

锌湿法冶炼渣的污染物分析及综合利用技术

朱军¹, 李维亮¹, 刘曼博¹, 康敏¹, 赵成¹, 崔旭东²

(1. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西锌业有限公司, 陕西 商洛 726000)

摘要: 有色金属冶炼的环境保护和资源高效利用已成为制约行业可持续发展的关键因素, 湿法炼锌生产的浸出渣开路问题是企业面临的难题之一。本文针对我国湿法炼锌采用的主流工艺, 基于生产过程产生的各种浸出渣、净化渣、烟尘、污泥等含锌物料的来源、组成和污染物进行分析, 较系统地总结了目前各类锌冶炼渣的综合利用及无害化处理技术。

关键词: 湿法炼锌; 冶炼渣; 污染; 综合利用; 无害化

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.04.009

中图分类号: TD989; X758 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 04-0059-07

世界上 90% 的锌由湿法工艺生产。湿法炼锌工艺包括: 常规浸出、热酸浸出、氧压浸出等方法, 在生产过程均会不同程度产生各种渣, 且大都属于危险固废, 含有 Zn、Fe、Cd、Cu、Pb、Ag、Au 等有价金属, 它们虽然大部分可以返回主流程来提取有价金属, 但仍存在部分冶炼渣无法经济利用、污染环境等行业面临的共性问题和技术难题。

1 冶炼渣的来源与组成

湿法炼锌均包括: 浸出、净化、电积和熔铸等工序。传统的焙烧过程使硫化锌矿中的部分砷、锑、镉和大部分汞进入 SO₂ 烟气中; 锌焙砂的不同浸出工艺使浸出渣中的铁、铅、银、锆、铟、镓等富集物的物相和含量也不同; 浸出后所得的硫酸锌溶液中含有铜、镉、镍、钴等杂质, 净化生成相应的净化渣; 在烟气制酸和电积过程不可避免的产生含有重金属的烟尘和废水。

1.1 常规浸出冶炼渣

常规浸出过程为中性浸出和酸性浸出两段。中性浸出液的净化采用置换或化学沉淀, 一般加入锌

粉去除铜镉, 然后将溶液升温加锌粉和活化剂铈盐或砷盐去除钴镍, 最后加锌粉去除复溶镉, 分别得到铜镉渣和镍钴渣, 也可采用黄药除钴生成黄酸钴渣。添加铜渣或石灰乳去除氟、氯, 分别得到氯化亚铜和氟化钙沉淀。通过控制酸性浸出液的 pH 值, Fe²⁺ 被氧化成 Fe³⁺ 后水解去除, 酸性浸出渣含锌约 20%, Fe 约 25%, 铅约 5%, 烟尘中含有少量的氧化锌尘和 SO₂。常规浸出冶炼渣为有害渣, 含有价金属多, 回收利用技术相对成熟。

1.2 热酸浸出冶炼渣

热酸浸出与常规浸出不同的是中性浸出渣采用二段高温高酸浸出, 使渣中难溶于稀硫酸的铁酸锌溶解进入酸性浸出液。富集于热酸浸出渣中的铅、银等称为铅银渣, 其中锌主要以 ZnS 和 ZnFe₂O₄ 形式存在, 铁主要以 Fe₂O₃ 和 FeO 形式存在, 铅主要以 PbS 和 PbSO₄ 形式存在, 银主要以 Ag₂S 和 AgCl 形式存在。热酸浸出液除铁后返回中性浸出流程, 除铁工艺主要有: 黄钾铁矾法、针铁矿法、赤铁矿法, 使浸出液中的 Fe 以黄钾铁矾、针铁矿、赤铁矿的形式与溶液分离。

收稿日期: 2019-04-23; 改回日期: 2019-05-06

作者简介: 朱军 (1963-), 男, 博士, 研究生导师, 研究方向为有色金属湿法冶金资源综合利用。

1.3 高压氧浸出渣

氧压浸出是在高压釜内直接高温氧压浸出硫化锌精矿, 可避免副产硫酸, 浸出液的处理过程与常规流程一致。此工艺反应速度快, 提高了原料中镓、锗、铟等稀散金属的回收率和铜、镉的浸出率和回收率, 利于铅、银等贵金属的富集。氧压浸出废渣含 20% ~ 25% 的水份和 12% ~ 15% 的元素硫, 根据精矿原料的不同及后续渣处理工艺的差别, 氧压浸出渣分为高银渣和低银渣, 高银渣又分成高铁渣和高铁渣。我国现有铁闪锌矿精矿中一般富含银 100 ~ 300 g/t, 产出的渣属于高铁渣 (含铁 35% ~ 40%), 可作为钢铁生产的原料。

1.4 常压富氧浸出渣

常压富氧浸出法是在氧压浸出法的基础上发展来的, 在高温和常压下用废电解液连续浸出硫化锌精矿, 通过氧气的氧化作用使硫化锌、铁酸锌等氧化浸出。浸出渣中含有大量硫和少量铅矾、半水硫酸钙, 送浮选系统产出含硫约 80% 的硫精矿, 浮选尾矿 (铅银渣) 可进一步回收铅、银, 浸出液送针铁矿沉铁工序, 沉铁渣易于处理。常压浸出操作简单且设备维护费用低, 硫以元素硫形式产出, 便于储存及运输, 但试剂成本高、反应耗时且能量损失大, 产生的废渣多, 不适合实际生产。

2 常规浸出渣的处理

常规浸出渣的处理方法主要有两种: 回转窑挥发法、热酸浸出法。这两种工艺程序冗长、工作量大且能耗高、重金属回收利用率低, 存在很多缺陷。浸出渣中含有重金属较多, 目前大多企业的浸出渣处理设备只能对特定几种重金属粗提取, 且工艺不易控制, 铅、锌的回收率低。

2.1 回转窑挥发法处理浸出渣

回转窑挥发法处理常规浸出渣是通过碳热还原回收氧化锌粉。铅、铟、镉、锗、镓等有价金属的氧化物被还原为单质, 从熔融渣中挥发出来与窑尾鼓入的空气反应生成金属氧化物, 在烟气中回收。锌的挥发率在 90% 以上, 浸出渣中 Fe、SiO₂ 及杂

质几乎都进入窑渣, 窑渣中含 Zn 1.5%、Fe 20% ~ 25%、Pb 2.0%、In 0.02%、S 2.0%、Ag 150 g/t, 部分稀散金属富集于氧化锌中, 可进一步利用。

但该法流程长, 设备的建设和维修费用高, 工作环境差; 金、银、铜等不易挥发的有价金属无法得到回收, 进入窑渣弃置; 氧化锌粉进入浸出流程前需经多膛炉脱氟、氯; 产生的烟尘量大, SO₂ 浓度低, 须脱硫处理。广西南方有色采用的富氧挥发锌浸出渣技术, 可有效降低燃料消耗并保持高的锌回收率。

2.2 热酸浸出法处理氧化锌焙烧烟尘

焙烧烟尘为高温氧化焙烧电尘及二次焙烧的旋涡尘、电尘的混合, 含 Zn 35%、Pd 15%、Fe 10%、Cd 5%, 葫芦岛锌厂将硫酸化焙烧 - 中性浸出烟尘处理工艺进行改造, 处理焙烧过程中富集锌、镉、铅等的次级氧化锌烟尘。生产中采用复浸出流程, 第一段中性浸出是将氧化锌浸出; 第二段为热酸浸出, 镉的浸出率比锌的浸出率低, 铅以硫化铅和硫酸铅的形态存在于渣中。为使锌、镉浸出时能保持较高的浸出率, 需加入适量的铁渣来调整。综合回收的最终产品为七水硫酸锌、精镉、和铅泥 (富集铅 40% 以上的硫酸铅), 送铅系统中以提取铅、银, 此工艺可从氧化焙烧的烟尘中回收了锌、镉、铅、银。

2.3 烟尘中铟的回收

回转窑挥发法处理中性浸出渣时, 约 65% 的铟进入氧化锌烟尘, 将烟尘置于多膛炉中脱除氟氯, 再进行中浸、低浸和铟水解, 生成的铟绵可制取精铟。但此法存在流程长, 工艺较难以控制, 铟回收率和品位较低等缺点。为此, 罗虹霖等^[1]对烟尘中各元素的挥发特性进行热力学平衡计算, 通过试验来验证铟镉铅选择性挥发效果, 获得高铟物料和脱除氟氯的高锌焙砂的工艺路线。常军^[2]利用微波对矿物的解离作用, 在浸出前破坏含铟矿物的表面结构形态, 加强了铟的溶出, 从而使铟的浸出率提升。

3 热酸浸出除铁渣的处理

热酸浸出目前大量投入生产的只有黄钾铁矾法，浸出后产生的黄钾铁矾渣含铁 25%、锌 7%、铅约 5%、硫约 12% 以及少量的银、镓、铟、镉等，渣量大且属于危险固废，处置方法已经成为企业的难题。

3.1 火法处理技术

3.1.1 回转窑挥发法

类似于常规浸出渣处理，在 1200℃ 左右将铁矾渣与焦粉在回转窑中还原挥发，回收其中的铅、锌。此法产生的窑渣中铅锌含量低，但能耗高。马红周等^[3]利用真空碳还原法对铁矾渣进行还原蒸馏，在 1000℃ 下保温 90 min，加入一定量的煤粉和脱硫剂，铅、锌的回收率均达到 99.4%。还原后渣经湿式磁选，得到含铁 62.43% 的铁精矿，铁矾渣中铁的直收率达到 78.2%。

3.1.2 焙烧-浸出法

薛佩毅等^[4]经过试验探究出中低温焙烧-NH₄Cl 浸出-碱浸黄钾铁矾渣的新工艺。将铁矾渣在 650℃ 下焙烧后分解为 Fe₂O₃、ZnSO₄ 和 PbSO₄，再用 NH₄Cl 浸出，Zn、Pb、Cd 的浸出率均达 95% 以上，可进一步回收。分离后用 NaOH 溶液浸出，将 As 和 Si 脱除，最终铁以 Fe₂O₃ 的形式留在渣中，渣含铁量达 54% 左右，可作为铁精矿或配矿，铁的总得率在 90% 以上。

3.1.3 富氧侧吹熔炼法

富氧侧吹熔炼法通过两台富氧侧吹炉来处理锌浸出渣：第一台炉内将浸出渣进行干燥、熔化并造渣，生成的热渣进入第二台炉内使锌挥发进入烟尘，通过调节炉内气氛，形成含金银的粗铅相或冰铜相。两台炉采用碎煤作燃料和还原剂，处理热酸浸出中产出的铁渣时需加入石灰石和石英石作熔剂^[5]。此法节能环保，有价金属回收率高，未来可以取代传统回转窑处理浸出渣工艺。

3.2 直接酸浸出法

此法是将铁矾渣重新用热酸浸出的方法回收其中的锌，但成本高。刘鹏飞等^[6]用硫酸和盐酸对黄钾铁矾渣进行浸出，结果表明：在一定液固比和反应条件下，Fe、Zn 在硫酸浸出中的浸出率达 80%；Fe、Zn、Pb 在盐酸浸出中的浸出率分别达 83%，89%，99%。最后用黄钾铁矾法将浸出液中的 Fe 沉淀，生成的黄钾铁矾渣进行无害化处理，得到富 Zn 的溶液。

3.3 其他处置方式

为了防止浸出渣中重金属离子的溶出对环境造成污染，弃渣应先进行无害化处理。通常用石灰、煤灰渣处理含锌浸出渣，按一定配比将它们置于原料混合机中搅拌均匀，再通过出料装置来成型。将成型的坯体加工后生成具有一定强度的固化产品。该方法简单易操作，处理效果好，处理后的固化产品达到国家的规定控制标准。

从铁矾渣处理现状看，常规方法和无害固化处理的投资成本都很高，且无法实现对稀散金属的回收。今后的研究方向为既能对有价金属进行综合回收，又能使废渣无害的铁矾渣处理技术。侯新刚^[7]在试验中利用黄钾铁矾渣为原料，通过浸出、加入铁粉净化、加入 MnSO₄ 共沉淀等步骤直接制备软磁锰锌铁氧体，并且附加得到高品位硫化铜镉渣。史玉娟^[8]利用铝厂废弃的高碱赤泥和黄钾铁矾渣进行中和反应，将产物过滤分离，滤液蒸发浓缩可得到石膏和芒硝等，滤渣煅烧后可得到赤铁矿砂。

4 浸出渣中铅银渣处理

湿法炼锌过程中，无论是常规浸出和热酸浸出均产出铅银渣，银主要以 AgCl 和 Ag₂S 形式存在。浸出渣在挥发窑中可除去铅、锌等金属，但银留在了窑渣中被弃置，渣中银含量较高时可通过回收来降低成本。

4.1 火法提银

4.1.1 硫脲法

硫脲法是用稀硫酸浸出铅银渣, Fe^{3+} 置换出 Ag^+ 后与硫脲发生反应, 生成可溶的阳离子络合物。何静等人^[9]对硫脲法进行试验, 通过对物料的配比和反应条件的研究, 使分解渣中 Ag 富集到 1060 g/t, Ag 的浸出率在 93% 以上。此法工艺简单, 能从矿石或含银很低的物料中回收银, 银的提取率高、反应温度低且反应时间短, 但硫脲自身具有氧化性, Cu^+ 与硫脲结合会形成络合物, 因而硫脲的真实消耗量比理论消耗量高。硫脲不如氰化物稳定, 且价格较高, 使得此法无法达到实际工业规模。

4.1.2 空气侧吹还原造钼熔炼

空气侧吹还原造钼熔炼法^[10]可同时处理铁矾渣与铅银渣。在高温下进行造钼反应, 使 Cu 、 Pb 、 S 和部分 Fe 生成钼, 熔钼能捕集渣中的 Au 、 Ag 等贵金属; 还原造钼熔炼后, Cu 、 Ag 、 Au 和大部分 Pb 进入铅冰铜中, 易挥发的 Zn 和 In 进入到烟尘, 得到氧化锌烟尘。该法工艺成熟且经济效益明显, 有价金属回收率高, 满足了锌浸出渣的无害化处理及资源综合利用。

4.2 浮选法

浮选法^[11]处理铅银渣主要是通过泡沫浮选, 经磨碎的铅银渣颗粒大小符合浮选要求, 在磨碎后的浆料加入浮选药剂并搅拌, 然后置于浮选槽中搅拌充气, 使气泡与矿粒接触, 或通过载体浮选技术, 可浮性好的颗粒选择性地粘附在气泡上被携带上浮, 从矿浆面溢出或机械刮取, 然后脱水、干燥, 制成精矿产品。

4.3 湿法提银

何后金^[12]针对云南某湿法炼锌厂难选的铅银渣, 通过高温高酸来浸出铁, 使铅、银以氧化物结构出现, 然后水洗除去渣表面的硫酸和水锌, 水锌中的 Zn^{2+} 富集后返回电锌系统得以回收。浸出渣通过硫化、加入组合药剂来异步浮选。在试验中得到铅品位 43.49% 的铅精矿, 银品位 370.85 g/t, 此法应用前景广, 具有很好的经济效益和工业利用

价值。蔡创开^[13]用铅银渣进行了三种氰化提银试验, 结果表示水洗 - 氰化工艺可获得 49.32% 的锌浸出率和 91.43% 的银浸出率, 氰化工艺前进行水洗处理可有效提高银的氰化浸出率。

5 浸出液净化渣处理

湿法炼锌中性浸出液中含有铜、镉、钴、镍、砷、锑等金属元素, 需要通过净化来将杂质的含量降至电积过程所允许的范围, 使电积过程能正常进行。通过净化使原料中的有价伴生元素得到富集, 便于从净化渣中综合回收有价金属。

5.1 铜镉渣

5.1.1 锌粉置换法

铜镉渣中的铜、镉多以金属单质的形态存在, 少量镉以硫酸镉形式存在。利用锌、镉、铜等氢标电位的不同来控制反应程度, 用硫酸溶液使锌、镉大量浸出而铜较少浸出, 将锌、镉与铜分离; 再将锌镉渣浸出, 用锌粉分两段置换出镉绵; 镉绵自然沉降再直接压团, 最后用火法熔炼得到含 Cd 99% 以上的成品镉锭。该工艺流程简单, 不引入其他杂质, 置换后溶液能直接制取 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。杨建广等^[14]利用电加强置换来提镉, 可在铜镉渣浸出液中直接将海绵镉置换出了, 溶液中的锌、镉一步分离, 极大的缩短了铜镉渣的处理流程, 镉回收率高达 85%。

5.1.2 氨水浸出法

氨水浸出净化渣原理是氨水中的氨与钴、铜和镍离子形成可溶性氨配合物进入溶液, 而其他组分则形成不溶氧化物或羟基化合物沉淀, 从而达到浸出的目的。此法工艺简单, 但浸出率低, 渣中的金属铜不容易浸出。刘海洋等^[15]通过试验发现, 在氨水浸出时加入氧化剂 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 来处理铜镉渣, 浸出速率快且浸出率高, 浸出过程的选择性高, 不会产生较大污染, 浸出液分离除杂后可制备锌、镉、铜的相关产品。

5.2 镍钴渣

湿法炼锌净化镍钴渣含锌约 40%, 铜 5%, 镉

3%，钴 0.3%，目前还没有很理想的综合回收工艺。一般用浓硫酸来浸出，使渣中各种金属尽可能进入到浸出液中。铅微溶于稀酸，得到的铅渣先分离出去；加入氧化剂 KMnO_4 和中和剂 NaOH ，使 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 MnO_2 沉淀后分离，再往溶液加入沉钴剂使溶液中 Co^{2+} 生成钴化合物沉淀；然后用锌粉将溶液中的 Cd^{2+} 还原成金属镉；最后利用锌粉-铋盐法净化法，将溶液中的 Ni^{2+} 还原成金属镍从溶液中分离。该工艺^[16]产出的硫酸锌溶液较为纯净，可以返回生产工序，回收的金属渣可在已有生产系统中进行处理，实现循环利用。

马进等^[17]通过全湿法工艺来浸出镍钴渣，在一定条件下用硫酸分两段浸出，再加入活化剂来分离锌钴，过滤后得到钴含量 8% 以上的高钴渣，最后用锌粉置换除镉，得到含镉 88% 以上的镉绵。该法锌回收率在高于 95%，并将有价金属富集，最终的硫酸锌溶液返回主流程可重复利用，无废料产生，实现绿色生产。

6 其他废渣的处理

6.1 锌浮渣

在湿法炼锌阴极锌熔铸工序，锌浇铸成锌锭时的副产品为含锌量高的锌浮渣，产率约为锌锭的 3%。锌浮渣中大部分为金属锌和氧化锌，由于在熔炼过程中加入了氯化铵造渣，其中还含有一部分氯化锌。对锌浮渣综合回收，先要分离出金属锌和氧化锌，一般采用湿式球磨-摇床重选法或空气雾化法，含锌高的金属锌粒可作为锌粉的代替品，氧化锌渣含氯高，可通过进一步处理来回收利用其中的锌。

6.2 石膏渣

湿法炼锌外排的酸性废水，一般加入石灰来去除重金属离子，药剂加入后发生中和作用产生大量二水石膏，含有锌、铅、铜、砷、镉、汞等重金属。这类渣的处理目前较为困难。

陈怡等^[18]通过对渣成分的分析，按照一定配

合比将废水处理渣、水泥、细骨料和粗骨料作为原材料，制备的混凝土满足施工要求，重金属离子固化在其中，混凝土浸出液中的重金属浓度均达到国家标准。赵占冲^[19]研究了含砷石膏渣的碳热还原分解过程，发现掺入一定量的煤粉可以使砷挥发，1200℃时挥发率最高达到 98.70%，降低了渣浸出毒性。此法不仅对含砷石膏渣进行无害化处理，砷元素也得到富集，但目前对石膏废料的利用率不高，仍对环境造成严重的污染，未来需要研发可资源化利用的技术。

6.3 制酸污泥

酸泥是锌冶炼烟气制酸系统净化工序中洗涤、净化烟气和加入氧化钙中和污酸时产生的固体废物，含少量的铅、锌、汞、镉、砷。污泥处理主要是降低含水率，其次通过简单的处理使钙盐与氢氧化物高效分离，可实现污泥的大幅减量，而以金属氢氧化物为主的残渣可直接返回冶炼流程。

6.3.1 火法熔炼技术

国内处理酸泥的常用方法是烧结机-鼓风机工艺。将酸泥干燥后以一定比例混入其他物料中进行制块，然后置入鼓风机中熔炼。在熔炼过程中铅、锌、镉都得到了回收，极少量砷氧化物被高温熔融后，固化在鼓风机炉渣中。炉渣可制作建筑材料。该法可以无害化处理废渣，但环境污染大，属于淘汰技术。

富氧侧吹熔池技术^[20]处理酸泥相较于传统方法流程紧凑，生产效率高，环境友好。酸泥同返尘、硫铁矿一起配料后置于富氧侧吹炉，通过熔池熔炼来充分脱硫。主要金属全部进入渣相，脱硫后的氧化金属熔体置于富氧侧吹还原炉内，与还原煤在高温下熔炼。还原炉内有价金属铅、铋被还原成铅铋合金，贵金属富集在铅铋合金内，还原渣最后进入烟化炉进行烟化处理。

6.3.2 固化处理

固化技术是一种低成本处置含砷污泥的方法，固化后可以堆存或作进一步处理，如何低成本地提高固化效果是目前对固化材料的研究热点。一

般将石灰石、水泥熟料按一定配比作固化剂,与水淬渣协同固化含砷污泥,高温冶炼渣和水泥熟料基固化材料可明显降低污泥中砷浸出量,从而减少砷浸出毒性。

陆占清等^[21]通过试验得出:在粉煤灰、矿渣粉、化学添加剂的作用下,酸泥中的砷和其他原料中的活性成分反应,以O为中心将Al、Si、As、Ca、Fe等元素通过稳定的化学键链接,形成稳定性好的长链。它们是组群状硅酸盐、砷酸盐结构,属于类陶瓷结构。固化体浸出液中砷质量浓度低于国家排放标准。

6.4 含砷废渣

在湿法炼锌过程中,一般用硫化物沉淀法来除砷,生成含砷量高的硫化砷渣。硫化砷渣可通过火法和湿法处理技术,进一步制取氧化砷、砷酸盐、氯化砷等。火法处理是将含砷渣焙烧,砷升华成砷蒸汽,与其他物料分离,砷蒸气可制备相关的含砷产品,此法成本低,但回收率低,会对环境造成污染。湿法处理采用酸浸、碱浸或盐浸等方法,将砷从渣中分离后再进一步回收含砷化合物或进行无害化处理。

卢琼等^[22]研究了硫化砷渣在自然氧化和 H_2O_2 氧化联合作用下的脱硫效率及 As_2O_3 的分离制备。当硫化砷渣与18% H_2O_2 的双氧水溶液的固液比为1:2时,硫离子的氧化率从自然氧化条件下的57.8%提高至99.8%。最后再以 CS_2 为萃取剂将单质硫分离,回收率为62.5%,剩余固体物质中 As_2O_3 为70.4%。

7 结 论

(1) 随着我国生态、环保要求的提高,绿色、经济的方法处理湿法炼锌过程中的冶炼渣,已成为制约企业可持续发展的共性问题,也是今后湿法炼锌新技术研究的重要课题。

(2) 渣处理首先基于循环经济的原则,规模化企业对于锌尽可能返回主流程,其他有价金属以合适的开路集中处理技术为宜,其次采用无害化处置堆存技术。

参考文献:

- [1] 罗虹霖,刘维,覃文庆,等.氧化锌烟尘中铟的挥发富集[J].中国有色金属学报,2014,24(11):2892-2899.
- Luo H L, Liu W, Tan W Q, et al. Volatile Enrichment of Indium in Zinc Oxide Fume [J]. Journal of China Nonferrous Metals, 2014,24 (11) : 2892-2899.
- [2] 常军.微波-超重力联合提取氧化锌烟尘中铟的基础理论及工艺研究[D].昆明:昆明理工大学.2016.
- Chang J. Study on Basic Theory and Process of Extracting Indium from Zinc Oxide Dust by Microwave-Super Gravity[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology. 2016.
- [3] 马红周,桂海平,樊鹏斌,等.湿法炼锌黄钾铁矾渣资源化的新探索[J].工业加热.2016,45(2):8-11.
- Ma H Z, Gui H P, Fan P B, et al. New Exploration of Jarosite Slag Resources Produced in Zinc Hydrometallurgy[J]. Industrial Heating. 2016,45 (2) : 8-11.
- [4] 薛佩毅,巨少华,张亦飞,等.焙烧-浸出黄钾铁矾渣中多种有价金属[J].过程工程学报,2011,11(1):56-60.
- Xue P Y, Ju S H, Zhang Y F, et al. Recovery of Valuable Metals by Leaching of Roasted Jarosite Residue[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011,11 (1) : 56-60.
- [5] 贺菊香,刘生长.湿法炼锌浸出渣处理方式的分析[J].四川有色金属,2014 (2):45-48.
- He J X, Lu S Z. Analysis of Zinc Leaching Residue Treating Method[J]. Sichuan Nonferrous Metals. 2014 (2) : 45-48.
- [6] 刘鹏飞,张亦飞,游韶玮,等.热酸浸出回收黄钾铁矾渣中有价元素[J].过程工程学报,2016,16 (4):584-588.
- Liu P F, Zhang Y F, You S W. Recovery of Valuable Elements in Jarosite Residue by Hot Acid Leaching[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016,16 (4) : 584-588.
- [7] 侯新刚,魏继业,苏瑞娟.利用黄钾铁矾渣制备软磁锰锌铁氧体工艺研究[J].中国有色冶金.2012.(4):72-76.
- Hou X G, Wei J Y, Su R J. Study on the preparation of soft magnetic ferro-zinc ferrite using yellow potash slag[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2012 (4) : 72-76.
- [8] 史玉娟.利用黄钾铁矾渣处理赤泥的研究[J].轻金属,2011 (s2):153-154.
- Shi Y J. Study on the treatment of red mud with yellow potash slag[J]. Light Metals, 2011 (s2) : 153-154.
- [9] 何静,杨建平,杨声海,等.铁矾渣热酸分解及硫脲提银[J].中国有色金属学报.2017,27(7):1504-1512.
- He J, Yang J P, Yang S H. Decomposition of jarosite residue in sulfuric acid medium and recovery of silver with thiourea solutio[J]. Journal of China Nonferrous Metals, 2017,27 (7) : 1504-1512.
- [10] 李旻廷,魏昶,李兴彬,等.铁矾渣、铅银渣中有价金

属的同步回收 [C]. 首届铅锌渣综合利用技术交流会论文集 .2017:155-163.

Li T Y, Wei C, Li X B. Simultaneous recovery of valuable metals in iron alum slag and lead-silver slag[C]. Proceedings of the First Lead-Zinc Slag Comprehensive Utilization Technology Exchange Conference, 2017: 155-163.

[11] 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):37-40.

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) : 37-40.

[12] 何后金,白丽梅. 湿法冶炼铅银渣中回收铅银锌试验探索 [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.

[13] 蔡创开. 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. Investigation on Silver Recovery from Lead-zinc Slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017 (3) : 86-89.

[14] 杨建元,雷杰,彭思尧,等. 从铜镉渣浸出液中电加强置换提取镉 [J]. 中国有色金属学报 ,2015,25(8):2268-2275.

Yang J Y, Lei J, Peng S Y, et al. Extraction of cadmium from leaching solution of Cu-Cd slag through electrically enhanced replacement process[J]. Journal of China Nonferrous Metals, 2015,25 (8) :2268-2275.

[15] 刘海洋,颜文斌,石爱华,等. 从铜镉渣中析出铜锌镉的氧化氨浸工艺 [J]. 吉首大学学报 .2010,31(2):97-100.

Liu H Y, Yan W B, Shi A H, et al. Research on Leaching Process of Copper,Zinc and Cadmium from Copper-Cadmium Slag[J]. Journal of Jishou University (Natural Science Edition). 2010,31 (2) :97-100.

[16] 李德磊,张昱琛. 湿法炼锌净化镍钴渣综合利用生产实

践 [J]. 中国有色冶金 .2015,(2):53-55.

Li D L, Zhang Y C. Practice of comprehensive utilization of nickel and cobalt slag of zinc hydrometallurgy[J]. China Nonferrous Metallurgy. 2015, (2) : 53-55.

[17] 马进,何国才,程亮,等. 湿法炼锌净化镍钴渣全湿法回收新工艺 [J]. 有色金属:冶炼部分 .2013 (12):11-14.

Ma J, He G C, Cheng L, et al. New Recovery Process for Zinc Hydrometallurgy Ni-Co-Bearing Purification Slag[J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy. 2013, (12) : 11-14.

[18] 陈怡,谷晋川,樊志金. 用废水处理渣制作混凝土 [J]. 混凝土 , 2015 (11):126-128.

Chen Y, Gu J C, Fan Z J. Preparation of concrete with sewage treatment residues[J]. Concrete, 2015 (11) : 126-128.

[19] 赵占冲. 含砷石膏渣碳热还原分解特性研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学 .2016.

Zhao Z C. Study on Carbothermal Reduction Decomposition Characteristics of Gypsum Residue Containing Arsenic[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology. 2016.

[20] 杨卫严,陈耿涛,周亮亮. 一种处理酸泥的冶炼新工艺 [J]. 有色冶金设计与研究 , 2015,36(6):20-22.

Yang W Y, Chen G T, Zhou L L. One New Smelting Process for Treatment of Acid Mud[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research. 2015,36 (6) : 20-22.

[21] 陆占清,丁雁波,周开敏. 冶炼烟气制酸净化含砷酸泥固化方法研究 [J]. 硫酸工业 , 2017 (12):23-29.

Lu Z Q, Ding Y B, Zhou K M. Study on the curing method of purifying arsenic acid sludge with acid purification from smelter flue gas[J]. Sulphuric Acid Industry, 2017 (12) : 23-29.

[22] 卢琼,杜颖,杜冬云. 从硫化砷渣回收单质硫和砷 [J]. 硫酸工业 , 2016 (1):24-27.

Lu Q, Du Y, Du D Y. Recovery of sulphur and arsenic from arsenic sulphide residue[J]. Sulphuric Acid Industry, 2016 (1) : 24-27.

Analysis of Contaminants and Comprehensive Utilization Technology of Zinc Hydrometallurgical Slag

Zhu Jun¹, Li Weiliang¹, Liu Manbo¹, Zhao Cheng¹, Cui Xudong²

(1.School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi, China; 2.Shaanxi Zinc Industry Co., Ltd., , Shangluo, Shaanxi, China)

Abstract: The environmental protection of the non-ferrous metal smelting and efficient use of resources have become the key factors that restrict the sustainable development of the industry. Open leaching slag production from wet zinc smelting is one of the challenges faced by companies. This article aims at the mainstream process adopted for wet zinc smelting in China, Based on the analysis of the sources, compositions, and pollutants of various zinc-containing materials such as leaching slag, purified slag, soot, and sludge generated during the production process, The comprehensive utilization and harmless treatment technologies of various zinc smelting slags are systematically summarized.

Keywords: Zinc hydrometallurgy; slag; Pollution; Comprehensive utilization; Harmless