

电子垃圾中有色金属熔池熔炼资源化利用技术研究

张磊,郝福来,张世鏢,王秀美,张晏铭

(长春黄金研究院有限公司)

摘要:有色金属是国民经济和国防建设不可或缺的重要基础原材料。中国目前有色金属对外依存度高,矿石品位较低,大型和中型矿山数量稀少,开采成本高昂,自然修复过程缓慢。基于有色金属产业的发展规模及发展过程中凸显的主要矛盾,对有色金属相关政策的演变历程进行了回顾。PCBs中有色金属含量远高于自然资源,具有巨大的经济潜力,现有大规模处理PCBs的企业以熔池熔炼技术为主,围绕熔池熔炼处理电子废弃物,阐述了该技术研究现状及其国内外工业化动态。系统归纳了国内相关技术取得的应用成果,从该技术工业推广的历程、技术壁垒突破等角度总结了熔池熔炼技术资源化现状,讨论了有色金属熔池熔炼技术资源化技术特点,并对发展趋势进行了展望,期望为电子垃圾中有色金属熔池熔炼资源化利用提供参考。

关键词:有色金属;循环经济;绿色资源化;电子垃圾;熔池熔炼;资源再生

中图分类号:TF111

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)03-0009-09

doi:10.11792/hj20250302

引言

有色金属(Non-ferrous Metals)一词最早可溯源至1958年第二个五年计划筹备期间王鹤寿提交的《争取有色金属产量的飞跃,占领有色金属的全部领域》报告。有色金属与黑色金属(Ferrous Metals)存在本质区别,黑色金属主要作为钢铁冶炼的基础原料,其分类并非仅基于视觉差异,而是更多地依据工业领域的实际应用进行划分。随着科学技术的不断发展,有色金属的定义已变得更加精确,特指除铁、锰、铬这3种黑色金属及铀等放射性金属之外的金属,包括铜、铝、铅、锌、镍、锡、钽(放射性稀土金属)等59种金属元素,以及硅、砷、硒、碲、硼等5种半金属元素,总计64种元素^[1]。

有色金属产业属于多元领域协同的综合性行业,包括矿石开采、选矿、冶炼、加工及后端产品制造和销售等多个环节^[2]。根据GB/T 4754—2017《国民经济行业分类》,有色金属行业被细分为有色金属矿采选业、有色金属冶炼及压延加工业两大类,以及有色金属铸造这一小类^[3]。

1 有色金属相关政策演变历程

有色金属作为国民经济和国防建设中不可或缺的基础原材料,其产业关联度超过90%,作为中国重要的基础原材料产业,在中国经济建设的稳步推进、国防建设的坚实支撑及高科技新兴产业发展的持续

驱动中,发挥着无可替代的战略作用^[4]。2002年,中国10种常用有色金属产量达到1 012万t,超越美国,位居世界第一。此后,中国有色金属产量稳居世界领先地位。2023年,10种常用有色金属产量达7 469.8万t。据国家统计局数据,2023年有色金属行业同比增长7.5%,增长幅度比工业平均水平高出2.9%;10种常用有色金属的产量首次突破7 000万t大关,同比增长7.1%。其中,精炼铜产量1 299万t,同比增长13.5%,电解铝产量4 159万t,同比增长3.7%^[5]。此外,2023年中国黄金产量为278 t,为全世界黄金产量最高的国家^[6]。在建国初期,中国能够生产开发利用的有色金属仅有铜、铅、锌、锡、锑5种,围绕有色金属的配套工业也尚未发展,全国有色金属产量仅为1.33万t^[7]。根据有色金属产业发展规模与发展过程中存在的主要矛盾,有色金属产业政策变迁历程分为5个阶段^[8]:萌芽奠基期(1949—1962年)、初步完善期(1963—1977年)、改革开放期(1978—2002年)、快速发展期(2003—2015年)、绿色转型期(2016年至今)。2017年后的政策性关键节点^[9-18]如图1所示。

由图1可知:为推动国民经济的高质量发展,有色金属产业正步入绿色转型的关键时期。围绕“绿水青山就是金山银山”的发展理念,2016年,中华人民共和国工业和信息化部发布了《工业绿色发展规划(2016—2020年)》^[19],旨在加强有色金属产业在技术创新、产业结构调整、质量效益提升、绿色发展及资源

收稿日期:2024-09-20;修回日期:2024-12-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907803)

作者简介:张磊(1985—),男,高级工程师,博士研究生,研究方向为稀贵金属资源化利用;E-mail:ecgrixy@chnegri.cn

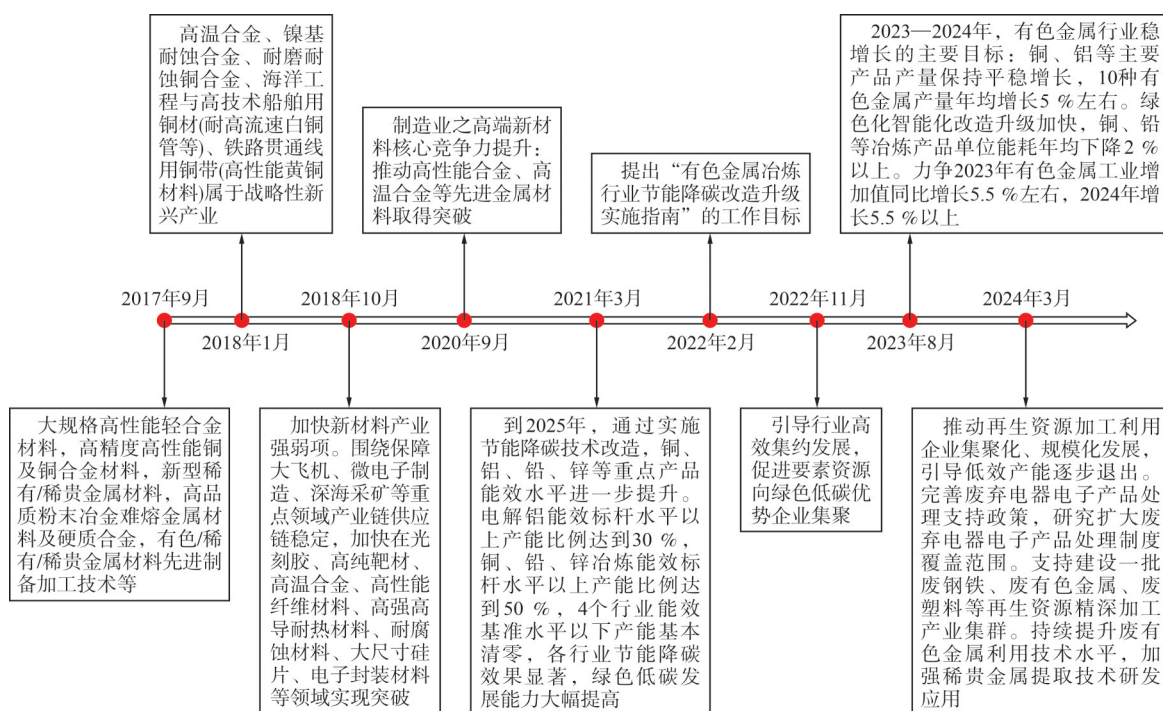


图1 有色金属国家重点研发历程重要节点

Fig. 1 Key milestones in the national R&D of non-ferrous metals

保障等方面的建设。在有色金属产业的绿色环保领域,中华人民共和国自然资源部于2020年颁布了《绿色矿山评价指标》等政策文件,明确提出了有色金属产业绿色可持续发展的政策导向^[20]。同年,中华人民共和国工业和信息化部、中华人民共和国国家发展和改革委员会与中华人民共和国自然资源部联合发布了《有色金属行业智能工厂(矿山)建设指南(试行)》,强调利用大数据等先进技术手段,推动有色金属产业向智能化和现代化方向发展^[21]。随后,中华人民共和国国家发展和改革委员会在2021年发布了关于在重点领域推动节能降碳的文件,以确保“十四五”期间节能减排目标的实现,以及碳达峰、碳中和目标的按时、保质、保量完成^[22]。2023年2月,中华人民共和国国家发展和改革委员会等9部门联合印发了《关于统筹节能降碳和回收利用 加快重点领域产品设备更新改造的指导意见》《家用电器更新升级和回收利用实施指南(2023年版)》。2024年3月,中华人民共和国国务院发布《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》,为废弃电器电子产品回收处理行业的发展提供了坚实的政策支持^[23]。

近年来,中国有色金属产业在新发展阶段中稳步前行,积极推进产业的绿色升级。有色金属资源的循环利用,也被称作“静脉产业”^[24],其核心是在保障环境安全的基础上,借助先进的技术手段,以节约资源和保护环境为目标,将生产和消费过程中产生的废弃物重新投入循环使用,从而形成一个生产—使用—回

收—再利用的闭环发展模式。“静脉产业”是循环经济的一个分支,而循环经济的概念最早可追溯至1989年,由英国环境经济学家大卫·皮尔斯和KERRY TURNER在其著作《自然资源与环境经济学》中提出。“3R”原则是循环经济发展的核心,包括减量化(Reduce)、再利用(Reuse)、再循环(Recycle),这些原则指导循环经济实现资源的高效利用和环境保护^[25]。循环经济的第3个原则即尽可能合理地再生利用资源。具体而言,就是将产品回收至工厂,经过加工后再次用于生产新产品,将废弃物转化为再生资源。在有色金属资源回收方面,相关政策可划分为2个主要方向:一是深化有色金属自然矿产资源的利用,通过提升尾矿中有色金属资源的利用率和提高矿产资源的边界品位,以实现经济价值的最大化;二是对有色金属产品进行回收再利用,通过技术创新激发再生有色金属市场的活力,构建一个完善的有色金属循环经济体系。随着全球各国加速推进再生有色金属产业的发展,世界领先的电子废弃物处理企业,如Umicore、Glencore、DOWA HOLDINGS Co., Ltd. 和 Mitsubishi Materials Corporation 的市场份额合计占比达到了约19%。目前,国内废旧有色金属的回收量(金属量)稳步增长至1450万t,再生铜和再生黄铜原料的进口量增长至190万t,再生铸造铝合金原料的进口量增长至170万t。资本市场对再生有色金属产业的关注度持续上升,根据2023年统计数据,以再生金属为主营业务的企业已超过50家,近3年内有2家企业成功上市,还有3~5家

企业正在进行股份制改革^[26]。与此同时,中国率先实施大规模设备更新和消费品以旧换新行动,不断开拓有色金属产业发展新领域。2024年6月18日,再生金属东南亚国际论坛在泰国曼谷举行,该论坛旨在从全球合作的角度共同探讨产业的使命和未来,帮助各国再生有色金属企业了解政策和市场环境,拓展贸易和投资渠道,促进再生有色金属产业的高质量协同发展^[27]。本文围绕电子垃圾中有色金属的资源化利用的发展现状及其趋势,进行技术层面的汇总与归纳。

2 电子垃圾概述

全球每年产生2 000万~5 000万t的电子垃圾(WEEE),年增长率已达3%~5%,作为一类新兴污染物,电子垃圾所带来的污染问题不容小觑,处理不当不仅会导致环境污染,还可能通过食物链对人类健康产生负面影响。例如:永久性有机污染物在土壤中的累积会破坏土壤生态平衡,并通过农作物的生物富

集作用进入人体。电子垃圾减量化、无害化、资源化处理技术已成为现阶段全球共同探索的重要课题^[28]。根据联合国环境规划署(UNU)、国际电信联盟(ITU)及国际固体废物协会(ISWA)的最新统计数据,2016年全球仅有20%的电子垃圾得到了收集和回收利用^[29],不同国家的资源回收率差别很大。上述情况可以证明,目前电子产品消费模式还不是制造—使用—循环的闭环系统。

全球电子废弃物主要源自发达国家和快速发展国家,其中,中国与美国分别居榜首与次席。目前,中国已经进入电器电子产品增量与存量市场并重的时代。截至2023年,中国首批目录产品的居民保有量为26.7亿台,不同地区的理论报废量^[23]如图2所示。与此同时,50%~80%的电子垃圾最终进入了缺乏相关监管的发展中国家^[30-31]。2012年,全球约70%的电子垃圾都流向了我国,其余部分则流向了印度、巴基斯坦及东南亚和非洲的一些国家^[32]。

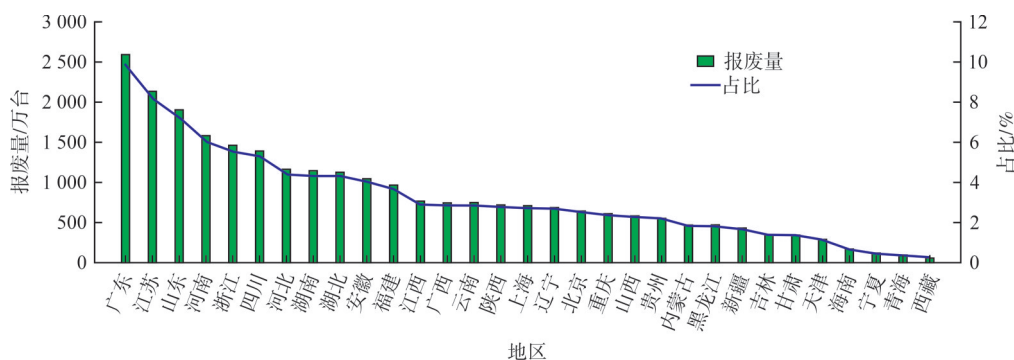


图2 2023年首批目录产品不同地区理论报废量

Fig. 2 Theoretical scrapped volume of the first batch of catalog products by region in 2023

在大多数欠发达国家,回收工作往往缺乏先进的技术与研究方法。这些地区通常依赖于劳动密集型的回收处理方式,主要关注回收高价值金属,如铜和金,而忽视了其他有毒的有色金属(如砷、镉、铅、汞)。在回收高价值金属后,剩余的材料往往被简单地填埋或焚烧,产生了大量有毒物质,对人体、动物和环境造成了无法修复的损害^[33]。显然,这样的处理方式与绿色循环利用的发展理念背道而驰。

3 印刷电路板结构及组成

印刷电路板(PCBs)作为电子垃圾中经济价值最高的功能组件,金属含量远高于自然资源,具有巨大的经济潜力。据估计,2007年中国回收PCBs所得的金属产值达到30亿美元,其中约85%是由稀贵金属贡献的^[34]。2014年,全球WEEE的潜在回收价值已达到560亿美元^[35]。在开发同等产量有色金属(金、银、铜、铝)的情况下,电子垃圾中高值金属的回收成本仅为传统开采、冶炼成本的1/7^[36]。全球每年有

10%的黄金需求可以通过回收电子废弃物来满足^[37]。据估算,国内电子垃圾处理企业每循环利用1t废弃手机和电脑,最终利润高达 $1.56 \times 10^5 \sim 1.75 \times 10^5$ 元^[38]。不同类型的PCBs与典型自然矿物资源金属量 and 经济价值对比^[39]如表1所示。

作为电子废弃物中具有高回收潜力的功能性组件,PCBs因其独特的性质和复杂的成分,与天然矿物有着显著的不同,这使得其回收过程充满挑战。PCBs通常由电器元件(ECs)、丝网印刷、焊接掩模、连接材料、金属涂层及聚合物基板等部分组成^[40-45]。根据GUO等^[46-47]研究,PCBs(包含ECs)一般由40%的金属、30%的塑料和30%的陶瓷构成,而PCBs(不含ECs)则含有30%~50%的金属和50%~70%的非金属。根据层数,PCBs可以分为单层、双层和多层板。依据材料的具体机械性能,PCBs还可以进一步被划分为刚性、柔性或柔—刚复合结构^[48-49],如图3所示。不同结构的PCBs在应用场合上存在差异,而其特殊的层状复合结构会对后续的金属回收工艺

表1 不同类型的PCBs与典型自然矿物资源金属量和经济价值对比

Table 1 Comparison of different types of PCBs with typical natural mineral resources in terms of metal content and economic value

元素	$w(\text{PCBs})$ 金属量/%			$w(\text{自然矿物资源})$ %		金属价格/(元·t ⁻¹)
	PC 主板	智能手机	电视	铜金矿	铜金精矿	
Cu	14.3	13	10	0.4	0.97	7.40×10 ⁴
Al	2.8	1	10	4.5	0.5	1.97×10 ⁴
Pb	2.2	0.3	1	0.1	0.03	1.70×10 ⁴
Sn	—	0.5	1.4	0.002	—	2.20×10 ⁵
Ni	1.1	0.1	0.3	0.001	0.02	1.25×10 ⁵
Pd ¹⁾	124	210	10	—	—	2.20×10 ⁸
Au ²⁾	566	350	20	5.7	490	8.00×10 ⁸
Ag ³⁾	639	1 380	299	22.9	100	7.50×10 ⁶

注:1) $w(\text{Pb})/\times 10^{-6}$; 2) $w(\text{Au})/\times 10^{-6}$; 3) $w(\text{Ag})/\times 10^{-6}$ 。

方案产生影响。

机械物理处理方法是实现PCBs中有色金属资源

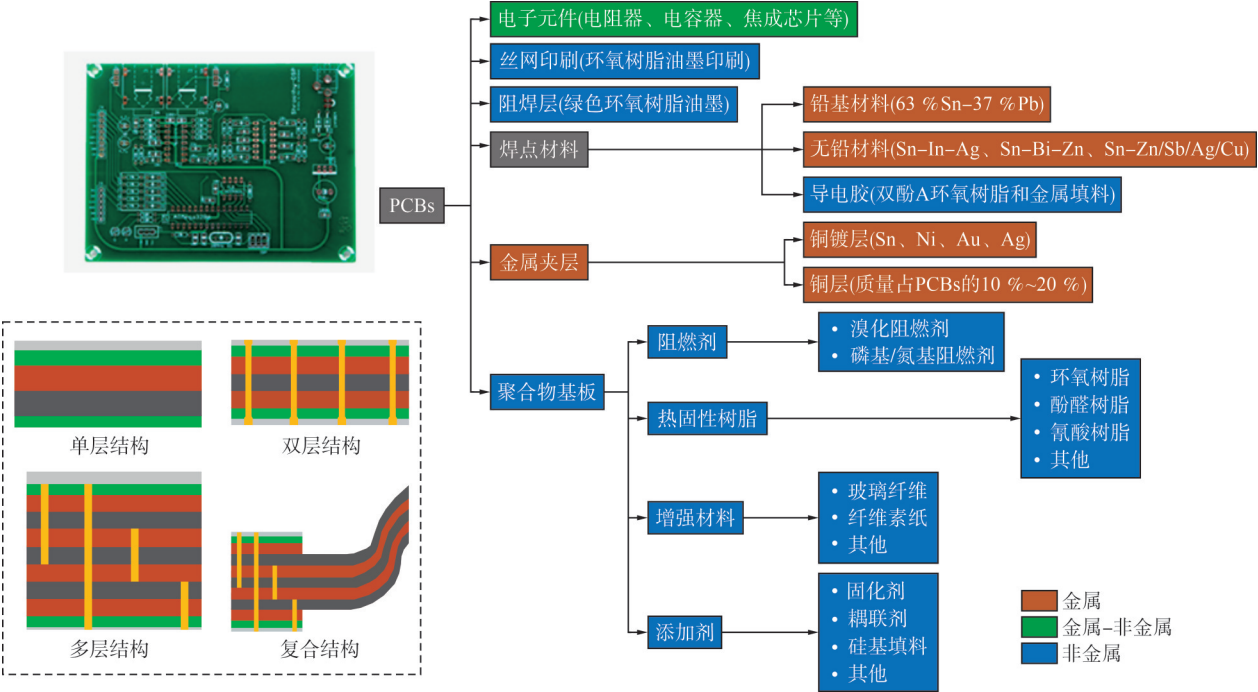


图3 PCBs成分和材料

Fig. 3 Components and materials of PCBs

化不可或缺的步骤。鉴于金属分离效率低,回收率不高,通常仅限于预处理阶段,主要目的是金属富集。机械-物理预处理可以分为3个主要阶段:①拆卸电子元件^[23](如图4所示);②切碎、破碎和(或)磨削;③金属与非金属的分离和富集^[50]。

焊点熔化是一种高效回收锡和铅的方法。目前,最普遍使用的焊料是含有63 %锡和37 %铅的合金,其熔点为183 °C。为实现有效熔化分离,通常采用比焊料熔点高出40 °C~50 °C的加热温度^[51]。然而,当加热温度在270 °C~280 °C会产生有害物质,该工艺的局限性影响了工业化推广。WANG等^[52-53]设计了一种自动系统,包括ECs的拆卸和废气净化,在加热温度265 °C±5 °C、拆卸气缸转速10 r/min、反应8 min时,可

完全去除电视和计算机主板PCBs中的焊料。

4 火法冶金资源化有色金属

4.1 火法冶金现状

火法冶金回收有色金属技术利用冶金炉的高温作用,使非金属成分挥发或形成浮渣从而实现分离。稀贵金属则熔解于其他金属熔体中,以合金形式流出冶金炉。最终得到的粗质合金,再通过火法精炼或电解精炼等方法,实现贵金属与贱金属的分离^[54]。

火法冶金涵盖煅烧、电弧炉或竖炉熔炼、渣金分离/烧结、高温熔融等工序。该方法具有高金属回收率,能够产出纯度相对较低的金属合金。几乎所有类型的PCBs都适用于火法冶金进行处理。

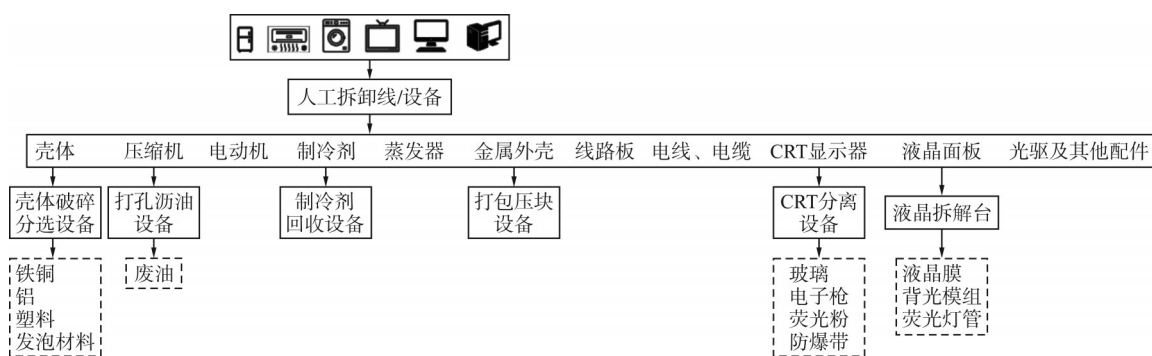


图4 拆卸电子元件

Fig. 4 Disassembly of electronic components

目前,PCBs中有色金属循环利用主流工艺分为火法冶金和湿法冶金两大类。火法冶金工艺因其处理量大和显著的经济优势而被广泛应用,特别是大规模处理PCBs的企业,多以火法为主。相比之下,湿法冶金工艺所涉及的浸出体系难以兼顾不同化学性质的有色金属,通常需要多个工序联合处理,这限制了其在短流程高效回收方面的应用。此外,一些高价值有色金属(如金、铂、钯等)因其化学性质的稳定性,使得现有的绿色湿法冶金工艺仍处于实验室研究阶段,并未在工业规模上得到验证。因此,湿法冶金工艺更多被应用于有色金属的纯化过程。

4.2 传统火法冶金工艺

火法冶金技术已在电子垃圾处理领域得到应用,其显著优势在于能够利用现有的金属冶炼设备,操作简单、处理能力强、回收效率高。它能够与废杂五金、电镀污泥等物料协同冶炼,并且能够最大限度地利用PCBs粉末中的有机物热值。然而,冶金过程的能耗相对较高,且PCBs中含有的溴阻燃剂和有机物在高温下容易产生二噁英、卤化氢等有害物质,因此必须配备废气处理系统以避免严重的二次环境污染。电子废弃物中的陶瓷、玻璃纤维等非金属成分会成为炉渣的一部分,导致炉渣量增加;同时,部分稀贵金属也会夹杂在炉渣中,造成稀贵金属的损失^[55]。因此,降低火法冶金过程的能耗、净化废气污染物、减少冶金渣中稀贵金属的损失,是火法冶金处理PCBs技术的主要研究方向。此外,尽管PCBs经过火法冶金处理后可以实现在贵金属与贱金属的有效分离,但通常纯度不高,需要后续结合湿法冶金纯化工艺以提高纯度。

4.3 熔池熔炼技术

为了解决传统火法冶金技术存在的问题,可通过技术革新,将传统的火法冶金工艺升级为先进的熔池熔炼技术。国际上,熔池熔炼技术已被成功应用于协同处理PCBs,不仅确保了高金属回收率,而且实现了烟气的达标排放。例如:瑞典Boliden公司采用了Rönnskär炉^[56],日本同和公司采用了奥斯麦特炉顶吹熔炼技术来处理手机和计算机线路板,而比利时Umi-

core公司则使用艾萨顶吹炉来处理PCBs和废铜料等^[57]。熔池熔炼工艺处理PCBs的流程主要包括3个阶段:高温热解分离、氧化吹炼富集及吹炼炉渣氧化分解热解尾气。在熔炼过程中,PCBs中的玻璃纤维可作为熔剂,与其他熔剂和杂质一起形成硅酸盐炉渣。这种工艺实现了废物的循环利用,熔池熔炼工艺能够处理万吨级规模的PCBs,非常适合工业化生产。为进一步提高PCBs中有色金属的高效资源化回收率,目前发达国家普遍采用富氧熔池熔炼工艺来处理回收电子垃圾中的有色金属。作为欧洲最大的电子垃圾回收利用企业,Boliden公司Rönnskär冶炼厂采用了卡多炉富氧侧吹熔炼工艺,能够实现每年10万t的处理量,在满足环保标准的同时,最大程度地回收PCBs中的高价值有色金属^[58-60]。比利时Umicore公司的Hoboken冶炼厂循环利用PCBs中有色金属处于全球领跑地位^[61],Hoboken冶炼厂采用IsaSmelt Furnace富氧顶吹熔炼工艺,年均处理25万t PCBs,循环利用17种有色金属,年生产金100 t、银2 400 t、铂族金属50 t、铜3万t、铅12.5万t、镍2 000 t、锡1 000 t^[62-64]。加拿大诺兰达冶炼厂采用硫化铜矿与PCBs(5%~40%)复配物料,该工艺实现了PCBs中多种有色金属的异步回收^[65],工艺流程如图5所示。

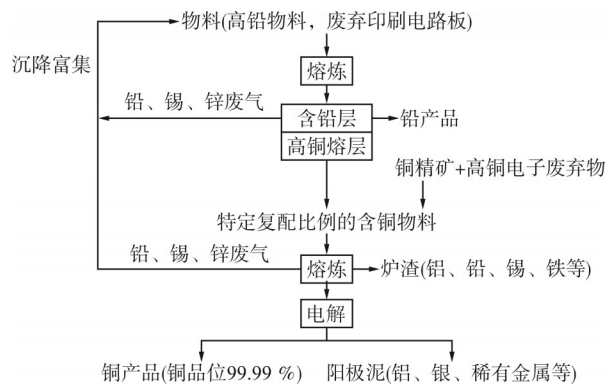


图5 诺兰达冶炼厂处理电子垃圾流程

Fig. 5 Flowchart of Noranda smelter treating e-waste

中国在PCBs资源化利用方面起步较晚。最初,电子垃圾的火法处理工艺主要依赖于人工拆解及使

用鼓风机或反射炉进行冶炼。1999年,中国贵屿镇成为废旧电脑和电子垃圾的知名集散地,当地居民采用传统手工方式拆解电脑,利用硝酸浸泡提取PCBs中的铜、锡、金等金属。电子垃圾的外壳被粉碎成塑料原料出售,而无法再利用的废物则被焚烧或随意露天堆放,这导致了一系列环境和健康问题。该地区的污染程度达到了世界卫生组织允许标准的190倍^[66]。随着环保意识的提升和相关法律的完善,科研人员在技术上不断取得突破,实现了“借绿生金”,提升了绿水青山的“含金量”和金山银山的“含绿量”。截至2000年,中国已经逐步淘汰了小规模反射炉和鼓风机工艺。

作为国内首家采用熔池熔炼技术处理PCBs的企业,中国节能环保集团有限公司以炉渣类型为研究起点,优化工艺后能够获得品位约90%的黑铜,同时金、银等高价值有色金属的捕收率超过95%。在确保资源回收率的同时,实现了低品位含铜炉渣(0.7%以下)的高效排放^[67-68]。2012年,针对社会广泛关注的垃圾焚烧产生二噁英问题,中国恩菲工程技术有限公司牵头承担了国家“863”课题,研发了焚烧废物(气)处置与稳定化控制技术^[69]。通过技术积累,该公司自主研发了侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术(SSC),应用于协同处理PCBs,实现了尾气的无害化处理、资源的无害化利用及综合回收,取得了

多维增益效果^[64,70-71],并已成功应用于浙江金泰莱环保科技有限公司、江西兴南环保科技有限公司等得多个项目^[69]。大冶有色金属集团控股有限公司采用奥斯麦特炉对预处理后的PCBs进行了深入研究,完成了再生资源与原生矿冶炼和铜产品生产的无缝接合,在国内率先建成了以铜为主导的“再生资源—有色金属—有色金属产品—再生资源”全循环产业链项目。经过冶炼、粗炼、精炼、电解工序后,制备了纯度为99.99%的阴极铜,实现了铜资源的高效回收,每处理1 t PCBs的利润可达223元^[72]。NRTS富氧顶吹熔池熔炼技术是中国瑞林工程技术股份有限公司自主研发的PCBs冶炼技术,其稀贵金属再生资源火法冶金炉(NRTS)具有处理能力大、回收率高、能耗低、环保效果好等优点。2016年,NRTS技术在江西瑞林稀贵金属科技有限公司实现落地投产,粗铜产品含铜 $\geq 98.0\%$ 、铜回收率 $\geq 98.5\%$,金、银回收率 $\geq 98\%$,重金属富集率 $\geq 99.9\%$ ^[73]。曾华星等^[74]提出了“富氧熔炼+分段补充氧气二段燃烧技术+急冷脱酸塔+活性炭喷射系统+布袋除尘器+洗涤塔”的方法,这是国内大规模PCBs及再生资源综合利用的前沿二噁英防治技术,该方法可将二噁英排放浓度控制在 0.1 ngTEQ/Nm^3 以下。中国企业自主研发熔池熔炼设备结构示意图如图6所示。

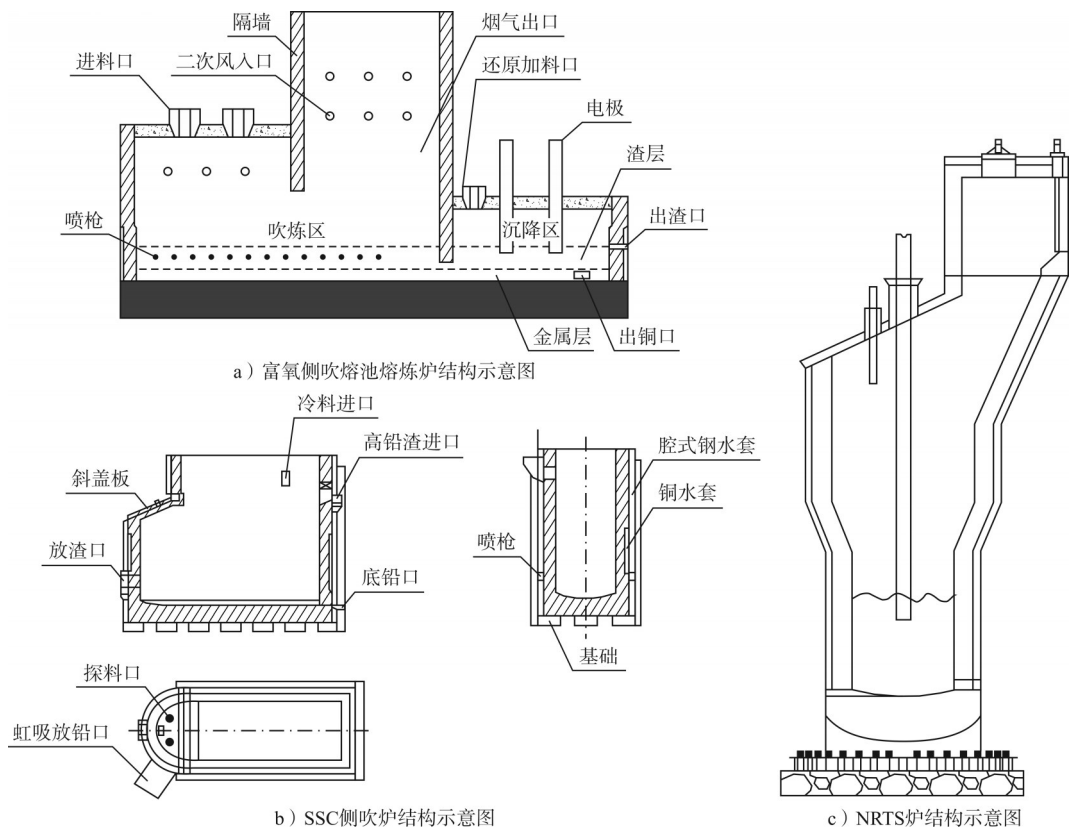


图6 中国企业自主研发熔池熔炼设备结构示意图

Fig. 6 Structural diagram of independently developed bath smelting equipment by Chinese enterprises

4.4 熔池熔炼技术发展方向

熔池熔炼技术是火法冶金处理PCBs中最有效的手段之一,不仅实现了二噁英的防治,还实现了有色金属的高效回收^[75]。尽管初期设备投资较大,但通过与其他技术的协同应用,可以进一步减少能源消耗。结合热解技术,对现有的熔池熔炼工艺进行升级,开发出热解-熔炼强化耦合技术。在热解阶段,PCBs在缺氧条件下被加热至1 200 °C~1 300 °C,这不仅使得陶瓷和有机材料得以回收,还能有效释放低蒸气压金属,同时挥发性金属则通过废气系统回收。高热值的碳源废气可被利用于熔炼过程,从而大幅减少外界所需提供的碳源,实现有色金属的高效回收^[76]。此外,将炉渣、灰尘或废气等转化为高价值副产品,也是热解-熔池熔炼协同技术研究的关键方向之一^[77]。

通常冶炼过程产生的废气中大部分粉尘尺寸小于25 μm,气体排放浓度约为80 μg/m³,略高于允许的空气质量限值75 μg/m³。此外,废气中混有金属粉尘、二氧化硫和氮的氧化物(NO_x)^[78]。将吸收塔引入排气系统,实现金属粉尘的收集^[79],然后改善除尘系统,将生成的二氧化硫气体转化为硫酸,实现废气转化产品^[80]。PCBs冶炼制备1 t铜产生3.7 t CO₂,远远低于常规铜矿资源冶炼过程CO₂的产生量(17 t)。因此,PCBs冶炼显著降低了铜生产过程的碳足迹^[81-84]。

5 结 语

目前,熔池熔炼技术在处理PCBs循环利用有色金属方向取得了可喜成果,不仅拓宽了金属供应路径,减缓矿石资源的开采,还可以保护生态平衡,减少碳排放,实现全球低碳的能源转型,促进金属资源的再利用。

1)目前,国内电子垃圾拆解以人工手动为主,属于劳动密集型产业。人工拆卸制约了工作效率,现有的拆卸设备无法满足不同类型的电子垃圾,研发设计高效、适用性强的自动化拆卸设备日益紧迫。

2)随着中国劳动力成本的不断提高,电子垃圾“预处理—金属冶炼—尾气净化—金属纯化”全流程涉及的装备自动化、智能化需进一步提高。

3)未来熔池熔炼技术处理PCBs资源化利用有色金属的趋势是在保证金属回收率与环保指标的基础上,通过升级现有工艺,构建低温熔炼技术体系,进一步减少能耗与碳排放。

4)由于PCBs中硅含量较高,冶炼厂的矿渣处理面临挑战,难以实现及时处理。解决这一问题的传统方法是采用黑铜熔炼技术,通过调整物料配比(即按特定比例混合PCBs与铜精矿)来提升能源使用效率。然而,电子废弃物处理企业通常位于城市周边,这导

致了铜精矿的运输成本增加。因此,进一步研究PCBs与其他低硅低铜固废资源的混合使用方案,不仅能够实现资源的有效利用,而且有助于企业拓展其收入来源。

[参 考 文 献]

- [1] 王祝堂.有色金属划分方式新进展[J].轻合金加工技术,2021,49(3):59.
- [2] 迟崇哲,刘影,王超,等.有色金属矿山尾矿土壤化生态修复技术研究进展[J].黄金,2024,45(12):8-12,38.
- [3] 中国质检出版社.标准修改、更正、勘误信息 GB/T 4754—2017《国民经济行业分类》更正启事[J].中国质量与标准导报,2017(9):46.
- [4] 柴立元,颜旭,王云燕,等.有色冶金清洁生产技术发展态势[J].有色金属工程,2024,14(7):1-12.
- [5] 鲍仁.十种有色金属产品产量首次突破7000万吨[N].期货日报,2024-01-31.
- [6] 王佳璐.有色产业现状及发展趋势分析[J].中国有色金属,2024(9):38-39.
- [7] 贾明星.七十年辉煌历程新时代砥砺前行——中国有色金属工业发展与展望[J].中国有色金属学报,2019,29(9):1 801-1 808.
- [8] 完成东.政策工具视角下我国有色金属产业政策研究[D].长沙:中南大学,2022.
- [9] 科技部发布《“十三五”材料领域科技创新专项规划》[J].纺织科技进展,2017(6):28.
- [10] 工信部将全面修订铜铝等有色行业规范及准入条件[J].有色冶金节能,2018,34(3):62.
- [11] 战略性新兴产业分类(2018)[J].中华人民共和国国务院公报,2019(5):41.
- [12] 国家发展改革委,科技部,工业和信息化部,等.关于扩大战略性新兴产业投资 培育壮大新增长点增长极的指导意见[EB/OL].(2020-09-08)[2024-10-18].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202009/t20200925_1239582.html.
- [13] 钟山.全国人民代表大会财政经济委员会关于《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》实施中期评估的调研报告——2023年12月26日在第十四届全国人民代表大会常务委员会第七次会议上[J].中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报,2024(1):137-143.
- [14] 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[EB/OL].(2020-11-03)[2024-10-19].https://www.gov.cn/xinwen/2020-11/03/content_5556991.htm.
- [15] 国家发展改革委等四部门印发《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)》[J].上海节能,2022(7):941.
- [16] 王祝堂.《有色金属行业碳达峰实施方案》发布[J].轻合金加工技术,2023,51(1):14.
- [17] 工业和信息化部 国家发展改革委 财政部 自然资源部 商务部 海关总署 国家粮食和储备局关于印发《有色金属行业稳增长工作方案》的通知[J].中华人民共和国国务院公报,2023(31):39-43.
- [18] 三千亿元资金加力支持大规模设备更新和消费品以旧换新再迎“政策包”[J].中国合作经济,2024(9):41-46.
- [19] 段雯娟.未来五年矿业发展新格局 解读《全国矿产资源规划(2016~2020年)》[J].地球,2017(1):71-73.
- [20] 自然资源部.中国矿产资源报告(2021)[EB/OL].(2021-10-22)[2024-11-23].http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202110/t20211022_2699855.html.

- [21] 工业和信息化部 国家发展改革委 自然资源部. 有色金属行业智能工厂(矿山)建设指南(试行)(工业和信息化部 国家发展改革委 自然资源部公告 2020 年 第 19 号)[EB/OL].(2020-11-03)[2024-12-09].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-05/08/content_5509729.htm.
- [22] 史有俊,付永立,赵丙辉,等.X射线荧光光谱法测定废旧电子元器件中的金[J].黄金,2016,37(7):84-87.
- [23] 中国废弃电器电子产品回收处理及综合利用行业白皮书 2023[J].家用电器,2024(7):52-71.
- [24] 王峰.静脉产业助力“无废城市”建设[N].合肥晚报,2024-05-30.
- [25] 王建增.全面把握“3R”原则,推进循环经济健康发展[C]//中国公路学会养护与管理分会.2014 全国公路养护技术学术年会论文集桥隧卷.北京:中国资源综合利用协会,国家发展和改革委员会技术进步的与装备司,2014.
- [26] 崔国强.再生有色金属产业呈增长态势[N].经济日报,2024-11-22(6).
- [27] 齐磊.共促全球再生有色金属产业高质量发展——2024 年再生金属东南亚国际论坛在泰国曼谷召开[J].资源再生,2024(6):60-62.
- [28] 宗磊.废旧电路板中有色金属的机械物理回收技术[J].造纸装备及材料,2021,50(9):64-65.
- [29] HAN Z, WANG N, ZHANG H, et al. Heavy metal contamination and risk assessment of human exposure near an e-waste processing site[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science, 2016, 67(2): 1-7.
- [30] WANG Z H, ZHANG B, GUAN D B. Take responsibility for electronic-waste disposal[J]. Nature, 2016, 536: 23-25.
- [31] SUN B, LI B, YU Y, et al. The recycling potential of unregulated waste electrical and electronic equipment in China: Generation, economic value, and cost-benefit analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 402: 136702.
- [32] ZHANG K, SCHNOOR J L, ZENG E Y. E-waste recycling: Where does it go from here? [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(20): 10 861-10 867.
- [33] AWASTHI A K, ZENG X, LI J. Environmental pollution of electronic waste recycling in India: A critical review[J]. Environmental Pollution, 2016, 211: 259-270.
- [34] LU Y, XU Z. Precious metals recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspective[J]. Resources Conservation and Recycling, 2016, 113: 28-39.
- [35] BALDÉ C P, WANG F, KUEHR R, et al. The global e-waste monitor—2014[R]. Bonn: United Nations University, 2014.
- [36] ZHOU W, LIANG H, XU H. Recovery of gold from waste mobile phone circuit boards and synthesis of nanomaterials using emulsion liquid membrane [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 411(1): 125011.
- [37] TAN Q, DONG Q, LIU L, et al. Potential recycling availability and capacity assessment on typical metals in waste mobile phones: A current research study in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 148: 509-517.
- [38] CUI J, ZHANG L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review[J]. Hazard Mater, 2008, 158(2): 228-256.
- [39] LACOSTE-BOUCHET P, DESCHÊNES G, GHALI E. Thiourea leaching of a copper-gold ore using statistical design[J]. Hydrometallurgy, 1998, 47(2): 189-203.
- [40] ORABY E A, EKSTEEN J J. Gold dissolution and copper suppression during leaching of copper-gold gravity concentrates in caustic soda-low free cyanide solutions [J]. Minerals Engineering, 2016, 87: 10-17.
- [41] HUAN L, ORABY E A, EKSTEEN J J. Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives—A review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 139: 122-139.
- [42] BIRLOAGA I, COMAN V, KOPACEK B, et al. An advanced study on the hydrometallurgical processing of waste computer printed circuit boards to extract their valuable content of metals [J]. Waste Management, 2014, 34(12): 2 581-2 586.
- [43] 张世鏢,李健,赵国惠,等.废弃线路板中金属循环利用技术研究进展[J].黄金,2021,42(3):79-82.
- [44] 张修超,张世鏢,郝福来.废旧电路板压力氧化—氰化提金试验研究[J].黄金,2024,45(6):50-54.
- [45] 杨梦平.全球电子垃圾产生量爆发式增长[J].生态经济,2024,40(6):5-8.
- [46] GUO J, GUO J, XU Z. Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(2): 567-590.
- [47] MARQUES A C, CABRERA J M, DE F M C. Printed circuit boards: A review on the perspective of sustainability [J]. Environmental Management, 2013, 131: 298-306.
- [48] XU Y, LIU J. Recent developments and perspective of the spent waste printed circuit boards [J]. Waste Management & Research, 2015, 33(5): 392-400.
- [49] 曹云华.电子废弃物拆解过程中重金属污染的环境行为与防控策略[J].中国资源综合利用,2024,42(8):186-188.
- [50] CUI H, ANDERSON C. Literature review of the hydrometallurgical recycling of printed circuit boards (PCBs) [J]. Journal of Advanced Chemical Engineering, 2016, 6(1): 142-153.
- [51] DUAN H, HOU K, LI J, et al. Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns[J]. Environmental Management, 2011, 92(3): 392-399.
- [52] WANG J, XU Z. Disposing and recycling waste printed circuit boards: Disconnecting, resource recovery, and pollution control[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2): 721-733.
- [53] WANG J, GUO J, XU Z. An environmentally friendly technology of disassembling electronic components from waste printed circuit boards[J]. Waste Management, 2016, 53: 218-224.
- [54] 齐亚兵.电子废弃物中稀贵金属回收技术的发展现状及研究进展[J].材料导报,2022,36(增刊1):436-443.
- [55] 赵晨阳,王新强.废弃电子器件的回收现状分析[J].湖南有色金属,2018,34(3):62-67.
- [56] THEO L. Integrated recycling of non-ferrous metals at Boliden Ltd. Ronnskar smelter [C]//IEEE. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on, Intelligent Control. Gaithersburg: IEEE, 1998.
- [57] 李冲,徐小锋,黎敏,等.侧吹熔池熔炼废线路板工艺及装置[J].有色金属(冶炼部分),2019(9):87-91.
- [58] PARK H S, KIM Y J. A novel process of extracting precious metals from waste printed circuit boards: Utilization of gold concentrate as a fluxing material [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 365: 659-664.
- [59] MARK F E, LEHNER T. Plastics recovery from waste electrical & electronic equipment in non-ferrous metal processes [C]// Association of Plastics Manufacturers in Europe. Brussels: Belgium, 2000.
- [60] 章俊.瑞典 Boliden 公司循环经济概述及对国内传统冶炼企业

- 的启示[J].有色矿冶,2022,38(3):62-64.
- [61] BRUSSELAERS J, HAGELÜKEN C, MARK F. An eco-efficient solution for plastics-metals-mixtures from electronic waste: the integrated metals smelter [C]// The European Plastics Producers Association. Proceedings of 5TH IDENTIPLAST 2005. Brussels: the European Plastics Producers Association, 2005.
- [62] HAGELÜKEN C. Recycling of electronic scrap at Umicore's integrated metals smelter and refinery [J]. *Erzmetall*, 2006, 59 (3): 152-161.
- [63] HAGELÜKEN C. Recycling of electronic scrap at Umicore precious metals refining [J]. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2006, 12: 111-120.
- [64] 彭浩. 电路板还原熔炼综合回收有价金属实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [65] FARAJI F, GOLMOHAMMADZADEH R, PICKLES C A. Potential and current practices of recycling waste printed circuit boards: A review of the recent progress in pyrometallurgy [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 316: 115242.
- [66] 梁帅表. 电子垃圾的回收和利用技术现状[J]. 世界有色金属, 2018(6): 209-211.
- [67] 邹结富, 刘风华, 丁勇, 等. 熔池熔炼工艺处理废线路板关键技术探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(9): 83-86.
- [68] 王海北. 我国二次资源循环利用技术现状与发展趋势 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(9): 1-11, 7.
- [69] 刘希瞳. 为建设“美丽中国”凝聚恩菲力量——巡礼中国恩菲工程技术有限公司固废处置技术及项目 [J]. 中国有色金属, 2022 (13): 27-34.
- [70] 杨冬伟, 陈正, 郭键柄, 等. 火法熔炼废旧印刷电路板回收有价金属的现状[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(3): 70-74.
- [71] 翟保金. 铜精矿富氧顶吹熔炼协同规模处置废电路板关键技术及应用[R]. 大冶: 大冶有色金属集团控股有限公司, 2020.
- [72] 张永斌. 富氧侧吹熔炼技术处理危险固废应用浅谈[J]. 世界有色金属, 2023(20): 7-10.
- [73] 喻鑫, 陈浩. NRTS炉的设计、制造与应用研究[J]. 有色冶金设计与研究, 2018, 39(6): 76-77, 80.
- [74] 曾华星, 桂双林. 基于电子废料再生利用稀贵金属过程中二噁英的控制分析[J]. 能源研究与管理, 2019(2): 35-37, 46.
- [75] KMENG Y J, ZHAG C Y, LIU Z R, et al. Recycling of waste printed circuit boards: Effect of PCB on aging resistance property of SBR modified asphalt [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 72: 106617.
- [76] GHODRAT M, RHAMDHANI M A, BROOKS G, et al. Techno economic analysis of electronic waste processing through black copper smelting route [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 126: 178-190.
- [77] PRIYA. Electronic waste management and treatment technology [M]. Sebastopol: Elsevier Science, 2019.
- [78] NAVARRA A, WILSON R, PARRA R, et al. Quantitative methods to support data acquisition modernization within copper smelters [J]. *Processes*, 2020, 8: 1 478.
- [79] MENG L, ZHONG Y, GUO L, et al. Accepted manuscript high-temperature centrifugal separation of Cu from waste printed circuit boards [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 831-839.
- [80] WU Q, SUN X, SU Y, et al. Behavior of sulfur oxides (SOX) in non-ferrous metal smelters and implications on future control and emission estimation [J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(15): 8 796-8 804.
- [81] CHAO N, CAROL S K L, DAVID C, et al. Waste Printed Circuit Board (PCB) recycling techniques [J]. *Topics in Current Chemistry*, 2017, 375(2): 43.
- [82] BROWN R M, MIRKOEI A, REED D, et al. Current nature-based biological practices for rare earth elements extraction and recovery: Bioleaching and biosorption [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 173: 113099.
- [83] MAIRIZAL A Q, SEMBADA A, TSE K, et al. Techno-economic analysis of waste PCB recycling in Australia [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 190: 106784.
- [84] FARIBORZ F, CHRISTOPHER A P. Potential and current practices of recycling waste printed circuit boards: A review of the recent progress in pyrometallurgy [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 316: 115242.

Research on resource-based utilization technology of non-ferrous metals in e-waste via bath smelting

Zhang Lei, Hao Fulai, Zhang Shibiao, Wang Xiumei, Zhang Yanming
(Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: Non-ferrous metals are indispensable raw materials for national economic and defense infrastructure. In China, the high external dependency, low ore grades, scarcity of large- and medium-scale mines, costly extraction, and slow natural remediation processes pose significant challenges to the non-ferrous metals industry. This study reviews the evolution of policies related to non-ferrous metals, highlighting the industry's scale and key contradictions. Notably, printed circuit boards (PCBs) contain far higher concentrations of non-ferrous metals than natural ores, offering substantial economic potential. Current large-scale PCB processing predominantly employs bath smelting technology. This paper elaborates on the application of bath smelting for e-waste treatment, including its research progress and global industrialization trends. It systematically summarizes domestic technological achievements, analyzes the status of bath smelting in resource recovery from technical promotion and barrier-breaking perspectives, and discusses the unique characteristics of non-ferrous metal bath smelting. Future development directions are also proposed to provide insights for advancing resource-based utilization of non-ferrous metals in e-waste.

Keywords: non-ferrous metals; circular economy; utilization as green resources; e-waste; bath smelting; resource regeneration