doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.11.020

锌浸出渣综合利用技术适用性评估

楚敬龙[1],席利丽[2],谈浩[3],刘楠楠[1],谭海伟[1],刘芳[1]

(1.矿冶科技集团有限公司,北京 100160;
2.白银有色集团股份有限公司,甘肃 白银 730900;
3.甘肃厂坝有色金属有限责任公司 成州锌冶炼厂,甘肃 陇南 742508)

摘要:针对锌浸出渣产量大、环境危害性高、富含可利用的有价金属、综合利用技术种类多而缺乏适用性评估等问题,通过分析多种锌浸出渣综合利用技术的优缺点及现状,构建了锌浸出渣综合利用技术评价指标体系,并采用定量评价方法,计算了各种锌浸出渣综合利用技术的加权平均综合指数,给出了推荐和可行两个层次的综合利用技术分类,可为锌冶炼厂的工艺选择或提标改造提供借鉴。

关键词:锌浸出渣;综合利用;指标体系;综合指数

中图分类号:X758 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-7545(2022)11-0134-07

Evaluation of Applicability of Comprehensive Utilization Technology for Zinc Leaching Residue

CHU Jing-long[1], XI Li-li[2], TAN Hao[3], LIU Nan-nan[1], TAN Hai-wei[1], LIU Fang[1]

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
2. Baiyin Non-ferrous Group Co., Ltd., Baiyin 730900, Gansu, China;
3. Chengzhou Zinc Smelter, Gansu Changba Non-ferrous Metals Co., Ltd., Longnan 742508, Gansu, China)

Abstract: Address to high yield of zinc leaching residue, high environmental harm, rich in available valuable metals, many kinds of comprehensive utilization technology and lack of applicability evaluation, the advantages, disadvantages and current situation of various zinc leaching slag comprehensive utilization technologies were analyzed. The evaluation index system of zinc leaching slag comprehensive utilization technology was established. The weighted average comprehensive index of various zinc leaching slag comprehensive utilization technologies by quantitative evaluation method was calculated, and taxonomy of recommended and feasible comprehensive utilization technologies were provided. It can provide reference for process selection or upgrading of zinc smelter.

Key words: zinc leaching residue; comprehensive utilization; indicator system; comprehensive index

锌冶炼技术主要有火法和湿法两大类,其中湿法炼锌占锌冶炼总量的85%以上,是当今炼锌的主要方法。世界各国的湿法炼锌主干流程是相同的,均为浸出—净化—电积—熔铸[1-2]。根据浸出过程不同,湿法炼锌分为部分湿法和全湿法,部分湿法炼锌工艺是指在浸出之前需先进行火法焙烧,将硫化锌精矿进行焙烧脱硫得到氧化锌焙砂,再进行浸出。全湿法炼锌工艺是指将硫化锌精矿在一定的温度、

收稿日期:2022-10-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1902803)

作者简介:楚敬龙(1983-),男,硕士,正高级工程师

酸度、氧压条件下进行直接浸出。部分湿法炼锌工艺包括常规法和高温高酸法,常规湿法炼锌是指锌精矿经过沸腾焙烧得到焙砂,焙砂经过中性浸出和低酸浸出后,再经净化除杂、电积、熔铸得到合格电锌;高温高酸法炼锌是将常规法中的低酸浸出改为热酸(超热酸)浸出。由于热酸浸出在提高锌回收率的同时也增加了浸出液中铁的浓度(高达 30 g/L),严重影响锌的冶炼[3],因此高温高酸法炼锌工艺中需增加除铁环节,根据除铁过程不同,高温高酸法又分为黄钾铁矾法、赤铁矿法、针铁矿法。全湿法炼锌工艺包括加压氧浸工艺和常压氧浸工艺,在直接浸出过程中,精矿中以硫化物形态存在的锌在酸和氧的作用下,转化为硫酸锌进入溶液,经净化后进行电积得到金属锌,而精矿中的硫在浸出过程中,被氧化成单质硫进入渣中。

锌浸出渣是湿法炼锌过程中产生的固废废渣,根据《国家危险废物名录(2021 年版)》,锌浸出渣为危险废物,包括湿法炼锌过程中锌焙烧矿、锌氧化矿常规浸出法产生的浸出渣、锌焙烧矿热酸浸出黄钾铁矾法产生的铁矾渣和铅银渣、锌焙烧矿热酸浸出针铁矿法产生的针铁矿渣和铅银渣、硫化锌矿常压氧浸或加压氧浸产生的硫渣和浮选尾矿渣、氧化锌浸出处理产生的氧化锌浸出渣。其成分非常复杂,含有锌、铅、镉、铜、银、铟、铊等金属元素,平均每生产 1 t 锌就排放 0.8～1 t 浸出渣[4]。2020 年我国精炼锌产量为 642.5 万 t,由此可知我国锌浸出渣的年排放量非常大,如此大量的锌浸出渣如果直接堆存处置,不但需要建设与之配套的危险废物处置场,耗资巨大,而且存在处置场防渗系统失效带来的污染物渗漏等环境污染风险,直接威胁下游的土壤、水环境。近年来,随着环保要求越来越严格,除了经济价值较小以及暂时无法综合利用的锌浸出渣,大部分的锌浸出渣均采用综合利用的方式进行处理,既避免了危险废物直接堆存带来的环境风险,又能回收渣中的有价金属,增加企业的收益。而找到环保指标好、综合回收率高、经济可靠的综合利用工艺是目前锌渣处理企业的重点。

锌浸出渣综合利用的方法主要有火法工艺、湿法工艺、火法-选矿联合工艺、火法-湿法联合工艺[3],其中以火法工艺为主。火法工艺中,可单独处理锌浸出渣的方法主要包括回转窑挥发法、奥斯麦特炉法、烟化炉法、富氧侧吹炉法(CSC 法)、旋涡熔炼炉法等;在铅冶炼或铅锌联合冶炼过程中搭配处理锌浸出渣的方法主要包括基夫赛特炉法、三连炉法、密闭鼓风炉法(ISP 法)等。目前锌浸出渣的综合利用方法较多,企业在选择时具有一定的盲目性,而以往的研究也仅在各种锌浸出渣综合利用技术的原理及优缺点方面进行定性描述和比较,继而根据某几个方面的有利因素做出方法的选择,不能全面反映某种方法的适用性。本文采用基于层次分析的综合评判法,在全面考虑锌浸出渣综合利用技术的各种影响因素的基础上,定量评估各种综合利用技术的适用性,以期为企业在锌浸出渣利用工艺的选择或者提标改造时提供参考。

1　锌浸出渣火法利用技术现状

目前行业内对锌浸出渣的综合利用一般都采用火法处理,在回收有价金属的同时,将危险废物最终转变为一般工业固体废物。而针对锌浸出渣的湿法处理大多处于试验和探索阶段,尚无工业应用。这里所指的湿法处理不是对中浸渣采用高温高酸法的湿法处理,而是对湿法炼锌最终浸出渣(包括高温高酸法处理后的铁矾渣、针铁矿渣、铅银渣)的湿法处理。

1.1　回转窑挥发法

将干燥的锌浸出渣(含水 10%～20%)配以 45%～55%的焦粉在回转窑中进行一系列的热解及氧化还原反应,使锌得到还原挥发并以次氧化锌烟尘的形式回收,同时次氧化锌烟尘中还富集了铅、镉、铟、镓、锗等有价金属,而 90%以上的杂质均进入窑渣。该工艺为处理锌浸出渣的典型工艺,具有处理能力大、原料适应性强、工艺成熟的优点,但热利用率低、能耗高、烟气中的 SO_2 浓度低不能制酸,且只能回收易挥发的锌、铅、铟等,大部分的金、银及铜等有价金属得不到回收[1,4-6]。

对传统回转窑挥发法进行工艺改进后,富氧回转窑和银浮选＋富氧回转窑的工艺被广泛应用。富氧回转窑技术可以提高锌渣处理量、降低能耗、提高锌的回收率、并显著降低生产成本[7]。而银浮选＋富氧回转窑技术是先将锌浸出渣进行银浮选,选出的银精矿外售,提高银的回收率,浮选尾矿压滤后再进富氧回转窑处理。

1.2　奥斯麦特炉法

奥斯麦特技术处理锌浸出渣系统由 1 台熔炼炉和 1 台贫化炉组成,炉内熔炼温度分别为 1 270～1 290和 1 300～1 320 ℃。在加入煤作为燃料和还原剂、鼓入浓度为 40%氧气的条件下,锌、铅、银经挥发氧化在烟尘中得到回收,同时铜、锑以黄渣的形

态得到回收。其优点是原料适应性强、有价金属回收率高、自动化程度高、热利用率高、熔炼炉烟气中SO_2浓度高可制酸，但能耗偏高、喷枪寿命短、更换频繁、投资较大。韩国锌业公司温山冶炼厂应用该技术对锌浸出渣进行处理，效果较好[1,4-6]。我国内蒙古兴安博源铜锌冶炼厂采用此技术。

1.3 烟化炉法

目前国内只有云南驰宏锌锗公司在应用，其曲靖分公司的烟化炉在处理铅冶炼系统热炉渣的同时配入锌浸出渣。虽属于铅锌联合冶炼企业处理锌浸出渣的工艺，但其锌浸出渣所占比例达60%以上，可以按主要处理锌浸出渣来对待。其优点是金属挥发率高，其中锗挥发率高达93%～95%，对处理含锗高的渣料有利[4,6]，但能耗高、炉寿短，需利用含铅热渣的潜热加热锌浸出渣(冷渣)。

1.4 富氧侧吹炉法(CSC法)

富氧侧吹炉法(CSC法)是一种新的锌浸出渣处理工艺，并得到了重点推广，在渣料处理、综合回收方面具有独到的优势。其特点是：以富氧侧吹炉为主配套一台烟化炉回收次氧化锌，对炉料含水、炉料粒度要求比较宽松，原料适应性强，烟气中的SO_2浓度可达到制酸要求，燃料及还原剂用量较小、生产成本低，密封性好、烟气量小、能耗低，炉寿长、设备处理能力大[1,6]，除了通过挥发回收铅、锌、铟等易挥发金属外，还可在炉缸中产出冰铜回收铜和银等有价金属。我国西部矿业公司和南方有色金属有限责任公司的渣处理系统采用此技术。

1.5 旋涡熔炼炉法

采用顶部加料和侧壁切向送风的方式运行，在高温和还原剂作用下，先是铁酸锌、硅酸锌、硫酸锌、硫酸铅等各种盐类的分解，然后是各种氧化物的还原挥发。在旋涡室内，不但易于挥发的金属铅、锌、铟、锗等挥发进入烟尘，连不易挥发的金属银也绝大多数挥发进入烟尘。另外，锌浸出渣中的铜也有15%～25%挥发进入烟尘。其优点是金属挥发率较高且全面、余热利用率高、炉寿较长、生产过程连续稳定，但原料制备复杂、生产流程长、单台炉处理能力小、放大前景不佳。最早用于葫芦岛锌厂的竖罐炼锌渣的处理[1,5]。

1.6 铅锌联合冶炼法

在锌浸出渣火法利用技术中，铅锌联合冶炼法是一种较为绿色的渣处理方法，在铅冶炼或铅锌联合冶炼的同时搭配处理锌浸出渣，既能达到处理锌浸出渣的目的，又不影响铅冶炼的各项技术经济指标，已被国内外很多铅冶炼厂或铅锌联合冶炼厂所采用。

韩国锌业公司铅冶炼厂的QSL(富氧底吹熔池熔炼)炼铅工艺搭配处理湿法炼锌浸出渣，加拿大Cominco公司Trail铅冶炼厂利用基夫赛特法在铅精矿中配入锌浸出渣进行处理，均取得了不错的效果[8]。我国江西铜业铅锌金属有限公司采用基夫赛特法，在铅精矿中搭配处理锌浸出渣，取得了较好的效果，目前中金岭南丹霞冶炼厂正在建设渣处理系统，采用基夫赛特法处理各种自产废渣及社会性废渣，包括硫渣、铅银渣等。富氧底(侧或顶)吹炉氧化＋侧吹炉还原铅＋烟化炉还原锌的“三连炉”工艺也是在铅冶炼的同时搭配处理锌浸出渣的绿色渣处理工艺，我国河南豫光金铅集团有限责任公司、济源市万洋冶炼集团有限公司、广西南丹南方金属有限公司等近30条铅生产线采用此技术。基夫赛特法和三连炉工艺均具有能耗低，有价元素综合回收率高，生产成本低等优点，金属回收率分别达到：Pb 97%～98%、Zn 92%～95%、Au 99%、Ag 99%、In 70%～85%，烟化炉渣含Zn 1%～1.5%、Pb 1%～2%。

密闭鼓风炉法(ISP法)是英国帝国熔炼公司发明的一种炼锌、附带产铅的方法，以铅、锌精矿或混合精矿为原料，经烧结机烧结、密闭鼓风炉熔炼得到粗铅和粗锌，粗铅经电解产出铅锭，粗锌经精馏分离产出锌锭。ISP工艺可以搭配处理含铅、锌的氧化物料以及湿法炼锌的浸出渣[9-10]。其优点是原料适应性强，工艺流程短，综合回收金属种类多、回收率高，某企业ISP工艺的金属回收率分别达到：Pb 95.54%、Zn 95.63%、Cd 82%、Ag 83%、Ge 58.6%。但此工艺规模较小，装备水平较低。我国中金岭南韶关冶炼厂、陕西东岭冶炼有限公司、白银有色集团第三冶炼厂、葫芦岛锌业股份有限公司采用此技术。

1.7 选冶联合法

选冶联合法是一种火法—选矿联合工艺，其利用选矿手段如碎磨、重选、磁选或浮选结合冶金工艺来处理矿石与废渣。从理论上讲，相较于单一冶金法或选矿法，选冶联合法更加灵活，处理锌浸出渣更加高效，成本较低，典型的选冶联合技术有焙烧—磁选法、焙烧—浮选法、水热硫化—浮选法、机械硫化—浮选法等[11]，但此技术正处于研究阶段，且在金属回收率方面尚未达到理想效果，实现工业化生产还需一定的距离。

另外，在锌浸出渣的综合利用方面，除了上述回收有价金属的综合利用技术外，还有制作功能材料、

建筑材料等方面的研究有待加强。

2　锌浸出渣综合利用技术适用性评估

本文针对单独处理锌浸出渣的综合利用技术进行定量评估,评估的对象有传统回转窑法、富氧回转窑法、银浮选+富氧回转窑法、奥斯麦特炉法、烟化炉法、富氧侧吹炉法、旋涡熔炼炉法共7种。由于铅锌联合冶炼法中处理锌浸出渣量的占比较小,与单独处理锌浸出渣的情况差异较大,因此不参与定量评估,而是根据其实际情况直接参与评估分类;选冶联合法未得到工业应用,不参与本次评估。

2.1　评估方法

相关评估方法较多,包括层次分析法、经验公式法、人工神经网络法、多元统计分析法、模糊综合评判法、信息量法等,这些方法在地质灾害危险性评估、岩溶塌陷危险性评估等领域应用较多[12],而在锌浸出渣综合利用技术适用性评估方面未见报道。本次采用基于层次分析的综合评判法对单独处理锌浸出渣的火法利用技术进行适应性评估。综合评判模型如下:

$$R = \sum_{i=1}^{n} W_i P_i \tag{1}$$

式中,R 为加权平均综合指数;W_i 为第 i 项评价因子的权重;P_i 为第 i 项评价因子的得分值。

评估的主要步骤包括建立评价指标体系、确定评价因子的标准化量值及其权重、运用综合评判法模型进行综合评价。

1)评价指标体系的建立

影响锌浸出渣综合利用技术适用性的因素很多,且各因素之间相互制约和影响,为了避免各因素之间的内容交叉重复使结果产生较大偏差,根据各综合利用技术的实际情况以及评价因子选取的科学性、完整性、主导性、可操作性、敏感性等选取原则,从诸多指标中选取某些能够真实全面反映锌浸出渣综合利用技术适用性的评价因子。本次选取了5类15个指标作为评价因子,见图1。需要说明的是,环境指标的指标层评价因子仅有废气(产生强度涉及无组织排放)和废渣(危害水平涉及固废类别),而没有废水,是因为各综合利用技术的主体设备处的排水均为冷却水,而其他环节的废水(如废气脱硫产生的含重金属废水)均排往废水处理站处理后回用或达标排放。

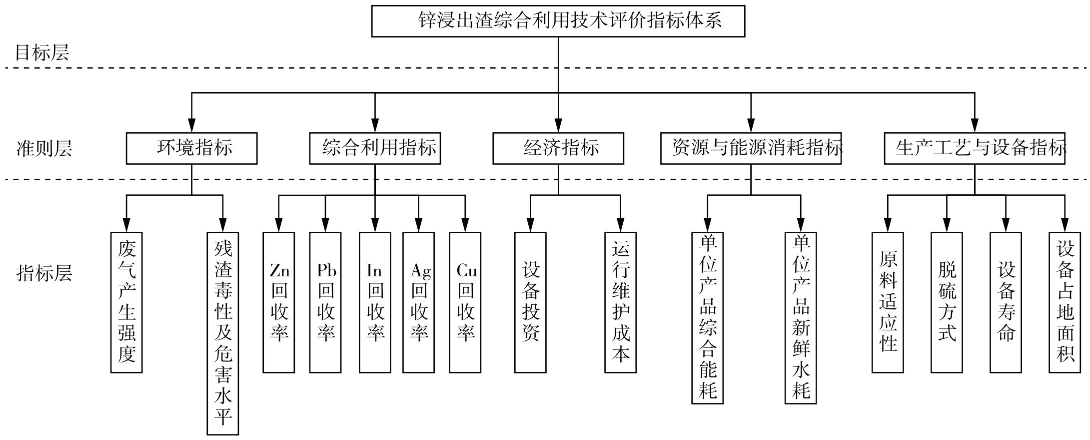

图1　锌浸出渣综合利用技术评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of comprehensive utilization technology of zinc leaching residue

2)评价因子标准化量值

对前述7种锌浸出渣综合利用技术各评价因子的内容分级情况见表1。

考虑到各评价因子的性质不同,量纲各异,不能直接进行数据对比和叠加,需要按照一定的标准分级归并,实现统一标准下的定量化表达,并使各评价因子的标准化定量值均居于0～100。

对于Zn回收率、Pb回收率、In回收率、Ag回收率、Cu回收率5个正向定量评价因子,其标准化量化公式为:

$$X_i = \frac{S_i - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \times 100 \tag{2}$$

对于废气产生强度、单位产品综合能耗、单位产品新鲜水耗三个负向定量评价因子,其标准化量化公式为:

$$X_i = \frac{S_{\max} - S_i}{S_{\max} - S_{\min}} \times 100 \tag{3}$$

式中,X_i 表示该评价因子第 i 等级的标准化量值;S_i 表示该评价因子第 i 等级的实际值;$S_{\min}$ 表示该评价因子所有等级中的实际最小值;$S_{\max}$ 表示该

表 1 锌浸出渣综合利用技术各评价因子内容分级和最终权重值

Table 1 Content classification and final weight values of evaluation factors of comprehensive utilization technology of zinc leaching residue

综合利用技术	吨渣废气产生强度/m^3	残渣毒性及危害水平	回收率/%					设备投资	运行维护成本	吨渣综合能耗/kgce	单位产品新鲜水耗/t	原料适用性	脱硫方式	设备寿命	设备占地面积
			Zn	Pb	In	Ag	Cu								
传统回转窑法	3 000～3 500	Ⅱ类固废,危害水平中等	90～92	85～90	80～85	10～20	10～20	较高	较高	514～564	2.00～3.60	好	碱法、石灰法、离子液法或氧化锌法等脱硫	中	较大
富氧回转窑法	2 000～2 500	Ⅱ类固废,危害水平中等	92～95	92～93	85～90	30～40	20～30	较高	中	240～284	1.73～2.53	好	碱法、石灰法、离子液法或氧化锌法等脱硫	中	较大
银浮选+富氧回转窑法	2 000～2 500	Ⅱ类固废,危害水平中等	92～95	92～93	85～90	55～70	20～30	较高	中	219～261	1.94～2.74	好	碱法、石灰法、离子液法或氧化锌法等脱硫	中	较大
奥斯麦特炉法	1 500～2 000	Ⅰ类或Ⅱ类固废,危害水平低-中等	90～95	92～95	65～70	85～90	50～60	高	较高	396～446	4.62～5.62	好	两转两吸制酸	喷枪寿命短	较小
烟化炉法	3 000～3 200	Ⅱ类固废,危害水平中等	85～90	88～93	80～85	30～40	20～30	中	较高	428～472	4.50～5.50	较好	碱法、石灰法、离子液法或氧化锌法等脱硫	短	较小
富氧侧吹炉法	1 500～2 000	Ⅰ类或Ⅱ类固废,危害水平低-中等	90～95	90～95	80～90	85～90	60～65	较高	较低	353～397	3.95～4.95	好	两转两吸制酸	长	较小
旋涡熔炼炉法	3 000～3 200	Ⅱ类固废,危害水平中等	80～85	85～90	60～65	70～75	15～25	较高	高	378～422	5.50～6.50	较差	碱法、石灰法、离子液法或氧化锌法等脱硫	较长	较小
权重	0.106	0.149	0.056	0.056	0.040	0.040	0.040	0.118	0.095	0.106	0.064	0.028	0.043	0.036	0.021

评价因子所有等级中的实际最大值。

对于指标体系中的定性指标,则根据其各自的差异性分级,直接赋予相应的标准化分值,具体见表 2。

3)评价因子的权重

本研究采用层次分析法确定权重。层次分析法(AHP)是美国 Satty 于 1973 年提出的,该方法使用系统的观点将研究问题系统化和模型化,适合应用在相互联系并制约的多因素复杂问题。其步骤为:(1)建立包含目标层、准则层、指标层的层次结构模型;(2)构造成对比较矩阵;(3)计算权向量并做一致性检验;(4)计算各影响因素的组合权重,得到各评价因子对于总目标的总排序,即权重分配[12]。

2.2 适用性评估

对表 1 所列评价因子中的废气产生强度、Zn 回收率、Pb 回收率、In 回收率、Ag 回收率、Cu 回收率、单位产品综合能耗、单位产品新鲜水耗共 8 个定量指标,采用公式(2)和公式(3)进行标准化量值计算;对于残渣毒性及危害水平、设备投资、运行维护成本、原料适用性、脱硫方式、设备寿命、设备占地面积共 7 个定性指标,根据表 2 进行标准化量值的赋值。同时采用层次分析法经过建立层次结构模型、判断矩阵、权向量计算以及一致性检验,得到各评价因子的最终权重,见表 1。

表 2 定性指标标准化量值表

Table 2 Standardized value of qualitative indicators

指标		定性指标标准化量值				
准则层	指标层	0～20	20～40	40～60	60～80	80～100
环境指标	残渣毒性及危害水平	危险废物,危害水平较高	/	/	Ⅱ类固废,危害水平中等	Ⅰ类固废,危害水平较低
经济指标	设备投资	高	较高	中	较低	低
	运行维护成本	高	较高	中	较低	低
生产工艺与设备指标	原料适用性	差	较差	中	较好	好
	脱硫方式	/	/	碱法、石灰法、离子液法或氧化锌法等	/	两转两吸制酸
	设备寿命	短	较短	中	较长	长
	设备占地面积	大	较大	中	较小	小

在得到了各评价因子的标准化量值和权重的基础上,根据综合评判模型,采用公式(1)计算各锌浸出渣综合利用技术的加权平均综合指数,并据此对各锌浸出渣综合利用技术进行了分类。将加权平均综合指数大于50分的综合利用技术列为推荐技术,小于50分的列为可行技术,见表3。

表3 锌浸出渣综合利用技术适用性评估表

Table 3 Evaluation of applicability of comprehensive utilization technology for zinc leaching residue

综合利用技术	加权平均综合指数	适用性评估
富氧侧吹炉法	71.7	推荐
银浮选+富氧回转窑法	65.6	
富氧回转窑法	63.8	
奥斯麦特炉法	58.4	
烟化炉法	44.0	可行
传统回转窑法	40.1	
旋涡熔炼炉法	37.2	

针对得到的适用性评估结果及各锌浸出渣综合利用技术,有以下几点需要说明:

1)基夫赛特法和三连炉工艺,主要为铅锌联合冶炼企业应用的主体工艺,均可在处理铅精矿的同时搭配处理锌浸出渣,其各方面性能、指标都较为先进,满足国家对工艺参数、环保指标的相关要求,应列入推荐技术;密闭鼓风炉法(ISP法)在处理混合铅锌精矿和复杂含铅锌废料方面有天然优势,但其装备水平较低、环保指标较其他技术处于劣势,建议列入可行技术;QSL工艺虽在韩国锌业公司铅冶炼厂应用比较成功,但国内目前没有企业应用该工艺,因此不进行评估分类。

2)各锌浸出渣综合利用技术均有其优缺点,虽然本研究通过综合评判法得到了锌浸出渣综合利用技术评估分类,但这是在对选定的15项评价因子进行分类统计分析基础上得到的结果,还有一些因素由于其特殊性及实际情况而无法纳入指标体系,如地域性因子(涉及到原辅料获得的难易程度及其价格、所含特征金属元素等)、产品或终渣的去向因子(涉及到下游产业链是否完备、消纳是否及时等),因此不能完全凭得分情况来评判某种综合利用技术相对于其他技术的优劣,而应在适用性评估的基础上,结合企业实际情况来进行评估和选择。

3)对于银浮选+富氧回转窑法,仅在锌浸出渣含银高时适用(一般含银大于150 g/t),如果锌浸出渣含银较低,则不需进行银浮选。锌浸出渣综合利用后,主体设备产出的终渣(如水淬渣或窑渣)为一般工业固体废物,达到了无害化的目的,同时可以视情况对主体设备产出的终渣进行重选碳、磁选铁或铁银合金等。综合利用过程中会产生废气,废气净化过程产生的脱硫石膏等固体废物属于环保辅助设备产生的废渣,应根据相关标准规范进行属性鉴别,而根据已有相关数据分析,一般来说,此脱硫石膏为一般工业固体废物。

4)对于硫化锌矿常压氧浸或加压氧浸产生的硫渣和浮选尾矿渣,含硫较高,且单质硫占比较大,在一定的温度下,单质硫存在升华而引起燃烧不充分、甚至着火问题,因此其干燥工艺需特别对待[6]。在采用基夫赛特法处理硫渣或浮选尾矿渣时,不宜采用常规干燥工艺,宜采用蒸汽干燥的方式使硫渣含水率降至1%以下,以满足基夫赛特炉对原料含水率的要求;采用其他炉窑处理时,须进行机械压滤使硫渣或浮选尾矿渣含水率降至10%~20%,或者根据当地气候条件采用自然干燥的方式降低含水率,以满足炉窑对原料含水率的要求。

3 结论

1)根据锌浸出渣综合利用技术适用性评估,推荐技术有富氧侧吹炉法、银浮选+富氧回转窑法、富氧回转窑法、奥斯麦特炉法、基夫赛特法以及三连炉工艺,可行技术有烟化炉法、传统回转窑法、旋涡熔炼炉法、密闭鼓风炉法。企业可在此基础上,根据自身所处地域特点、地方相关环保要求、以及其他需考虑的实际情况,选择合适的锌浸出渣综合利用技术。

2)总体来看,推荐的综合利用技术是国内应用最普遍、最稳定和发展前景最好的锌浸出渣处理方法,可行的综合利用技术也有企业根据自身情况已投入运行多年,比较符合国内锌浸出渣综合利用的实际,可见建立的评价指标体系是合理的,采用的基于层次分析的综合评判法是行之有效的,可以满足锌浸出渣综合利用技术适用性评估的需要。

参考文献

[1] 邹小平,王海北,魏帮,等.锌冶炼厂铁闪锌矿湿法冶炼浸出渣处理方案选择[J].有色金属(冶炼部分),2016(8):12-15.
ZOU X P,WANG H B,WEI B,et al. Scheme selection to treat marmatite leaching residue from zinc hydrometallurgy plant[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2016(8):12-15.

[2] 卢宇飞,熊国焕,何艳明.锌冶炼浸出渣资源化利用技术分析[J].云南冶金,2014,43(1):93-96.
LU Y F,XIONG G H,HE Y M. Technical analysis of resource utilization of zinc smelting leaching residue[J].

Yunnan Metallurgy,2014,43(1):93-96.

[3] 朱林,韩俊伟,刘维,等.铁矾渣综合利用技术进展[J].矿产保护与利用,2018,38(4):124-129.
ZHU L, HAN J W, LIU W, et al. Progress of comprehensive utilization technology of jarosite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018,38(4):124-129.

[4] 刘学武,王正民,王书民.炉窑处理湿法炼锌浸出渣研究进展[J].商洛学院学报,2016,30(2):47-52.
LIU X W, WANG Z M, WANG S M. Advances on furnaces processing of wet smelting zinc leaching residue[J]. Journal of Shangluo University, 2016, 30(2):47-52.

[5] 刘洪萍.锌浸出渣处理工艺概述[J].云南冶金,2009,38(4):34-37.
LIU H P. Overview of zinc leaching residue treatment process[J]. Yunnan Metallurgy,2014,43(1):93-96.

[6] 孔德鸿,吴心平,罗仙平.氧压浸出炼锌尾矿渣无害化处理及有价金属综合回收方案选择[J].有色设备,2019(1):17-20,71.
KONG D H, WU X P, LUO X P. Harmless treatment of tailings and selection of comprehensive recovery scheme for valuable metals in a new type of oxygen pressure leaching of electric zinc plant[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment,2019(1):17-20,71.

[7] 何启贤,周裕高,覃毅力,等.锌浸出渣回转窑富氧烟化工艺研究[J].中国有色冶金,2017,46(3):49-54.
HE Q X, ZHOU Y G, QIN Y L, et al. Study on oxygen-enriched fuming process of zinc leaching residue with rotary kiln [J]. China Nonferrous Metallurgy,2017,46(3):49-54.

[8] 王凤朝.高浸渣资源化综合利用工艺选择分析[J].有色冶金节能,2012,28(4):51-55.
WANG F C. Analysis on process selection of comprehensive resources utilization from high acid leaching residues[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy,2012,28(4):51-55.

[9] 罗琨.ISP法冶炼铅锌节能实践[J].有色冶金节能,2016,32(4):16-18.
LUO K. Energy-saving practice of ISP lead & zinc smelting[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2016,32(4):16-18.

[10] 刘斌莲.提高ISP工艺锌冶炼回收率实践[J].有色矿冶,2014,30(2):32-34.
LIU B L. The practice of improving the zinc recovery rate in the ISP process[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy,2014,30(2):32-34.

[11] 宁继来,郑永兴,胡盘金,等.锌冶炼渣选冶联合技术研究进展[J].矿冶,2020,29(3):18-24.
NING J L, ZHENG Y X, HU P J, et al. Research progress on beneficiation-metallurgy combination process of zinc smelter slag [J]. Mining and Metallurgy,2020,29(3):18-24.

[12] 王恒恒,张发旺,郭纯青,等.基于层次分析法的城市岩溶塌陷危险性评价:以武汉市南部为例[J].中国岩溶,2016,35(6):667-673.
WANG H H, ZHANG F W, GUO C Q, et al. Urban karst collapse hazard assessment based on analytic hierarchy process: an example of southern Wuhan city[J]. Carsologica Sinica,2016,35(6):667-673.

(上接第119页)

[20] 许端平,李晓波,孙璐.有机酸对土壤中Pb和Cd淋洗动力学特征及去除机理[J].安全与环境学报,2015,15(3):261-266.
XU D P, LI X B, SUN L. Washing kinetics and mechanism of removing Pb and Cd from the contaminated soil with the organic acids[J]. Journal of Safety and Environment,2015,15(3):261-266.

[21] 郭观林,周启星.重金属镉在黑土和棕壤中的解吸行为比较[J].环境科学,2006,27(5):1013-1019.
GUO G L, ZHOU Q X. Comparison on desorptive behavior of cadmium in phaeozem and burozem[J]. Environmental Science,2006,27(5):1013-1019.

[22] 曹勤英,黄志宏.污染土壤重金属形态分析及其影响因素研究进展[J].生态科学,2017,36(6):222-232.
CAO Q Y, HUANG Z H. Review on speciation analysis of heavy metals in polluted soils and its influencing factors[J]. Ecological Science,2017,36(6):222-232.

[23] ZHONG X L, ZHOU S L, ZHU Q, et al. Fraction distribution and bioavailability of soil heavy metals in the Yangtze River Delta: a case study of Kunshan city in Jiangsu province, China[J]. Journal of Hazardous Materials,2011,198:13-21.

[24] 高一丹,袁旭音,汪宜敏,等.不同螯合剂对两类Cd和Ni污染土壤的淋洗修复对比[J].中国环境科学,2022,42(1):250-257.
GAO Y D, YUAN X Y, WANG Y M, et al. Leaching remediation efficiency of biodegradable chelating agents for the Cd and Ni contaminated soils[J]. China Environmental Science,2022,42(1):250-257.

[25] YANG Z H, DONG C D, CHEN C W, et al. Using poly-glutamic acid as soil-washing agent to remediate heavy metal-contaminated soils [J]. Environmental Science and Pollution Research,2018,25(6):5231-5242.