的经济效益和社会效益。电子废弃物的回收方法多种多样,主要包括:火法处理^[5]、湿法处理(化学处理)^[6]、机械处理^[7-8]、生物浸出技术^[9]以及联合处理^[10]等,但诸类方法都伴随工艺繁杂、污染严重以及能耗过高等问题。本文采用物理气流分选方法,在确保电子废弃物得到有效回收前提下克服现行方法所存在的环境、水污染和高能耗等问题。基于高效、物理分离回收需求,建立了多通道电子废弃物颗粒干法分选模型,利用颗粒流体力学(CPFD)分别就增加折流与不同二次进风对电子废弃物分选模型的影响及耦合分离特征进行分析,基于 Barracuda 数值模拟可设计合适的电子废弃物分选装置,对于电子废弃物无污染回收具有一定的借鉴意义。

1 电子废弃物分选工艺

电子废弃物中有 40% 的金属,其中含基本金属(铝、铜、铁和锡等)和贵金属(金、银、铑和钯等),30% 的塑料(聚乙烯、聚酯等)和 30% 的惰性氧化物(硅、氧化铝等)^[11]。电子废弃物采用机械回收金属的方法主要是指:依据电子废弃物不同组分间存在的物理性质差异,对其进行破碎、球磨、磁选及物料的分选等一系列机械处理过程。将电子废弃物经一级破碎后的产物再进行球磨,得到较小粒径的颗粒物。再利用物料的磁性差异磁选出铁颗粒(锡一般与铁结合),最后利用密度差异进行干法分选。干法分选可分离出电子废弃物中的铁、铜、金、银等贵金属,回收工艺流程如图 1 所示。本文利用电子废弃物分选模型主要针对电子废弃物组分中的金、铜以及塑料进行仿真分析。

2 折流与二次进风分离模型

2.1 基本模型

本文主要研究电子废弃物破碎粉料在气流分选装置中的分离过程,分选装置由一次进风口、二次进风口、折流板、出风口以及富集槽组成,其结构如图 2 所示。电子废弃物破碎粉料从入料口自由下落,一次进风口对电子废弃物进行初步分离,未完全分离

的电子废弃物经折流板引导流向二次进风口,二次进风口随即对未完全分离的物料进行再次分离,依据电子废弃物横向位移差在分离模型底部设有三个富集槽,电子废弃物中不同密度颗粒由隔板隔开,气流最后经出风口排出。分选过程中电子废弃物颗粒在一次进风、二次进风及折流板干扰作用下呈现出一定的迁移轨迹和分离特征,观测颗粒水平位移差,研究电子废弃物在分离模型中的运动规律。

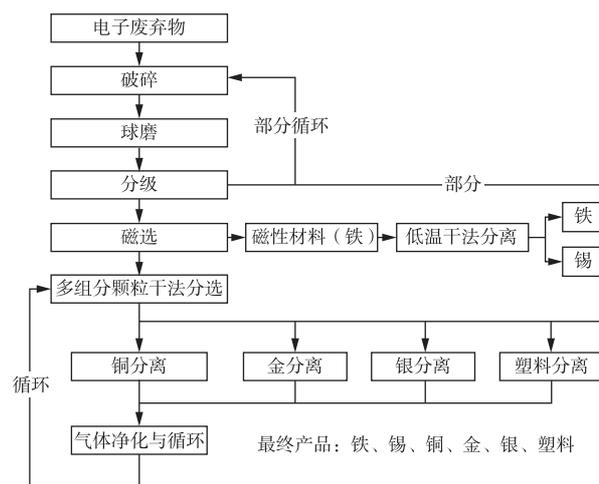


图 1 电子废弃物分选工艺流程

Fig. 1 Flowsheet of electronic waste sorting process

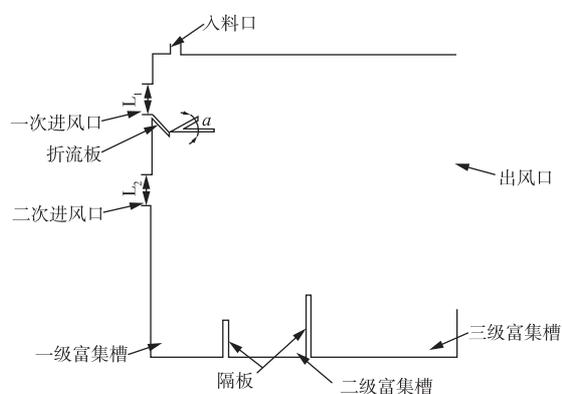


图 2 电子废弃物干法分离模型

Fig. 2 E-waste dry separation model

2.2 边界条件

本文采用有限元仿真软件 Barracuda 对电子废弃物破碎粉料在分离模型中的运动过程进行仿真分析,流体域模型采用笛卡尔网格生成离散单元,计算域入口包括顶部电子废弃物颗粒入口、左侧一次进风口和二次进风口,采用拉格朗日法将颗粒处理为离散体系并运用 MP-PIC^[12]方法进行计算,由于颗粒与流体间存在速度差,受流体曳力的影响二者产生耦合作用,曳力模型选用 Wen-Yu 模型。把流体作

为一种连续的介质并运用 Navier-Stokes 方程对其进行描述^[13],无需考虑能量方程。本文研究重点是二次进风速度及折流板角度对电子废弃物分离效果的影响,依据折流与二次进风分离模型设定分选流场的边界条件。其中关键参数有:颗粒的堆积体积分数 0.5,最大动能损耗 40%,颗粒-壁面法向动能系数 0.3,颗粒-壁面切向动能系数 0.9;颗粒与气体的滑移率 0.5,单位体积分数 2 000,颗粒质量流速 55 kg/(m²·s)。为验证模型可行性,粗略将其他元素归于塑料成分,便于放大多密度颗粒间的密度差。给定物料组成及含量为金 0.08%、铜 20%和塑料 79.92%,如表 1 所示。

表 1 分选物料元素分析结果
Table 1 Results of elemental analysis
of sorting materials

| 组分 | 金 | 铜 | 塑料 |
|--------------------------|--------|-------|-------|
| 含量/% | 0.08 | 20 | 79.92 |
| 粒径/ μm | 75 | 75 | 75 |
| 密度/(kg·m ⁻³) | 19 320 | 8 960 | 1 220 |

3 结果与讨论

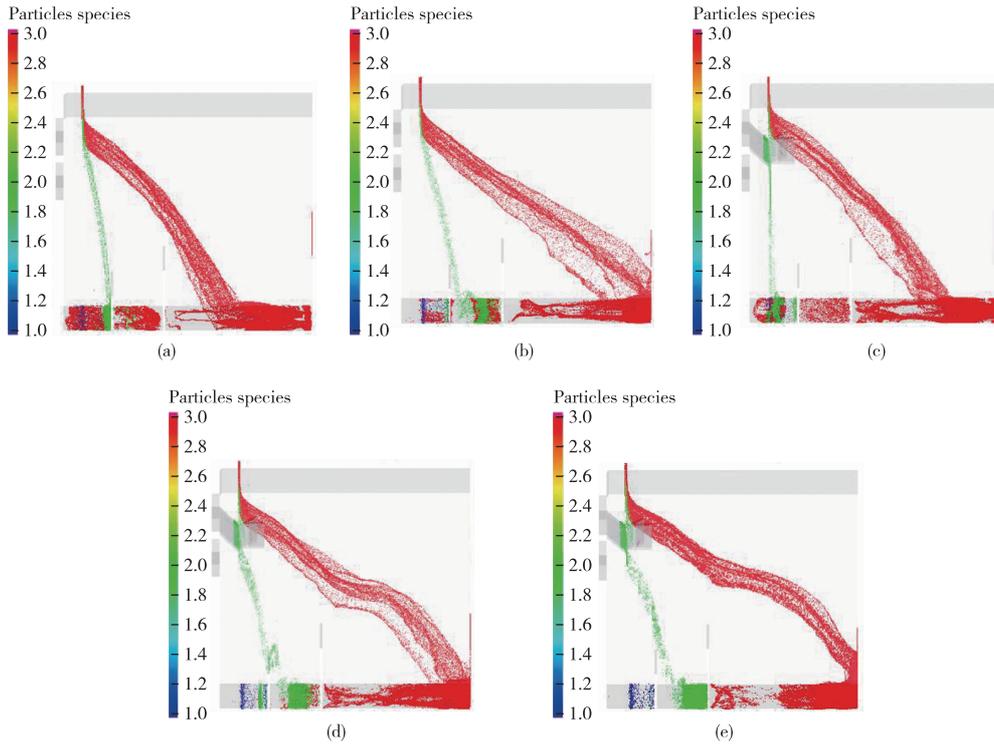
3.1 电子废弃物颗粒分布特性

电子废弃物破碎物料在分选过程中,须增大各组分密度差,使其主导颗粒的分离行为。此外,模拟分选过程中之所以采用同种粒径的颗粒,是为了减小颗粒粒径、形态等因素对分选效果带来的影响。由于物料各组分物性不同,在无外力影响时会自由下落。但当其处于运动介质中时,会因自身重力、流体曳力及惯性力等因素的影响而生成不同的迁移轨迹,因此需使被分选物料所受净浮力在流化密度中占据主导地位。图 3 是通过设定不同的操作参数得到的三种不同电子废弃物破碎粉料分选效果图(横坐标是富集槽横向尺寸)。图 3(a)是当入料口开口大小为 3 mm,一次进风开口大小 30 mm 时,一次进风风速 3.2 m/s,未安装折流板和无二次进风条件下气流平稳运行后电子废弃物组分分布情况,一级富集槽内存在金颗粒、大部分铜颗粒以及少量塑料颗粒混合的情况,少量铜颗粒被分离至二级富集槽。图 3(b)是当入料口开口大小为 3 mm,一次、二次进风开口大小均为 30 mm,风速均为 3.2 m/s,未安装折流板时,气流平稳运行后分离模型内的电子废弃物组分分布情况。图中可见塑料颗粒在一、二级富集槽内的数量均有所减少,金颗粒与铜颗粒的分离情况也得到改善,大部分铜颗粒富集在二级富集槽。相较于图 3(a)而言,金颗粒与铜颗粒虽实现一定程

度上的分离,但也存在金颗粒与铜颗粒、铜颗粒与塑料颗粒一定数量上的混合。由图 3(c)可知,当入料口开口大小为 3 mm,一次、二次进风开口大小均为 30 mm,一次进风风速为 3.2 m/s,无二次进风,即二次进风风速为 0,折流板夹角(α)大小为 30°时分离模型内铜颗粒和金颗粒基本未实现分离,且混杂少量塑料颗粒,达不到多组分分离的效果。图 3(d)是当入料口开口大小为 3 mm,一次、二次进风开口大小均为 30 mm,风速均为 3.2 m/s,折流板夹角(α)大小为 30°情况下电子废弃物组分分布情况,较上述 3 种情况而言,图 3(d)所述分选条件所形成的分离效果更佳,金颗粒基本富集在一级富集槽,与少量铜颗粒混合。大部分铜颗粒分布在二级富集槽,参杂少量塑料颗粒。图 3(e)为入料口开口大小为 3 mm,一次、二次进风开口大小均为 35 mm,一次进风风速为 3.2 m/s,二次进风风速为 4.6 m/s,折流板夹角(α)大小为 30°时电子废弃物组分分布情况,较图 3(d)而言,物料分选效果更好,各组分几乎单独富集,可见电子废弃物的回收率和富集比都得到大幅提升。由图可知,当二次进风风速过小或未安装折流板时,电子废弃物不能得到良好分离。据此得出,各组分物性不同,在二次进风条件下会呈现出不同的分离效果。自左侧由近及远依次呈现不同颜色的组分分布,即密度由大及小。较佳的分选条件为进风口开口大小为 35 mm 时,一次进风风速 3.2 m/s,二次进风风速 4.6 m/s,折流板夹角(α)大小为 30°,此时气流分选装置可对电子废弃物破碎物料实现高效的分选富集。

3.2 二次进风对电子废弃物分选规律的影响

气流分选装置的各操作参数对电子废弃物分选效果具有显著影响,结合图 3(b)可看出当二次进风口未通入气流时,金颗粒与铜颗粒完全混合在一级富集槽内,且参杂部分塑料颗粒,分选效果极差。为了将金颗粒和铜颗粒分离,得到最佳分选效果,即引入二次进风。据此,若要模拟二次进风条件下电子废弃物的分离效果,可通过设定不同的二次进风风速。结合图 3 分析得出,二次进风口开口 35 mm 时物料分离效果较为良好,设定一次进风口风速为 3.2 m/s,折流板夹角(α)大小为 25°,再将二次进风口风速分别设置为:0、1.6、2.6、3.6、4.6、5.6、6.6 m/s。在折流与二次进风分离模型底部设置 3 个物料富集槽,分析电子废弃物组分品位及回收率,金颗粒和铜颗粒在不同二次进风风速下不同分布距离上的品位分布和回收率如图 4 所示。



注: 蓝色—金颗粒; 绿色—铜颗粒; 红色—塑料颗粒

图 3 电子废弃物颗粒分布规律

Fig. 3 E-waste particle distribution law

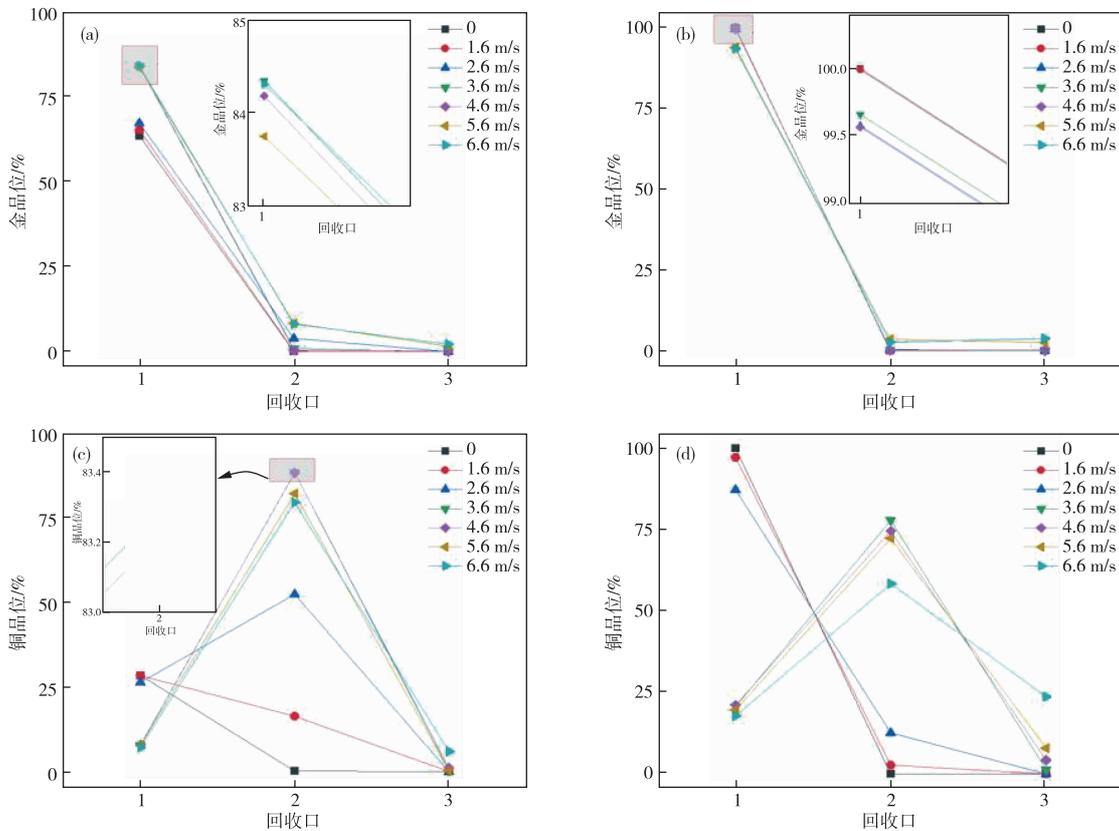


图 4 电子废弃物在不同二次风速下品位及回收率变化

Fig. 4 Changes of grade and recovery of electronic waste under different secondary air velocity

由图4可知,适当的分离参数可使电子废弃物破碎粉料在折流与二次进风分离模型内几乎单独富集,金颗粒基本全都掉落在一级富集槽内,而绝大部分铜颗粒在颗粒折流与二次进风共同作用下也都集中在二级富集槽内。由图4(a)、(b)可知,不同二次进风气流速度下一级富集槽的金颗粒品位随着气流速度增大而呈现先增大后减小的趋势;随着气流速度增大,其回收率先减小后增大再减小,因为未引入二次进风或流速过小时,金颗粒与铜颗粒未被分离,全部混合在一级富集槽内,流速增大,二次风对一次风未分离完全的电子废弃物破碎粉料再次进行分离,随着气流速度不断增加,金颗粒和铜颗粒逐渐分离,铜颗粒被分选至二级富集槽内,金颗粒混杂铜颗粒、铜颗粒混杂塑料颗粒的情况得到改善。在气流速度适当时,可实现电子废弃物有效分离和富集。由图4可知,当二次进风口气流速度达到3.6 m/s时,金颗粒几乎全部分布在一级富集槽,回收率达99.66%,品位达84.35%;铜颗粒几乎全部分布在二级富集槽,回收率达77.91%,品位达88.28%,富集比为4.41,且塑料颗粒与金、铜颗粒分离效果最佳。但当二次进风口气流速度速度过大时,金颗粒会随气体流动被裹挟到二、三级富集槽内致使回收率下降。

3.3 颗粒折流角度对物料分选效果的影响

经仿真分析得出,分选过程中颗粒的品位高低深受电子废弃物颗粒干法分选模型内折流板安装角度的影响,由此探究模型的折流板安装角度对金和铜分选效果的影响,分别设定4组折流板安装角度(α):20°、25°、30°、35°,一次进风和二次进风开口大小均为35 mm,作用于颗粒的气流速度分别为:一次进风口3.2 m/s、二次进风口3.6 m/s,分别得到金颗粒在一级富集槽和铜颗粒在二级富集槽的品位及回收率如图5所示。

由图5可知,随着折流板夹角(α)的增加,金颗粒在一级富集槽和铜颗粒在二级富集槽的回收率和品位都呈现先增加后减小的变化规律。自折流板夹角为20°开始,随着折流板夹角增大,在折流板夹角达到25°时,金颗粒与铜颗粒的分离效果最佳,将折流板夹角继续增大至35°时,塑料颗粒和铜颗粒、铜颗粒和金颗粒均有少量混杂,其回收率和品位都呈下降趋势,致使分选效果变差。由此可知,适当的富集槽分布距离和折流板夹角大小可有效提升物料分选的品位及回收率,这是因为采用气流分选方法时,设定风速作用于不同密度的颗粒物,不同电

子废弃物组分之间存在密度差异,从而在水平方向呈现位移差,以达到对电子废弃物的分选与富集作用。

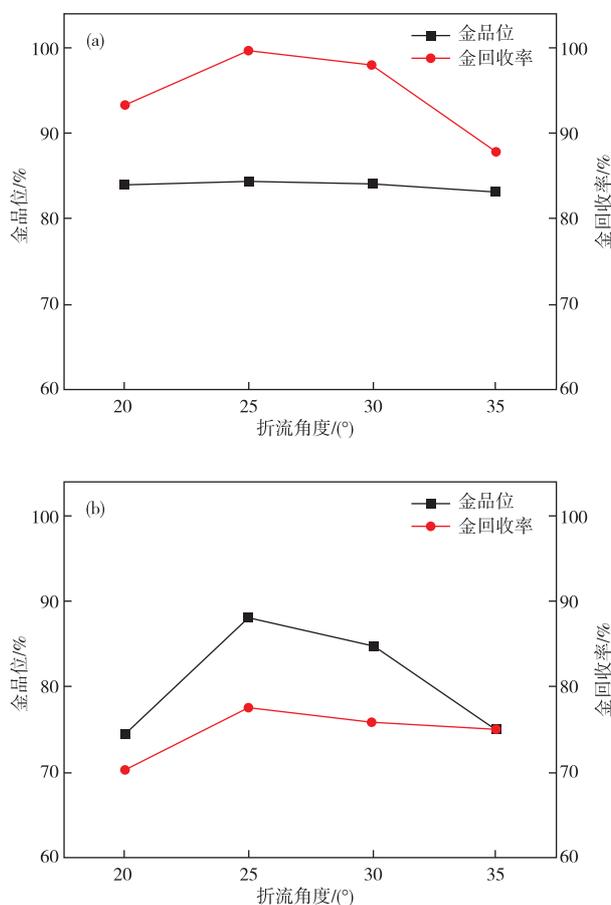


图5 颗粒折流对电子废弃物分选效果的影响

Fig. 5 Effect of particle baffle on sorting effect of electronic waste

4 结论

1) 二次进风口的不同气流速度对电子废弃物颗粒的品位及回收率有较大影响,当一次进风口气流速度为3.2 m/s、二次进风口气流速度为3.6 m/s且开口大小为35 mm时,破碎粉料中金颗粒和铜颗粒的品位和回收率更佳,可有效实现电子废弃物的分选。

2) 二次进风口气流速度为3.6 m/s,折流板安装角度为25°时,金颗粒在一级富集槽内品位可达84.35%,回收率可达99.66%,铜颗粒在二级富集槽内品位可达88.28%,回收率可达77.91%,据此可知,物料的分选效果受颗粒折流角度的影响,当折流板安装角度适当时,电子废弃物可获得良好的回收效果。

3) 基于CPFD仿真分析对折流与二次进风条件

下的电子废弃物分离行为进行探究,可为电子废弃物分选装置结构设计和参数优化等方面提供相应的理论支撑,同时还对其他存在密度差的物料回收具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 刘方方. 物理法从废线路板中回收铜合金粉末新技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
LIU Fangfang. Investigation of a novel technology of recycling copper alloy powders from waste printed circuit boards by physical method [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2020.
- [2] 李国. 电子废弃物:一座尚待开采的“金矿”[J]. 资源再生,2020(7):28-29.
LI Guo. Electronic waste;a “gold mine” yet to be mined [J]. Resource Recycling,2020(7):28-29.
- [3] 毛玉如,李兴. 电子废弃物现状与回收处理探讨[J]. 再生资源研究,2004(2):11-14.
MAO Yuru, LI Xing. Preliminary exploring current condition and recycling system of electronic waste[J]. Recyclable Resources and Circular Economy,2004(2):11-14.
- [4] 陶天一,康飞,孙峙,等. 电子废弃物破碎颗粒料球形化过程研究[J]. 有色金属(选矿部分),2022(2):45-52.
TAO Tianyi, KANG Fei, SUN Zhi, et al. Research on the sphericalization process of E-waste broken particles[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section),2022(2):45-52.
- [5] 艾元方,何世科,孙彦文,等. 短回转窑-立窑型废线路板高温焚烧冶炼炉[J]. 矿冶,2014,23(05):86-91.
AI Yuanfang, HE Shike, SUN Yanwen, et al. High-temperature incineration and smelting furnace composed of short rotary kiln and shaft kiln for waste printed-circuit boards [J]. Mining and Metallurgy,2014,23(5):86-91.
- [6] KANG J, SOHN J, CHANG H, et al. Preparation of cobalt oxide from concentrated cathode material of spent lithium ion batteries by hydrometallurgical method [J]. Advanced Powder Technology, 2010, 21(2):175-179.
- [7] MOHABUTH N, MILES N. The recovery of recyclable materials from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) by using vertical vibration separation [J]. Resources, conservation and recycling, 2005, 45 (1): 60-69.
- [8] 何双华,朱华炳,柏宇轩. 废动力电池破碎产物的风选特性分析及试验[J]. 中国科技论文,2017,12(10):1118-1123.
HE Shuanghua, ZHU Huabing, BO Yuxuan. Pneumatic separation characteristic analysis and test on the crushed products of spent power batteries [J]. China Science Paper,2017,12(10):1118-1123.
- [9] 聂红燕. 嗜酸性细菌浸出线路板的吸附行为、动力学及机理研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.
NIE Hongyan. The study of adsorption behavior, kinetics and mechanism of acidophilic bacteria on the leaching of printed circuit boards [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2015.
- [10] BHAT V, RAO P, PATIL Y. Development of an integrated model to recover precious metals from electronic scrap:a novel strategy for e-waste management [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 37: 397-406.
- [11] 谢奕标. 废旧电路板真空热解气相产物分析及控制研究[D]. 广州:广东工业大学,2016.
XIE Yibiao. Analysis and control of gaseous products form vacuum pyrolysis of waste printed circuit board[D]. Guangzhou:Guangdong University of Technology, 2016.
- [12] SNIDER D M, O'ROURKE P J. The multiphase particle-in-cell (MP-PIC) method for dense particle flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 22(2), 370-402.
- [13] 谢君科,李玉如,柳忠彬. 基于CPFD多密度矿粒的流化与分选特性[J]. 有色金属工程,2018,8(4):79-84.
XIE Junke, LI Yuru, LIU Zhongbin. Fluidization and separation characteristics of multi-density mineral particles based on CPFD [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2018,8(4):79-84.

(本文编辑 刘水红)