# 有色金属矿山尾矿综合利用进展

敖顺福

云南驰宏锌锗股份有限公司,云南 曲靖 655011

**中图分类号**:X758 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-0076(2021)03-0094-10
DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.03.014

**摘要** 有色金属矿山尾矿的大量排放堆存占用土地,造成矿产资源的浪费,以及存在直接或潜在的安全隐患和环境危害。通过有色金属矿山尾矿综合利用的研究现状总结,阐述了有色金属矿山尾矿以下利用现状:再选回收有价金属及非金属矿物;在环保领域用作吸附剂、中和剂及滤料;用作原料或辅料制备地聚物、分子筛、白炭黑及硅微粉;用于制砖、水泥、混凝土、陶瓷及玻璃;用作土壤改良剂和制备化肥;用于井下充填材料。并分析论述了综合利用中存在的问题与困境,指出需持续不断的加大科研投入,对已有的综合利用技术进行创新以降低成本、技术难度及简化工艺,且探索新的利用途径以扩大尾矿的使用范围、消纳量及提高附加值。

**关键词** 有色金属;尾矿;综合利用;减量化

有色金属是国民经济发展的基础材料,广泛应用于航空航天、机械制造、电力工程、交通运输、电子信息及国防军工等行业,加速有色金属矿产资源的开发利用对促进国民经济的可持续发展具有重要意义。但有色金属矿普遍有用矿物含量低、嵌布粒度细,在选矿过程中排弃的尾矿成为了矿山主要固体废弃物之一,因其粒度细、残留选矿药剂及含重金属等,大量的尾矿在地面筑坝堆存,对环境造成了严重危害;然而,随着经济的快速发展,矿产品的需求量与日俱增,但矿产资源经历多年的开采,矿石品位下降,甚至部分矿石资源正逐步枯竭,使得尾矿作为二次资源进行综合利用愈发重要[1]。因此,有色金属矿山尾矿具有环境属性、资源属性及经济属性,合理利用可以创造新的价值,不合理处置会引发安全事故,造成环境污染事件,开展尾矿的综合利用成为了有色金属矿山可持续发展的必然选择。

## 1 有色金属矿山尾矿的危害

经济发展对矿产品的需求不断增加,矿产资源开发规模与日俱增,选矿过程中排弃的尾矿量不断增长,且排入尾矿库中进行堆存,不仅占用大量的土地资源,覆盖当地原有的植被,使周围的生态环境被破坏,还造成矿产资源的浪费,以及存在直接或潜在的安全隐患和环境危害。

### 1.1 资源浪费

尾矿并非只是选矿排出的废弃物,尾矿中仍含有大量有价组分,而我国有色金属矿产资源以含有多种共伴生组分的贫矿为主,虽然开发利用较早,但选矿技术和选矿设备的起步发展相对较晚,使得大量有价组分未得到充分选别回收利用而损失到尾矿中。

云南个旧地区遗留有锡尾矿1.9亿t以上,尾矿中含有锡、铁、硫、铅、锌及铜等有价组分,其中仅锡金属约39万t以上,有价组分的价值上千亿元[2]。甘肃金川铜镍矿自1963年投产以来,堆存尾矿总量超过1.2亿t,尾矿中约含镍0.22%、铜0.20%及铁10.75%等,尾矿中有价金属造成巨大的经济损失[3]。拉拉铜矿自1958年建成投产以来,到目前共储集尾矿超过2000万t,针对其中Ⅱ号尾矿库的典型尾矿研究得出,尾矿中铜的品位为0.04%,铜主要富集在黄铜矿和斑铜矿中,钴和镍的含量分别为0.005 9%和0.002 4%,稀土总量为0.11%,金含量为0.16g/t,银含量7.11

**收稿日期**:2021-03-18
**作者简介**:敖顺福(1982-),男,高级工程师,主要从事选矿技术、矿产资源综合利用及清洁生产的研究及管理工作。Email:aoshunfu1982@126.com。

g/t,钾的载体矿物云母类矿物含量 14.75%[4]。

### 1.2　安全隐患

有色金属矿山选矿排放的尾矿粒度细,细粒尾矿具有难沉降、固结速度慢、透水性差及抗剪切强度低等特点,尾矿库为具有高势能的人造泥石流危险源,尾矿库的运行维护不力易形成重大的安全隐患,从而引发生产安全事故,造成重大的人员伤亡及经济财产损失等。如 2020 年广西南丹县大厂镇鸿图选矿厂尾矿库发生重大垮坝事故,2017 年大冶有色金属公司铜绿山铜铁矿尾砂库西北角发生局部溃坝事故,都造成多人死亡,并蒙受巨大的经济损失。

### 1.3　环境危害

#### 1.3.1　环境污染

有色金属矿山尾矿对环境的危害主要来源于残留的选矿药剂和矿石中的重金属元素的叠加污染,而有色金属矿绝大多数为硫化矿,在堆存中产生的酸性污水会使污染进一步加重。此外,由于尾矿颗粒细、质量小,在风力作用下造成扬尘污染,扬尘污染过程往往伴随着选矿药剂和重金属污染,甚至放射性元素污染等;而重金属污染具有长期性、累积性、不可逆性及不易治理的特点,其危害甚大。

夏毅民等[5]对铜陵某矿区尾矿库周边土壤重金属污染进行研究,得出尾矿库周边土壤整体呈弱酸性,pH 值为 5.2 ~ 6.1,土壤中镉、砷、锌及汞严重超标,分别为《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)风险筛选值的 6.3、3.7、1.8及 1.5 倍,已对周边环境造成重度污染。宋国策等[6]对内蒙古新巴尔虎右旗多金属矿区扬尘风积物污染范围变化进行遥感监测,研究得出尾矿库、废石堆等易于产生扬尘,对周边草场产生污染,2000—2018 年期间区内扬尘风积物污染面积由 38.052 $hm^2$ 增加至 190.566 $hm^2$,矿区粉尘对周围环境影响方式包括土壤重金属含量提高和植被叶片上覆盖有扬尘,以及受污染植被叶片产生病变。

#### 1.3.2　突发环境事件

有色金属矿山尾矿库发生溃坝、洪水漫顶、排洪溢洪设施损坏等,冲泄出的尾矿及尾矿水数量巨大、迁移扩散速度快,拦截除污困难,易引起区域性的污染,甚至跨界流域的污染事件。

2015 年 11 月 23 日,甘肃陇星锑业有限责任公司尾矿库泄漏约 2.5 万 $m^3$ 的含锑尾矿及尾矿水,造成直接经济损失 6 120.79 万元,约 346 km 河道受污染,10.8万余人供水受影响。2020 年 3 月 28 日,伊春鹿鸣矿业有限公司钼矿尾矿库 4 号溢流井发生倾斜,导致伴有尾矿砂的污水达 253 万 $m^3$,进入松花江二级支流依吉密河,引起下游钼、化学需氧量及石油类项目超出标准限值,造成环境污染事件。

## 2　有色金属矿山尾矿的综合利用

### 2.1　尾矿有价组分的再选回收

选矿生产技术的不断进步和发展表明,受限于过去选矿工艺技术及设备水平,或当时矿产资源中有价组分的价值影响,致使部分有价组分未得到充分的选别回收损失在尾矿中,随着选矿工艺技术的进步、选矿设备的创新及选矿新药剂的研发等,使尾矿再选不断地由可能性成为现实性,并再选回收有价金属及非金属矿物。

#### 2.1.1　有价金属的选别回收

尾矿作为选矿排出的废弃物,不仅仍然含有色金属矿物,而且在尾矿中或有黑色金属、贵金属及稀散金属等矿物得到了富集,加强有色金属矿山尾矿中有价金属的再选回收一直是研究的重点,且在尾矿再选回收铅、锌、铜、钼、铁、金及银等有价金属均取得了突破。

铅锌作为我国的优势矿产资源,但随着高强度的开采利用,国内勘查新增及保有储量不足,从尾矿中回收铅锌金属,可以减少铅锌资源的损失和降低环境污染,并延缓铅锌资源的消耗速度。郭杰等[7]使用自吸式充气浮选柱从福建某铅锌选矿厂含锌 1.8% 的浮选尾矿中回收闪锌矿进行试验研究,半工业试验中,取得了锌精矿品位 9% ~ 14% 的指标。董宗良等[8]以某铅锌选矿厂硫化铅锌矿选别后的尾矿作为试验对象,开发出新型氧化矿高效捕收剂 CA - 1,辅以戊基黄药配合使用,并使用硅酸钠和六偏磷酸钠为组合抑制剂,闭路试验获得锌品位 32.13%,回收率 78.76% 的氧化锌精矿。高腾跃等[9]针对某铅锌浮选尾矿,采用“尾矿再磨—铅锌混合浮选—活化选锌”的工艺,在磨矿细度 - 74 μm占 82% 的条件下,以乙硫氮和丁基黄药为铅锌混合浮选捕收剂,锌浮选采用硫化钠和硫酸铜活化,以丁基黄药和异戊基黄药为捕收剂,开路试验所得铅锌混合精矿中铅、锌的回收率分别为 36.4% 和18.0%,锌粗精矿中锌的回收率达到 57.6%。

铜在国民经济建设中起重要作用,但我国的铜供应远小于铜需求,主要依靠进口来弥补缺口,加强尾矿再选回收铜可降低对外贸易的依靠。陈靖等[10]针对湖北某含铜 0.058%、含铁 15.85% 的铜铁矿尾矿,采用“浮选回收铜矿物—浮选尾矿经再磨—磁选回收铁

矿物”的流程获得了铜品位 2.636%、回收率 75% 的铜精矿和铁品位 39.80%、回收率 50.97% 的铁精矿。Xie 等[11]采用浸出法从低品位镍铜硫化尾矿中回收镍、铜及钴,试验研究发现,硫酸和硝酸的混合酸在常温常压的条件下适于尾矿浸出,镍、铜及钴的浸出率分别高达 91.5%、85.0% 及 54.6%。

我国曾是锡资源的主要供应国,但随着锡矿资源优势的逐渐丧失,已逐渐转变为了锡资源进口国,加强尾矿锡资源的再选回收显得愈发重要。祁忠旭等[12]针对某铜锌硫化矿浮选尾矿中所含锡石,采用重选—浮选联合工艺,通过分级重选得到了锡品位 20.64%,锡回收率 60.05% 的锡精矿,对重选中矿与极细粒级的尾矿通过物理化学联合脱泥浮选得到了锡品位 1.39%、锡回收率 5.36% 的锡富中矿,重浮联合工艺最终回收了尾矿中 65.41% 的锡。肖日鹏等[13]针对蒙自矿冶白牛厂选矿厂生产抛弃尾矿中的锡石粒度较细,主要集中在 -45 μm 粒级,仅以单一的摇床回收该粒度的低品位锡石已无太多的提升空间,采用悬振锥面选矿机进行再选,改造后整个选矿厂的锡金属回收率提高了 8 ~ 10 个百分点。Sleinias[14]针对印度哈里亚耶邦托沙姆矿区某脉锡矿的重选尾矿,采用烷基磷酸酯 - 硅氟化钠 - 工业级硫酸和柠檬酸的浮选药剂制度,获得了含锡 7%、回收率 55% 的锡精矿。

钼是我国传统的优势矿产资源,也是一种重要的战略金属,应尽可能的提升选矿回收利用水平。秦华江等[15]针对陕西某钼选矿厂精选尾矿中难选微细粒辉钼矿不能充分回收和利用的问题,使用旋流 - 静态微泡浮选柱对细粒难选辉钼矿进行分选,能够生产出钼品位为 31.096%、回收率为 62.71% 的钼精矿产品。邵伟华等[16]针对河南某库存钼尾矿,采用弱磁选除铁—非磁性物脱泥浓缩后,以碳酸钠为调整剂、水玻璃为抑制剂、W - 189 为捕收剂,采用 1 次粗选 1 次精选 3 次扫选流程浮选获得了钼品位为 0.86%、$WO_3$ 含量为 1.21% 的钨钼混合粗精矿,钨钼混合粗精矿浓缩加温调浆后经 1 次粗选 3 次精选 2 次扫选流程精选,获得了钼品位为 12.78%、回收率为 54.94% 和 $WO_3$ 品位为 21.96%、回收率为 72.45% 的钨钼混合精矿。

我国铁矿资源丰富,但铁矿石品质差,资源消耗快,铁矿石的进口规模持续增长,加强尾矿再选回收铁,对提高铁矿资源的安全保障具有重要作用。邵爽等[17]进行了从选铜尾矿中选择性还原回收铁的研究,研究得出还原焙烧最佳工艺条件为还原温度1 200 ℃,还原剂褐煤用量为铜尾矿质量 25%,还原时间为 2 h,活化剂氯化钙用量为原料质量 5%,还原焙烧磁选精矿中铁品位超过 90%,铁回收率大于 95%。张国旺等[18]为开发利用某铜尾矿中的磁性铁,采用立式螺旋搅拌磨机进行选矿厂改造,获得的粗精矿经磨矿分级后到 -0.045 mm 粒级占 90%,最后经两段磁选机选别后获得品位为 60% 以上的铁精矿,且总回收率达到 80% 以上,精矿产量达到 120 t/d。何建成等[19]针对金堆城某选矿厂钼尾矿选铁再磨作业中球磨机细磨能力不足的缺陷,提出利用 KWM 卧式搅拌磨机替代传动球磨机的改造方案,改造后设备装机功率降低了 14.8 个百分点,大量节省了占地面积,功率密度提高约 35 倍,产品新增 -23 μm 粒级产率 5.69 个百分点,铁精矿品位提高了 0.74 个百分点。

有色金属矿产资源中伴生的金和银矿物一直是贵金属金和银资源的重要来源,近年来有着很多关于尾矿再选回收金和银的研究。叶岳华等[20]针对云南某铅锌矿浮选尾矿,采用“铅锌混合浮选—尾矿选硫”的原则工艺流程,采用乙硫氮与 BK - N 组合用药,加强金和银的捕收,试验室闭路试验获得铅锌混合精矿铅品位 15.62%,锌品位 38.55%,含金 15.83 g/t,含银 2 268.57 g/t,铅、锌、金和银回收率分别为 28.03%、53.69%、7.63% 和 18.47%;硫浮选采用硫酸作为活化剂,丁黄药作为捕收剂,BK202 作为起泡剂,获得硫精矿硫品位 48.77%,硫回收率 89.70%。李辉等[21]针对刚果(金)某复杂低品位难处理铜尾矿,采用“选—冶联合工艺湿法浸出—浸出渣浮选”的工艺,在硫酸用量 80 kg/t 矿、熟化时间 15 ~ 24 h、液固体积质量比 3/1、常温下浸出 90 min、机械搅拌速度 260 r/min 条件下,尾矿中铜浸出率为 68.10%,氧化铜浸出率为 98.11%,钴浸出率 53.32%;浸出渣经浮选,获得精矿铜品位 26.35%,钴品位 3.74%,金品位 5.87 g/t;铜、钴和金回收率分别为 74.64%、59.88% 和 45.05%。

### 2.1.2 有价非金属的选别回收

不同类型的有色金属矿山尾矿的特性存在着较大差异,但绝大部分矿物均为非金属矿物,再选回收利用非金属有用组分相较于回收有价金属更有利于尾矿的减量化,并同样具有经济效益和社会效益,使得有色金属矿山尾矿再选回收有价非金属矿物成为了研究的热点,且研究主要集中在长石、重晶石、金红石及云母等有价非金属矿物。

长石是硅氧四面体架状构造的钾、钠、钙铝硅酸盐矿物,富含钾或钠的长石应用广泛,由于我国优质长石资源的日益减少,对尾矿中的长石资源的再选回收利用非常迫切。王国标[22]针对某铜钼矿尾矿中的长石,采用反浮选云母—反浮选石英—长石粗精矿磁选除铁,获得了 $K_2O$ 品位为 7.48%、总回收率为 39.89%,$Na_2O$ 品位为 3.91%、总回收率为 43.78%,铁含量为 0.70% 的长石精矿。王长拼等[23]针对某钼尾矿中的

长石,通过脱泥—磁选去除铁磁性矿物—浮选去除碳酸盐矿物的回收工艺流程,获得了产率为 34.46% 的长石和石英混合精矿,其中 $K_2O$ 与 $Na_2O$ 的总含量达到 8.39%。

重晶石作为最重要的钡产品原料,随着其深加工技术的发展具有十分广阔的应用前景,将重晶石从尾矿中有效回收,可使这部分资源得到有效利用。王玉婷等[24]针对平水铜矿尾矿中的重晶石,分级后将 +0.074 mm 粒级作为尾矿丢弃,-0.074 mm 采用浮选回收重晶石,并选择十二烷基硫酸钠作为捕收剂,水玻璃作为抑制剂,最终试验获得了 $BaSO_4$ 品位 91.68%、回收率 80.43% 的重晶石精矿。肖骏等[25]针对广西盘龙铅锌矿浮选尾矿中的重晶石,采用螺旋溜槽脱泥—脱硫浮选—再磨—重晶石浮选的选别流程,获得了 $BaSO_4$ 品位 96.89%、回收率 67.52% 的重晶石精矿。

金红石是钛的氧化物,虽然我国钛资源丰富,但天然金红石较少,且主要依靠进口,加强尾矿中金红石的选矿回收可充分利用我国金红石资源。王允火[26]针对某铜钼尾矿中的金红石,在不磨矿的情况下,采用 2 次粗选 1 次扫选 4 次精选、扫选精矿与精选 1 尾矿合并精选后返回、其它中矿顺序返回的浮选流程对金红石进行了选矿试验,最终获得了 $TiO_2$ 品位 64.59%、回收率 77.25% 的金红石精矿。周源等[27]对某铜尾矿中金红石,采用筛分分级和离心选矿机分选获得重选粗精矿,再经 1 次粗选 2 次扫选 4 次精选、中矿顺序返回的闭路浮选流程选别,获得 $TiO_2$ 品位 68.28%,对原尾矿回收率 6.88% 的金红石精矿。

云母是一种性能独特的层状铝硅酸盐矿物,具有重要的工业应用价值,尾矿再选回收云母可扩宽云母产品的来源。田信普等[28]针对德兴铜矿尾矿中的绢云母,采用重选方式分离出二级品绢云母精矿,再采用浮选选别得到 $Al_2O_3$ 含量为 28.08% 的一级品绢云母精矿及 $Al_2O_3$ 含量为 22.96% 的二级品绢云母精矿。肖福渐[29]针对某铅锌矿的绢云母,采用高选择性的 3ACH 捕收剂、F1 抑制剂,经浮选回收得到 $Al_2O_3$ 含量为30.07% 一级品绢云母精矿及 $Al_2O_3$ 含量为 20.77% 二级品绢云母精矿。

## 2.2　尾矿用作水处理药剂与材料

有色金属矿山尾矿性质复杂、有价组分含量低、矿物的嵌布粒度细且共生关系复杂,造成尾矿的选别回收率低、精矿质量不高、选矿药剂消耗大,导致再选生产成本高、经济效益低,甚至部分尾矿仍未研发出适用的再选回收工艺,因此有色金属矿山尾矿再选生产应用相对较少;然而即使有色金属矿山尾矿中的有价组分得到了二次选别回收,但由于有价组分含量低,仍然还有大量再选产生的尾矿需要排出,其堆存产生的问题仍不能得到解决。针对有色金属矿山尾矿具有多样性、多用性及来源广泛,且价格低廉,将其直接、改性或加工后应用于环保领域,用作吸附剂、中和剂及滤料等,可实现化废为利、以废治废及资源综合利用,近年来成为了研究与发展的新领域。

### 2.2.1　尾矿用作吸附剂

吸附法处理废水具有去污效率高、应用广泛的特点,但由于吸附剂成本高,吸附法处理废水多用在深度处理;针对具有吸附、络合、交换等性能的有色金属矿山尾矿,将其作为吸附剂应用于废水处理,可降低废水处理成本。

刘倩等[30]进行了钼尾矿对 Cr(Ⅵ)吸附性能的研究,得出对 Cr(Ⅵ)初始浓度 40 mg/L 的废水,在尾矿粒度为 -0.125 mm、尾矿量为 12 g、吸附 27 h 的条件下,钼尾矿对 Cr(Ⅵ)的吸附容量可高达 3.22 mg/g,Cr(Ⅵ)离子去除率可达到最高 90% 以上,吸附热力学和吸附动力学试验得出钼尾矿吸附 Cr(Ⅵ)方式以化学吸附为主。邓春华[31]进行了用铝土矿正浮选尾矿处理含 Pb(Ⅱ)废水的试验研究,得出对含 Pb(Ⅱ)40 mg/L 的废水,尾矿用量为 5 g/L,处理时间为 1 h,在 pH > 6.2 的条件下,Pb(Ⅱ)去除率接近 100%,溶液化学计算分析表明,Pb(Ⅱ)与尾矿中铝硅酸盐矿物表面的羟基基团可能发生络合反应。兰叶等[32]进行了用改性铝土矿浮选尾矿处理含 Cr(Ⅵ)废水的试验研究,以铝土矿尾矿为原料,氯化铁为改性剂,制得改性尾矿,用其吸附高浓度含 Cr(Ⅵ)溶液,试验表明,在环境温度为 30 ℃、改性尾矿投加量为 0.2 g/mL、pH 值为 3.52 条件下,对 Cr(Ⅵ)含量为 150 mg/L 的溶液 Cr(Ⅵ)去除率可达到 90.9%。孔荔玺等[33]进行了铜尾矿吸附模拟废水中磷的研究,研究得出未经活化,简单磨细的原尾矿对溶液中的磷具有明显的吸附能力,而经过热焙烧的原尾矿得到了有效活化,吸附能力更强,最大吸附率从 83.5% 提高到 96.5%。戴琦等[34]进行了铅锌矿尾矿吸附水溶液中碱性品绿的研究,研究结果表明,pH 值对铅锌矿尾矿吸附水溶液中碱性品绿有显著影响,强酸性条件不利于吸附,当溶液 pH 7.0 时去除率达到最大,为 97.55%,当 pH 值大于 7.0 时去除率趋于平衡。

### 2.2.2　尾矿用作中和剂

酸性废水对生态环境的危害极大,中和法是目前最为常用的酸性废水处理方法,石灰石、白云石、方解石和大理石等是尾矿中最常见的碱性脉石矿物,将含

有碱性脉石矿物的有色金属矿山尾矿用作中和剂已得到了成熟应用。

蔡创开等[35]利用碱性尾矿中和某加压氧化厂酸性废液,以含有 30% ~40% 碳酸盐的尾矿替代原有两段中和的石灰石,生产技改应用后,浮选尾矿以 1 200 kg/t 金精矿的量加入一段中和,二段仍用石灰乳,不影响原有的除杂效果和工艺流程,但整体中和成本降低了 57.5 元/t 金精矿,年节支 700 多万元,使尾矿得到了有效利用。张楠等[36]利用富含碳酸盐的铜陵相思谷尾矿进行了处理酸性矿山排水的试验研究,研究得出铜陵相思谷尾矿砂对模拟酸性矿山排水具有长期的持续处理能力,酸主要通过与碳酸盐(尤其是方解石)和硅酸盐(少量长石)反应而被中和,铜和锌离子主要通过铁氢氧化物的吸持和形成碳酸盐沉淀方式被固定。

### 2.2.3 尾矿用作滤料

滤料是一类广泛用于水处理的净水材料,机械强度高、性能稳定的尾矿均可以用作滤料,用于机械截留水中的悬浮颗粒物等,尾矿改性或加工后的滤料则应用更为广泛。

汪顺才等[37]公开了一种硫化铅锌矿浮选尾矿生物陶粒滤料及其制备方法,采用硫化铅锌矿浮选尾矿,辅以黏土、造孔剂及黏结剂,经干燥、混料、成型、烘干、预热、焙烧及冷却工艺制得硫化铅锌矿浮选尾矿生物陶粒滤料成品。余黎明等[38]研究了镁橄榄石尾矿滤料在 BAF 中的挂膜启动,以镁橄榄石尾矿为原料制备一种新型生物滤料,将其用于上向流曝气生物滤池处理生活污水,研究得出镁橄榄石尾矿滤料对 COD、$BOD_5$、$NH_3$ - N 以及 TN 的去除率分别达到了 80%、70%、90% 和 50% 以上。

### 2.2.4 其它

絮凝剂具有显著的净化处理效能,在水处理领域应用广泛,其中聚合氯化铝(PAC)是最为重要的无机高分子絮凝剂之一。刘三军等[39]用铝土矿选矿尾矿,在 750 ℃下焙烧 1.0 h,然后用 20% 盐酸在 85 ℃下溶解 2 h,铝溶出率为 90.12%,溶出的铝在适宜条件下聚合获得聚合氯化铝(PAC),并用所制备 PAC 处理钢铁厂污水,在 PAC 用量为 0.5 mL/L 条件下,污水浊度去除率可达 90.46%,净化效果较好。陶粒具有密度小、内部多孔,且具有一定强度,在水处理中常用作吸附剂、滤料。汪顺才等[40]以铅锌矿浮选尾矿为原料,水玻璃和木质素作为添加剂,通过高温焙烧,制备水处理陶粒,并用其对选矿废水进行了吸附处理试验研究,COD 去除率达到了 88.21%。

## 2.3 尾矿用作制备新材料

有色金属矿山尾矿在环保领域的应用具有来源固定、成本低等优点,但存在普适性低及重复利用率低的弊端,且用于废水处理后的尾矿再利用困难,并极可能成为一种新的难处理固体废物。随着矿物深加工技术的发展,针对有色金属矿山尾矿中部分元素、组分或矿物特性等,将有色金属矿山尾矿用作制备地聚物、分子筛、白炭黑及硅微粉等的原料或辅料,可生产高附加值产品。

李北星等[41]研究得出,原状铅锌尾矿可用于制备地聚合物,在适量矿粉的激发下,当碱含量为 9%、养护温度为 50 ℃、水玻璃模数为 1.0 时,制备的地聚物试样强度最高。张鹏举等[42]以有色金属锡矿尾矿为原料,经酸浸和高温碱融活化作为硅源和铝源,通过乙醇导向法,可以合成出高结晶度、具有规整八面体外形及良好热稳定性能的 ZSM - 5 分子筛产物。陈明日等[43]以钼尾矿为硅源,采用除铁碱浸工艺制备水玻璃,并通过化学沉淀法制备了纳米级白炭黑,所制备的白炭黑平均粒径小于 200 nm,比表面积为 203 ~ 254 $m^2/g$,孔容积为 0.23 ~ 0.81 $cm^3/g$。李峰等[44]以钼尾矿为原料,采用酸溶—碳酸钾沉淀法制备硅微粉,在钼尾矿粒径小于 74 μm、反应温度 50 ℃、反应时间 60 min 及 $K_2CO_3$ 质量分数 50% 的工艺条件下,$SiO_2$ 产率可达 98.92%,产品硅微粉的 $SiO_2$ 质量分数达 98.44%,粒径为 100 ~ 200 nm,超过《不定型耐火材料用二氧化硅微粉》(YB/T 115—2004)中 SF96 指标($SiO_2$ 质量分数 ≥96.0%)的要求。孙毅等[45]利用废弃铅锌尾矿制备出了能够去除甲醛的高附加值尾矿/$TiO_2$ 复合光催化剂,与纯的 $TiO_2$ 相比,复合光催化剂在可见光区出现了新的吸收,可见光下甲醛降解性能得到明显增强,其中尾矿与 $TiO_2$ 质量比为 5/1 的复合光催化剂活性最高,在白光 LED 光辐照 20 min 后甲醛降解率达到 44.4%。李二伟等[46]进行了河南夜长坪钨钼尾矿制备橡胶填料的研究,研究得出通过硅烷偶联剂 KH550 改性,在改性的尾矿粉体用量为 50 份时,丁苯橡胶的拉伸强度、扯断伸长率、断裂力达到最大,分别为 13.96 MPa、541.68% 和 167.52 N,与白炭黑的补强效果相当。霍成立等[47]研究了铝土矿选矿尾矿作为填料在 PVC 制品中的应用技术,研究得出铝土矿选矿尾矿热稳定性好,成分与常用的无机填料相似,超细加工后粉体粒径小、粒度分布均匀,作为填料具有技术可行性,并以尾矿粉 60% 和 20% 的填充量分别制得了软质 PVC 板材和化工用 PVC - U 管材,制品的主要性能指标均达到标准要求。Gourav 等[48]针对废轮胎碎屑、铜尾矿及水泥等混合制备成结构填料进行了研究,研究

得出掺有 30% 废轮胎碎屑填料与未添加废轮胎碎屑填料相比承载力增加了 9 倍以上,TCLP 测试表明浸出元素的浓度远低于美国环保署规定的限值,铜尾矿可用于制备结构填料。

有色金属矿山尾矿用于地聚物、分子筛、白炭黑及硅微粉等有着广阔的发展前景,而相关研究工作还处于探索和开拓阶段,试验研究内容和深度有待进一步完善和充实,并需推进产业化应用和销售市场开拓的进程。

## 2.4　尾矿制备建筑材料

有色金属矿山尾矿的主要成分为硅氧化物、铝氧化物、硅酸盐、碳酸盐及黏土矿物等,与一些建筑材料的原料较为接近,因此可以根据尾矿的矿物组成特性,用于制砖、水泥、混凝土、陶瓷及玻璃等,以进一步实现尾矿的综合利用。

### 2.4.1　尾矿制砖

黏土制砖导致土地资源被损毁,我国部分省份已禁止生产和使用黏土砖,以有色金属矿山尾矿为原材料制备黏土砖,可以解决制砖损毁土地资源的问题,且减少尾矿堆存占用土地,甚至避免建设尾矿库等;此外有色金属矿山尾矿与水泥、掺加料等通过适宜的生产配方和工艺制砖,对尾矿中的重金属离子具有固化行为,能减少重金属的污染。

李春等[49]以商洛钼尾矿为试验矿样和水泥为胶凝材料进行制作尾矿砖进行研究,研究得出随着钼尾矿添加量的增大,免烧砖的力学性能下降,当钼尾矿添加量在 80% 以下时,所制得的免烧砖抗折和抗压强度均在 3.86 和 11.65 MPa 以上,不同尾矿添加量所制备免烧砖的密度均在 2.3 g/cm$^3$ 左右;随着养护时间的延长,免烧砖的力学性能提高,养护 7 d 时,其强度达到了 28 d 强度的 80% 以上。冯启明等[50]针对某铅锌矿选别尾矿,以其作骨料,适量水泥作胶结料,石灰作激发剂,分别加入混凝土发泡剂和废弃聚苯泡沫粒作预孔剂,通过浇注、捣打成型、养护等工艺制备了轻质免烧砖,尾矿用量达 70% ~80% 时,制品干燥容重仅为页岩实心砖的 2/3,抗压强度最高可达到 9.3 MPa,适用于建筑物承重和非承重填充砌块。李冲等[51]进行了铅锌尾矿免烧吸附砖的制备与研究,研究了硅微粉、水泥等胶结物对尾矿中重金属离子的固化行为,研究得出铅锌尾矿掺量为 70%,硅微粉为 20%,制备的免烧砖强度符合 MU20 等级;水化产物与尾矿中的重金属形成沉淀物,有效固化重金属离子;同时,该免烧砖可作为优良的吸附基体,对废水中的铅具有高效的去除能力,在 pH 值为 5、吸附时间为 90 min、含铅废水初始质量浓度 50 mg/L 时,免烧砖对 $Pb^{2+}$ 的吸附效率达到 96%。

大部分的有色金属矿山尾矿库所在地理位置偏僻、交通不便,加之尾矿制砖的附加值低,且运输量大和运输成本高,销售半径受运输费用制约,难以和市售建筑砖进行竞争。

### 2.4.2　尾矿制水泥

水泥是重要的基础性材料,但水泥的制备会消耗大量的黏土和石灰等,将硅质岩型有色金属矿山尾矿用于制备水泥,可降低水泥生产对硅质原料的依赖以及制备成本;有色金属矿山尾矿含有的一些微量成分,对水泥熟料烧成具有矿化作用和助熔作用,可降低生料中矿物的反应温度、能耗及提高熟料强度等。

李凝等[52]进行锡尾矿配料烧成水泥熟料动力学及熟料特性研究,研究表明,以锡尾矿为原料烧制水泥熟料的动力学控制机理与一般硅酸盐水泥熟料一致,锡尾矿配入可降低熟料矿物烧成温度及形成活化能 Ea,提升固相反应速度,控制尾矿量在 26% ~30% 时,Ea 比一般硅酸盐水泥减小 77.220 ~ 112.954 kJ/mol,且锡尾矿配入基本不改变热反应历程,可降低生料中碳酸盐分解温度、固相反应温度及烧成能耗。赵坚志等[53]进行了利用电石渣和铅锌尾矿等生产高强度水泥熟料的研究与应用,试验结果表明,用铅锌尾矿部分代替黏土作硅质原料,电石渣部分代替石灰石,铜渣作铁质校正原料,矿渣或粉煤灰作铝质校正料进行配料,在 1 400 ~ 1 450 ℃烧制硅酸盐水泥熟料是可行的;工业生产应用表明每年可利用工业废渣达 25 万 t,减少了石灰石和黏土的消耗,每年可节约标煤 4 500 余 t、节电 121 万余 kW · h,综合效益显著。

水泥原料辅料成分直接影响着水泥成品的质量,制备水泥对尾矿掺入量有着严格的要求,由于有色金属矿山尾矿的化学成分差异,对水泥的凝结时间、强度、耐腐蚀性及寿命等有着不同程度的影响,限制了有色金属矿山尾矿作为水泥掺入料的大量应用。

### 2.4.3　尾矿制混凝土

混凝土广泛应用于建筑、交通及水利等工程建设中,用于配制混凝土的天然砂石骨料在部分地区已出现短缺,河砂的采挖因损坏河床生态而逐渐被禁止;机制砂受粒形、级配及石粉等固有的劣势,影响了在混凝土中的应用。有色金属矿山尾矿具有粒度均匀和矿物组成相对稳定的特点,其应用于取代混凝土骨料的优势正逐步显现。

曾兴华[54]进行了用铜尾矿制备蒸压加气混凝土砌块综合利用技术研究,针对某二氧化硅含量较低的

铜尾矿,复合天然砂作为制备蒸压加气混凝土的硅质材料,在铜尾矿 25%、天然砂为 42%、生石灰为 19%、水泥为 10%、铝粉膏为 0.09% 及水料比为 0.6 最佳配比的条件下,通过蒸压釜中恒压养护 6 h,制备的铜尾矿蒸压加气混凝土砌块的抗压强度达 4.2 MPa,密度为 615 kg/m$^3$,满足 GB 11968—2006《蒸压加气混凝土砌块》A3.5B06 等级产品对强度和密度指标的要求。吴庆文等[55]进行了用铅锌尾矿制备防辐射混凝土的试验研究,试验结果表明,铅锌尾矿的掺量在质量含量 20% 以下时,所制得铅锌尾矿水泥混合材的水泥强度等级均可达到 42.5 级通用硅酸盐水泥等级,且利用其制备出的铅锌尾矿防辐射混凝土防辐射性能良好;当用水量为 190 kg/m$^3$、水泥用量为 365 kg/m$^3$、细骨料用量为 1 130 kg/m$^3$、粗骨料用量为 1 844 kg/m$^3$ 时,所制得的防辐射混凝土黏聚性和保水性较好,坍落度为 52 mm,表观密度为 3 510 kg/m$^3$,满足设计要求。Thomas 等[56]对铜尾矿作为天然河砂的部分替代物在水泥混凝土中的适用性进行研究,研究得出在制备 M25 等级的混凝土,铜尾矿作为天然河砂替代率达到了 60%,制备的铜尾矿混凝土表现出良好的强度和耐久性。Obinna 等[57]研究了铜尾矿作为外加剂对水泥混凝土耐久性能的影响,铜尾矿添加量分别为 0%、5% 和 10%,当铜尾矿添加量为 5% 时,其 28 d 和 90 d 的抗压强度为对照组的 107.1% 和 112.3%,铜尾矿添加量为 10% 时,28 d 和 90 d 的抗压强度为对照组的 104.1% 和 109.2%,且随着铜尾矿含量的增加,混凝土的抗酸蚀和氯离子渗透能力也有所提高,铜尾矿有可能提高水泥混凝土的耐久性。

有色金属矿山尾矿在用于制备混凝土方面具有良好的前景,但是还未得到大范围的推广使用,尽早建立相关的施工工艺及质量验收标准规范,将能更好地推动有色金属矿山尾矿在制备混凝土方面的应用。

### 2.4.4 尾矿制其它新型建材

有色金属矿山尾矿除用于制砖、水泥及混凝土外,在用于制备陶瓷、玻璃、琉璃瓦及陶粒等新型建材方面成为了研究的热点。

李峰等[58]进行了钼尾矿制备莫来石—石英复相陶瓷的研究,结果表明,当钼尾矿用量为 75%、烧成温度为 1 320 ℃、保温时间为 60 min、成型压力为 35 MPa 时,所制陶瓷的抗折强度可达 88.4 MPa、气孔率为 5.3%。王秀兰等[59]进行了钼尾矿制备建筑陶瓷及性能研究,结果表明,以钼尾矿为主要原料,采用压制成型法,在烧成温度 1 165 ℃、保温时间 120 min 条件下,可制备出抗折强度为 46.85 MPa、吸水率为 0.43% 及体积密度为 2.23 g/cm$^3$ 的高性能陶瓷砖。李彬等[60]以葫芦岛杨家丈子选矿厂钼尾矿为主要原料及鞍山钢铁公司高炉渣为辅助料研制玻璃材料,研究得出钼尾矿的利用率可达 80 % 以上,其性能达到或优于同类产品,可用于建筑和其他耐腐蚀的行业,还可作为微晶玻璃的基础玻璃。Yang 等[61]在富铁铜尾矿中回收铁元素后,将再选后的尾矿作为主要原料制备浅色微晶玻璃,研究结果表明,在 950 ℃下获得最佳物理化学性能的微晶玻璃,堆积密度为 2.69 g/cm$^3$,孔隙率 0.06%,吸水率 0.05%,硬度 90.4 HBa。邹小玲等[62]以铅锌银矿尾矿为主要原料,辅以红泥和高岭土,在 1 160 ~ 1 170 ℃煅烧琉璃瓦,研究结果表明所用配方组成为铅锌银矿尾矿 36% ~37%、红泥 45% ~46% 及高岭土 18% ~19%,制得的琉璃瓦坯体主晶相有石英、钙长石及莫来石等,琉璃瓦坯体颗粒紧密排列,颗粒之间有少量的空隙,釉面较平整,釉坯中间层紧密,琉璃瓦的吸水率、弯曲破坏荷重、热稳定性能和抗冻性等指标均能达到《建筑琉璃制品》JC/T 765—2006 标准要求。林慧等[63]以赞比亚铜尾矿为主要原料,采用新型烧结法,在预热温度 900 ℃、预热时间 15 min、焙烧时间 8 min 的条件下,烧制出吸水率为 3.8%,堆积密度为 647 kg/m$^3$,粒型系数为 0.98,筒压强度为 8.9 MPa 的 800 级的高强陶粒,其各项指标均符合国标要求的新型建筑材料陶粒。吴琛等[64]以铜陵尾矿为主要填充骨料,无机胶黏剂为胶黏材料,配以无机增强剂、增韧剂及无机色粉等添加剂制备无机人造石装饰材料,制成了抗压强度为 120.6 MPa、抗折强度为 19.5 MPa、吸水率为 0.5% 及光泽度为 76 光泽单位的无机人造石装饰材料,性能超过 JC/T 507—2012《建筑装饰用水磨石—水泥人造石》的指标,从产品性能和外观上均满足室内室外装饰使用。

有色金属矿山尾矿制备陶瓷、玻璃、琉璃瓦及陶粒等具有广阔的研究及应用前景,部分研究已经取得了相对成熟的理论,但制作成本较高、工程化应用技术要求高,相关理论转化为生产应用的工程案例还较少。

## 2.5 尾矿应用于农业生产

有色金属矿山尾矿的总量大、种类多,各种尾矿都具有不同的物理化学特性,部分尾矿含有农作物生长所需要的营养元素,因此可以将其用作土壤改良剂和制备化肥。

### 2.5.1 尾矿用作土壤改良剂

有色金属矿山尾矿中含有的粉砂质组分和黏土组分等,可针对性的用于改善土壤的理化性质,如透气性、固水保湿等。

刘帆等[65]公开了一种钼尾矿改良土壤的矿质修

复剂,采用钼尾矿、煤泥等矿质原料,经煅烧、混合等工艺,并通过稻糠、锯末等原料的加入和明矾浆的包覆,制成土壤修复剂,可实现高效、持久、无害化的土壤修复作用,增加土壤腐殖质含量,提高土壤物理性能,并稳定的保持其中微量矿质元素营养的释放。刘畅等[66]公开了一种磁铁矿尾矿复合改良剂治理改良苏打盐碱地方法,利用电气石与水对盐碱地进行浸泡及排水洗盐,再铺设由磁铁矿尾矿粉、发酵有机肥及糠醛渣混合制成的改良剂,可以改变土壤物理性质,使雨水容易渗透下去,淋洗表土盐分,同时土壤质地变粗,防返盐碱,毛管上升水不易直接到达地面,减少盐分向地表积聚,疏松土壤,保护盐碱地改良效果,防止次生盐渍化。Mu 等[67]利用酸浸产生的铜尾矿为原料,采用石灰、碳酸钠及氢氧化钠作为添加剂在 550 ℃ ~1 150 ℃的温度下热活化制备了硅铁土壤改良剂,以香根草为试材通过土壤培养和温室盆栽试验,得出制备的硅铁土壤改良剂可以安全地用于土壤修复,对土壤中的镉、铬和铅有良好的植物稳定性。

由于有色金属矿山尾矿普遍含重金属和选矿药剂,导致可用于土壤改良剂的有色金属矿山尾矿种类极少,且尾矿用作土壤改良剂受地域上的影响,尚不能大规模持续不断的消纳尾矿。

### 2.5.2　尾矿用作化肥

有色金属矿山尾矿含有磷、钾、钙、硫及硅等为植物生长所必需的大量元素和锌、钼、铜、锰及铁等植物生长必须的微量元素,可用于替代肥料中的部分添加剂制作化肥。

徐晓萍等[68]针对某钼尾矿中钼和二氧化硅含量高及重金属元素含量低的特点,采用浮选预先回收钼—浮钼尾矿焙烧制备硅肥的工艺进行综合利用研究,对含钼 0.0093% 的尾矿,经 1 次粗选 5 次精选 2 次扫选闭路选别后,获得钼品位为 25.36%、回收率 65.04% 的低品位钼精矿,钼浮选尾矿经干燥后,与白云石按照 1∶1 质量比例混匀,经焙烧冷淬后可获得活性二氧化硅含量为 21.45% 的硅肥。吴摇贵[69]进行了无害化钼尾矿可控缓释肥田间效果分析,研究得出施用钼尾矿缓释肥料可以延缓后期小麦的衰老,小麦籽粒产量分别比不施肥和施用 NPK 复混肥增产 139.57% 和 26.95%。

有色金属矿山尾矿用于制作化肥多使用其中的微量元素,但实际的需求量普遍较少,且制作化肥的工艺技术复杂、成本较高,实际生产应用不多。

### 2.6　尾矿应用于井下充填材料

有色金属矿产资源的大规模开采,产生的采空区越来越多,易引起或诱发矿区岩移和地面的沉陷、塌陷及开裂等地质环境破坏。尾矿用于充填采空区,使采空区得到了有效的充填治理,同时也降低了尾矿堆存占用土地,有助于实现建设无尾矿矿山。尾矿应用于井下充填材料的技术较多,其中尾矿制备膏体充填是最具有应用前景的技术之一。

金川镍矿从 20 世纪 80 年代末期到 90 年代中期,在我国首次开展了尾砂膏体充填技术的引进、研究、建设和工业化应用,但在系统设计和工程应用中存在诸多问题,通过多年的尾砂膏体充填技术攻关和系统改造才实现正常生产,且直至 2011 年达到设计生产能力[70]。新疆伽师铜矿井下围岩遇水泥化,需要最大限度地降低充填料中的泌水量,膏体充填成了伽师铜矿充填法的唯一选择,且针对尾砂细颗粒含量高、黏性大造成强度和输送的不利影响,通过添加粗骨料和泵送剂成功的提升了充填强度,并实现了长距离泵压输送,实现了膏体泵送充填采矿工艺的生产应用[71]。南京栖霞山铅锌矿对尾矿进行水力旋流器分级处理,粗砂尾矿高浓度输送到采场代替水砂和矸石用于采场充填打坝,较细粒级尾矿高浓度再加水泥搅拌用泵打到采场胶结充填,部分全尾矿浓缩脱水后用作水泥辅料,从而实现了尾矿固体废物的零排放[72]。会泽铅锌矿将选矿流程生产尾矿、老尾矿库尾矿和冶炼炉渣等添加水泥制备为膏体充填井下,全面解决了尾矿、废石和冶炼炉渣的存放问题[73]。

尾矿制备膏体充填井下采空区的技术难度大、成本高及经济效益低,而且尾矿多用作骨料,对尾矿的粒级级配要求较高,制约着尾矿膏体充填的大范围使用,尾矿制备为膏体后受胶凝剂水泥的影响,尾矿中残留的有价组分基本不可能再通过选矿回收利用,将造成尾矿中有价组分永久性的损失。

## 3　结语

随着社会的发展进步,人类对自然矿产资源的刚性需求愈发迫切,而面临的矿产资源禀赋劣势愈发明显,矿产资源储量日益减少和入选矿石品位逐渐降低,以及尾矿堆存存在直接或潜在的安全隐患和环境危害,迫使人们对有色金属矿山尾矿的综合利用越来越重视,虽然有色金属矿山尾矿在有价组分再选回收、用作水处理药剂与材料、制备建筑材料、用于井下充填材料等资源化利用方面取得了一定成效,但仍然存在着问题与困境。

然而有色金属矿山尾矿的综合利用能起到尾矿减量化、资源化及无害化,有助于实现资源与环境的可持续发展,故还需持续不断的加大科研投入,对已有的综合利用技术进行创新以降低成本、技术难度及简化工

艺,并探索新的利用途径,以扩大尾矿的使用范围、消纳量及提高附加值,更需国家和行业制定相关配套的规范和标准,以及给予政策保障和税收优惠等,以促进科研成果向生产应用转化,推动和规范有色金属矿山尾矿综合利用产业链的良性发展。

**参考文献:**


[1] 童雄. 尾矿资源二次利用的研究与实践[M],北京:科学出版社,2013.

[2] 甘风伟. 个旧锡多金属矿区尾矿物质成分与污染传输研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2009.

[3] 王武名,鲁安怀,陶维东,等. 金川铜镍矿山尾矿砂循环经济研究[J]. 金属矿山,2006(4):81 - 84.

[4] 田恩源,惠博,陈小青. 拉拉铜矿尾矿工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用,2020(3):148 - 152.

[5] 夏毅民,郑刘根,邱征,等. 铜陵某富硫尾矿库周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 环境污染与防治,2020,42(4):493 - 499.

[6] 宋国策,张志. 内蒙古新巴尔虎右旗多金属矿区扬尘风积物遥感监测方法[J]. 国土资源遥感,2020,32(2):46 - 53.

[7] 郭杰,刘炯天,王永田,等. 用自吸式充气浮选柱回收铅锌尾矿中锌的试验[J]. 金属矿山,2005(1):63 - 64.

[8] 董宗良,刘勇,冯程,等. CA - 1 在低品位难选氧化锌矿浮选中的应用[J]. 矿业研究与开发,2018,38(2):64 - 69.

[9] 高腾跃,张文平,徐超,等. 某铅锌浮选尾矿有价金属浮选综合回收[J]. 矿冶,2019,28(4):56 - 59.

[10] 陈靖,陈飞,胡洋,等. 某铜铁矿尾矿再选试验研究[J]. 现代矿业,2019(11):11 - 13.

[11] XIE YT, XU YB, YAN L, et al. Recovery of nickel, copper and cobalt from low - grade Ni - Cu sulfide tailings[J]. Hydrometallurgy, 2005(80): 54 - 58.

[12] 祁忠旭,王硕,郑润浩,等. 某铜锌硫化矿浮选尾矿中锡石综合利用研究[J]. 现代矿业,2020(11):109 - 112.

[13] 肖日鹏,杨波,贺涛,等. 悬振锥面选矿机再选尾矿的工业应用[J]. 有色金属(选矿部分),2016(3):87 - 90.

[14] SLEINIAS T. Study on collector for the cassiterite flotation recovery from low grade cassiterite - gravity tailings in India[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1999(19): 47 - 53.

[15] 秦华江,张海军,何川,等. 旋流—态微泡浮选柱回收钼精选尾矿中钼金属[J]. 中国钼业,2016,40(4):6 - 9.

[16] 邵伟华,赵平,郭珍旭,等. 河南某库存钼尾矿回收钨钼选矿试验[J]. 金属矿山,2014(10):176 - 180.

[17] 邵爽,邢鹏,张文娟,等. 铝从选铜尾矿中选择性还原回收铁[J]. 工程科学学报,2019,41(6):741 - 747.

[18] 张国旺,龙渊,高宏伟,等. 大型立磨机在铜尾矿回收利用中的应用[J]. 矿冶工程,2014,34(z1):49 - 51.

[19] 何建成,袁树礼,刘之能. 卧式搅拌磨机在钼尾矿选铁再磨作业中的应用[J]. 现代矿业,2015(9):204 - 205.

[20] 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.

[21] 李辉,于雪,李杰,等. 选冶联合工艺处理刚果(金)某铜尾矿试验研究[J]. 有色矿冶,2020(4):26 - 30.

[22] 王国标. 某铜钼尾矿回收长石的试验研究[J]. 黄金,2017,38(2):66 - 69.

[23] 王长拼,张凌燕,白丽丽,等. 钼尾矿综合回收利用试验[J]. 矿产综合利用,2016(1):71 - 75.

[24] 王玉婷,刘三军,阮伟. 平水铜矿尾矿回收重晶石的试验研究[J]. 矿业快报,2008(8):36 - 38.

[25] 肖骏,董艳红. 盘龙铅锌矿尾矿浮选回收重晶石试验研究[J]. 化工矿物,2020(11):14 - 18.

[26] 王允火. 某铜钼尾矿中金红石的浮选回收试验[J]. 金属矿山,2014(11):167 - 170.

[27] 周源,崔振红,熊立,等. 某铜尾矿中金红石的选矿回收试验[J]. 金属矿山,2014(3):160 - 161.

[28] 田信普,李骏. 江西德兴铜矿尾矿提取绢云母及综合利用的探讨[J]. 地质与勘探,2000,36(5):47 - 48.

[29] 肖福渐. 某铅锌矿选矿尾矿综合利用试验研究[J]. 湖南有色金属,2003,19(1):9 - 11.

[30] 刘倩,常亮亮. 钼尾矿对 Cr(Ⅵ)吸附性能的研究[J]. 合成材料老化与应用,2016,45(3):80 - 84.

[31] 邓春华. 铝土矿正浮选尾矿处理含 Pb(Ⅱ)废水的试验研究[J]. 湖南有色金属,2013,29(5):55 - 58.

[32] 兰叶,王毓华,李艳. 改性铝土矿浮选尾矿处理含 Cr(Ⅵ)废水的试验研究[J]. 矿冶工程,2006,26(6):43 - 46.

[33] 孔荔玺,薛峰,陈莉莉,等. 尾矿吸附模拟废水中磷的初步研究[J]. 环境污染与防治,2008,30(5):15 - 17.

[34] 戴琦,吴云海,胡玥,等. 铅锌矿尾矿吸附水溶液中碱性品绿的研究[J]. 水资源保护,2012,28(2):68 - 71.

[35] 蔡创开,许晓阳,卢松,等. 利用碱性尾矿中和某加压氧化厂酸性废液[J]. 矿产综合利用,2018(5):131 - 134.

[36] 张楠,陈天虎,周跃飞,等. 铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的试验研究[J]. 环境科学,2012,33(4):1272 - 1277.

[37] 汪顺才,余学勇,袁荣灼,等. 一种硫化铅锌矿浮选尾矿生物陶粒滤料及其制备方法:103086741A[P]. 2013 - 1 - 18.

[38] 余黎明,朱雷. 镁橄榄石尾矿滤料在 BAF 中的挂膜启动[J]. 水处理技术,2015,41(9):116 - 118.

[39] 刘三军,刘永,李向阳,等. 用铝土矿选矿尾矿制备聚合氯化铝及污水处理试验研究[J]. 湿法冶金,2020,39(6):539 - 542.

[40] 汪顺才,袁荣灼,余学勇,等. 铅锌矿尾矿制备陶粒处理选矿废水[J]. 环境工程学报,2013,7(5):1779 - 1784.

[41] 李北星,冯紫豪,叶茂,等. 原状铅锌尾矿制备地聚物的研究[J]. 混凝土,2018(1):68 - 71.

[42] 张鹏举,黄太铭,何华杰,等. 以锡矿尾矿为原料 ZSM - 5 分子筛的水热合成[J]. 中国有色金属学报,2019,29(8):1790 - 1800.

[43] 陈明日,史非,郑晓航,等. 碱浸钼尾矿制备白炭黑的工艺与表征[J]. 大连工业大学学报,2015,34(6):267 - 471.

[44] 李峰,刘君,李晓龙,等. 钼尾矿制备硅微粉[J]. 化工环保,2020,40(4):396 - 400.

[45] 孙毅,土育玲,王宇飞. 废弃铅锌尾矿复合 $TiO_2$ 光催化剂的制备及其可见光降解甲醛性能研究[J]. 陕西科技大学学报,2020,38(5):26 - 32.

[46] 李二伟,刘昊,吕国诚,等. 河南夜长坪钨钼尾矿制备橡胶填料的研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(1):225 - 232.

[47] 霍成立,刘明珠,赵武,等. 铝土矿选矿尾矿深加工及在 PVC 塑料中的应用[J]. 金属矿山,2010(9):177 - 181.

[48] GILL G, MITTAL R K, DANDAUTIYA R, et al. Sustainable utilization of waste tire - chips reinforced copper tailings as structural fill[J]. Environment, Development and Sustainability, 2020(22): 4845 - 4865.

[49] 李春,王恩峰,崔乐,等. 掺杂商洛钼尾矿制备免烧砖的研究[J]. 新型建筑材料,2016,43(7):90 - 92.

[50] 冯启明,王维清,张博廉,等. 利用青海某铅锌矿尾矿制作轻质免烧砖的工艺研究[J]. 非金属矿,2011,34(3):6 - 8.

[51] 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(4):46 - 51.

[52] 李凝,韦立宁,梁亮,等. 锡尾矿配料烧成水泥熟料动力学及熟料特性研究[J]. 硅酸盐通报,2014,33(5):1052 - 1057.

[53] 赵坚志,王学武,胡浙安. 利用电石渣和铅锌尾矿等生产高强度水泥熟料的研究与应用[J]. 水泥工程,2011(6):64 - 68.

[54] 曾兴华. 铜尾矿在制备蒸压加气混凝土砌块综合利用技术研究[J]. 砖瓦,2018(10):71 - 73.

[55] 吴庆文,陈西子,陈艳蕾,等. 铅锌尾矿制备防辐射混凝土的试验研究[J]. 陶瓷学报,2018,39(6):769 – 775.
[56] THOMAS BS, DAMARE A, GUPTA R C. Strength and durability characteristics of copper tailing concrete[J]. Construction and Building Materials,2013,48: 894 – 900.
[57] OBINNA O, ZGUR E. Cement mixtures containing copper tailings as an additive: durability properties[J]. Materials Research, 2012, 15(6): 1029 – 1036.
[58] 李峰,崔孝炜,张篷,等. 钼尾矿制备莫来石 – 石英复相陶瓷的研究[J]. 非金属矿,2020(5):64 – 66.
[59] 王秀兰,田达威,史茼桧,等. 钼尾矿制备建筑陶瓷及性能研究[J]. 人工晶体学报,2017(8):1517 – 1520.
[60] 李彬,隋智通. 钼尾矿玻璃的研究[J]. 中国陶瓷工业,2001(3):15 – 16.
[61] YANG Z, LIN Q, XIA J, et al. Preparation and crystallization of glass – ceramics derived from iron – rich copper slag[J]. Journal of slloys and compounds, 2013, 574: 354 – 360.
[62] 邹小玲,成岳,洪光照. 利用铅锌银矿尾矿研制琉璃瓦[J]. 中国陶瓷,2015,51(6):54 – 58.
[63] 林慧,宋晓岚. 利用赞比亚铜尾矿制备高强陶粒及其机理研究[J]. 陶瓷学报,2016,37(4):404 – 408.
[64] 吴琛,赵宝军,曾正祥,等. 利用铜陵尾矿料制备无机人造石装饰材料的研究[J]. 中国建筑科技,2021,30(1):44 – 47.
[65] 刘帆,何光强,牛涛. 一种钼尾矿改良土壤的矿质修复剂:105967936A[P]. 2016 – 2 – 19.
[66] 刘畅,刘润华,崔湘浩,等. 一种磁铁尾矿复合改良剂治理改良苏打盐碱地方法:103858554B[P]. 2016 – 6 – 15.
[67] MU J, HU Z, HUANG L, et al. Preparation of a silicon – iron amend – ment from acid – extracted copper tailings for remediating multi – metal – contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2020(257): 113565.
[68] 徐晓萍,高玉德,孟庆波. 利用某钼尾矿回收钼及制备硅肥的研究[J]. 材料研究与应用,2018(1):55 – 158.
[69] 吴摇贵. 无害化钼尾矿可控缓释肥田间效果分析[J]. 科技创业家,2013(21):166.
[70] 杨志强,高谦,王永前,等. 金川镍矿尾砂膏体充填采矿技术进步与展望[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版),2014,29(3):1 – 8.
[71] 吴爱祥,王勇,王洪江. 膏体充填技术现状及趋势[J]. 金属矿山,2016(7):1 – 9.
[72] 孙水裕,缪建成,王方汉. 选矿尾矿综合利用和零排放的研究与生产实践[J]. 环境工程,2004,22(5): 55 – 56.
[73] 敖顺福,崔茂金,石增龙,等. 会泽铅锌矿资源综合利用技术的实践与应用[J]. 中国矿业,2016,25(11):102 – 106.

# Research Progress of Comprehensive Utilization of Nonferrous Metals Mine Tailings

AO Shunfu

*Yunnan Chihong Zn&Ge Co. , Ltd. , Qujing 655011 , Yunnan , China*

**Abstract**: The large amount of discharged nonferrous metal mine tailings occupy land, resulting in the waste of mineral resources. There are direct or potential safety risks and environmental hazards. Based on the analysis of the current research status of the comprehensive utilization of nonferrous metal mine tailings, the following utilization status of nonferrous metal mine tailings is described as follows: recovering valuable metals and nonmetallic minerals from nonferrous metal mine tailings; the nonferrous metal mine tailings are used as adsorbent, neutralizer and filter material in the field of environmental protection; nonferrous metal mine tailings used as raw material or auxiliary materials for geopolymer, molecular sieve, white carbon black and microsilica; nonferrous metal mine tailings used as materials for making brick, cement, concrete, ceramics and glass; nonferrous metal mine tailings used as soil amendment and chemical fertilizer making; nonferrous metal mine tailings used as underground filling materials. The problems and difficulties in comprehensive utilization are analyzed and discussed. It is necessary to continuously increase investment in scientific research and innovate existing comprehensive utilization technologies to reduce costs, technical difficulties and simplify processes. And it is necessary to explore new ways of utilization to expand the scope of use, consumption and increase the added value of tailings.

**Key words**: nonferrous metals; tailings; comprehensive utilization; reduction

**引用格式**:敖顺福. 有色金属矿山尾矿综合利用进展[J]. 矿产保护与利用,2021,41(3):94 – 103.
Ao SF. Research progress of comprehensive utilization of nonferrous metals mine tailings[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(3): 94 – 103.