

铁尾矿制备建筑材料研究进展

史达, 任雪梅, 郝挺宇, 张润

中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100082

中图分类号: TD926.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)06-0044-12
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.06.005

摘要 铁尾矿是铁矿石开发过程中产生的主要固体废弃物, 铁尾矿建材化利用是其规模化消纳的重要方向之一。从铁尾矿的物理、化学特性入手, 综述了国内外铁尾矿制备建筑材料方面的研究进展, 主要包括: (1) 水泥; (2) 混凝土, 主要作为人造粗/细骨料, 或经活化处理后作为胶凝材料等; (3) 砖材, 包括烧结砖、蒸压砖、陶瓷砖、透水砖、免蒸免烧砖等; (4) 墙体材料, 包括混凝土墙体材料、新型墙板材料如隔声材料与保温隔热材料等; (5) 陶瓷材料, 包括玻化砖、微晶玻璃、发泡陶瓷等; (6) 路用材料, 包括路基填料、路面基层、底基层等。分析了铁尾矿建材化利用存在的主要问题和未来发展趋势。由于铁尾矿粒径跨度大、部分粒度细、级配差、活性差、性能波动大、不同铁尾矿性质差异大等特点, 导致在建材化利用过程中存在掺量小、处理成本高、产品性能差等问题。提出依据铁尾矿特点开发高效、简单的生产工艺路线。明确进一步降低生产成本, 提高产品价值, 是目前铁尾矿建材化利用的迫切需求。

关键词 铁尾矿; 建筑材料; 水泥; 混凝土; 墙体材料; 陶瓷材料; 路用材料

引言

钢铁是国民经济的中流砥柱, 是国家生存和发展的物质保障, 而铁矿石是钢铁生产的重要原材料^[1]。铁矿石资源的开发利用伴随着大量尾矿产出, 2023 年我国铁尾矿产生量约 6 亿 t, 占我国各类尾矿产出量的 40% 以上^[2]。目前铁尾矿的主要处理方式尾矿库堆存, 造成了土地资源浪费和水-土-气环境污染^[3-4]。首先, 尾矿中含有重金属、硫化物、化学药剂等, 这些物质在尾矿堆积、处理或运输过程中, 很容易通过渗漏、淋溶等方式进入地下水或地表水系统, 尾矿的长期露天堆放使得其中的有害成分经风化、雨淋、地表径流腐蚀后渗入水体, 造成水质酸化、毒害水生生物, 并可能导致水体富营养化, 严重影响水系的生态平衡。其次, 铁尾矿的长期堆放会占用大量土地, 尾矿中的有害成分经过长期积累, 会杀死土壤中的微生物, 影响土壤的肥力和结构, 严重危害农作物的生长。另外, 铁尾矿露天堆存还可能产生大量的粉尘和颗粒物, 这些物质会对大气造成污染, 甚至影响人体健康和生活质量。因此, 铁尾矿资源化利用迫在眉睫。

为实现铁尾矿的综合利用, 国内外开展了大量研究, 主要集中在有价元素及有用非金属矿物的提纯、

充填材料、建筑材料、介孔材料、环保材料、农业材料等。从规模上看, 铁尾矿制备建筑材料能够实现铁尾矿的大规模消纳。铁尾矿中有大量的 Si、Al、Ca、Fe 等元素, 其矿物组成和化学组成与天然砂石、骨料等建筑材料十分相似, 这使得铁尾矿在制备建筑材料方面也具有一定的可行性。

本文在分析铁尾矿化学和物理特性的基础上, 对其建材化利用方面的工艺、技术及机理研究进展进行系统归纳分析, 提出尾矿综合利用思路和未来发展方向, 为相关领域科研工作者提供参考。

1 铁尾矿性质

1.1 化学组成

世界范围内的铁尾矿种类繁多, 其分布和形成受不同地质条件的影响, 导致化学组成复杂多变。表 1 为各国及中国不同区域铁尾矿的化学组成概况, 呈现出显著的地域性差异。这些尾矿按化学特征可大致分为高硅型、高铝型、高钙镁型及多金属伴生型, 普遍富含 Fe、Si、Al 等基本元素, 为建筑材料的制备提供了原料基础。

具体而言, 澳大利亚、巴西、尼日利亚等国的铁

收稿日期: 2024-04-24

基金项目: 中国五矿集团科技专项(2021ZX07); 中冶集团“181 计划”重大研发项目(CBN2022Kt01)

作者简介: 史达(1994—), 男, 山西大同人, 博士, 工程师, 主要从事固体废弃物综合利用方面的研究工作, E-mail: 617557797@qq.com。

表 1 不同地区铁尾矿化学组成

Table 1 Chemical composition of iron tailings in different areas

地区	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	LOI	CuO	F	REO	其他	文献
澳大利亚	0.03	57.31	9.58	25.13	0.08	0.15	0.04	0.04	0.61	6.67				0.36	[5]
巴西		45.72	2.06	34.26										17.96	[6]
巴西		69.7	4.8	24		0.1		0.15						1.25	[7]
尼日利亚	0.61	45.64	3.26	47.7	0.39				0.24					2.16	[8]
马来西亚	4.3	56	10	8.3				1.5		3.3				16.6	[9]
辽宁	2.75	69	2	19.17	4.19	1.97		0.49						0.43	[10]
辽宁	3.42	66.46	2.57	13.01	1.38		0.07	0.24						12.85	[11]
北京	6.7	61.03	7.53	13.49	7.75			1.71						1.79	[12]
山西		58.47	27.03	4.92			1.18	6			1.25			1.15	[13]
四川	11.41	38.09	12.26	12.15	7.72	0.36								18.01	[14]
安徽	3.47	72.58	8.05	10.29	2.66	0.05	1.07	0.2						1.63	[14]
河北	21.6	36.62	9.15	13.45	0.25	0.21		1.07	1.86		0.05			15.74	[15]
内蒙古	20.82	9.7	0.63	20.94	3	3.7	0.75	0.38	0.66	11.3		10.62	11.83	5.67	[16]

尾矿中铁品位仍然较高,具备进一步富集并提取铁精矿的潜力。而在国内,山西、内蒙古、河北等地的铁尾矿中,不仅含有 Fe,还含有 Ti、Cu、F、RE 等有价值元素,可通过浮选等技术手段加以回收利用。铁尾矿的二次元素提取具有巨大潜力:一方面,通过优先提取有价值元素加工成产品,能够提升资源利用率;另一方面,有助于减少这些元素对最终建材产品性能的潜在不利影响,实现资源的高效与环保利用。

1.2 物理性质

表 2 为不同铁尾矿密度和粒度。在粒度方面,在铁矿石开采、分选过程中,经过破碎、磨矿、选别等作业,产生的铁尾矿粒度不尽相同。铁尾矿中的颗粒粒径可能存在较大的差异,这会影响到建筑材料的均匀性和稳定性,需要对铁尾矿进行细致的筛选和控制,确保合理的级配曲线。铁尾矿中可能存在一部分细小颗粒($<10\ \mu\text{m}$),这可能会降低建筑材料的密实性和强度。在密度方面,铁尾矿随着铁含量的增加,其密度最高可达 $3.47\ \text{g}/\text{cm}^3$,部分密度高的铁尾矿制备建筑材料,材料容重可能过高,增加建筑物整体质量,导致建筑成本增加等问题。

表 2 铁尾矿的密度与粒度

Table 2 Density and particle size characteristics of iron tailings

样品编号	表观密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	粒径	文献
1	1.48	$D_{90}=34.23\ \mu\text{m}$	[17]
2	3.06	-45 μm 占比 69.57%	[18]
3	3.47	$D_{90}=170\ \mu\text{m}$	[6]
4	1.816	$D_{90}=169\ \mu\text{m}$	[19]
5	/	$D_{90}=84.58\ \mu\text{m}$	[20]
6	2.8~3.0	/	[21]

2 铁尾矿建材化利用

国内外各地区、各类型铁尾矿均含有大量的 Si、Al、Ca 等元素,与建筑材料的部分化学成分相同,但含量有所区别。目前国内外针对铁尾矿建材化利用的研究主要集中在以下几个方面:(1)水泥;(2)混凝土,主要作为人造粗/细骨料,或经活化处理后作为胶凝材料等;(3)砖材,包括烧结砖、蒸压砖、陶瓷砖、透水砖、免蒸免烧砖等;(4)墙体材料,包括混凝土墙体材料、新型墙板材料如隔声墙板材料与保温隔热墙板材料等;(5)陶瓷材料,包括玻化砖、微晶玻璃、发泡陶瓷等;(6)路用材料,包括路基填料、路面基层、底基层等;(7)其他材料。

2.1 水泥

水泥主要由石灰质材料(如石灰石或白垩,黏土或页岩中的矾土和硅石)制备而来,也有使用石灰质和黏土质材料混合而成的泥灰岩制备,煅烧温度可达 $1450\ ^\circ\text{C}$ 。2022 年中国水泥产量达 21 亿 t。铁尾矿中含有大量的 Si、Al、Ca 元素,作为钙源和硅源替代硅酸盐水泥制备所需的石灰石和黏土矿物,铁尾矿中 Ca、Si 含量越高,越有利于尾矿的消纳,但 SO_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 含量过高会降低尾矿掺量^[21]。铁尾矿用于水泥原料,在不影响水泥熟料质量的前提下掺量一般 $<20\%$,例如徐庆荣^[23]采用安徽某铁尾矿、石灰石、钢渣为原料制备硅酸盐水泥,生料配方 $m(\text{石灰粉}):m(\text{铁尾矿}):m(\text{钢渣})=7:1.7:1.3$,最佳煅烧温度为 $1400\ ^\circ\text{C}$,煅烧时间 25 min,制备的水泥熟料化学性能能满足 GB/T 21372—2008 标准要求,实现了铁尾矿和钢渣固废的协同利用。在铁尾矿掺入水泥煅烧过程的矿相转变规律方面,水泥熟料的主要矿相为 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、

C₄A_F 和玻璃相, 熟料水化后会生成针棒状钙矾石、板片状氢氧化钙和无定形态的 C-S-H^[24]。铁尾矿制备硅酸盐水泥熟料煅烧温度一般为 1 400~1 450 ℃, 制备的水泥熟料强度优良, 满足国家标准要求, 有助于促进铁尾矿的资源化利用。

2.2 混凝土

混凝土是当代最主要的土木工程材料之一, 是由胶凝材料(硅酸盐水泥)、骨料、水、外加剂和矿物掺合料按一定比例配制, 经均匀搅拌、密实成型、养护硬化而成的一种人工石材^[25]。铁尾矿在混凝土方面的应用主要集中在制备胶凝材料、人造骨料(陶粒)、矿物掺合料等。2022 年我国商品混凝土材料消耗量 26 亿 m³, 制备混凝土材料是铁尾矿规模化利用的重要途径。

2.2.1 骨料

铁尾矿废石通过破碎—筛分工艺, 按粒级分为粗骨料、细骨料。骨料强度受矿石母岩性质影响, 例如石英岩型铁尾矿废石比以碳酸钙为主要矿物成分的石灰岩型尾矿骨料强度更高, 制备的石英岩型混凝土抗压强度也更高^[26]。国内外研究报道的大量尾矿废石制备混凝土的工作性能、力学性能合格, 甚至略优于天然骨料, 但在混凝土界面过渡区、力学增强效应机理还需进一步深入研究, 对尾矿废石与其他各类矿物掺合料、固废基胶凝材料交互作用、泥粉泥块含量控制有待加强, 对尾矿废石制备混凝土的抗硫酸盐侵蚀、抗氯离子侵蚀、抗冻融循环能力还待挖掘^[27]。

在铁尾矿人造烧结骨料工艺方面, 赵威等人^[28]利用大西沟低硅型铁尾矿作为原料, 采用 $m(\text{铁尾矿}) : m(\text{黏土}) : m(\text{钾长石}) = 8 : 1 : 1$ 的配比, SiC 为发泡剂, 通过造粒、干燥、1 160℃ 烧结工艺制备了尺寸 10 mm、筒压强度 14.42 MPa、堆积密度 916 kg/m³、表观密度 1 521 kg/m³、吸水率 4.46% 的轻质高强人造骨料, 人造骨料混凝土相比于同粒径石子混凝土提高了抗压和抗折强度, 可用于高层建筑、装配式墙材等领域的混凝土骨料。煅烧温度超过 1 100 ℃, 铁尾矿中的钙长石、钙铁榴石、橄榄石矿相消失, 部分石英转变为无

定形态^[29]。人造骨料烧结过程需要消耗大量的电能, 成本较高, 产品附加值相对较低, 烧制过程还会释放 NO_x、CO₂ 等温室气体和其他有毒有害物质。

在铁尾矿人造免烧骨料方面, 按制备工艺不同可分为人造蒸压骨料和人造黏结骨料。人造蒸压骨料经过搅拌、造粒、静养、蒸压养护工艺制备而成, 如图 1 所示。托贝莫来石是主要水化产物, 也是人造蒸压骨料强度的主要来源之一^[30]。人造蒸压骨料制备的混凝土具有水泥用量小、抗压强度高特点。人造黏结骨料利用坯料中添加的胶凝材料参加水化反应, 生成水化硅酸钙 C-S-H 和钙长石类晶态组织, 晶体作为承接骨架, 胶体起胶结作用, 二者相互交错形成网状, 使陶粒内部颗粒紧密结合而产生强度。常用的胶凝材料有矿渣、水泥、粉煤灰、硅灰、赤泥等^[31-33]。人造免烧骨料不经过高温煅烧过程, 原料适应性强, 尾矿掺量最高可达 70%, 筒压强度可达 25 MPa, 具有消纳量大、绿色节能、成本低廉等优势^[34]。

人造骨料用于制备混凝土在施工过程容易出现流动度差的问题, 为解决此类问题, 可通过添加活性粉体或药剂改善混凝土性能。在人造骨料混凝土中添加矿渣、矿渣粉或粉煤灰, 有利于改善浆体流动度, 使其达到和天然骨料混凝土相近的工作性能。此外, 添加各类外加剂也可以改善混凝土工作性能, 常用的外加剂包括水玻璃、聚丙烯纤维、聚羧酸型/萘型/氨基型/脂肪酸型减水剂等^[35]。

2.2.2 胶凝材料

胶凝材料是以尾矿、水淬高炉矿渣、钢渣、脱硫石膏等固体废弃物为原料, 经物理、化学手段处理后按一定比例配制成的水硬性胶凝材料。在混凝土行业, 固废胶凝材料可以作为矿物掺合料用于制备混凝土材料。铁尾矿 SiO₂、CaO、Al₂O₃ 含量较高, 与其他胶凝材料组成相似, 但天然火山灰活性较低, 直接用作固废胶凝材料会影响混凝土性能。为提高尾矿的火山灰活性, 通常需要采用机械活化、化学活化、热活化以及复合活化等手段提高铁尾矿的活性。

机械活化是通过机械力作用对尾矿进行研磨、压

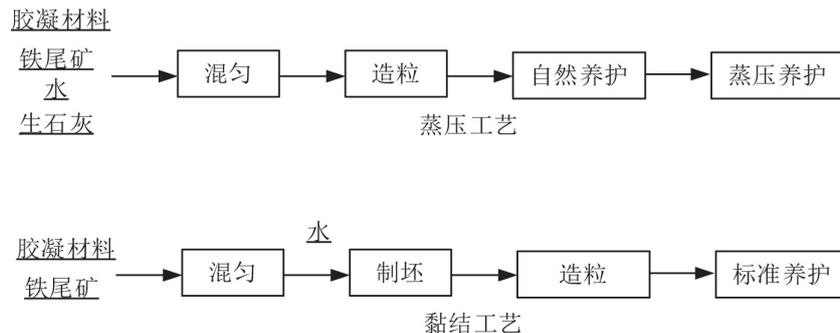


图 1 铁尾矿制备人造免烧骨料工艺流程

Fig. 1 Process flow chart of preparing artificial unburned aggregate from iron tailings

缩、剪切、冲击等作用,尾矿在机械力作用下理化性质发生变化、晶体结构改变,反应活性提高^[35]。一方面,在机械力施加下,颗粒粒度降低、比表面积增大,另一方面还会起到使颗粒的晶体结构发生破坏的作用,如晶格畸变、结晶度降低、反应活化能降低等。根据 JG/T 315—2011 标准要求,用于混凝土中的粉体材料 28 d 活性指数应 $\geq 65\%$ 。机械活化后铁尾矿颗粒级配更好,活性指数可提高至 70% 以上,作为矿粉复合掺合料制备混凝土的 28 d 抗压强度可提高 30%~50%, 150 d 抗压强度可提高 8%~10%,当铁尾矿粉复合掺量超过 30%,混凝土抗氯离子和抗冻融性能最好,继续增大铁尾矿产量混凝土耐久性逐渐降低^[36-39]。另外,过度粉磨使颗粒间团聚作用增强,需要防止过磨。

化学活化通过添加合适的化学试剂或活性材料(如石灰、水玻璃、氢氧化钠、三乙醇胺、硫酸盐、碱金属盐等),使尾矿活性提高。硅酸钠、硫酸钠、氢氧化钠、氢氧化钙和三乙醇胺作为化学活化剂制备的试块抗压强度较高,7 d 抗压强度可达 28.6 MPa, 28 d 抗压强度为 42.9 MPa,与普通硅酸盐水泥(42.5 牌号)相当,其活化机理主要是促进了无定形和非晶相的凝胶的生成,增强火山灰反应,提高后期强度^[40-41]。

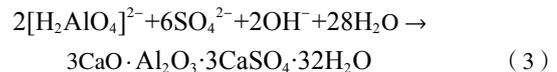
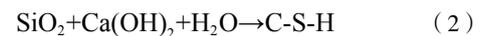
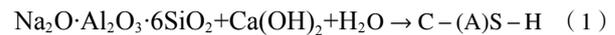
热活化是指通过高温煅烧来提高铁尾矿活性,尾矿在高温煅烧的作用下表面和内部原本稳定的硅氧四面体和铝氧四面体结构的连接和配位结构会发生较大变化, Si-O、Al-O 键发生断裂,原子排列出现不规则现象,呈现热力学介稳状态而具有较高的火山灰活性^[42]。与烧制硅酸盐水泥煅烧温度和形成的矿相组成不同,热活化主要目的是生成活性硅和活性铝,提高非晶相含量,而烧制硅酸盐水泥形成 C₂S、C₃S 等矿相。升温至 700 °C 时,铁尾矿中高岭石发生分解,凝胶活性最好,若煅烧温度继续升高,方解石分解产生的 CaO 会消耗高岭石分解产生的活性氧化硅和活性氧化铝^[43]。

复合活化是采用两种或两种以上活化手段处理以提高尾矿活性的活化工艺^[5,44]。在多维激发活化方面,对比机械力-热-化学和机械力-微波-化学两种多维活化手段对铁尾矿进行活化的激发效果,热活化与微波活化加剧了颗粒细化、表面糙化后铁尾矿内部稳定态结构的破坏,机械力-微波-化学多维激发在温度低于热活化的条件下,对铁尾矿中活性物质稳态结构转化率更高,铁尾矿-水泥体系水化产物晶化倾向变弱,结构更致密,28 d 活性指数最高可达 90.87%^[45-46]。在耐久性方面,铁尾矿通过机械-化学活化后,混凝土抗碳化能力和抗渗性随铁尾矿掺量的增加先增大后降低,抗硫酸盐侵蚀能力和抗冻性能随铁尾矿掺量的增加而增加^[47]。

铁尾矿作为胶凝材料固化机理分为两个方面,分别为“二次水化效应”和“微集料充填效应”,如图 2

所示。“二次水化效应”是尾矿中的活性组分在水化反应过程中与水泥初次水化产物发生二次水化作用,形成大量的胶凝物质和二次水化产物。尾矿的水化活性较低,随着尾矿在磨矿过程中细化,石英、长石、云母等铝硅酸盐矿物颗粒表面的晶格畸变程度增加,非晶相含量增加,表面能增大,使尾矿颗粒具有一定的火山灰活性。活化尾矿的“二次水化效应”发生在尾矿颗粒和氢氧化钙之间,长石、云母等铝硅酸盐活化矿物解聚与氢氧化钙生成 C-(A)-S-H 凝胶,石英与氢氧化钙生成 C-S-H 凝胶^[37]。在石膏参与下,除上述反应外,尾矿颗粒表面解聚产生的 [AlO₄-SiO₄] 四面体形成 [H₃AlO₄]²⁻ 离子, [H₃AlO₄]²⁻ 离子进一步反应生成钙矾石矿相^[48-49]。这些凝胶和钙矾石不仅能够将一次水化产物和聚合体黏结起来,还能填充孔隙,降低有害孔隙的数量,因此能够提升试块的力学性能。“微集料充填效应”是尾矿中惰性矿物颗粒充填混凝土中的空隙,较少孔隙数量使混凝土结构更致密^[47-49]。

“二次水化效应”可能发生的反应如下:



未来在铁尾矿作胶凝材料方面,基于铁尾矿的低活性特点,尽管在活化手段下铁尾矿活性指数得到提升,为保证混凝土性能还需要与其他固废胶凝材料(如粉煤灰、矿渣、硅灰等)共同作用,注意控制尾矿掺量不能太高,当掺量超过 30% 时,整个体系中活性物质总量减少,“二次水化效应”和“微集料充填效应”作用不足以补充活性物质减少带来的力学性能损失,强度将大幅下降。因此,各种单一活化手段虽在一定程度上提高尾矿的活性指数,但仍存在激发剂用量大、能耗高、活性低等问题,多种手段的协同作用下的活化效果更好,但需要更高的成本和更复杂的工艺。

另外,也需结合前端选矿技术进行开拓创新,近年来东北大学^[50-51]等研究团队针对国内外诸多复杂难选铁矿石品位低、铁矿物种类多的特点,形成了“预富集—悬浮焙烧—磁选”“氢基矿相转化”等选冶联合新工艺,在此过程中铁矿石经过 500~600 °C 矿相调控,物相变化后的含铁矿物易于通过磁选分离,剩余尾矿中大量低活性铝硅酸盐矿物得以活化,原本稳定的硅氧四面体和铝氧四面体结构的连接和配位结构会发生较大变化, Si-O、Al-O 键发生断裂,起到“热活化”的作用,这类活化尾矿用于混凝土材料制备可大大降低生产成本,提高混凝土性能。

综上所述,尾矿用于制备混凝土方面具有以下特

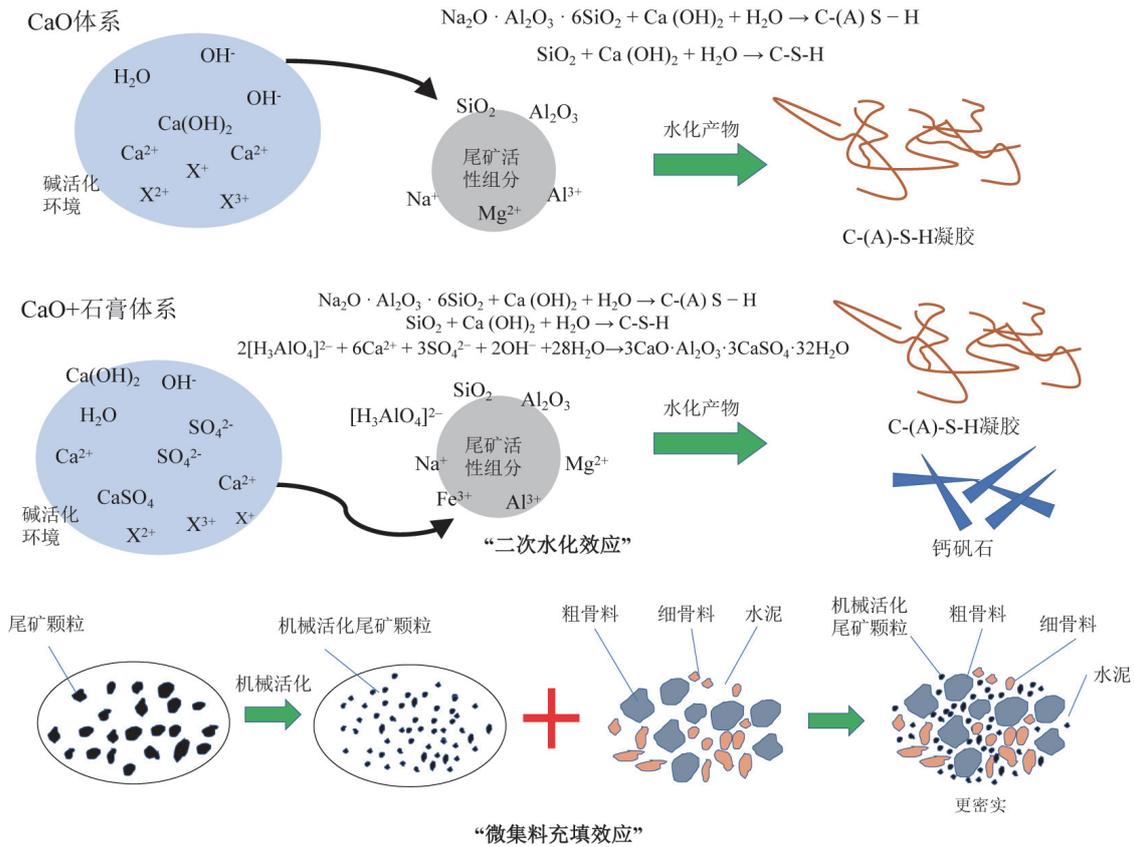


图2 铁尾矿活化机理示意图^[37,47-49]
 Fig. 2 Schematic diagram of the activation mechanism of iron tailings^[37,47-49]

点: (1)铁尾矿惰性组分含量高,制备混凝土材料活性较低,通过机械、化学、煅烧及复合活化手段可以显著提高尾矿活性,但目前仍存在能耗高、活化剂消耗量大的问题。(2)不同组成的尾矿制备混凝土材料掺量不同,主要与其活性组分含量有关,石英、长石、云母、高岭土、辉石、闪石、黏土等铝硅酸盐含量以及方解石、白云石等碳酸盐矿物含量高为宜,但掺量一般不高于30%,掺量过多时其“二次水化效应”和“微集料充填效应”不足以弥补水化物质减少带来的强度损失。(3)尾矿在混凝土方面的利用仍是当前其建材化利用的主要途径,对于长期耐久性方面的研究仍有待深入。

2.3 砖材

铁尾矿成分与黏土相似,粗粒级铁尾矿可替代砖材石子,细粒级铁尾矿可作为填充料使用,减少对天然黏土矿的开采及资源浪费。相比于黏土、粉煤灰等材料,微细粒尾矿具有比表面积高、粒度分布均匀等特点,通过调整原料配方、工艺参数可实现铁尾矿砖的制备,如烧结砖、蒸压砖、陶瓷砖、透水砖、免蒸免烧砖等。

高硅铁尾矿制备烧结砖性能优异,由于铁尾矿的复杂矿物成分和黏结性低的特点,在原料配方中需要添加增塑剂,促进成型,加入30%~60%的铁尾矿和黏

土以及少量的增塑剂(4%~5%)调整原料配比,其制成的烧结砖抗压强度可达14.6~26.5 MPa^[52-53]。王金忠等^[54]采用细粒高硅尾矿(含SiO₂>75%)作为原料,辅以少量骨料、钙质胶凝材料 and 外加剂,并加入适量水混合均匀后,在60 t压力下成型,脱模后再经28 d自然养护即可制得,抗压强度可达23.6 MPa。高铁低硅尾矿(TFe含量为20.53%, SiO₂含量为25.89%)也可替代黏土生产出合格的实心砖、多孔砖和空心砖,但高铁低硅尾矿的比重大于黏土,导致烧成品密度偏高,在一些产品中可能会发生泛霜和石灰爆裂现象^[55-58]。

在铁尾矿烧结过程中,细小颗粒的铁尾矿与其他成分经过一连串的物理及化学反应,形成稳定的矿相结构。随着温度增加,尾矿中部分矿相开始分解,一些新矿相生成,构建了烧结砖基本框架。温度进一步升高至烧结温度,低熔点物质的产生促进液相的形成,起到充填孔隙的作用,减少坯体中的微孔,增加砖材密度和强度;烧结结束后,在冷却阶段玻璃态物质与晶态的颗粒紧密结合,进一步增加砖材强度。

利用铁尾矿制砖方面的研究和报道较多,铁尾矿制砖具有以下特点:(1)铁尾矿硅铝含量相对较低,铁含量较高,所制备砖材存在密度高、烧成收缩大等问题,需要从原料上进行配伍,提高材料性能。(2)制备烧结过程中形成的部分液相熔融体,能够填充孔隙,提高整体致密性,有利于力学性能的提高。(3)对于

部分低硅类铁尾矿,由于其硅含量少,不能有效地应用于免烧建材方面,而用作烧结制砖更具优势^[54]。

2.4 墙体材料

作为建筑物的主要围护结构,墙体材料约占建筑总材料用量的65%。鉴于这一巨大的需求量,开发集轻质、高强度、保温性、防火性以及与建筑物同寿命等多功能于一体的现代化墙体材料成为了一个迫切的需求^[59]。墙体材料主要分为混凝土墙体材料、新型墙板材料如隔声材料与保温隔热材料等。尾矿在混凝土墙体方面与制备混凝土材料相似。周怡笛等^[60]采用铁尾矿粉掺量12%、粉煤灰掺量15%、硅灰掺量2.4%、纤维掺量0.2%、硬脂酸钙掺量0.8%、水胶比0.48的配比,制备出密度等级600 kg/m³的泡沫混凝土砌块。随着铁尾矿粉掺量增加,泡沫混凝土砌块的抗压强度下降,同时导热系数逐渐增加,因此不应使用过多铁尾矿粉。为解决铁尾矿掺量小的问题,张立侠等^[61]对尾矿活性进行激发,配比为 $m(\text{水泥}):m(\text{铁尾矿}):m(\text{激发剂}):m(\text{膨胀珍珠岩})=1:2.5:0.25:0.63$,水灰比控制为0.8,可以得到28 d抗压强度>5 MPa、容重<900 kg/m³、导热系数<0.231 W/(m·K)的轻质墙体砌块,铁尾矿掺量>55%,可作为各类非承重墙及屋顶用材。

在隔声材料方面,王长龙等^[62]利用钒钛磁铁矿选矿尾矿作为填料,加入废橡胶粉和钢纤维作为增强剂,成功制备出硅酸钙隔声板材,其抗折强度最高可达到8.8 MPa,满足GB/T 7019—2014标准要求。在保温隔热材料方面,王鹏昕^[63]制备了一种以微纳米铁尾矿砂为主要基材,添加二氧化硅气凝胶、纤维素和玻璃纤维等外加剂的新型保温隔热复合材料,导热系数最小为0.065 W/(m·K),用于建筑隔墙结构中在成本控制和增加容积率方面意义重大。

尾矿制备墙体材料有以下特点:(1)尾矿制备墙体材料,由于经过磨矿,粒径较为适中,级配较好,合适掺量条件下可制备较为致密的墙体制品。(2)掺入适宜用量的铁尾矿,一般为10%~30%,墙体制品抗压强度、导热系数、抗冻融性等指标提高,尾矿掺入量过大水化反应降低,墙体抗压强度降低。(3)铁尾矿密度较大,将增加墙体制品整体质量。

2.5 陶瓷材料

2.5.1 玻化砖

玻化砖又称抛光砖,是经高温煅烧后进行表面打磨抛光而成的瓷质地砖,是主要建筑陶瓷产品之一。制备玻化砖要求原料SiO₂和Al₂O₃含量较高,并含有一定量的K₂O、Na₂O、CaO、MgO等低熔点物质,某些铁尾矿可以满足成分要求,且铁尾矿中的Fe₂O₃是制

备彩色陶瓷化砖的天然着色剂^[64]。以武钢程潮铁尾矿为例,铁尾矿添加一定量自制的着色助剂TM,按传统通体砖生产工艺制备黑色通体砖,铁尾矿掺量>95%,可制备出符合国家标准黑色通体砖产品,是利用铁尾矿生产低成本高档建材产品的有效途径^[65]。石棋等人^[66]利用攀钢铁尾矿制备了黑色玻化砖,但由于攀钢铁尾矿的成分与制备常规玻化砖的成分有一定差异,因此需优化调整配料,所制得样品的主晶相为钙长石,而不是传统的莫来石,材料抗折强度为46.2~48.7 MPa。

陶瓷玻化砖具有强度大、硬度高、机械性能好的特点,属于高档建筑陶瓷材料,是铁尾矿高值化利用的方向之一。但铁尾矿中铁含量对产品颜色影响大,普遍颜色较深,呈灰黑色,仍需对铁尾矿掺量、烧制配方和工艺参数严格控制,开发施釉技术,以获得特定颜色的玻化砖。另外,需关注产品的放射性,以避免对人体健康造成损害。

2.5.2 微晶玻璃

微晶玻璃又名玻璃陶瓷,其生产过程结合了玻璃和陶瓷两种制作工艺,在特定环境下晶化得到的复合材料具有介电损耗低、热膨胀性可调、机械强度高、抗热震性好、耐化学腐蚀和电绝缘性好等优点,其综合性能主要取决于晶体的种类、微晶体的尺寸和数量、残余玻璃相的性质和数量等^[67]。铁尾矿中含有的Si、Al、Fe、Ca等元素,有利于制备微晶玻璃材料。CHEN等^[68]采用熔融法合成了CaO-Al₂O₃-MgO-SiO₂系矿渣微晶玻璃,所制备的微晶玻璃陶瓷的主晶相为透辉石,次晶相为石英,平均粒径约为142 nm,孔隙率为0.05%,密度为3.0 g/cm³。LU等^[69]利用尾矿制备了莫来石为主晶相(含量72.9%)的微晶玻璃,具有79.3%~99.99%的优异耐化学性、0.2%~31.3%的吸水率和170.3~1 061.6 MPa的抗压强度,有害金属浸出率低,适用于作为建材使用。杨博宇等^[70]以包头铁尾矿和金矿尾矿为主要原料,以铁尾矿中的Fe₂O₃和CaF₂为成核剂,采用玻璃熔制-微波热处理方法得到以辉石相为主晶相的微晶玻璃,样品密度为2.97 g/cm³,抗折强度为264.62 MPa,耐酸性99.38%,耐碱性99.17%。南宁等人^[71]采用烧结法以商洛某铁尾矿为主要原料制备微晶玻璃,在熔制温度1 400 °C、保温2 h条件下熔制的基础玻璃性能较优,其抗压强度为164.75 MPa,密度为2.82 g/cm³,耐酸质量损失率为0.11%,耐碱质量损失率为0.13%。晶化过程中实现玻璃相向晶体相的转变,使制备出的微晶玻璃机械强度及热稳定性等方面都有很大程度的提高。

2.5.3 发泡陶瓷

发泡陶瓷又称多孔陶瓷,是一种具有立体网络骨架结构的新型陶瓷材料。由于发泡陶瓷特有的孔结构,使其具有高孔隙率、良好的化学稳定性、小体积

密度及低导热性等特点,被广泛应用于环保、能源、航空航天、冶金、石油化工、建筑、生物医学等众多领域^[72]。其质轻的优异性使发泡陶瓷可以与岩棉和有机聚合物等材料在市场上竞争。利用工业固体废弃物制备发泡陶瓷最常用的方法是粉末烧结法,即原材料、发泡剂、助熔剂等均匀混合,经压制成型、烧结获得发泡陶瓷材料。铁尾矿制备发泡陶瓷一般是利用尾矿中丰富的硅质、铝硅酸盐矿物、碱金属氧化物特性,辅以一定的结合剂、造孔剂、添加剂等辅助材料,在 1 000~1 300 ℃ 烧制而成。一般可分为开孔型和闭孔型两大类。开孔型发泡陶瓷一般用于吸声、过滤等领域,闭孔型发泡陶瓷一般用于隔热、隔声、装饰材料等领域。高温造孔剂可分为分解型(碳酸盐、硫酸盐)、氧化型(碳化硅等与氧气反应发泡剂)和还原型(多价金属氧化物)三大类,工业上常用高温发泡剂为碳化硅。李林等人^[73]以攀西钒钛磁铁矿尾矿和废玻璃为主要原料,制备储水发泡陶瓷,随着尾矿用量的增加,材料的体积密度及抗压强度逐渐增大,气孔平均孔径减小,这可能是由于尾矿量增加,熔剂减少,高温熔体内部无法产生足够的液相,高黏度熔体导致气泡外压增加,小气泡成长受阻使得气泡小而密。

在发泡陶瓷制备机理方面,以碳化硅发泡剂体系为例(如图 3 所示)。发泡陶瓷烧成分为以下三个阶段:(1)预热阶段。坯体从室温加热到 400 ℃ 进行预热,主要是消除坯体内外的温度差,同时脱除坯体水分;(2)烧结阶段。从预热温度迅速升温至烧结温度,防止部分已生成的气体在尚未熔融时逸散,并进行保温,此时坯体进入液相熔融状态,发泡剂发生氧化反应形成 CO、CO₂ 气体,熔融坯体具有一定黏度包裹住气体形成气泡,气体形成的压力与熔融坯体的黏滞阻力相互平衡,不致于因气压过大导致气泡兼并、破裂,又能保证能够产生足够的气泡,同时坯体体积膨胀;(3)降温阶段。停止加热后,坯体温度逐渐降低,从液相熔融状态转变为固相,气泡在坯体内稳定固化,形成气固空腔^[74-75]。

综上,以玻化砖、微晶玻璃、发泡陶瓷为代表的

各类尾矿陶瓷材料,有以下特点:化学稳定性好、抗冻耐污染性能好、强度高,广泛应用于建筑装饰,如地面砖、外墙装饰、大型异形装饰构件等,但仍存在尾矿成分复杂、组成波动大、导致产品稳定性差等问题,需进一步提高材料的智能化设计,提高固废利用率,优化降低生产成本,推动铁尾矿在陶瓷行业的高值化应用。

2.6 路用材料

公路工程通常需要消耗大量的建筑材料,铁尾矿中含有石英、长石、云母等矿相,具有一定的硬度和强度,且粒级级配较好,与天然砂石资源性质相近,若能将铁尾矿应用于路基填料、路面基层、底基层等路用材料中,不仅可以消耗大量的尾矿,还能降低河砂、土石方等天然砂石资源的消耗,进一步降低公路的施工成本,具有重要的社会效益、经济效益和环境效益^[76]。

国外铁尾矿在道路工程中的应用距今已有 60 余年历史,从 20 世纪 60 年代起美国将铁尾矿应用于城市路面的底基层,首先采用铁尾矿填筑厚 91.44 cm 的路基,在其上铺筑铁尾矿底基层,最后在底基层上铺设铁尾矿沥青混合料,至今仍能保持良好的使用状态,也说明铁尾矿作为路基材料及沥青路面材料建设的公路强度高、耐久性好^[77]。

国内 20 世纪 90 年代开始在公路路面中使用了铁尾矿与废石、黏土、固化剂、粉煤灰、河沙等配料混合的材料,经养护后可达到国家规范要求^[78-79]。将铁尾矿就近用于二级旅游公路路面基层中,工程采用水泥稳定碎石材料,其中碎石和砂均为铁尾矿,对铺筑后的基层进行钻芯取样实验,其 7 d 强度为 3.52 MPa,满足公路路面基层相关要求^[80-81]。此外,石灰、粉煤灰改良铁尾矿具有较强的水稳定性、抗冻性,强度和刚度也十分良好,可作为公路底基层材料使用,同时使用水泥和石灰对铁尾矿路用材料的改良效果优于单一改良效果^[82-84]。

铁尾矿在制备路用材料方面,有以下特点:(1)目前铁尾矿作为路用材料的机械性能可达到二级及二

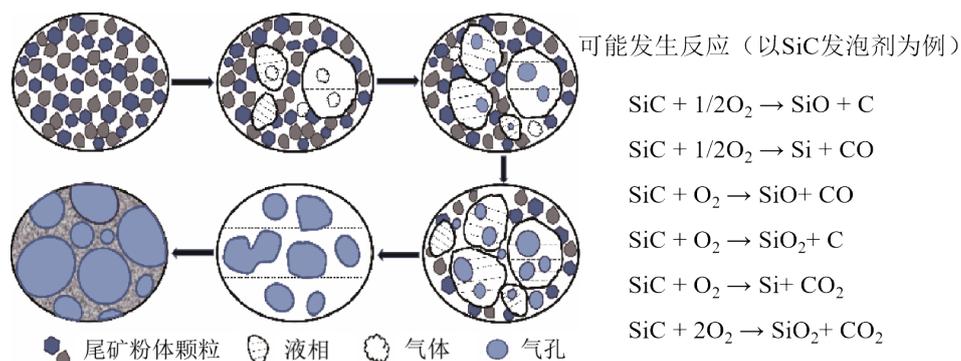


图 3 发泡陶瓷制备原理示意图^[74]
Fig. 3 Schematic diagram of preparation principle of foamed ceramics^[74]

级以下公路基层活底基层设计标准,有巨大应用潜力,但仍存在粒度较细、细度模数小的问题。(2)铁尾矿掺量过高易导致级配差、机械性能不达标、基层开裂等问题,需要采用合适的改良剂或稳定剂处理,提高材料性能^[85]。

综上所述,铁尾矿种类繁多且元素组成复杂,经过采矿、选矿物理方法处理,具有粒度细、活性低的特点,规模化利用附加值低、运输半径小,高值化利用掺量小、利用率有限。基于上述研究进展,针对铁尾矿物理化学性质,中冶建筑研究总院有限公司郝挺宇团队提出“有价元素再选—高值发泡陶瓷材料+规模化硅酸盐功能骨料”的资源化利用路线,且无二次废物产出。其中发泡陶瓷材料包括开孔型和闭孔型两种类型,可应用于保温隔音墙体、道路声屏障、装饰艺术构件、吸音材料。制备的硅酸盐功能骨料可用于替代混凝土粗、细骨料。该技术路线同时可拓展至其他铝硅酸盐固废综合利用方面。

3 结语与展望

随着铁矿资源的开发利用,国内外铁尾矿产量巨大,由于其综合利用率仍较低,尾矿堆存量与日俱增,亟需大规模消纳和资源化利用。建材化利用是快速消纳积压铁尾矿的重要方向,目前主要集中在混凝土、制砖、陶瓷材料、墙体材料、路用材料等方面,但因铁尾矿粒度细、级配差、活性差、性能波动大、不同类型铁尾矿性质差异大等特点,导致掺量小、处理成本高、产品性能差等问题。若采用复杂工艺、添加合适助剂能够提高铁尾矿活性,则造成产品成本高、售价低的问题,且存在下游产品市场和运输半径的瓶颈。因此,为提高铁尾矿综合利用率,可从以下几方面进一步推进:(1)建立不同地区、不同类型尾矿性质数据库,根据工艺矿物学特性进行分类,将铁尾矿处理工艺与其特性对应;(2)开发高值化产品,加强高值材料下游市场拓展,及时建立相关标准,增强产品认可度;(3)简化铁尾矿建材化生产工艺,铁尾矿由于其火山灰活性差,需要结合选矿工艺开发更高效的活化工艺,为低成本大规模生产奠定基础;(4)注重环境效益,部分铁尾矿中重金属、硫、放射性元素含量高,在利用过程需针对具体材料进行检测分析,避免二次污染。铁尾矿在建材行业有着广阔的应用前景,是实现规模化消纳的重要方向,具有良好的经济价值和社会价值。

参考文献:

[1] 路畅,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.
LU C, CHEN H Y, FU L J, et al. Research progress on the preparation of new building materials using iron tailings[J]. Materials Reports, 2021, 35(5): 5011-5026.

[2] 唐志东,陈国岩,曲孔辉,等.鞍钢东部尾矿工艺矿物学研究[J].金属矿山,2018(6):109-113.
TANG Z D, CHEN G Y, QU K H, et al. Research on process mineralogy of eastern tailings in ANSTEEL[J]. Metal Mine, 2018(6): 109-113.

[3] RICO M, BENITO G, SALGUEIRO A R, et al. Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152(2): 846-852.

[4] LI J, WANG C Z, NI W, et al. Orthogonal test design for the optimization of preparation of steel slag-based carbonated building materials with ultramafic tailings as fine aggregates[J]. *Minerals*, 2022, 12(2): 246.

[5] 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, 286: 122968.

[6] CARRASCO E V M, MAGALHAES C, SANTOS W J D, et al. Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 131: 31-38.

[7] CONSOLI N C, VOGT J C, SILVA J P S, et al. Behaviour of compacted filtered iron ore tailings-portland cement blends: new brazilian trend for tailings disposal by stacking[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(2): 836.

[8] UGAMA T, EJEH S, AMARTEY D. Effect of iron ore tailing on the properties of concrete[J]. *Civil and Environmental Research*, 2014, 6(10): 7-13.

[9] SHETTIMA A U, HUSSIN M W, AHMAD Y, et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120: 72-79.

[10] 张天宇,霍岩,肖启飞,等.南芬选矿厂尾矿工艺矿物学研究[J].现代矿业,2020,36(8):257-258.
ZHANG T Y, HUO Y, XIAO Q F, et al. Study on process mineralogy research of tailings in Nanfen concentrator[J]. *Modern Mining*, 2020, 36(8): 257-258.

[11] 毛奎,蔡亮,吴小文,等.几种典型铁尾矿制备加气混凝土性能及水化机理研究[J].硅酸盐通报,2019,38(12):3719-3725.
MAO K, CAI L, WU X W, et al. Hydration mechanism and properties of aerated concrete prepared by several typical iron tailings[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(12): 3719-3725.

[12] WU S Z, ZHOU Y, GAO W, et al. Preparation and properties of shape-stable phase change material with enhanced thermal conductivity based on SiC porous ceramic carrier made of iron tailings[J]. *Applied Energy*, 2024, 355: 122256.

[13] SUN B, GUO Z Y, REN F F, et al. Enhanced photocatalyst with TiO₂-anchored iron tailings structure for highly efficient degradation of doxycycline hydrochloride[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 427: 139241.

[14] 白润山,闫彭亮,张会芳,等.铁尾矿在混凝土中的应用研究进展[J].河北建筑工程学院学报,2015,33(4):1-4.
BAI M S, YAN P L, ZHANG H F, et al. Present status of applied studies on iron tailings in concrete[J]. *Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering*, 2015, 33(4): 1-4.

[15] 张作金,周振华,吴天来,等.河北某钒钛磁铁矿尾矿中回收铜实验研究[J].矿产综合利用,2023(3):27-30+37.
ZHANG Z J, ZHOU Z H, WU T L, et al. Study on copper recovery from tailings of a vanadium titanomagnetite in Hebei[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(3): 27-30+37.

[16] 秦玉芳,李娜,王其伟,等.白云鄂博选铁尾矿稀土的工艺矿物学研究[J].中国稀土学报,2021,39(5):796-804.
QIN Y F, LI N, WANG Q W, et al. Technological mineralogy of rare

- earth in Bayan Obo iron tailings[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2021, 39(5): 796–804.
- [17] 吴俊权, 马晶, 汪应玲, 等. 高硅铁尾矿制备陶粒工艺试验研究[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(6): 126–132.
- WU J Q, MA J, WANG Y L, et al. Experimental study on preparation of ceramsite with high silicon iron tailings[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(6): 126–132.
- [18] 李富有, 何余良. 铁尾矿粉在道路工程中的应用研究[J]. *中外公路*, 2022, 42(1): 233–239.
- WU J Q, MA J, WANG Y L, et al. Study on application of iron tailings powder in road engineering[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2022, 42(1): 233–239.
- [19] GAYANA, BANGALORE, CHINNAPPA, et al. Experimental and statistical evaluations of strength properties of concrete with iron ore tailings as fine aggregate[J]. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2020, 24(1): 1–14.
- [20] 王雅琳. 铁尾矿粉-矿渣粉复掺混凝土配合比优化研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2022.
- WANG Y L. Optimization study of mixture ratio for concrete mixed with iron tailing powder-slag powder[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022.
- [21] 边伟, 王国安, 荣亚鹏, 等. 铁尾矿砂的静力学特性研究[J]. *山西交通科技*, 2023(6): 29–32.
- BIAN W, WANG G A, RONG Y P, et al. Research on static properties of iron tailings sand[J]. *Shanxi Science & Technology of Transportation*, 2023(6): 29–32.
- [22] ZHANG S Q, ZHAO T, LI Y, et al. The effects and solidification characteristics of municipal solid waste incineration fly ash-slag-tailing based backfill blocks in underground mine condition[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 420: 135508.
- [23] 徐庆荣. 利用铁尾矿烧制硅酸盐水泥熟料[J]. *现代矿业*, 2018, 34(5): 165–168.
- XU Q R. Calcining portland cement clinker with iron tailings[J]. *Modern Mining*, 2018, 34(5): 165–168.
- [24] 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.
- YANG F, SUN X M. Preparation of ordinary portland cement clinker from vanadium-titanium magnetite tailing[J]. *Modern Mining*, 2020, 41(2): 75–81.
- [25] 尹琛, 白丽梅, 李绍英, 等. 铁尾矿综合利用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(6): 41–53.
- YIN C, BAI L M, LI S Y, et al. Research progress of comprehensive utilization of iron tailings[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(6): 41–53.
- [26] 吴瑞东. 石英岩型铁尾矿微粉及废石对水泥基材料的性能影响及机理[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- WU R D. Performance and mechanism analysis of quartz-type iron tailings powder and waste rock in cement-based materials[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [27] LIU J H, WU R D, WU A X, et al. Bleeding characteristics and improving mechanism of self-flowing tailings filling slurry with low concentration[J]. *Minerals*, 2017, 7(8): 131.
- [28] 赵威, 曹宝月, 崔孝伟, 等. 铁尾矿基陶粒混凝土的制备及性能研究[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(6): 89–93.
- ZHAO W, CAO B Y, CUI X W, et al. Study on preparation and performance of iron tailings-based ceramsite concrete[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(6): 89–93.
- [29] 李国峰, 那威, 田江涛, 等. 铁尾矿基陶粒的物理力学性能及其微观性质研究[J]. *金属矿山*, 2022(10): 245–249.
- LI G F, NA W, TIAN J T, et al. Physical-mechanical properties and microcosmic properties of iron tailings-based ceramsite[J]. *Metal Mine*, 2022(10): 245–249.
- [30] YANG C M, CUI C, QIN J. Recycling of low-silicon iron tailings in the production of lightweight aggregates[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(1): 1213–1221.
- [31] 祁会军, 张慧爱, 段瑞斌. 聚苯颗粒陶粒超轻混凝土的试验研究[J]. *混凝土*, 2023(9): 173–177+183.
- QI H J, ZHANG H A, DUAN R B. Experimental study on polystyrene particle lytag super-light weight concrete[J]. *Concrete*, 2023(9): 173–177+183.
- [32] 崔皓楠. 全固废免烧陶粒试验研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2023.
- CUI H N. Experimental study on all solid waste unburned ceramsite[D]. Beijing: North China University of Technology, 2023.
- [33] 李杰. 细颗粒固废免烧陶粒及其透水混凝土的制备与性能研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2021.
- LI J. Preparation and properties of non fired ceramicite of fine solidwaste and its permeable concrete[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2021.
- [34] 童思意, 刘长森, 刘玉林, 等. 我国固体废弃物制备陶粒的研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(3): 140–150.
- TONG S Y, LIU C Y, LIU Y L, et al. Research status of ceramsite prepared from solid waste in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(3): 140–150.
- [35] YAN R F, YIN S H, ZHANG H S, et al. Effect of superplasticizer on the setting behaviors and mechanical properties of tailings-waste rock cemented paste backfills[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: 1714.
- [36] CHENG Y H, HUANG F, LI W C, et al. Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 118: 164–170.
- [37] 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.
- ZHANG Y N, LIU B N, GU X W, et al. Mechanical activation mechanism of multi-component iron tailings admixture[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2022, 44(1): 95–101.
- [38] ZHANG M G, LI K Q, NI W, et al. Preparation of mine backfilling from steel slag-based non-clinker combined with ultra-fine tailing[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 320: 126248.
- [39] 程兴旺. 铁尾矿粉混凝土力学性能与耐久性分析[J]. *粉煤灰综合利用*, 2018(5): 15–17+22.
- CHENG X W. Research on mechanical properties and durability of iron tailing powder concrete[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2018(5): 15–17+22.
- [40] 冯永存, 宋少民. 铁尾矿微粉复合矿物掺合料的试验研究[J]. *粉煤灰综合利用*, 2015(1): 44–45+47.
- FENG Y C, SONG S M. Experimental study on iron tailings powder as concrete admixture[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2015(1): 44–45+47.
- [41] HU Z H, GU X W, CHENG B J, et al. The role of chemical activation in strengthening iron ore tailings supplementary cementitious materials[J]. *Buildings*, 2024, 14(4): 963.
- [42] YANG Y C, YANG Z L, CHENG Z X, et al. Effects of wet grinding combined with chemical activation on the activity of iron tailings powder[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01385.

- DOI:10.1016/j.cscm.2022.e01385.
- [43] 施惠生, 吴敏. 土聚水泥的聚合反应与研究现状[J]. 材料导报, 2007, 21(8): 88-91.
SHI H S, WU M. Geo-polymerization and research status of geopolymeric cement[J]. Materials Reports, 2007, 21(8): 88-91.
- [44] 易忠来, 孙恒虎, 李宇. 热活化对铁尾矿胶凝活性的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(12): 5-7+34.
YI Z L, SUN H H, LI Y. Research on the influence of thermal activation for the cementitious activity of iron ore tailing[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(12): 5-7+34.
- [45] 张延年, 孙厚启, 顾晓薇, 等. 铁尾矿基多固废矿物掺和料耦合活化机理分析[J]. 非金属矿, 2022, 45(3): 82-85.
ZHANG Y N, SUN H Q, GU X W, et al. Coupling activation mechanism analysis of iron tailings based solid waste mineral admixture[J]. Non-Metallic Mines, 2022, 45(3): 82-85.
- [46] 王荣林, 席雅允, 冯建, 等. 改性铁尾矿微粉对中高强混凝土性能的影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(1): 32-37.
WANG R L, XI Y Y, FENG J, et al. Influence of modified iron tailings powder on the properties of medium and high strength concrete[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(1): 32-37.
- [47] 李晓, 夏禹, 王珏. 多维激发对富硅铁尾矿活化的耦合效应研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(6): 1-5.
LI X, XIA Y, WANG J, et al. Study on the coupling effect of multi-dimensional excitation on the activation of silicon-rich iron tailings[J]. New Building Materials, 2022, 49(6): 1-5.
- [48] YAO G, LIU Q, WANG J X, et al. Effect of mechanical grinding on pozzolanic activity and hydration properties of siliceous gold ore tailings[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 217: 12-21.
- [49] 申艳军, 王志鹏, 郝建师, 等. 尾矿制备混凝土研究进展与利用现状分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 845-857.
LI X, XIA Y, WANG J, et al. Research progress and utilization status analysis of concrete prepared by tailings[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(3): 845-857.
- [50] 崔孝炜, 邓怀心, 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.
CUI X W, DENG W X, ZHAO Y X, et al. Basic research on the preparation of mineral admixtures with iron ore tailings[J]. Non-Metallic Mines, 2020, 43(4): 88-91.
- [51] ZHANG X L, LIU P F, GAO P, et al. A clean and green technology for iron extraction from refractory siderite ore via fluidization self-magnetization roasting[J]. Powder Technology, 2024, 444: 119993.
- [52] LI Z M, HAN Y X, SUN Y S, et al. Fluidization characteristics of ore particles for downstream hydrogen mineral phase transformation equipment[J]. Powder Technology, 2024, 443: 119993.
- [53] 王金忠. 铁尾矿部分代替粘土在烧结砖中的应用研究[J]. 房材与应用, 2000(3): 27-30.
WANG J Z. Study on application of replacing clay partially with iron tailings in burnt brick[J]. Construction Conserves Energy, 2000(3): 27-30.
- [54] 王金忠, 李晖. 利用铁尾矿生产烧结砖的实验研究[J]. 辽宁建材, 2000(3): 21-23.
WANG J Z. Experimental study on producing sintered brick from iron tailings[J]. LiaoNing Building Materials, 2000(3): 21-23.
- [55] 陈永亮. 鄂西低硅铁尾矿烧结制砖及机理研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.
CHEN Y L. Preparation and mechanism of fired bricks and tiles with low-silicon iron tailings from Western Hubei[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2012.
- [56] 田玉梅. 利用铁尾矿制备烧结多孔砖技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2004.
TIAN Y M. Study on preparation of sintered porous brick from iron ore tailings[D]. Ji'nan: Shandong University, 2004.
- [57] 衣德强, 张剑锋. 铁尾矿烧制制砖可行性探讨[J]. 宝钢技术, 2008(6): 58-61.
YI D Q, ZHANG J F. Discussion on the feasibility of iron ore tailings for sintering bricks[J]. Baosteel Technology, 2008(6): 58-61.
- [58] 朱华根, 衣德强. 铁尾矿烧制制砖试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2008, 26(12): 19-21.
ZHU H G, YI D Q. Research on brick production by firing with iron ore tailings[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2008, 26(12): 19-21.
- [59] 杜建发. 梅山选厂细粒级尾矿综合利用进展[J]. 金属矿山, 2008(6): 145-147+149.
DU J F, YI D Q. Progress in comprehensive utilization of Meishan concentrator's fine tailings[J]. Metal Mine, 2008(6): 145-147+149.
- [60] 周怡笛, 王丽娟, 闵鑫, 等. 铁尾矿高值化利用研究进展[J]. 现代矿业, 2022, 38(10): 251-254.
ZHOU Y D, WANG L J, MIN X, et al. Research progress on the high-value utilization of iron tailings[J]. Modern Mining, 2022, 38(10): 251-254.
- [61] 张立侠, 胡晨光, 宋裕增, 等. 利用铁尾矿粉制备保温砌块的研究[J]. 建设科技, 2016(3): 80-81.
ZHANG L X, HU C G, SONG Y Z, et al. Study on preparation of thermal insulation block from iron tailings powder[J]. Construction Science and Technology, 2016(3): 80-81.
- [62] 王长龙, 荆华霖, 齐洋, 等. 钒钛铁尾矿制备硅酸钙隔声板材及其性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(3): 105-113.
WANG C L, JING J L, QI Y, et al. Preparation and properties of calcium silicate sound insulation board from vanadium-titanium iron ore tailings[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(3): 105-113.
- [63] 王鹏昕. 微纳铁尾矿砂/SiO₂气凝胶保温隔热建筑新材料的制备及其参数影响规律[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2020.
WANG P X. Preparation of new material for micro-nano iron tailing sand/SiO₂ aerogel thermal insulation building and laws of parameter influence[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2020.
- [64] 喻杰, 柯昌云, 喻振贤, 等. 大比例掺用铁尾矿制备轻质保温墙体材料[J]. 金属矿山, 2013, 43(3): 161-164.
YU J, KE C Y, YU Z X, et al. Preparation of lightweight thermal insulation walling material with high content of iron tailings[J]. Construction Science and Technology, 2013, 43(3): 161-164.
- [65] 隋延力, 王继全, 杨芳, 等. 铁尾矿生产陶瓷玻化砖离工业化还有多远[J]. 金属世界, 2014(1): 9-13.
SUI Y L, WANG J Q, YANG F, et al. How far is it from iron ore tailings to the industrialized production of ceramic tiles[J]. Metal World, 2014(1): 9-13.
- [66] 焦娟, 郭志猛, 刘祥庆, 等. 用程潮铁尾矿制备黑色通体砖[J]. 金属矿山, 2010(12): 167-170+174.
JIAO J, GUO Z M, LIU X Q, et al. Preparation of black full-body brick with Chengchao iron tailings[J]. Metal Mine, 2010(12): 167-170+174.
- [67] 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.
SHI Q, CUI W H, SUI Y L, et al. Study on preparation of black vitrified brick from Panzhihua iron and steel tailings[J]. China Ceramics, 2012, 48(10): 55-57.

- [68] 薛路, 成兆鑫, 赵勇. 基于铁尾矿的微晶玻璃的制备 [J]. 现代矿业, 2016, 32(8): 289-290.
XUE L, CHENG Z X, ZHAO Y, et al. Preparation of glass-ceramics based on iron tailings [J]. *Modern Mining*, 2016, 32(8): 289-290.
- [69] ZHANG H J, ZHAO W G, LI F L, et al. Preparation and erosion resistance of CaO-Al₂O₃-MgO-SiO₂ microcrystalline glass ceramics [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 44: 277-280.
- [70] LU X W, ZHOU C, LIU Y X, et al. Crystallization characteristics and properties of glass ceramics derived from iron tailing [J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2022, 8(3): 1117-1129.
- [71] 杨博宇, 张雪峰. 微波加热法制备尾矿微晶玻璃的研究 [J]. 中国陶瓷, 2018, 54(2): 63-67.
YANG B Y, ZHANG X F. Preparation of tailing glass-ceramics by microwave heating treatment [J]. *China Ceramics*, 2018, 54(2): 63-67.
- [72] 南宁, 崔孝炜, 孙强强, 等. 铁尾矿制备微晶玻璃的研究 [J]. 矿产综合利用, 2022(3): 47-50.
NAN N, CUI X W, SUN Q Q, et al. Investigation on preparation of glass-ceramics with iron tailings [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(3): 47-50.
- [73] CHEN S Z, LUO L M, SUN H J, et al. Effect and mechanism of Fe₂O₃ decomposition in the preparation of foaming ceramics from industrial solid waste [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2024, 21(2): 934-946.
- [74] 李林, 姜涛, 陈超, 等. 攀西钒钛磁铁矿尾矿制备储水泡沫陶瓷的研究 [J]. 矿产综合利用, 2020(6): 7-13+6.
LI L, JIANG T, CHEN C, et al. Study on preparation of water-retaining foam ceramics from vanadium-titanium magnetite tailings [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6): 7-13+6.
- [75] 姜葱葱, 董祎然, 黄世峰, 等. 基于原位发泡工艺的固废基发泡陶瓷研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(9): 2510-2526.
JIANG C C, DONG Y R, HUANG S F, et al. Research progress on solid waste-based foamed ceramics based on in-situ foaming process [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(9): 2510-2526.
- [76] DENG F Q, WANG F, SHI X P, et al. Synthesis and properties of foam glass-ceramics from granite tailings by using SiC and MnO₂ as the mixed foaming agent [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(22): 34647-34656.
- [77] 王晶. 铁尾矿在国内外道路工程中的应用 [J]. 环境与发展, 2014, 26(7): 51-55+100.
WANG J. The application of iron tailings in road construction in China and abroad [J]. *Environment and Development*, 2014, 26(7): 51-55+100.
- [78] 赵宇翔, 张茜, 刘碧雯, 等. 尾矿制备建筑材料的研究进展 [J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(9): 120-124.
ZHAO Y X, ZHANG Q, LIU B W, et al. Progress of research on building materials prepared from tailings [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2021, 39(9): 120-124.
- [79] 易龙生, 李行, 齐莉娜, 等. 铁尾矿用于路面基层材料的研究进展及前景 [J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(10): 27-32.
YI L S, LI X, QI L N, et al. Research progress and application prospect of iron tailings for pavement base material [J]. *Mining Research and Development*, 2015, 35(10): 27-32.
- [80] 杨青. 无机结合料稳定铁尾矿砂的路用性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
YANG Q. Study on road performance of iron tailings stabilized by inorganic binder [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [81] 郭晓华. 尾矿砂在道路工程中的应用前景 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2011, 7(5): 99-101.
GUO X H. Application prospect of tailings in road engineering [J]. *Highway Traffic Technology*, 2011, 7(5): 99-101.
- [82] 苏更. 铁尾矿料在公路工程中的应用 [J]. 内蒙古公路与运输, 2007(1): 29-32.
SU G. Application of iron-ore tailing to highway engineering [J]. *Highways & Transportation in Inner Mongolia*, 2007(1): 29-32.
- [83] 孙吉书, 陈朝霞, 肖田, 等. 石灰粉煤灰稳定铁尾矿碎石的路用性能研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(3): 59-62.
SUN J S, CHEN Z X, XIAO T, et al. Research on the performances of lime fly ash stabilized iron tailing gravel in highway application [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2012, 34(3): 59-62.
- [84] 万磊. 铁尾矿用作路面基层材料的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
WAN L. The apply of iron tailings as subgrade materials [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [85] 王一峰. 固化剂改良铁尾矿路用性能研究 [D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2019.
WAN Y F. Road performance study of curing agent stabilized iron tailing [D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2019.

Research Progress on the Utilization of Iron Tailings as Building Materials

SHI Da, REN Xuemei, HAO Tingyu, ZHANG Run

Central Research Institute of Building and Construction MCC Co., Ltd, Beijing 100082, China

Abstract: Iron tailings are the main solid waste produced in the process of iron ore development, and the utilization of iron tailings as building materials is one of the important directions for its large-scale consumption. Based on the physical and chemical characteristics of iron tailings, the research progress in the preparation of building materials from iron tailings at home and abroad is reviewed, including: (1) cement; (2) concrete, mainly as artificial coarse/fine aggregate, or as a cementing material after activation treatment; (3) brick materials, such as sintered brick, autoclaved brick, ceramic brick, permeable brick, and steam-free and burn-free brick; (4) wall materials, including concrete wall materials, new wall materials such as sound insulation materials and thermal insulation materials; (5) ceramic materials, such as porcelain tile, glass ceramics, and foamed ceramics; (6) road materials, including subgrade filling material, road base course, and subbase course. The major problems and future development trends of iron tailings in building materials applications are analyzed. Due to the characteristics of iron tailings, such as large particle size range, fine particle size in some parts, poor grading, poor activity, large performance fluctuation and large difference in properties of different iron tailings, there are some problems in the process of building materials utilization, such as small dosage, high treatment cost and poor product performance. According to the characteristics of iron tailings, an efficient and simple production process route is proposed. It is urgent to further reduce the production cost and improve the product value.

Keywords: iron tailings; building materials; cement; concrete; wall material; ceramic material; road material

引用格式: 史达, 任雪梅, 郝挺宇, 张润. 铁尾矿制备建筑材料研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(6): 44-55.

SHI Da, REN Xuemei, HAO Tingyu, ZHANG Run. Research progress on the utilization of iron tailings as building materials[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(6): 44-55.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn