

含锌冶炼渣综合利用现状及发展趋势

顾丝雨, 刘维, 韩俊伟, 覃文庆

(中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为了顺应国家发展需求, 对锌资源的不断开发使高品位矿石日益枯竭, 并产生了大量的含锌冶炼渣, 且由于锌的生产方式多样, 含锌冶炼渣成分及性质各不相同, 后续的处理难度也显著提升。含锌冶炼渣的大量堆存不仅会对周围环境造成严重危害, 还会导致有价金属资源浪费。本文总结了含锌冶炼渣的危害及现行的利用方式, 并着重介绍了回收含锌冶炼渣中有价金属的主要处理工艺的原理、优缺点及研究现状。最后指出了含锌冶炼渣资源化处理技术可加强的研究方向。

关键词: 含锌冶炼渣; 资源化; 综合利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.05.001

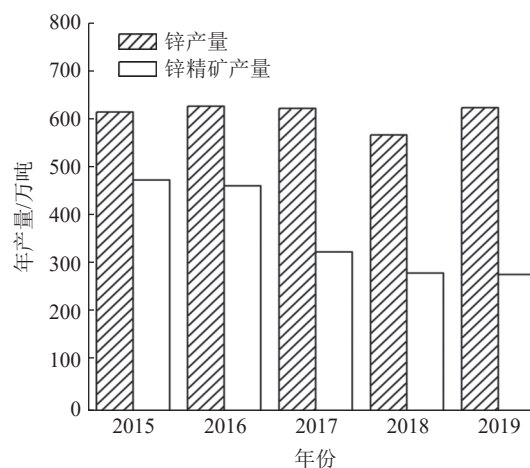
中图分类号: TD952; X751 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 05-0001-08

1 含锌冶炼渣的来源

锌是重要的有色金属, 广泛应用于各个行业的生产中, 中国锌矿矿石类型复杂, 相比澳大利亚、加拿大等国资源品质较差, 中品位矿多, 共生组分多^[1-2]。虽然近年金属价格下跌幅度较大、有色金属价格震荡, 但我国锌产量基本保持增长势头, 然而受环保治理影响, 我国锌精矿产量逐年下降。近5年来我国锌产量、锌精矿产量见图1。随着金属资源的不断开发, 高品位矿石日益枯竭, 相对地, 每年全球会产生数百万吨含有大量重金属的冶炼废物。锌的生产工艺多样, 见表1, 致使含锌冶炼渣的组成、性质不尽相同, 使含锌冶炼渣的处理难度大大增加, 且耗资过多, 近年来国家明确要求企业节能减排和发展低碳经济, 致使废渣处理经济效益不高, 因此大多数企业会选择堆积的方式处理含锌冶炼渣, 废渣再利用率较低, 造成有价金属浪费。

国家“十三五”规划倡导循环经济、废物资源化, 将实施危险废物污染防治、生态治理、化学品风险控制等领域一批国家重点研发计划重点专项。2018年1月1日起实施的《中华人民共和国

环境保护税法》, 详细规定了固体废弃物污染排放征税标准, 每排1 t尾矿将征税约15元人民币, 而含锌冶炼渣等危险废物征税高达1000元/t。因此, 冶炼废渣的综合利用将是未来有色金属工业发展的必由之路。



(注: 相关数据来源于中国有色金属工业协会网站)

图1 2015~2019年我国锌产量及锌精矿产量
Fig.1 Yield of zinc and zinc concentrate in China from 2015 to 2019

收稿日期: 2020-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51804342); 湖南省自然科学基金 (2019JJ50805); 国家重点研发项目 (2019YFC1907301); 中南大学创新驱动项目 (2020CX038); 中南大学科研启动基金 (218041)

作者简介: 顾丝雨 (1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为二次资源综合回收与利用。

通信作者: 韩俊伟 (1987-), 男, 副教授, 博士。

表 1 几种锌冶炼技术及应用^[3-9]
Table 1 Several zinc smelting technologies and applications

冶炼分类	冶炼工艺	技术介绍
湿法炼锌	常规浸出法	浮选硫化锌精矿抛入沸腾焙烧炉焙烧后得焙砂，送至中性浸出，浸出后的上清液采用三段锌粉置换法获得硫酸锌溶液，再熔炼出锌锭或合金锌。由于环境保护，节能减排等方面有明显缺陷，2000年以来新冶炼厂很少采用。
	热酸浸出法	增添了高酸、高温浸出工艺，有利于浸出过程不溶解的有价金属富集，方便后续回收处理。
	氧压直接浸出法 (OPL)	选用高压釜，在高温高压和富氧条件下浸出，取消了硫化锌精矿常压浸出、焙烧和制酸过程，能使难以溶解的硫化锌溶解，并以元素硫的方式代替了二氧化硫的生成，削减了对周围环境的危害。
	常压富氧浸出法 (APOL)	以氧压浸出为工艺基础，采用高温常压，在立式玻璃钢反应器内用废电解液连续浸出硫化锌精矿。
	电炉炼锌	可分为电阻电热竖炉和电弧电阻矿热炉，该工艺以电能为能源，并转化成热能冶炼氧化锌物料，锌挥发后冷凝可得到粗锌产品。
火法炼锌	密封鼓风炉炼锌 (ISP)	对原料适应性强，能很好处理铅锌难以分选的精矿，但污染较为严重，逐渐被弃用。
	竖罐炼锌	主要包括团矿制备、还原蒸馏及锌蒸汽冷凝三部分，该工艺能耗高，且伴生金属回收效果差。

2 含锌冶炼渣的危害

含锌冶炼渣中存在 Zn、Pb、Co、Cu、Ni 等有价金属。含锌冶炼渣中重金属元素具有持久性毒性，且迁移性、隐藏性和富集性较强，不易被降解，若长期堆存，随着雨水的冲刷及自然渗透，其中的可溶成分会随水从地表向土壤，水系渗透，使堆存地周围的土壤发生酸碱化，部分重金属经过生物富集后通过食物链进入人体，易引发慢性中毒，对人们的生命健康产生长期危害。含锌冶炼渣的固体废物长期堆存，不仅会浪费土地资源和有价金属资源，还会对环境造成重金属污染危害。因此，研究如何经济高效绿色地回收利用含锌冶炼渣十分迫切。

3 含锌冶炼渣处理技术现状

固体废物的处理需要遵循三化原则，即减量化-资源化-无害化。首先是减量化，应尽可能减少固废的产生，降低后续处理压力，其次是资源化，回收利用固废中的有用资源，响应资源可持续发展战略，在无法减量化且资源化经济效益不高的前提下，再考虑无害化堆存处理。随着经济的发展和人们环保意识的增加，对含锌冶炼渣的回收利用也逐渐得到重视，2018 年再生锌产量为 60 万 t，2019 年再生锌产量同比增长了 22.9%。一代代的冶金人致力于有色冶炼废渣的高效清洁处理研究，开发出了多种含锌冶炼渣处理技术，主要分为三大类：生产建筑材料技术，稳定化/固化处理技术和有价金属综合回收技术。

3.1 生产建筑材料

将含锌冶炼渣等生产废物用作生产水泥、混

凝土砖等建筑材料的原料不仅可以再利用固废资源，还节约了生产建筑材料所需的天然砂石等资源。生产建筑材料所用的含锌冶炼渣一般重金属含量较低，且化学性质稳定。闫亚楠等^[10]将毕节赫章炼锌尾渣掺入混凝土路面砖的制作中，掺量达到 40% 时，制备出抗压强度可达 32 MPa 以上的混凝土砖。由于冶炼废渣具有潜在的胶凝活性，可与其他物料协同用于复合水泥的生产，如王生辉^[11]等人将冶炼废渣与尾矿协同制备了结构更加致密的复合水泥。

虽然将含锌冶炼渣用于生产建筑材料有诸多好处，可以减少污染及占地面积，但只有重金属含量少的含锌冶炼渣能用于生产建筑材料，重金属含量多的废渣无法通过该途径处理，且产生的建材长期在自然侵蚀及外力破坏下，其中的重金属有可能释放出来，对周围环境造成威胁。并且由于建材市场的规范及建材标准的提高，用含锌冶炼渣为原料的建材市场严重缩减。

近年来，还有学者研究了以含锌冶炼渣为原料，采用微波干燥工艺进行玻璃化和微晶化制成装饰材料微晶玻璃^[12]。该工艺将重金属固定于微晶玻璃的晶格中，避免二次污染，实现了资源化、无害化与高值化。此外，利用含锌冶炼渣还可生产纳米复合材料、复合螯合氨基酸锌、氧化铁红等产品^[13-15]，促进了含锌冶炼渣的高值化利用研究。

3.2 稳定化/固化处理

稳定化/固化属于无害化处理的范畴，常通过物理或化学方法将有害废物包裹，使其转化为不可流动的包埋体，从而防止有害成分释放或将固废中的有毒、迁移性好的组分转化为低溶解性、

低迁移性、低毒性组分^[16]。目前已有稳定化/固化技术包括：石灰稳定化/固化，塑料材料稳定化/固化，水泥稳定化/固化，沥青稳定化/固化，硫化稳定化/固化，药剂稳定化/固化等。对于物理包容稳定化/固化技术，不仅会造成较大的增容比，处理后废渣的长期稳定性无法保证，易造成二次污染。申坤等^[17]研究处理湖南某厂重金属废渣，向废渣添加稳定化药剂，将重金属废渣从危险废物变为一般工业固废，然而化学药剂成本较高。柴立元^[18]等研发了浸锌渣水热硫化稳定化/固化技术，实现了废渣中重金属转变为低水溶性的硫化物，降低了废渣毒性，且形成的固化体可作为硫磺建材。然而稳定化/固化处理技术皆无法回收废渣中的重金属，资源二次利用度不高。

3.3 有价金属回收

上述两种含锌冶炼渣的处理方法因其本身限制，无法用于大量的实际生产中，且无法回收锌废渣中的有价金属，造成金属资源的浪费。近年来，废物资源化与再生利用成为国内外的研究热点，并获得了许多重要研究成果。目前从含锌冶炼渣中回收有价金属的技术主要有：火法处理技术、湿法处理技术、火法-湿法联合技术及选冶联合技术^[19-22]。

3.3.1 火法处理技术

火法处理技术具有原料适应性强、工艺流程短及金属综合回收率高等优势。然而火法工艺的能耗较高、回收重金属稳定性差且可能会再次产生二次废物污染等缺点，与低碳经济环保理念相悖，使火法处理工艺面临着严重的挑战，甚至淘汰的风险。目前，主要的火法处理技术有回转窑挥发法、烟化炉连续吹炼法、Ausmelt法、漩渦炉熔炼法及焙烧法等。

回转窑挥发法是把干燥的锌浸出渣和45%~55%的焦粉或碎煤加入回转窑，在1100~1300℃下使渣中90%~95%的锌还原挥发，补入空气进而氧化为氧化锌粉，再通过收尘装置回收，同时大量的Pb、Cd、In、Cr、Ga等有价金属也进入烟尘，有利于综合回收。浸出渣中90%以上的Fe、SiO₂等进入窑渣，窑渣可进行堆存或用作建筑材料。然而该方法处理工艺流程较长，设备要求高且维修量大，燃煤或冶炼焦的消耗量大，且烟气中含二氧化硫需要处理^[23-24]。内蒙古安凯公司^[25]对湿法炼锌产生的铅银渣采取回转窑挥

发处理，渣中Pb、Zn、In的回收率在80%~90%之间。巴彦淖尔紫金有色金属有限公司^[26]采用回转窑挥发法处理铁闪锌矿浸出渣，进行技术改造后，锌回收率提高1.5个百分点，危废渣每年可减少21万t，具有显著的经济和社会效益。

烟化炉连续吹炼法广泛应用于各种炉渣回收工艺，与回转窑挥发法原理类似，区别在于烟化炉连续吹炼法中渣与还原剂反应时，反应物料为熔融态，而回转窑挥发法反应物料则为固态。该法具有金属回收率高、工艺流程短及降低成本及能耗的优点。江西铜业^[27]自2013年采用烟化炉连续吹炼作业模式，在生产中不断完善工艺，能够实现资源利用最大化。

Ausmelt技术处理锌浸出渣的工业化应用较少，该技术对炉料的适应性强、操作简便、能耗低且炉渣无害，但是引进费用高，投资过大，限制了其在国内的发展^[28]，应用较成功的即韩国温山冶炼厂。漩渦炉熔炼法金属挥发率高，生产连续稳定，但流程长，熔炼温度高，炉型小，处理能力小^[29]。

3.3.2 湿法处理技术

湿法处理技术是指在各种药剂及条件下，将含锌冶炼渣中的有用金属溶解在浸出液中，再通过进一步工序，使有价金属选择性分离。湿法处理技术目前应用比较广泛，其具有选择性强，能耗低，环境污染小的优势，目前较为典型的工艺包括热酸浸出法回收锌，硫脲法、氰化法回收金银，氯盐法回收铅银^[30]，氧化浸出法回收铜铅锌等，然而其主要缺点是工艺流程繁杂，处理能力小，浸出废渣中重金属浸出毒性超标，需要进一步无害化处理。

热酸浸出法是湿法处理技术中应用较广泛的工艺之一，常用的酸有硫酸，硝酸，盐酸等。酸性浸出是在高浓度酸溶液中将Fe、Cu、Zn等金属元素溶于浸出液中，再通过铁屑置换等工艺将有色金属与铁分离。然后该工艺对设备要求较高，且产生的大量铁渣难以资源化利用。此外，采用碱浸法、氨浸法等工艺处理含锌冶炼渣的研究也很多。郭翠香等人采用NaOH作浸出剂，铅锌浸出率大于90%，再通过电解工艺回收铅。碱浸法对设备友好，且浸出率高，浸出液净化难度较低，但液固比要求高，浸出后的锌离子浓度低^[31]。石振武等人采用氨浸法从铅锌废渣中回收锌，考查了

多个单因素影响,在较优条件下锌浸出率为 81.99%,且浸出液进一步除杂后,可直接制备碱式碳酸锌。氨浸生产流程短,能耗低,但实际操作过程中因氨气挥发而损失严重^[32]。

生物浸出是指通过微生物自身及其代谢产物的酸解、氧化、还原、络合等多种作用,将冶炼渣中的特定金属离子溶析。郭朝晖等^[33]利用微生物浸出回收 Zn 冶炼渣中的有价金属,有价金属 Cu, Zn 的浸出率分别达到 95.5%, 93.5%。生物浸出具有处理成本低,浸出率高,安全环保的优势,但是该工艺耗时较长。

3.3.3 火法-湿法联合技术

相较于单独的火法、湿法技术,火法-湿法联合技术结合了两者的优势,不仅可以有效地回收锌渣中的有价金属,还减少污染,降低能耗。该法首先通过火法将锌渣中难处理物质(如铁酸锌、硅酸锌)的结构打开,使被包裹的有价金属裸露出来,再采用湿法浸出充分回收有价金属。蒋国民等^[34]将锌浸渣与硫酸铁混合焙烧,焙烧温度为 640℃,硫酸化焙烧时间为 1 h,废渣中的有价金属转化为可溶性硫酸盐,再采用水浸法提取硫酸盐中的有价金属,最终得到锌、锰、铜、镉的回收率分别为 92.4%、93.3%、99.3%、91.4%。

3.3.4 选冶联合技术

选冶联合技术是先通过冶金工艺改变含锌冶炼渣中有价金属的物理或化学性质,再结合选矿工艺回收有价金属的方法。选冶联合技术可以避免火法及湿法工艺的缺点,同时选矿工艺具有成本低,污染小,金属回收效率高等优势。肖军辉等^[35]研究从某铅锌尾渣中回收铅,锌,采用硫酸浸锌-浸渣重选选铅的工艺,最终得到回收率 89.98%、品位 45.68% 的铅精矿。刘维等^[36]采用动态回转炉,以高铁锌焙砂为原料,以 CO 和 CO₂ 混合气体为还原剂,使铁酸锌选择性分解,再采用弱酸浸出和磁选工艺,最终锌回收率大于 90%、铁回收率为 84.34%、铁品位达 53.24%。

在各种选矿方法中,浮选处理成本低,环境污染小,是目前应用较广泛,研究较完备的选矿方法,且金属硫化物具有天然可浮性,与其他种类的矿物相比,硫化矿浮选发展完善,浮选效果较好。重金属废物很少存在于硫化物中,而是大量存在于氧化物和氧化化合物中,通过硫化技术处理废渣,将其中的重金属转变为硫化物,这些

硫化物具有良好的可浮性且相对不溶于水溶液,然后再通过浮选回收有价金属,同时处理后的重金属稳定性较好。目前,国内外学者提出了多种硫化浮选技术来回收含锌冶炼渣,包括表面硫化浮选技术,机械力诱发硫化浮选技术,水热硫化浮选技术,硫化焙烧浮选技术。

(1) 机械力诱发硫化浮选

机械力诱发硫化技术是通过不同机械力的作用,引起受力物体的结构和性质发生改变,进而可以进一步诱发硫化反应的进行,或提高反应效率。机械硫化技术常用的手段是球磨。

干式机械力硫化即将矿样与硫化剂在干磨条件下进行硫化,其反应机制即自蔓延硫化机制。而湿式机械力硫化可以被看作干式硫化与表面硫化相结合,在表面硫化进行到一定程度时,矿物表面硫化物增多,阻碍了硫化剂与矿物的进一步作用,这时,引入一定的机械力,使矿物表面的硫化产物剥落,形成新的反应界面继续表面硫化。Banza 等^[37]研究了以 Na₂S 为硫化剂硫化孔雀石,在无机机械力时,其硫化率只有 50%,当有机机械力硫化时,其硫化率可达 70%。目前机械力硫化技术常应用于性质简单的重金属废渣,对于性质复杂,成分多样的冶炼渣来说,技术仍不完善。

(2) 水热硫化浮选

水热硫化技术是指在高温高压条件下,硫化剂与水发生歧化反应后,将溶解的重金属物质转化为硫化物,重新结晶后再通过浮选回收。闵小波等^[38]采用水热硫化-浮选工艺,对多个单因素进行考虑,在较优条件下,废渣中锌硫化率超过 90%,而 Zn 的回收率只有 55%。对于水热硫化来说,其硫化所得的产物粒级过小,通常只有纳米级,这对硫化产物之后的浮选工艺不利。

(3) 表面硫化浮选

表面硫化是指通过添加适当的硫化剂改变难以浮选的矿物的表面性质,增加矿物与药剂的在浮选中作用强度。废渣中的重金属通常较难浮,采用合适的硫化剂改造和修饰其表面性质、结构,能改善其可浮性差的问题。曾懋华等^[39]研究用硫化物改变和修饰废渣的表面性质与结构,再通过浮选工艺得到了回收率 95%、铅含量 30% 以上的精矿。虽然表面硫化技术得到了一些成绩,然而表面硫化技术仍有许多需要解决的问题,

如，表面生成的硫化薄膜不稳定，易在强烈搅拌时掉落；表面硫化技术仅作用于物料表面，难以硫化大多数存在于废渣内部的重金属，难以实现高效处理。

(4) 硫化焙烧浮选

硫化焙烧浮选是指在惰性气氛或还原气氛下，金属氧化物在硫化剂作用下，转化为硫化物再通过浮选回收的工艺。相比于上述三种硫化方式，硫化焙烧有利于硫化物晶体的形成和生长，产物粒径大，通常为微米级，反应速度快，硫化效率高，并相对能从浮选中得到更好的有色金属回收的结果。Li等^[40]研究采用硫化焙烧和浮选工艺从低品位铅锌氧化矿中回收铅和锌。结果表明：铅和锌硫化率分别达到98%和95%。同时，通过常规浮选回收铅79.5%，锌88.2%，浮选精矿含铅10.2%，锌38.9%。郑永兴等^[41]采用硫化焙烧-浮选工艺从锌浸渣中回收有价金属，锌浸渣实验结果表明，浮选获得了含锌39.13%，铅6.93%，银973.54 g/t的精矿，锌、铅、银的回收率分别为48.38%、68.23%和77.41%。虽然硫化焙烧的产物粒径较上述三种硫化技术产物粒径大，但相对于常规的浮选过程原料粒径要求仍较小，因此需要进一步研究使焙烧产物的粒径增大及结晶完善。目前韩俊伟等^[42]通过调控高温选择性硫化焙烧条件，研究了添加钠盐、铁氧化物及炭粉对铅含锌冶炼渣硫化焙烧产物的结晶度及晶粒尺寸的影响，研究发现添加钠盐有利于体系液相量的生成，进而有利于矿物晶粒团聚及晶粒的长大；炭粉可促进硫化反应的发生，还能减少二氧化硫的生成；铁氧化物不仅可以改善焙烧后期硫化剂不足的问题，也能促进焙烧产物晶粒生长。研究发现通过对焙烧产物的晶相调控，强化了后续浮选效果。

4 总结与展望

随着科技和社会经济的发展，锌作为在电池、机械、医药等行业不可或缺的重要金属，消耗量也逐年上升。由于对锌资源的不断开发，含有大量的锌、铅、铜、钴等多种有用金属的含锌冶炼渣堆存，不仅造成了资源浪费又会引起潜在的环境危险，影响锌冶炼工业的可持续发展。为了响应国家“十三五”规划倡导的循环经济、废物

资源化、绿色可持续发展的政策，对含锌冶炼渣加以综合回收利用刻不容缓。利用含锌冶炼渣生产建筑材料或进行稳定化处理，不仅浪费了有价金属资源，还有重金属二次释放的风险。目前从含锌冶炼渣中回收有价金属的技术各有优缺点，其中火法工艺能耗高、易产生二次污染，但可以回收多种有价金属。湿法工艺虽然能耗低，污染较小，但对设备要求高，浸出后的废渣及废液难以处理。由于选冶联合工艺可以在一定程度上避免火法及湿法工艺的缺点，得到了有色金属行业的广泛关注。浮选是选矿工艺中较为绿色经济且高效的工艺，其中硫化矿的浮选研究更为完善，因此采用硫化工艺将渣中金属氧化物或氧化化合物转化为相应的金属硫化物，再通过浮选工艺回收金属硫化物，对于含锌冶炼渣的资源化回收利用是一种值得研究的方向。然而需要重点解决硫化产物粒径小，晶型差，致使后续浮选工艺没有达到理想效果的问题。对硫化产物进行晶型调控，使硫化产物的晶粒长大和结晶完善，进而实现含锌冶炼渣中有价金属的高效回收。含锌冶炼渣的资源化利用还可集中在生产或改进纳米复合材料、复合螯合氨基酸锌和氧化铁红等高附加值产品上，直接实现由废渣到产品的过程，是进行工业化生产值得考虑的方向。

参考文献：

- [1] 代涛, 陈其慎, 于汶加. 全球锌消费及需求预测与中国锌产业发展[J]. 资源科学, 2015, 37(5):951-960.
- DAI T, CHEN Q S, YU W J. Global zinc consumption and demand forecast and development of China's zinc industry[J]. Resources Science, 2015, 37(5):951-960.
- [2] 中国资源综合利用年度报告(2014)[R]. 再生资源与循环经济, 2014, 7(10): 3-8.
- China annual report on comprehensive utilization of resources(2014)[R]. Recyclable Resources and Cycular Economy, 2014, 7(10): 3-8.
- [3] 郭天立, 高良宾. 当代竖罐炼锌技术述评[J]. 中国有色冶金, 2007(1):5-6.
- GUO T L, GAO L B. Review on today's zinc vertical retorting technology[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2007(1):5-6.
- [4] 胡丕成. 电炉炼锌工艺[J]. 中国有色冶金, 2018, 47(4):1-3.
- HU P C. Zinc smelting process by submerged arc furnace[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018, 47(4):1-3.

- [5] 白桦. 密闭鼓风炉炼铅锌[J]. 工程设计与研究, 2005(1):6-9.
- BAI H. Lead and zinc smelting in closed blast furnace[J]. Engineering Design and Research, 2005(1):6-9.
- [6] 张飞, 曾科. 铅冶炼行业现状及重金属污染防治对策分析[J]. 世界有色金属, 2018(9):1-3.
- ZHANG F, ZENG K. Analysis of lead smelting industry situation countermeasures for prevention and treatment of heavy metal pollution[J]. World Nonferrous Metal, 2018(9):1-3.
- [7] 黄兰青, 白堂谋. 锌冶炼技术现状及发展探讨[J]. 企业科技与发展, 2015(5):41-42.
- HUANG L Q, BAI T M. Discussion on the status and development of zinc smelting technology[J]. Sci-Tech & Development of Enterprise, 2015(5):41-42.
- [8] 王成彦, 陈永强. 中国铅锌冶金技术状况及发展趋势: 锌冶金[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(1):1-7.
- WANG C Y, CHEN Y Q. Lead and zinc metallurgy technology situation and development trends of China: zinc metallurgy[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(1):1-7.
- [9] 缙明亮, 夏丹. 陕西某锌冶炼厂锌冶炼渣综合利用[J]. 矿产综合利用, 2020(4):147-151.
- GOU M L, XIA D. Study on comprehensive utilization of zinc smelting slag in a zinc smelter in Shaanxi province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(4):147-151.
- [10] 闫亚楠, 晏拥华, 贺深阳. 利用炼锌尾渣生产混凝土路面砖性能研究[J]. 混凝土, 2013(7):121-123.
- YAN Y N, YAN Y H, HE S Y. Study on performances of the concrete pavement brick from zincilate[J]. Concrete, 2013(7):121-123.
- [11] 王生辉, 刘荣进, 陈平, 等. 铅锌尾矿和冶炼渣双掺制备复合水泥的试验研究[J]. 水泥工程, 2020(1):21-24.
- WANG S H, LIU R J, CHEN P, et al. Experimental study on the preparation of composite cement by combining lead-zinc tailings with smelting slag[J]. Cement Engineering, 2020(1):21-24.
- [12] 张深根, 杨健, 刘波, 等. 一种危险固废制备微晶玻璃的方法: 中国, CN201410783923.9 [P]. 2015-03-25.
- ZHANG S G, YANG J, LIU B, et al. Method for preparing glass-ceramics from hazardous solid waste: China, CN201410783923.9[P]. 2015-03-25.
- [13] 石振武, 杨海东, 宋娟, 等. 利用铅锌废渣制备银修饰纳米复合材料的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(7):2257-2261.
- SHI Z W, YANG H D, SONG J, et al. Silver modified composite nanomaterials from metallurgical lead and zinc slag[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(7):2257-2261.
- [14] 王艳君, 潘梦雅, 张择瑞, 等. 锌渣与膏状氨基酸应用于生产复合螯合氨基酸锌的综合利用[J]. 广州化工, 2019, 47(16):71-74.
- WANG Y J, PAN M Y, ZHANG Z D, et al. Comprehensive utilization of zinc slag and paste-like amino acids for producing complex chelated amino acidic zinc(II) compounds[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019, 47(16):71-74.
- [15] 郝晓平, 韩进文, 高志强, 等. 锌冶炼废渣的综合利用[J]. 无机盐工业, 2017, 49(7):55-58.
- HAO X P, HAN J W, GAO Z Q, et al. Comprehensive utilization of zinc smelting residue[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2017, 49(7):55-58.
- [16] 谭聪, 肖筱瑜, 孙伟, 等. 锌行业重金属废渣固化/稳定化应用研究[J]. 矿产与地质, 2019, 33(3):562-566.
- TAN C, XIAO X Y, SUN W, et al. Study on solidification/stabilization of heavy metal slag in zinc industry[J]. Mineral Resources and Geology, 2019, 33(3):562-566.
- [17] 申坤, 程言君, 高国龙, 等. 某冶炼废渣的稳定化处理[J]. 有色金属工程, 2013, 3(3):45-49.
- SHEN K, CHENG Y J, GAO G L, et al. Stabilization of a smelting residue[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2013, 3(3):45-49.
- [18] 柴立元, 柯勇, 梁彦杰, 等. 重金属冶炼废渣稳定化/固化处理技术研究进展 [C]. 重金属污染防治及风险评估研讨会暨重金属污染防治专业委会学术年会. 长沙: 中国环境科学学会, 2013.
- CHAI L Y, KE Y, LIANG Y J, et al. Research advances on stabilization/solidification treatment technology of heavy metal-containing smelting slag[C]. Seminar on heavy metal pollution prevention and risk assessment and annual conference of the professional committee on heavy metal pollution prevention and control. Changsha: Chinese Society For Environmental Sciences, 2013.
- [19] 赵金艳, 王金生, 郑骥. 有色金属冶炼废渣有价金属湿法回收技术及现状[J]. 矿产综合利用, 2012(4):7-12.
- ZHAO J Y, WANG J S, ZHENG J. Non-ferrous metal smelting waste slag and valuable metal wet recovery technology and current situation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral

Resources, 2012(4):7-12.

[20] 黄柱成, 蔡江松, 杨永斌, 等. 浸锌渣中有价元素的综合利用[J]. 矿产综合利用, 2002(3):46-49.

HUANG Z C, CAI J S, YANG Y B, et al. Comprehensive recovery of valuable elements from zinc-leaching residue[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2002(3):46-49.

[21] 朱军, 李维亮, 刘曼博, 等. 锌湿法冶炼渣的污染物分析及综合利用技术[J]. 矿产综合利用, 2020(4):59-65.

ZHU J, LI W L, LIU M B, et al. Analysis of contaminants and comprehensive utilization technology of zinc hydrometallurgical slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(4):59-65.

[22] 赵成, 朱军, 王正民, 等. 重要有色金属冶炼废渣的特征及处理技术[J]. 矿产综合利用, 2019(6):1-6.

ZHAO C, ZHU J, WANG Z M, et al. Characteristics and treatment technology of non-ferrous heavy metal smelting slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6):1-6.

[23] 王超, 郭宇峰, 杨凌志, 等. 含锌渣尘中有价金属回收利用现状与研究进展[J]. 金属矿山, 2019(3):21-29.

WANG C, GUO Y F, YANG L Z, et al. Situation and research development of recovery valuable metals in zinc dust and residue[J]. Metal Mine, 2019(3):21-29.

[24] 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.

[25] 张帆, 程楚, 王海北, 等. 铅银渣综合利用研究现状[J]. 中国资源综合利用, 2015, 33(3):37-41.

ZHANG F, CHENG C, WANG H B, et al. Research status of lead-silver residue comprehensive utilization[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2015, 33(3):37-41.

[26] 孙明生. 铁闪锌矿湿法冶炼浸出渣的资源综合利用无害化处理技术与应用[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(9):53-56.

SUN M S. Technology and application of the innocent treatment and comprehensive utilization of the iron sphalerite hydrometallurgical leaching residue[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(9):53-56.

[27] 郭建荣, 荆旭冬, 周蓉. 烟化炉液态渣连续吹炼应用实践[J]. 铜业工程, 2017(3):68-70.

GUO J R, JING X D, ZHOU R. The application and practice on continuous smelting of liquid slag in fuming furnace[J].

Copper Engineering, 2017(3):68-70.

[28] 杨淑霞. 韩国温山锌冶炼厂利用奥斯麦特技术处理锌渣情况介绍[J]. 有色冶金设计与研究, 2001(1):18-24.

YANG S X. Introduction of Onsan zinc smelter in South Korea using Osmelt technology to treat zinc slag[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2001(1):18-24.

[29] 董铁红. 利用旋涡炉工艺处理锌冶炼残渣[J]. 节能, 2009, 28(6):37-38.

DONG T H. Treating zinc smelted residue by vortex furnace technics[J]. Energy Conservation, 2009, 28(6):37-38.

[30] 高丽霞, 戴子林, 张魁芳, 等. 从湿法锌冶炼废渣中提取银和铅[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(5):29-32.

GAO L X, DAI Z L, ZHANG K F, et al. Extraction of silver and lead from slag of zinc hydrometallurgy[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2018(5):29-32.

[31] 郭翠香, 赵由才. 从含铅锌烟尘中综合回收铅和锌[J]. 化工环保, 2008(1):77-80.

GUO C X, ZHAO Y C. Recovery of Pb and Zn from smoke dust[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2008(1):77-80.

[32] 石振武, 杨守洁, 薛群虎. 从铅锌废渣中氨浸锌试验研究[J]. 湿法冶金, 2019, 38(4):271-275.

SHI Z W, YANG S J, XUE Q H. Recovery of zinc from lead-zinc slag using ammonia[J]. Hydrometallurgy of China, 2019, 38(4):271-275.

[33] 郭朝晖, 程义, 邱冠周, 等. Pb/Zn 冶炼废渣中有价金属生物浸出条件优化[J]. 中国有色金属学报, 2008(5):923-928.

GUO Z H, CHENG Y, QIU G Z, et al. Optimization on bioleaching of metal values from Pb/Zn smelting slag[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008(5):923-928.

[34] Jiang G, Peng B, Liang Y, et al. Recovery of valuable metals from zinc leaching residue by sulfate roasting and water leaching[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(5):1180-1187.

[35] 肖军辉, 王进明, 傅开彬, 等. 选冶联合工艺回收云南某铅锌尾渣中 Pb 和 Zn[J]. 金属矿山, 2017(6):192-196.

XIAO J H, WANG J M, FU K B, et al. Recovery of Pb and Zn from Pb-Zn tailings in Yunnan by beneficiation metallurgy combined process[J]. Metal Mine, 2017(6):192-196.

[36] Liu W, Han J W, Qin W Q, et al. Reduction roasting of high iron bearing zinc calcine for recovery of zinc and iron[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2014, 53(2):176-182.

[37] Banza A N, Gock E. Mechanochemical processing of chrysocolla with sodium sulphide[J]. Minerals Engineering,

2003, 16(12):1349-1354.

[38] 闵小波, 陈杰, 梁彦杰, 等. 含锌废渣水热硫化浮选回收的工艺研究[J]. *有色金属科学与工程*, 2013, 4(6):1-7.

MIN X B, CHEN J, LIANG Y J, et al. Recovery of zinc from sludge by a combination of hydrothermal sulfidation and flotation[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2013, 4(6):1-7.

[39] 曾懋华, 奚长生, 彭翠红, 等. 浮选含铅废渣富集铅的研究[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2004(1):12-15.

ZENG M H, XI C S, PENG C H, et al. Study on flotation lead from waste residue of lead[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2004(1):12-15.

[40] Li Y, Wang J, Chang W, et al. Sulfidation roasting of low grade lead-zinc oxide ore with elemental sulfur[J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(7):563-566.

[41] Zheng Y X, Liu W, Qin W Q, et al. Improvement for sulphidation roasting and its application to treat lead smelter slag and zinc recovery[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2015, 54(1):92-100.

[42] Han J, Liu W, Wang D, et al. Selective sulfidation of lead smelter slag with pyrite and flotation behavior of synthetic ZnS[J]. *Metallurgical and Materials Transactions. B, Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2016, 47(4):2400-2410.

Current Situation and Development Trend of Comprehensive Utilization of Zinc Smelting Slag

Gu Siyu, Liu Wei, Han Junwei, Qin Wenqing

(School of Minerals Processing & Bioengineering, Central South University, Changsha, Hunan, China)

Abstract: In order to meet the needs of the national development, the continuous development of zinc resources has increasingly depleted high-grade ore and produced a large amount of zinc smelting slag. Due to the diverse production methods of zinc, the composition and properties of zinc smelting slag are different. The processing difficulty is also significantly increased. Storage of zinc smelting slag will not only cause serious harm to the surrounding environment, but also cause waste of valuable metal resources. This article summarizes the harm of zinc smelting slag and the current utilization methods, and focuses on the principle advantages and disadvantages and research status of the main treatment processes for recovering valuable metals from zinc smelting slag. Finally, it points out the research direction that can be strengthened in the resource treatment technology of zinc smelting slag.

Keywords: Zinc smelting slag; Resource utilization; Comprehensive utilization