

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.09.001

典型固废资源化与无害化处置技术

王海北, 邹小平, 谢铿, 郑朝振, 刘三平

(矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘要:2021 年我国产出约 110 亿吨固体废弃物, 其中 40 亿吨为工业固体废弃物, 12 亿吨不同程度含有价金属, 具有一定的回收利用价值。重点针对复杂多金属典型固废, 介绍了国内外资源化与无害化处置技术, 包括铜冶炼过程含砷物料、铅锌冶炼渣、废锂离子动力电池、废催化剂、电镀污泥和氰化渣等典型固废。目前, 我国已初步建立了典型固废特别是危废的处置体系, 但存在处置能力不足、技术装备参差不齐、处理不彻底、经济性差等问题, 未来发展趋势将向着规模化、高温无害化、协同冶炼等方向发展。

关键词:固体废弃物; 资源化; 无害化处置; 协同冶炼

中图分类号: X758

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2022)09-0001-08

Technologies of Recycling and Harmless Treatment for Typical Solid Wastes

WANG Hai-bei, ZOU Xiao-ping, XIE Keng, ZHENG Chao-zhen, LIU San-ping

(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: About 11.0 billion tons solid wastes were produced in 2021 in China, in which 4.0 billion tons came from industries, and about 1.2 billion tons solids contained valuable metals with potential comprehensive utilization. This paper focus on typical solid wastes with multi-metals and introduced the technologies of reused and harmless treatment including solids containing arsenic from copper smelters, residues from lead and zinc plant, spent Li battery, spent catalysts, electroplating sludge and cyanide residues. At present, the disposal system of typical solid waste, especially hazardous waste, has been initially established in China, but there are some problems such as insufficient disposal capacity, uneven technical equipment, incomplete treatment, and poor economy etc. The future development trend will be toward large-scale plant, harmless with high temperature, and collaborative smelting.

Key words: solid wastes; recycling; harmless treatment; collaborative smelting

我国是农业、工业生产大国, 且人口众多, 2021 年产出的固体废弃物总量超过 110 亿吨, 其中工业固体废弃物产生量在 40 亿吨左右, 其中含有价金属的固废约 12 亿吨, 危险固体废弃物约 0.8 亿吨。

固废种类繁多, 分布广泛, 成分复杂多变, 作为多种毒害物质的混合物, 其污染具有长周期、叠加性和复杂性等特征, 安全处置和综合利用远未达到理

想水平。固废资源化与无害化处置已引起国家高度重视, “十九大”提出要建立生态文明和美丽中国目标。 “十三五”以来, 固废产生总量仍将在短期内呈现增长的趋势。欧、美、日等发达国家和地区已全面实现工业化, 处于以高端制造业为主、工业固体废物排放大幅削减的阶段, 而我国仍处于工业化转型阶段, 亟需建立固废资源化与无害化处置体系。

收稿日期: 2022-07-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2902800)

作者简介: 王海北(1972-), 男, 正高级工程师, 博士生导师

又开发了常压-加压联合浸出流程(图2),将白烟尘在常压下硫酸浸出,铜、锌、砷等易浸出物质进入溶液,浸出液与砷滤饼、黑铜泥浆化后送入加压釜进行加压浸出,铜、砷、锌等分解进入溶液,铅、铋、金、银等留在渣中。

加压浸出渣采用侧吹炉进行还原生产铅铋合金,经过除铜和真空蒸馏脱锡后电解生产电铅,金银等贵金属从阳极泥中综合回收。该方法已在铜陵有色集团建成投产年处理40 kt白烟尘和5.6 kt硫化砷渣的工厂。

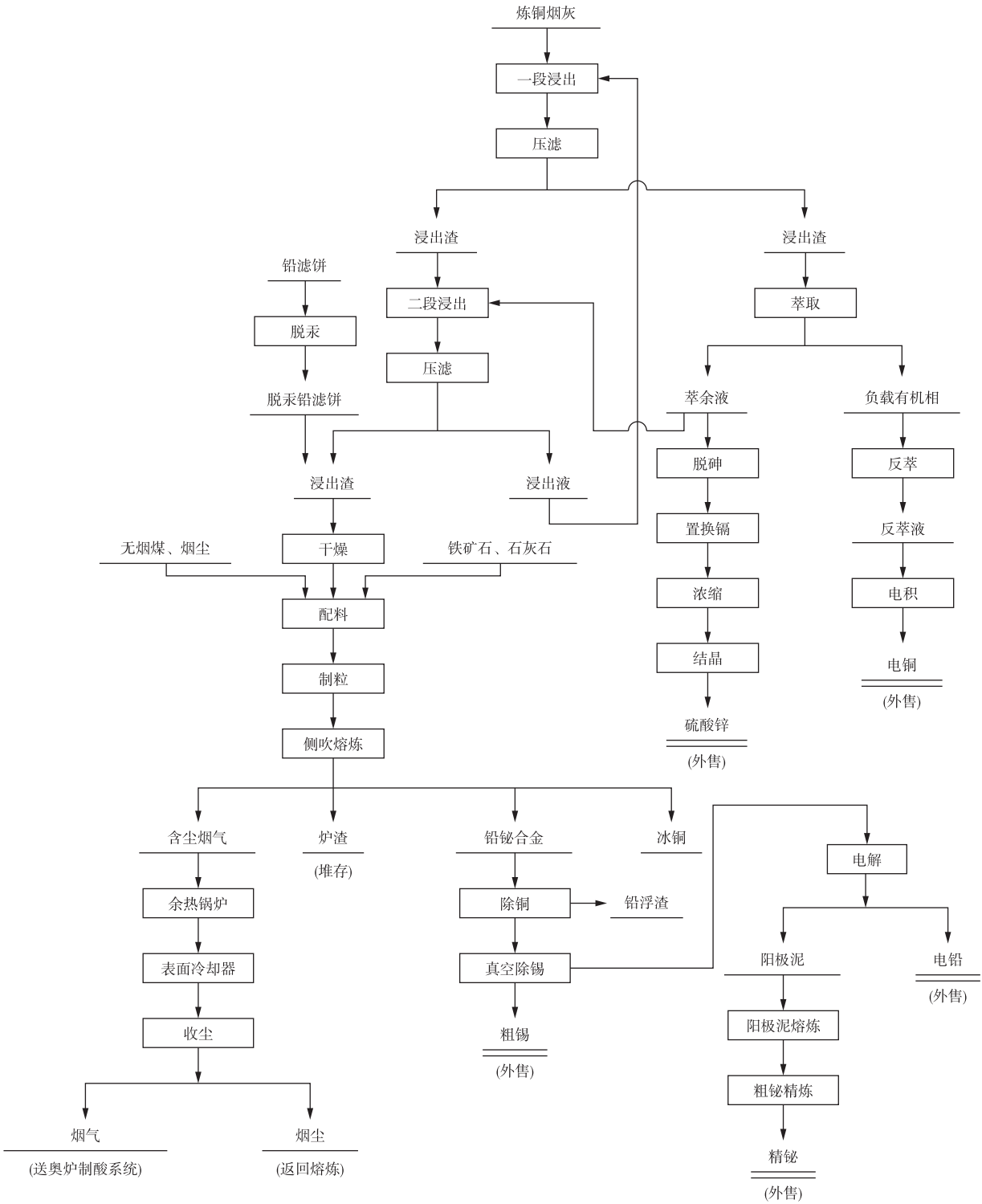


图2 常压-加压联合浸出法工艺流程

Fig.2 Process flow of atmospheric pressure-pressure combined leaching method

1.3 置换浸出法

该方法利用硫化铜和硫化砷溶度积差异,实现铜冶炼过程含砷物料的协同处理,将污酸、废电解液等需要处理的含铜溶液与含砷物料进行浆化浸出,砷、锌等被溶解进入溶液,铜等其它有价金属进入浸出渣中,该渣可送熔炼系统配料,也可以单独处理回收稀贵金属。

近3年来,矿冶科技集团又开发了含砷物料直接固化技术,已在紫金矿业实现工程化应用。正在研究含砷物料高温熔炼和选择性收尘直接制备金属砷先进技术与装备。

1.4 汞无害化处置技术

在重金属冶炼过程中,汞通常在高温条件下进入烟气,目前是从冶炼烟气通过收尘进入铅滤饼当中,该危废年产生量约10 kt左右,对于一个冶炼厂每年产生量在200~500 t。主要的处理工艺是采用回转窑等设备进行挥发,汞再次进入烟气,再通过湿法捕集得到粗汞产品。

矿冶科技集团开发了一种汞的吸附剂,可直接从冶炼烟气中有效吸附汞,得到汞的富集物进行销售。汞的吸附率超过99%,吸附后液含汞低于1.0 mg/L。

未来,铜冶炼过程固废的主要发展趋势包括:1)危废源头减量技术,从源头实现砷等杂质的高温固化;2)冶炼过程优化控制,通过流程优化和精细化管理,提高物料在整个铜冶炼系统的自循环能力,最终实现只产出1至2种固废开路循环积累的有价金属和杂质;3)高温熔炼资源化与无害化技术、高温等离子等技术将在工业化上得到应用。

2 铅锌冶炼渣处理技术

含铅锌的固废主要有锌浸出渣、铅银渣、铁矾渣、钢厂含锌烟灰、废铅膏等,目前处理工艺主要有回转窑挥发、转底炉挥发、高温熔炼法等^[5-11]。

2.1 回转窑还原挥发

该方法在锌冶炼中应用最普遍,通常用来处理锌浸出渣、铁矾渣、钢厂烟灰等物料,配入一定量的焦炭或煤作为还原剂和热源,在1250℃高温条件下,铅、锌、铜等易挥发物质进入烟气,经过收尘获得次氧化锌产品。回转窑渣可进行选碳、选铁,碳返回配料循环使用,铁精矿含铁达到65%以上作为铁原料销售。选矿尾渣销售给水泥厂作为熟料使用。该方法铅、锌、铜、镉、铁回收率分别达到88%~90%、90%~92%、70%~75%、55%~60%

和65%~70%。

该工艺优点是技术装备成熟可靠,生产灵活易于组织,不足之处在于能耗偏高,设备控制水平有待提高。

2.2 转底炉还原

转底炉最早试图应用于炼铁和炼镍铁,但都不是特别成功。近年来,该方法在处理钢厂含锌烟灰上得到推广应用,我国宝武湛江钢铁、沙钢、济钢、日照钢铁、韶钢等均采用转底炉处理含锌烟灰。该方法以烟灰中残留的碳为还原剂,通常还需额外配入一定量的焦炭作为还原剂和热源,在1400~1450℃条件下进行还原,锌等易挥发物质进入烟气,经冷却收尘后得到次氧化锌烟尘。转底炉渣经过分离铁后返回炼铁工序,最后的尾渣可作为水泥原料使用。

该方法优点是在高温下处理钢厂烟灰,锌、铁回收率高,可分别达到95%、90%以上,明显高于回转窑工艺,同时可充分利用烟灰中的残碳,减少能源消耗。不足之处在于投资明显高于回转窑工艺,设备的床能率有待进一步提高,能耗需进一步降低。

2.3 高温熔炼法

该方法是采用顶吹或侧吹熔池熔炼技术处理含铅锌银多金属物料,在铅冶炼中已广泛应用于高铅渣贫化工序,在处理铅锌固废/危废方面也逐渐得到推广应用。

1995年,韩国温山冶炼厂首先将Ausmelt高温熔炼法应用于处理含铅锌固废中,采用两台Ausmelt炉,一段熔炼、二段烟化,锌、铅、铜、银回收率分别达到82%、93%、55%和86%,其中在第一段熔炼炉中回收率分别为61%、82%、6%和65%,第二段烟化炉中回收率分别为55%、60%、49%和60%。我国在内蒙兴安铜锌冶炼有限公司建成了顶吹熔炼处理含铅锌固废的工厂,西部矿业香河公司、白银公司第三冶炼厂、汉中八一锌业等采用侧吹熔炼法处理铅锌固废,其中西部矿业采用侧吹熔炼处理加压浸出渣获得成功。

在废铅膏处理方面,侧吹熔炼法在浙江天能集团、河南金利、湖南郴州丰越环保等企业得到产业化应用。采用一段或两段侧吹熔炼炉得到粗铅,低浓度SO₂烟气采用非稳态制酸技术进行处理。

未来,铅锌冶炼渣的处理将向着高温火法方向发展,并在多元有价金属综合回收能力方面得到进一步提升。矿冶科技集团牵头的团队正在研发废铅膏直接湿法短流程清洁转化技术开发,有望获得突

破。该技术将直接从废铅膏制备电池所需要的氧化铅和金属铅,无需通过高温火法熔炼,大大缩短了流程,降低了能耗,而且酸也可提纯再生成电池级稀硫酸。

3 废锂离子动力电池回收技术

随着我国新能源汽车和储能行业的快速发展,废锂离子动力电池的回收利用成为热点,退役动力电池的回收利用包括电池收集与转运、检测与梯次利用、拆解、破碎—分选和湿法再生等环节。关于退役电池的最终去向尚不是特别明朗,但随着新能源汽车生产责任者延伸制的颁布和实施,车企成为了动力电池回收渠道的焦点,计划从事梯次利用和动力电池回收行业的企业纷纷与车企签订战略合作协议。

目前,废锂离子动力电池回收技术主要包括精细拆解—正极材料修复和破碎—分选—湿法再生两大类,高温火法直接再生尚在实验室研究阶段。精细拆解—正极材料修复主要研究对象集中在磷酸铁锂,国内已有小规模生产线,通过将正极、负极精准分离,然后正极材料添加锂盐通过烧结提高材料性能,磷酸铁锂修复后主要用于电动车或小型储能站。

磷酸铁锂回收利用的关键是回收锂,其可回收利用价值与碳酸锂市场价格密切相关,在锂价格较低或正常情况下,磷酸铁锂回收价值一般,报废的电池通常需要委托有资质的单位进行处理。但随着碳酸锂价格飙升,磷酸铁锂回收利用近期也成为研究的热点,主要方向是优先提锂,然后生产碳酸锂,其核心是如何深度脱除铝、钙、镁、磷、铁等杂质,提锂后的残余物可生产磷酸铁产品。

三元动力电池的回收利用比磷酸铁锂明显要复杂,目前主要研究的重点有以下几个方面^[12-13]:1)拆解方式与自动化控制水平;2)放电方式与带电破碎;3)有机质处理方式及无害化;4)优先提锂;5)镍钴锰短流程再生;6)负极石墨提纯。

目前已经建成的电池拆解线仍然以人工和机械化为主,研究机构根据电池正向组装流程,正在研究逆向全自动化拆解技术,但离工业化应用还有一定差距。在精准拆解方面国内研究也较多,其难点主要在于电池类型、形状和性状差异性较大,如何能够适应大部分电池类型是要解决的难题。精准拆解是未来重要的发展方向之一,因为精准拆解为材料直接修复和短流程再生提供了条件,正极材料、负极材料中的夹带的杂质将大大减少,后续修复或湿法再

生成本将显著降低。

放电方式主要有盐水浸泡、回馈式放电和物理负载放电三种,盐水放电简单易行、投资低,但会产生大量废水,在放电过程中会产生腐蚀,气味较重。回馈式放电采用放电柜的模式,80%的电可以实现再利用,但放电柜效率低、投资大。物理负载放电简单、投资省,但电得不到利用,且导致周围环境温度升高,存在安全隐患。目前已经建成的生产线主要采用盐水浸泡或缺氧带电破碎的方式,其它两种放电模式尚未得到工业应用。

在电池中,约有3%~5%的有机质需要处理,包括电解液、黏结剂等,现在的研究主要集中在热解法和萃取法。哈尔滨工业大学对萃取法回收电解质进行了研究,取得了一定进展,大部分电解质可被分离纯化。热解法是更为普遍的方法,在400~500℃条件下,六氟磷酸锂、黏结剂等被分解,转化为氟化锂和氟化磷等物质,部分进入烟气,再通过烟气洗涤吸收进入溶液中,氟化锂则进入热解渣中,这也是导致热解过程中脱氟不彻底的主要原因,热解渣含氟通常在1.0%~2.0%。

优先提锂是研究者关注的重点,也是近年来研究较多的方向,在三元正极材料中,镍钴锰锂形成较为稳定的四元结构,必须破坏其晶格结构使其塌陷或者解离,锂才能被释放出来。目前优先提锂研究较多的方法有碳热还原法、氢还原法、盐类焙烧法等,碳热还原法是在600~700℃条件下,通过还原性气氛将镍钴锰锂中的高价镍钴锰还原为二价甚至金属态,晶格结构被破坏后锂转化为氧化锂或碳酸锂,然后水浸锂进入溶液中。氢还原法原理与碳热还原法相同,只是还原剂不同,采用氢气的好处是属于清洁能源,减少CO₂排放,不足之处是安全措施要求更高,还原气氛不容易控制。盐类焙烧也是研究较多的方向,通过加入不同的添加剂,实现晶格间的元素替代,使得锂被释放出来,水浸后锂进入溶液。该方法锂回收率较高,但由于锂原子量较小,盐类添加比例较大。目前已经建成投产的优先提锂工厂,锂的回收率已经可达到85%~90%,但仍有提高的空间。

镍钴锰湿法再生是整个电池回收的关键环节,国内采用破碎—分选产出的黑粉进行生产的工厂已经比较多,目前主要采用硫酸浸出—中和除铁铝—萃取除杂—萃取分离的主工艺流程,该工艺技术成熟可靠,但工艺流程较长,特别是需要进行萃取除杂和萃取分离,产出大量的高盐废水需要进行处理。

国内已开始研究镍钴锰短流程再生技术,未来有望取得突破。

在破碎—分选过程中,由于正极和负极材料粒度很细,导致正负极难以通过选别的方式分开,后续湿法再生过程中负极石墨将进入浸出渣中,该渣残留有镍钴锰等重金属,被列为危废的行列需要单独处理。国内研究机构采用超高温法除杂提纯生产4N级石墨,然后用于轮胎等其它行业。或采用湿法提纯法氢氧化钠—盐酸浸出法。

4 废催化剂处理技术

我国每年废催化剂产生量超过80万吨,包括FCC、SCR、废加氢、重整、钯碳、含银、含钒催化剂等,卸载后的部分废催化剂首先经过清洗、修复之后还可以循环使用,FCC催化剂也首先通过磁选等预处理方式将符合性能要求的部分催化剂返回使用,其它报废的废催化剂进入处理环节。

FCC催化剂量大,但回收利用价值低,一般含有1%~2%镍、0.5%~1.0%钒、3%~5%钼和铈等稀土元素,该催化剂以无害化处置为主,目前多采用填埋、高温焙烧、高温熔炼等方式进行无害化处理。SCR脱硫脱硝催化剂含有钨、钼、钒、镍等有色金属,回收利用价值比FCC要高,近年来国内中科院过程所、矿冶科技集团等针对SCR催化剂研究较多,开发了焙烧—碱浸—酸浸—分离提纯等技术,SCR废催化剂首先在800~900℃条件下进行直接焙烧或钠化焙烧,焙烧后的物料先用碱浸分离钨、钼,从浸出液中再进行钨钼分离。浸出后液采用硫酸浸出钒、镍,然后沉钒、沉镍,实现SCR废催化剂的有色金属回收利用。国内北京工业大学也在研究载体制备光催化材料的技术,已完成了实验室阶段性试验。

废加氢催化剂含镍钴钨钼等有色金属较高,可达到20%~30%,具有很高的回收利用价值,国内已有相关企业采用焙烧或钠盐焙烧,碱浸、酸浸联合流程来回收镍钴钨钼,该技术成熟度高,流程易于操作,投资低,不足之处在于产出大量的废水需要处理,载体难以循环利用。国内中南大学、矿冶科技集团等单位开展了大量研究,开发了废加氢催化剂载体直接溶解、氧化铝制备、镍钴产品制备、钨钼分离及其产品制备等新技术。矿冶科技集团研究了采用高温熔炼法富集分离镍钴钨钼等有色金属,回收率均在90%以上。

贵金属催化剂每年产出量在5 000~10 000 t,但含有铂钯铑银等贵金属,回收利用价值很高,也是目前循环再生比例最高的废催化剂种类。国内主要的处理工艺分为火法和湿法两种,以贵研铂业为代表的火法冶炼工艺是采用高温等离子炉处理废汽车催化剂,年处理量接近2 000 t,以铁为捕收集,将铂钯铑富集在铁合金中,铂钯铑捕收率可分别达到98%、98%和93%。以江苏北矿金属循环利用科技有限公司为代表的全湿法工艺,采用硫酸法首先溶解载体氧化铝,然后生产净水剂。浸出渣采用硝酸+盐酸混酸浸出铂钯,浸出液离子交换分离富集铂和钯,生产硝酸铂、硝酸钯、氯化铂、氯化钯或铂粉、钯粉等产品。

5 电镀污泥处理技术

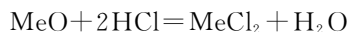
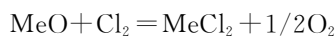
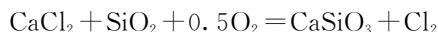
电镀污泥含有铜、镍、锌等有色金属,同时含有铬等有毒有害重金属元素,目前主要采用湿法浸出一火法无害化的工艺,电镀污泥首先进行硫酸浸出,铜、镍、锌、铬溶解进入溶液,首先中和除铬和铁,可作为生产铬铁合金的原料。除杂后液萃取—电积生产阴极铜,萃铜余液继续采用萃取回收锌和镍,分别获得硫酸镍和碳酸锌产品^[14-16]。

矿冶科技集团开发了高温还原熔炼和协同冶炼技术,在高温下生产冰铜或合金,中间富集物再进一步分离提取有色金属^[17]。

6 氰化渣处理技术

氰化提金仍然是黄金冶炼的主要工艺,产出的氰化渣不仅含有氰根等有毒有害物质,还含有3~5 g/L金需要回收利用。对于含金较低的全泥氰化尾渣,主要以堆存或双氧水破氰为主,对于焙烧—氰化产出的氰化渣,国内开展了大量研究,开发了磁化焙烧—磁选回收铁,铅锌等进入烟气经收尘获得次氧化锌^[18-20]。矿冶科技集团开发了氰化渣氯化挥发技术,在800~900℃加入氯化钙等进行挥发,金、银挥发率可分别达到99%和90%^[21]。

发生的主要化学反应有:



氯化挥发技术已在国内建成投产3座工厂,金、银回收率可分别达到85%和80%以上。

7 结语

我国是工业生产大国和矿产品消费大国,在生产过程中产出大量的固废/危废需要资源化利用和无害化处置,虽然我国已经建成了超过8 000万吨危废处置能力的工厂和一般固废综合利用工厂,但总体来看,以低端利用为主,高值化利用较少,且存在小、散、乱,技术装备参差不齐,处理不够彻底,二次污染风险高等问题。未来发展趋势首先是要提高现有生产性企业就地处置能力,通过工艺过程优化和精细化管控,实现中间物料在生产系统内的自循环和危废不出厂的目标。协同冶炼是未来主要发展方向之一,通过已有冶炼厂或新建综合性固废/危废处置厂,协同处理10~15种以上冶炼过程中间物料和二次资源物料,充分利用富裕产能,提高企业竞争力,实现高质量发展。

参考文献

- [1] 魏栋,刘士祥,董广刚.铜冶炼含砷物料处理技术研究进展[J].铜业工程,2021(5):34-38.
WEI D, LIU S X, DONG G G. Research progress of arsenic-containing materials treatment technology in copper smelting [J]. Copper Engineering, 2021 (5): 34-38.
- [2] 黎渡.铜冶炼含砷固体废物处置现状与展望[J].铜业工程,2021(5):27-29.
LI D. Disposal status and prospect of arsenic-containing solid waste from copper smelting [J]. Copper Engineering, 2021(5):27-29.
- [3] 鲁兴武,何国才,程亮,等.铜冶炼白烟灰选择性浸出新工艺研究[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2015,40(4):1-5.
LU X W, HE G C, CHENG L, et al. Study on new process of copper smelting ESP dust with selective leaching[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 40(4):1-5.
- [4] 蒋开喜,王海北,王玉芳,等.铜冶炼过程中硫化砷综合利用技术[J].有色金属科学与工程,2014,5(5):1-5.
JIANG K X, WANG H B, WANG Y F, et al. Comprehensive utilization technology of arsenic sulphide slag in copper smelting process[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2014, 5(5):1-5.
- [5] 刘三平,王海北,蒋开喜,等.含锌铁矾渣的回收利用[J].矿冶,2009,18(1):23-28.
LIU S P, WANG H B, JIANG K X, et al. Utilization of jarosite containing zinc [J]. Mining and Metallurgy, 2009,18(1):23-28.
- [6] 杨泽,崔雅茹,郝禹,等.资源化消纳高浸铅银渣底吹+侧吹炼铅工艺优化[J].过程工程学报,2020,20(11):1304-1312.
YANG Z, CUI Y R, HAO Y, et al. Optimization on bottom blowing + side blowing lead smelting for utilizing of lead-silver leaching residues [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020,20(11):1304-1312.
- [7] 欧志光.富氧侧吹熔池熔炼处理低品位含铅物料问题分析及措施[J].湖南有色金属,2017,33(6):37-40.
OU Z G. Measures and problems oxygen-enriched side-blown melting of lowgrade lead bearing materials[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2017,33(6):37-40.
- [8] 杨伟,何勇毅,代龙果,等.锌冶炼渣搭配铅精矿侧吹还原熔炼直接炼铅渣型理论研究[J].有色金属(冶炼部分),2021(6):10-17.
YANG W, HE Y Y, DAI L G, et al. Fundamental research on slag type of zinc leaching residue with lead concentrate in lead smelting by side blowing reduction [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(6):10-17.
- [9] 徐万刚,李文龙,王鹏飞.顶吹炉处理锌浸出渣工艺技术产业化实践[J].中国有色冶金,2018,47(5):6-9,12.
XU W G, LI W L, WANG P F. Commercial production practice of zinc leaching residue treatment process by top-blowing furnace[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018,47(5):6-9,12.
- [10] 保自坤,陈学刚,庄福礼,等.富氧顶吹熔炼-侧吹还原熔炼直接炼铅工艺搭配处理低品位铅锌共生氧化矿生产实践[J].中国有色冶金,2014,43(6):5-9.
BAO Z K, CHEN X G, ZHUANG F L, et al. Operational practices of oxygen-enriched top-blown smelting and side-blown reduction smelting lead process for treating low-grade Pb-Zn paragenic oxidized ore[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2014, 43(6):5-9.
- [11] 蒋荣生,柴立元,贾著红,等.烟化法处理铅锌冶炼渣的生产实践与探讨[J].云南冶金,2014,43,(1):58-61.
JIANG R S, CHAI L Y, JIA Z H, et al. Production practice and discussion on treating lead and zinc smelting slag by fuming process [J]. Yunnan Metallurgy, 2014,43,(1):58-61.
- [12] 李丽,来小康,慈松,等.动力电池梯次利用与回收技术[M].北京:科学出版社,2021.

- LI L, LAI X K, CI S, et al. Cascade utilization and recovery technology of power battery [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [13] 余海军, 谢英豪, 张铜柱. 车用动力电池回收技术进展[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(2): 448-460.
YU H J, XIE Y H, ZHANG T Z. Technical progress on power batteries recovery for electric vehicle[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(2): 448-460.
- [14] 袁文辉, 徐志峰. 混合电镀污泥中铬铁的选择性分离工艺[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(9): 55-58.
YUAN W H, XU Z F. Selective separation technology of chromium and iron from mixed electroplating sludge[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2016(9): 55-58.
- [15] 杨卜, 袁文辉, 马保中, 等. 电镀污泥微波干燥预处理试验研究[J]. 环境科技, 2013, 26(1): 1-3.
YANG B, YUAN W H, MA B Z, et al. Study on the experiment in solution of electroplating pretreatment by microwave drying[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 26(1): 1-3.
- [16] 赵晶磊, 王岱, 杨占昆. 电镀污泥的资源化利用技术及实例研究[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(3): 96-98.
ZHAO J L, WANG D, YANG Z K. Study on recycling technology and examples of electroplating sludge[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(3): 96-98.
- [17] 李强, 赵峰, 杨卜, 等. 电镀污泥多金属资源化利用研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(4): 63-65.
- LI Q, ZHAO F, YANG B, et al. Study on multi-metal resource utilization of electroplating sludge [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2016(4): 63-65.
- [18] 王先华. 氰化尾渣无害化处理回收技术研究[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(12): 22-24.
WANG X H. Study on harmless treatment and recovery technology of cyanide tailings [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(12): 22-24.
- [19] 袁嘉声, 畅永锋, 郑春龙, 等. 氰化尾渣脱氰技术综述[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(6): 1568-1581.
YUAN J S, CHANG Y F, ZHENG C L, et al. Review on treatment technologies of cyanide tailing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(6): 1568-1581.
- [20] 丁剑, 叶树峰. 焙烧氰化渣氯化挥发提金的研究[J]. 黄金科学技术, 2014, 22(4): 113-117.
DING J, YE S F. Research on gold recovery from residue of roasting-cyaniding process by chloridizing roast[J]. Gold Science and Technology, 2014, 22(4): 113-117.
- [21] 韦其晋, 袁朝新, 刘大学, 等. 贵州某金矿氰化尾渣氯化挥发回收金试验 [J]. 有色金属工程, 2014, 4(3): 45-47.
WEI Q J, YUAN C X, LIU D X, et al. Gold recovery by chlorination volatilization of cyanide tailings from a gold mine in Guizhou [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2014, 4(3): 45-47.