

从铅银渣中回收金银概况

郭艳华, 杨俊龙, 柏亚林, 郭海宁
(西北矿冶研究院, 甘肃 白银 730900)

摘 要: 为实现铅银渣中金银的综合回收, 对铅银渣物理化学性质、有价金属含量、赋存状态、铅银渣中金银的回收方法、研究进展及其应用情况进行综述。铅银渣粒度细、酸度强、可溶物含量高, 渣中矿物经历过相体转化由硫化物转变成氧化物, 以再造矿物形式存在, 选矿难度大; 铅银渣有价金属铜、铅、锌、金、银含量较高, 经济价值可观。目前, 从铅银渣中回收金银的主要方法为浮选法、湿法、火法、湿法-火法联合、选冶联合等。通过分析各种方法优缺点, 指出单一的浮选法流程简单、成本低, 但金银回收率低; 湿法、火法或湿法-火法工业应用良好, 但是存在工艺复杂、成本高; 选冶联合方法金属回收率高、流程适应性强, 便于连续操作, 具有较好的发展应用前景。

关键词: 选矿; 冶金; 铅银渣; 选冶联合; 综合回收

中图分类号: TF831; TF832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2023)04-0091-07

Overview of recovery of gold and silver from silver and lead slag

GUO Yanhua, YANG Junlong, BAI Yalin, GUO Haining

(Northwest Research Institute of Mining and Metallurgy, Baiyin 730900, Gansu, China)

Abstract: An overview of the recovery of gold and silver from lead and silver slag was presented in this paper, including the physical and chemical properties of silver and lead slag, the content of valuable metals in the slag, the occurrence states of silver and gold, the reported recovery methods and their application and the recent research progress. Lead-silver slag has fine particle size, strong acidity and high soluble content. The minerals in the slag have undergone phase transformation from sulfide to oxide and exist in the form of reconstituted minerals, making the slag difficult to be concentrated. However, the slag has considerable economic value, due to the high content of copper, lead, zinc, gold and silver in it. At present, the main methods of recovering gold and silver from lead and silver slag are flotation, hydro-metallurgy, pyro-metallurgy, combined process of hydro and pyro-metallurgy, combined process of selecting and smelting. By analyzing the advantages and disadvantages of each method, it was pointed out that flotation method is a simple process with low cost, but the resulting recovery of gold and silver is not satisfactory. The latter three methods, despite good industrial application, involve the complicated processes, leading to high costs. As for the combined process of selecting and smelting, it has the advantages of strong adaptability and easy continuous operation and high recovery rates, showing great potential for further development and wide application.

Key words: mineral separation; metallurgy; lead silver slag; combined process of selecting and smelting; comprehensive recovery

我国伴生金、银在金、银矿产资源中占据非常重要的地位, 伴生金占金矿保有储量的 41.1%左右,

伴生银占银矿总储量的 90%以上^[1]。伴生金银矿床主要为铜矿床、铅锌矿床、硫矿床等, 在回收铜、

收稿日期: 2023-02-24

基金项目: 白银区科技计划项目(2022-1-5G)

第一作者: 郭艳华, 女, 硕士, 高级工程师; 研究方向: 二次资源综合利用; E-mail: gyh19861109@163.com

铅、锌、硫等金属时,金、银随之进入精矿,通过冶炼进行回收,也有一部分进入冶炼渣中。提高我国难处理金、银伴生矿石的利用率和处理能力,加快二次资源中金、银的综合回收率,是目前金、银回收的重要方向。我国每年湿法冶炼产生大量的铅银渣,铅银渣中含有较高的金、银。从铅银渣中回收金、银不仅符合国家的“双碳目标”,也可弥补金、银资源的不足,对我国国民经济的发展起着至关重要的作用。

1 铅银渣概况

传统的湿法炼锌工艺为焙烧-浸出-净化-电积-熔铸,而浸出又分为常规浸出和热酸浸出,铅银渣主要在热酸浸出阶段产出^[2]。在湿法炼锌的过程中,锌精矿中的金、银大部分残留在浸出渣中,每冶炼1 t 锌,约产生0.9 t 湿法炼锌渣,有的湿法炼锌渣含铅、银比较高,称为“铅银渣”。西北铅锌冶炼厂产出的铅银渣细度一般-0.074 mm 含量占90%以上,可溶物硫酸锌、硫酸钙等含量占15%~19%,pH 值2.0左右。铅银渣中有价金属含量根据冶炼原料的不同而不同,铜含量0.2%~0.6%,铅含量3.0%~7.0%,锌含量2.0%~8.0%,银含量150.0~300.0 g/t,金含量1.0~3.0 g/t,有时还含有少量的铟和镉,主要脉石矿物以铁橄榄石、铁的氧化物和石膏等形式存在。

国内对铅银渣的处理方法为:1) 将铅银渣与石灰、煤灰渣按照一定比例混合后作为填埋材料外售;2) 作为水泥的生产原料,取代部分萤石或铁矿石;3) 绝大部分作为废弃渣处理直接运送渣场长期堆存^[3]。随着国家新的环保法的颁布,对固体废弃物的管理形式十分严峻,外售及堆存均不能作为企业处理废弃渣的有效办法。铅银渣中含有大量有价金属,如能将铅银渣资源化利用,不仅可解决安全环保问题,而且能为企业创造可观的经济效益。

铅银渣中矿物经过相体转化,由硫化物变成氧化物,以再造矿物形式存在。渣中银主要以金属银和硫化银形式存在,还含有一部分难溶包裹银、氧化银、氯化银等;铅主要为铅矾,还有少量硫化铅和氧化铅;锌主要以铁酸锌、硅酸锌、可溶锌形式存在;金的赋存状态文献报道较少,个别文献报道金可能以难溶包裹金形式存在^[4]。金、银被铁矾、铁的氧化物包裹,这部分包裹体性质稳定,较难被破坏。另外,铅银渣本身粒度极细,酸性较强,可

溶盐含量高,加上随着冶炼原料、冶炼工艺不同产生的铅银渣性质也不同,金、银品位波动较大,赋存状态也不同,使得铅银渣中的金、银回收难度大。改变金、银赋存状态和表面性质,破坏脉石包裹体,释放金、银是回收关键。

从铅银渣回收金银的主要方法有浮选法、湿法、火法、选冶联合法、湿法-火法联合法等。浮选包括直接浮选法、载体浮选法等;湿法包括酸浸法、水浸法、碱浸法、氯盐浸出法等;火法包括回转窑挥发法、烟化挥发法、侧吹熔炼法、熔池熔炼法、浸没熔炼法等^[5]。

2 浮选法

浮选法回收铅银渣中金、银常常存在回收率较低的现象,原因在于铅银渣中硫化银和单质银可浮性较好,而氧化银、硅酸银、银铁矾等较难上浮,铅银渣中难溶包裹金、银含量较高时,金、银被脉石包裹,如果不得到释放,这部分金、银几乎不可回收。因此,浮选法回收铅银渣中有价元素具有一定的局限性。

2.1 直接浮选

铅银渣中的银主要以自然银、硫化银、氧化银、氯化银、硅酸银、硫酸银等形式存在,当铅银渣中自然银和硫化银含量较高时,可以采用直接浮选法回收,因为自然银和硫化银天然可浮性较好。通常采用活化剂进行活化,再添加捕收剂、起泡剂、辅助捕收剂回收,有时脉石矿物较细,矿泥含量较多时,还可添加分散剂、脉石抑制剂等。常用的活化剂有硫化钠、硫酸铵、硫酸铜、氯化钠等。常用捕收起泡剂为丁铵黑药、25#黑药、硫逐氨基异丙基乙酯、乙硫氨酯、乙硫氮、XY+丁基黄药、二硫代磷酸盐、二硫代亚磷酸盐等,辅助捕收剂为242#浮选剂、煤油。常用起泡剂有RB、PZ、2#油等^[6]。程永彪^[7]对云南罗平低品位锌浸出渣进行银浮选试验研究,该渣含银140 g/t,银在浸出渣中形态复杂,主要为自然银、硫化银,一部分被包裹。试验采用氯化钠、硫化钠作为活化剂,乙硫氮、丁铵黑药作为捕收剂,通过一次粗选两次精选三次扫选可获得银精矿品位为1830~2000 g/t,回收率为70%~75%。张平^[8]在温度为50℃时,对中浸渣进行加温浮选,硫化钠作为活化剂,捕收剂丁基黄药+丁铵黑药,起泡剂PZ,获得银品位为3215 g/t,银回收率为70.55%的选矿指标。

2.2 载体浮选

铅银渣粒度极细,有时还需要磨矿再选,造成铅银渣泥化严重,如果采用直接浮选,浮选泡沫品位较低,金、银回收率受矿泥影响严重,选矿指标较差。载体浮选是选别微细粒矿物的主要手段之一,又被称为背负浮选。铅银渣载体浮选基本原理为铅银渣浮选过程中添加粗矿粒作为载体,载体可为同类矿物,也可以为异类矿物,以微细粒形式存在的金、银矿物粘附在粗矿粒载体表面,载体与微细粒金、银矿物形成团聚体,微细粒矿物与气泡黏着的可能性被提高了,再采用直接泡沫浮选即可获得较好的效果^[9]。铅银渣浮选常用的载体为活性炭、OC、AC-0等。载体浮选时,载体的大小和数目都会影响浮选结果,而选用异类矿物作为载体时,耗药大、成本高,后续载体与精矿分离也存在一定的问题。杨志超^[10]对白银锌浸出渣进行研究,采用火法焙烧-载体浮选联合工艺,载体浮选时以OC为载体,添加硫化钠活化,采用丁铵黑药和辅助捕收剂GC,起泡剂BK201,产出银品位为5334.0 g/t,银回收率为71.41%的银精矿。查辉等^[11]添加载体AC-0,石灰调浆,丁铵黑药、GC为捕收剂,在自然pH和pH为4条件下,分别可得银品位3363 g/t,银回收率为71.01%和银品位3760 g/t,银回收率为69.47%的银精矿。奥特罗什德诺娃等^[12]以黄铜矿和闪锌矿作为载体,丁基黄药为捕收剂,机油为起泡剂,通过一次粗选一次精选一次扫选的工艺流程,获得银品位1105 g/t,银回收率69.8%的工艺指标。

3 湿法

铅银渣常用的湿法主要为酸浸法、碱浸法、水浸法和氯盐浸出法^[13-15]。

3.1 酸浸法

酸浸法处理铅银渣通常是在高温条件下进行,添加浓硫酸或者含酸较高的冶炼废电解液进行搅拌处理,酸可与铁矾、铁酸锌、氧化铁等发生化学反应将其溶解,一部分有价元素锌、铅进入浸出液中通过萃取回收,另一部分有价元素金、银在渣中得到释放,通过其他手段回收。酸浸法优点是适用性强,回收率较高,具有较高的工业推广价值;缺点是,单独的酸浸方法不可直接回收有价元素,通常需要联合其他方法使用,而且酸具有强烈的腐蚀性,对设备、环境不友好。李国栋^[16]采用热酸浸出-浮选

工艺,硫酸浓度200 g/L,浸出温度90℃,时间2 h,浸出渣磨矿浮选,可获得锌品位22.03%,锌回收率59.17%,含3286.67 g/t银回收率85.75%,含金16.31 g/t,金回收率90.28%的锌银精矿。

3.2 碱浸法

碱浸法处理铅银渣需要在加温条件进行,添加氢氧化钠进行碱性浸出,铅矾和氧化铅与氢氧化钠发生反应生成氢氧化铅,再采用硫化沉淀法以硫化铅形式沉淀。有时,铅银渣可先用盐酸或者硫酸浸出,水洗后再加碱性的碳酸钠或氢氧化钠反应改变渣型,有价金属得到富集。碱浸法的优缺点基本与酸浸法相似。甄勇^[17]对四环锌锗冶炼厂产生的铅银渣进行研究,研究表明,该铅银渣-0.025 mm含量占75.74%,而银含量随着粒度变细而上升,银主要以草黄铁矾中结合银形式存在。采用硫酸水洗,水洗后银富集至300~500 g/t,再用氢氧化钠对铅银渣进行转化,氢氧化钠与草黄铁矾发生化学反应,草黄铁矾被分解,银富集品位为400~500 g/t,再进行浮选回收银。水洗条件为,硫酸5 g/L,温度80℃,时间1 h,液固比5:1;转化分解条件:氢氧化钠40 kg/t,加碱温度75℃,反应温度80℃,反应时间1 h;浮选条件:硫化钠5 kg/t,丁铵黑药600 g/t,乙硫氮150 g/t,最终获得银品位2375 g/t,银回收率为80.08%的较好指标。

3.3 水浸法

水浸法是一种较简单的方法,以水作为介质溶解铅银渣。因为铅银渣中含有较高的可溶盐,如硫酸锌、硫酸铁、硫酸钙等。在常温或加热条件下水浸,可溶盐进入水中,有价水浸液可返回冶炼系统,渣中的有价元素得到一定程度富集。水浸法成本较低,对环境友好,但有价元素回收率较低,工业上可操作性差。蔡创开^[18]对某铅银渣进行研究,渣中银主要以自然银、氧化银形式存在,采用水洗-氰化工艺可获得银浸出率为91.43%,而采用直接浮选仅可获得银品位2620.25 g/t、银回收率63.09%的银精矿。姚伟等^[19]对某冶炼厂两段氧压酸浸产生的铅银渣进行研究,铅银渣中主要回收的矿物为铅矾,脉石矿物为石英、石膏、云母等。研究表明,在液固比为2 mL/g时对铅银渣进行水洗2次,然后添加石灰、硅酸钠、羟肟酸、松醇油用量(g/t)分别为500、2000、1500、75进行浮选,经过一次粗选一次扫选三次精选最终获得铅品位47.18%、铅回收率76.39%的铅精矿。

3.4 氯盐浸法

在 CaCl_2 、 NaCl 、 HCl 下, 添加氧化剂 FeCl_3 、硫酸、 $\text{Ca}(\text{ClO})_2$, 铅银渣中的硫化银在酸性或氧化性强的条件下发生氧化反应, 银离子进入浸出液中与氯离子反应生成络合物而达到提高银浸出率的目的。氯盐浸出法, 采用的氯化剂活性较强、供应充足, 价格合理, 浸出液可循环使用, 应用广泛, 但氯化物对人体和环境有一定不良影响。周起帆等^[20]在浸出温度 $85\text{ }^\circ\text{C}$, 反应时间 2.5 h , 液固比 $8:1$, NaCl 浓度 300 g/L , CaCl_2 浓度 50 g/L , 盐酸 0.4 mol/L 条件下, 对铅银渣进行氯化浸出; 再采用净液-置换工艺处理氯化浸出液, 通过铅置换银, 铁置换铅, 最终获得银的置换率大于 98% , 铅的置换率大于 90% 的较好指标。陈伟军^[21]对某冶炼厂铅银渣进行研究, 该铅银渣主要有价元素为铅、银、锌、硫, 铅+锌总量占 20% , 银品位为 200 g/t , 银主要为单质银、硫化银, 采用 NaCl - CaCl_2 浸出体系, 在液固比 $10:1$ 、 NaCl 120 g/L 、 CaCl_2 50 g/L 、 FeCl_3 5 g/L 、时间 1 h 的条件下, 铅浸出率 96% , 锌浸出率 88% , 银浸出率 85% 。

4 火法

火法回收铅银渣中有价元素主要为回转窑挥发法、烟化挥发法、侧吹熔炼法等^[22-23]。火法处理可改善铅银渣中有价金属的性质和态相, 可较好的通过浮选或其他手段回收有价金属。但是火法处理成本较高、工艺复杂、对环境影响较大。

4.1 回转窑挥发法

回转窑挥发法是以回转窑为主要设备的生产工艺, 又被称为威尔兹法。主要处理过程为, 铅银渣与焦炭或无烟煤按照一定比例混合, 投入回转窑中, 鼓风高温条件下, 有价金属被碳或一氧化碳还原成金属蒸气, 以气相存在的金属又被氧化生成铅锌氧化物粉尘, 随烟气被收集, 这些金属主要为铅、锌、铜等, 而金、银留在窑渣中。回转窑挥发法作为我国火法处理的典型流程, 工艺成熟, 应用广泛; 但是回转窑密封性较差, 烟气量大, 无法制酸, 耗煤高、劳动环境差, 回收指标不理想等, 目前逐步被其他方法替代。何启贤等^[24]将铅银渣经过回转窑焙烧, 回转窑渣直接送入炼铜和炼铅系统中处理回收银, 银的回收率可达 70% 左右。谈应飞等^[25]利用回转窑处理锌浸出渣, 铅、锌和铜的回收率较高, 采用富氧技术之后, 处理过的废渣中有价金属的含量已经相当的低, 但是银的回收率依旧可提高。

4.2 烟化挥发法

烟化挥发法实际上是将还原熔炼与吹炼同时完成的过程。把熔化后的铅银渣置入烟化炉中, 再向熔渣中吹入空气与粉煤的混合物, 铅银渣在高温下还原, 渣中有价金属被熔炼还原和烟化挥发, 富集于烟尘中被捕集回收。烟化挥发法工业化应用以后总体情况良好, 但是依旧存在能耗偏高的问题。王胜等^[26]对西北铅锌冶炼厂脱硫处理后的铅银渣进行研究, 脱硫后的铅银渣被放入高温箱式炉中, 在温度为 $1250\text{ }^\circ\text{C}$ 、时间 1 h 、配碳比 $1:4$ 的条件下, 铁酸锌、铅铁矾、氧化铜、氧化镉与碳发生烟化挥发反应, 铅、锌、铜、镉挥发率分别为 82.26% 、 99.69% 、 99.09% 、 99.90% , 实现多种有价金属的高效挥发与回收。

4.3 侧吹熔炼法

侧吹熔炼法是将铅银渣与还原剂粉煤、熔剂按照一定比例混合, 然后输送至侧吹炉在 $1300\sim 1400\text{ }^\circ\text{C}$ 熔炼, 产出含银粗铅或冰铜沉入炉底, 然后排出。熔炼后的炉渣进行烟化处理, 铅、锌、铜等金属挥发进入烟气。侧吹熔炼法还原剂利用效率高, 二氧化硫产生较少, 且二氧化硫可以配入沸腾焙烧烟气制酸回收。近年来, 该方法已在工业上较好的应用。温功玉^[27]对九江湖口铅锌冶炼厂产出的铅银渣进行低温碱性熔炼处理, 铅银以粗铅形式回收, 硫以硫酸锌形式被固定, 铁以四氧化三铁形式存在于熔炼渣中, 通过调节一氧化碳浓度, 可生成粗铅和固硫, 同时避免金属铁的生成。当采用质量比氯化钠:碳酸钠为 $4:6$, 还原碳粉用量为原料的 10% , 碳酸钠用量为原料的 1.215 倍, 在温度为 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 熔炼 1 h , 可获得铅直收率 85.28% , 银直收率 86.19% 。

4.4 其他火法

常用于铅银渣处理的火法工艺还有熔池熔炼法、浸没熔炼法, 目前这两种工艺也相对成熟。两种方法的基本原理相似, 均为把银、铜、铅等有价金属富集于冰铜或粗金属相中。熔池溶炼法是将两侧的风吹向熔体, 铅银渣被强烈搅拌, 并在富氧空气下熔化, 同时发生氧化、还原反应。浸没熔炼法是在溶池溶炼法的基础上加以改进, 解决了熔池堵塞的问题。浸没熔炼法结构简单、金属挥发率高, 但是后续工艺处理繁琐、成本高。周洪武等^[28]对株洲冶炼厂炼锌渣采用熔池熔炼法, 池内温度 $1200\text{ }^\circ\text{C}$, 添加捕收剂用量为浸出样重量的 20% , 可获粗铅中银品位 $1000\sim 3300\text{ g/t}$, 银回收率 90% 以上。

5 选冶联合法

对于铅银渣的回收, 仅仅采用选矿手段适用性不强、回收率低; 仅采用冶金手段往往仅能回收部分金属, 对于挥发性不强的贵金属回收效果较差。选冶联合方法综合了选矿、冶金的优点, 冶金方法作为对铅银渣的预处理方法, 可以采用湿法、火法, 选矿方法主要采用浮选法^[29]。目前, 选冶联合方法应用较为广泛, 具有较好的发展前景。夏青等^[30]对西北某冶炼厂产生的铅银渣进行研究, 铅银渣中主要矿物为铅矾、铁酸锌、石膏、黄钾铁矾等。采用选冶联合工艺, 配入焦炭 40%, 石灰 4%在温度为 1200 °C 条件下还原焙烧 1 h, 铅直收率 98.85%, 锌直收率 91.60%; 焙烧渣经过浮选-磁选工艺回收碳、银、铁, 分别获得碳品位为 71.58%, 回收率为 95.29% 的碳粉, 银品位为 548.10 g/t, 银回收率为 91.2% 的银精矿和铁品位为 70.55%, 铁回收率为 40.71% 的铁精矿, 实现了铅银渣资源化回收。郭艳华等^[31]对西北某冶炼厂铅银进行研究, 采用硫酸化焙烧-洗涤-磨矿-浮选工艺, 当硫酸用量为 2.0 kg/t, 800 °C 焙烧 4 h, 采用抑制剂 T19, 活化剂硫酸铜, 捕收剂酯-30 进行闭路试验, 获得银精矿中银品位为 1755.48 g/t, 银回收率为 84.17%, 银精矿含金 12.16 g/t, 金回收率为 90.52%。何后金等^[32]以某冶炼厂中酸浸铅银渣为研究对象, 渣中含铅 9.44%, 银 91.71 g/t, 粒度较细-0.037mm, 含量占 65%, 泥化较为严重, 属于难选矿物。采用高温、高酸浸铁-水洗-硫化异步浮选工艺, 高温、高酸可破坏渣中铅铁矾的化学结构, 使铅、银暴露为后续浮选做准备, 采用水洗至锌离子含量小于 0.5 mg/L, 添加硫化钠、水玻璃、腐殖酸铵、丁铵黑药、戊基黄药等进行异步浮选, 闭路试验获得铅品位 43.49%, 铅回收率为 75.18% 的铅精矿, 铅中含银 370.85 g/t, 银回收率为 70.34%。郭艳华等^[33]对某铅银渣进行研究, 发现铅银渣中银主要以再造矿物铜蓝、硫化银混合相存在, 结合银的存在状态, 采用水热浸出-浮选工艺, 在液固比为 2:1, 温度为 70 °C, 时间为 2 h 条件下水热浸出, 金、银预先富集, 再采用 T19、硫酸铜、酯-30 浮选, 获得银精矿中银品位为 3805 g/t, 银回收率为 86.82%, 银精矿中含金 25.8 g/t, 金回收率为 94.96%。

6 湿法-火法联合

湿法-火法联合最常见的是硫酸化焙烧-氯盐浸出、焙烧-酸浸、焙烧-氯盐浸出、浸出-焙烧-浸出等, 湿法-火法联合回收铅银渣中有价金属, 可实现多种有价金属同时回收, 回收率较高, 但湿法-火法联合工艺流程复杂、成本较高^[34]。任杰等^[35]对铅银渣进行分析检测, 检测结果表明, 铅银渣中的元素主要为铁、硫、铅、锌、硅等; 铁主要为性质稳定的氧化铁、铁矾渣; 硫主要以硫酸根形式存在; 锌一部分为可溶锌, 如硫酸锌, 还有一部分较难溶的铁酸锌; 铅为难溶的硫酸铅即铅矾, 硅主要是二氧化硅。采用石灰转化-氯盐浸出工艺, 在液固比为 5:1, pH 为 9, 温度 85 °C, 反应时间 1.5 h 进行石灰转化, 在硫化钠浓度为 2600 g/L, pH 为 2~3, L/S=5, 温度 85 °C, 反应时间 1.5 h 进行氯盐浸出, 银回收率 80%, 铅回收率 60%。曾斌等^[36]对湿法炼锌渣采用二甲苯浸出-焙烧-硫酸浸出和氰化浸出工艺, 二甲苯浸出回收硫, 硫酸、氰化浸出回收银, 硫浸出率 96.40%, 银回收率 78.5%。

7 结语

湿法炼锌是最常见的炼锌方法, 湿法炼锌产生的铅银渣普遍存在。铅银渣中含有多种有价金属, 从铅银渣中综合回收各种有价金属成为目前发展的大趋势。铅银渣独特的物理、化学性质决定其选矿难度大, 单一的处理方法难以高效回收其有价金属。铅银渣中回收金银方法较多, 可根据金银在渣中的赋存状态选择适宜的方法。铅银渣中银主要以硫化银和单质银存在时, 可采用浮选法; 铅银渣中银主要以氧化银、碳酸银存在时, 通常选用湿法、火法; 铅银渣中银主要以硅酸银、硫酸银、难溶包裹银存在时, 选用联合工艺。选冶联合工艺综合了选矿、冶金的优点, 具有较好的工业应用前景。

参考文献:

- [1] 朱桂田, 刘东升. 中国金银矿产资源现状、成矿环境及开发前景[J]. 矿产与地质, 1997, 11(6): 9-14.
ZHU G T, LIU D S. Present situation of mineral resources, metallogenic setting and exploitation perspective of gold

- and silver in China[J]. Mineral Resources and Geology, 1997, 11(6): 9-14.
- [2] 敖顺福. 锌浸出渣中银的浮选回收综述[J]. 贵金属, 2022, 43(3): 82-86.
- AO S F. A review on flotation recovery silver in zinc leaching residues[J]. Precious Metals, 2022, 43(3): 82-86.
- [3] 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.
- [4] 单亚志, 李文军, 安睿. 锌冶炼系统冶炼废渣回收银技术研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2019(11): 93-96.
- [5] 周国华. 提高锌浸出渣中银浮选回收率的工艺与理论研究[D]. 长沙: 中南大学, 2002.
- ZHOU G H. Technology and theory studies of upgrading silver recovery of flotation from zinc leaching residues abstract[D]. Changsha: Central South University, 2002.
- [6] 邱冠周, 胡岳华, 王淀佐. 载体浮选工艺因素研究[J]. 有色金属, 1994, 46(2): 21-24.
- QIU G Z, HU Y H, WANG D Z. Studies of technological parameters of carrier flotation[J]. Non-ferrous Metals, 1994, 46(2): 21-24.
- [7] 程永彪. 锌浸出渣银浮选工艺试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
- [8] 张平. 高温下浮选回收中浸渣中银的工艺及机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2012.
- [9] 王朋杰, 刘龙飞. 载体浮选工艺的应用与机理研究进展[J]. 现代矿业, 2011(1): 78-79.
- [10] 杨志超. 白银难处理锌浸渣中银的回收研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- YANG Z C. Study on recovery silver from refractory zinc leaching residue of Baiyin[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [11] 查辉, 葛英勇, 罗衡, 等. 从高酸锌浸出渣中浮选回收银的试验研究[J]. 中国矿业, 2013, 22(7): 94-96.
- ZHA H, GE Y Y, LUO H, et al. Experimental research on recovering silver from high acid zinc leaching residue with flotation[J]. China Mining Magazing, 2013, 22(7): 94-96.
- [12] 奥特罗什德诺娃 L. 浸出浮选联合法从锌渣中回收银[J]. 李华, 译. 国外金属矿选矿, 1996, 33(8): 22-24.
- [13] 顾丝雨, 刘维, 韩俊伟, 等. 含锌冶炼渣综合利用现状及发展趋势[J]. 矿产综合利用, 2022, 237(5): 1-8.
- GU S Y, LIU W, HAN J W, et al. Current situation and development trend of comprehensive utilization of zinc smelting slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022, 237(5): 1-8.
- [14] 张媛, 朱山, 安娜, 等. 锌冶炼渣强化浸出及提取工艺优化研究[J]. 世界有色金属, 2021, 581(17): 129-136.
- ZHANG Y, ZHU S, AN N, et al. Study on intensified leaching of zinc smelting slag and optimization of extraction process[J]. World Nonferrous Metal, 2021, 581(17): 129-136.
- [15] 毕廷涛, 杨子轩, 吴咪娜, 等. 锌冶炼渣资源化利用试验研究[J]. 黄金, 2022, 43(1): 101-104.
- BI T T, YANG Z X, WU M N, et al. Experimental research on utilization of zinc smelting slag as resources[J]. Gold, 2022, 43(1): 101-104.
- [16] 李国栋. 从铅银渣中综合回收金银铅锌的工艺和机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
- LI G D. Study on the process and mechanism for comprehensive recovery of gold, silver, lead and zinc from Pb-Ag residue[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [17] 甄勇. 铅银渣转化-浮选工艺研究[J]. 世界有色金属, 2019(11): 4-7.
- ZHEN Y. Study on conversion-flotation process of lead-silver residue[J]. World Nonferrous Metal, 2019(11): 4-7.
- [18] 蔡创开. 某铅银渣中银回收工艺选择研究[J]. 矿产综合利用, 2017(3): 86-89.
- CAI C K. Research on effect of chemical waste liquid synthesis new type collectors on flotation of chalcopyrite [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(3): 86-89.
- [19] 姚伟, 李茂林, 孙肇淑, 等. 铅银渣中铅矾浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(2): 53-60.
- YAO W, LI M L, SUN Z S, et al. Flotation recovery of anglesite minerals from lead-silver residue[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(2): 53-60.
- [20] 周起帆, 刘三平, 王玉芳. 铅银渣氯化浸出液净化及有价金属回收试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(9): 5-11.
- ZHOU Q F, LIU S P, WANG Y F. Study on purification of chlorination leachate of Pb-Ag residue and recovery of valuable metals[J]. Non-ferrous Metal (Smelting Part), 2020(9): 5-11.
- [21] 陈伟军. 湿法炼锌铅银渣有价金属综合回收技术研究[J]. 世界有色金属, 2020(7): 88-89.
- [22] 李正明, 张伟, 窦传龙, 等. 湿法炼锌中铅银渣的处理

- 回收工艺[J]. 云南冶金, 2011, 40(7): 173-175.
- LI Z M, ZHANG W, DOU C L, et al. The technique of recycling treatment for lead silver residue of zinc hydrometallurgy[J]. Yunnan Metallurgy, 2011, 40(7): 173-175.
- [23] 陈锦安, 徐磊. 铅冶炼技术升级改造及处理锌冶炼浸出铅银渣实践[J]. 世界有色金属, 2020(6): 1-4.
- CHEN J A, XU L. Upgrading of lead smelting technology and practice on treatment of lead silver slag leached from zinc smelting[J]. World Nonferrous Metal, 2020(6): 1-4.
- [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(3): 49-54.
- HE Q X, ZHOU Y G, TAN Y L, et al. Study on oxygen-enriched fuming process of zinc leaching residue with rotary kiln[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2017(3): 49-54.
- [25] 谈应飞, 王浩宇. 锌冶炼浸出渣资源化回收工艺分析[J]. 世界有色金属, 2016(10): 79-80.
- TAN Y F, WANG H Y. Experimental research on recovering silver from high acid zinc leaching residue with flotation[J]. World Nonferrous Metal, 2016(10): 79-80.
- [26] 王胜, 张吉, 李德磊, 等. 脱硫铅银渣烟化挥发有价金属的研究[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(1): 1-8.
- WANG S, ZHANG J, LI D L, et al. Study on volatilization of valuable metals from desulfurized lead silver slag[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(1): 1-8.
- [27] 温功玉. 低温碱性熔炼从铅银渣中回收铅银[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
- WEN G Y. Recover lead and silver from lead-silver slag by low-temperature alkaline smelting[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2018.
- [28] 周洪武, 徐子平. 熔池熔炼从锌窑渣中回收银[J]. 有色金属(冶炼部分), 1991(6): 18-20.
- [29] 黄汝杰, 谢建宏, 刘振辉. 从锌冶炼渣中回收银的试验研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(2): 52-55.
- HUANG R J, XIE J H, LIU Z H. Experiential study on silver recovery from hydrometallurgical zinc residue[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2013, 33(2): 52-55.
- [30] 夏青, 李银丽, 李彦龙, 等. 铅银渣选冶联合资源化工艺试验[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(4): 30-36.
- XIA Q, LI Y L, LI Y L, et al. Experiment on metallurgy ore beneficiation combined process of Pb-Ag residue for resource utilization[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(4): 30-36.
- [31] 郭艳华, 杨俊龙, 廖雪珍, 等. 选冶联合综合回收铅银渣中金银试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2016(2): 34-37.
- GUO Y H, YANG J L, LIAO X Z, et al. Comprehensive recovery gold and silver from lead-silver residue using dressing-metallurgy technology experimental research[J]. Non-ferrous Metals (Beneficiation Part), 2016(2): 34-37.
- [32] 何后金, 白丽梅. 湿法冶炼铅银渣中回收铅银锌实验探索[J]. 云南冶金, 2016, 45(6): 23-28.
- HE H J, BAI L M. The experimental exploration for recovery of lead-silver-zinc in lead silver residue generated from hydrometallurgy[J]. Yunnan Metallurgy, 2016, 45(6): 23-28.
- [33] 郭艳华, 孙运礼, 郭海宁, 等. 水热浸出-浮选综合回收铅银渣中金银实验研究[J]. 贵金属, 2015, 36(4): 63-68.
- GUO Y H, SUN Y L, GUO H N, et al. Experimental research on comprehensive recovery of gold and silver from lead-silver residue by hydrothermal leaching-floatation[J]. Precious Metals, 2015, 36(4): 63-68.
- [34] 刘自亮, 王宇佳, 张岭. 锌湿法冶炼渣处理工艺研究[J]. 铜业工程, 2020(1): 74-77.
- LIU Z L, WANG Y J, ZHANG L. Study on treatment scheme of zinc hydrometallurgical process slag[J]. Copper Engineering, 2020(1): 74-77.
- [35] 任杰, 申开榜, 刘乐, 等. 湿法炼锌铅银渣深度处理及回收工艺[J]. 中国有色冶金, 2019(1): 39-45.
- REN J, SHEN K B, LIU L, et al. Treatment of lead and silver residue in zinc hydrometallurgy and its recovery process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2019(1): 39-45.
- [36] 曾斌, 胡良辉, 毛永星, 等. 从湿法炼锌渣中回收银和硫[J]. 湿法冶金, 2014, 33(2): 121-123.
- ZENG B, HU L H, MAO Y H, et al. Recovery of sulfur and silver from zinc smelting residue[J]. Hydrometallurgy of China, 2014, 33(2): 121-123.