

铁尾矿资源化利用现状与发展策略

张振国^{1,2}, 王月^{1,2}, 陈军典³, 高倩³

1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 阜新 123000

2. 辽宁省矿产资源绿色开发重点实验室, 阜新 123000

3. 辽宁省物测勘查院有限责任公司, 沈阳 110031

摘要 铁尾矿是我国目前现存规模最大的固体废弃物之一, 而且其堆存量还在快速增长。一方面铁尾矿的堆放不仅占用大量土地资源, 还存在不同程度的环境污染与安全隐忧; 另一方面, 铁尾矿也是一种宝贵的资源, 对其合理的综合利用, 可以实现变废为宝, 也可以实现最大限度的趋利避害。在分析铁尾矿利用现状的基础上, 通过对其利用方式的对比分析, 提出加强对铁尾矿资源利用的管理, 为铁尾矿的开发利用提供技术保障; 加强矿山企业铁尾矿高附加值资源化利用研究, 探索铁尾矿资源增效新途径; 以及吸引社会资本投入铁尾矿库治理、生态修复等可行性建议。

关键词 铁尾矿; 资源化利用; 现状分析; 对策

钢铁工业是我国国民经济发展的基础, 铁矿石则是钢铁工业的重要原料。我国铁矿资源禀赋较差、利用率较低、铁矿供需缺口扩大, 铁尾矿的综合利用已成为我国研究关注的热点^[1]。铁尾矿是铁矿石选出有用组分后剩余的固体废弃物, 我国每生产 1 t 精铁矿就要排放 2.5~3 t 的尾矿, 铁尾矿已成为我国产量最高的大宗固废之一^[2]。

大量堆积的铁尾矿既造成了资源的浪费, 也危害了周围生态环境安全。首先, 作为堆存铁尾矿的尾矿库会随着尾矿量的增加而增加, 这会导致大量的土地被占用, 并且铁尾矿库的运营所产生的费用

也会给国家和企业带来巨大的经济负担。且尾矿库受人为或环境因素的影响有溃坝和泄漏的危险, 近年来铁尾矿事故频繁发生, 为防范化解尾矿库风险, 应急管理部门对尾矿库的管理防范也提出了新的要求^[2-4]。尾矿的堆积时间往往会达到几十年上百年的, 尾矿中含有的大量重金属元素在地表径流、地下径流、大气扬尘、渗透、大气沉降等方式下, 会向着垂直和水平两个方向发生释放与迁移, 对周围的水体、植被、土壤等造成污染, 并通过食物链不断富集, 最终给人类造成严重的健康威胁^[5-6]。

铁尾矿对周围环境的影响是个持久的过程, 只

收稿日期: 2022-07-20; 修回日期: 2023-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972004); 河北省自然科学基金项目(E2019209339)

作者简介: 张振国, 教授, 研究方向为矿山地质、海洋地质和地球化学等, 电子邮箱: zzg035@163.com

引用格式: 张振国, 王月, 陈军典, 等. 铁尾矿资源化利用现状与发展策略[J]. 科技导报, 2024, 42(2): 90-103; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.02.009

有尾矿问题得到有效地解决,其周围的生态环境才能得到恢复,为解决这一系列问题,我国已颁布系列技术标准来推动铁尾矿的综合利用^[7]。本文主要整理了我国铁尾矿资源现状,深入分析了铁尾矿资源化利用的多种方式,并提出相关发展对策。

1 铁尾矿的特征

铁尾矿是矿业开采产生的废弃物,是工业污染的主要来源之一。铁尾矿的化学成分主要是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 和 MgO 等,主要矿物有石英、赤铁矿、方解石、白云石、长石等,不同地区的铁尾矿的化学成分有一定的差异,如表1^[8-9]所示。根据化学成分含量的不同,把铁尾矿主要分为以下5种类型,分别是高硅型铁尾矿,这类铁尾矿数量最多, SiO_2 的含量高达70%以上,一般不含其他伴生元素;高钙镁型铁尾矿, Ca 和 Mg 的含量特别高;高铝型铁尾矿,因 Al_2O_3 的含量高而有较高的利用价值;低硅钙镁铝型铁尾矿,这类铁尾矿中低 Ca 、 Mg 、 Si 、 Al 多伴生 Ga 、 Ni 、 Co 等稀有元素;多金属铁尾矿中则含有高价值的贵金属伴生元素^[10]。

表1 我国主要矿区铁尾矿组分(质量分数/%)

地区	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	文献
唐山	72.79	6.08	6.20	4.85	3.16	—	—	[8]
马鞍山	47.39	12.75	24.82	8.85	0.10	0.70	0.32	[8]
邯郸	31.98	6.49	10.23	30.77	13.84	0.81	0.83	[8]
包头	15.67	1.68	—	25.95	1.80	0.46	1.36	[8]
攀枝花	35.76	11.67	7.37	11.22	9.26	0.85	0.68	[8]
北京	59.30	13.50	4.30	2.00	1.70	—	1.50	[8]
遵化	58.76	11.84	10.41	5.14	6.11	1.62	2.71	[9]
辽宁	75.23	2.64	11.31	1.47	2.10	0.40	0.49	[9]
迁安	68.63	6.72	11.99	2.76	3.82	1.98	1.60	[9]

2 我国铁尾矿资源现状

我国铁矿资源储量丰富,储量位居世界第四。自2000年以来,国家经济的高速发展对钢铁工业的需求不断增高,导致钢铁主要原料铁矿石的消耗不断攀升,且我国铁矿资源贫矿多、开采成本高,受以上因素影响,国内铁矿石供应不能满足国内需

求,对外依存度急速上升^[1]。铁矿石在2014年的开采量达到高峰,产量为15.1亿t,2014年以后,受中国经济转型的影响,对铁矿石的需求开始有所下降,2020年我国铁矿产量8.7亿t,中华人民共和国自然资源部公开数据显示我国铁矿石近十年产量如图1所示^[11]。

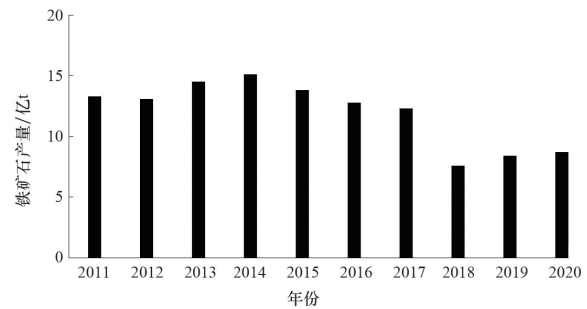


图1 2011—2020年中国铁矿石产量^[11]

2011—2014年,我国尾矿产量逐年增长,在2014年达到顶峰,随后开始下降,近几年尾矿产生量开始回升。其中,在尾矿总产生量中,铁尾矿比较其他尾矿占比最大,2017年,我国尾矿总产生量为16.16亿t,铁尾矿产生量为7.65亿t,占比47.34%;2018年,全国尾矿总产生量为12.11亿t,铁尾矿产生量为4.76亿t,占比39.31%;2019年,全国尾矿总产生量为12.72亿t,铁尾矿约为5.2亿t,占比40.9%;2020年,全国尾矿总产生量为12.95亿t,铁尾矿约为5.4亿t,占比41.66%^[12]。2011到2020年我国尾矿产生量如图2所示。

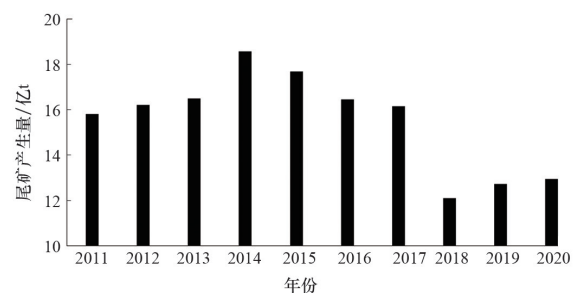


图2 2011—2020年中国尾矿产生量^[12]

1986年,我国通过并开始实施了《中华人民共和国矿产资源法》,将尾矿的综合利用纳入法律^[2]。随后,我国先后发布了大量关于铁尾矿利用技术及

产品的相关标准来推动铁尾矿的综合利用,为铁尾矿的治理提供相应的保障支持并且提高矿产资源的可持续利用^[13]。

3 铁尾矿综合利用现状

铁尾矿虽然在一定程度上威胁着生态环境但同时也是重要的资源,铁尾矿的再次利用不仅有益于环境效益也对经济效益产生影响。目前,我国铁尾矿的主要利用方式包括有价元素的回收、填充矿山采空区、作为建筑材料、作为土壤改良剂及肥料和尾矿复垦等。

3.1 铁尾矿有价组分回收

铁尾矿有价组分回收是提升铁尾矿高附加值利用的有效方式之一,不同地区的铁尾矿有着不同的伴生元素,在铁尾矿有价组分回收的研究中,不仅回收铁元素,也回收 Cu、Ni、Ti、Co、稀土等有价金属元素和硫等非金属元素以及云母石英等矿物^[14-15]。

铁尾矿再选技术目前主要有单一磁选、单一浮选,以及重选、磁选和浮选的联合技术,将尾矿磨细进行矿物解离,再利用铁与其他脉石矿物的磁性差别,通过磁选回收尾矿中的铁,但受粉磨后的部分细粒或微细粒形式的铁尾矿无法被磁选设备回收,可通过浮选进行下一步的回收^[16]。浮选法分为阴离子正、反浮选和阳离子反浮选,适合对细粒、微细粒物质的分选,可根据物质表面性质的不同,通过药剂分离出目标矿物,但正浮选适用于矿物组成简单的矿石,反浮选可适用于成分复杂的矿物,但对入选铁尾矿品位有一定要求^[17]。故采用多种选矿技术联合选别可提高目标矿物的品位和回收率。

铁尾矿粒度较细,在表面力作用的影响下铁尾矿的再选会受到影响,因此,对选矿技术的和选矿工艺的进一步研究可以提高矿石利用率。虽然从铁尾矿中提取有价金属元素可以在一定程度上消纳铁尾矿,但最终还是要二次排放铁尾矿,并且在提取过程中需要较高的技术支撑,提取成本也很高,所以铁尾矿有价金属的回收并不是大程度消纳铁尾矿的最佳方式。

3.2 作为建筑材料

铁尾矿化学成分与许多建筑材料的化学成分均有相似之处,有作为建筑原材料的潜质。目前将铁尾矿制备建筑材料已成为消纳铁尾矿的主要方式,以下研究均证明了铁尾矿制备建材方面的可行性。

3.2.1 制备水泥

铁尾矿中有较高的 SiO_2 、 Al_2O_3 等组分,与黏土成分相似,不仅可以作为水泥中的硅铝质原料,而且铁尾矿中的 Fe_2O_3 也可作为水泥中的铁质校正原料^[18]。

罗力等^[19]利用铁尾矿作为铝硅质原料制备硅酸盐水泥,在适当掺量下所制备的硅酸盐水泥熟料的抗折强度、抗压强度以及比表面积等物理性能均满足 42.5 号普通硅酸盐水泥指标,且未影响水泥的易烧性,在 1350°C 时,游离态 CaO 含量显著下降,生成大量 C_3S 。水泥的易烧性是水泥烧成的重要指标,直接影响着水泥的煅烧成本和制品性能,水泥熟料的 CaO 的含量能够代表水泥生料的易烧性。在水泥生料煅烧的过程中, CaO 会不断与水泥中其他组分发生反应,主要生成 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 和 C_4AF 矿物,为制品提供强度。因此,熟料中游离态的 CaO 含量越低,代表水泥生料更容易烧结^[20]。王宏霞等^[21]研究了铁尾矿代替铁矿粉作为铁质校正原料对水泥生料易烧性和水泥强度的影响,研究表明,在不同相对配比的铁尾矿和铁矿粉在不同温度下煅烧,游离态 CaO 的含量均没有明显的影响,且铁尾矿代替铁粉助于熟料矿相的发育,制备的水泥物理力学性能更高。

通过调控铁尾矿与其他原料的配比,可以制备出符合标准的水泥熟料,且不会阻碍水泥生料的易烧性,在一定程度上能促进水化产物结构的致密性,提高水泥的物理力学性能,降低水泥的煅烧成本,在制备过程中有效的减少能耗,利用铁尾矿制备水泥是消纳铁尾矿、减少矿山危害、高附加值利用铁尾矿的方式之一。但目前,受铁尾矿活性等因素影响,其掺量有一定的限制,掺量过低不能满足水泥生料对易烧性的要求,掺量过高会对水泥的易烧性起到反作用并且影响制品的性能,当作为水泥

原料使用时,最佳掺量在15%左右。

3.2.2 制备混凝土

1) 作为掺合料

混凝土是指由胶凝材料将砂、石等骨料胶结在一起的人工石材,铁尾矿可代替部分水泥作为混凝土的胶凝材料应用于混凝土中。随着铁矿资源的利用率的提高,铁尾矿在粒度上越来越细,在粒度上,可达到矿物掺合料的细度。在组成成分上,铁尾矿含中的 SiO_2 、 Al_2O_3 成分经过一定的活化处理后可激发火山灰活性,从而作为矿物掺合料应用于混凝土中,不仅可以提高混凝土的性能还可以节约水泥用料^[22]。激发铁尾矿的反应活性主要有机械活化、热活化和化学活化3种方式,其中机械活化则更加节能方便环保。机械活化的本质是在机械粉磨的作用下,粉末颗粒内部造成局部破坏,晶格缺陷,吸收机械能转为内能,以此激发铁尾矿活性。但随着粉磨时间的增长,颗粒之间的静电力作用使它们彼此之间的吸引力变强,颗粒表面发生团聚现象,机械研磨作用使颗粒被压实,比表面积开始变

小,密度也开始上升,铁尾矿的活性也因颗粒产生团聚下降^[23]。

经过机械活化的铁尾矿能与水泥熟料产生的水化产物发生二次水化。在水化反应中,水泥熟料中的 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF (铁铝酸四钙)等先发生水化反应,产生C-S-H凝胶、钙矾石、和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等水化产物,而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会与铁尾矿中的活性成分发生二次水化,继续产生C-S-H凝胶等水化产物,随着混凝土龄期的增长,不断为其提供强度。且铁尾矿经过机械粉磨后,粒度减小,在适当的掺量下可以发挥很好的填充效应,增加抗折抗压强度^[24]。

图3充分表明了不同铁尾矿掺量与不同磨粉时间对胶砂试件强度的影响,随着粉磨时间的增长,试件的抗折抗压强度呈现先增大后减小的特性,随着铁尾矿的掺量增加,整体可参与到水化反应中的物质降低,故试件强度开始呈下降趋势,如图4所示,在铁尾矿掺量30%时试件的抗折抗压强度开始急剧下降,因此最大掺量为30%,试样28 d的抗压强度可达到28.55 MPa^[25]。

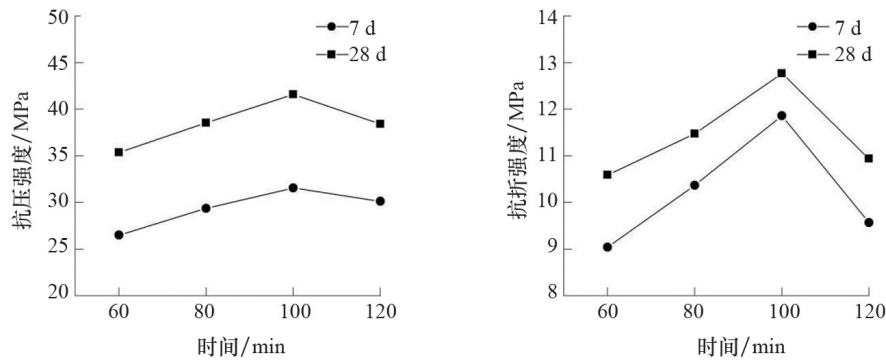


图3 不同磨粉时间与胶砂试件力学性能^[25]

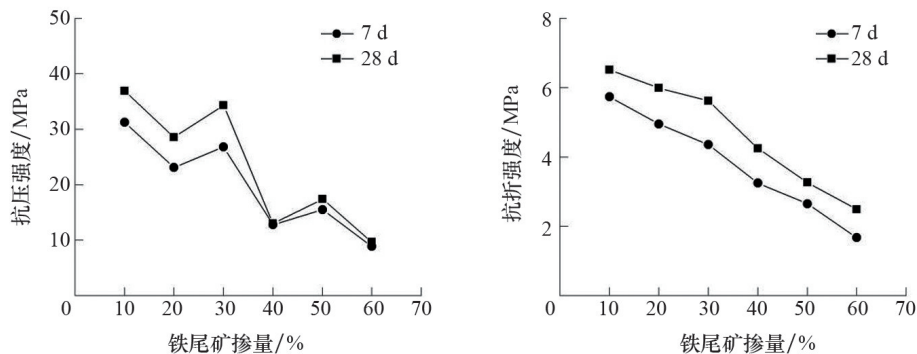


图4 不同铁尾矿掺量与胶砂试件力学性能^[25]

如图5和图6所示,表明不同铁尾矿掺量下的混凝土的碳化与抗硫酸盐腐蚀性能,将活化铁尾矿替代部分混凝土胶凝材料,随着混凝土龄期的增长,碳化深度逐渐增高,且铁尾矿掺量越高,碳化深度越高^[26]。这是由于铁尾矿中活性成分与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应造成碱性降低,反应程度带来的影响大于二次水化时产生水化产物的填充效应,虽碳化深度增高,但不同掺量下均满足标准要求;抗硫酸盐腐蚀性能随着铁尾矿的掺量增高而变高, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 易被硫酸盐腐蚀,在二次水化不仅消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,而且生成的水化产物也增加了混凝土的致密度,防止硫酸盐与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 接触。

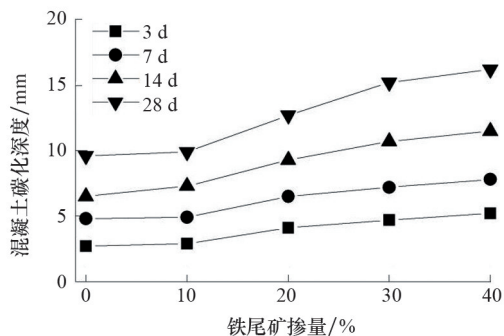


图5 不同铁尾矿掺量与碳化深度变化^[26]

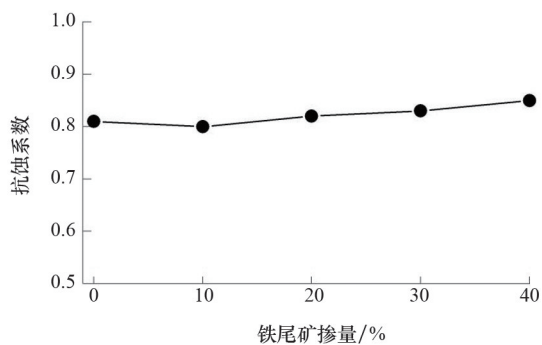


图6 不同铁尾矿掺量与抗蚀系数变化^[26]

经过机械活化后的铁尾矿具有作为胶凝材料应用于混凝土中的潜力,性能上能适当提高混凝土的抗折抗压强度,提高抗腐蚀系数,碳化深度虽然有所升高,但均满足标准要求;经济上,铁尾矿作为胶凝材料掺量有效提高并缓解了高品质矿物掺合料不足的现状,减少水泥的用量,有效提高了铁尾

矿的经济、环境效益。

2) 混凝土骨料。

骨料承担着混凝土支撑作用,分为粗骨料和细骨料。传统的细骨料一般为天然砂、机制砂等;而粗骨料一般占普通混凝土体积的40%~47%,主要是天然砂石、人工砂石等^[27]。铁尾矿砂石根据粒度不同可代替混凝土的粗骨料或细骨料。

较粗粒度的铁尾矿可被作为粗骨料应用于混凝土中。任才富等^[28]利用铁尾矿石制备透水性混凝土,并探讨了不同集灰比和掺入细集料下混凝土的力学性能和透水性能,实验证明了铁尾矿作为混凝土粗集料的可行性,且随着集灰比的增大,抗压强度逐渐减小,而透水系数逐渐增大,加入5%的细集料后可以增强混凝土强度。封孝信等^[29]将铁尾矿砂石分别取代天然砂和普通碎石,研究铁尾矿砂石分别取代和共同取代时混凝土的渗透性,实验表明,随着尾矿石取代率的增加,混凝土的渗透性逐渐降低,但随着尾矿砂单独取代或尾矿砂石共同取代时,随着取代率的增加,混凝土的渗透性均是先降低后升高,当取代率均在50%左右时,相对渗透系数最小。

近年来,对铁资源回收率的提升,铁尾矿粒度越来越细,难以作为粗骨料应用于混凝土中,多代替天然砂作为细骨料应用于混凝土中。天然砂是构成混凝土细骨料的必然组分,对天然砂的开采会造成河道生态的破坏,我国已经相继出台了很多关于禁止使用天然砂的政策,因此铁尾矿砂完全或部分代替天然砂将成为必然趋势^[30]。张建林等^[31]研究了铁尾矿替代天然砂的可行性,相比较普通混凝土来说,配合比优化的铁尾矿部分或完全替代细骨料制备的混凝土的抗压强度有所提升,坍落度也会随着铁尾矿的掺入量的升高而降低,并且坍落度幅度减小。

相比较天然砂颗粒的规则圆滑来说,经过制砂机破碎形成的铁尾矿砂的颗粒的表面不规则,多棱角,虽然能在使用时和水泥有更好的粘合力,更高的抗压强度,但过高的铁尾矿代替天然砂会使材料颗粒级配变差,影响混凝土的工作性能,故对铁尾矿的掺量有一定要求。张玉琢等^[32]将铁尾矿砂和

天然砂按照不同比例进行混合制备混凝土,实验表明,铁尾矿砂比例过高时,级配较差,铁尾矿砂与天然砂的质量比为1:1时,混凝土拌合物的和易性良好,28 d的抗压强度高于普通混凝土。张秀芝等^[33]将铁尾矿与机制砂质量比为6:4时,制备的高性能混凝土的新拌性能以及在各龄期的抗压强度都要高于河砂,耐久性也接近于河砂混凝土。

另外,铁尾矿因需水量较大,在混凝土中会产生更多的游离水,在东北等地区,混凝土中的游离水会因冻结体积变大,融化后体积变小,会导致结构松动;其次,受酸雨腐蚀影响,与混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,生成的产物体积较大,会使孔隙连通,而使耐久性降低^[34]。唐可等^[35]对铁尾矿砂制备的混凝土的性能进行研究,25%~50%的铁尾矿砂掺量下,均有利于混凝土的和易性和力学性能,并且铁尾矿砂可以有效地降低冻融及盐蚀对混凝土质量的影响,提高混凝土的密实性,抑制混凝土结构破坏。

铁尾矿多作为细骨料掺入到混凝土中,最高掺量为50%左右,过高掺入则会影响混凝土力学性能、耐久性及材料的流动性等,因此,对探究铁尾矿的最优形态将有望使铁尾矿完全替代骨料^[36]。

3.2.3 加气混凝土

加气混凝土是一种以硅质材料和钙质材料为主料,通过一系列工艺制备而成的一种多孔硅酸盐制品,由于加气混凝土有大量的气孔,这使加气混凝土有更好的性能,具有质轻经济、保温隔音等特点,铁尾矿中富含加气混凝土中所需要的硅质材料,我国利用铁尾矿为原料制作加气混凝土方面已经进行了大量的研究^[37]。

加气混凝土的蒸汽养护阶段分为静停养护阶段,和蒸压养护阶段;在静停养护阶段,主要发生水泥矿物的水化和石灰的消解,产生部分水化产物和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 放出大量的热量,为接下来的反应提供环境温度并创造碱性环境;在碱性环境影响下,铝粉会发生反应产生气体,为坯体提供气孔,但在制备过程中要注意铁尾矿的粒径,过小可能会导致未反应的颗粒形成较差的气孔,过大可能会导致气孔较少^[38]。在蒸压养护阶段,铁尾矿受高温高压,碱性

环境的影响,部分硅铝成分被活化,铁尾矿中和铝粉中的硅铝成分与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成水化硅酸钙凝胶和托贝莫来石等水化产物,大小均一、相互交织生长的托贝莫来石与水化凝胶产物紧密相连,填充在空隙中,形成庞大的网状结构,为坯体提供强度^[39]。

如图7所示,铁尾矿粒度与掺量对所制备的加气混凝土的性能起着重要作用,随铁尾矿掺量的增加,因托贝莫来石的产量先增大后减小,抗压强度也随之先增大后减小,但干密度随着铁尾矿的增加,水化产物空隙逐渐被填充,导致干密度增大,因此,要综合考虑铁尾矿的掺量对抗压强度与干密度的影响;铁尾矿粒度过粗或过细均会影响浆体的流动性,且会影响气孔的质量,粒度过细会导致浆料粘稠,无法提供所需的骨架而导致气体结构变差,粒度过粗会导致浆料流动性变差,浇筑时易产生气泡,故寻求合适细度铁尾矿,会增加比表面积,增强反应活性,制备符合标准加气混凝土^[40]。

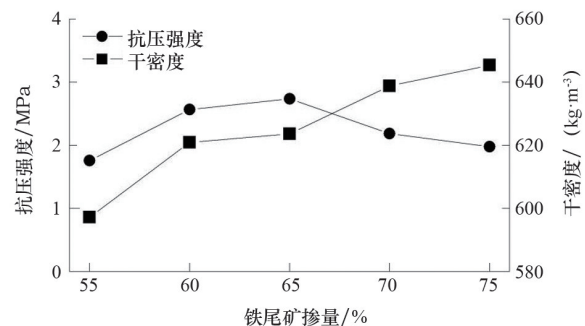


图7 不同铁尾矿掺量下加气混凝土的性能^[40]

受活性硅铝与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应而提供力学性能的影响,因此加气混凝土对硅质成分的含量有较高的要求,一般要求 SiO_2 含量>70%,并要求石英含量>40%,对于低硅铁尾矿来说,加适量硅砂便可制备满足性能的加气混凝土,使低硅铁尾矿有更广阔的利用途径。王长龙等^[41]在铁尾矿掺量40%,硅砂掺量20%下制备出抗压强度4.11 MPa的加气混凝土。

3.2.4 泡沫混凝土

泡沫混凝土又叫发泡混凝土,是由胶凝材料、矿物掺合料、骨料和外加剂等组成制成浆体,并通

过物理或化学方式将气泡加入到浆体中,生成孔隙均匀的保温材料,具有轻质环保、保温隔热、耐火防水等特点^[42]。

泡沫混凝土经浇筑后如果严重收缩会导致泡沫混凝土发生开裂,所以收缩率是泡沫混凝土的一个重要指标。赵苏等^[43]对不同掺量铁尾矿取代水泥制备的泡沫混凝土的收缩率进行研究,实验表明,随着铁尾矿掺量的增大,收缩率先降低后增高,最佳掺量为30%。这是由于尾矿颗粒起初起到骨架作用,可以限制干缩,但随着掺量的增加,浆体的流动性变差,结构被破坏所引起的收缩率上升。如图8和图9所示,铁尾矿的掺入还可以改善泡沫混凝土的力学性能,随着铁尾矿的掺量增大,泡沫混凝土的力学性能呈现着先增大后减小的趋势,可在一定程度上弥补水泥硬化强度小的问题^[44]。

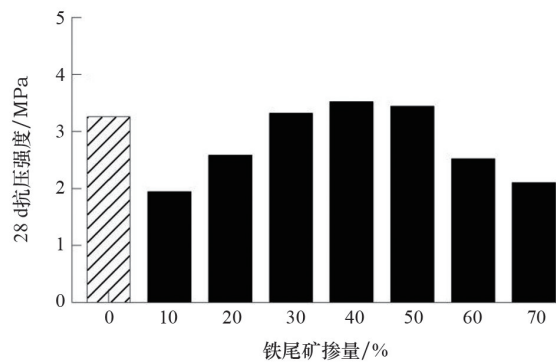


图8 不同铁尾矿粉掺量对抗压强度影响^[44]

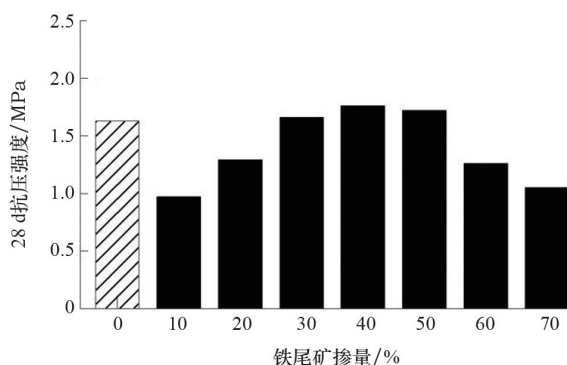


图9 不同铁尾矿粉掺量对抗折强度影响^[44]

掺入铁尾矿的泡沫混凝土可作为砌块、板材等建筑材料,但铁尾矿的掺入有极值,与铁尾矿粉、双

氧水、水灰比及减水剂等因素均有一定关系^[45]。泡沫混凝土是一种新型的建筑环保材料,在制备的过程中既不会产生污染环境的废液,也能实现铁尾矿的资源化利用,满足生态环境和建筑使用两大要求。

3.2.5 建筑用砖

1) 制砖。

我国的传统建筑用砖的原材料主要为黏土,为了保护我国的土地资源,黏土逐渐被我国禁止开采,人们开始寻找新的材料来代替它,主要为粉煤灰、煤矸石、铁尾矿、页岩等。铁尾矿中的 SiO_2 、 Al_2O_3 等成分与黏土成分相似,可以利用铁尾矿等工业固废制作烧结砖,但使用这些替代材料来制作烧结砖时,由于它们的可塑性不高,所以还是要加入一些黏土来满足烧结砖的可塑性。

探究烧结砖的烧结机理对铁尾矿的进一步利用有着重要作用。在烧结初期,铁尾矿制作的坯体会随着温度的升高失去结晶水、结构水、吸附水,其次,坯体中的方解石和碳素等也会分解生成二氧化碳气体挥发,导致坯体失重,随着温度进一步升高,部分矿物晶格被破坏,形成非晶态物质填充于固态颗粒之间,固态颗粒在表面张力的作用下逐渐靠近,坯体孔隙减少逐渐致密化,冷却后形成坚硬的烧结体^[46]。

不同地区的铁尾矿中的化学组成不尽相同, SiO_2 的含量过高会导致可塑性的降低, Al_2O_3 的含量过高会导致烧成温度过高, SiO_2 与 Al_2O_3 的含量过低则不能形成足够的莫来石相,不能为烧结砖提供相应的强度,故硅铝比最好维持在2.5以上^[45]。对于低 Al_2O_3 、 SiO_2 的铁尾矿在制砖时,可添加一定比例的粉煤灰来弥补其成分的不足。 K_2O 、 NaO 可起到助溶剂的作用;铁尾矿中的氧化铁有助于降低烧结温度,并且氧化铁的含量对砖体颜色也有一定影响,在相同条件下,增加铁尾矿的量会使颜色加深^[47]。陈秀峰等^[48]在制备海泥烧结多孔砖时对泛霜程度进行分析,证明铁尾矿优于粉煤灰的原因之一也是因为氧化铁降低了烧结温度,使固相反应中的液相量变高,增加了坯体的致密性,因而减轻了泛霜程度。

铁尾矿制备烧结砖时,烧结砖的原料配比以及制作工艺对烧结砖的性能有很大影响。如图 10 所示,受铁尾矿可塑性低的影响,铁尾矿不能完全取代黏土等原料的含量,且掺量有极值,随着铁尾矿掺量的增加,烧结砖试件抗压强度逐渐降低,吸水率也逐渐降低,但均符合《烧结普通砖》(GB/T 5101—2003)的标准,在 45% 的铁尾矿掺量、1000 °C 的烧成温度、120 min 的保温时间下能够制备出标准中 MU20 要求的制品^[49]。

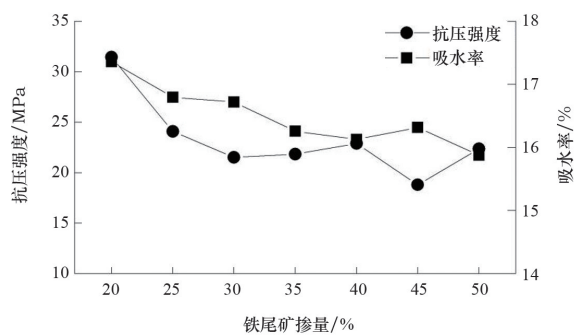


图 10 铁尾矿掺量对烧结砖试样抗压强度及吸水率的影响^[49]

在烧结过程中,还应考虑铁尾矿中重金属浸出的影响,罗立群等^[50]利用铁尾矿、煤矸石、污泥和少量页岩制备烧结砖,经实验证明,在烧结过程中,重金属离子绝大部分固化或少量挥发,未烧结的坯体与烧结后制品中的重金属浸出量均远低于危险废弃物标准。

除了利用铁尾矿做烧结砖,还将铁尾矿应用于蒸压砖、免烧免蒸砖等,不仅可以减少耗能、还使制作工艺变得更简单。蒸压砖制作的原理主要是在蒸压条件下,铁尾矿中的硅质成分被活化并与 Ca(OH)₂ 反应,产生提供强度的水化硅酸钙凝胶、托勃莫来石等,经 2 次搅拌后的制品的塑性指标及抗压强度均有所提高,在经过搅拌工艺的影响后,成型压力也对制品的性能会产生影响,随着压力的增大,首先颗粒间隙受压力影响变得紧密,促进蒸压反应的进行,为坯体提供初始强度,颗粒间的摩擦力随着压力的继续增大而增大,颗粒间存在未排出的气体,气体压缩导致反膨胀力增大,影响制品性

能,故而在蒸压过程中要选择适当的搅拌工艺及成型压力^[51]。赵云良等^[51]利用赤铁矿尾矿在 m(尾矿)、m(石灰)和 m(黄沙)按照 70%:15%:15% 的比例制备的蒸压砖,达到《蒸压灰砂砖》(GB 11945—1999)规定的 MU20 级的要求。

将石灰、水泥、铁尾矿等按照一定配比混合,经过压制成型、后期养护等工艺便可制成双免砖,其原理是利用水化反应生成的胶凝材料将大部分为反应的铁尾矿颗粒紧紧胶结,形成骨架为砖体提供强度。曹耀华等^[52]利用鞍本地区的铁尾矿为主要材料,水泥作为胶结剂,铁尾矿用量为 58%,制备出的双免砖的性能符合 MU10 标准要求。

2) 陶瓷砖。

铁尾矿还被应用于制备玻化陶瓷砖,泡沫陶瓷砖等产品,高岭土、长石、石英等为传统陶瓷原料,铁尾矿成分的不同会影响玻化陶瓷砖的品质,通过成分的调整,铁尾矿可以部分取代陶瓷原料,经过定型、烧结等工艺烧结达到制作玻化陶瓷砖的要求^[53]。

吸水率和烧成收缩率对陶瓷性能有着重要影响,国家陶瓷砖标准中要求陶瓷吸水率不超过 0.5%,收缩率越大,坯体致密度越高,吸水率也就越低。铁尾矿的掺量影响着陶瓷的吸水率和烧成收缩率,随着铁尾矿掺量的增大,可降低烧结温度促进烧结,但掺量过多,会导致烧成温度范围变窄,不利于莫来石、钙晶石等晶体的生成,烧成收缩率先增大后减小,对应的吸水率则反之^[54]。陈永亮等^[55]以低硅铁尾矿为主要原料制备陶瓷砖,将铁尾矿全部取代陶瓷原料中的长石,所制备的陶瓷砖性能可满足陶瓷砖(GB/T 4100—2006)国家标准要求,取代率在 55%~65% 之间。以铁尾矿代替陶瓷色料呈色可大幅度降低成本。其中铁尾矿中铁的存在形式与含量等因素使玻化砖呈现不同颜色,多以黑色、灰色、棕色和红色等为主。石棋等^[56]利用攀钢铁尾矿制备黑色玻化砖,在 820 °C 时开始生成黑色晶体 Fe₂TiO₅,随着铁尾矿的量的增多,玻化砖的颜色逐渐加深,从灰褐色向着黑色转变。

20 世纪 80 年代,我国开始研究泡沫陶瓷砖工艺,泡沫陶瓷以陶瓷原矿、页岩、大理石尾矿等无机

材料作为主要原料,另加一定的助熔剂和少量发泡剂所制备的多孔陶瓷材料,具有高比表面积,耐腐蚀、耐高温、良好的机械强度与刚度等特点^[57]。

黎邦城等以程潮铁尾矿为主要原料,另加其他辅助材料以及少量的碳化硅发泡剂制备泡沫陶瓷,探究了泡沫陶瓷的发泡机理,发泡机理主要分为两部分,一是铁尾矿中的石膏、碳酸钙、白云石、赤铁矿等成分会在温度逐渐升高的情况下分解产生气体;二是碳化硅作为发泡剂,反应时的温度区间为 800~1200℃,连续释放气体,使陶瓷气泡均匀^[58]。泡沫陶瓷与陶瓷砖所需要的成分相似,均以 Al_2O_3 和 SiO_2 为主并需要少量助熔成分,其中, Al_2O_3 的含量会影响泡沫陶瓷的热稳定性,助熔成分主要是为了以相对较低的温度生成相同或着更高的液相量,因此烧成温度和成分含量是影响泡沫陶瓷烧成的重要因素。

潘德安等^[59]以辽宁省沈抚新区的高硅铁尾矿为主要原料制备泡沫陶瓷,铁尾矿掺量可达到 55%,制品的主要晶相是 SiO_2 ,并探讨了铁尾矿、发泡剂和助熔剂的掺量以及烧成温度这四个变量分别对泡沫陶瓷的结构和性能的影响,最制得体积密度为 0.600 g/cm^3 ,吸水率为 3.95%,抗压强度为 7.65 MPa 的闭孔型多孔陶瓷。

建筑用砖在建筑业中是一种需求量很高的产品之一,为满足特殊场合的需求,还可利用铁尾矿制备多功能砖,利用铁尾矿制砖将是提高铁尾矿的利用率,增加其经济效益的重要发展方向之一。

3.2.6 微晶玻璃

微晶玻璃是一种无机非金属材料,因内部微小晶体的致密排列而使其性能较普通玻璃更加优异。目前,利用铁尾矿制备微晶玻璃已经得到了广泛的研究^[60]。张锦瑞等^[61]利用唐山地区铁尾矿加入适当的复合晶核剂经热处理后制成主晶相为透辉石,次晶相为硅灰石和尖晶石的微晶玻璃,其中,热处理工艺为核化温度 770℃,晶化温度为 870℃,保温时间均为 60 min。南宁等^[62]利用商洛铁尾矿制备主晶相为透辉石相微晶玻璃,并探究烧结温度对微晶玻璃的性能的影响,在 900℃的晶化温度,120 min 的保温时间时微晶玻璃性能最优,抗压强度可

达到 164.75 MPa。

SiO_2 、 CaO 、 MgO 及 Al_2O_3 等是构成微晶玻璃的主要成分,这些成分含量的变化会直接使微晶玻璃的主晶相种类发生变化,从而影响微晶玻璃的结构与性能。例如, $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系微晶玻璃在抗压抗折强度、耐酸碱腐蚀、耐磨性等方面具有良好的性质, $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系微晶玻璃拥有较好的介电性能,可用于绝缘功能材料,用铁尾矿多制备 $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系微晶玻璃,其主晶相多为辉石相结构^[63]。田英良等^[64]在铁尾矿中加入适量的 CaO 和 MgO 调节成分,构建 $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系微晶玻璃,其中铁尾矿的利用率在 60% 以上。于洪浩等^[65]按照一定配比在铁尾矿中加入适量 BaCO_3 和 Fe_2O_3 ,制备 $\text{BaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系微晶玻璃,在基础玻璃晶化过程中,随着温度的升高,逐渐出现主晶相 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$,并在 1050℃时, $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 含量最大。

不同的热处理工艺也会对微晶的形成与长大有着不同的影响。李红霞等^[66]探究了热处理对铁尾矿与金尾矿制备的微晶玻璃析晶过程及性能的影响,首先利用熔融法制基础玻璃,后采用一步法热处理制备出主晶相为透辉石的微晶玻璃,并总结出最优的热处理温度是在 820℃保温 45 min。

由于不同地区的铁尾矿的组成成分差异问题,制作的微晶玻璃也有不同的性质,铁尾矿的掺量也影响着微晶玻璃的颜色,掺量过多会导致微晶玻璃颜色过深而不易调节。对于建筑物装饰板材的成本来说,微晶玻璃的成本仅为高档花岗岩和大理石理成本的 12%~15%,并且有着优秀的性能,是性价比比较高的代替品,但对于铁尾矿的掺量来说,极值为 50% 左右,可将如何提高铁尾矿在微晶玻璃中的掺量作为下一步的研究^[64]。

3.2.7 建筑涂料

涂料一般由颜料、溶剂、辅助材料(添加剂)、成膜物质(树脂)组成,在油漆和涂料中,其中一些油漆中常含有挥发性物质 VOCs, VOCs 是作为溶剂或稀释剂,与树脂一起奏效的,大多 VOCs 有刺激性气味并有致癌风险,对人们的身体健康产生极大的影响。在我国,氧化铁作为粉末涂料已经在涂料、建材、塑料等领域中得到了广泛的应用^[67]。铁尾矿

中含有氧化铁,将铁尾矿作为颜料在巴西等国家已经有了一定的研究。

2012年,有学者将铁尾矿作为陶瓷颜料进行研究,将未经处理的铁尾矿分别加在透明、白色和哑光釉料中,釉料的颜色会随着烧成温度的变化而变化,在中等温度下,铁尾矿使透明釉料产生适合于屋顶瓦片的微红色,表明铁尾矿可以作为屋顶瓦片工业的陶瓷着色剂^[68]。巴西有学者利用铁尾矿制备了一种可持续性涂料,该涂料的组成只包括受干燥和破碎处理的铁尾矿、水以及粘结剂,测试油漆混合物的成本、颜色均匀性、耐磨性和耐久性,结果表明和传统油漆相比,可持续涂料呈现淡红色;合适的透明度;并且以较低的价格便获得了令人满意的耐久性^[69]。但目前,我国利用铁尾矿制作涂料的研究还很少,需要更进一步研究。

3.3 充填矿山采空区

采空区及塌陷区会引起多种地质灾害,为推动矿业活动安全可持续开采,尾矿充填的逐渐成为消纳尾矿的重要方式。充填技术主要有全尾砂结构胶结充填、膏体泵送充填、废石胶结充填技术和分级尾砂胶结充填等^[70]。胶结充填材料主要是由胶凝材料、骨料、水等按照一定的比例混合制成,利用铁尾矿充填矿山采空区是铁尾矿利用的主要方式之一,在这其中,铁尾矿多作为骨料或者胶凝材料。在铁尾矿回填采矿区的工艺中,铁尾矿多作为骨料,经水泥固化后作为回填料^[71]。但将铁尾矿作为胶凝材料也有广泛的研究。其中,水泥及其替代品是主要的胶凝材料。铁尾矿的组成成分与主要的胶凝材料普通硅酸盐水泥中矿物成分相似,在经过活化处理后,铁尾矿可以部分代替水泥作为胶凝材料,不仅节省水泥原料,降低成本,充分利用铁尾矿中的火山灰活性,提高了铁尾矿的高附加值利用。

采用铁尾矿充填矿山采空区,可以有效降低矿山充填成本,费用仅为碎石水泥充填费的1/4~1/10,还具有节省土地资源、就地取材等特点,对于某些因地形因素而不能设置尾矿库的地区具有更大的意义^[72]。虽然用铁尾矿充填采空区在很大程度上消纳铁尾矿的数量,但经济效益却比较低。

3.4 制备土壤改良剂及复合肥料

铁尾矿中往往有着植物生长所必需的Fe、Zn、Mn、Cu、Mo、V、B和P等元素,故可以利用铁尾矿制备土壤改良剂和复合肥料。

以铁尾矿制备的改良剂可通过优化土壤性质有效地改良盐碱地。受土壤中氯化物或硫酸盐、碳酸盐或重磷酸盐含量的影响,盐碱地分为盐土或碱土,往往土壤的盐化和碱化是共存的,一般土壤中的可溶性盐超过0.3%就发生了盐碱化,会影响植物的生长,土壤产生盐碱化的原因主要是因为地表水分蒸发,地下可溶性盐分顺着毛细管向上运动,加强地表盐分堆积,或因为土壤地下水位过高以及人为的不当灌溉等因素产生^[73]。张丛香等^[74]利用铁尾矿为主制备的复合改良剂对东北盐碱地土壤进行实验,使中、重度盐碱地的pH值和盐分均有所下降,可以有效达到作物耕种的条件,证明了用铁尾矿制备的改良剂可对盐碱地起到疏松土壤,切断毛细管、提高土壤的渗透性、阻碍盐碱上升的重要作用。且用铁尾矿制备的复合改良剂的改良成本仅为现在改良成本的一半左右,由改良盐碱地生产出的不施化肥的绿色水稻价格也比传统施加化肥的水稻价格要高,对我国粮食发展有着重要意义,具有良好的经济价值^[75]。

由于传统三大肥料氮、磷、钾的过度使用,破坏了土壤的肥力结构,土壤中的微生物及有机质成分日益缺乏。孙希乐等^[76]为了提高土壤中微量元素,促进植物生长,采用煅烧法制备土壤调理剂,试验中将铁尾矿、云母粉和白云石按照一定的比例混合,在1100℃下,进行煅烧得到了呈碱性的土壤调理剂,对长江地区的酸性土壤有着一定意义。赵淑芳等^[77]采用液碱湿法活化工艺将固定比例的高硅铁尾矿和Na₂OH在一定条件下配置硅肥,实验证明加入2‰硅肥的水萝卜生长得更好。

20世纪中期,我国就有磁性复合肥的应用,将有一定载磁性的磁性材料与氮、磷、钾等肥料相混合,经过造粒、磁化后得到的磁化复合肥料,磁化复合肥料可提高土壤理化性质以及农作物的产量,对于土壤性质来说,可以改善土壤电荷性质,加强土壤颗粒的团聚能力,提高土壤的透水性等,对于土

壤作物来说,在作物根系发生磁化反应,促进植物根系对养分的吸收,最终提高作物产量^[78]。不同的磁化材料对于磁化复合肥的作用也不相同,丁文金等^[79]对铁尾矿粉、钢渣和粉煤灰3种磁化材料进行研究,实验表明,3种材料制备的磁化复混肥料的重金属含量满足于国家复混肥料标准,且铁尾矿粉在一定条件下的磁化性能和磁性稳定性在3种材料中最好。

铁尾矿中有众多微量元素可以满足植物的生长要求,但是,将铁尾矿应用于农业中,还应考虑铁尾矿中重金属对土壤和农作物的影响,需要进一步的研究相关评价标准。

3.5 尾矿复垦

铁尾矿结构性差、透气性差、养分贫瘠,在刮风天气会造成风沙扬尘,影响矿山周围人民的生活,并且尾矿堆积占用大量的土地,在雨水和地表径流的侵蚀下极易发生水土流失,尾矿复垦可以从根源上解决占用土地问题^[80]。20世纪中期,我国开始进行尾矿复垦并在1988年颁布土地复垦相关规定,尾矿复垦主要采用重构土壤和种植植被。土壤重构主要是在尾矿表面掺土或施肥,改变土壤的理化性质使土壤达到满足植被生长的条件^[81]。植被法是种植能在极端环境生存的植物,可以有效地防止尾矿的风蚀和水蚀,还可以通过根茎固定尾矿中的重金属,是一种有效的治理方法,在使用中的尾矿坝坡面种植一些灌木或草藤,可以增加坝体的稳定性、改良土壤、增加土地面积,对于恢复生态环境以及尾矿的资源利用有着重要的意义^[82]。

4 我国铁尾矿综合利用的建议

我国铁尾矿的各种利用方式有利有弊,铁尾矿再选会产生尾矿二次排放,且需要较高的技术和成本;充填矿山采空区虽然能够消纳大量铁尾矿,但效益较低,填充技术困难;制备土壤改良剂及复合肥料需要较高的成本且难以扩大推行;尾矿复垦也只是暂时解决铁尾矿堆存的现状;目前铁尾矿最佳的利用方式主要是应用在建材方面,但大部分新型建材仍停留在实验室阶段,在技术上、运输上以及

原材料方面还未形成成熟的规模。

近年来,我国铁尾矿的综合利用率虽有所上升,但铁尾矿仍是我国产量最大的大宗固废之一,随着我国经济的快速发展,矿产资源的储量品位不能满足我国对矿产资源的需求,因此对铁尾矿的综合利用将会成为难以回避的科学问题。未来,应充分协调政府管理部门、企业和社会力量,共同推进固废资源的资源化利用。

1) 政府、职能部门应加强对铁尾矿资源利用的引导与管理,提出明确的审查标准,大力推动铁尾矿利用新技术,促使技术成果快速转化,为尾矿的开发利用提供技术保障。现阶段,对矿业行业的粗放式管理已经无法实现国家对绿色矿山建设的要求,多部门应相互协调配合,共同参与管理铁尾矿综合利用的建设工程,对铁尾矿资源情况进行调查统计,建立统一数据库,为铁尾矿的综合利用提供数据基础。铁尾矿资源化利用的相关权威标准化技术组织等注重统筹规划,完善部分应用领域中相关标准的空白和滞后,增加一些基础通用性规范,利用规范引导产业发展,推广铁尾矿资源化利用新技术,及时将技术成果转化为标准,推动产业高质量发展。企业应加强与科研机构的联合,开发新技术、新设备,改造落后的、高污染的工艺技术及装备,全方面提高铁尾矿的综合利用。

2) 矿山企业应改变“采富弃贫”的传统思维,强化铁尾矿资源化利用的观念,重视铁尾矿的开发利用,生产高附加值产品,探索铁尾矿资源增效新途径。相关管理部门应加强对铁尾矿的综合利用意识的宣传教育,矿山企业应培训专业人员认真学习相关规范要求,提高企业可持续利用观念。国家政府应对铁尾矿综合利用产品加强政策导向和扶持,鼓励企业生产尾矿产品,政府也可帮助企业利用网络媒介积极宣传企业尾矿产品,提高铁尾矿资源化利用产品的市场竞争力。

3) 大力吸引社会资本投入尾矿治理、生态修复等,优化投资结构,促使铁尾矿资源化利用成为社会主流认识、全民行为。政府应加大对尾矿综合利用的扶持力度,创立专项基金,制定资金管理制度,专人专账严格管理,加大人才、技术方面的投

资,重点开发高附加值产品,尾矿产品因生产成本高而不具有竞争力,对于尾矿产品在纳税方面给予优惠。扩大资金渠道,积极协调地方财政基金以及银行金融等加大对矿山企业对尾矿资源化利用,环境修复的支持。

参考文献(References)

- [1] 赵立群,王春女,张敏,等.中国铁矿资源勘查开发现状及供需形势分析[J].地质与勘探,2020,56(3):635-643.
- [2] 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(1):1-6.
- [3] Tang L, Liu X, Wang X, et al. Statistical analysis of tailings ponds in China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020, 216: 106579.
- [4] 张家荣,刘建林.中国尾矿库溃坝与泄露事故统计及成因分析[J].中国钨业,2019,43(4):10-14.
- [5] 孙厚云,卫晓锋,孙晓明,等.钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征[J].环境科学,2021,doi:10.13227/j.hjkk.202007200.
- [6] Young G, Chen Y Q, Yang M. Concentrations, distribution, and risk assessment of heavy metals in the iron tailings of Yeshan National Mine Park in Nanjing, China[J]. Chemosphere, 2021, 271: 129546.
- [7] 刘文博,姚华彦,王静峰,等.铁尾矿资源化综合利用现状[J].材料导报,2020,34(S1):268-270.
- [8] 魏瑞丽,张婕.铁尾矿资源化利用研究进展[J].矿业工程,2014,12(1):56-59.
- [9] Zhao J S, Ni K, Su Y P, et al. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties[J]. Construction and Building Materials, 2021, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122968.
- [10] 董学超.铁尾矿活化工艺与技术指标分级研究[D].西安:长安大学,2021.
- [11] 中华人民共和国国土资源部.中国矿产资源报告(2021)[M].北京:地质出版社,2021.
- [12] 中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告(2020-2021年度)[R].北京:工业固废网,2021.
- [13] 舒敏,刘昆,李德军,等.铁尾矿资源化利用标准化现状及对策研究[J].中国标准化,2021(11):154-158.
- [14] 孔德翠,张淑敏,刘杰,等.某铁尾矿中含铜矿物的综合回收试验[J].现代矿业,2019,35(11):1-3.
- [15] Yuan S, Zhang Q, Yin H, et al. Efficient iron recovery from iron tailings using advanced suspension reduction technology: a study of reaction kinetics, phase transformation, and structure evolution[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, doi:10.1016/j.jhazmat.2020.124067.
- [16] 蒋京航,叶国华,胡艺博,等.铁尾矿再选技术现状及研究进展[J].矿冶,2018,27(1):1-4.
- [17] 刘文刚,魏德洲,王晓慧,等.反浮选铁尾矿正一反浮选再选研究[J].金属矿山,2011,415(1):147-149,164.
- [18] 陈东平,刘芳,齐艳涛.铁尾矿在水泥基材料中的再利用研究进展[J].环境工程,2015,33(8):83-86.
- [19] 罗力,张一敏,包申旭.利用铁尾矿制备硅酸盐水泥熟料[J].非金属矿,2016,39(3):50-52.
- [20] 杨飞,孙晓敏.利用钒钛磁铁矿尾矿制备普通硅酸盐水泥熟料的研究[J].钢铁钒钛,2020,41(2):75-81.
- [21] 王宏霞,张文生,叶家元,等.铁尾矿替代铁粉制备硅酸盐水泥熟料的研究[J].新世纪水泥导报,2015,21(2):32-34,7.
- [22] 刘刚,姚少巍,封孝信,等.利用铁尾矿制备活性粉末混凝土的研究[J].新世纪水泥导报,2016,22(5):3-8.
- [23] 朴春爱,王栋民,张力冉,等.机械力活化对铁尾矿活化性能的影响研究[J].硅酸盐通报,2016,35(9):2973-2979.
- [24] 张延年,刘柏男,顾晓薇,等.铁尾矿多元掺合料机械活化机理[J].沈阳工业大学学报,2022,44(1):95-101.
- [25] 崔孝炜,邓惋心,赵雨曦,等.利用铁尾矿作为混凝土掺和料的基础研究[J].非金属矿,2020,43(4):88-91.
- [26] 程云虹,黄菲,齐珊珊,等.高硅型铁尾矿对混凝土碳化及抗硫酸盐腐蚀性能的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(1):121-125,149.
- [27] 韩宇栋,张君,王振波.粗骨料体积分数对混凝土弹模和抗压强度的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(4):84-91.
- [28] 任才富,王奕仁,王栋民,等.铁尾矿石透水性混凝土制备及性能研究[J].混凝土,2017(5):137-139,148.
- [29] 封孝信,于启洋,刘刚,等.铁尾矿砂石对混凝土抗水渗透性的影响[J].硅酸盐通报,2018,37(10):3288-3295.
- [30] Zou J J, Jin Z, Chen D P, Gao H C. Experimental study on volume deformation of iron tailing-steel slag aggregate concrete[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, doi:10.1088/1755-1315/242/5/052061.
- [31] 张建林,韩显松.铁尾矿混凝土应用特性试验研究[J].西安科技大学学报,2015,35(3):381-385.
- [32] 张玉琢,周梅,刘凯.铁尾矿砂用于混凝土细集料的试验研究[J].非金属矿,2016,39(6):57-59,66.
- [33] 张秀芝,付宝华,刘俊彪,等.铁尾矿砂/机制砂制备高

- 性能混凝土性能研究[J]. 混凝土, 2014(3): 116-118, 123.
- [34] 张信龙, 顾晓薇, 刘庆东, 等. 冻融-酸雨耦合作用对铁尾矿砂混凝土耐久性的影响[J]. 混凝土, 2021(1): 107-109, 114.
- [35] 唐可, 毛雪松, 徐旺, 等. 掺铁尾矿砂细集料的水泥混凝土性能分析[J]. 工业建筑, 2019, 49(8): 153-157.
- [36] 顾晓薇, 张延年, 张伟峰, 等. 大宗工业固废高值建材化利用研究现状与展望[J]. 金属矿山, 2022(1): 2-13.
- [37] 何小芳, 余豪争, 杨佳, 等. 铁尾矿加气混凝土的应用研究现状[J]. 混凝土, 2015(12): 157-160.
- [38] 罗立群, 舒伟, 程琪林, 等. 铁尾矿加气混凝土制备工艺及结构形成机理分析[J]. 化工进展, 2017, 36(4): 1482-1490.
- [39] 李德忠, 倪文, 郑永超, 等. 铁尾矿加气混凝土在蒸压养护条件下反应机理[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(6): 799-805.
- [40] 舒伟, 罗立群, 程琪林, 等. 低贫钒钛铁尾矿制备加气混凝土[J]. 过程工程学报, 2015, 15(6): 1075-1080.
- [41] 王长龙, 倪文, 李德忠, 等. 山西灵丘低硅铁尾矿制备加气混凝土的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1129-1133.
- [42] 任先艳, 张玉荣, 刘才林, 等. 泡沫混凝土的研究现状与展望[J]. 混凝土, 2011(2): 139-141, 144.
- [43] 赵苏, 温煦, 丁向群, 等. 铁尾矿粉泡沫混凝土收缩性能的研究[J]. 混凝土, 2017(8): 59-61, 65.
- [44] 景帅帅. 铁尾矿粉泡沫混凝土特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [45] 刘畅, 陈洪运, 傅梁杰, 等. 铁尾矿制备新型建筑材料的国内外进展[J]. 材料导报, 2021, 35(5): 5011-5026.
- [46] 李润丰, 周洋, 李世波, 等. 北京地区细颗粒铁尾矿烧结过程与机理研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4): 672-677.
- [47] 苏立栋, 杨立荣, 杨超, 等. 利用唐山地区铁尾矿生产高掺量尾矿烧结砖的研究[J]. 非金属矿, 2014, 37(1): 40-43.
- [48] 陈秀峰, 严捍东. 工业废渣对海泥烧结砖泛霜程度影响的试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 433-437.
- [49] 刘莲花, 左然芳, 索也兵, 等. 铁尾矿掺加量及烧成制度对烧结砖性能的影响[J]. 非金属矿, 2013, 36(5): 4-6.
- [50] 罗立群, 王召, 魏金明, 等. 铁尾矿-煤矸石-污泥复合烧结砖的制备与特性[J]. 中国矿业, 2018, 27(3): 127-131, 137.
- [51] 赵云良, 张一敏, 陈铁军. 采用低硅赤铁矿尾矿制备蒸压砖[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(5): 1760-1765.
- [52] 曹耀华, 高照国, 刘红召. 鞍本地区某铁尾矿制备免蒸免烧砖试验研究[J]. 矿产综合利用, 2009(6): 41-44.
- [53] 薛瑞田, 李彩红, 董丽君, 等. 玻化砖及其瓷砖胶制备的研究进展[J]. 中国陶瓷, 2020, 56(6): 50-53.
- [54] 陈永亮, 杜金洋, 张惠灵, 等. 铁尾矿掺量对尾矿瓷质砖性能和结构的影响[J]. 中国陶瓷, 2018, 54(11): 42-47.
- [55] 陈永亮, 李杨, 张惠灵, 等. 高掺量低硅铁尾矿制备瓷质砖的研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(3): 927-932.
- [56] 石棋, 崔文豪, 隋延力. 利用攀钢铁尾矿制备黑色玻化砖的研究[J]. 中国陶瓷, 2012, 48(10): 55-57.
- [57] 张文毓. 泡沫陶瓷的研究现状与应用进展[J]. 陶瓷, 2019(11): 9-14.
- [58] 黎邦城, 石棋, 胡海明, 等. 程潮铁尾矿制备泡沫陶瓷的研究[J]. 中国陶瓷, 2014, 50(9): 82-86.
- [59] 潘德安, 逯海洋, 刘晓敏, 等. 高硅铁尾矿制备轻质闭孔泡沫陶瓷研究[J]. 中国陶瓷, 2020, 56(3): 51-58.
- [60] 郑伟宏, 王哲, 晁华, 等. 铁尾矿-CRT玻璃协同制备CMAS微晶玻璃的研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(2): 511-517.
- [61] 张锦瑞, 倪文, 王亚利. 利用铁尾矿制取微晶玻璃的研究[J]. 金属矿山, 2005(11): 72-74.
- [62] 南宁, 刘萍, 孙强强, 等. 利用铁尾矿制备微晶玻璃试验研究[J]. 当代化工, 2019, 48(10): 2199-2201, 2205.
- [63] 李保卫, 杜永胜, 张雪峰, 等. 基础成分配比对白云鄂博尾矿微晶玻璃结构及性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2012, 41(5): 1391-1398.
- [64] 田英良, 杨丽敏, 常新安, 等. 利用铁尾矿研制CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂系微晶玻璃[J]. 北京工业大学学报, 2002(3): 369-373.
- [65] 于洪浩, 薛向欣, 黄大威. 铁尾矿制备BaO-Fe₂O₃-SiO₂微晶玻璃的晶化过程[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(11): 2076-2081.
- [66] 李红霞, 李保卫, 徐鹏飞, 等. 热处理时间对透辉石系尾矿微晶玻璃析晶及其性能的影响[J]. 材料研究学报, 2020, 34(3): 209-216.
- [67] 蔡帅, 李辉扬, 李豪. 氧化铁颜料在粉末涂料中的应用与发展[J]. 中国涂料, 2018, 33(7): 25-29.
- [68] Pereira O C, Bernardin A M. Ceramic colorant from untreated iron ore residue[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 233-234: 103-111.
- [69] Barros Galvao J L, Andrade H D, Brigolini G J, et al .

- Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 200: 412–422.
- [70] 王丽红, 鲍爱华, 罗园园. 中国充填技术应用与展望[J]. *矿业研究与开发*, 2017, 37(3): 1–7.
- [71] 杨陆海. 铁尾矿胶结充填料的物理力学性能研究[J]. *现代矿业*, 2017, 33(2): 144–146.
- [72] 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(3): 1–5, 61.
- [73] 杨孝勇. 基于铁尾矿的新型盐碱地复合改良剂的研制及应用[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [74] 张丛香, 刘润华, 刘双安, 等. 利用铁尾矿改良苏打盐碱地技术研究与应用[J]. *矿业工程*, 2016, 14(1): 39–41.
- [75] 刘润华, 冯文龙. 铁尾矿复合改良剂改良盐碱地技术获得成功[J]. *黄金*, 2016, 37(2): 55.
- [76] 孙希乐, 安卫东, 张韬, 等. 利用铁尾矿和副产品云母粉、白云石制备土壤调理剂试验研究[J]. *金属矿山*, 2018(6): 192–196.
- [77] 赵淑芳, 王浩明, 高玉倩, 等. 开发含高硅铁尾矿硅肥试验研究初探[J]. *矿产综合利用*, 2018(5): 126–130.
- [78] 魏由庆, 严慧峻. 磁学农业应用与磁性肥料[J]. *土壤肥料*, 2000(5): 9–12.
- [79] 丁文金, 李丁, 马友华, 等. 磁化复混肥料的磁化工艺及磁性稳定性研究[J]. *磷肥与复肥*, 2014, 29(2): 13–15.
- [80] 吕春娟, 郭岩松, 毕如田, 等. 不同复垦模式下铁尾矿坡面产流产沙与水力特性[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 156–165.
- [81] 吕春娟, 陈丹, 郭星星, 等. 铁尾矿不同复垦模式土壤贮水能力及入渗特征[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(4): 59–66.
- [82] Mahar A, Wang P, Ali A, et al. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 126: 111–121.

Current situation and countermeasures of iron tailings resource utilization

ZHANG Zhenguo^{1,2}, WANG Yue^{1,2}, CHEN Jundian³, GAO Qian³

1. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2. Key Laboratory of Green Development of Mineral Resources in Liaoning Province, Fuxin 123000, China

3. Geophysical Measuring Exploration Institute of Liaoning province, Shenyang 110031, China

Abstract Iron tailings are one kind of the largest existing solid wastes in China, and their stockpile is still growing rapidly. On the one hand, the pile of iron tailings not only occupies a large amount of land resources, but also has different degrees of environmental pollution and safety hazards; on the other hand, iron tailings are also a kind of valuable resources, and their reasonable comprehensive utilization can realize the transformation of waste into treasure, and also can achieve the maximum benefit and avoid harm. Therefore, it is necessary and urgent to carry out research on the resource utilization of iron tailings. Based on an in-depth analysis of the current situation of iron tailings utilization, this paper proposes feasible suggestions, such as strengthening the management of iron tailings resource utilization and providing technical guarantee for the development and utilization of iron tailings, strengthening the research on the high value-added resource utilization of iron tailings in mining enterprises and exploring new ways to increase the efficiency of iron tailings resources; attracting social capital to invest in the treatment and ecological restoration of iron tailings reservoirs, and so on.

Keywords iron tailings; resource utilization; situation analysis; countermeasures ●



(责任编辑 卫夏雯)