

综合评述

我国矿山尾矿利用技术及开发利用建议*

刘玉林^{1,2}, 刘长淼^{1,2}, 刘红召^{1,2}, 赵毅^{1,2}, 谭琦^{1,2}

(1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 2. 国家非金属矿资源综合利用工程技术研究中心, 河南 郑州 450006)

摘要:我国尾矿堆存和排放量巨大, 对环境、经济以及安全造成重大压力, 从尾矿的主要成分对尾矿进行分类, 梳理了我国在尾矿资源化、减量化和无害化技术及应用现状, 并对我国尾矿综合利用存在问题及需解决的问题提出了建议。

关键词:尾矿; 资源化; 减量化; 无害化; 综合利用

中图分类号: TD926.4⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2018)06-0140-05

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.06.027

Utilization Technology of Mine Tailings in China and Exploitation Suggestions

LIU Yulin^{1,2}, LIU Changmiao^{1,2}, LIU Hongzhao^{1,2}, ZHAO Yi^{1,2}, TAN Qi^{1,2}

(1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resource, China Academy of Geological Sciences, Zhengzhou 450006, China; 2. Mineral Resource Comprehensive Engineering Research Center, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: The huge stockpiles and emissions of mine tailings in China cause significant pressure on the environment, economy, and safety. This paper classifies tailings based on the main components of tailings, and reviews the current technology and application status of tailings resource utilization, reduction and harmlessness in China. Finally, some suggestions are put forward on the problems existing in the comprehensive utilization of tailings in China and the problems to be solved immediately.

Key words: tailings; resource utilization; reduction; harmlessness; comprehensive utilization

矿产资源作为人类生产、生活和社会发展的重要物质基础, 供给了我国经济发展过程中约85%的原材料。然而, 矿产资源在开发利用过程中, 70%以上的物质成为尾矿和废石等矿业固体废弃物, 这些尾矿和废石大量堆积, 不仅占用了土地, 浪费了资源, 还破坏了周边生态环境, 并造成安全隐患。

党的十九大报告中, 习总书记在“加快生态文明体制改革, 建设美丽中国”章节中, 明确提出“推进资源全面节约和循环利用”、“加强固体废弃物和垃圾处置”。党中央国务院在《关于加快推进生态文明建设的意见》中进一步部署了推进固体废弃物综合利用, 发展循环经济的任务。

2015年, 全国一般工业固体废弃物产生量32.7

亿t, 综合利用量19.9亿t, 贮存和处置量13.1亿t, 综合利用率仅为60.3%^[1]。2015年工业固体废弃物中, 尾矿为95 501万t, 粉煤灰43 785万t, 煤矸石38 692万t, 冶炼废渣33 903万t, 炉渣31 733万t, 尾矿、粉煤灰、煤矸石和炉渣的综合利用率分别为28.5%、86.4%、65.5%、91.5%和88.2%^[2]。尾矿是综合利用率最低的一种矿业固体废弃物。据统计^[3], 全国废石、煤矸石、尾矿总量超过600亿t, 截至2015年11月底, 全国正用或未治理的尾矿库累计量超过200亿t, 占地约67 000 hm²。尾矿中元素回收和规模化利用是未来重要的发展方向之一。

* 收稿日期: 2018-09-19

基金项目: 国土资源部行业公益专项项目(201511062)

作者简介: 刘玉林(1983-), 男, 湖北黄冈人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事矿业固废综合利用研究。

1 我国尾矿资源概况

“十二五”期间,我国尾矿年排放量高达15亿t以上。最新统计数据显示:我国堆存接近600亿t的尾矿和废石中,废石堆存量438亿t,75%为煤炭、铁矿和铜矿开采所产生的矸石和废石;尾矿堆存量146亿t,83%为铁矿、铜矿和金矿经选别后所排出的尾矿。“十二五”期间,我国尾矿排放增速明显,低于利用增速,但排放量仍高于综合利用量,且受矿业市场影响,尾矿利用增速较“十一五”期间出现了大幅下降^[4]。

1.1 尾矿的分类

尾矿的组成较为复杂,我国尾矿主要成分有石英、长石、石灰石、滑石、白云石、云母、高岭石、石榴石和绿泥石等。按照尾矿的主要组成成分,尾矿可分为以下5类:

(1) 以石英为主的尾矿

以石英为主的矿床主要有热液石英脉型矿床、伟晶花岗岩型矿床、沉积硅质砂岩型矿床以及变质沉积石英岩矿床,这类矿床经开采选别后所产生的尾矿中SiO₂的含量一般为60%~90%。常见如金矿和铁矿。石英脉型金矿是我国主要的金矿工业类型,其数量和储量分别占金矿床总数量和金总储量的50%以上^[5]。我国最大的高硅鞍山型铁矿,其尾矿中SiO₂含量可达83%,如本钢、鞍钢、首钢、太钢和唐钢等公司下属选矿厂排出的尾矿;据资料显示,鞍钢矿山公司尾矿库尾矿中的SiO₂含量在80%左右^[6-8]。

(2) 以长石和石英为主的尾矿

以长石和石英为主的矿床主要为稀有金属矿床,其类型有花岗岩型、伟晶岩型、细晶岩型、碱性岩型、长石岩型和风化壳型矿床,其经过选别后所排出的尾矿中Na₂O+K₂O可达4%~9%。如钾长石石英脉钼矿:凡台沟钼矿、纸房钼矿等^[9];斑岩型钼矿:吉林大黑山钼矿、河南南泥湾-三道庄钼钨矿^[10];钠长石-石英脉金矿:湘西合仁坪金矿^[11]等。

(3) 以碳酸盐为主的尾矿

以碳酸盐为主的矿床主要包含钙质碳酸盐型矿床和镁质碳酸盐型矿床,一般矿物成分为方解石、石灰石和白云石等,同时还含有黏土矿物。这类矿床的地质成因一般为热液碳酸盐型、胶体沉积型和生物化学沉积碳酸盐型的矿床。在我国广西、湖南和

广东三省碳酸盐岩地区,金属硫化物矿山经选别排出的尾矿分为四类:(1)方解石型尾矿,如车河和黄沙坪选矿厂排出的尾矿;(2)白云石型尾矿,如泗顶和古丹选矿厂排出的尾矿;(3)白云石-方解石混合型尾矿,如凡口选矿厂排出的尾矿;(4)铁白云石型尾矿,如老厂选矿厂排出的尾矿^[12]。

(4) 以硅酸盐为主的尾矿

硅酸盐为主的矿床主要包含高铝硅酸盐、高钙硅酸盐、碱性硅酸盐、钙铝硅酸盐、镁铁硅酸盐矿床,其主要矿物组成包括高岭土、铝矾土、硅灰石、透辉石、绿帘石、石榴子石、绿泥石、霞石、沸石、云母、橄榄石和角闪石等。在这类尾矿中一般同时富含石英。我国大多数的煤矸石中富含高岭土,其储量达180亿t,全球排名第一^[13];栾川洛钼集团炉场沟尾矿库钼尾矿中石榴子石含量在60%~65%等。

(5) 其他类型尾矿

除上述4种类型尾矿外,还有部分尾矿同时含有萤石、重晶石和石膏等矿物。如浙江平水铜矿尾矿中重晶石含量达到11.5%^[14];湖南省郴州市柿竹园钨钼矿尾矿萤石品位高达22.45%^[15]。

1.2 尾矿的危害性

尾矿的大量排放堆积,对资源、环境、生态和安全都形成了重大威胁。

(1)资源浪费:早期因选矿技术的落后和综合利用意识淡薄,大量有价值资源被遗弃到尾矿中。研究表明,我国安徽和江西等地区的铜尾矿具有再回选的经济价值,其尾矿量占全国铜尾矿的25%^[16]。截至2009年底,我国铜尾矿铜平均品位为0.077%,高于铜精矿价格在35000元/t时铜矿石开采的经济品位(0.07%);按2018年铜精矿市场价格为40000元/t左右行情,我国大部分铜矿山尾矿库的铜元素具有回收再利用的经济价值^[17]。我国现存黄金选矿尾矿约200多万t,可回收的黄金多达30t。此外,全国岩金矿山尾矿中金品位高达0.35g/t,其尾矿年损失黄金高达25t^[18]。目前,我国铁矿山年排放尾矿1.3亿t,铁平均品位11%,其铁年损失量达1410万t^[19]。

(2)侵占土地:据工信部《金属尾矿综合利用专项规划(2010—2015年)》数据,2005年我国尾矿堆存量为54亿t,占用土地达1300多万亩,截至2010年底,我国尾矿堆存量增长到为94亿t,占用土地面积达2300多万亩^[20]。此外,矿山开采造成大量的采空区、塌陷区所破坏的土地面积更大。据统计,我国矿山破坏的土地中,尾矿库和废石堆所占面积仅

占总面积的38% (分别为13%和25%),此外,采矿形成的采空区面积占总面积的59%,另外还有3%的处于塌陷危险区^[4]。

(3) 地质灾害:尾矿大量积存容易诱发次生灾害,严重威胁人民的生命财产安全,如尾矿库溃坝、排土场滑坡和泥石流。2008年9月,山西省新塔矿业有限公司尾矿库发生溃坝,造成277人死亡、4人失踪和33人受伤,直接经济损失达9 619.2万元。据统计,我国黑色矿山30%的尾矿库存在安全隐患^[21]。

(4) 环境污染:矿山尾矿严重破坏了土壤、植物、大气和水源等周边生态环境,矿区及周边区域空气粉尘飞扬,植物枯黄,土地沙漠化,水源酸化,并伴随刺激性气味,生态环境遭到严重破坏。尾矿中的硫化物、重金属离子、药剂等物质常常具有一定毒性,而且这些物质之间的相互作用会加剧对周边水源、土壤以及地下水的污染,并随河流迁移影响更大区域的生态环境。目前,我国因尾矿直接和间接污染土地面积超过1 000余万亩^[22]。

2 尾矿的资源化减量化技术

尾矿资源化和减量化是指将尾矿直接作为资源进行回收利用或者对尾矿进行再生利用,其方法包括尾矿再选和尾矿制备材料等。尾矿的资源化和减量化利用不仅可提高我国矿业开发综合利用水平,同时还可减少尾矿和废水等矿业固体废弃物的排放,减少矿业开发过程对环境的影响。

2.1 有价值组分回收

早期的矿业因市场行情低迷、设备技术条件落后、综合利用意识淡薄,大量的有价值元素及非金属矿被遗弃于尾矿中。通过选矿工艺技术升级或尾矿再选回收有价值元素与有用矿物,其经济效益明显,也是尾矿资源化和减量化的主要途径之一。

中南大学针对钨钼矿共生伴生磷灰石的特点,提出硫磷混酸协同分解钨矿及高效提钨的方法,不仅提高钨资源的综合回收率,同时实现废水全部回收,及有害钨渣的零排放^[23]。

张晋禄^[24]等人通过优先浮选硫化铜,然后硫化浮选回收氧化铜,采用三次粗选一次扫选两次精选的浮选流程,从云南某铜尾矿得到铜品位15.21%和回收率83.19%的铜精矿;马崇振^[25]对攀枝花某铁尾矿采用弱磁选—强磁选—螺旋溜槽重选—电选工艺,获得TiO₂含量47.33%、回收率为55.13%、

含硫0.15%的钛精矿;刘三军^[14]等人对浙江平水铜矿尾矿开展脱硫后浮选回收重晶石研究,获得硫酸钡品位为91.68%、回收率80.41%的重晶石精矿;黄伟生^[15]针对柿竹园钨钼尾矿开展回收萤石可选性试验,采用预先抛尾—浮选的混合流程,得到CaF₂品位97.22%、回收率55.06%的高品位萤石精矿。

江西铜业集团的德兴铜矿对含硫废石采用微生物浸出—溶剂萃取—电积方法,每年回收硫精矿1 000 t,铜9.2 t,金33.4 kg,产值达1 300多万元,铜、金和银的回收率分别为86.60%、62.32%和65.09%^[26];大冶有色公司丰山铜矿对尾矿采用重选—浮选—磁选—重选联合工艺再选,得到铜精矿、铁精矿、硫精矿,其品位分别为Cu 20.5%、TFe 55.61%和S 43.61%^[27]。

首钢水厂铁选厂采用磁选—磨矿—磁选工艺处理TFe品位10%左右的尾砂,每年处理尾矿787万t,生产TFe品位为66.95%的铁精矿28.8万t,回收金属量19.28万t,直接经济价值达2.3亿元;年减少尾矿排放量28.8万t,减少占用尾矿库库容9万m³左右,既产生了经济效益,又缓解尾矿排放对环境的影响^[28]。

2.2 制备建筑材料

尾矿在资源特征上与传统的建筑材料基本相近,主要化学成分为硅、铝、钙和镁氧化物,还有少量碱金属、钛、铁、硫氧化物,因此可以考虑进行整体利用。尾矿用作传统建筑材料,如水泥、混凝土砂石料、免烧砖、空心砖和加气砌块等,其市场需求量巨大,是尾矿的减量化、规模化消纳的主要手段。

尾矿作为建筑材料原料,无需破碎和其他处理,可节省能耗,降低成本。利用尾矿生产水泥,不仅能起矿化作用,还能够有效地提高水泥熟料的质量与降低能耗,达到高标号水泥要求,如凡口铅锌矿尾矿和东昌乐特种水泥厂利用当地铜尾矿生产水泥,月山铜矿利用尾矿制砖,年产量达2 000万块,产值100多万元^[26]。

山东金洲矿业集团有限公司利用金尾矿生产加气混凝土砌块、蒸压砖和多孔砖等建筑材料,实现3个黄金矿山生产尾矿零排放,此外,还消耗大量的库存尾矿,每年消耗库存尾矿12万t^[29]。

北京密云铁矿将每年排放的200多万t围岩和100万t尾矿制备成建筑骨料、建筑用砂、建筑砖和砌块等建材产品,产值高达5 000多万元;同时还消

耗了尾矿库库存近2 000万t,做到了尾矿的零排放,产生了巨大的社会和经济效益^[21]。

2.3 制备矿物肥料

部分尾矿含有磷、锌、锰、钼、钒、硼和铁等微量元素,不仅可改善土壤质量,促进植物生长,还可以作为土壤改良剂或微量元素肥料。目前国内用尾矿制备肥料的产品主要有磷复合肥、磁选尾矿复合肥料、钼锰锌硅铁等元素微肥以及混合肥等。某些含钙和镁组分的碱性脉石为主的尾矿可以用来中和酸性土壤,不仅可提供矿物元素作为营养物质,还能提高土壤孔隙率以及保水性能,促进植物成长。河南栾川钼尾矿无害化农用产业项目一期建设了100万t规模的钼尾矿无害化处理,年生产缓释肥60万t、土壤调理剂40万t;项目总投资3亿元,年综合效益达6~7亿元。

此外,尾矿中的二氧化硅通过煅烧,变成活性硅,而被植物吸收。沈宏集团利用多宝山钼矿尾矿中富含二氧化硅的特点,通过煅烧,再添加钙和镁等组分,得到合格的硅肥,并开展了作物的田间试验^[30]。

3 尾矿的无害化处置

通过对尾矿的无害化处置,使尾矿堆积体达到稳定状态,消除或最大限度减少尾砂对环境的污染,并以尾矿堆积体换取矿物或土地资源,从中获得经济效益、环境效益和资源效益。

3.1 尾矿充填

从20世纪50年代到90年代,矿山的充填经历了干式充填、水力充填、胶结充填以及膏体充填阶段。目前,地下硬岩采矿企业几乎都采用膏体充填工艺^[31]。截至2012年,美国、俄罗斯和德国等发达国家已实现尾矿井下全充填。

1965年,我国在冷水江锡矿山南矿首次采用了尾砂水力充填工艺,有效地减缓了地表下沉,控制了大面积地压活动,并推广应用于铜录山铜铁矿、招远金矿和凡口铅锌矿等矿山。目前,尾矿分级后作胶结充填的集料,其工艺技术较为成熟,在全国多家矿山应用^[32]。

3.2 矿山复垦

目前,国外发达国家对矿山尾矿库的复垦开展了大量的工作^[33];德国、俄罗斯、美国、加拿大和澳大利亚等国的矿山土地复垦率均在80%以上。近几年,迫于环保的压力,国内矿山企业越来越重视尾

矿库的复垦。

中条山有色金属公司对胡家峪铜矿的毛家湾尾矿库开展了复垦研究;并建立了4万m²的农业种植示范场^[34]。云南锡业集团采用基质改良方法对其金属尾矿库进行复垦,种植蜈蚣草并定期收割、焚烧,从灰分中冶炼回收有价金属。项目投资200万元,种植面积80亩,每年回收的砷124.8 kg/hm²,铅60.26 kg,铜14.08 kg,锌19.28 kg,经济效益达到693.5元/hm²^[28]。

4 尾矿利用存在问题

尾矿的综合利用在我国起步较晚,虽然发展迅速,并已取得了较大的进展,但是仍然存在着不少的技术难题,全面提高矿山尾矿综合利用水平仍然是一项艰巨的任务。

4.1 尾矿的基本特征数据不清

对尾矿和废石的粒度分布、组成成分、重金属元素含量等基本特征数据没有全面了解,一个尾矿库的尾矿服务年限高达十年甚至几十年,不同时期处理的原矿性质有一定差异;一般来说,从企业获取生产数据,可以较为全面地反映出尾矿的分布特征及组成,由于尾矿牵涉到安全问题,从企业获取详细的数据比较困难,同时早期的固体废弃物堆,生产数据缺失,难以获取全面的信息。

对尾矿和废石采集代表性的样品开展分析难度较大。一是选矿厂排放的尾矿不能代表整个尾矿库尾矿的基本特征;二是需要多个浅钻取样,成本较高,且难以取到尾矿库底部早期排放的尾矿,而采用深钻取样会破坏尾矿库的坝体,引发安全事故,是管理方不允许的。

4.2 缺失尾矿利用的科学合理分级分类及应用标准

不同类型的尾矿在粒度组成、力学强度、耐磨性、堆存稳定性和辐射强度等物理性质差别大,同时其有价矿物(元素)含量、有害矿物(元素)含量和利用技术条件等诸多方面,也存在较大差异。应该科学地对尾矿进行合理的分类分级,为尾矿利用、保护或者处置提供依据。现阶段,还没有与尾矿分级分类相对应的标准。由于采选冶技术进步,早期未综合利用的尾矿可能具备再选的价值,而对于现阶段产生的有价矿物(元素)含量低于入选原矿品位的尾矿,在未来也可能成为一种资源。我们应该对此制定相关的标准予以考虑。

4.3 尾矿利用途径单一,缺乏高值化利用的技术

尾矿堆存与排放量巨大,现阶段的利用途径主要以膏体回填和用作建筑材料为主,价值低、可利用区域半径小,企业无法获得较好的经济效益,消纳的积极性不足。尾矿制备的建筑材料,由于利润低,经济效益差,受制于运输成本,企业无力扩大利用区域半径,提高尾矿整体利用量。尾矿的大规模合理利用,不仅需要开展回填和建筑行业应用来实现规模化利用,同时也需要高值化利用技术来提高产品的附加值,提高综合利用经济效益,增强企业对尾矿消纳的积极性。

5 尾矿综合利用建议

(1)厘清尾矿资源属性,摸清尾矿资源家底。亟待对全国矿山尾矿资源进行调查评价,查清固体废弃物的堆存量、堆存位置、矿物组成和化学组成等综合利用特征;建立全国矿山尾矿数据库,为尾矿的综合利用提供数据支撑。

(2)建立尾矿分级分类方法及相应的应用评价标准,增大加强尾矿大宗利用和高值化利用关键技术研究投入。依据尾矿的资源属性、环境影响程度、开发利用技术条件等诸多因素,建立形成尾矿分级分类标准体系,做好资源的最大程度利用和保护;针对尾矿在建筑行业大宗利用开展应用标准研究,加强尾矿分级梯度利用、尾矿协同利用、尾矿高值化利用的技术研究,提升尾矿利用经济效益,拓展尾矿利用方式,扩大尾矿利用的区域半径,进而提高尾矿整体综合利用水平。

(3)加强政策引导与激励措施。管理层面需要全面考虑尾矿整体利用的经济效益和生态效益,充分考虑尾矿减量化、资源化和无害化处置带来的生态环境效益,出台固体废弃物减量化鼓励政策和措施;同时加强推广尾矿综合利用先进技术,建立尾矿整体消纳利用激励约束制度,引导企业加强资源的综合利用,提高尾矿资源化与减量化水平,推进矿业固体废弃物源头减量与循环利用。

参考文献:

[1] 环境保护部. 2015 全国环境统计公报[R]. 2016.
 [2] 佚名. 中国资源综合利用年度报告[J]. 中国经贸导刊, 2014(30):49-56.
 [3] 王海军, 薛亚洲. 我国矿产资源节约与综合利用现状分析[J]. 矿产保护与利用, 2017(2):1-5, 12.

[4] 宗编. 中国矿产资源节约与综合利用报告(2015)[N]. 中国建材报, 2015-12-11(003).
 [5] 邵军. 中国石英脉型金矿床地质特征[J]. 贵金属地质, 1998, 7(3):172-179.
 [6] 沈玉芬. 鞍山式铁矿尾矿综合利用现状[J]. 矿业快报, 2000(10):89-90.
 [7] 王运敏, 常前发. 当前我国铁矿尾矿的资源状况利用现状及工作方向[J]. 金属矿山, 1999, 271(1):1-6.
 [8] 陈虎, 沈卫国, 单来, 等. 国内外铁尾矿排放及综合利用状况探讨[J]. 混凝土, 2012(2):88-92.
 [9] 白凤军, 肖荣阁, 刘国营. 河南嵩县钾长石石英脉型钼矿床成因分析[J]. 地质与勘探, 2009, 45(4):335-342.
 [10] 郑明贵. 矿业技术经济学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2017.
 [11] 胡诗情, 彭建堂, 邓穆昆, 等. 湘西合仁坪钠长石-石英脉型金矿床的成矿流体研究[J]. 矿物学报, 2017, 37(Z1):93-105.
 [12] 雷良奇, 宋慈安, 王飞, 等. 桂北及邻区碳酸盐型尾矿的酸中和能力及酸化潜力[J]. 矿物岩石, 2010, 30(4):106-113.
 [13] 张峰玮. “十三五”煤系高岭土岩市场需求预测研究[J]. 煤炭经济研究, 2016, 36(11):6-10.
 [14] 刘三军, 王玉婷, 阮伟. 从铜矿尾矿中回收重晶石的实验研究[J]. 矿冶工程, 2008, 28(6):44-47.
 [15] 黄伟生. 柿竹园钨钼铋尾矿回收萤石可选性试验研究[J]. 湖南有色金属, 2013, 29(6):17-20.
 [16] 陈甲斌, 王海军. 铜矿尾矿资源结构与综合利用政策研究[J]. 中国矿业, 2012, 21(1):48-52.
 [17] 中国有色金属工业协会. 新中国有色金属工业 60 年[M]. 长沙:中南大学出版社, 2009.
 [18] 吴荣庆, 张燕如, 张安宁. 我国黄金矿产资源特点及循环经济发展现状与趋势[J]. 中国金属通报, 2008(12):32-34.
 [19] 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.
 [20] 陈赞. 我国尾矿问题分析与土地复垦综合利用[J]. 上海国土资源, 2012, 33(4):76-79.
 [21] 常前发. 我国矿山尾矿综合利用和减排的新进展[J]. 金属矿山, 2010, 405(3):1-5.
 [22] 王威. 内蒙古中西部地区尾矿综合利用战略研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2011.
 [23] 赵中伟, 陈星宇, 刘旭恒, 等. 新形势下钨提取冶金面临的挑战与发展[J]. 矿产保护与利用, 2017(1):98-102.
 [24] 张晋禄, 戈保梁, 伏彦雄, 等. 云南某尾矿中氧化铜矿回收试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2015(3):60-64.
 [25] 马崇振. 攀枝花某铁尾矿提钛降杂试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2016(5):74-78.
 [26] 尤翔宇, 姜平红. 尾矿综合利用技术研究进展[J]. 湖南有色金属, 2013, 29(2):63-67.
 [27] 张宏泉, 李琦缘. 铜尾矿资源利用现状及展望[J]. 现代矿业, 2017, 573(1):127-131.
 [28] 黄勇刚. 我国铁尾矿资源的利用现状及展望[J]. 资源与产业, 2013, 15(3):40-44.

势[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 776 - 779.

[23] 陈益民, 张洪韬, 郭随华, 等. 磨细钢渣粉作水泥高活性混合材料的研究[J]. 水泥, 2001(5): 1 - 3.

[24] 张云莲, 史美伦, 陈志源. 钢渣掺合料对水泥基材料渗流结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(3): 316 - 320.

[25] Rai A, Prabakar J, Raju CB, et al. Metallurgical slag as a component in blended cement [J]. Construction and building materials, 2002, 16(8): 489 - 494.

[26] 崔孝炜, 狄燕清, 南宁. 钢渣的机械力粉磨特性[J]. 矿产保护与利用, 2017(5): 77 - 81.

[27] 杨景玲, 闫文, 郝以党. 制订系列标准 推动钢渣“零排放”[J]. 工程建设标准化, 2014(2): 50 - 53.

[28] Faraone N, Tonell O G, Furlani E, et al. Steelmaking slag as aggregate for mortars; effects of particle dimension on compression strength [J]. Chemosphere, 2009, 77(8): 1152 - 1156.

[29] 甘万贵, 梁德兴, 赵青林, 等. 钢渣砂抗裂干混砂浆在工程中的应用研究[J]. 商品混凝土, 2011(5): 56 - 57, 72.

[30] 熊付刚. 钢渣代砂对砂浆的强度和工作性能的影响[J]. 建材世界, 2009, 30(1): 19 - 22.

[31] 姜从盛, 彭波动, 李春, 等. 钢渣作耐磨集料的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2001(4): 14 - 17.

[32] Wu Shaopeng, Xue Yongjie, Ye Qunshan, et al. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (sma) mixtures [J]. Building and environment, 2007, 42(7): 2580 - 2585.

[33] 施惠生, 李东锋, 吴凯, 等. 钢渣对水泥混凝土性能影响的研究进展[J]. 水泥技术, 2011(5): 29 - 34.

[34] 王强, 曹丰泽, 于超, 等. 钢渣骨料对混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(4): 1004 - 1010.

[35] 孙明霞, 姚永成. 试论粉煤灰钢渣高炉渣在修复渔业水域生态环境中的研究进展[J]. 中国水产, 2011(6): 47 - 48.

[36] 王中杰, 倪文, 伏程红, 等. 钢渣—矿渣基绿色人工鱼礁混凝土的制备[J]. 矿产综合利用, 2012(5): 39 - 43.

[37] 王晓曦, 邹汉伟. 液态渣显热回收技术现状及前景分析[J]. 铁合金, 2007(5): 34 - 36.

[38] 王晟, 岳昌盛, 陈瑶, 等. 钢渣碳化用于 CO₂ 减排的研究进展与展望[J]. 材料导报, 2016, 30(1): 111 - 114, 121.

[39] 赵青林, 周明凯, 魏茂. 德国冶金渣及其综合利用情况[J]. 硅酸盐通报, 2006, 25(6): 165 - 171.

[40] 雷云波, 张玉柱, 邢宏伟, 等. 转炉渣掺粉煤灰高温熔融消解游离 CaO 的试验[J]. 河北冶金, 2011(1): 8 - 11.

[41] 付贵勤, 朱苗勇, 徐红江. 提高转炉渣体积安定性的实验研究[J]. 中国冶金, 2007, 17(3): 30 - 33, 51.

[42] 黎载波, 赵三银, 贺图升, 等. 钢渣重构用调节材料高温体积稳定性及胶凝性能[J]. 韶关学院学报, 2010, 31(6): 67 - 70.

[43] 钱强, 刘国强. 还原钢渣用于水泥混合材的试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2007(6): 47 - 49.

[44] 吴龙, 郝以党, 岳昌盛, 等. 钢渣热闷处理及资源化利用技术[J]. 工业加热, 2016, 45(2): 46 - 50.

引用格式: 刘长波, 彭彝, 夏春, 等. 钢渣利用及稳定化技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2018(6): 145 - 150.

YUE Changsheng, Wang Sheng, XIA Chun, et al. The research progress of steel slag utilization and stabilization technology[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2018(6): 145 - 150.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn

(上接第 144 页)

[29] 王吉青, 王苹. 黄金生产尾矿综合利用的研究与应用[J]. 黄金科学技术, 2010, 18(5): 87 - 89.

[30] 谭宝会, 朱强, 陈莹, 等. 我国尾矿综合利用现状及存在的问题和发展对策[J]. 矿山机械, 2013, 41(11): 1 - 4.

[31] 王湘桂, 唐开元. 矿山充填采矿法综述[J]. 矿业快报, 2008, 476(12): 1 - 5.

[32] 王钦建, 石琳, 黄颖. 国内铅锌尾矿综合利用概况[J]. 中国资源综合利用, 2012, 30(8): 33 - 37.

[33] 胡月, 丁凤. 黄金矿山尾矿综合利用技术研究与应用新进展[J]. 黄金, 2013, 34(8): 75 - 78.

[34] 王儒, 张锦瑞, 代淑娟. 我国有色金属尾矿利用现状及发展方向[J]. 现代矿业, 2010, 494(6): 6 - 9.

引用格式: 刘玉林, 刘长淼, 刘红召, 等. 我国矿山尾矿利用技术及开发利用建议[J]. 矿产保护与利用, 2018(6): 140 - 144, 150.

LIU Yulin, LIU Changmiao, LIU Hongzhao, et al. Utilization technology of mine tailings in China and exploitation suggestions[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2018(6): 140 - 144, 150.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn