

# 铅锌尾矿的资源化综合利用研究进展

温龙新<sup>1</sup>, 唐培垚<sup>2</sup>, 李伟光<sup>2</sup>

(1. 南京银茂铅锌矿业有限公司, 南京 210033;  
2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 102628)

**摘要:** 铅锌尾矿是浮选铅、锌过程中的主要固体废弃物, 主要分为硅酸盐型尾矿和碳酸盐型尾矿。我国是世界铅锌生产大国, 铅锌尾矿堆存总量已达到 5 亿 t, 综合利用率却不到 20%, 大量堆存在尾矿库中不仅占用宝贵的空间土地资源, 还会带来严重的安全问题和环境污染隐患, 探索铅锌尾矿的综合利用途径已迫在眉睫。近年来, 随着我国资源行业发展转型升级, 有关铅锌尾矿综合利用的基础研究、技术开发和产业化发展工作日益完善, 取得显著成效。本文从铅锌尾矿有价组分回收、铅锌尾矿充填地下采空区和铅锌尾矿建材化综合利用三个方面介绍了近年来有关铅锌尾矿消纳和资源化综合利用的研究成果, 以期对铅锌尾矿资源化综合利用的相关研究提供参考。

**关键词:** 铅锌尾矿; 综合利用; 应用领域; 研究进展

**中图分类号:** TD926.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-4172(2024)03-0017-06

## Research progress on comprehensive utilization of lead-zinc tailings as resources

WEN Longxin<sup>1</sup>, TANG Peiyao<sup>2</sup>, LI Weiguang<sup>2</sup>

(1. Nanjing Yinmao Lead-zinc Mine Co., Ltd., Nanjing 210033, China;  
2. BGRIMM Technology Group, Beijing 102628, China)

**Abstract:** Lead-zinc tailings are the main solid wastes in the process of flotation of lead and zinc, which are mainly divided into silicate tailings and carbonate tailings. China is a big producer of lead and zinc in the world. The total storage of lead and zinc tailings has reached 500 million tons, but the comprehensive utilization rate is less than 20%. A large number of lead and zinc tailings not only occupy valuable space and land resources but also bring serious safety problems and hidden dangers of environmental pollution. It is urgent to explore the comprehensive utilization ways of lead and zinc tailings. In recent years, with the development, transformation, and upgrading of China's resource industry, the basic research, technical development and industrial development of comprehensive utilization of lead and zinc tailings have become increasingly perfect and achieved remarkable results. In this paper, the research results on the consumption and comprehensive utilization of lead-zinc tailings in recent years are introduced from three aspects: the recovery of valuable components of lead-zinc tailings, the filling of underground goaf with lead-zinc tailings, and the comprehensive utilization of lead-zinc tailings as building materials, to provide reference for the related research on comprehensive utilization of lead-zinc tailings.

**Key words:** lead-zinc tailings; comprehensive utilization; application field; research progress

铅锌是重要的战略发展资源, 广泛应用于电气、机械、军事、化工、医药等领域<sup>[1-3]</sup>。我国是世界上铅锌产量最大的国家, 2022 年, 我国铅产量达到 781.1

万 t, 锌产量达到 680.2 万 t, 均超过全球产量的 40%<sup>[4-5]</sup>。

由于成矿条件近似, 铅锌通常以共生的形式存在, 铅锌尾矿是铅锌矿石选矿作业中残余的有价组分含量低且目前无法用于工业生产的固体废弃物。由于我国铅锌矿品位较低, 铅锌尾矿的产量通常为铅锌精矿的十倍以上<sup>[6]</sup>。铅锌尾矿以脉石矿物(石英、方解石等)为主, 具有相当复杂的矿物组成, 主要

收稿日期: 2024-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U20A20269)

作者简介: 温龙新(1969—), 男, 高级工程师, 硕士, 矿物加工工程专业, 主要从事复杂多金属难选铅锌选矿技术研究, E-mail: 3193920744@qq.com。

化学成分为硅、铝、铁、钙、镁等元素的氧化物和硅酸盐,金属含量相对偏低<sup>[7-9]</sup>。因其选矿工艺的特性,铅锌尾矿具有数量大、成本低、粒度细、重金属含量较高等特点,堆存在尾矿库中不仅占用大量土地资源,还会带来严重的环境与安全隐患<sup>[10]</sup>。

随着我国铅锌产量的不断提升,铅锌尾矿的消纳处理成为制约铅锌产业发展的关键问题,铅锌尾矿的资源化综合利用成为当下研究的热点。由于不同矿区铅锌矿自身性质和选矿工艺的差异,铅锌尾矿的理化性质也存在较大波动,因此综合利用的方

式也不尽相同。

## 1 铅锌尾矿的性质及危害

### 1.1 铅锌尾矿的性质

铅锌尾矿一般呈灰黑色粉末状,成分十分复杂,其主要化学组成是  $\text{CaO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{SO}_3$ ,还有少量的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{MgO}$  等。铅锌尾矿的 X 射线荧光光谱半定量分析见表 1, XRD 分析图谱见图 1,其主要矿物组成为方解石(30.5%)、黄铁矿(8.9%)、石英(18.4%)、白云石(33.3%)和菱铁矿(8.9%)。

表 1 铅锌尾矿 X 射线荧光光谱半定量分析

化学成分	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{ZnO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$	烧失
铅锌尾矿	12.33	2.16	40.86	3.43	0.28	0.21	17.31	8.74	14.51

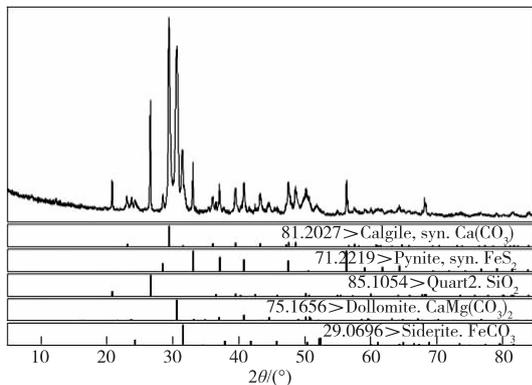


图 1 铅锌尾矿 XRD 衍射分析图谱

Fig. 1 XRD diffraction analysis map of lead-zinc tailings

### 1.2 铅锌尾矿的危害

未经处理的铅锌尾矿可能含有 Pb、Zn、As 等重金属元素,长时间的堆存对环境对人类都有较大的危害。研究表明,铅锌尾矿中的有毒元素会在雨水的冲刷下进入水循环,破坏生态平衡。本着绿色矿山建设的原则,人们采用各种手段对铅锌尾矿加以利用,均取得了不错的效果。例如利用对铅锌尾矿进行有价值组分回收、充填井下采空区、生产建筑材料等。但相较于国内日渐增长的尾矿堆存量,这些利用手段对铅锌尾矿的利用量显得杯水车薪,整个行业亟需更高效的方法来应对这种情况。

## 2 铅锌尾矿的回收利用

目前铅锌尾矿的综合利用主要集中在有价值组分回收、充填井下采空区以及制备建筑材料三个领域。其中有价值组分回收主要是回收铅锌尾矿中铅锌外的其余有价值组分,对铅锌尾矿的减量化消纳效果并不明显;利用充填胶凝材料协同铅锌尾矿充填井下采

空区不仅可有效消纳铅锌尾矿,还可充分固化铅锌尾矿中的重金属等有害元素,是安全高效的尾矿综合利用手段;其余铅锌尾矿的综合利用主要是投入建筑材料领域,该领域消纳尾矿的手段种类较多,可用于生产各种水泥、加气混凝土砌块、道路材料等,虽然生产的建筑材料存在尾矿掺量低的问题,但该领域前景广阔,是目前解决铅锌尾矿堆存问题的最有效途径。

### 2.1 有价值组分回收

受限于选矿技术落后、装备性能差及工艺不完善等因素,矿石中许多有价值组分往往难以全部选出,造成尾矿中有价成分较多,因此可以通过二次浮选、磁选、酸浸、生物浸出等工艺回收尾矿中的有价值组分,进而有效提高尾矿的经济价值。由于不同铅锌尾矿的成分各异,可通过再选回收的有价值组分也存在差异,就现有研究来看,铅锌尾矿中可回收的主要有价值组分有铅、锌、硫、铁、锰、萤石、萤石、重晶石、绢云母等<sup>[11-12]</sup>。

翟旭东<sup>[13]</sup>采用先硫后氧的流程回收铅锌尾矿中的锌,以硫酸铜为活化剂,以丁基黄药为捕收剂浮出细磨后铅锌尾矿中的硫化锌,之后进行重选脱泥,并采用浮选的方式对沉砂中的氧化锌进行处理,最终锌品位达到 23.43%,锌回收率达到 81.68%,有效回收了铅锌尾矿中的锌资源;叶岳华等<sup>[14]</sup>等针对云南某铅锌尾矿中的金、银、硫展开回收,制定了“铅锌混合浮选—尾矿选硫”的工艺流程,采用乙硫氮和 BK-N 的组合,再选得到的精矿中含 Au 15.83 g/t,含 Ag 2 268.57 g/t, Au 回收率 7.63%, Ag 回收率 18.47%;硫精矿品位 48.77%,回收率 89.70%。进一步降低了尾矿中的有用组分含量,有效资源得到最大化利用。

综上所述,针对铅锌尾矿中的有价组分进行回收的研究较多,工艺较为成熟,可以得到品位较高的精矿产品,有效避免矿产资源的浪费,实现矿物价值的最大化,为矿山企业带来更大的经济效益,但尾矿再选后依旧会产生较大比例的尾矿,因此有价组分回收这一综合利用方式往往作为铅锌尾矿综合利用过程的第一步,不能彻底解决铅锌尾矿大规模消纳的问题。

## 2.2 充填井下采空区

在矿产资源开采的过程中人为挖掘形成的地下空洞被称作采空区,由于应力不均,采空区容易发生塌陷等安全事故,是矿山安全生产的主要危害之一,通常采用充填的方式进行解决<sup>[14]</sup>。尾矿井下充填是指在使用尾矿替代土壤,配加水泥或充填胶固粉等胶凝材料提高固结强度后通过充填站将尾矿送至矿山的采空区进行充填的方式,不仅可以有效降低采空区的安全隐患,还可以大规模消纳尾矿,解决尾矿堆存带来的环境与安全问题。

施士虎等<sup>[15]</sup>研究了铅锌尾矿胶结充填材料的无侧限抗压强度(UCS)发展规律。结果表明,以普通硅酸盐水泥(OPC)为胶凝材料的充填体,无论颗粒大小,在养护后期抗压强度均有所降低。相同条件下,OPC掺量越高,胶结充填体的UCS越高,且养护天数越长,胶结充填体的UCS开始降低。在相同条件下,尾矿越细,各龄期胶结充填体的UCS越低,且在较早的养护龄期,胶结充填体的UCS开始降低;赵泽民<sup>[16]</sup>采用由70%矿粉+30%水泥+1%泡花碱所制备的矿渣硅酸盐水泥替代传统硅酸盐水泥来制备铅锌尾矿充填体材料,可以显著降低充填成本。同时,采用10%~15%细粒度铅锌尾矿粉替代部分粗粒度铅锌尾矿砂制备充填体时,细粒尾矿粉可以改善充填体的粒级配分布,提高料浆流动性,同时可以发挥微集料效应,改善充填体的微观结构;张丹<sup>[17]</sup>采用机械活化和化学活化协同处理铅锌尾矿和铅锌冶炼渣,制备了新型矿山充填胶凝材料,减少水泥用量、降低生产成本的同时可以有效解决铅锌尾矿和铅锌冶炼渣的消纳问题。

利用铅锌尾矿充填矿山采空区是铅锌尾矿综合利用的重要方式,这种途径成本较低,尾矿消纳量大,且对尾矿的理化性质和原料稳定性的要求较低,充填胶凝材料可对尾矿颗粒进行包裹,固化尾矿中的重金属等有害元素(如图2所示),该方法具有较好的普适性,但经济价值有限。

## 2.3 制备建筑材料

利用铅锌尾矿制备建筑材料具有污染少、经济效益高、可持续发展性强等优点,是目前铅锌尾矿资



图2 铅锌尾矿充填矿山采空区过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the process of filling mine goaf with lead-zinc tailings

源化利用的主要方向。铅锌尾矿的主要化学成分与建材原料成分相似,因此可以将尾矿用作建筑原料来实现尾矿的规模化消纳,如水泥、混凝土、建筑用砖、发泡陶瓷、陶粒、微晶玻璃等。

### 2.3.1 水泥原料

铅锌尾矿用于水泥产业的途径主要分为两种。一种是作为水泥混合材,直接掺入水泥熟料中替代部分水泥,这种方法简单且成本较低,但由于铅锌尾矿中存在大量非活性物质,大量配入会影响水泥强度,因此配入量十分有限,往往需要采用机械活化或激发剂活化来提高铅锌尾矿的活性<sup>[18]</sup>。另一种是将铅锌尾矿用作生产水泥熟料的原料,铅锌尾矿中的主要成分为 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,与水泥生料中的硅质、铝质材料相近,能够满足生产硅酸盐水泥的组分需求,同时铅锌尾矿中含有的Pb、Zn、Cu、Mn、Cr、Ti等微量元素还具有助熔、矿化等效果,可以提高水泥生料易烧性,因此可以将尾矿代替部分黏土配料来生产水泥熟料,实现铅锌尾矿的规模化利用<sup>[19]</sup>。但这种方法存在重金属离子固结程度低、重金属离子易浸出污染环境等问题。

王生辉等<sup>[20]</sup>将铅锌尾矿、铅锌冶炼渣作为水泥混合材,研究表明,铅锌尾矿中存在一定量的非活性组分,基本不参与前期水化反应,导致前期水化反应产物相对减少,表现为前期强度有所降低,同时铅锌尾矿不能为体系提供足够量参与二次水化反应的有效成分,导致后期强度也出现一定的降低,因此铅锌尾矿单掺时比例不宜超过10%;李炳良等<sup>[21]</sup>在铅锌尾矿作水泥混合材的过程中使用活性激发剂DE来提高铅锌尾矿的活性,进而提高铅锌尾矿的掺量。研究表明,在原料粉磨过程中添加0.04%的活性激发剂DE可以增加5%的铅锌尾矿掺量;高锦城等<sup>[22]</sup>按照铅锌尾矿:石灰石=35.4:64.6的比例在1350℃条件下煅烧制备水泥熟料,可以达到42.5水泥的28d抗压强度指标。养护前期主要水化产物为钙矾石,随着养护时间增长,水化产物C-S-H含量增多,逐渐填满试块内部空隙,增加浆体密实度,进而提高抗压强度。

将铅锌尾矿用于水泥生产工艺简便,成本较低,是铅锌尾矿消纳的重要方法,但也存在一定的局限

性。成品水泥的质量受水泥生料的化学成分影响,这也限制了铅锌尾矿掺入量的提高,且不同来源的铅锌尾矿成分不同,甚至同一种尾矿也存在成分波动的问题,因此在同一生产过程中难以控制成品水泥的性能稳定不变。同时,还需要关注铅锌尾矿在焙烧过程中潜在的污染问题。

### 2.3.2 多孔陶瓷

发泡陶瓷是一种新型建筑材料,具有轻质、保温、隔热、变形系数小、强度高、使用寿命长等优势,通常以陶土尾矿、陶瓷碎片、河道淤泥、陶瓷固体废料为主要原料,并添加特殊发泡剂,经布料成型、窑炉高温焙烧而制成。尾矿中的化学组分类似于发泡陶瓷原料中使用的黏土,因此将尾矿替代黏土用于制备发泡陶瓷,可实现尾矿的高附加值利用<sup>[23]</sup>。

刘娥等<sup>[24]</sup>以铅锌尾矿为主要原料,配加黏土、长石、石英、玻璃粉、陶瓷废料和发泡剂,在 1 200 ℃ 左右焙烧制备了性能良好的发泡陶瓷保温板,铅锌尾矿的利用率超过 50%。区雪连等<sup>[25]</sup>以铅锌尾矿、废玻璃、废陶瓷浆为主要原料,以 SiC 为发泡剂,经多段焙烧工艺后制备了平均显微硬度为 10.05 GPa、密度达到 445 kg/m<sup>3</sup>、导热系数为 0.078 W/(m·K)、吸水率为 1.25%、试样抗折强度为 0.49 MPa、抗压强度为 1.24 MPa、耐酸碱腐蚀性良好的发泡陶瓷产品;LIU 等<sup>[26]</sup>以 25% 铅锌尾矿、25% 赤泥和 40% 硅砂为主要原料,以 10% Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 为助熔剂,采用粉末工艺制备了发泡陶瓷。在 970℃ 的烧结温度下,泡沫陶瓷材料的体积密度为 0.56 g/cm<sup>3</sup>,孔隙率为 76.2%,抗弯强度为 5.3 MPa,导热系数为 0.21 W/(m·K),具有较高的孔隙率和较低的导热系数,适用于建筑行业的保温材料。

### 2.3.3 烧结普通砖

建筑砖是建筑领域应用最广泛的基础材料之一,传统的建筑砖生产需要消耗大量的黏土,对自然环境造成一定的影响。为此,国家出台了“无黏土”政策,在这一政策的推动下,利用尾矿、炉渣等工业固体废物生产建筑砖的研究受到广泛关注。根据制备工艺不同,利用铅锌尾矿制备的砖体材料主要分为烧结砖和免烧砖(图 3)。

王志瑞等<sup>[27]</sup>以安顺市低硅铅锌尾矿为主要原料,按照铅锌尾矿:硅矿:煤矸石:页岩:粉煤灰=3:3:1.2:2:0.8 的配比,在焙烧温度 1 050~1 080 ℃,保温时间为 45 min 的条件下制备了性能良好的烧结砖产品。周龙等<sup>[28]</sup>采用铅锌尾矿:石膏:水泥:石粉=2.5:1.5:1:5 的比例,在成型水分 14%、成型压力 20 MPa 的条件下制备了抗压强度为 26.2 MPa、吸水率为 17.82% 的免烧砖,复合

MU20 等级;李冲等<sup>[29]</sup>按照铅锌尾矿:硅微粉:水泥=70:20:10 的比例制备了免烧吸附砖,满足 MU20 等级的同时,水化物与尾矿内重金属形成沉淀物,并对含铅废水中的铅离子吸附率达到 96%,可应用于江河湖泊等工程场景。



图 3 烧结普通砖(KP1 和标砖)

Fig. 3 Sintered common bricks(KP1 and standard bricks)

### 2.3.4 制备微晶玻璃

微晶玻璃又称玻璃陶瓷、微晶玉石,是将特定组成的基础玻璃通过控制晶化制成的含有大量微晶相和玻璃相的固体材料,它具有耐腐蚀性优良、强度高、环保等优点,广泛应用于建材、机械、电子工业和生物医学等领域。铅锌尾矿的化学组分及含量与微晶玻璃基础组分体系相符合,具备利用现有工艺体系将铅锌尾矿制备成微晶玻璃的可行性,但往往需要添加其他化工原料或协同其他固废对整体成分进行调控。

郭艳平等<sup>[30]</sup>采用烧结法协同铅锌尾矿和 CRT 玻璃废弃物制备微晶玻璃,其中铅锌尾矿添加量为 20%、CRT 玻璃废弃物掺量为 30%,微晶玻璃晶相以透辉石为主,具有良好的机械性能和化学稳定性;硅钙比是影响微晶玻璃性质的重要参数。钟高辉等<sup>[31]</sup>以铅锌尾矿为主要原料,使用烧结法制备了 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 系微晶玻璃,并发现在 CaO/SiO<sub>2</sub> 小于 0.3 的情况下,随着 CaO/SiO<sub>2</sub> 质量比的增加,

基础玻璃的晶化温度逐渐降低,有利于晶化,主晶相为透辉石,微晶玻璃的密度增大,抗压强度增强。石戈<sup>[32]</sup>研究了铅锌尾矿制备微晶玻璃过程中 Si/Ca 对产品重金属浸出毒性的影响,结果表明,随硅钙比的增加,Zn、Mn 的浸出率基本没有影响,这是因为重金属离子可以通过取代价态相同、半径相近的离子形成置换固溶体,并被固化为微晶相存在于微晶玻璃中,不参与相变反应的重金属离子可嵌入晶体的晶格结构中,被固化到玻璃基质中。Pb 的浸出率逐渐增加,可能是 Pb 的蒸气压大于 Zn、Mn 等重金属,在熔化过程中更容易挥发,使残余铅在熔体表面富集,削弱了固化效果。

利用铅锌尾矿制备微晶玻璃是铅锌尾矿高值化消纳的重要途径之一,但微晶玻璃对于原料成分的要求较为严格,因此在微晶玻璃生产过程中铅锌尾矿的配入量较为有限。

### 3 结语

1) 铅锌尾矿既是带来安全和环境问题的固体废弃物,也是具有宝贵利用价值的矿产资源。根据铅锌尾矿的基础特性选取恰当的方式进行综合利用,不仅可以消除尾矿堆存带来的风险,还可以获得显著的经济效益。

2) 对铅锌尾矿中残余的有价值组分进行再选可以有效提高矿产资源的利用效率,进一步提升经济效益,但二次回收后依旧会产生较高比例的尾矿,因此有价值组分回收往往作为铅锌尾矿综合利用的第一步,需要协同其他利用方式进行尾矿消纳。

3) 利用铅锌尾矿充填矿山采空区是铅锌尾矿综合利用的重要方式,这种途径成本较低,尾矿消纳量大,且对尾矿的理化性质和原料稳定性的要求较低,具有较好的普适性,但经济价值有限。

4) 利用铅锌尾矿制备建材是铅锌尾矿增值化综合利用的重要方式,可以带来更高的利用价值和经济效益,符合环境保护和经济发展的双重要求。但建材化应用往往对于尾矿的理化特性提出了更高的要求,这也限制了铅锌尾矿的掺量。

#### 参 考 文 献

[1] 顾亚,王建平,王修,等.我国铅资源开发现状和可持续发展建议[J].资源与产业,2018,20(1):39-46.  
GU Ya, WANG Jianping, WANG Xiu, et al. Situation and sustainable development proposals for lead resource development in China [J]. Resources & Industries, 2018, 20(1):39-46.

[2] 韦岩松,李海风,冯琼慧,等.广西某铅锌尾矿库区土壤中重金属 Cd、Pb、Zn、Cu 的分布特征及源解析[J].有色金属(矿山部分),2023,75(4):172-178,185.

WEI Yansong, LI Haifeng, FENG Qionghui, et al. Soil pollutant distribution and source analysis for Cd, Pb, Zn and Cu in a lead-zinc tailings area of Gungxi [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(4):172-178.

[3] 张谦,文书明,丰奇成,等.某难处理铜铅锌混合矿浮选试验及机理分析[J].有色金属工程,2022,12(8):108-118.  
ZHANG Qian, WEN Shuming, FENG Qicheng, et al. Flotation experiments of mixed ore of copper-lead-zinc and the mechanisms analysis [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(8):108-118.

[4] 雷力,周兴龙,文书明,等.我国铅锌矿资源特点及开发利用现状[J].矿业快报,2007(9):1-4.  
LEI Li, ZHOU Xinglong, WEN Shuming, et al. Characteristics and present situation of development and utilization of lead and zinc mineral resources in China [J]. Express Information of Mining Industry, 2007(9):1-4.

[5] 江少卿,徐毅,孙尚信,等.全球铅锌矿资源分布[J].地质与资源,2020,29(3):224-232.  
JIANG Shaoqing, XU Yi, SUN Shangxin, et al. Global distribution of lead-zinc resources [J]. Geology and Resources, 2020, 29(3):224-232.

[6] 刘晓,张宇,王楠,等.我国铅锌矿资源现状及其发展对策研究[J].中国矿业,2015,24(增刊1):6-9.  
LIU Xiao, ZHANG Yu, WANG Nan, et al. Pb-Zn metal resources situation and suggestion for Pb-Zn metals industry development in China [J]. China Mining Magazine, 2015, 24(Suppl. 1):6-9.

[7] 陈喜峰,彭润民.中国铅锌矿资源形势及可持续发展对策[J].有色金属,2008,60(3):129-132.  
CHEN Xifeng, PENG Runmin. Pb-Zn metal resources condition and strategy for Pb-Zn metals industry sustainable in China [J]. Nonferrous Metals, 2008, 60(3):129-132.

[8] 阎赞,王想,徐名特,等.尾矿资源化研究在铅锌尾矿中的应用[J].矿产综合利用,2017(1):1-5.  
YAN Zan, WANG Xiang, XU Mingte, et al. Utilization situation and development trend of lead and zinc tailing resources [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(1):1-5.

[9] 万慧茹.我国典型铅锌选矿企业尾矿产生及综合利用分析[J].环境保护与循环经济,2012,32(9):40-43.  
WAN Huiru. Analysis of production and comprehensive utilization of tailings in typical lead-zinc mineral processing enterprises in China [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2012, 32(9):40-43.

[10] ASADI T, AZIZI A, LEE J, et al. Leaching of zinc from a lead-zinc flotation tailing sample using ferric sulphate and sulfuric acid media [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5(5):4769-4775.

[11] LEI C, YAN B, CHEN T, et al. Recovery of metals from the roasted lead-zinc tailings by magnetizing roasting followed by magnetic separation [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 158:73-80.

[12] 陈帮金,赵晨阳,瞿广飞,等.含重金属尾矿资源化利用研究进展[J].有色金属(矿山部分),2022,74(2):116-125.  
CHEN Bangjin, ZHAO Chenyang, QU Guangfei, et al.

- Research progress on resource utilization of heavy metal tailings[J]. *Nonferrous Metals(Mining Section)*, 2022, 74(2): 116-125.
- [13] 翟旭东. 某铅锌尾矿回收氧化锌选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(3): 110-115.  
ZHAI Xudong. Experimental research on recovery of zinc oxide from a lead-zinc tailings[J]. *Nonferrous Metals (Processing Section)*, 2023(3): 110-115.
- [14] 叶岳华, 王立刚, 陈旭波, 等. 云南某铅锌尾矿中金银硫的综合回收[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(4): 83-87.  
YE Yuehua, WANG Ligang, CHEN Xubo, et al. Comprehensive recovery of gold, silver and sulfur from a lead-zinc tailings in Yunnan[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(4): 83-87.
- [15] 施士虎, 李浩宇, 陈慧泉. 矿山充填技术的创新与发展[J]. 中国矿山工程, 2010, 39(5): 10-13, 19.  
SHI Shihu, LI Haoyu, CHEN Huiquan. Development and innovation of mine backfilling technology [J]. *China Mine Engineering*, 2010, 39(5): 10-13, 19.
- [16] 赵泽民. 铅锌尾矿充填体的设计制备与应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.  
ZHAO Zemin. Research on design and application of lead-zinc tailings[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [17] 张丹. 基于铅锌尾矿/铅锌冶金渣制备矿山采空区充填材料的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.  
ZHANG Dan. Study on the mechanism of synergistic activation of lead and zinc tailing/metallurgical slag and the preparation of filling material for mine goaf[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [18] 祁仲舒, 刘明亮. 铅锌尾矿配料对水泥熟料易烧性影响的研究[J]. 水泥工程, 2019(3): 8-10, 27.  
QI Zhongshu, LIU Mingliang. Study on the influence of lead-zinc tailings on the burnability of cement clinker[J]. *Cement Engineering*, 2019(3): 8-10, 27.
- [19] 肖祈春. 铅锌尾矿制备水泥熟料及其重金属固化特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.  
XIAO Qichun. Study on the solidification of heavy metal and the production of cement clinker by lead-zinc tailings [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [20] 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 Shenghui, LIU Rongjin, CHEN Ping, 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.
- [21] 李炳良, 吴秋生, 于智军. 高性能铅锌尾矿活性激发剂的研究[J]. 广东建材, 2017, 33(2): 30-32.  
LI Bingliang, WU Qiusheng, YU Zhijun. Study on high performance activator of lead and zinc tailings[J]. *Guangdong Building Materials*, 2017, 33(2): 30-32.
- [22] 高锦城, 倪文, 于森, 等. 以铅锌尾矿为原料煅烧水泥熟料[J]. 金属矿山, 2017, 46(3): 192-196.  
GAO Jincheng, NI Wen, YU Miao, et al. Study on high performance activator of lead and zinc tailings[J]. *Metal Mine*, 2017, 46(3): 192-196.
- [23] LIU T, TANG Y, HAN L, et al. Recycling of harmful waste lead-zinc mine tailings and fly ash for preparation of inorganic porous ceramics [J]. *Ceramics International*, 2016, 43(6): 4910-4918.
- [24] 刘娥, 贺晓梅, 卢庆阳. 利用凤县原料生产发泡陶瓷保温板的研究[J]. 陶瓷, 2017(7): 21-25.  
LIU E, HE Xiaomei, LU Qingyang. Study on the production of foamed ceramic insulation board from Fengxian raw materials[J]. *Ceramics*, 2017(7): 21-25.
- [25] 区雪连. 重金属尾矿与陶瓷浆制备发泡陶瓷的工艺研究[J]. 陶瓷, 2018(9): 17-22.  
QU Xuelian. Research on porosity ceramics prepared from ceramic slurry and heavy metal tailings[J]. *Ceramics*, 2018(9): 17-22.
- [26] LIU T Y, LI X Y, GUAN L M, et al. Low-cost and environment-friendly ceramic foams made from lead-zinc mine tailings and red mud: foaming mechanism, physical, mechanical and chemical properties [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(1): 1733-1739.
- [27] 王志瑞, 曾程, 周顺, 等. 安顺市某铅锌尾矿烧结砖研究[J]. 绿色科技, 2015(3): 225-226.  
WANG Zhirui, ZENG Cheng, ZHOU Shun, et al. Research on fired bricks by using lead-zinc mine tailings in Anshun city[J]. *Journal of Green Science Technology*, 2015(3): 225-226.
- [28] 周龙, 周素莲, 马华菊. 铅锌尾矿免蒸免烧砖的制备及性能[J]. 矿产综合利用, 2022(3): 12-16.  
ZHOU Long, ZHOU Sulian, MA Huaju. Study on the preparation and performance of lead-zinc mine steam-free and burn-free brick [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(3): 12-16.
- [29] 李冲, 许亚丽, 于岩, 等. 铅锌尾矿免烧吸附砖的制备与研究[J]. 材料科学与工艺, 2016, 24(4): 46-51.  
LI Chong, XU Yali, YU Yan, et al. The preparation and research of unburned and absorptive bricks of Pb-Zn mine tailings[J]. *Materials Science & Technology*, 2016, 24(4): 46-51.
- [30] 郭艳平, 钟高辉, 区雪连, 等. 利用铅锌尾矿和CRT玻璃固体废弃物协同制备微晶玻璃工艺[J]. 再生资源与循环经济, 2014, 7(5): 30-34.  
GUO Yanping, ZHONG Gaohui, QU Xuelian, et al. Preparation of the glass-ceramics by using lead-zinc tailings and cathode ray tube glass solid wastes[J]. *Renewable Resources and Circular Economy*, 2014, 7(5): 30-34.
- [31] 钟高辉, 郭艳平, 区雪连, 等. CaO/SiO<sub>2</sub>质量比对铅锌尾矿微晶玻璃结构和性能的影响[J]. 中国陶瓷, 2014, 50(12): 71-74.  
ZHONG Gaohui, GUO Yanping, QU Xuelian, et al. The impacts of CaO/SiO<sub>2</sub> mass ratio in the structure and performance of glass-ceramics made in lead-zinc tailings[J]. *Chinese Ceramic*, 2014, 50(12): 71-74.
- [32] 石戈. 钙硅比对铅锌尾矿微晶玻璃性能及重金属浸出毒性的影响[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(3): 147-153.  
SHI Ge. The effect of CaO/SiO<sub>2</sub> ratio on the glass-ceramics properties and heavy metal leaching ability of lead-zinc tailings[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(3): 147-153.