

doi: 10.20237/j.issn.1007-7545.2025.04.002

# 现代铅锌冶炼技术现状与火法熔池炼锌技术潜力分析

闵小波<sup>1,2,3</sup>, 王鑫<sup>1</sup>, 任浩宇<sup>1</sup>, 王萌<sup>1</sup>, 陈功夫<sup>1</sup>, 田秉东<sup>1</sup>, 王云燕<sup>1,2,3</sup>,  
米贵良<sup>1</sup>, 王唯任<sup>1</sup>, 彭聪<sup>1,2,3</sup>, 柯勇<sup>1,2,3</sup>, 李云<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083;
2. 有色金属强化冶金新技术全国重点实验室, 长沙 410083;
3. 国家重金属污染防治工程技术研究中心, 长沙 410083)

**摘要:** 随着高品质硫化锌精矿逐渐减少, 未来锌冶炼原料将从高品位硫化矿转向低质高杂铅锌混合矿、氧化矿、氧硫混合矿及含锌二次资源等。针对原料变动带来的挑战, 总结了当下铅锌资源现状, 主流的锌冶炼方法, 分析了其技术特点及适用性, 重点论述了未来原料变动、环保政策、无废低碳等新挑战下, 现有复杂锌资源回收方法原理及其局限性。结合未来绿色低碳冶金发展趋势, 探讨了目前火法短流程直接炼锌技术在处理复杂含锌物料上的机遇与挑战。依托现代熔池熔炼强化冶金技术优势, 分析了火法熔池直接炼锌技术可行性, 展望了未来复杂含锌物料熔池炼锌技术发展前景与待突破的技术瓶颈, 为未来锌冶炼行业发展提供参考与借鉴。

**关键词:** 铅锌复杂资源; 氧硫混合矿; 锌冶炼; 熔池炼锌; 绿色低碳冶金

**中图分类号:** TF812; TF813 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7545(2025)04-0006-12

## Current Situation of Modern Lead and Zinc Smelting Technology and Potential Analysis of Pyrometallurgical Zinc Bath Smelting Technology

MIN Xiaobo<sup>1,2,3</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, REN Haoyu<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, CHEN Gongfu<sup>1</sup>,  
TIAN Bingdong<sup>1</sup>, WANG Yunyan<sup>1,2,3</sup>, MI Guiliang<sup>1</sup>, WANG Weiren<sup>1</sup>,  
PENG Cong<sup>1,2,3</sup>, KE Yong<sup>1,2,3</sup>, LI Yun<sup>1,2,3</sup>

- (1. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy for Non-ferrous Metals, Changsha 410083, China;
3. Chinese National Engineering Research Center for Control & Treatment of Heavy Metal Pollution, Changsha 410083, China)

**Abstract:** As high-quality zinc sulfide concentrates are gradually depleted, the raw materials for zinc smelting in the future will shift from high-grade sulfide ores to a variety of low-quality, high-mix lead-zinc ores, including oxide ores, oxygen-sulfur mixed ores, and zinc-containing secondary resources. In response to the challenges brought

**收稿日期:** 2024-12-23

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2022YFC3901603); 国家自然科学基金创新研究群体项目(52121004); 国家自然科学基金青年项目(52104356); 湖南省芙蓉计划湖湘青年英才(荷尖)项目(2023RC3059); 广东省重点研发计划项目(2022B0111130002); 国家重点研发计划青年科学家项目(2023YFC2909100); 湖南省研究生科研创新项目(CX20240015); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2024ZZTS0010); 2024级大学生创新创业训练计划支持项目(S202410533086, S202410533044)

**作者简介:** 闵小波(1973-), 男, 教授; **通信作者:** 李云(1989-), 男, 副教授

about by changes in raw materials, a summary of the current status of lead and zinc resources and mainstream zinc smelting methods were provided, and their technical characteristics and applicability were analyzed. The principles and limitations of existing complex zinc resource recovery methods under the new challenges such as future changes in raw materials, environmental protection policies and waste free and low carbon were discussed. In light of the anticipated advancements in green and low-carbon metallurgy in the future, the opportunities and challenges associated with the present pyrometallurgical short-process direct zinc smelting technology in treating complex zinc-containing materials were discussed. Based on the advantages of modern pyrometallurgical molten pool direct zinc smelting technology and enhanced metallurgical technology, the technical feasibility of direct pyrometallurgical zinc bath smelting was analyzed. The development prospects and technical bottlenecks to be overcome of molten pool zinc smelting for complex zinc-containing materials were prospected, so as to provide reference for the development of zinc smelting industry in the future.

**Key words:** lead-zinc complex resources; sulfide-oxidized mixed ore; zinc smelting; zinc bath smelting; green low-carbon metallurgy

## 1 铅锌资源现状及冶炼工艺特性

### 1.1 原生铅锌资源及产量

铅和锌是工业中广泛应用的重要有色金属<sup>[1]</sup>。铅主要用于电池制造、辐射防护等领域,其中铅酸电池是其主要消费方向,广泛应用于汽车、电动自行车和储能系统<sup>[2-3]</sup>。全球铅生产和消费集中在中国、澳大利亚、美国等国<sup>[4]</sup>。中国铅工业自1898年湖南水口山矿开采起步,从2000年开始成为全球最大铅生产国<sup>[5]</sup>。近年来,受环保政策推动<sup>[6]</sup>,行业加速淘汰落后产能,提升资源利用率,并在废铅蓄电池回收等清洁技术上取得显著进展。

锌主要应用于汽车、建筑、轻工等行业<sup>[7]</sup>。自然界锌主要以硫化矿形式存在,矿石种类主要有闪锌矿、菱锌矿、异锌矿以及纤锌矿<sup>[8]</sup>。氧化矿和氧硫混合矿一般是由于硫化矿长期风化产生的伴生矿。矿山原料产品主要来自两个方面:锌矿、锌与其他金属的伴生矿以及再生锌。一般来说90%以上的锌源于矿山开采,全球80%以上的锌矿是需要从地下进行开采的,只有8%左右的矿山是使用露天开采。矿石品位方面,典型锌矿品位在7%~10%,高品位可达到20%<sup>[9-12]</sup>。全球锌资源储量集中在澳大利亚、中国等地<sup>[13]</sup>,我国不仅是世界产锌大国,更是世界锌消费大国,消费量超过世界总产量的45%。2023年,中国锌矿产量达715.2万t,成为最大的锌矿生产国。我国锌产业链已形成完整的生产和供应体系,推动绿色低碳发展政策实施,再生锌量自2013年以来增长2.6倍,显著提升资源循环利用水平。但是眼下,国内锌产业存在资源保障程度偏低、矿石依赖进口严重、锌回收产业发展滞后、环境问题依然突出

等问题。随着绿色冶炼技术进步和全球资源协同开发,铅锌行业正向高附加值产品与可持续发展目标迈进。

### 1.2 再生铅锌资源及回收工艺

再生铅主要来源于废旧铅酸蓄电池和铅制品的再加工生产,主要工艺包括火法和湿法<sup>[14-15]</sup>。如表1所示,工业上湿法工艺主要集中在废铅酸蓄电池铅膏湿法与脱硫工序,湿法技术回收率高、环境友好,但因化学试剂成本高,目前国内再生铅以火法为主导<sup>[16-17]</sup>。再生锌原料主要来源于冶炼及加工废料,如镀锌废料、锌合金压铸废料、电池锌渣,以及钢铁厂含锌烟尘等<sup>[18]</sup>。国内再生锌原料多依赖国外进口,包括汽车锌合金铸件、镀锌废钢等,也从国内高炉瓦斯灰、废锌合金边角料中回收。处理含锌二次物料时,火法工艺将废料转化为次氧化锌和锌焙砂,再结合火法(密闭鼓风机、电炉等)或湿法(酸法、碱法、氨法)生产再生锌锭<sup>[19]</sup>。火法操作简单、适应性强,湿法则适合高纯度锌生产。国内再生铅主要依托现有成熟的“三连炉”火法炼铅搭配回收,技术成熟;再生锌产业主要依托湿法炼锌技术回收,如图1、2所示,2023年再生锌占比18.18%,较再生铅占比44.81%差距显著,再生锌行业目前正逐步创新发展,提高综合回收率,实现资源高效利用<sup>[20]</sup>。

### 1.3 再生锌回收产业存在的问题及政策

再生锌产业在全球资源循环利用趋势下具有巨大潜力,但当前仍面临原料分散、产业集中度低、回收体系不完善及环保压力大的多重挑战。首先,原料供应链覆盖范围广泛,企业规模较小且分布零散,导致环保监管难以有效实施,产品质量不一,限制了

表1 再生铅行业生产工艺分类<sup>[17,21-22]</sup>

Table 1 Classification of production processes in the secondary lead industry<sup>[17,21-22]</sup>

类型	描述	主要工艺流程	应用场景
火法冶炼	含铅物料中铅高温熔炼分离	预处理(破碎、筛分、富集);熔炼(氧化、还原、精炼);铸锭	大规模工业生产,处理含铅废料
湿法冶炼	利用化学溶剂将铅从含铅物料中溶解出来	预处理(破碎、筛分);浸出(使用酸性或碱性溶液);净化(去除杂质);电积(通过电解沉积铅)	处理含低品位与复杂矿含铅物料
直接熔炼法	直接将含铅物料在高温下熔化,分离出铅和渣	直接熔化,分离铅和铅渣	处理含铅废电池等零部件
机械物理法	通过物理方法分离含铅物料中的铅	破碎、筛分;分离(磁选、静电等)	处理含铅废电器和电子设备
联合法	结合火法和湿法冶炼的优点,提高铅的回收率	预处理;火法或湿法冶炼;精炼	综合处理多种含铅物料

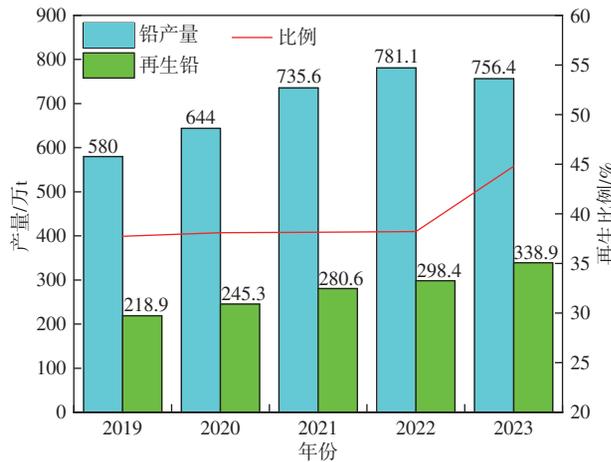


图1 中国铅产量及再生铅产量

Fig. 1 Lead production and secondary lead production in China

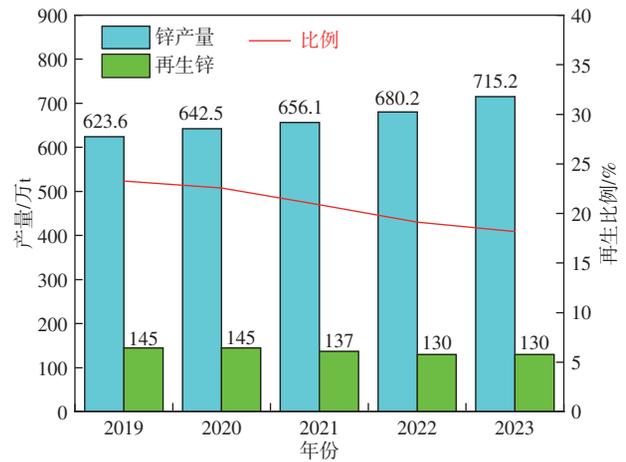


图2 中国锌产量及再生锌产量

Fig. 2 Zinc production and secondary zinc production in China

行业的规模化发展。其次,行业集中度明显偏低,无论与国内其他再生金属产业(如铜、铝、铅)还是国际再生锌市场相比,我国的废锌回收行业尚未实现资源整合和协同效应<sup>[23]</sup>。此外,锌废料管理缺乏统一标准和强制性要求,且二次物料普遍品位低,加之严格环保要求下的高回收成本和固定资产投入,使低品位废料的回收吸引力进一步减弱。

当前,针对低品位含锌废料的回收激励政策不足,行业亟需出台更加优惠的政策推动资源循环利用,表2为有色金属再生国家政策。同时,硫酸电解和氨法电解过程中产生的废液和氨气加剧环保压力,企业环保投入显著增加。未来,通过提升产业集中度、优化原料供应链、加强环保管理及推广绿色创新技术,可助力再生锌行业实现可持续发展。

表2 有色金属再生国家政策

Table 2 National policy on non-ferrous metal recycling

发布时间	发布部门	政策名称	主要内容
2021年7月	国家发展改革委	“十四五”循环经济发展规划	到2025年,废钢利用量达到6 000万t,废纸利用量达到3.2亿t,再生有色金属产量达到2 000万t
2021年1月	国务院	2030年前碳达峰行动方案	到2025年,废钢铁、废铝、废铜、废锌、废铅、废镍、废塑料、废橡胶、废玻璃等9种主要再生资源原料利用量达到4.5亿t <sup>[24]</sup> ;到2030年达到5.1亿t。
2022年1月	国家发展改革委、商务部等部门	关于加快废旧物资循环利用体系建设的指导意见	到2025年,废旧物资循环利用政策体系进一步完善,资源循环利用水平进一步提升;废钢铁、废铝、废铜、废锌、废铅、废镍、废塑料、废橡胶、废玻璃等9种主要再生资源原料利用量达到4.5亿t
2022年6月	生态环境部国家发展改革委和工信部7部门	河北省实施方案	推广“高效低碳技术”,助推再生有色金属产业发展。
2022年7月	工业和信息化部、国家发展改革委和生态环境部	工业领域碳达峰实施方案	延伸再生资源清洁加工产业链条,促进铜、铝、铅、锌、镍、钨、钼、铋、铌等再生有色金属循环利用。
2024年2月	国务院办公厅	关于加快构建废弃物循环利用体系的实施意见	到2025年,初步建立覆盖全国、各环节的废弃物循环利用体系 <sup>[25]</sup> ,主要再生有色金属产量达到3 000万t。废钢、废铜、废铝、废锌、废铅等再生金属产业年产值达到5万亿元。

## 2 现代锌冶炼方法

当前锌冶炼主要采用火法和湿法两种工艺(图3)。火法通过焙烧锌矿生成氧化锌,再还原熔炼得到粗锌<sup>[26-27]</sup>;湿法则通过焙烧—浸出—电积流程提取纯锌。近年来,工艺优化侧重于节能减排、提高资源回收率和降低环境污染,推动锌冶炼向更加环保高效的方向发展<sup>[28]</sup>。因此,改进现有锌冶炼工艺,创新锌冶炼技术,发展含锌二次资源回收利用技术,已成为我国锌冶炼领域的发展趋势。

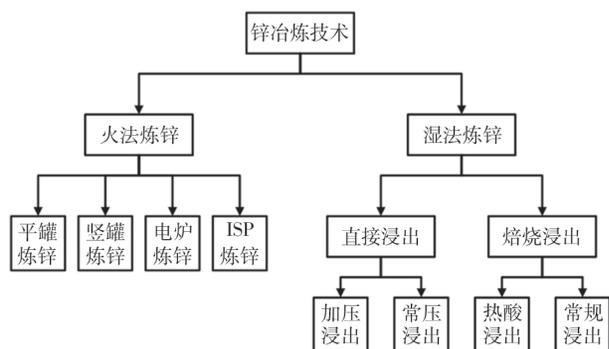


图3 锌冶炼技术分类

Fig. 3 Classification of zinc smelting technologies

### 2.1 湿法炼锌工艺技术及其原理

湿法炼锌作为全球主要的炼锌方法,以其高效率、自动化程度高、废料可循环利用的特点,产量占全球锌产量的85%以上<sup>[29]</sup>。然而,尽管工艺发展迅速,直接浸出和间接浸出均已广泛应用,其工艺过程中含铁固废的产排和锌二次资源的大规模处置问题仍是技术瓶颈<sup>[30-31]</sup>。湿法工艺通过将锌精矿浸入高温高酸的电解质溶液中,实现锌与杂质的分离,并经过电积得到纯锌<sup>[32-34]</sup>。

直接浸出工艺是近年来的重要技术进展,主要包括加压富氧浸出和常压富氧浸出<sup>[35-36]</sup>。加压浸出技术已在中金岭南丹霞冶炼厂、西部矿业公司、南方有色金属有限公司等企业应用,常压浸出则在株冶集团等企业推广。然而,这些工艺在浸出过程中会产生大量含铁固废,尤其是热酸浸出工艺,其渣属于危险废物,需依赖火法工艺处理,加大了后续成本和环境压力。

间接浸出是当前最主要的湿法炼锌工艺,生产电锌的产量约占全球的90%。其流程包括硫化锌精矿沸腾炉焙烧、焙砂浸出、浸出液净化、电积锌锭等环节。其中,热酸浸出工艺虽然提升了浸出效率,但伴随固废量增加和危废特性,使得处理难度加大。传

统常规浸出工艺因产渣量较低和技术相对成熟,在全球范围内仍占主导地位<sup>[37]</sup>。

湿法炼锌无法直接大规模处置锌二次资源,如镀锌废料、锌渣等低品位物料,需借助火法挥发富集得到氧化锌烟尘,制约了资源循环利用<sup>[38]</sup>。未来技术改进方向应着重于设备大型化、优化浸出渣无害化处理及推进绿色技术创新,以缓解含铁固废处理和资源回收难题,实现锌冶炼的可持续发展。

### 2.2 火法炼锌工艺技术及其原理

火法炼锌采用碳作为还原剂,将锌的氧化物与碳在密闭容器中加热至高温下还原,之后经提纯得到纯锌。中国现行的火法炼锌工艺主要包括ISP密闭鼓风炉炼锌和电炉炼锌,其中以ISP工艺为主,电炉炼锌投资相对较低,操作简易,但产能较小,因此适宜在中小型炼锌厂中使用。

ISP工艺是英国帝国熔炼公司(Imperial Smelting Corp.)研发的,在密闭炉顶的鼓风炉中,用碳质还原剂从铅锌精矿烧结块中还原出锌和铅<sup>[39]</sup>。此方法可以处理原生硫化铅锌精矿,也可以熔炼次生含铅锌物料,其工艺流程图如图4所示<sup>[40]</sup>。ISP工艺全世界先后共建设了19条生产线,在国外,因环保原因已经全部关闭,目前,我国尚建有4条ISP鼓风炉炼锌生产线(韶关、葫芦岛、白银、陕西东岭)。

电炉炼锌技术采用电能作为热源,在存在焦炭或煤等还原剂的条件下,直接加热原料,使其中的氧化锌(ZnO)被持续还原生成锌蒸气,随后冷凝得到金属锌<sup>[39-40]</sup>。电炉炼锌适用于高铜、高铁的锌矿石,但对原料中的硫含量有严格要求,需控制在1%以下;对于硫含量较高的碳酸盐锌矿,还需进行预先脱硫处理。

## 3 非常规复杂锌资源回收工艺现状

我国铅锌冶炼工艺复杂,冶炼过程中产生大量冶炼渣。然而,由于当前处理效率低、环境污染严重,难以满足低成本和高回收率的资源化利用需求<sup>[41]</sup>。2022年,全国铅基固废产量为1 152万t,资源循环水平有待提升。相比之下,全球含锌二次物料已成为锌生产的重要来源,约占全球锌资源的30%;我国在再生锌供应方面发展较慢,但潜力巨大。

目前再生锌资源主要集中于冶炼烟尘和冶炼渣,包括镀锌过程中产生的热镀锌渣、锌灰,钢铁行业的电弧炉烟尘、瓦斯泥,以及铅锌冶炼中的含锌烟尘和浸出渣等<sup>[39, 42]</sup>。这些再生资源虽然含锌品位低、成分复杂,还夹杂有害元素(如氟、氯、砷、锑、镉等),但

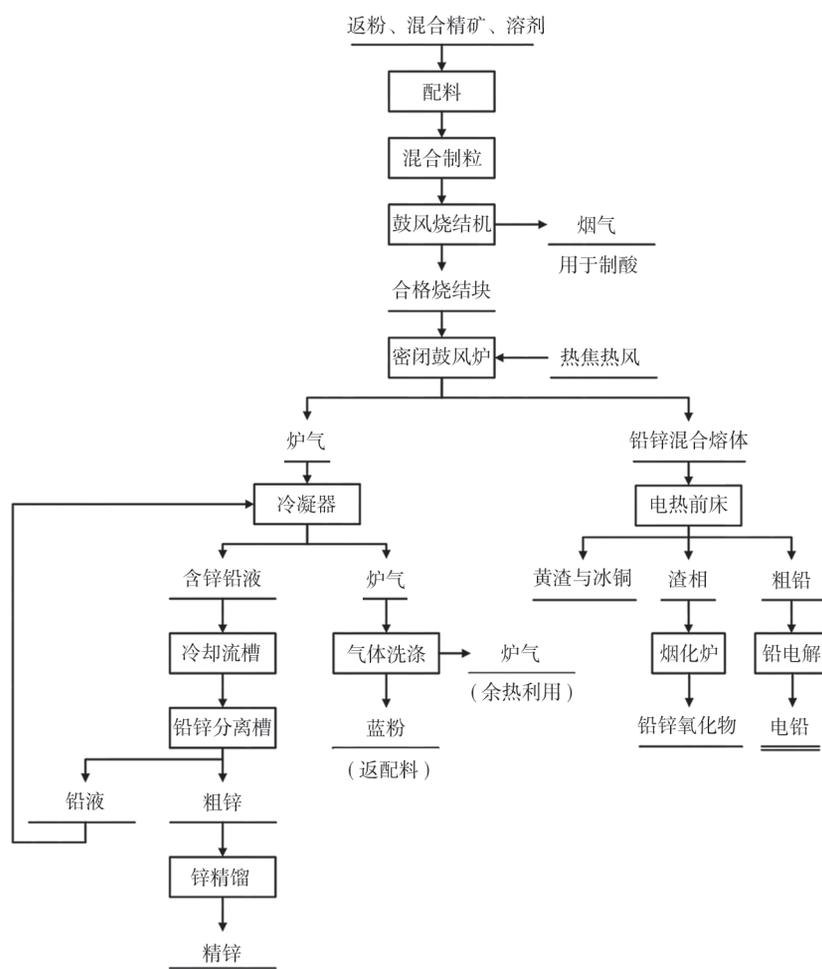


图4 密闭鼓风炉炼锌流程

Fig. 4 Imperial Smelting Furnace zinc smelting process

铅锌冶炼渣中部分有价金属含量甚至超过天然矿石。因此,开发利用铅锌冶炼固废资源,既能回收有价金属,缓解资源短缺,又符合环境保护和可持续发展的要求。

### 3.1 湿法回收工艺

目前,非常规复杂含锌物料湿法处理方法主要包括酸浸法、氨浸法和碱浸法<sup>[43]</sup>。这些工艺已在锌硫化矿、氧化矿、尾矿以及冶金废物等二次资源的试验研究中得到广泛探索<sup>[44]</sup>。其中,稀H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸出因其工艺成熟、适用性广,已被大多锌冶炼企业采用。然而,对于铁、钙、硅含量高的低品位氧化锌矿石或尾矿,该方法存在酸耗过大、工艺复杂和硅胶生成等问题,导致ZnSO<sub>4</sub>难以从矿浆中分离。锌的最大溶解顺序为H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>HCl>HNO<sub>3</sub>,但HCl工艺因非选择性浸出和高成本尚未实现工业化应用。有机酸在较高温度和pH下溶解锌效果显著,但因同时溶解铁而不经济。碱性NaOH或氨溶液可选择性溶解锌,而铁、铝、镁等杂质保留在残渣中,提纯过程简单,但锌酸

钠溶液中锌的电积工艺仍需突破。

近年来,对电弧炉(EAF)粉尘等锌、铅、铁含量高的废弃物的直接浸出工艺研究受到关注,特别是在环保法规日益严格和矿产资源短缺的背景下。虽然H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>仍是最常用的浸出剂,但其缺点促使研究者探索氨、铵盐、氯化物、烧碱等替代物。其中,氨和铵盐因低腐蚀性和环保优势使用量增加。此外,氧化剂、高压、微波加热和机械活化等预处理技术可有效提高浸出效率。

### 3.2 火法回收工艺

我国处理低品位含铅锌固废主要采用回转窑法(威尔兹法)。该工艺将物料中的金属氧化物还原为金属锌蒸气(金属锌的气化温度约907℃),再氧化成烟尘并通过收尘系统分离。处理温度达1100~1250℃,适合低品位含铅锌固废,要求原料中Zn含量≥15%,产出的氧化锌粉含Zn 50%~60%<sup>[45]</sup>。回转窑法适用原料广、锌回收率高,广泛应用于铅锌废渣、钢厂烟灰、尾矿等含锌固废的资源化处理<sup>[46]</sup>。

然而,当前我国在再生锌资源回收技术上与发

达国家存在差距。通过技术改进提高二次物料的回收效率,能够助力无废城市建设,推动资源可持续发展。现有铅锌还原炉渣多采用烟化工艺,锌以次氧化锌形式产出,附加值低、铁组分未被有效回收,尾渣只能低价低值处置。中国恩菲工程技术公司采用侧吹-烟化工艺处理铅锌渣,Zn、Pb、Ag等回收率可达92%,能耗比传统工艺低,但效率受到非连续作业的限制,且未实现尾渣中铁的回收利用<sup>[47]</sup>。

在锌回收工艺中,不同技术的挥发率和效率各有不同。基夫赛特法的优势在于其对原料适应性强,可处理含铅量15%~70%、含硫量13.5%~28%的原料,且能有效处理含铅锌的废渣,具有较高的主要金

属回收率,实现了资源的高效综合利用<sup>[48-49]</sup>。然而,基夫赛特法也存在一定的局限性,如原料预处理要求较高,需将物料干燥至含水量低于1%(质量分数),增加了工艺复杂性。回转窑法和烟化法中,锌的挥发率分别可达90%~95%和90%~92%。然而,这些方法存在碳耗高等缺点,且会产生大量高含铁的二次残渣。近年来,Ausmelt熔炼技术被应用于从锌浸出渣中回收锌,锌的回收率达到80%~85%。不过,该工艺需要使用两台澳斯麦特炉,导致资本投资增加。因此,开发高效、低污染、低能耗的锌浸渣回收技术是当前亟待解决的关键问题<sup>[50-51]</sup>。表3为不同含铅物料与锌浸渣回收工艺的比较。

表3 不同含铅物料与锌浸渣回收工艺比较<sup>[50,52-53]</sup>

工艺	Zn回收率/%	Pb回收率/%	Cu回收率/%	Ag回收率/%	In回收率/%	吨渣燃料消耗/t	烟气SO <sub>2</sub> 浓度/%
回转窑法	80~90	80~90,入烟尘	几乎全部进渣	20~30,入烟尘	80	焦粉0.5	0.15
烟化炉法	85~90	85~95,入烟尘	95,入渣	30~40,入烟尘	70~80	煤0.3~0.4	0.2~0.5
澳斯麦特法	80~85	90~95,入烟尘	40,入渣	80~90,进烟尘和冰铜	70	煤0.35~0.45	0.5~1.0
基夫赛特炉法	85~92	90~95,入粗铅	70~80,入粗铅	90~95,入粗铅	80~85	煤0.21、焦粒0.03	渣中硫进烟 气(烟气浓度 15~20)

目前,国内铅锌冶炼工艺正逐步向联合冶炼模式转变。采用硫化铅精矿和硫酸铅渣作为原料,首先在富氧顶吹炉中进行氧化熔炼,生成富含铅的渣料。随后,这些富铅渣被送入侧吹还原炉进行还原熔炼,最终得到粗铅和含锌的液态熔渣<sup>[54-55]</sup>。接下来,含锌液态熔渣与湿法炼锌过程中产生的锌浸出渣共同作为原料进入烟化炉,在烟化过程中回收挥发的锌、铅、锗、银等贵金属。处理后的烟气经过余热回收、干式收尘以及氨酸法脱硫等步骤,最终达到排放标准<sup>[55]</sup>。

在国内,铅锌企业的联合冶炼工艺技术得到了广泛的实践应用<sup>[22,56]</sup>。某铅锌企业为高效利用和处理低品位的铅锌资源,结合铅锌冶炼的联合特性,采用拥有自主知识产权的富氧侧吹熔化技术,具体流程为“富氧顶吹熔炼-液态高铅渣侧吹直接还原-锌浸出渣富氧侧吹熔炼-烟化挥发冶炼”<sup>[57]</sup>,构建了由四座熔炉组成的联合生产体系<sup>[58]</sup>,成功实施“锌浸出渣处理环保节能技改工程”项目。不仅能够满足厂内对铅锌浸出渣料的高效处理需求,同时具备处理非常规氧化矿和氧硫混合矿的能力,最大限度地回收有价金属。这一流程有效减轻了铅锌浸出渣及氧化矿、氧硫混合矿难以高效利用的压力,优化了企业的资源综合利用。然而,在实施过程中,仍需关注可

能带来的绿色环保风险问题。

### 3.3 非常规锌资源冶炼现状及技术瓶颈问题分析

兰坪铅锌矿是我国重要的氧硫复合型铅锌矿床之一。经过数十年的开采,矿区内仍存有约3200万t难以处理的氧硫混合矿和1200万t的铅锌矿,铅锌金属总量接近400万t<sup>[59]</sup>。这些资源必须得到有效的开发利用和妥善处理<sup>[59-60]</sup>。此外,我国还在新疆发现了另一个特大型铅锌矿——火烧云铅锌矿,储量超过1820万t,矿床平均品位铅4.60%、锌23.37%、铅+锌27.97%,居世界第六、亚洲第一。该矿石锌主要以菱锌矿形式存在,现有的湿法炼锌工艺(如沸腾焙烧-常规浸出、氧压浸出等)难以直接应用于这种矿石,需探索适合的冶炼工艺<sup>[61-62]</sup>。

尽管当前全球超过85%的锌产量依赖湿法炼锌,但随着硫化锌精矿资源的逐渐枯竭,未来锌的冶炼将逐步转向利用铅锌氧化矿、氧硫复合矿以及含锌的二次资源等非常规铅锌原料。传统湿法工艺难以适应复杂原料的要求,火法炼锌工艺在未来冶炼中反而更具潜力,因此,电炉炼锌和ISP鼓风炉炼锌工艺以其较强的原料适应性及能短流程直接回收金属锌的能力展示了独特优势<sup>[63]</sup>。

综上所述,为应对未来非常规铅锌资源高效利用

的挑战,现有锌冶炼主导技术湿法炼锌工艺无法高效适配,需借助回转窑、ISP密闭鼓风机、基夫赛特炉、ISA炉、侧吹熔炼炉、烟化炉等火法熔炼技术及装备,进行原料“预处理”富集得到氧化锌烟尘,才能顺利链接到“浸出一净化—电积”的湿法炼锌主流流程中去<sup>[64-66]</sup>。基于此,火法技术在铅锌冶炼行业的地位在未来处理非常规锌资源时会逐渐凸显,展现出更大的发展潜力。

#### 4 火法熔池炼锌技术开发及未来应用前景展望

熔池熔炼是现阶段强化冶金技术进步的标志,目前已大规模应用于铜、铅的工业化生产,但锌冶炼仍未突破熔池熔炼技术瓶颈。闪速熔炼、底吹/侧吹/顶吹熔池熔炼技术已成世界范围内铜冶炼的标配技术,铅冶炼“三连炉”液态连续化熔池熔炼工艺已工业化应用20余年,支撑了铜、铅产能提升、降本增效及线路板/铅膏等铜/铅基金属基固废的大规模消纳处置,促进了铅锌冶金技术绿色升级、能耗降低与环保水平提升<sup>[67-68]</sup>。但ZnO熔点高(1 975 °C),导致高锌物料在常规冶炼温度(1 150~1 300 °C)下难以熔融流动,无法实现液态连续化熔池熔炼<sup>[69]</sup>。现有的基夫赛特、三联炉等熔池炼铅工艺需要严格限制锌

含量不超过18%,以避免熔渣黏度升高,引起炉况恶化。

高锌物料熔池氧化-熔池还原直接回收金属锌是未来锌冶炼技术发展趋势<sup>[70]</sup>。为了降低高锌物料的熔点,澳斯麦特公司通过氧势控制与SiO<sub>2</sub>-FeO-ZnO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>渣系调控,理论上可以在1 250 °C条件下实现含20%锌物料的熔融;金川公司的研究显示,加入硼化物、钠盐、钾盐等助熔剂可降低炉渣熔点、提高流动性,但助熔剂可能会降低耐火材料寿命,并影响炉渣的建材化利用。Ausmelt顶吹浸没喷吹直接炼锌技术(TSL)从熔池中还原挥发锌,总锌回收率为99%,但锌以ZnO形式回收<sup>[71]</sup>。韩国、日本、澳大利亚等已将顶吹浸没喷吹熔池熔炼技术应用于锌浸出渣、QSL炉渣等含锌渣的处理,如韩国杨浦(YPC/Young Poong)公司采用TSL技术处理锌渣(含Zn 15%~20%、Pb 3%~5%),以ZnO回收锌后,尾渣含锌、铅分别小于3%、1%<sup>[71-72]</sup>。大量的工程实践已证明,熔池中锌可被还原为金属锌,但金属锌极易在上升烟道中被二次氧化,导致无法直接回收金属锌<sup>[73-74]</sup>。为此,开发高锌低熔点多元渣系、引入低温促熔剂,解决锌蒸气再氧化等瓶颈问题,是开发短流程熔池炼锌技术的关键。图5为熔池直接还原直接炼锌工艺示意图。

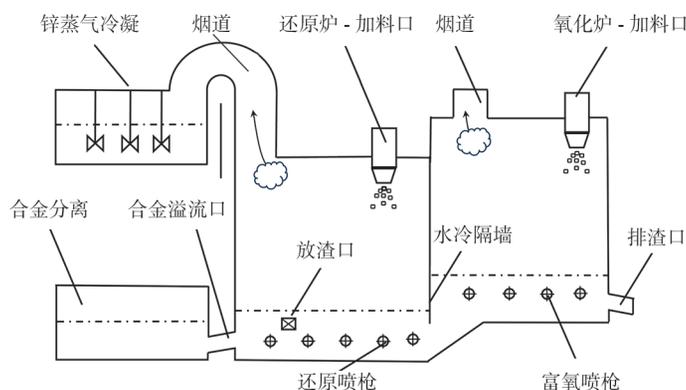


图5 熔池直接还原炼锌示意图

Fig. 5 Schematic diagram of direct reduction zinc bath smelting

ISP工艺中密闭鼓风机(ISF炉)利用料柱还原,在密闭鼓风条件下,将烟道内的锌蒸气直接导入铅雨冷凝器,实现了金属锌的直接回收。借鉴料柱密闭鼓风还原方法,结合熔池熔炼优势,实现床层-熔池耦合熔炼直接回收金属锌具有可行性。同时可大规模搭配处理含锌粉尘、尘泥等复杂锌资源,也为兰

坪难处理铅锌混合矿、火烧云矿大规模资源化处理提供可能,符合冶金行业短流程低碳发展的要求。

未来铅锌铜资源必将朝铅锌铜联合冶炼方向发展,借助冶炼行业严苛的环保要求,发挥原生冶炼在大规模绿色协同处理金属基固废上的优势。近年来,铅锌冶炼在传统工艺基础上,也在不断探索引入

过程自动化与智能化技术,如无人配料行车、冶金过程高效转化精准调控与智能自动化控制系统等,以优化工艺过程、减少人工成本、提升回收率并降低能耗。同时,在当前水泥建材市场萎靡的环境下,探索铅锌铜等冶炼废渣的全量利用,为进一步释放市场潜力和增加废渣价值创造新的方向。加强冶金过程砷、铊等重金属全流程管控,提升共伴生微量稀贵金属的综合回收率,是开发未来熔池炼锌新技术应同步考虑的重点内容。

综合以上,推动火法熔池炼锌技术进步,提升复杂资源利用率,提高共伴生稀贵金属综合回收率,提升新技术自动化、智能化水平,兼顾固危废源头减量与过程污染防控,开发尾渣全量化利用新模式,才能更好地满足当前节能减排、绿色低碳的发展要求,为无废城市建设和冶金行业的绿色可持续发展提供强有力支撑。

## 5 结论

当前,锌冶炼行业面临原料复杂性、资源枯竭和环保压力等多重挑战。传统湿法炼锌在处理非常规资源和二次物料时已显现瓶颈,尤其在低品位锌废料和高铁含锌固废的处理上,存在较大技术难题。因此,湿法炼锌在未来复杂锌资源的挑战中将面临更多困难。

熔池炼锌技术因其低能耗、流程短、效率高,且原料适应性强的优势,是未来锌冶炼技术的发展趋势。但由于氧化锌熔点高,锌蒸气易氧化,熔池炼锌技术应从开发高锌低熔点渣系、抑制金属锌蒸气再氧化等方面着力,推动技术瓶颈的突破。同时,新技术的开发,应更具前瞻视角,需着眼未来复杂资源挑战、固废源头减量、过程智能化、有价值组分全量利用等多方面考量,真正为锌冶炼行业带来颠覆性绿色冶金技术变革。

### 参考文献

- [1] 李楠,谢海云,陈家灵,等. 云南某低品位铅锌硫化矿选矿试验研究[J]. 矿冶,2024,33(1): 26-33.  
LI N, XIE H Y, CHEN J L, et al. Experimental study on beneficiation of a low-grade lead zinc sulfide ore in Yunnan[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(1): 26-33.
- [2] 林朝萍. 废旧铅酸电池的回收技术新方法及其研究进展[J]. 资源再生,2022(7): 55-58.  
LIN C P. New methods and research progress of recycling technology of waste lead-acid batteries[J]. Resource Recycling, 2022(7): 55-58.
- [3] ZHAO T, CHAE S, CHOI Y. A review on recycling of waste lead-acid batteries[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2738(1): 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/2738/1/012019.
- [4] 王成彦,陈永强. 中国铅锌冶金技术状况及发展趋势: 节能潜力[J]. 有色金属科学与工程,2017,8(3): 1-6.  
WANG C Y, CHEN Y Q. Status and development trends of China's lead and zinc metallurgy technology: energy-saving potential[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(3): 1-6.
- [5] 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.
- [6] 张霜雪,陈玉林,李妍研,等. 含锌烟尘综合回收利用现状[J]. 世界有色金属,2020(21): 208-209,212.  
ZHANG S X, CHEN Y L, LI Y Y, et al. Current situation of comprehensive recovery and utilization of dust containing zinc[J]. World Nonferrous Metals, 2020(21): 208-209, 212.
- [7] 彭礼国,方建军,何海洋,等. 氧化锌矿石浮选技术研究进展[J]. 有色金属(选矿部分),2024(10): 57-65.  
PENG L G, FANG J J, HE H Y, et al. Research progress in flotation technology of zinc oxide ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(10): 57-65.
- [8] 李光胜,张文平. 内蒙某含锌矿石的工艺矿物学研究[J]. 矿冶,2020,29(6): 104-108.  
LI G S, ZHANG W P. Study on process mineralogy of a zinc ore in Inner Mongolia[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(6): 104-108.
- [9] 赵晖,金自钦. 云南某铅锌矿工艺矿物学研究[J]. 云南冶金,2024,53(1): 60-65.  
ZHAO H, JIN Z Q. Process mineralogy study of one lead-zinc ore in Yunnan[J]. Yunnan Metallurgy, 2024, 53(1): 60-65.
- [10] 邓攀. 四川某氧化铅锌矿工艺矿物学研究[J]. 有色矿冶,2023,39(1): 14-17,10.  
DENG P. Study on process mineralogy of a lead-zinc oxide ore in Sichuan province[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2023, 39(1): 14-17, 10.
- [11] 刘鑫宇,郭宝,左蔚然. 锌精矿氧压浸出技术研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分),2024(5): 19-26.  
LIU X Y, GUO B, ZUO W R. Research progress of oxygen pressure leaching technology of zinc concentrate[J]. Nonferrous Metals (Extractive

- Metallurgy), 2024(5): 19-26.
- [12] 曾小辉,李波,饶金山,等. 某伴生金银铅锌矿的工艺矿物学与浮选工艺[J]. 矿业研究与开发,2022,42(2): 31-38.  
ZENG X H, LI B, RAO J S. Process mineralogy and flotation technology of a lead-zinc ore associating gold and silver[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(2): 31-38.
- [13] 刘红召,杨卉芃,冯安生. 全球锌矿资源分布及开发利用[J]. 矿产保护与利用,2017(1): 113-118.  
LIU H Z, YANG H P, FENG A S. The distribution and utilization of global zinc resource[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017(1): 113-118.
- [14] XIONG Y. Recycling of lead pastes from spent lead-acid batteries: thermodynamic constraints for desulphurization[J]. Recycling, 2022, 7(4): 45. DOI: 10.1016/Recycling 222.6200.
- [15] 羊建波. 铅基固废资源区域分布及环境属性分析[J]. 绿色矿冶,2024,40(1): 71-77.  
YANG J B. Analysis of regional distribution and environmental attributes of lead-based solid waste resources[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(1): 71-77.
- [16] 高宇. 我国再生铅领域现状与发展趋势研究[J]. 世界有色金属,2019(10): 168-169.  
GAO Y. Research on current situation and development trend of recycled lead in China[J]. World Nonferrous Metals 2019(10): 168-169.
- [17] 陈亚州,汤伟,吴艳新,等. 国内外再生铅技术的现状及发展趋势[J]. 中国有色冶金,2017,46(3): 17-22.  
CHEN Y Z, TANG W, WU Y X, et al. Present situation and development trend of secondary lead process at home and abroad[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2017, 46(3): 17-22.
- [18] 王菲,张曼丽,王雪娇,等. 我国铜、铅和锌冶炼过程中危险废物产生与污染特性[J]. 环境工程技术学报,2021, 11(5): 1012-1019.  
WANG F, ZHANG M L, WANG X J, et al. Generation and pollution characteristics of hazardous wastes from smelting of copper, lead and zinc in China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(5): 1012-1019.
- [19] KAYA M, HUSSAINI S, KURSUNOGLU S. Critical review on secondary zinc resources and their recycling technologies [J]. Hydrometallurgy, 2020, 195: 105362. DOI: 10.1016/j.hydromet.2020.105362.
- [20] 王琢璞,温宗国. 废铅酸电池回收制取再生铅合金技术的生命周期评价[J]. 环境科学学报,2018,38(3): 1245-1255.  
WANG Z P, WEN Z G. Life cycle assessment of regeneration of lead alloy from waste lead-acid batteries[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3): 1245-1255.
- [21] 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.  
LIU Q. Research progress on resource of lead-zinc metallurgical slag[J]. Henan Chemical Industry, 2017, 34(2): 11-15.
- [22] 张成江. 铅锌联合冶炼工艺的优势[J]. 世界有色金属, 2023(18): 7-9.  
ZHANG C J. Advantages of lead zinc joint smelting process[J]. World Nonferrous Metals, 2023(18): 7-9.
- [23] 张小红. 关注中国锌工业[J]. 中国有色金属,2015(18): 44-45.  
ZHANG X H. Concerned about the Chinese zinc industry[J]. China Nonferrous Metals, 2015(18): 44-45.
- [24] 郑莉霞. 中国塑料污染治理政策分析: 全生命周期管理角度(下)[J]. 资源再生,2023(12): 26-29.  
ZHENG L X. Analysis of China's plastic pollution control policies: full lifecycle management perspective (Part 2) [J]. Resource Recycling, 2023(12): 26-29.
- [25] 滑清泉,杨森. 循环经济: 归位“错放资源” 垒起“金山银山” [N]. 驻马店日报,2024-10-16(1).  
HUA Q Q, YANG S. Circular economy: putting “misplaced resources” into position to build up a “mountain of gold” [N]. Zhumadian Daily News, 2024-10-16(1).
- [26] 张国繁,申晓毅,邵鸿媚,等. 氧化锌矿选冶技术研究进展[J]. 矿产保护与利用,2023,43(6): 158-170.  
ZHANG G F, SHEN X Y, SHAO H M, et al. Research progress beneficiation and metallurgy technology of zinc oxide ore[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(6): 158-170.
- [27] 黄标彩,汪灿荣,郭光章,等. 氧化锌的挥发行为及有效回收利用技术[J]. 江西冶金,2019,39(4): 1-6.  
HUANG B C, WANG C R, GUO G Z, et al. A study on the volatilization behavior and effective recovery and utilization technology of ZnO[J]. Jiangxi Metallurgy, 2019, 39(4): 1-6.
- [28] 郭学益,刘静欣,田庆华,等. 有色金属复杂资源低温碱性熔炼原理与方法[J]. 有色金属科学与工程,2013,4(2): 8-13.  
GUO X Y, LIU J X, TIAN Q H, et al. Principle and method of low temperature alkaline smelting in non-ferrous metallurgy complicated resources[J].

- Nonferrous Metals Science and Engineering, 2013, 4(2): 8-13.
- [29] 王振银, 高文成, 温建康, 等. 锌浸出渣有价金属回收及全质化利用研究进展[J]. 工程科学学报, 2020, 42(11): 1400-1410.
- WANG Z Y, GAO W C, WEN J K, et al. Research progress in the recovery of valuable metals from zinc leaching residue and its total material utilization[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(11): 1400-1410.
- [30] 刘自亮, 杨建平, 严浩, 等. 湿法炼锌除铁工艺研究[J]. 铜业工程, 2020(2): 51-54.
- LIU Z L, YANG J P, YAN H, et al. Research on iron removal process in zinc hydrometallurgical[J]. Copper Engineering, 2020(2): 51-54.
- [31] 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, 42.
- 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, 42.
- [32] 柴立元, 颜旭, 王云燕, 等. 有色冶金清洁生产技术发展态势[J]. 有色金属工程, 2024, 14(7): 1-12.
- CHAI L Y, YAN X, WANG Y Y, et al. Development trend of cleaner production technology in nonferrous metallurgical industry[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(7): 1-12.
- [33] 徐志峰, 朱辉, 王成彦. 富氧硫酸体系中硫化锌精矿的常压直接浸出动力学[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(12): 3440-3447.
- XU Z F, ZHU H, WANG C Y. Atmospheric direct leaching kinetics of zinc sulfide concentrate in oxygen-rich sulfuric acid system[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(12): 3440-3447.
- [34] SADEGHI N, MOGHADDAM J, OJAGHI ILKHCHI M. Kinetics of zinc sulfide concentrate direct leaching in pilot plant scale and development of semi-empirical model[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(10): 2272-2281.
- [35] 李嘉辉, 张程, 邓志敢, 等. 氧化中浸-加压酸浸组合浸出技术回收氧化锌烟尘[J]. 有色金属工程, 2022, 12(11): 67-75.
- LI J H, ZHANG C, DENG Z G, et al. Recovery of zinc oxide dust by oxidation neutral leaching & pressure acid leaching combined technology[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(11): 67-75.
- [36] 刘平, 赵景龙, 李辉. 富氧常压浸出设备的改进[J]. 湖南有色金属, 2019, 35(3): 38-40, 67.
- LIU P, ZHAO J L, LI H. Improvement of normal pressure leaching equipment[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2019, 35(3): 38-40, 67.
- [37] 宋言, 许良, 吴卫国. 锌冶炼先进工艺技术及应用实践[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(1): 23-29.
- SONG Y, XU L, WU W G. Advanced industrial technological innovation and application practice of zinc smelting[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(1): 23-29.
- [38] 吴卫国, 宋言. 含铅锌多金属固废的处理工艺创新及工业应用[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(6): 95-100.
- WU W G, SONG Y. Treatment process innovation and industrial application of lead-zinc polymetallic solid waste[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(6): 95-100.
- [39] 钟勇. 提高铅锌烧结块率的工业应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- ZHONG Y. Study on the industrial application of improving the rate of lead and zinc sintered lumps[D]. Changsha: Central South University, 2004.
- [40] 李密. 锌焙砂选择性还原与铁锌分离的基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- LI M. Fundamental research on selective reduction of zinc calcine and separation of zinc and iron[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [41] YAO L W, MIN X B, XU H, et al. Physicochemical and environmental properties of arsenic sulfide sludge from copper and lead-zinc smelter [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(7): 1943-1955.
- [42] 赵鹏飞. 再生锌综合回收工艺的研究现状及进展[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(4): 60-63.
- ZHAO P F. Status quo and progress of study on secondary zinc comprehensive recovery process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(4): 60-63.
- [43] HU Y Y, LI M, WU W G, et al. Life cycle assessment for waste acid treatment in zinc smelting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(11): 3822-3834.
- [44] LIU J, SHI X, ZOU Q, et al. Recycling of water quenched slag and silica sand tailing for the synthesis of an eco-friendly permeable material[J]. Construction and Building Materials, 2022, 357: 129310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129310>.
- [45] CHEN Y J, WANG Y Y, PENG N, et al. Isothermal reduction kinetics of zinc calcine under carbon monoxide [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(8): 2274-2282.

- [46] 冯均利,何宏平,薛亚,等. 典型再生氧化锌富集物的来源与分析鉴别综述[J]. 冶金分析, 2024, 44(11): 34-44.  
FENG J L, HE H P, XUE Y, et al. Review on the source, analysis, and identification of typical regenerated zinc oxide concentrates[J]. Metallurgical Analysis, 2024, 44(11): 34-44.
- [47] 宋言,陈向强,张阁. 湿法炼锌危废铅银渣的侧吹熔炼-连续烟化工艺核心装备与工程设计[J]. 有色设备, 2024, 38(5): 53-60.  
SONG Y, CHEN X Q, ZHANG G. Engineering design and core equipment of side-submerged combustion smelting-continuous fuming process for hazardous waste lead-silver slag from zinc hydrometallurgy[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(5): 53-60.
- [48] 荆旭冬,周蓉. 基夫赛特直接炼铅技术在国内首次应用实践[J]. 铜业工程, 2015(4): 58-61.  
JING X D, ZHOU R. The first application of Kivcet lead smelting in China[J]. Copper Engineering, 2015(4): 58-61.
- [49] 刘宁,朱超波,罗亮,等. 某铅锌废渣综合回收处置研究[J]. 世界有色金属, 2024(17): 13-15.  
LIU N, ZHU C B, LUO L, et al. Research on comprehensive recovery and disposal of a lead zinc waste residue[J]. World Nonferrous Metals, 2024(17): 13-15.
- [50] 羊建波,马文军,杨逸,等. 我国铅基固废现状、趋势及建议[J]. 有色设备, 2024, 38(5): 11-16, 23.  
YANG J B, MA W J, YANG Y, et al. Status, trend and suggestions of lead-based solid waste resources[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(5): 11-16, 23.
- [51] 石升友,马爱元,李国江,等. 锌冶金固废渣综合利用现状研究[J]. 世界有色金属, 2019(13): 7-8.  
SHI S Y, MA A Y, LI G J, et al. Research on comprehensive utilization status of zinc metallurgical solid waste slag[J]. World Nonferrous Metals, 2019(13): 7-8.
- [52] 陈玲玲,韩俊伟,覃文庆,等. 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 L L, HAN J W, QIN W Q, et al. Advances in comprehensive utilization of lead-zinc smelting slag[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(3): 49-55.
- [53] 张蕊,李恒江. 降低常规湿法炼锌尾渣银的研究与实践[J]. 世界有色金属, 2019(23): 7-8.  
ZHANG R, LI H J. Research and practice of reducing silver in zinc tailings of conventional hydrometallurgy[J]. World Nonferrous Metals, 2019(23): 7-8.
- [54] ZENG W Z, HU X Y, YAN Y, et al. Study on the cavitation and dissociation of sulfur from zinc leaching residue[J]. JOM, 2024, 76(3): 1394-1407.
- [55] 刘燕庭,杨天足,李明周. 铅富氧侧吹氧化熔炼多元多相平衡分析[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(5): 1110-1118.  
LIU Y T, YANG T Z, LI M Z. Multielement and multiphase equilibrium analysis of lead oxygen-enriched side-blown oxidation smelting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(5): 1110-1118.
- [56] WANG X, YANG C C, PAN J, et al. Effective utilization of dolomitic lead-zinc waste rock by replacing dolomite as flux in iron ore sintering process[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(8): 1861-1872.
- [57] 郭利杰,张雷,李文臣. 有色冶金渣制备胶凝材料研究现状与展望[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(5): 621-636.  
GUO L J, ZHANG L, LI W C. Progress and prospects of the preparation of cementitious materials based on nonferrous metallurgical slags[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(5): 621-636.
- [58] 王松松,王亲猛,田庆华,等. 铜富氧强化熔炼过程伴生铅锌元素定向分配行为调控[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(9): 2499-2511.  
WANG S S, WANG Q M, TIAN Q H, et al. Directional distribution behavior regulation of lead and zinc in oxygen-enriched intensified copper smelting process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(9): 2499-2511.
- [59] 李四光. 兰坪难处理氧硫混合铅锌矿冶选联合工艺[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(2): 49-53, 63.  
LI S G. Combined process of hydrometallurgy and beneficiation for the refractory oxygen-sulfur mixed lead-zinc ore in Lanping mine[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(2): 49-53, 63.
- [60] 汤裕源,陈为亮. 兰坪低品位难处理氧硫混合铅锌矿冶炼新思路[J]. 云南冶金, 2019, 48(4): 62-64.  
TANG Y Y, CHEN W L. New idea of smelting of refractory oxygen-sulfur mixed lead-zinc ore with low grade in Lanping[J]. Yunnan Metallurgy, 2019, 48(4): 62-64.
- [61] 汤裕源,刘丽. 锌冶炼工艺综述与展望[J]. 云南冶金, 2020, 49(6): 38-41.  
TANG Y Y, LIU L. Review and prospect of zinc smelting process[J]. Yunnan Metallurgy, 2020, 49(6): 38-41.
- [62] 贾楠楠,王会刚,郭敏,等. 硫氧混合铅锌矿中锌的氧化氨浸动力学[J]. 工程科学学报, 2017, 39(3): 377-382.  
JIA N N, WANG H G, GUO M, et al. Oxidative

- ammonia leaching kinetics of zinc extracted from mixed sulfide-oxide lead and zinc ore[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(3): 377-382.
- [63] 欧阳坤,豆志河.高锌含量下ZnO-FeO-SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>渣系黏度研究[J].中国有色冶金,2023,52(6):125-130.  
OUYANG K, DOU Z H. Viscosity of ZnO-FeO-SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag system with high zinc oxide content[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(6): 125-130.
- [64] 殷勤生,陶乃兴,苗彦臣,等.提高铅锌密闭鼓风炉原料适应性生产实践[J].甘肃冶金,2022,44(6):20-22.  
YIN Q S, TAO N X, MIAO Y C, et al. Production practice of improving raw material adaptability of lead-zinc closed blast furnace[J]. Gansu Metallurgy, 2022, 44(6): 20-22.
- [65] 楚敬龙,席利丽,谈浩,等.锌浸出渣综合利用技术适用性评估[J].有色金属(冶炼部分),2022(11):134-140.  
CHU J L, XI L L, TAN H, et al. Evaluation of applicability of comprehensive utilization technology for zinc leaching residue[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(11): 134-140.
- [66] 翟亮. ISP工艺烧结机富氧烧结改造实践[J].中国有色冶金,2020,49(1):26-29.  
ZHAI L. Reforming practice of oxygen-rich sintering of sintering machine in ISP process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020, 49(1): 26-29.
- [67] 陈朝辉,赵升辉,赵明杰,等.双侧吹熔池熔炼炉内气液两相流数值模拟[J].有色金属(冶炼部分),2024(12):8-16.  
CHEN C H, ZHAO S H, ZHAO M J, et al. Numerical simulation of gas-liquid two phase flow in a double-side-blown bath smelter[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(12): 8-16.
- [68] 杨华锋,史小毛,田发辉.侧-顶吹熔炼技术在处理铅基固废等物料的生产实践[J].有色设备,2024,38(5):30-36.  
YANG H F, SHI X M, TIAN F H, et al. Side-top blowing smelting technology in the production practice of processing lead-based solid waste and other materials[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(5): 30-36.
- [69] 王国华,杨建军,崔雅茹,等.铅银渣混配铅精矿直接还原熔炼成渣特性及动力学解析[J].有色金属工程,2024,14(6):53-61.  
WANG G H, YANG J J, CUI Y R. Slagging Characteristics and kinetic analysis of direct reduction smelting for treating lead-silver leaching residues mixed with lead concentrates[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(6): 53-61.
- [70] 黄晴宇,李云,卢珈伟,等.高锌物料熔池还原过程中渣型研选协同回收锌铅铜[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(2):538-547.  
HUANG Q Y, LI Y, LU J W, et al. Research selection of slag property of high-zinc materials bath reduction smelting for co-recovery of zinc, lead and copper[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(2): 538-547.
- [71] KIM B S, JEONG S B, LEE J C, et al. Behaviors of lead and zinc in top submerged lance (TSL) plant at Sukpo zinc refinery [J]. Materials Transactions, 2012, 53(5): 985-990.
- [72] ZHANG Z T, DAI X. Effect of Fe/SiO<sub>2</sub> and CaO/SiO<sub>2</sub> mass ratios on metal recovery rate and metal content in slag in oxygen-enriched direct smelting of jamesonite concentrate [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(2): 501-508.
- [73] WOOD J, COVENEY J, HELIN G, et al. The Outotec direct zinc smelting process [C]//European Metallurgical Conference 2015. 2015.
- [74] HOANG J, REUTER M A, MATUSEWICZ R, et al. Top submerged lance direct zinc smelting [J]. Minerals Engineering, 2009, 22(9): 742-751.