

# 中国尾矿资源综合利用现状

易龙生, 米宏成, 吴倩, 夏晋, 张冰行

1. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083

中图分类号: TD926.4<sup>+</sup>.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)03-0079-06  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.03.013

**摘要** 简要介绍了目前我国尾矿资源的现状, 论述了在当前经济发展形式和环保要求下, 尾矿资源综合利用的必要性。列举大量实例和数据, 简述了尾矿综合利用途径和发展现状, 并指出尾矿综合利用是实现矿产行业可持续发展的必然选择。进一步开展尾矿综合利用的研究, 将尾矿的综合利用同环境治理结合起来, 既能取得良好的经济效益, 又能产生显著的社会效益。

**关键词** 尾矿; 综合利用; 建材; 尾矿回填

## 引言

尾矿是选矿作业中产生的有用组分含量低且目前无法经济用于工业生产的组分, 也是工业固体废弃物中的主要组成成分<sup>[1]</sup>。尾矿的主要矿物成分各种脉石矿物, 如石英、长石、辉石和角闪石等, 其主要化学成分为铁、硅和铝等元素的氧化物和硅酸盐<sup>[2]</sup>。世界各国每年采出的金属矿、非金属矿、煤和黏土等产量巨大, 由此产生的尾矿数量也是相当巨大。据《中国矿产资源节约与综合利用报告(2018)》显示, 截至2017年底, 我国尾矿堆存量为195亿t, 82%为铁矿、铜矿、金矿和磷矿采选产生的尾矿和废石<sup>[3]</sup>。尾矿不仅对环境有着很大污染, 浪费了大量的土地, 也严重影响了人类的生命健康和财产安全, 存在着严重的安全隐患<sup>[4]</sup>。

此外, 堆存的尾矿需要投入大量资金进行日常维护, 降低了矿产企业的经济效益。国内选厂的设备与处理工艺有了长足进步, 但由于我国矿石具有贫、细、杂和难选的特点, 选矿中的有用矿物回收水平较低, 产生的尾矿数量依然很大。同时, 随着矿产资源的过度开发, 矿石质量日益下降, 将尾矿当做二次资源进行开发利用已经引起了全世界范围内的广泛关注<sup>[5]</sup>。近年来, 我国对于尾矿再利用愈发的重视起来, 但是由于我国矿石大多属于共伴生矿, 矿石性质较为复杂, 利用开发的程度并不高。国外对于尾矿的综合利用效率可以达到60%以上<sup>[6]</sup>, 而国内的尾矿利用效率很低, 只有7%左右<sup>[7]</sup>。因此我国应针对尾矿的实际现状, 加大力度开发利用尾矿资源, 降低尾矿对环境的污染, 提高资

源利用率, 实现经济的可持续发展和绿色发展。

## 1 尾矿综合利用的必要性

### 1.1 尾矿中可回收组分丰富

我国的矿石类型以共伴生矿为主, 其占到矿产资源总数的80%, 选别难度较大。加之早期矿山的选冶技术较为落后, 不同时期的经济条件也不尽相同, 通常只能对矿石中一种或某几种矿物进行回收。这就使得包括有色金属、稀有金属、贵金属和大量的非金属矿物留存在尾矿中<sup>[7,8]</sup>。就铁矿山而言, 年平均排尾量接近1.3亿t, 尾矿中铁品位在11%左右, 相当于有1400万t金属铁存留在尾矿中<sup>[1]</sup>。据不完全统计, 我国黄金企业每年都会产出近2000万t的氰化尾渣, 这些尾渣中通常含有金、银、铜、铅、锌等多种有价金属, 如能充分的综合回收利用, 将会产生巨大经济收益<sup>[9]</sup>。如江西铜业公司各选矿厂每天排放尾矿量达8.3万t左右, 各选矿厂尾矿库已堆放尾矿9000万m<sup>3</sup><sup>[10]</sup>, 将这些尾矿充分利用起来会产生可观的效益。由上可知, 尾矿中含有大量可回收的有用组分, 但由于各种原因, 这些组分只能以尾矿的形式堆存。然而以现在的选冶技术是完全可以对其进行回收利用, 补充日趋枯竭的矿产资源。

### 1.2 尾矿中的非金属资源丰富

尾矿中含有大量的石英、长石、角闪石、辉石、方解石、白云石以及由于蚀变产生的硅酸盐矿物和硅镁酸

收稿日期: 2019-12-08

作者简介: 易龙生(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事矿物加工、固体废物处理处置与资源化、再生资源综合利用等研究, E-mail: cmiyls@163.com。

通信作者: 米宏成(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿物加工和固体废物综合利用方面研究, E-mail: mhccsu@163.com。

盐矿物,主要化学成分有硅、铝、钙、镁等,其中硅和铝的含量较高。目前尾矿已被广泛地用于修筑路基、制造建材、回填采空区,资源利用率进一步提高,同时也使得矿山企业获得了良好的经济效益。因此,要充分利用尾矿资源,特别是其中所含有的非金属资源是十分必要的。

### 1.3 尾矿具有严重的危害性

目前尾矿的处理方法还是以尾矿库堆存为主,尾矿堆存将会占用大量的农用、林用土地,破坏其所在地区土地资源的配置。此外,一些偏远地区的矿山选厂或是乡镇的小型选厂还会将尾矿直接排到自然环境中,对环境造成了极大破坏。如辽宁海城地区堆存的菱镁矿尾矿和废弃矿区对周边的土壤造成了严重影响,土壤养分和微生物量大幅下降<sup>[11]</sup>。尾矿库表面的尾矿受风吹光照,脱去水分形成大量粉体,随风飘散到尾矿库周围,严重时甚至可以形成沙尘暴,严重污染大气,影响居民出行。尾矿库溃坝则是尾矿极具危害性的一种表现形式,如2006年4月30日陕西省商洛市镇安县黄金矿业有限责任公司尾矿库发生溃坝事故,尾矿外泄20万m<sup>3</sup>,76间民房被毁,22人被掩埋;2008年9月8日山西省襄汾县新塔矿业有限公司塔儿山铁矿的一座尾矿库发生溃坝事故,倾泻出26.8万m<sup>3</sup>的尾矿,事故波及至下游500m处的矿区办公室、集贸市场和民宅,共造成277人死亡,33人受伤,4人失踪,直接经济损失达9616.2万元。综上可知,尾矿不仅会对环境造成破坏,还会威胁到人身财产安全。鉴于尾矿具有极大的潜在危害性,所以通过多种综合利用方式消纳尾矿已是刻不容缓。

### 1.4 尾矿综合利用的经济效益高

世界上工业发达的国家为保护矿产资源,维持生态平衡,实行良性循环,开始兴建“二次原料工业”,并取得了显著成效<sup>[6]</sup>。我国堆存的尾矿一般都有较高的品位,尤其是20世纪50~60年代的尾矿,具有更大的开发利用价值。而且相较于开发新矿脉,对尾矿勘探成本更低,探查结果也更准确。同时尾矿库周边的交通便利,基础设施较为完善,可以大幅度基建投资。尾矿库中的尾矿较为疏松,粒度较细,只需要少量破碎和磨矿作业,能耗低,生产成本低。近些年来,我国的一些矿业公司在尾矿的综合利用上已经取得了不错的经济效益,如昆钢对大红山尾矿有用成分进行回收,取得了良好的经济效益<sup>[12]</sup>;研山铁矿回收铁矿中铁矿物每年可产出铁品位超过69%的铁精粉约5.5万t,获利1750万元<sup>[13]</sup>;某黄金矿山对尾矿进行再利用,得到质量较好的建材,年利润总额76.42万元<sup>[14]</sup>。

由上可知,尾矿已经严重束缚了矿产行业的绿色发展和可持续发展,同时也成为了破坏环境、危害安全

的重要影响因素。只有对其进行综合利用,才能解决尾矿所带来的各项问题,并实现矿山企业的盈利增收。

## 2 尾矿的综合利用途径

我国尾矿开发利用的理论研究和实际应用相较于国外有很大差距,但近些年由于政府和有关部门的重视,情况已经有了很大改观,一大批高校和科研院所都开始与矿山企业紧密合作,目前在尾矿的综合利用,即实现尾矿的资源化、减量化和无害化方面已取得了显著的成果。本文作者将从尾矿的二次选别、尾矿用作建材原料、尾矿在农业生产上的应用和尾矿回填利用四个方面进行叙述。

### 2.1 尾矿的二次选别

尾矿总量大,种类多,因此选取铁尾矿、铜尾矿、铅锌尾矿和稀土尾矿这几种产量较大、代表性强的尾矿进行叙述。

对于铁尾矿的二次选别,目前已经有了较为成熟的工艺对其中的铁矿物进行回收,并获得质量较好的铁精矿。针对铁尾矿磁性较弱的特点,预富集—磁选—反浮选和磁化焙烧—磁选工艺目前已成为较为流行的铁尾矿二次选别方法,这两种方法对TFe品位低、嵌布粒度细的铁尾矿处理效果比较显著,得到的精矿产品铁品位普遍在55%~67%之间,金属铁的回收率较高,产品具有较高的经济价值。袁致涛等<sup>[15]</sup>采用尾矿预富集—弱磁选和弱磁选尾矿强磁选—反浮选工艺,得到了较好的指标;唐志东等<sup>[16]</sup>采用强磁预富集—磁化焙烧—磨矿—弱磁选的工艺处理袁家村铁矿选厂综合尾矿,最终得到了铁品位61.82%、铁作业回收80.91%、对原矿回收率55.98%的铁精矿产品;Li等<sup>[17]</sup>采用磁化焙烧—磁选的工艺处理鞍山选铁尾矿,得到铁品位为61.30%、回收率为88.20%的精矿产品;Jihua Zhai等<sup>[18]</sup>对攀钢集团早期尾矿进行处理,采用磁选回收尾矿中的铁,采用磁选预富集—微泡浮选回收金属钛,目前已经投入工业生产;Tang等<sup>[19]</sup>采用磁选预富集—流态化焙烧—弱磁选工艺回收铁矿中的铁矿物,最终得到铁品位为65.91%、回收率为94.60%的铁精矿。Sun<sup>[20]</sup>采用悬浮磁化焙烧—磁选—浮选工艺进行了铁尾矿二次选别的中试研究,在最佳工艺条件下得到了铁品位为58.67%、回收率为57.82%的铁精矿。另外,对于铁尾矿的二次选别,不仅只回收金属铁这一种矿物,也可以回收其他矿物。如杨慧芬等<sup>[21]</sup>采用氧化酸浸—酒石酸络合法回收铅渣选铁尾矿中的锑和铜;郑强等<sup>[22]</sup>采用盐酸浸出白云鄂博选铁尾矿,可以有效回收尾矿中的稀土元素。

铜、铅和锌占了有色金属行业产能的绝大部分,其产生的尾矿量也相当惊人,因此对铜尾矿和铅锌尾矿的资源化利用也引起了人们的广泛关注。

对于铜尾矿而言,其二次选别方式有还原剂还原焙烧—磨矿—磁选工艺<sup>[23]</sup>、浮选<sup>[24,25]</sup>和浸出工艺<sup>[26,27]</sup>。还原焙烧—磨矿—磁选工艺是通过还原剂将铜尾矿中的铜和铁等金属还原成金属单质,再将其磨细,最后利用磁选进行回收;浮选可通过采用不同工序和药剂实现铜尾矿中有用组分的二次选别;化学浸出工艺可以实现铜尾矿中的多种有价金属的回收利用。

铅锌尾矿中铅、锌等金属的品位都比较高,具有较高的回收价值,因而对其二次分选是有意义的。铅锌尾矿二次选别方式种类很多,除了传统的选矿工艺<sup>[28-30]</sup>外,还有很多新技术,如磁化焙烧—磁选工艺<sup>[31]</sup>,此种工艺能有效回收金属铁,同时对其他金属也有一定的富集作用;离心重介质分离技术<sup>[32]</sup>可以将铅锌尾矿分成轻重两种部分,较重的部分中含有绝大部分有用矿物,可在之后继续进行处理回收;化学浸出<sup>[33]</sup>是传统浸出工艺,基本可以实现铅锌的全部回收;微生物浸出<sup>[34]</sup>是利用细菌对铅锌尾矿浸出的新工艺,其浸出率相较于化学浸出较低,但二次污染少。

稀土是国家重要战略资源,稀土尾矿中含有大量有用矿物,特别是 REO,必须将其尽可能回收。稀土尾矿的二次选别方式既有传统选矿工艺,如单一浮选<sup>[35]</sup>、“浮团聚磁选”<sup>[36]</sup>和浮选—磁选—重选联合工艺<sup>[37]</sup>,也有超重力—焙烧<sup>[38]</sup>、磁化焙烧—磁选<sup>[39]</sup>等新工艺,这些工艺都可以有效地回收稀土尾矿中 REO 等有价组分。

由上可知,铁尾矿的二次选别工艺较为成熟,回收效果较好,精矿产品的指标很高,而且铁尾矿的二次选别不仅回收含铁组分,也回收了如镓、铜、镍等有价矿物;铜、铅和锌尾矿的二次选别工艺种类较多,既有传统工艺,如浮选、化学浸出,也有生物浸出、离心重介质分离、磁化焙烧—磁选等新工艺,都可以回收尾矿中的有用组分,但相较于传统工艺,新工艺不易造成二次污染,因此应大力发展新技术来代替传统工艺;稀土尾矿的二次选别工艺种类多,基本都可以将 REO 从尾矿分离出来,实现高效富集。总的来说,尾矿的二次选别可以将尾矿中的有价金属尽可能分选出来,实现尾矿的资源化利用;同时,尾矿二次选别可以大量消纳尾矿,实现变废为宝。

## 2.2 尾矿用作建材原料

尾矿中含有的 Si、Al 等元素是生产建材必不可少的成分,因此尾矿是可以用作建材生产的原材料。目前,国家提倡装配式建筑,禁止开山采石,建议对固废进行资源化利用,促进固废的高效利用<sup>[40]</sup>。将尾矿用作建材原料既可以实现尾矿的大宗消纳,同时也可以固化/稳定化尾矿中的有害物质,阻止有害物质的迁移。目前,尾矿主要被用作混凝土和陶瓷等建材的原料。Zhang 等<sup>[41]</sup>利用尾矿制备混凝土,获得了性能优

异的混凝土;Wang 等<sup>[42]</sup>将铅锌尾矿用作水泥的替代品,获得了自密实的超性能混凝土,且浸出毒性低于国家标准;Guo 等<sup>[43]</sup>采用煅烧和研磨激发黄铁矿浮选尾矿的火山灰活性,将其加入到混凝土中,可使混凝土具有良好的性能。将尾矿用作混凝土原料只需经过一段时间的养护,就可以制得工作性能好、抗压强度高、重金属浸出率低的混凝土,这种方法对尾矿的利用量大,利用效率高,无二次污染,极具开发和应用前景。由于尾矿中元素组成满足成陶要求,因此可以利用尾矿制备性能较好的陶瓷材料,如 Wang 等<sup>[44]</sup>利用白云鄂博尾矿和 C&D 固体废物联合制备陶粒,为制陶工业提供了两种可用的新原料;Liu 等<sup>[45]</sup>以铅锌尾矿、赤泥等为原料,在 980 °C 的温度下进行烧结,获得了性能较好的泡沫陶瓷。Xi 等<sup>[46]</sup>利用钛尾矿和废玻璃制备了性能优良的多孔玻璃陶瓷。利用尾矿制备地聚合物作为建材原料也是尾矿综合利用研究的一个重要方向,如 Wei 等<sup>[47]</sup>利用机械活化后的钒尾矿制备了高强度的地聚合物;Ping 等<sup>[48]</sup>制备了粉煤灰和铁尾矿基地聚合物;Jiao 等<sup>[49]</sup>利用高硅钒尾矿制备了耐高温的地聚合物,研究表明钒尾矿可作为耐火聚合物的潜在原料。此外,利用尾矿还可以制备多孔砖<sup>[50,51]</sup>、微晶玻璃<sup>[52-54]</sup>和保温隔热材料<sup>[55,56]</sup>等。

由上可知,尾矿因其所含成分可以满足建材制造的要求,只需经过一些工艺处理,如烧结、养护等,就可以获得符合国家相关标准的建筑材料,所以用尾矿生产制备高附加值建筑材料是实现尾矿综合利用的一个极好的途径。使用尾矿制备建筑材料可以消纳大量尾矿,实现尾矿的高值化利用。

## 2.3 尾矿在农业生产上的应用

尾矿在农业上的应用主要有三种,分别是制备化肥、用作土壤改良剂和尾矿复垦。尾矿中通常都含有植物生长所必需的微量元素,如 Zn、Mn、Cu、Mo、V、B、Fe 和 P 等,经过一系列的处理,可以将尾矿制成化肥,此种化肥可以改善土壤结构,提高土壤肥力,能够使作物茁壮生长,并实现农业增产。利用尾矿制备化肥的研究有很多,如马鞍山矿山研究院制成了磁化尾矿化肥,并实现了大规模生产<sup>[57]</sup>;周芸等<sup>[58]</sup>利用生物炭和木醋液对磷尾矿堆肥进行处理,结果表明这两种物质可以有效促进磷尾矿堆肥进程和磷降解。

尾矿用作土壤改良剂的主要原理就是尾矿含有的组分可以与土壤中的有害物质发生反应,阻止土壤中的有害物质迁移,如 Mu 等<sup>[59]</sup>利用酸浸之后的铜尾矿制备出了硅铁土壤改良剂用于修复多金属污染的土壤,此种改良剂对土壤中的 Cd、Cr 和 Pb 有良好的植物稳定性;Lei 等<sup>[60]</sup>利用铁尾矿和锰尾矿用作土壤改良剂,修复被 As 污染的土壤,取得了不错的效果。由上述可知,尾矿土壤改良剂可以有效修复被污染的土壤,

减少污染物的迁移,在修复环境的同时,也消纳了尾矿,实现了以废治废。

尾矿复垦也是尾矿在农业生产上的一个重要应用。目前,尾矿的复垦常采用的是生物法或微生物法,使用这两种方法可以降低土壤中可溶性重金属含量,实现重金属的稳定化。国外常使用生物法或微生物法对尾矿进行复垦/修复,尾矿的复垦率最高可达 80%。国的尾矿复垦/修复起步较晚,但发展还是较为迅速<sup>[61]</sup>。国家有关部门发布了相关规定,对尾矿复垦的发展起到了很大的促进作用<sup>[62]</sup>。20 世纪 90 年代末,甘德清等<sup>[63]</sup>针对唐山中小型铁矿在生产过程中所排放的尾矿所带来的危害,进行了为期三年的农作物适应性种植,复垦 90 hm<sup>2</sup> 尾矿,复垦率达到了 30.26%,复垦经济效益 1 550 万元,年种植效益 19.6 万元。当前对尾矿复垦/修复的研究也有很多,如 Li 等<sup>[64]</sup>以生物炭/凹凸棒石作为改良剂,利用龙葵对矿山进行植物修复,结果表明植物根系对重金属吸收效果明显;Liu 等<sup>[65]</sup>通过将马尾松接种外生菌根提高植物对重金属的吸收率,能有效降低土壤的 pH 和重金属含量,增强了土壤酶的活性,极具应用潜力;Zhang 等<sup>[66]</sup>利用碱蓬和拟南芥处理尾矿,一方面,这两种植物可以对重金属有较好的耐受力,可以对尾矿进行有效修复,另一方面,微生物群落可以增强植物的抗性和富集效果;Wang 等<sup>[67]</sup>为了弥补单一植物修复尾矿的不足,采用田间正交试验,利用植物、微生物和改良剂联合用于矿山尾矿修复,以达到最佳修复效果。

## 2.4 尾矿回填

尾矿回填可以大量消纳尾矿,是一种极为有效的尾矿减量化利用技术。尾矿回填的技术种类很多<sup>[68]</sup>,其中目前最为常用的就是胶结充填技术,此种技术是将细砂等惰性材料和适量凝胶材料,加水混合制成充填材料,能提高地采回采率。尾矿回填中尾矿常与其他固体废物一起制备填充材料,回填到矿山采空区或其他由于工程建设产生的地下空区。如 Chu 等<sup>[69]</sup>利用铁尾矿、河道底泥和电石渣等大宗固废制备采空区回填材料,降低了施工成本;Liu 等<sup>[70]</sup>制备了超细尾矿-高炉矿渣填充材料,用于填充矿山采空区;Wan 等<sup>[71]</sup>以铁尾矿回填地源热泵(GSHP)的地下空区,结果表明此种方法是可行的;Yin 等<sup>[72]</sup>使用水泥和硫化矿尾矿制备尾砂填充体,对地下采场充填设计有重要的参考价值;Zheng 等<sup>[73]</sup>用 MgO 活化磨细矿渣作为硫化矿尾矿的胶结料,研究结果表明养护 28 d 的胶砂符合相关强度要求。

由上述可知,以尾矿回填采空区,可以代替原本的水泥胶结填充体,此种方法不仅可以消纳大量尾矿,还可以降低回填成本。当前,尾矿常与具有一定活性的工业废物如冶炼渣一起混合制备回填胶砂,可以实现

全尾胶结填充,既满足了回填的技术要求,还综合利用了工业废弃物,具有发展前景。目前利用尾矿作胶结材料填充采空区已经取得了一些成功。

## 3 尾矿综合利用中存在的问题

尾矿综合利用中存在着很多问题,主要体现在以下几个方面:

(1)尾矿综合利用技术已经取得了很大的进展,但是由于其工艺复杂,效益低,且有些工艺不适用于边远地区,这使得尾矿综合利用技术受到了极大的限制。

(2)一些尾矿处理技术只是处于试验室研究阶段,距离实际应用还有一段距离,如高值利用和大宗消纳技术仅停留在研究阶段,推广到生产应用还需要一定的时间。这需要相关部门出台专门激励政策和措施,鼓励尾矿综合利用技术创新,争取早日实现理论和技术上的突破。

(3)保护环境的呼声越来越高,相关的法律法规也陆续出台,但是由于相关企业环保意识不足,缺少相关处理设备,对尾矿的循环利用、综合利用做得不到位。同时,管理部门监管不严,对资源循环利用的宣传教育不到位,导致尾矿综合利用无法顺利开展。

(4)研究与生产实际联系不够密切,导致很多技术无法直接应用于实际生产一线,加之投入的资金少,科研成果的转化率不高,科研成果推广缓慢,无法转化为现实生产力。

## 4 结语

尾矿作为大宗工业固体废弃物,对矿山及其周边环境造成了极大的危害,同时限制了矿业的持续性发展。如今矿产资源日益枯竭,矿石品位不断下降,环保要求愈发严格,采用多种方式对尾矿资源进行综合利用,已经是必然选择。对于矿山企业来讲,应深入贯彻环保要求,将环境保护深入贯彻到矿山开发的全过程中;同时依靠科技创新,并结合矿山自身条件,实现尾矿的无害化、减量化、资源化利用,回收有用有价组分,开发附加值高、用途广、功能多样的新材料。运用市场机制和政策条件,综合利用尾矿资源将获得极大的经济效益和社会效益。

### 参考文献:

- [1] 张淑会,薛向欣,刘然,等.尾矿综合利用现状及展望[J].矿冶工程,2005(3):44-47.
- [2] 常亮.用铁尾矿和镁尾矿制备 M2S 隔热砖的工艺研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2008.
- [3] 王雪峰,朱欣然,李为,等.全国矿产资源节约与综合利用报告[M].北京:地质出版社.2018:21-23.
- [4] Matschullat J, Borba RP, Deschamps E, et al. Human and environmental contamination in the Iron Quadrangle, Brazil [J]. Applied Geochemistry: Journal of the International Association of Geochemistry and Cosmochemistry, 2000, 15(2): 181-190.
- [5] LICSK6 I, LOIS L, SZEBeNYI G. Tailings as a source of environmental

- pollution [J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(10): 333 - 336.
- [6] 彭毓,汪贻水. 中国实用矿地质学(下册)[M]. 北京:冶金工业出版社,2010:5.
- [7] 史利芳,潘利祥,郭炜,等. 尾矿综合利用及实例[C]//中国冶金矿山企业协会. 第六届全国尾矿库安全运行与尾矿综合利用技术高峰论坛论文集. 黄山:中国冶金矿山企业协会,2013:137 - 141,150.
- [8] 陈益民. 尾矿综合利用现状和存在的问题[J]. 有色冶金设计与研究,2018,39(6):123 - 125.
- [9] 徐名特,姜得男,阎赞,等. 某金矿氧化尾渣浮选试验研究[J]. 矿业研究与开发,2015,35(11):56 - 59.
- [10] 向鹏成,谢英亮. 尾矿利用的经济性潜力分析[J]. 矿产保护与利用,2002(1):50 - 54.
- [11] YANG D, ZENG D H, ZHANG J, et al. Chemical and microbial properties in contaminated soils around a magnesite mine in northeast China [J]. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(3): 256 - 262.
- [12] 沈立义. 大红山铁矿400万t/a选矿厂尾矿再选试验及初步实践[J]. 金属矿山,2008(5):143 - 145,148.
- [13] 周咏,田艳红. 研山铁矿综合尾矿再选试验及生产实践[J]. 金属矿山,2019(5):188 - 191.
- [14] 张宝丽. 某黄金矿山尾矿综合利用研究[J]. 有色金属(选矿部分),2000(1):41 - 43,22.
- [15] 袁致涛,马玉新,李庚辉,等. 某铁尾矿再回收铁矿物试验研究[J]. 矿冶工程,2016,36(4):37 - 40,44.
- [16] 唐志东,韩跃新,李艳军,等. 袁家村铁矿尾矿再选试验研究[J]. 矿产综合利用,2018(1):106 - 110.
- [17] LI C, SUN H, BAI J, et al. Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part I. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1): 71 - 77.
- [18] ZHAI J, WANG H, CHEN P, et al. Recycling of iron and titanium resources from early tailings: From fundamental work to industrial application [J]. *Chemosphere*, 2020, 242: 125178.
- [19] TANG Z, GAO P, LI Y, et al. Recovery of iron from hazardous tailings using fluidized roasting coupling technology [J]. *Powder Technology*, 2020, 361: 591 - 599.
- [20] SUN Y, ZHANG X, HAN Y, et al. A new approach for recovering iron from iron ore tailings using suspension magnetization roasting: A pilot-scale study [J]. *Powder Technology*, 2020, 361: 571 - 580.
- [21] 杨慧芬,李彩红,王传龙,等. 氧化酸浸-酒石酸络合法从铅渣选铁尾矿中回收镉铜[J]. 金属矿山,2015(9):175 - 180.
- [22] 郑强,边雪,吴文远. 盐酸浸出白云鄂博选铁尾矿中经钙化焙烧的稀土[J]. 金属矿山,2017(5):197 - 200.
- [23] CENG C, WANG H - J, HU W - T, et al. Recovery of iron and copper from copper tailings by coal-based direct reduction and magnetic separation [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2017, 24(10): 991 - 997.
- [24] 焦文亚,赵义,邵辉,等. 湖北某铜尾矿再选回收铜硫试验[J]. 金属矿山,2016(7):179 - 181.
- [25] LYU C, WANG Y, QIAN P, et al. Separation of chalcopyrite and pyrite from a copper tailing by ammonium humate [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2018, 26(9): 1814 - 1821.
- [26] CHEN T, LEI C, YAN B, et al. Metal recovery from the copper sulfide tailing with leaching and fractional precipitation technology [J]. *Hydrometallurgy*, 2014, 147 - 148: 178 - 182.
- [27] YIN S, WANG L, WU A, et al. Copper recycle from sulfide tailings using combined leaching of ammonia solution and alkaline bacteria [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 189: 746 - 753.
- [28] 王显军. 某矿山尾矿资源综合利用[J]. 中国金属通报,2018(12): 42 - 43.
- [29] 刘超,陈志强,罗传胜,等. 某铅锌尾矿回收重晶石选矿新工艺研究[J]. 化工矿物与加工,2017,46(11):11 - 13.
- [30] 程瑜,石富军,徐飞,等. 铅锌尾矿综合回收锌试验研究[J]. 中国资源综合利用,2016,34(2):36 - 39.
- [31] 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.
- [32] KHALIL A, ARGANE R, BENZAAZOUA M, et al. Pb - Zn mine tailings reprocessing using centrifugal dense media separation [J]. *Minerals Engineering*, 2019, 131: 28 - 37.
- [33] LIU Y, ZHANG Y, CHEN F, et al. The alkaline leaching of molybdenite flotation tailings associated with galena [J]. *Hydrometallurgy*, 2012, 129 - 130: 30 - 34.
- [34] LEI Y, ZHANG G, AI C, et al. Bioleaching of sphalerite by the native mesophilic iron-oxidizing bacteria from a lead-zinc tailing [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, 31: 554 - 559.
- [35] 张悦,林海,董颖博,等. 包钢稀土尾矿中稀土矿物的浮选再回收[J]. 金属矿山,2016(3):176 - 179.
- [36] 邓善芝,邓杰,熊文良,等. 某稀土尾矿综合利用技术研究[J]. 稀土,2018,39(4):77 - 85.
- [37] 严伟平,曾小波,杨耀辉. 四川某稀土尾矿综合回收利用的选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2019(4):9 - 15.
- [38] LAN X, GAO J, LI Y, et al. A green method of respectively recovering rare earths (Ce, La, Pr, Nd) from rare-earth tailings under super-gravity [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 367: 473 - 481.
- [39] ZHENG Q, BIAN X, WU W - Y. Iron recovery and rare earths enrichment from Bayan Obo tailings using Coal - Ca(OH)<sub>2</sub> - NaOH roasting followed by magnetic separation [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2017, 24(2): 147 - 155.
- [40] 罗立群,涂序,周鹏飞. 湖泥陶粒的制备及重金属固化研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(11):3397 - 3402,3408.
- [41] ZHANG Y, SHEN W, WU M, et al. Experimental study on the utilization of copper tailing as micronized sand to prepare high performance concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 244: 118312.
- [42] WANG X, YU R, SHUI Z, et al. Development of a novel cleaner construction product: Ultra-high performance concrete incorporating lead-zinc tailings [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196: 172 - 182.
- [43] GUO Z, FENG Q, WANG W, et al. Study on flotation tailings of kaolinite-type pyrite when used as cement admixture and concrete admixture [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, 31: 644 - 652.
- [44] WANG C, CHEN X - X, DANG C, et al. Preparation of ceramsite from C&D waste and baiyunebo tailings [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, 31: 211 - 217.
- [45] LIU T, TANG Y, LI Z, et al. Red mud and fly ash incorporation for lightweight foamed ceramics using lead-zinc mine tailings as foaming agent [J]. *Materials Letters*, 2016, 183: 362 - 364.
- [46] XI C, ZHOU J, ZHENG F, et al. Conversion of extracted titanium tailing and waste glass to value-added porous glass ceramic with improved performances [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261: 110197.
- [47] WEI B, ZHANG Y, BAO S. Preparation of geopolymers from vanadium tailings by mechanical activation [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 145: 236 - 242.
- [48] DUAN P, YAN C, ZHOU W, et al. Development of fly ash and iron ore tailing based porous geopolymer for removal of Cu(II) from wastewater [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(12): 13507 - 13518.
- [49] JIAO X, ZHANG Y, CHEN T. Thermal stability of a silica-rich vanadium tailing based geopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 43 - 47.
- [50] YANG C, CUI C, QIN J, et al. Characteristics of the fired bricks with low-silicon iron tailings [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 70: 36 - 42.
- [51] LI R, ZHOU Y, LI C, et al. Recycling of industrial waste iron tailings

- in porous bricks with low thermal conductivity [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 43 – 50.
- [52] SHI J, HE F, YE C, et al. Preparation and characterization of CaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> glass – ceramics from molybdenum tailings [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2017, 197: 57 – 64.
- [53] ZHENG W M, SUN H J, PENG T J, et al. Novel preparation of foamed glass – ceramics from asbestos tailings and waste glass by self – expansion in high temperature [J]. *Journal of Non – Crystalline Solids*, 2020, 529: 119767.
- [54] CHEN J, YAN B, LI H, et al. Vitrification of blast furnace slag and fluorite tailings for giving diopside – fluorapatite glass – ceramics [J]. *Materials Letters*, 2018, 218: 309 – 312.
- [55] GAO H, LIU H, LIAO L, et al. A novel inorganic thermal insulation material utilizing perlite tailings [J]. *Energy and Buildings*, 2019, 190: 25 – 33.
- [56] 狄燕清, 崔孝炜, 庞华, 等. 掺尾矿新型轻质建筑保温材料的制备 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2016(6): 66 – 69.
- [57] 牛艳宁, 孙小卫, 冯立新, 等. 尾矿综合利用产业化现状及前景展望 [C]//国家金属矿产资源综合利用工程技术研究中心. 2013' 全国矿产资源和产业“三废”的综合利用学术研讨会论文集. 南宁: 国家金属矿产资源综合利用工程技术研究中心, 2013: 3.
- [58] 周芸, 李永梅, 张仁礼, 等. 生物炭、木醋液对磷尾矿堆肥进程及磷活化的影响 [J]. *云南农业大学学报 (自然科学)*, 2019, 34(3): 509 – 515.
- [59] MU J, HU Z, HUANG L, et al. Preparation of a silicon – iron amendment from acid – extracted copper tailings for remediating multi – metal – contaminated soils [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113565.
- [60] LEI M, TANG L, DU H, et al. Safety assessment and application of iron and manganese ore tailings for the remediation of As – contaminated soil [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 125: 334 – 341.
- [61] 朱岩. 我国矿山土地复垦现状及对策研究 [J]. *国土资源*, 2019(6): 48 – 49.
- [62] 赵良庆, 潘利祥, 史利芳, 等. 矿山复垦及存在的问题 [C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会 2013 年学术年会论文集. 昆明: 中国环境科学学会, 2013: 6175 – 6179.
- [63] 甘德清, 杨福海, 王树国. 唐山中小型铁矿尾矿复垦试验 [J]. *金属矿山*, 1996(12): 42 – 44.
- [64] LI X, ZHANG X, WANG X, et al. Phytoremediation of multi – metal contaminated mine tailings with *Solanum nigrum* L. and biochar/attapulgite amendments [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 180: 517 – 525.
- [65] LIU B, WANG S, WANG J, et al. The great potential for phytoremediation of abandoned tailings pond using ectomycorrhizal *Pinus sylvestris* [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 719: 137475.
- [66] ZHANG X, LI M, YANG H, et al. Physiological responses of *Suaeda glauca* and *Arabidopsis thaliana* in phytoremediation of heavy metals [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 223: 132 – 139.
- [67] LI X, WANG X, CHEN Y, et al. Optimization of combined phytoremediation for heavy metal contaminated mine tailings by a field – scale orthogonal experiment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 168: 1 – 8.
- [68] 崔旭, 宋少先, 夏令, 等. 尾矿减量化关键技术研究及应用 [J]. *现代矿业*, 2019, 35(7): 161 – 165, 182.
- [69] CHU C, DENG Y, ZHOU A, et al. Backfilling performance of mixtures of dredged river sediment and iron tailing slag stabilized by calcium carbide slag in mine goaf [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 189: 849 – 856.
- [70] LIU B, GAO Y T, JIN A B, et al. Dynamic characteristics of superfine tailings – blast furnace slag backfill featuring filling surface [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242: 118173.
- [71] WAN R, KONG D, KANG J, et al. The experimental study on thermal conductivity of backfill material of ground source heat pump based on iron tailings [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 174: 1 – 12.
- [72] YIN S, SHAO Y, WU A, et al. Expansion and strength properties of cemented backfill using sulphidic mill tailings [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 138 – 148.
- [73] ZHENG J, SUN X, GUO L, et al. Strength and hydration products of cemented paste backfill from sulphide – rich tailings using reactive MgO – activated slag as a binder [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 203: 111 – 119.

## Present Situation of Comprehensive Utilization of Tailings Resources in China

YI Longsheng, MI Hongcheng, WU Qian, XIA Jin, ZHANG Binghang

*School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China*

**Abstract:** The paper introduces status of tailings resource briefly, and discusses the necessities of comprehensive utilization of tailings in the current economic development situation and environmental protection in China. Based on a large number of examples and data, the approaches of comprehensive utilization and current development status are described. The significant choice for mineral industry to achieve sustainable development is comprehensive utilization of tailings. Further research on the comprehensive utilization of tailings, combining the comprehensive utilization of tailings with environmental treatment, can not only realize good economic benefit, but also produce significant social benefit.

**Key words:** tailings; comprehensive utilization; building materials; tailings backfill

引用格式: 易龙生, 米宏成, 吴倩, 夏晋, 张冰行. 中国尾矿资源综合利用现状 [J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(3): 79 – 84.

Yi LS, Mi HC, Wu Q, Xia J and Zhang BX. Present situation of comprehensive utilization of tailings resources in China [J]. *Conservation and utilization of mineral resources*, 2020, 40(3): 79 – 84.