铅锌冶炼渣综合利用研究进展

陈玲玲，韩俊伟，覃文庆，刘维

中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083

中图分类号：X758　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001－0076(2021)03－0049－07
DOI：10.13779/j.cnki.issn1001－0076.2021.03.007

摘要　铅锌冶炼行业每年产生的废渣增量大和历史堆存量大。这些废渣既是危险废弃物，同时又是一种重要的二次资源，因此铅锌冶炼渣的资源化处理受到广泛的关注。文章对我国铅锌冶炼工艺现状、铅锌废渣的产生及危害和铅锌冶炼渣的综合利用技术进展进行了详细阐述，重点介绍铅锌冶炼渣的资源化利用研究进展。

关键词　铅锌冶炼渣；二次资源；综合利用；资源化

铅和锌是重要的有色金属，是国民经济发展中的重要原料之一，广泛地应用于人类日常生活和冶炼行业[1]。铅是最早从铅锌矿中提炼出来的金属之一，具有柔软性和强延展性，约 70% 左右的铅用于制造铅酸蓄电池，还多用于制造电缆铅包皮、铅管铅板、颜料和合金等；锌在有色金属的消费中位列前三，全球锌总产量中大约有一半用于镀锌，还多用于生产锌合金、黄铜和青铜、氧化锌、干电池和化工制品。世界铅锌矿产资源丰富，主要分布在澳大利亚、中国、美国、加拿大、墨西哥和秘鲁等国家。目前，我国已在 29 个省（区、市）勘探出铅锌资源，主要集中在滇西、滇川、南岭、秦岭－祁连山以及内蒙古狼山－渣尔泰等地区[2,3]。尽管近年来有色金属行业不景气，金属价格跌落，中小企业发展举步维艰，但我国铅锌产量总体保持增长势头，近十年我国铅锌产量如图 1 所示。数据显示，2020 年我国铅、锌产量分别为 644 万 t 和 643 万 t，同比增长 9.4% 和 2.7%，居世界首位[4]。

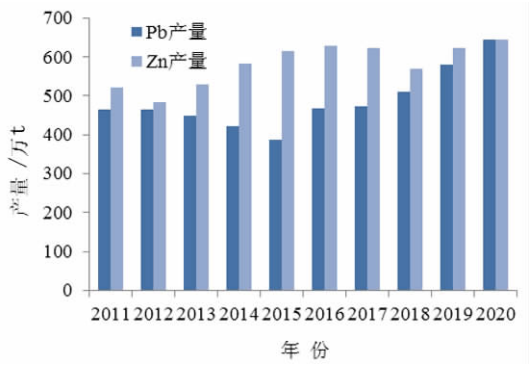

图 1　2011－2020 年铅和锌年产量图
Fig. 1　Production chart of annual lead and zinc from 2011 to 2020

我国铅锌冶炼企业分布广，为满足生产和消费需求，铅锌冶炼企业数量和规模不断扩张，冶炼工艺不断改进，使得铅锌冶炼技术获得了快速发展[5]，但从总体上来看我国铅锌冶炼工艺复杂，冶炼过程产生大量冶炼渣。铅锌冶炼渣中不仅含有 Pb、Zn、Cr、Hg 和 As 等具有高度迁移性的重金属，还含有 Au、Ag 和 Pt 等贵金属，以及 Ga 和 In 等稀散金属，被视为重要的二次资源。铅锌冶炼渣的直接堆存，不仅占用大量土地，还会对土壤和水体造成潜在污染。另一方面，矿产资源在人类不断的开发中呈现出“贫、细、杂”的趋势，而铅锌冶炼渣中某些有价金属含量甚至远高于天然矿石中的含量。因此对铅锌冶炼渣的资源化利用不仅能够释放土地，减轻对环境的污染，还可以充分回收其中的有价金属，是一条可持续化发展的道路[6]。

收稿日期：2021－03－09
基金项目：湖南省自然科学基金青年基金项目(2019JJ50805)；国家自然科学基金项目(51804342)；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：陈玲玲(1996－)，女，硕士，主要从事二次资源回收与利用研究，E－mail：631067576@qq.com。
通信作者：韩俊伟(1987－)，男，博士，副教授，主要从事二次资源回收与利用研究，E－mail：hanjunwei2008@163.com。

1　铅锌冶炼工艺现状

1.1　铅冶炼工艺现状

铅冶炼工艺是在铜冶炼技术的基础上再改进而发展起来的一种冶炼方法[7]。目前,我国铅冶炼工艺以火法为主,湿法炼铅技术还不成熟[5,8]。火法炼铅工艺主要有传统炼铅法和直接炼铅法,约 85% 以上的铅是由传统烧结焙烧 - 鼓风炉熔炼技术生产的,工艺流程见图 2[5]。传统炼铅法是应用较早的工艺,受到工艺条件和设备的限制,存在能耗高、工艺流程复杂、返料量大、装备自动化水平低、SO_2 气体捕集回收困难且无法制酸等诸多难以解决的问题。直接炼铅法将传统生产流程的氧化还原两个过程合并在一个装置内完成,利用硫化铅精矿的表面能和燃烧热等特性,在熔池熔炼或闪速熔炼过程中加入氧气强化熔炼,解决了传统炼铅工艺中出现的诸多问题。直接炼铅法有基夫赛特法(Kivcet 法)、富氧底吹熔池熔炼法(QSL 法)、富氧顶吹浸没熔炼法(Ausmelt 法)、卡尔多炼铅法(Kaldo)和氧气底吹熔炼—鼓风炉还原熔炼法(SKS 法或水口山法)等[6-9],直接炼铅法的出现减少了铅冶炼过程中“三废”的产生,有利于铅锌冶炼行业清洁发展。目前,国外最具竞争力的 3 种铅冶炼方法分别是基夫赛特法、QSL 法和闪速熔炼法;国内常采用我国自主研发的氧气底吹—鼓风炉还原熔炼法[8,10]。

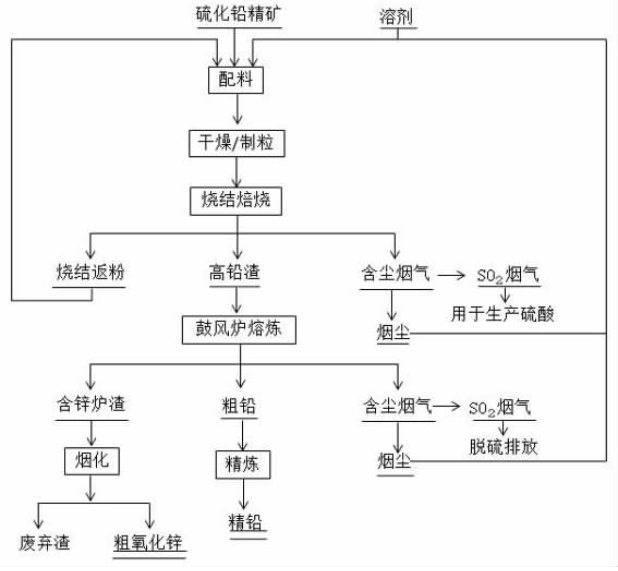

图 2　传统烧结焙烧—鼓风炉铅熔炼工艺流程图

Fig. 2　Flow chart of traditional sintering roasting - blast furnace lead smelting process

1.2　锌冶炼工艺现状

目前,锌冶炼工艺分为湿法和火法两大类。湿法炼锌可分为常规酸浸(或低温酸浸)和高温高酸浸出,湿法炼锌生产的锌占全球锌产量的 85% 以上,因此湿法炼锌技术占据主导地位,常规湿法炼锌工艺流程见图 3。由于湿法炼锌技术具有能耗低、环境友好、对有价金属的回收率高和易于实现工业化规模生产等优点而得到快速发展,湿法工艺主要工序为“沸腾焙烧—两段浸出—净化除杂—电积”[5],是火法和湿法相结合的冶炼技术,全湿法炼锌工艺有硫化锌精矿氧压浸出法。由于锌独特的性质,且锌精矿中含有少量的铁闪锌矿和黄铁矿,在沸腾焙烧过程中会不可避免地产生铁酸锌类物质,铁酸锌在后续的浸出过程中难以溶出,因而会产生大量铁酸锌渣,因此在常规浸出法的基础上发展出一些针对除铁的高温高酸浸出新工艺,这些新工艺的出现使得锌冶炼工艺经历了缓慢发展到快速发展的过程。高温高酸浸出包括高压浸出—赤铁矿法、热酸浸出—针铁矿法、热酸浸出—黄钾铁矾法和热酸浸出—喷淋除铁法等[5,11]。火法炼锌工艺主要包括竖罐炼锌、横罐炼锌、电热法炼锌和密闭鼓风炉炼锌(ISP)等,很多常规的火法炼锌方法已经基本淘汰,剩下的基本上都是对原料适应性强和工艺成熟的密闭鼓风炉冶炼法,如横罐炼锌已经基本淘汰,竖罐炼锌在国内外都比较罕见,密闭鼓风炉炼锌工艺是当下主要的火法炼锌方法。

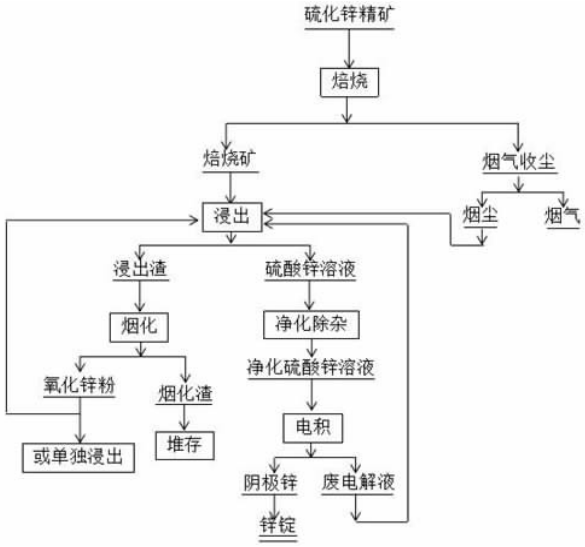

图 3　传统湿法炼锌工艺流程图

Fig. 3　Flow chart of traditional zinc hydrometallurgical process

2　铅锌废渣的产生及危害

目前，我国铅锌冶炼企业多、规模迥异，企业的工艺技术及装备水平参差不齐，不少企业工艺落后，装备陈旧，生产成本高，污染严重，加上我国铅锌冶炼起步晚，对矿产资源的综合利用率低，造成每年冶炼废弃物的排放量巨大，而综合回收利用率低[8]。据估算，铅冶炼系统每生产 1 t 金属铅会排放 0.71 t 废弃渣，锌冶炼系统每生产 1 t 金属锌会排放 0.96 t 废弃渣[12]，照此计算，2020 年产生的铅锌冶炼废渣量达数千万吨，废渣堆积如山，历史堆存量巨大，给环境造成恶劣影响[13]。

铅冶炼过程废渣的主要来源是火法粗炼—电解精炼工艺，产生的废渣主要有粗炼炉渣、粗炼浮渣、精炼浮渣和贵金属废渣等；锌冶炼过程中废渣主要来自“焙烧—浸出—浸液—电积”工艺，其浸出过程产生大量锌浸出渣，还有浸化渣、浮渣和锌阳极泥和铅阳极泥等[14]。铅锌冶炼渣的化学成分分析表明，冶炼废渣中含有丰富的二次资源和一些有毒有害元素，而企业倾向于采用直接堆存处理，随着堆存时间的推移，在长期风化和淋洗等外界作用下，重金属会释放到自然环境中去，造成土壤退化和水体破坏，这种处置方式不仅浪费资源，占用大量场地，在场地费和管理费上耗费大量资金，而且不利于周边生态环境健康发展，影响人与自然和谐共生[15-17]。近年来，我国报道多起因重金属污染引发的中毒事件，如陕西凤翔、河南济源、华南武冈、湖南嘉禾等数起铅冶炼排放渣引起的重金属污染事件，敲响了国家和企业重金属污染防治的警钟。另一方面，随着人民环保意识逐渐增强，加上近年来国家明确提出企业要走节能减排和绿色低碳发展道路，加快建设无废城市的要求，因此如何减少冶金废渣的排放，如何提高冶金废渣的综合利用率以及如何形成成熟的废渣全消纳闭合生产体系早已是人们关注的话题[18]。

3　铅锌冶炼渣的综合利用技术进展

随着人类资源短缺问题的凸显和国民环保意识的增强，工业固体废弃物中因含有多种有价金属而再次走入大众的视野，这种废弃资源回收—再生利用已成为国内外研究热点。目前，对铅锌冶炼废渣的综合利用研究主要关注在提取有价金属和生产建筑材料等方面[10,19]。

3.1　提取有价金属

近年来，国内外以工业固体废弃物为原料，再生金属资源及其他材料的研究颇多，已取得了重要成果。由于铅锌冶炼废渣中含有丰富的 Pb、Zn、Au、Ag、Ga 和 In 等金属，因此提取各种有价金属是废渣资源化利用最主要的途径。目前，铅锌冶炼废渣中有价金属的回收有湿法、火法、浮选以及选冶联合等手段。

（1）湿法提取

湿法提取技术是根据冶炼废渣产生原理，使用合适的溶剂对冶炼过程中产生的中间产物选择性溶解，使其中的有价成分或有害杂质进入溶液中，再通过适当的工序提取其中的有价金属[5,20-22]。湿法提取技术具有金属浸出率高、选择性强、能耗低和环境友好等优点，因此企业多采用湿法回收其中的金属。

周起帆等[23]考察了温度、浸出时间、氯化钠浓度和酸度等对锌冶炼产生的铅银渣浸出的影响，确定在氯化钠浓度 300 g/L、氯化钙浓度 50 g/L、盐酸浓度 0.4 mol/L、浸出温度 85 ℃、浸出时间 2.5 h、液固比为 8 的条件下铅银渣中铅和银的浸出率分别可达 94.43% 和 91.48%，渣中铅含量为 0.9%，银含量 84.4 g/t。高丽霞等人[22]对某铅锌冶炼企业湿法工艺的锌废渣进行氯盐浸出，以提取其中的铅和银，循环浸出三次后，浸出液中银的浓度达到 139 mg/L，浸出率为 93.84%，铅的浸出率为 81.23%。彭兵等[24]利用还原焙烧—碱浸出工艺处理高铁锌焙砂，解决焙烧过程中产生的阻碍后续浸出的铁酸锌类物质，作者提出在还原焙烧的基础上使铁酸锌分解，再利用氢氧化钠碱性体系浸出锌，使铁留在渣中待后续处理，实现锌铁分离，在最优工艺条件下，锌的浸出率可达到 90% 以上。

（2）火法提取

火法一直在二次资源的回收中占据主导地位，具有工作温度区间大、工艺简单、反应速度快和物相分离简单等优点。火法处理后基本可以实现铅锌冶炼废渣的无害化和减量化，对环境危害程度降低，然而火法存在环境污染严重和能耗高，因此在未来发展中面临着严峻的挑战。火法处理主要有回转窑法（威尔兹法）、烟化法、奥斯麦特法、基夫赛特法和旋涡炉法[5,12,14]。

传统锌生产流程产生大量的锌浸出渣，对锌浸出渣的处理普遍采用回转窑挥发法。回转窑挥发的原理是将锌浸出渣和焦炭还原剂按一定比例混合后在窑体内进行还原熔炼，炉内温度一般达到 1 100 ~ 1 300 ℃，此工艺对锌的挥发率高达 90% 以上。何启贤等[25]采用回转窑富氧烟化工艺处理锌浸出渣，最终结果表明，利用富氧挥发工艺提高有价金属的回收率是可行的，在一定的条件下还可以控制锌浸出渣的处理成本和处理量。烟化吹炼工艺也可以高效回收锌浸出渣中的有价金属，烟化吹炼技术实际上是在同一炉内，利用高温使渣中可挥发的有价金属以氧化烟尘的形式挥发，再将挥发烟尘捕集回收和冶炼，渣在高温下完全熔融，水淬冷却后的固化渣可以用于生产建筑材料[12,26]。该方

法最大的优点就是对铅、锌、锗和银等金属的回收率高,同时能回收锡和铟等金属,兼具原料适应性强和操作简单的优点。蒋荣生等[27]根据锌浸出渣和铅还原渣的特性,将两种渣按一定比例混合后烟化处理,生产实践表明,该工艺的社会经济效益好,应用性强。大量研究表明,烟化法通过烟化形式回收渣中稀贵金属,而且铅和锌以氧化烟尘的形式回收,已成为金属回收的首选工艺。基夫赛特炉法对含有 Pb、Zn、Cu 和 Ag 等金属渣料的挥发回收率很高。蒋建兴等[28]采用基夫赛特炼铅法处理铅锌冶炼废渣,原料除了铅精矿外,还能完全消耗厂区内含铅的渣料。该工艺能耗低,主要金属回收率高,烟尘率低,有效提升了有价金属回收率,不仅解决低浓度二氧化硫烟气的制酸问题,又解决了锌浸出渣大量堆存问题。

(3)浮选法

浮选的原理实际上是利用矿物表面物理化学性质的不同或矿粒与药剂作用后矿粒表面因产生亲水性和疏水性差异而发生分离的过程。由于火法对某些贵金属元素的回收效果不好,湿法产生的渣量大,而传统的浮选法具有能耗低、处理量大和环保等众多优点,因此多采用浮选法回收贵金属,尤其是锌浸出渣中银的回收[29,30]。云南某锌冶炼厂锌离子浓度对银的回收率影响较大,何名飞等[31]对现场流程和设备进行改造,利用浮选柱实现一次粗选三次精选三次扫选流程,实现锌浸出渣中银的回收,最终可以把原有工艺银的回收率从 72.55% 提升到 82.88%,银的品位提高到5 700 g/t,给企业带来巨大的经济效益。Wei Yao 等[32]利用浮选法处理广东某冶炼厂锌浸出渣,浸出渣经水洗涤后再浮选,以 CaO 作 pH 调整剂,Na_2SiO_3 作抑制剂,水杨羟肟酸作捕收剂,松醇油作起泡剂,浮选流程为一次粗选一次扫选三次精选,最终得到回收率和精矿铅品位分别为 76.39% 和 47.18% 的铅产品。李琛等[33]研究了锌浸出渣的浮选行为,在以六偏磷酸钠为分散剂,丁铵黑药为捕收剂,乳化煤油为辅助捕收剂,MIBC 为起泡剂,pH = 5.47 的条件下,采用一次精选两次扫选流程得到银混合精矿品位为 3 439 g/t、回收率为 76.54% 的良好指标。

铅锌冶炼渣中有价金属大都以难浮硅酸盐、硫酸盐和氧化物等形式存在,浮选效果一直不理想。硫化浮选技术是指通过外加硫源或以自身为硫源将氧化物料中的有价金属部分或全部转为易浮硫化物的技术。目前,硫化浮选技术包括表面硫化浮选、机械硫化浮选、水热硫化浮选和硫化焙烧浮选。其中硫化焙烧浮选可以利用高温控制硫化物晶体的形成和晶粒生长,使后续工艺获得比其他硫化技术更好的浮选指标,广泛用于处理低品位铅锌矿石和富含铅锌的冶炼废渣。

韩俊伟等[34-36]提出高温选择性硫化工艺,系统地研究了铅冶炼渣中锌在硫化生成 ZnS 的过程中,硫、黄铁矿以及钠盐的添加对渣选择性硫化的可行性。通过大量的试验研究得到,铅冶炼渣中锌的氧化物在以碳为还原剂、钠盐为添加剂、硫/黄铁矿为硫化剂的条件下进行高温硫化焙烧,可以选择性地转化为晶粒粗和结晶好的硫化物,且锌的硫化度大于 95%。研究结果表明,添加碳粉不仅可以促进选择性硫化过程,而且还能减少硫的用量和 SO_2 气体的排放,钠盐的添加有利于提高硫化反应的活性,增强硫化物的可浮性,降低混合物的熔点。张波[37]还利用硫化技术处理黄钾铁矾渣,该工作利用渣中的硫为硫源,既起到硫化焙烧的作用,又能达到固硫的效果,结果得到锌浸出渣在 800 ℃,焙烧温度 2 h,碳添加量为 15% 时,锌的硫化程度达到 98%,固硫效果为 91%。

(4)选冶联合提取

选冶联合工艺是将湿法、火法、磁选、重选和浮选等结合起来的一种选别工艺,该工艺先利用冶炼技术改变物料的某些性质,再用传统选矿技术回收金属。肖鹏[38]利用选冶联合技术对锌窑渣进行无害化处理,首先对窑渣进行选矿预处理,选出易浮的 C 和带磁性的 Fe,然后用常压氧化浸出技术处理剩余物料,以回收其他金属,在最佳条件下(H_2O_2 添加量 0.6 mL/g、硫酸浓度 2.92 mol/L、反应温度 80.51 ℃、反应时间 2.2 h,液固比 6∶1),铟、铜和锌的浸出率分别为 91.57%、89.84% 和 66.49%。Yayun Wang 等[39]提出用直接还原—磁选法回收黄钾铁矾渣中的铅、锌和铁,在煤的添加量为 25%,还原焙烧温度 1 250 ℃时,铅和锌的挥发率达到 95% 以上,铁的回收率达到 91.97%;在磁场磁感应强度为 24 kA/m 的条件下,铁的回收率达到 50.87%,作者提出的直接还原和磁选的方法处理危险废弃物黄钾铁矾渣的效果明显,不仅回收大量有价金属和单质铁,还解决因铁矾渣带来的环境污染问题。

湿法冶炼是锌冶炼厂普遍采用的方法,该过程中大量银和铁残留在锌浸出渣中,浮选法不能有效回收,很多学者提出用选冶联合工艺处理此类渣。刘维和韩俊伟[40-44]提出“磁化焙烧—低酸浸出—磁选”工艺,用于回收高铁硫化锌精矿中的金属锌和铁。该工艺采用动态回转炉,把高温氧化焙烧后的产物进行温度稍低的还原焙烧,使氧化过程生成的铁酸锌在以 CO 和 CO_2 混合气体为弱还原剂的气氛下选择性分解为氧化锌和磁铁矿,焙烧预处理后对煅烧物进行常规低酸浸出以提取其中的锌,进一步磁选处理浸出残渣以回收其中的铁,其他的有用金属会富集在选铁尾矿中,有利于进一步回收。焙烧过程主要发生的反应有:

$$3ZnFe_2O_4 + CO(g) = 3ZnO + 2Fe_3O_4 + CO_2(g) \quad (1)$$

$$ZnFe_2O_4 + CO(g) = ZnO + 2FeO + CO_2(g) \quad (2)$$

在作者探索出的最佳焙烧条件下，锌和铁的浸出率分别约为 90% 和 9.5%；在磁选最佳条件下，铁精矿的铁品位达到 53.24%，铁的回收率达到 84.34% 以上。该工艺简化了现有炼锌工艺，还原焙烧温度较低，可以充分利用氧化焙烧所携带的热量进行还原焙烧，降低能耗，在处理危险固废的同时回收部分有用金属。选冶联合工艺可以实现单一工艺不能达到的技术经济指标，不仅可以减少因冶炼带来的尾气排放，还可以利用选矿成本低的优势回收金属，实现二次资源中有价元素的高效回收和清洁利用，此工艺具有很大的发展空间。

3.2　生产建筑材料

利用铅锌冶炼渣、煤矸石、尾矿及钢渣生产建筑材料是大宗固体废弃物资源化利用的重要手段，用于生产建筑材料的大宗固体废弃物一般不会产生二次污染，还能达到消除污染，变废为宝的积极效果，所以该技术发展较快[45]。铅锌冶炼过程中产生的重金属含量少和物化性质稳定的废渣常用于生产建筑材料。因铅锌冶炼废渣与普通水泥有相似的性质，而地聚合物综合性能优于普通水泥，且制备工艺简单、低能耗、低成本和环境友好，故利用废弃物制备地聚合物，用于生产建材受到广泛的研究[46,47]。孙双月等[45,48]采用铅锌冶炼产生的废渣为硅铝原料，添加一定的碱性激发剂制备胶凝材料，固化一定时间后利用 XRD 和 SEM 等分析表征手段检测出这种胶凝材料微观形貌致密，胶凝体能够与未反应原料紧密连接在一起，因此这种胶凝材料强度较大，可用于生产建筑材料，而且还可以利用其自胶凝性使渣中的重金属离子得到有效的固化，减少重金属溶出风险[49]。

铅冶炼烟化渣和锌冶炼挥发渣是在铅锌冶炼过程中产生的两种量大且难以处理的重金属危险废弃物，传统的处理方式是固化后安全填埋，但该技术不仅填埋成本高，其中的重金属还有溶出的风险，对环境的影响需要长期监测。郭斌[50]利用烟化渣和挥发窑渣制备微晶玻璃和地聚合物，并研究了渣中 Pb 和 Cd 在材料制备中的固化机理，当两种渣分别与不同比例的粉煤灰和不锈钢渣混合，制备出的微晶玻璃性能较好，两种渣分别与粉煤灰制备的地聚合物也能达到强度标准。

虽然冶金废渣经无害化处理后用于生产建材消纳了大量的废弃物，但地聚合物对铅锌冶炼渣中重金属的稳定固化能力有限，而且随着杂质的混入，部分未释放的重金属离子的浸出率会受到影响，长期暴露在自然条件下，受到酸雨腐蚀和风化作用等的破坏，可能会随之排放到空气中，长此以往会存在安全问题[47]。以铅锌冶炼废渣生产建筑材料的安全性检验需要很长的周期才能完成，因此探寻其他清洁利用铅锌冶炼废渣的途径对铅锌冶炼行业具有重要意义。

4　结论

（1）作为铅锌生产和消费大国，我国铅锌冶炼行业每年排放废渣量巨大，直接堆存和固化填埋的方式对环境危害大。由于废渣中含有丰富的有价金属，因此废渣的资源化利用不仅可以减轻环境压力，还可以通过回收有价金属缓解资源压力，是铅锌冶炼行业走可持续发展的必由道路。

（2）在冶炼废弃物综合利用的过程中，主要通过提取其中有价金属，减少资源浪费，也可以通过以含硅铝酸盐的铅锌固体废弃物为原料生产建筑材料，减少固体废渣的排放，减轻环境和土地压力，使冶炼废渣给国民经济带来良好的社会和经济效益。未来，铅锌冶炼渣的资源化再生利用及如何高效环保地利用其中的有价成分仍是今后研究工作的重点。

参考文献：

[1] 何章辉. 我国铅锌矿产资源的特征及选矿技术[J]. 科技展望，2016，26(2)：143.

[2] 戴自希. 世界铅锌资源的分布、类型和勘查准则[J]. 世界有色金属，2005(3)：15－23，6.

[3] 雷力，周兴龙，文书明，等. 我国铅锌矿产资源特点及开发利用现状[J]. 矿业快报，2007，263(9)：1－4.

[4] 2020 年铅锌行业运行情况[EB/OL]. (2021－02－08)[2021－04－09]. https://www.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/yclgy/ys/art/2021/art_feb2f69776f246a3841737c829a5b48d.html.

[5] 刘群. 铅锌冶炼渣的资源化研究进展[J]. 河南化工，2017，34(2)：11－15.

[6] 刘凯凯，周广柱，周静. 铅锌冶炼渣性质及综合利用研究进展[J]. 山东化工，2013，42(7)：58－60，64.

[7] 郭儒，杨晓松，林星杰. 我国铅锌冶炼清洁生产技术现状及发展趋势[C]//2016 中国环境科学学会学术年会. 2016：4449－4453.

[8] 李若贵. 我国铅锌冶炼工艺现状及发展[J]. 中国有色冶金，2010，39(6)：13－20.

[9] 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.

[10] 李凯茂，崔雅茹，王尚杰，等. 铅火法冶炼及其废渣综合利用现状[J]. 中国有色冶金，2012，41(2)：70－73.

[11] 蒋继穆. 中国铅锌冶炼技术盘点[J]. 中国有色金属，2012(3)：32－33.

[12] 侯晓波. 铅锌冶炼渣处理的系统分析及研究[J]. 云南冶金，2011，40(3)：42－46.

[13] 梁彦杰. 铅锌冶炼渣硫化处理新方法研究[D]. 长沙：中南大学，2012.

[14]《铅锌冶金学》委员会编著. 铅锌冶金学[M]. 北京：科学出版社，2003.

[15] DU BY, ZHOU J, LU BX, et al. Environmental and human health

risks from cadmium exposure near an active lead – zinc mine and a copper smelter, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 720.

[16] 陈凤,董泽琴,王程程,等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. 环境科学,2017,38(20):4360 – 4369.

[17] PAN DE'AN, LI LL, TIAN X, et al. A review on lead slag generation, characteristics, and utilization[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2019, 146: 140 – 155.

[18] 邓新辉,柴立元,杨志辉,等. 铅锌冶炼废渣堆场土壤重金属污染特征研究[J]. 生态环境学报,2015(9):1534 – 1539.

[19] 孙坚,耿春雷,张作泰,等. 工业固体废弃物资源综合利用技术现状[J]. 材料导报,2012,26(11):105 – 109.

[20] 齐兆轩,于洋. 有色金属冶炼废渣湿法回收技术研究[J]. 世界有色金属,2018(15):26 – 27.

[21] 高丽霞,戴子林,李桂英,等. 从湿法锌冶炼废渣中高效回收银的研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2016(4):45 – 48,65.

[22] 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.

[23] 周起帆,蒋开喜,王海北,等. 锌冶炼铅银渣湿法浸出工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2018(6):1 – 4.

[24] 彭兵,林冬红,刘恢,等. 高铁锌焙砂还原焙烧 – 碱浸工艺[J]. 中国有色金属学报,2017,27(2):423 – 429.

[25] 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.

[26] 陈萃. 烟化吹炼技术的现状和发展[J]. 中国有色冶金,2017,46(1):23 – 25,53.

[27] 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.

[28] 蒋建兴,李样人,郭海军. 基夫赛特炼铅工艺实践[J]. 世界有色金属,2018(18):7 – 9.

[29] 谢朝学,袁慧珍. 用充填式浮选机回收铅锌浸渣中银的试验研究[J]. 金属矿山,2007(5):81 – 83.

[30] YANG ZC, GE YY, ZHANG YL, et al. Recovery of silver from zinc acid – leaching residue by flotation[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 392: 14 – 23.

[31] 何名飞,简胜,张晶. 锌浸出渣中银矿物关键选冶技术研究[J]. 云南冶金,2016,45(4):21 – 24.

[32] YAO W, LI ML, ZHANG M, et al. Lead recovery from znc leaching residue by flotation[J]. JOM, 2019, 71(12): 4588 – 4593.

[33] 李琛,韩俊伟,刘维,等. 锌浸出渣银浮选回收试验初探[J]. 有色金属(选矿部分),2018(6):35 – 39.

[34] HAN JW, LIU W, QIN WQ, et al. Effects of sodium salts on the sulfidation of lead smelting slag[J]. Minerals Engineering, 2017, 108: 1 – 11.

[35] HAN JW, LIU W, WANG DW, et al. Selective sulfidation of lead smelter slag with pyrite and flotation behavior of synthetic ZnS[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(4): 2400 – 2410.

[36] HAN JW, LIU W, WANG DW, et al. Selective sulfidation of lead smelter slag with sulfur[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2016, 47(1): 344 – 354.

[37] ZHANG B, ZHU L, LIU W, et al. Sulfidation and sulfur fixation of jarosite residues during reduction roasting[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2019, 50(2): 761 – 771.

[38] 肖鹏. 锌窑渣选冶联合综合回收有价金属工艺研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2018.

[39] WANG YY, YANG HF, JIANG B, et al. Comprehensive recovery of lead, zinc, and iron from hazardous jarosite residues using direct reduction followed by magnetic separation[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2018; 25(2): 123 – 130.

[40] 韩俊伟. 选冶联合清洁处理高铁锌焙砂新技术研究[D]. 长沙:中南大学,2014.

[41] HAN JW, LIU W, QIN WQ, et al. Innovative methodology for comprehensive utilization of high iron bearing zinc calcine[J]. Separation and Purification Technology, 2015, 154: 263 – 270.

[42] HAN JW, LIU W, QIN WQ, et al. Recovery of zinc and iron from high iron – bearing zinc calcine by selective reduction roasting[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 22: 272 – 279.

[43] LIU W, HAN JW, QIN WQ, 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.

[44] HAN JW. Removal of iron impurity from zinc calcine after magnetization roasting[C]. //7th International symposium on High – Temperature Metallurgical Processing. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2016: 543 – 550.

[45] 孙双月,蔡靖. 利用铅锌冶炼废渣制备碱激发胶凝材料的试验研究[J]. 广东化工,2016,43(5):39 – 40.

[46] XIA M, MUHAMMAND FAHEEM, ZENG LH, et al. Solidification/stabilization of lead – zinc smelting slag in composite based geopolymer[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 1206 – 1215.

[47] LI S, HUANG X, MUHAMMAND FAHEEM, et al. Waste solidification/stabilization of lead – zinc slag by utilizing fly ash based geopolymers[J]. RSC Advances, 2018, 8(57): 32956 – 32965.

[48] 孙双月,牛丽红,王聪. 铅锌冶炼废渣和尾矿制备地聚合物的研究[J]. 中国矿业,2015(7):48 – 52.

[49] ZHANG PP, MUHAMMAND FAHEEM, YU L, et al. Self – cementation solidification of heavy metals in lead – zinc smelting slag through alkali – activated materials[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249.

[50] 郭斌. 铅锌冶炼渣制备微晶玻璃和地质聚合物及其铅镉固化机理[D]. 北京:北京科技大学,2017.

Advances in Comprehensive Utilization of Lead – zinc Smelting Slag

CHEN Lingling, HAN Junwei*, QIN Wenqing, Liu Wei

School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China

Abstract: The lead – zinc smelting industry produces a large increment of waste slag each year and a large historical stockpile. These slags are not only hazardous wastes, but also an important secondary resource. Therefore, the resource treatment of lead – zinc smelting slag has received extensive attention. The article elaborates on the current situation of lead – zinc smelting process in China, the generation and hazards of lead – zinc slag and the technological progress of comprehensive utilization of lead – zinc smelting slag. The research progress on the resource utilization of lead and zinc smelting slag is introduced especially.

Key words: lead – zinc smelting slag; secondary resources; comprehensive utilization; recycling

引用格式:陈玲玲,韩俊伟,覃文庆,刘维. 铅锌冶炼渣综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用,2021,41(3):49 – 55.
Chen LL, Han JW, Qin WQ, and Liu W. Advances in comprehensive utilization of lead – zinc smelting slag[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(3): 49 – 55.

投稿网址:http://kcbh.cbpt.cnki.net　　E – mail:kcbh@chinajournal.net.cn