

铁矿废石综合利用研究进展

刘文宝¹, 张昊¹, 刘文刚¹, 王振², 佟柯霖¹

1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
2. 96854 部队工程项目管理室, 辽宁 沈阳 110819

中图分类号: X751 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2021)03-0118-08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.03.017

摘要 随着我国铁矿资源的不断开采,不可避免地产生大量废石,伴随着绿色矿山理念的深入,这些铁矿废石的处理及利用一直是各地矿山企业关注的热点和难点。当前,我国对铁矿废石的处理手段主要包括采空区回填、工程运用、回收铁矿石以及制备砂石骨料等多种方式。本文在介绍当前我国铁矿废石资源基本情况的基础上,综述了近十年来国内外铁矿废石资源的综合利用研究进展,以期为我国未来矿山废石处理问题的解决提供借鉴与参考。

关键词 铁矿废石;综合利用;采空区回填;砂石骨料;回收铁矿

钢铁被广泛应用于建筑、机械、道路、制造业和家电等各行业,是一种重要的金属材料,而钢铁工业的发展水平也被视为是一个国家综合实力高低的重要标志^[1]。据统计,作为钢铁冶金原材料的铁矿石其年均使用量已达到全球金属矿石总量的95%^[2]。我国是铁矿开采及生产大国,当前已探明的铁矿石储量占全球比例约13%,其产量长期稳居世界第一^[3-4]。在铁矿开采的过程中,无论是露天开采还是井下开采,都将产生大量的矿体表面围岩与不能作为矿石使用的夹石,即铁矿废石^[5]。而我国铁矿资源“贫、细、杂”的特点则进一步加剧了铁矿废石的排放问题^[6]。根据中国国土资源经济研究院发布的《中国矿产资源节约与综合利用报告(2015)》显示,中国废石堆存量达到438亿t,这对周边自然环境造成了严重的破坏^[7]。当前,我国铁矿开采产生的废石主要堆存在矿山的排土场内,而排土场的建造往往会消耗大量的人力和物力,也占用了大量的土地资源;同时,废石在排土场内的堆存还带来了一系列的安全与环境问题,其主要表现在排土场泥石流、植被破坏、土地退化、沙漠化、粉尘污染以及水体污染等^[8-9]。

2018年,我国自然资源部发布的《冶金行业绿色

矿山建设规范》中明确提出,矿山企业应对露天剥离的废石等固体废弃物进行资源化利用,安全处置率需达到100%,另外,要建全资源节约型、环境友好型的采矿方式,最大程度地减轻对自然环境的破坏,严格遵守减量化、再利用和资源化的原则,科学利用以废石为代表的固体废弃物,努力发展矿山循环经济。由此可见,废石堆存造成的资源浪费和环境危害等问题已引起我国政府的高度重视,开展矿山废石资源化利用已成为矿山企业绿色可持续发展的必然要求。

1 我国铁矿废石的基本概况

一般而言,铁矿废石主要包括花岗质条带状混合岩、混合花岗岩、辉长岩、麻岩和部分细粒闪长岩、大理岩等,力学性能稳定且强度较高,具有较大的利用潜能^[10]。在铁矿开采的过程中,不可避免地产生了大量的铁矿废石,据统计,我国每生产1t铁精粉平均需要排出5.82t左右的采矿废石^[11]。这些废石主要集中在鞍本地区、攀西地区、冀东地区和包白地区等重要的铁矿生产基地,目前,我国对于铁矿废石的利用仍处于较低水平,以2018年为例,我国共排放出铁矿废石约83 087.69万t,年利用废石约23 202.08万t,平均废石

收稿日期: 2021-05-13

基金项目: 辽宁省科技厅重大科技专项项目(2020020307-JH1/103-01)

作者简介: 刘文宝(1988-),男,山东临沂人,博士,副教授,主要从事矿物分选及固体废弃物综合回收利用研究, E-mail: liuwenbao@mail.neu.edu.cn。

通信作者: 张昊(1996-),男,广西南宁人,硕士研究生,主要从事固体废弃物综合回收利用研究, E-mail: 2231447037@qq.com。

利用率仅为 27.92%, 存在较大的提升空间^[12]。

2 铁矿废石综合利用技术研究进展

国内外对于铁矿废石的综合利用主要包括采空区充填、工程应用、回收铁矿石以及制备砂石骨料等多种方式^[13-14]。当前,已有不少矿山企业通过以上方式对铁矿废石的综合利用进行积极的探索与实践,并取得较为丰硕的成果。

2.1 采空区充填

自充填工艺诞生以来,以废石作为充填料进行采空区充填的技术工艺经历了三个发展阶段:一是将废石就近直接充填于采空区的干式充填阶段;二是以废石作为充填体粗骨料的胶结充填阶段;三是以废石-尾砂胶结充填为代表的高浓度充填阶段^[15-17]。

废石干式充填技术在国内的应用始于 20 世纪 50 年代,其凭借能在处理采矿废石的基础上一定程度地提升矿石开采率,而得到广泛地应用与推广^[16-18]。甘肃七角井铁矿通过合理有效的生产调度,将 2 020 m 中段及 2 085 m 矿山深部优先采掘产生的废石就近充填至采空区,实现了将铁矿废石全部回填至井下采空区的目标^[19]。东大山铁矿针对分段采矿法及矿体形态复杂造成的矿石回收率低等问题,提出了上向水平分层废石干式充填法并进行工业试验,通过采场短溜井向布置在穿脉内的矿车输送采掘废石,与之前的充填方式相比,东大山铁矿回采率从 49.25%~55% 提高到 83.6% 以上,取得巨大的经济效益^[20]。某铁矿通过相似模拟试验分析充填散体结构及流动特性,由此确定出最佳充填井尺寸为 3.5 m,散体自然安息角为 33.2°,合理充填井间距为 20 m,在此基础上进行废石干式充填,使采空区围岩承载能力得到加强,有效解决围岩冒落问题,增强顶板岩体的稳固性,保障了顶板矿石安全性和高效的回采^[21]。但是,废石干式充填法所具有的劳动强度大、生产能力不足的缺陷使其难以满足采矿业高速发展的需求,而低成本、工艺简单和高效率的胶结充填技术逐步走进人们的视野^[16-17,22]。

从充填体构成材料的角度出发,胶结充填方式一般有尾砂胶结充填与废石胶结充填。废石胶结充填最早出现于 20 世纪 70 年代的澳大利亚和前苏联等国,该技术主要通过向采空区内注入铁矿废石与水泥浆从而形成废石胶结充填体^[23]。与尾砂胶结充填相比,废石胶结充填体具有更高的抗压强度,其强度通常在 5~10 MPa 以上,适用于一些铁矿石品位较高、尾矿产量较少的矿山^[24-26]。乌克兰 Pivdenno-Bilozerske 矿区基于原先充填体强度不足及成本过高的情况,于 2001 年起采用废石作为粗骨料,以冶炼炉渣代替硅酸

盐水泥对采空区进行胶结充填,这种充填方式不仅大幅提升地下充填体的强度,还减少了采矿废石的倾倒量,实现了高品位铁矿石的高效开采^[26]。国内也有部分矿山使用此法进行铁矿采空区充填,如高阳铁矿及苍山铁矿^[27]。值得注意的是,虽然废石胶结充填在成本、工艺以及充填体强度等方面具有诸多优势,是当前胶结充填重要的发展方向之一^[23],但也存在着一些问题,如适用范围小、充填体接顶困难、对充填体的强度和稳定性缺少有效的监测方式与评价手段等,需要更多的专家学者在力学理论模型及充填模式方面开展进一步的研究工作^[22]。

随着充填技术的发展,为了进一步满足回采工艺要求及采矿成本与环境保护的需要,在胶结充填基础上,废石-尾砂胶结充填技术在 20 世纪 80~90 年代应运而生^[16-18]。广山铁矿探索了同步和分步两种废石-尾砂胶结充填方式,研究表明,两种废石-尾砂胶结物的强度要高于分层尾砂胶结物强度,该技术使得广山铁矿回采率由 70% 提升至 93%,贫化率由 30% 降至 5% 以下,大幅度延长了矿山的服役年限^[28]。结合我国铁矿石“贫、细、杂”的特点,废石-尾砂胶结充填相较于胶结充填在我国具有更强的适用性^[6],其充填料浆具有良好的稳定性、流动性和可输送性,形成的充填体强度满足采矿工艺要求,而粗粒级废石骨料的应用则可有效减少胶结剂的用量,降低充填成本^[23]。

废石充填具有工艺简单和成本低等特点,但因受到井下掘进量的限制,充填能力难以满足大规模开采的需求,因此常常作为其它充填方式的补充工艺^[27]。滇北铁矿二期工程 23# 矿体采用尾砂胶结与废石混合充填的方式,在废石充填时,两侧流出 2~3 m 的空间进行尾砂胶结充填,经估算该充填方式每年可节约水泥用量 1.8 万 t,尾砂用量 14.3 万 t^[29]。太平山铁矿对坡度较缓的区域进行了全尾砂胶结充填,而对于坡度较大,可以利用废石自身重力势能的区域进行了废石充填,从而大幅提升了工作效率,降低充填成本^[30]。大冶铁矿狮子山采区为解决尾砂不足的问题,在采空区实施废石充填与全尾砂胶结充填交替进行的充填方案,在保障充填效果的同时节省尾砂使用量,取得了不错的经济效益^[31]。

2.2 工程应用

铁矿废石在工程中的应用主要有修筑废石坝、尾矿坝、道路工程施工和填海造陆等。

2.2.1 修筑废石坝和尾矿坝

利用铁矿废石修筑废石坝和尾矿坝,不仅可以在一定程度上就近缓解废石堆存的问题,还能解决

尾矿的排放问题。

舞阳铁矿利用铁山庙采场废石,在尾矿库下游地区修筑了高于地面 35 m 的废石坝,该坝服务年限可达 3 a 左右,用以堆积 600 万 m^3 的采矿废石,在一定程度上解决了该矿山废石处理的问题^[32]。袁家村铁矿根据当地湿陷性黄土及毗邻排土场等特点,开发出一套集湿陷性黄土筑坝工艺和渗流控制技术为一体的全寿命废石筑坝技术,截至 2013 年堆存尾矿 1 700 万 m^3 ,取得了巨大的经济效益^[33]。鞍钢集团利用齐大山铁矿山废石积极开展尾矿坝扩容及筑坝工艺的试验研究,成功将风水沟尾矿库由 140 m 加高至 155 m,并修筑副坝十座;同时利用该工艺将大孤山球团厂尾矿坝由 150 m 加高至 180 m,据统计,仅大孤山球团厂尾矿库就消耗废石 360 万 m^3 ,节省征地及工程费用近千万元^[34]。

2.2.2 道路工程施工

随着我国经济的腾飞,各类道路的总里程飞速增长,而不容忽视的是我国对于路基材料,尤其是碎石的需求量也持续攀升。铁矿废石成本低廉,力学性能优良,在作为路基材料方面应用潜力巨大。

孙超铨最先探究矿山废石在道路工程上应用的可行性,指出矿山废石可在物理性质、力学性质和化学性质等检测合格的基础上用以生产修建高速公路所需的路基材料^[36]。宋殿林等对迁安磨盘山铁矿废石进行破碎处理后,将其中产率占 24% 的 -70 + 40 mm 粒级物料用作铺路石渣^[37]。李柏山通过振动给料筛对程潮铁矿废石进行筛分处理,将其中 40 cm 以下的废石经 PFQ1210 反击破碎机破碎为小块碎石、小石子和瓜子石后充作铺设铁轨的铁路道渣,达到了废石利用的目的^[38]。鞍钢集团利用齐大山铁矿废石作为路基材料铺设了两条试验路,结果表明,该试验路可满足 300 ~ 360 t 电动轮自卸卡车频繁停车和起动,路面结构强度满足坡道和弯道上行驶安全的要求,此外,该矿山还建成一座道路混铺块碎石加工基地,年产量 75 万 t,约 33 万 m^3 左右,满足了该矿山及周边地区道路工程对于合格路基碎石的需求^[35]。

2.2.3 填海造陆

作为一种新型的铁矿废石处理方式,利用铁矿废石进行填海造陆近些年来在我国的冀东以及海南地区进行了探索与实践。

海南省矿产资源较为丰富,已探明的矿种多达 56 种,拥有大型矿床 67 处,据海南省自然资源厅调查显示,铁矿是海南矿山废石排放量较大的主要矿种之一,其中,仅昌江县石碌铁矿排放的废石就达数亿吨之

多^[39]。为解决海南省废石堆存日益严重的问题,同时也为改善该省围填海石料严重不足的局面,石碌铁矿对废石进行了物理机械性能检测、放射性强度测试以及《围填海工程填充物质成分限值》校核,结果表明,铁矿废石饱和抗压强度基本在 120 MPa 以上,饱和抗剪强度及抗腐蚀性能良好,伽玛照射量率一般在 3.0 $\text{nc/kg} \cdot \text{h}$ 以内,满足《天然石材放射性防护分类控制标准》规定的范围,符合围海工程填充物质的基本要求^[40]。司家营铁矿为解决矿山排土场内铁矿废石大量堆存的问题,通过与当地政府协商,建设了一条集采场内汽车运输、岩石破碎站、胶带运输、岩石转运站、装车系统、火车运输、终端卸载站和填海造地为一体的完整体系,经由迁(安) - 曹(妃甸)铁路向唐山市曹妃甸沿海经济开发区供应填海造陆所需石料,这一系统的建成不仅能够减少排土场占地 410 万 km^2 ,还能为矿山获取每吨废石 0.5 元的资源费(仅 2019 年就创收 1 050 万元),同时也极大程度地解决了曹妃甸沿海工业区填海造陆的石料来源问题^[13,41]。

2.3 有价元素的回收

2.3.1 铁的回收

当前,我国钢铁行业仍面临着严峻的形势。一方面,国内生产的铁矿石远远不能满足钢铁企业的需求,需要大量进口铁矿石,对外依存度高^[3];另一方面,我国铁矿资源“贫、细、杂”的特点导致了大量的铁矿被排放到废石堆中,造成资源的严重浪费^[6,42]。因此,对废石中的铁矿回收利用就显得尤为必要。

当前,对于废石中铁元素的回收主要有干式预选及阶段磁选两种方式。干式预选是指对废石预先进行干式磁选,再将干选精矿返回选矿厂进行二次选别。干式预选具有工艺设备简单,处理量大等特点,因而在废石回收铁元素的过程中得到了广泛地运用。本钢南芬铁矿利用 CTDG1216 大粒度干选机对排土场内 -400 mm 的废石进行了磁选,回收的铁矿石品位可达 20% 左右^[43]。磁海铁矿将排土场废石破碎至 -12 mm 后,使用 3 台 LCG1021 粉矿干选机对废石进行磁选,经干式磁选机磁选后的废石其磁性铁含量由原来的 18.76% ~ 22.17% 提升至 25.86% ~ 31.63%,磁性铁回收率达到了 87.68% ~ 91.63%^[44]。本钢歪头山铁矿通过废石粗选及粗精矿再选试验对原有废石预选回收工艺进行改进,结果表明,采用废石筛分 - 筛下预选抛尾 - 筛分 - 筛下干选的生产工艺可使粗精矿铁品位提高 9.85 个百分点,精矿电耗降低 5.23 kWh/t ,经济效益十分显著^[45-47]。

通常情况下,铁矿废石中铁品位较低,其所含铁矿

的回收工艺常常面临着效益较低的问题。因此,干式预选常常被作为其他利用方式(尤其是制备砂石骨料)的辅助工艺对废石中的铁矿石进行回收。迁安磨盘山铁矿废石经颚式破碎机处理后通过磁滑轮选别出产率为3%、品位为22%~26%的铁矿石返回选矿厂回收^[37]。溪石铁矿废石在颚式破碎机破碎后进入磁滑轮进行选别,可以有效回收混料中的磁铁矿矿石^[48]。研山铁矿在废石制砂工艺的中碎作业后设置了干式磁选机,其中干选精矿返回选矿厂重新选别,而其余废石则进入后续制砂工艺,增加了经济效益^[49]。大石河铁矿将细碎后10~20 mm以及小于10 mm粒级的废石进行干式磁选处理,由此获得产率为3.96%、全铁品位为18.34%的铁矿石,成为该矿山新的经济增长点^[50]。

此外,部分铁矿山根据废石铁品位较高的特点开发出集磁选、磨矿和浮选等选别手段为一体的富集工艺。该工艺能够最大程度地将废石中的铁元素选别出来,实现铁矿资源的高效利用。徐州铁矿对下属镇北和吴庄两处铁矿废石开展了磨矿细度、弱磁选条件和强磁选条件探索试验,根据试验结果制定了一条干式磁选—磨矿—弱磁选—强磁选—脱水的废石磁选富集工艺,该工艺最终可获得产率3.50%、铁品位65%的弱磁选铁精矿,以及产率5.42%、铁品位35%的强磁选精矿,年利润总额达到了262.6万元^[51]。我国西部某铁矿对废石进行了磨矿细度、磁选以及反浮选的试验,最终确定了干式磁选抛废—阶段磨矿—阶段磁选—反浮选的工艺流程,并获得了铁品位为62.11%、回收率为61.68%、磷含量为0.05%的铁精矿,回收效果十分理想^[52]。河北司家营铁矿将该矿铁品位为18.79%的废石先后经干式磁选和湿式磁选抛尾后进行两段磨矿与阶段磁选,得到了铁品位为52.71%、回收率为48.50%的磁选混合精矿,随后又以NaOH为pH调整剂、淀粉为抑制剂、CaO为活化剂、MF为反浮选捕收剂,经1次粗选1次精选和2次扫选的反浮选,得到了铁品位65.97%、回收率43.27%的铁精矿,此研究对该类铁矿废石的回收利用具有一定的指导意义^[53]。虽然上述分选能够最大程度地提升铁的回收率,但是其复杂的工艺及废石中铁含量不高的特点往往会造成设备工艺成本较高,尾矿排放量较大等问题,因此对于该工艺的使用还需结合具体情况进行具体分析。

2.3.2 其他有价元素的回收

除了回收铁元素,部分选厂还对铁矿废石中所含有的磷、硫、铜、钒和钛等元素进行了回收利用,并取得了一定的研究成果。河北冀东地区形成了集钒、钛和

磷等元素为一体的铁矿资源综合利用示范基地,该基地的建成对于周边地区磷铁矿及钒钛磁铁矿的综合利用具有一定的示范引导作用^[54]。纪莹华等对承德某铁矿干选废石进行磁选和浮选探索试验,结果表明,对废石中-0.5 mm粒级的细颗粒进行“一粗二精一扫”开路选别后可回收 P_2O_5 品位为32.50%的磷精矿,实现资源的综合利用^[55]。王炬对某铁矿干式磁选抛废废石进行预先富集、跳汰选别、铜硫混合浮选和铜硫分离浮选等综合试验后,最终分别获得了铁品位为65.02%的铁精矿、硫品位为45.44%的硫精矿以及铜品位为18.80%的铜精矿,对于同行业铁矿山废石中有价元素的回收利用具有一定的借鉴意义^[56]。此外,在美国阿迪朗达克高地的氧化铁磷灰石矿床的废石中还检测出了高浓度的稀土矿元素,其回收仍有待进一步地探究^[57]。

2.4 生产砂石骨料

砂石骨料是生产生活中消耗量仅次于水的第二大天然材料,是混凝土等建筑材料中最重要的原材料,被广泛运用于建筑、道路、桥梁和水利等各大领域,截止2019年,全球砂石骨料产量已达到500亿t,中国是全球砂石骨料第一大生产国,2019年已达到188亿t^[58-59]。根据原材料来源的不同,砂石骨料可被分为机制砂与天然砂两种类型。当前,由于受到环境保护和资源储量等多方面因素的限制,天然砂逐渐难以支撑起我国每年近200亿t的砂石骨料需求量^[60]。因此,混凝土行业必须找到新的原料来替代天然砂,而便宜和存贮量庞大的采矿废石就具备良好的应用前景^[61]。

与天然骨料相比,铁矿废石储量大、强度高且力学性能稳定,因此在对铁矿废石各项指标检测合格的基础上将其用于制备砂石骨料,这不仅可以缓解天然骨料的供应压力,还能在一定程度上解决废石堆存过剩的难题,其具备较高的经济效益、环境效益和社会效益。

早在21世纪初我国就有专家学者对于将铁矿废石用于砂石骨料的制备开展了相关研究。张雷通过对高村铁矿废石的普氏硬度系数、密度及松散系数等物理和力学性质进行测量后,提出该铁矿围岩可用于生产混凝土粗骨料的设想,为铁矿废石的综合利用指明新的途径^[62]。龚树峰等总结了铁矿废石常见的自然类型,指出对于铁矿废石物理、力学、化学性质的检测可具体到含泥量、化学成分、坚固性、强度和密度等方面,并据此提出基于铁矿围岩性能检测的生产0~10、10~20和20~40 mm粒级石料的碎石加工工艺,为铁矿废石制备砂石骨料技术的研究与应用提供借鉴和指

导^[10]。

与此同时,越来越多的企业针对铁矿废石制备砂石骨料技术进行了积极地探索与实践。洛阳大华机械厂与北京路星公司以首钢密云铁矿废石为原料,开发出一条两段两闭路的机制砂石的生产流程,该流程利用该公司自行研发的 PFQ 系列强力反击式破碎机和 PL 立式冲击破碎机,将 350 mm 以下的铁矿废石加工成 40 ~ 0.15 mm 粒级的各种用途的砂石骨料,不仅降低了人工砂石的生产成本,取得巨大的经济效益,而且还解决了废石堆存占地引发的环境和安全等问题,为我国节约了大量的石料和土地资源^[63]。舞阳矿业基于铁古坑和铁山庙两处铁矿废石建成了年产 100 万 m³ 的石子厂,该厂可生产 5 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 31.5 mm 粒级粗骨料及 0.3 ~ 4 和 4 ~ 5 mm 粒级机制砂,并在机制砂生产工艺中加入了水洗流程,较好地解决了石粉含量过高的问题,使铁矿废石成为该公司新的经济增长点^[33]。

各类标准规范的制定及铁矿废石各项性质检测数据的提供有着重要意义。Gayana BC 等指出应对铁矿废石进行详细地检测,确保矿山废石的各项性能符合建筑工程的标准规范的同时,还要保障对环境及人类无害^[64]。Yellishetty 等根据美国试验材料学会制定的 ASTM C/109C 等标准对印度果阿邦铁矿废石的级配曲线、片状颗粒含量、压碎指标值和吸水率等性能进行检测,并与天然骨料一同进行混凝土养护的对照试验;检测结果表明,粒级为 12.5 ~ 20 mm 的铁矿废石适用于作为混凝土骨料使用,12.5 ~ 4.75 mm 的细粒级废石则适用于生产建筑工程的砂石;而养护试验则显示,相比于天然骨料,果阿邦铁矿废石作为骨料制成的混凝土有着更为优良的力学性能^[65]。

四川广元某超贫磁铁矿矿山对废石的密度和单轴抗压强度进行检测后,又根据公路桥涵技术规范 JT-GTF50-2011 对破碎至 16 ~ 4.75 mm(碎石)与 4.75 ~ 0 mm(机制砂)两个粒级的泥块含量、针片状颗粒含量、轻物质含量和压碎指标值等进行检测,最终设计出一条包括除泥、破碎、筛分和选粉的废石加工的工艺流程^[66]。

张发胜对酒钢铁矿废石进行物相、放射性、粒度分布以及化学成分的检测;并根据 JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》、GB/T 14685—2011《建设用卵石、碎石》、GB/T 14684—2011《建设用砂》等标准对废石破碎后制成的粗骨料(5 ~ 20 mm)与细骨料(0.16 ~ 5 mm)的压碎指标值、堆积空隙率、吸水率和针片状含量等指标进行检测,得出该铁矿废石可以用作生产粗骨料及机制砂的结论^[67]。

大石河铁矿依据《普通混凝土用砂、石质量及检验

方法标准》对公司排土场铁矿废石进行表观密度、吸水率、含泥量、有害物质、坚固性、放射性和压碎指标值等指标的检测,并对废石的颗粒级配进行监测分析;根据检测结果为大石河铁矿开发出一条年处理量 732 万 t 的建筑砂石生产工艺,可生产出 4.75 ~ 0.15 mm 粒级建筑砂及 20 ~ 10 mm 粒级的建筑砾^[49]。

山东苍峰铁矿利用某矿山的铁矿废石资源建成了一条处理量 2020t/h 的骨料生产线,该生产线在投产前对铁矿废石进行化学成分及国标 GB/T 14685—2011《建设用碎石》中规定的各项性能检测,并基于该铁矿废石 SiO₂ 含量及坚固性、岩石抗压强度较高等特性设计出采用颚式破碎机、圆锥破碎机与反击式破碎机相结合的破碎工艺流程。该骨料生产线可生产 20 ~ 31.5、10 ~ 20 和 5 ~ 10 mm 粒级的粗骨料,并利用生产粗骨料产生的 -5 mm 粒级物料经筛分、洗砂和磁选后生产 0.4 ~ 4 mm 细沙及 4 ~ 5 mm 粗砂。该生产线自 2017 年投产以来,生产出符合标准的粗骨料及机制砂,为废石的综合利用以及绿色矿山建设提供了借鉴^[68]。

2.5 其他方向的利用

2.5.1 制备高性能混凝土

近年来,部分专家学者对利用铁矿废石制成的砂石骨料开展了制备高性能混凝土的相关研究。陈杏婕等以密云地区铁矿废石为粗骨料,以单独磨细的钢渣为胶凝材料,再配合铁尾矿、水泥熟料和脱硫石膏磨制的混合料,加入水及碱水剂后制成高强度混凝土材料,其抗压强度可达 75.92 MPa^[69]。刘佳利用密云地区铁矿废石作为粗骨料,将其与尾矿、粉煤灰、脱硫石膏和水泥熟料等按照一定比例配合制成高性能混凝土材料,该材料在抗冻融及抗硫酸盐侵蚀等方面具有优异的性能^[70]。李斌斌等利用辽宁壹立方砂业提供的铁矿废石粗骨料代替天然骨料制备出符合需求且质量优良的 C30 混凝土叠合板,证明了铁矿废石在预制构件中大掺量应用的可行性^[71]。

2.5.2 制备环保材料

近年来,铁矿废石在制备环保材料中的运用也取得一定的实践。海南红石铁矿由于其废石内普遍含有选矿后残留的废渣,粉末状含量较高,因而在分选后将废渣用以生产环保砖^[39]。Bahareh Sadeghalvad 等从伊朗中部的 Choghart 铁矿废石中提取出交代岩并对其进行改性处理,在其基础上使其分别与 Mg-Al 及 Ni-Al 水滑石结合制成两种吸附材料,用以吸附污水中的硫酸盐,结果表明,两种吸附材料吸附过程为放热反

应,且吸附性能优良^[72]。Moon Young Jung 等对韩国 Yangyang 铁矿废石中的重金属元素含量进行了相关工程试验标准的检测,检测结果表明,重金属含量合格,在此基础上利用该废石代替细骨料可生产出 1 级非烧结环保砖,仅在原材料方面就节约了 30% 的成本^[73]。

2.5.3 制备其他材料

铁矿废石还可用作制备块砖和陶瓷材料等建筑材料。本钢集团现已建成年产量 6 万 m³ 的建筑砌块砖厂,可以生产各种规格的免烧砌块砖^[74]。杨航等将河北某铁矿废石破碎至 -2 mm 后与发泡剂和铁尾矿按照一定比例混合后烧制成型,结果显示,当废石用量为 45% ~ 60% 时,可以制成发泡效果优良的建筑外墙防火陶瓷保温材料,这为铁矿废石的精细化利用提供了新的思路^[75]。庄骏利用十八胺对酒泉钢铁公司废石场中的千枚岩废石样品进行了改性处理,改性后的废石力学性能优良,且在一定比例下与阻燃剂 DBDPE (十溴二苯乙烷) 及阻燃协效剂复配使用可制成阻燃性塑料填料,其阻燃效果可达 V-0 等级^[76]。

3 结语

目前,我国对铁矿废石的综合利用仍处于起步阶段,依然存在规模小、数量少和规范性不强等诸多问题。因此,一方面广大矿山企业要进一步深化和细化对铁矿废石工艺矿物学等基础性质的研究,在此基础上将制备砂石骨料与采空区回填、工程应用等铁矿废石利用方式充分结合起来,进一步加强对利用铁矿废石研发和制备高性能材料的力度,并努力把铁矿废石的综合利用与当地市场需求和政府发展战略等因素结合起来,从而实现铁矿废石综合利用的高值化、规模化和产业化。另一方面,政府部门应当加强对矿山企业尤其是中小型及偏远地区矿山企业的扶持力度,在完善相关法律法规和标准规范的同时给予这些企业更多资金上的帮扶,力争将铁矿废石综合利用相关技术推广开来,从而为绿色矿山的建设添砖加瓦。

参考文献:

- [1] 王海军,张国华.我国铁矿资源勘查现状及供需潜力分析[J]. 中国国土资源经济,2013(11):35-39.
- [2] RAMANAIDOU ER, WELLS MA. Sedimentary hosted iron ore[J]. Earth Systems and Environmental Sciences - Treatise on Geochemistry (Second Edition), 2014, 13: 313-355.
- [3] 石洪卫.浅议全球铁矿资源、供需、成本及定价权[J]. 冶金管理,2017(4):18-23.
- [4] 杨志强,高谦,蔡美峰,等.我国大型贫铁矿充填法开采关键技术与发展方向[J]. 矿业工程研究,2015,30(1):38-45.
- [5] 龙涛,刘太春,高玉宝.我国金属矿山固体废物污染及其对策分析[J]. 中国矿业,2010,19(6):54-56.
- [6] 韩跃新,孙永升,李艳军,等.我国铁矿选矿技术最新进展[J]. 金属矿山,2015(2):1-11.
- [7] 中国国土资源经济研究院.中国矿产资源节约与综合利用报告(2015)[M]. 北京:地质出版社,2015.
- [8] 李晓峰,龙涛.露采剥离废石资源化节约综合利用研究综述[J]. 有色金属(矿山部分),2007,59(2):14-16,34.
- [9] 陈明莲.矿山固体废物综合利用的几种途径[J]. 南方金属,2011(4):1-4.
- [10] 龚树峰,史学伟.铁矿废石及尾矿的综合利用技术[J]. 金属材料与冶金工程,2014,42(3):49-53.
- [11] 冯安生,吕振福,武秋杰,等.矿业固体废物大数据研究[J]. 矿产保护与利用,2018(2):40-43,51.
- [12] 武秋杰,吕振福,曹进成.我国铁矿大型资源基地开发利用现状研究[J]. 现代矿业,2020,36(8):113-115,138.
- [13] 王得志.铁矿山固体废料综合利用的实践及构想[C]//第十八届川鲁冀晋琼辽七省矿业学术交流会议论文集.中国金属学会:山东省科学技术协会,2011:43-48.
- [14] 张以河,胡攀,张娜,等.铁矿废石及尾矿资源综合利用与绿色矿山建设[J]. 资源与产业,2019,21(3):1-13.
- [15] 袁世伦.金属矿山固体废物综合利用与处置的途径和任务[J]. 矿业快报,2004(9):1-4,11.
- [16] 张生.充填采矿技术应用发展及存在问题研究[J]. 城市地理,2017(16):110.
- [17] 牛雷.矽石膏体充填开采充填体物理力学性质研究[D].邯郸:河北工程大学,2014.
- [18] 刘浪,方治余,张波,等.矿山充填技术的演进历程与基本类别[J]. 金属矿山,2021(3):1-10.
- [19] 赵永平,孙利,吴智平.矿山掘进废石充填采空区工艺探索与实践[J]. 世界有色金属,2019(13):163-164.
- [20] 马正位,乔登攀,魏学松,等.上向水平分层废石充填法在东大山铁矿的应用[J]. 有色金属(矿山部分),2009,61(3):3-5.
- [21] 曹建立,任凤玉,张东杰,等.某铁矿采空区治理技术研究[J]. 中国矿业,2019,28(2):86-90,96.
- [22] 戴水平.矿山废石(块石)胶结充填技术的发展与应用[J]. 华东科技:学术版,2016(8):5-14.
- [23] 王贤来,姚维信,王虎,等.矿山废石全尾砂充填研究现状与发展趋势[J]. 中国矿业,2011,20(9):76-79.
- [24] SIVAKUGAN N, RANKINE RM, RANKINE KJ, et al. Geotechnical considerations in mine backfilling in Australia[J]. Journal of Cleaner Production, 2006, 14: 1168-1175.
- [25] KOUPOULI JF, BELEM T, RIVARD P, et al. Direct shear tests on cemented paste backfill - rock wall and cemented paste backfill - backfill interfaces. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering [J]. 2016, 8: 472-479.
- [26] BAZALUK O, PETLOVANYI M, LOZYNSKYI V, et al. Sustainable underground iron ore mining in ukraine with backfilling worked-out area[J]. Sustainability, 2021, 13(2):1-18.
- [27] 柳小胜.中国铁矿床充填采矿实践[J]. 矿业研究与开发,2012,32(6):7-9.
- [28] 胡维,庄明营.上向分段废石尾砂胶结充填采矿法在广山铁矿的应用[J]. 金属矿山,2013(6):23-24,28.
- [29] 田占,厉洪涛.上向进路充填采矿法在镇北铁矿的应用及优化研究[J]. 现代矿业,2020,36(1):233-234.
- [30] 郭明明.太平山铁矿全尾砂充填系统的设计研究[J]. 矿业研究与开发,2015,35(2):9-12.

- [32] 何志义,姜维,楚立申. 废石充填在胶结充填中的应用[J]. 采矿技术,2017,17(4):22-23,56.
- [33] 文启付. 舞阳铁矿矿山废弃物综合利用探讨与实践[J]. 金属矿山,2007(11):133-134.
- [34] 米子军,赵锡铭,王海滨,等. 微细粒铁矿全寿命废石筑尾矿(库)坝关键技术研究与应用[J]. 中国冶金,2017,27(8):74.
- [35] 李荣海,朱万刚,赵俊英,等. 铁矿山剥岩废石综合利用[J]. 冶金设备管理与维修,2016,34(2):15-18.
- [36] 孙超铨. 废石利用的新途径[J]. 采矿技术,2005(1):11-12.
- [37] 宋殿林,张锦瑞. 迁安磨盘山铁矿资源综合利用[J]. 矿业快报,2006(7):69-70.
- [38] 李柏山. 程潮铁矿废石和尾矿的综合利用技术研究[J]. 环境科学与管理,2011,36(7):36-38.
- [39] 齐文涛,陈智伟. 海南岛矿山废石资源特征及综合利用研究[J]. 中国矿业,2019,28(2):40-44.
- [40] 刘朝露,齐文涛. 海南石碌铁矿废石资源特征及综合利用[J]. 资源环境与工程,2017,31(5):637-641.
- [41] 李欣,李俊华. 冀东司家营铁矿剥离岩土处置优化及填海造地实践[J]. 中国矿业,2010,19:205-207,216.
- [42] 任邦生. 试论从废石堆中回收矿石[C]. 中国实用矿山地质学(下册). 中国地质学会,2010:347-350.
- [43] 姚元. 南芬铁矿对损失于排土场混合矿石的回收利用现状及下步干选回收方案探析[J]. 本钢技术,2009(5):5-9.
- [44] 纪永东,王振刚,苑鲁疆,等. 干式磁选工艺回收磁海铁矿排土场中的铁矿资源[J]. 新疆钢铁,2015(2):57-58.
- [45] 李彬. 歪头山铁混矿废石中铁矿石的回收方案[J]. 金属矿山,2008(8):151-152.
- [46] 程永维. 歪头山铁矿排土场废石精选工艺研究及实践[J]. 金属世界,2014(6):58-63.
- [47] 程永维. 歪头山铁矿排土场废石预选试验[C]. 中国矿业科技文汇—2014,2014:666-667.
- [48] 张大勇,段海瑞. 大石河铁矿某排土场废石资源综合利用工艺研究[J]. 现代矿业,2020,36(9):162-163.
- [49] 李孟春. 浅谈露天开采磁铁矿剥岩混入矿石的回收及废石的利用[J]. 科技风,2014(5):81.
- [50] 李金朋,张成龙,王浩明,等. 研山铁矿排岩废石生产砂石骨料研究[J]. 现代矿业,2019,35(6):278-279.
- [51] 刘爱兴,吕永斌,安宏远,等. 某铁选厂废石的综合利用研究[J]. 现代矿业,2015,31(10):74-76.
- [52] 黄新. 我国西部某铁矿含铁废石选矿试验[J]. 现代矿业,2015,31(6):61-63.
- [53] 陈洲,杨任新,王炬,等. 司家营铁矿废石选矿工艺研究[J]. 金属矿山,2016(2):56-60.
- [54] 王应芳,于瑞杰,郭朝辉. 黑山铁矿矿产资源综合利用示范基地的建设实践[C]. 现代矿业杂志社,2013:5.
- [55] 纪莹华,肖晶晶,黄志营. 某选矿厂干选废石综合利用回收磷的试验研究[J]. 有色金属设计,2020,47(4):31-33.
- [56] 王炬. 某铁矿干抛废石中综合回收铁、硫、铜试验[J]. 现代矿业,2013,29(1):107-110.
- [57] TAYLOR RD, SHAH AK, WALSH GJ, et al. Geochemistry and geophysics of iron oxide-apatite deposits and associated waste piles with implications for potential rare earth element resources from ore and historical mine waste in the eastern adirondack highlands, New York, USA[J]. Economic Geology, 2019, 114(8): 1569-98.
- [58] 闫十一,刘骏,石巍,等. 2019 年美国骨料行业现状[J]. 中国建材科技,2021,30(2):77-83.
- [59] 郎营,都兴田. 新冠肺炎疫情对砂石骨料行业的影响分析[J]. 居业,2020(3):13-14,19.
- [60] 韩继先,肖旭雨. 我国骨料的现状与发展趋势[J]. 混凝土世界,2013(9):36-42.
- [61] BEDERINA M, MAKHLOUFI Z, BOUNOUA A, et al. Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 146-158.
- [62] 张雷. 高村铁矿围岩及尾矿综合利用的设想[J]. 矿业快报,2008(9):82-83.
- [63] 乔丽侠,宋喜民. 矿山废石综合利用新方法——人工砂石料[J]. 矿山机械,2004(4):13-14.
- [64] GAYANA B C, CHANDAR KR. A study on suitability of iron ore overburden waste rock for partial replacement of coarse aggregates in concrete pavements[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 431(10): 102012.
- [65] YELLISHHELLISHETTY M, KARPE V, REDDY EH, et al. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study-resources[J]. Resources Conservation & Recycling, 2008, 52(11): 1283-1289.
- [66] 赵利勤. 四川广元某超贫磁铁矿石高效利用研究[J]. 现代矿业,2020,36(8):154-156.
- [67] 张发胜. 铁尾矿废石资源化利用试验研究[J]. 甘肃冶金,2021,43(1):8-10,13.
- [68] 陈学云,王伟,王雁,等. 铁矿尾矿加工建筑石料工艺实践[J]. 山东冶金,2020,42(4):55-56.
- [69] 陈杏婕,倪文,吴辉,等. 全尾矿废石骨料高强混凝土的试验研究[J]. 金属矿山,2015(2):166-172.
- [70] 刘佳. 利用密云尾矿废石制备高性能混凝土的基础研究[D]. 北京:北京科技大学,2015.
- [71] 李斌斌,顾晓薇,陈林,等. 全铁矿废石骨料在混凝土叠合板中的应用研究[J]. 混凝土世界,2021(5):80-83.
- [72] SADEGHALVAD B, AZADMEHR A, HEZARKHANI A. A new approach to improve sulfate uptake from contaminated aqueous solution: Metal layered double hydroxides functionalized metasomatic rock[J]. Separation Science Technology. 2019, 54(4): 447-66.
- [73] AN YH. Recycling of the waste rock and tailings from Yangyang iron mine[J]. Journal of The Korean Institute of Resources Recycling. 2016, 25(4): 23-31.
- [74] 李铁. 本钢矿冶固体废弃物综合利用研究与产品开发[J]. 本钢技术,2008(1):36-37.
- [75] 杨航,申士富,刘海营,等. 铁尾矿和废石制备建筑外墙防火保温陶瓷材料[J]. 矿冶,2016,25(6):45-50,59.
- [76] 庄骏. 千枚岩型废石制备阻燃性塑料填料的研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2018.

Research Progress on Comprehensive Utilization of Iron Ore Barren Rock

LIU Wenbao¹, ZHANG Hao¹, LIU Wengang¹, WANG Zhen², TONG Kelin¹

1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Engineering Project Management Office of 96854 Unit, Shenyang 110819, China

Abstract: With the continuous exploitation of China's iron ore resources, it is inevitable to produce a large number of waste rocks. As the concept of a green mine is deeply rooted in the hearts of the people, the treatment and utilization of these iron ore waste rocks have always been a hot and difficult issue for mining enterprises. At present, the treatment methods for waste rock in iron ore mainly include goaf backfilling, engineering application, recovery of iron ore and preparation of sand and gravel aggregate. Based on the introduction of the basic situation of iron ore waste resources in China, this paper summarized the research progress of comprehensive utilization of iron ore waste resources in China and other countries in recent years, in order to provide a reference for solving the problem of waste rock storage in China in the future.

Key words: barren rock in iron ore; comprehensive utilization; goaf backfill; sand and gravel aggregate; recovery iron ore

引用格式:刘文宝,张昊,刘文刚,王振,佟柯霖. 铁矿废石综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(3): 118-125.

Liu WB, Zhang H, Liu WG, Wang Z, and Tong KL. Research progress on comprehensive utilization of iron ore barren rock[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(3): 118-125.

投稿网址: <http://kebh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kebh@chinajournal.net.cn