矿山废石对环境的污染及其综合利用研究现状

蓝卓越[1,2]，高天锐[1]，吕晋芳[1,2]，郑永兴[2*]

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院，云南 昆明 650093；
2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室，云南 昆明 650093

中图分类号：X751　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001－0076(2021)03－0126－06
DOI：10.13779/j.cnki.issn1001－0076.2021.03.018

摘要　在矿产资源开采过程中会产生大量不含矿的围岩和夹石，称为废石。废石是一种固体废弃物，一般以堆存的方式存放。随着我国对矿山环保要求的不断提高，废石的大量堆存及其造成的环境污染已成为现在亟需解决的问题。本文介绍了矿山废石堆存对周边水体、土壤和大气造成的危害，并指明目前这类废石的综合利用方式主要包括有价金属提取、工程化利用以及建材制造等，以期为后续矿山废石的无害化及资源化综合利用提供借鉴。

关键词　矿山废石；环境污染；综合利用；有价金属提取

随着我国工业的快速发展，我国对矿产资源的需求量和开采量逐年增加[1-2]。然而，在矿山开采过程中会产生大量不含矿或含矿量很低的围岩和夹石，称为废石。目前，我国矿山废石储存量达到数百亿吨，每年排放的废石量达到6亿t，其中最主要的来源为采矿剥离废石，每年排放量高达4亿t，其次为煤矸石和抛尾废石等[3]。按照我国《固体废物污染防治法》规定，堆存的废石属于固体废物。目前，这种废石主要采用堆存的方式处置，但是堆存过程中，由于风化与雨淋，使废石中有毒有害元素进入周边环境，从而造成二次污染。因此，矿山废石的安全堆置和综合利用已成为学者们的研究热点。

1　矿山废石对环境的污染

矿山废石的长时间堆存不仅占用大面积土地，而且会对周边水体、土壤和大气造成严重的二次污染[4-5]。

1.1　废石堆存对周边水体的污染

评估矿山废石对水环境的影响，是评估采矿环境的一个重点[6]。废石堆积的地方经过雨水冲刷之后，它的渗出液或浸沥液会渗透到地下水和流入河流中，对水环境造成严重的重金属污染[7]。康林刚等[8]对某钼矿废石场淋溶水检测发现，与污水出水标准对比，淋溶水中铜、镉和镍离子浓度严重超标，分别为192、5.21和4.88 mg/L。王俊桃等[9]对某有色金属矿山废石堆淋溶液取样检测发现，经过长期浸泡淋溶，淋溶液与废石发生了复杂的物理化学反应，其中的pH为5.58，SO_4^{2-}浓度589.30 mg/L，铁离子浓度0.797 4 mg/L，均超过国家排放标准。王芳等[10]对某矿山废石的浸出液进行检测发现，浸出液中镍和铜污染负荷率分别为25.05%和69.54%，均超过国家标准。针对废石造成的水体污染，目前常采用中和沉淀法、硫化沉淀法和生物法进行治理。

1.2　废石堆存对土壤和植被的破坏及带来的重金属污染

矿山废石的大量堆积会影响和侵蚀土壤夹层，造成泥石流。废石堆积占据了大量的土地，需要压占和清除裸露在地面的植物，大大减少了绿色植物的覆盖，破坏了生态平衡和损害土壤，减少了生物多样性[11]，并且废石堆存会对周围土壤造成重金属污染，存在放

收稿日期：2021－04－22
基金项目：国家自然科学基金青年项目(51904129)；云南省教育厅科学研究基金项目(2019J0037)；云南省基础研究专项(202001AU070028)
作者简介：蓝卓越(1976－)，男，博士，副教授，硕士生导师，研究方向：资源综合利用；E－mail：xingdakg@126.com。
通信作者：郑永兴(1986－)，男，博士，副教授，硕士生导师，研究方向：资源与环境；E－mail：yongxingzheng2017@126.com。

射性的废石会破坏土壤的环境有效性。张永康等[12]对青海某铜矿区土壤进行了重金属分析,利用内梅罗综合污染指数法和单因子指数法等评价了土壤污染状况,最后发现,废石堆区域土壤中砷、铅和铜含量分别为 13.67、20.20 和 18.00 mg/kg,超过国家土壤二级标准。张彬等[13]对广东某铀矿山的一个废石堆通过Q－ICP－MS 探定土壤中的放射元素和重金属元素的分布特征,并利用富集因子法对土壤进行污染评价,结果表明土壤中镉、铬、砷、铜、锌和镍含量分别为 1.39、11.40、2.24、11.30、21.20 和 4.78 μg/g,高于土壤环境质量标准,放射元素铀对土壤产生了显著的放射性污染。针对废石造成的土壤污染,常采用钝化修复技术、固化修复技术、化学修复技术和生物修复技术等进行治理。

1.3　废石堆存对大气的污染

煤矸石堆是一种人工建筑,内部具有较大的空隙,长期暴露在大气中会发生自燃现象,从而产生 SO_2、CO_2 和 H_2S 等有害气体[14－16]。据统计,常年自燃的煤矸石堆,每平方米燃烧将向大气排放 10.8 g CO_2、6.5 g SO_2 和 2 g H_2S,远超国家大气污染物排放标准[17]。此外,废石中含有的大量飞灰和粉灰渣等细微颗粒也会进入大气,对大气造成严重污染,例如含砷废石会在风化过程中产生三氧化二砷等有害气体[18]。张叶等[19]对某铀矿山废石堆积场周围的大气进行监测,发现周围致癌气体氡气浓度值为 72.35 bp/m^3,远超国家规定的限值。针对大气污染,常采用间隔堆存、密封堆存和种植植被等进行防治处理。

2　矿山废石的综合利用

矿山废石中往往含有少量的有价金属,因此具有一定的预富集价值。如果将废石中的有价金属再利用可一定程度提高资源的利用率。此外,废石中还含有大量的脉石矿物,如碳酸盐和硅酸盐等,这些矿物具有强度高、力学性能稳定的性质,可用作工程填充或建材原料,从而实现废石的最大化利用。目前,实现废石综合利用的废石种类主要包括铁矿废石、铜矿废石、金矿废石、铅锌矿废石、煤矸石和大理岩矿废石等。

2.1　有价金属提取

2.1.1　铁矿废石

铁作为现代工业的主要金属,主要来源是铁矿。但是我国铁矿资源匮乏,是亚洲三大钢铁进口国之一。因此,铁矿废石中铁资源的综合利用是势在必行[20－22]。铁矿一般采用露天开采、地下开采以及露天－地下联合开采方式,在采矿剥离和抛尾工艺阶段会产生大量铁矿废石[23]。

铁矿废石有价金属提取是指采用一定的技术对废石进行预处理,达到预富集的效果,然后通过磁选、浮选或浮选—磁选联合工艺回收废石中的铁元素[24]。目前,常用的预处理技术主要包括干式和湿式磁选预富集技术技术。磁滑轮和筒式磁选机是一种常用的干式预富集磁选设备。刘爱兴等[25]对徐州铁矿集团下属的镇北铁矿和吴庄铁矿的综合废石进行了再选回收研究。铁品位为 13.22% 的综合废石,利用磁场磁感应强度为 96～128 kA/m 的 φ500 mm 磁滑轮干选预先抛尾,然后通过弱磁选—强磁选—脱水筛分级工艺,得到铁品位分别为 65% 的弱磁精矿和 35% 的强磁精矿。黄新等[26]利用中磁筒式磁选机和强磁筒式磁选机对西部某铁矿废石先进行干式磁选抛废处理,然后采取磨矿—磁选—反浮选工艺,最终获得了铁品位为 62.11%、回收率为 61.68% 的铁精矿。目前,常见的湿式预富集设备主要为高梯度湿式强磁选机。陈洲等[27]对铁品位为 18.79% 的河北司家营铁矿废石进行回收,采取 φ350 mm×560 mm 的永磁干式磁选机进行干式预选抛尾,然后采取 LHGC－750 中细粒高梯度湿式强磁选机进行湿式抛尾,通过预先抛尾处理使废石中铁品位提高至 29.25%,然后对其进行磨矿—磁选—反浮选得到铁品位 65.97% 和回收率 89.21% 的铁精矿。此外,也有文献报道,可采用磁选技术对铁废石中的铁进行直接回收。韩京增等[28]直接采用两段强磁一段弱磁工艺对某选厂的抛尾废石进行回收,得到铁品位 60.05%、回收率 4.12% 的铁精矿。

2.1.2　有色金属废石

有色金属废石中含有一定量的有价金属,因此可通过一定的技术手段将其中的有价金属回收。铜矿废石作为有色金属矿山废石中最常见的,也是研究的热点。铜废石一般可以采取 X 荧光预选技术和浸出等进行预处理。刘明宝等[29]对红透山铜矿废石采取 X 荧光预选,当激发电压为 36 kV、滤光片数目为 9 片、给矿频率为 30 Hz、分离阈值为 0.11 时,可以获得铜品位为 1.10%、回收率 70.80% 的预选产品。此外,铜废石可直接通过湿法冶金工艺进行回收。永平铜矿为了处理铜品位 0.1% ～0.18% 的废石,利用堆浸—萃取—电积技术,建造了年产量 200 亿 t 的电积铜厂,产出电积铜 1 000 多 t[30]。范道炎等[31]对原生硫化铜占79.38%、次生硫化铜占 14.17% 的内蒙古某铜矿废石,采取 ZJ 微生物菌种进行 185 d 的浸出,然后对浸出液采用萃取—电积,最终铜回收率达到 27.02%。

除了铜矿废石之外,有关其他金属矿山废石的有

价金属提取也有许多相关报道,多数采用预先富集—富集产品再选技术。徐凤平等[32]对钨矿废石首先采取跳汰预先抛尾处理,废石预先抛除率达 59.68%,富集后的废石再进行破碎—磨矿—浓缩—浮选工艺得到 WO_3 品位为 65.48% 的白钨精矿。此外,部分金矿废石和锑矿废石可采取直接回收的方法处理。李建政等[33]对小秦岭金矿废石先采用预先富集和超前抛尾工艺提高废石品位,之后利用破碎—筛分—浮选—重选—全闭路试验工艺,得到回收率为 83.11%、品位为 24.16 g/t 的金精矿。徐其红等[34]利用筛孔 6 mm 筛子对经过粗细分级的福建某金矿废石进行筛分,筛上粒级占 19.45%,金品位为 0.19 g/t,对其直接氰化浸出,金浸出率为 84.21%;将其余 -6 mm 粒级的部分废石制粒,将粒团与剩余粉矿按 1∶1 混合后氰化浸出,金浸出率为 91.11%,最后总浸出率为 90.47%。刘英伯等[35]对江西德安锑矿选矿厂废石采用闭路破碎—磨矿—浮选(一次粗选、二次精选和二次扫选)—脱水工艺,得到回收率 28.3%、品位 53.8% 的锑精矿。

除了回收单一金属矿山废石以外,也可以对多金属矿山废石预富集处理,回收其中的有价金属。常用的预富集技术包括荧光分选、跳汰和螺旋溜槽选别等。牛珊等[36]对西部某矿区含铜、锌和锡废石采用 LPPC 多金属荧光分选机进行回收,经过一次分选,得到铜、锌和锡品位分别为 0.897%、1.556% 和 0.309%、回收率分别为 84.57%、84.54% 和 68.92% 的预富集精矿。洪永华等[37]对都龙矿区含铜、锌和锡废石先进行破碎筛分,然后对大颗粒废石进行光电选别,粗粒级废石进行跳汰选别,细粒级废石进行螺旋溜槽选别,成功预富集废石中的铜、锌和锡金属元素。除此之外,也有对多金属废石进行直接回收的案例,如毛竞等[38]对含铜 1.4%、含钴 0.5% 的刚果某铜钴矿废石直接采用浮选和高梯度强磁选技术处理得到氧化铜钴产品。

有色金属废石中可实现有价金属提取的主要包括铜矿废石、金矿废石、钨矿废石、锑矿废石和多金属废石等。对于这些有色金属废石多采用预富集—富集产品再选技术进行有价金属的提取。目前,常用的预富集技术有荧光分选、光电选别、跳汰和螺旋溜槽选别等。通过预富集技术处理后废石中的有价金属品位达到边界品位,然后采用传统的选别技术进行回收。

2.2 废石充填

废石用作采矿充填,不仅减小了废石的占地面积,而且可为企业降低经济成本[39]。目前,废石的充填已成为矿山固体废物处理的主流方案。而废石充填利用的方法为胶结填充法,是指以矿山废石作为充填的粗骨料,以水泥或砂浆填充块石间隙并将其胶结成一个整体,经过自淋或搅拌混合后充填采矿区。余超等[39]对猫场铝矿进行物理化学性质分析后,以废石作为粗骨料,水泥作为胶结材料,并通过强度配比试验,确定了废石、水泥和水的的最佳配比,结果显示该充填体 3 d 龄期抗压强度为 0.84 MPa,7 d 龄期抗压强度为 1.72 MPa,满足采空区回填要求。朱高杰等[40]以某矿山剥离废石作为充填骨料,复合硅酸盐水泥作为胶结材料,通过试验确定了最佳配比,并对其流动性和抗压强度进行了测试,结果显示其 15 d 龄抗压强度达到 0.68 MPa,能够满足充填要求。龚树峰等[41]为了避免运输成本过高和占地面积太大的问题,利用细砂胶结填充体将 4 万 t 质量检测达标的铁矿废石包裹,直接用于某大型铁矿山采空区回填。袁国斌等[42]将金川矿山废石与混合骨料的胶结充填体进行混合后发现,掺加 30% 的废石,胶砂比为 1∶4 时填充体的 3 d 和 7 d 龄期抗压强度分别达到 3.6 MPa 和 6.81 MPa,可用于填充采空区。

矿山废石除了对矿区采空区进行充填外,还能将废石用于其它填埋。刘朝露等[43]对海南石碌 5 个铁矿废石堆场进行成分分析,通过分析得出 5 个堆场废石均可作为第三类填海工程填充物质。煤矿废石也可直接填入地下空间和巷道等。郭振忠等[44]通过对许厂煤矿的煤矸石进行综合利用试验以及物性特征分析之后,将其回填于地表塌陷区以及一些裂缝,恢复土地面积 481.34 Km^2。赵霄等[45]对煤矸石的物理力学性能分析后,将其回填于淮北矿区铁路塌陷区以及填筑铁路路基。鞍钢集团利用铁矿废石对齐大山尾矿坝、大孤山球团厂尾矿坝进行填埋,同时也将部分铁废石破碎,对公路路面进行填埋[46]。

对于废石回填采空区,由于采矿风险很大,因此需要采取成熟安全的填埋工艺,一般采用废石胶结充填,能保证采空区填埋的稳定性和安全性。对于其它一些巷道、空地等填埋,工艺就较为简单,对废石进行一些简单的毒性、力学性能检测后就可以直接进行填埋。

2.3 制成建材

2.3.1 砂石骨料

由于多数废石都具备强度高、力学性能稳定的特点,因此废石可用来制成砂石骨料。现阶段,国内采用的工艺主要为将废石粉碎,然后通过筛分制成不同种类的砂石骨料[47]。龚树峰等[41]利用这一工艺将某铁矿废石制成各种建筑用石。采用颚式破碎机将直径大于 500 mm 的铁矿废石粉碎,并将小于 40 mm 的废石筛出,剩余物料进入圆锥破碎机再破碎和筛分,最后筛分得到粒径为 0.5 ~ 1、1 ~ 2、1 ~ 3、2 ~ 4.75 和大于

4.75 cm 的 5 种建筑砂石。石碌铁矿场对矿山废石进行了岩石物理力学试验测试,结果表明,所有的样品均可作为建筑石料[48]。文启付等[49]将舞阳矿业矿山废石通过破碎筛分等工艺将其制成建筑砂石,年产达到 100 万 m^3,创造了很高的经济效益。张大勇[50]等采取粗碎—预筛分—干选—筛分—风选工艺将大石河铁矿废石制成建筑砂石。顾敏等[51]将凡口铅锌矿废石经过智能选矿和跳汰脱除废石中的铅、锌和硫,然后经过无害化处理生产成为符合规定的砂石材料。

2.3.2　砖块水泥

煤矿废石用作建筑材料符合国家“节约能源,就地取材”的发展建材的方针。目前,利用煤矿废石生产免烧砖是一项很有前途的技术。由于地方对砖的需求量很大,铁法煤矿将小康煤矿和大兴煤矿的废石用来制作免烧砖,每年将 510 000 m^3 的煤矿废石转化为 32 亿块免烧砖,不仅降低了堆存面积和处理成本,而且获得了巨大的经济效益[52]。随着水泥用量的迅速增加以及石灰石和黏土等不可再生资源的减少,将矿山废石用来作为生产水泥原料[53]。张存仁等[54]对武家河大理岩矿山剥离废石进行分析,发现剥离废石中含有凝灰岩,由于凝灰岩中含铁比较稳定,且铁和铝比例符合生产低碱水泥的要求,因此,用其代替了硫酸渣和黏土产出水泥,并取得良好的效果。葛洲坝石门特种水泥有限公司将石灰矿山中的高镁废石进行分级处理,将其与石灰石按一定比例搭配,然后以一定比例煤炭和石油焦作为燃料进行熟料快烧,得到白度达 87% 以上的熟料;最后,将其与精选的高镁废石、方解石和石灰等进行混合研磨,制备出各项指标均符合国家标准的水泥[55]。刘连成等[56]以煤矸石作为原料,经过低温活化,形成矸石渣,然后将其与生石灰和晶种按比例混合后研磨,将研磨产品经过水热合成—低温焙烧—加入石膏后制得水泥。

2.3.3　混凝土

有学者研究表明,煤矸石的掺加可以使混凝土的抗压强度、耐性和抗冻性发生变化。因此,煤矸石混凝土是一项有前途的建筑材料[57]。Selguero 等[58]发现,利用煤矸石代替部分细骨料的混凝土抗压强度和抗弯强度分别比常规混凝土高 27.9% 和 21.3%。李永靖等[59]对利用煤矸石作混凝土可行性进行了探究,对其干燥收缩性能和抗冻性能进行试验,试验结果表明,采用煤矸石制作混凝土是可行的,性能均满足国家规范要求。除了煤矸石之外,针对铁矿废石,主要是将其与铁尾矿或铁矿尾砂等混合制成混凝土。刘佳等[60]将密云铁矿废石作为粗骨料,铁尾矿作为细骨料,将其混合制成混凝土,结果显示这种混凝土力学性能和耐久性能优异。王威等[61]将来源相同的铁矿废石与铁矿尾砂进行混合制成混凝土后,对其碱活性、物理力学性质、表面特性等进行了研究,结果表明其力学性能稳定,静载抗裂强度满足标准要求。另外也有文献提到镍矿废石也可制成混凝土,杨志强等[62]对金川矿山镍矿废石进行破碎,与胶结剂和外加剂等有机组合,可以制成满足强度要求的混凝土。

根据不同废石的力学性质、稳定性等,可以将废石制成砂石骨料、砖块、水泥以及混凝土等材料。

3　总结与展望

随着我国矿业的快速发展,矿山废石产生的数量越来越多。矿山废石的大量堆存不仅占用大面积土地,而且对周边水体、土壤和大气造成严重污染。因此,废石的安全处置和综合利用成了现阶段的研究热点。对于废石的综合利用主要研究对象包括铁矿废石、铜矿废石、金矿废石、煤矸石、大理岩矿和铅锌矿废石等。这些废石的综合利用的方式包括有价金属提取、能源利用、充填、工程化利用和制成建材等。废石的综合利用不仅避免了废石堆存造成的环境污染隐患,而且降低了资源的损失率,实现了变废为宝的目的。因此,对于废石的处置建议最大限度提高废石中有用矿物的利用率,提取后的废石可用于充填或制成建材。

参考文献:

[1] SYA B, HDA B, JC B. An evaluation of the supply risk for China's strategic metallic mineral resources[J]. ResourcesPolicy, 2020,70:101891.

[2] HENCKENS M, DRIESSEN P, RYNGAERT C, et al. The set - up of an international agreement on the conservation and sustainable use of geologically scarce mineral resources[J]. Resources Policy, 2016, 49:92 - 101.

[3] 李明立,原振雷,朱嘉伟. 矿山固体废物对环境的影响及综合利用探讨[J]. 矿产保护与利用,2005(4):38 - 41.

[4] KONG R, XUE F, WANG J, et al. Research on Mineral Resources and Environment of Salt Lakes in Qinghai Province based on System Dynamics Theory[J]. Resources Policy, 2017, 52: 19 - 28.

[5] WU J, JING H, YIN Q, et al. Strength prediction model considering material, ultrasonic and stress of cemented waste rock backfill for recycling gangue[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 123189.

[6] PEDRETTID, MAYER KU, BECKIE RD. Stochastic multicomponent reactive transport analysis of low quality drainage release from waste rock piles: Controls of the spatial distribution of acid generating and neutralizing minerals[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2017, 201: 30 - 38.

[7] LIU H, LIU Z. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China[J]. Resources Conservation & Recycling, 2010, 54(12): 1331 - 1340.

[8] 康林刚. 矿山废石场淋溶水的治理研究[J]. 中国矿山工程,2017,46

(5):14 – 16,72.
[9] 王俊桃,谢娟,张益谦. 矿山废石淋溶对水环境的影响[J]. 地球科学与环境学报,2006(4):96 – 100.
[10] 王芳,黄羽飞,张望,等. 硫化镍矿废石和尾矿中重金属排放特征与防治对策[J]. 有色金属工程,2014,4(1):57 – 59.
[11] 刘爱中. 矿山开发存在的生态环境问题及保护对策[J]. 科技经济导刊,2019,27(32):94.
[12] 张永康,曹耀华,高照国,等. 某铜矿区土壤重金属污染评价[J]. 有色金属(冶炼部分),2018(8):74 – 78.
[13] 张彬. 铀废石堆中铀钍及重金属对周边土壤环境质量的影响[J]. 世界有色金属,2017(21):283 – 286.
[14] 李兰. 堆积煤矸石的城市环境效应[J]. 中国地质灾害与防治学报,1992(4):8 – 15.
[15] 张伟,邬剑明,王俊峰. 煤矸石山自燃治理与灭火工艺[J]. 中国煤炭,2012,38(12):97 – 99.
[16] KOLKER A, ENGLE M, STRACHER G, et al. Emissions from Coal Fires and Their Impact on the Environment[J]. U. S. geological Survey, 2009 – 3084.
[17] 赵方莹,刘飞,巩潇. 煤矸石山危害及其植被恢复研究综述[J]. 露天采矿技术,2013(2):77 – 81.
[18] 杨娟. 矿山砷废石污染及其治理[J]. 工业安全与防尘,1992(5):2 – 3,7.
[19] 张叶,张雄杰,覃国秀. 某铀矿山废石堆场氡污染调查[J]. 铀矿地质,2017,33(3):174 – 177.
[20] F R A A, A C R G, A M V, et al. Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro – surfacing type cold asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2021, 266: 121020.
[21] DONG X, BA T L, HA T. Iron ore identification method using reflectance spectrometer and a deep neural network framework[J]. SpectrochimicaActa Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 248(10): 119168.
[22] DONG Y, LING GZ, MEI FL, et al. Does shipping market affect international iron ore trade – An equilibrium analysis[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 144: 102107.
[23] 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.
[24] 魏瑞丽. 钢铁工业主要固体废弃物资源化利用的技术现状分析研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.
[25] 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.
[26] 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.
[27] 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,2016,476(2):62 – 66.
[28] 韩京增,樊岩,荆龙,等. 难选铁矿抛尾废石中回收铁的试验研究[J]. 中国矿业,2011,20(9):95 – 98.
[29] 刘明宝,杨超普,阎赞,等. 红透山铜矿废石 X 荧光预选[J]. 有色金属工程,2016,6(2):48 – 51.
[30] 刘维阁. 浅谈矿产资源的综合开发与科学合理利用[J]. 中国金属通报,2008(44):36 – 37.
[31] 范道焱,伍赠玲,谢洪珍,等. 低品位含铜废石生物浸出试验研究[J]. 矿产综合利用,2019,216(2):115 – 119.
[32] 徐凤平,丁明胜,冯其明. 重 – 浮联合工艺在低品位钨矿选别中的应用研究[J]. 矿冶工程,2015,35(3):72 – 74.
[33] 李建政,王安理,范尚立,等. 小秦岭金矿区废石资源综合利用试验研究[J]. 矿冶工程,2010(06):51 – 53.
[34] 徐其红,何小民,孙忠梅,等. 福建某金矿排石场废石利用试验[J]. 金属矿山,2017(12):198 – 201.
[35] 刘英伯,陈光利. 锑废石浮选生产实践[J]. 有色金属(选矿部分),1986(6):56.
[36] 牛珊,王硕,张自江. 某矿区低品位矿石选矿试验研究[J]. 世界有色金属,2019,517(1):51 – 53.
[37] 洪永华,兰希雄,何庆浪,等. 都龙矿区废石资源综合回收有价金属研究实践[J]. 有色金属(选矿部分),2020(5):73 – 77,106.
[38] 毛竞,易运来,薛伟,等. 低成本浮磁联合新工艺在刚果(金)铜钴矿废石处理中的应用[J]. 现代矿业,2020,36(5):127 – 129.
[39] 余超,侯国权. 猫场铝矿废石胶结充填试验研究[J]. 现代矿业,2020,36(4):139 – 142.
[40] 朱高杰,焦鹏,辜志强,等. 某矿山尾砂及废石胶结充填试验[J]. 现代矿业,2018,34(10):12 – 14.
[41] 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.
[42] 袁国斌,杨志强,高谦,等. 废石 – 棒磨砂混合骨料胶结充填体强度试验[J]. 矿业研究与开发,2016,36(8):16 – 20.
[43] 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.
[44] 郭振忠,高强,李恩全,等. 矸石回填复垦技术在许厂煤矿土地治理中的应用[J]. 煤田地质与勘探,2019,47(z1):62 – 64.
[45] 赵霄,孙涛. 矿区煤矸石填筑铁路路基的应用[J]. 现代矿业,2007,23(2):77 – 80.
[46] 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.
[47] 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.
[48] 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):43 – 47.
[49] 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,2007,377(11):133 – 134.
[50] 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.
[51] 顾敏,罗里奥. 凡口铅锌矿废石生产建筑材料思路与成果[J]. 绿色环保建材,2021(1):3 – 4.
[52] FAN G, ZHANG D, WANG X. Reduction and utilization of coal mine waste rock in China: A case study in Tiefacoalfield[J]. Resources Conservation & Recycling, 2014, 83:24 – 33.
[53] 范文学,杨瑞华. 黑龙江省水泥用大理岩矿的剥离废石及覆盖层的综合利用[J]. 中国非金属矿工业导刊,2008,69(4):16 – 17.
[54] 张存仁,杨建康,李新,等. 矿山剥离废石在水泥生产中的综合利用[J]. 中国水泥,2017(4):122 – 123.
[55] 覃爱平,程海平,徐合林,等. 高镁废石在白水泥生产中的应用[J]. 水泥,2016(12):16 – 19.
[56] LIU L, ZHOU H. Coal gangue cement synthesized at low temperature[J]. New Building Materials, 2007(5): 4 – 6.
[57] LI J, WANG J. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 117946.
[58] SALGUERO F, GRANDE J A, VALENTE T, et al. Recycling of manganese gangue materials from waste – dumps in the Iberian Pyrite Belt –

Application as filler for concrete production[J]. Construction & Building Materials, 2014, 54(3): 363 – 368.
[59] 李永靖,张旭. 煤矸石骨料混凝土的耐久性试验研究[J]. 混凝土, 2016,38(7):1215 – 1219.
[60] 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.
[61] 王威. 全尾矿砂废石骨料制备高性能混凝土的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2014.
[62] 杨志强,王永前,高谦,等. 金川镍矿废弃物在充填采矿中利用现状与展望[J]. 矿产综合利用,2017(3):22 – 28.

Research Status of Environmental Pollution and Comprehensive Utilization of Mine Waste Rocks

LAN Zhuoyue[1,2], GAO Tianrui[1], LV Jinfang[1,2], ZHENG Yongxing[2*]

1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

Abstract: A large number of surrounding rocks and sandwiched rocks without minerals are produced in the process of ore mining, which are called waste rocks. Waste rocks are solid wastes which are usually stored in storage. With the continuous improvement of mine environmental protection requirements in China, the waste rock storage and its environmental pollution have become an urgent problem. This paper comprehensively introduces the comprehensive utilization status of waste rocks and the harm caused by mine waste rocks to surrounding water, soil and atmosphere. The comprehensive utilization methods of the kind of waste rocks are points out, which mainly includes valuable metal extraction, engineering utilization and building materials manufacturing. It can provide references for the subsequent harmless and resource comprehensive utilization of mine waste rocks.

Key words: mine waste rocks; environmental pollution; comprehensive utilization; valuable metal extraction

引用格式:蓝卓越,高天锐,吕晋芳,郑永兴. 矿山废石对环境的污染及其综合利用研究现状[J]. 矿产保护与利用,2021,41(3):126 – 131.
Lan ZY, Gao TR, Lyu JF, and Zheng YX. Research status of environmental pollution and comprehensive utilization of mine waste rocks [J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(3): 126 – 131.