

铁尾矿在建筑材料中的应用研究进展*

Research Progress on Durability of Iron Tailings Concrete and Its Application in Building Materials

薛三锋, 石华旺, 王鸿源, 冯胜雷, 李彦苍

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 铁尾矿作为工业固体废弃物, 其产量呈逐年递增趋势, 大量堆积的铁尾矿对环境造成了严重破坏, 对人民群众生命财产和健康构成了威胁, 如何实现铁尾矿废弃物资源化利用已成为我国可持续发展过程中不可回避的问题。以铁尾矿在建筑材料中的应用为目标, 分别从铁尾矿理化性质分析、用作水泥熟料、制备混凝土、制备新型轻质建材四个方面进行全面阐述, 分析现阶段铁尾矿资源化利用最新进展, 总结铁尾矿应用最新研究成果, 为铁尾矿在建筑材料中高附加值利用提供参考, 同时也助力“碳达峰、碳中和”目标的实现。

关键词: 铁尾矿; 建筑材料; 工业固废; 资源化利用

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 04-0015-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.003

XUE Sanfeng, SHI Huawang, WANG Hongyuan, FENG Shenglei, LI Yancang

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: As an industrial solid waste, the output of iron tailings is increasing year by year. In addition, the massive accumulation of iron tailings has caused serious damage to the environment and poses a threat to people's lives, property, health and life. How to realize the resource utilization of iron tailings waste has become an unavoidable problem in the process of sustainable development in China. Aiming at the application of iron tailings in building materials, this paper comprehensively expounds the four aspects of physical and chemical property analysis of iron tailings, use as cement clinker, preparation of concrete and preparation of new lightweight building materials, analyzes the latest progress of resource utilization of iron tailings at the present stage, summarizes the latest research results of iron tailings application, and provides reference for the high value-added utilization of iron tailings in building materials. At the same time, it also helps to achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality.

Keywords: iron tailing; building material; industrial solid waste; resource utilization

0 引言

近年来, 随着产业结构调整, 提升大宗工业固废的综合利用, 能够显著改善工业环境质量、实现经济社会可持续发展与全面绿色转型, 同时也助力国家双碳目标的实现^[1]。年产量在 1 亿 t 以上单一种类固体污染物称为大宗工业固体废弃物, 主要分为煤矸石、粉煤灰、尾矿、工业副产品石膏、冶金渣、建筑施工废弃物和农作物秸秆等七个种类, 因其年产量庞大、占地面积广阔、对环境影响较为突出,

* 基金项目: 河北省自然科学基金 (E2020402079, E2019402395); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (21422111281); 河北工程大学创新基金项目 (SJ2101003131)。

作者简介: 薛三锋 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 工矿固体废弃物资源化利用。

通信作者: 石华旺 (1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 工矿固体废弃物资源化利用、结构工程研究。

收稿日期: 2023-03-05

材料科学

是大宗工业固体废弃物资源化综合利用的核心范畴。

截止到 2020 年,我国每年新增大宗工业固体废弃物 30 亿 t,并且年增长率达到 7%,其中尾矿的总产量已经突破 600 亿 t,铁尾矿年产量接近 8.39 亿 t^[2-3]。现阶段,集中堆存仍然是我国解决尾矿问题的主要方式,尾矿大量堆存不仅占用有限土地资源,而且带来了严重的环境污染和安全隐患。天然建材作为一项不可再生资源,且产量逐年减少,使人们意识到利用尾矿作为天然建材也能够发挥其潜在的应用价值。目前,随着绿色建材的蓬勃发展,使用尾矿生产高附加值建材的占比也逐渐上升。经选矿后的铁尾矿,粒径与天然砂、机制砂接近,可利用铁尾矿制备机制砂。除此之外,还可以利用铁尾矿制备微晶玻璃、预制加气混凝土砌块、陶瓷、透水砖、保温建筑外墙、建筑物回填料等^[3]。

铁尾矿综合利用不仅改善矿区的环境卫生问题、减少尾矿的堆存,而且为尾矿的综合利用开辟了一条新道路,具有保护环境和促进经济发展的双重意义。以铁尾矿在建材中的应用为主要研究内容,梳理多年来铁尾矿在建材中应用与铁尾矿混凝土耐久性的相关

研究成果,为铁尾矿今后的研究与进展提供参考。

1 铁尾矿作为建材应用研究与进展

1.1 铁尾矿的理化特点

铁矿石经过一系列选矿流程后形成铁尾矿,通常表面粗糙、棱角分明、形状不规则。但随着选矿工艺的提高,铁尾矿磨细程度也越来越高,粒径越来越小,大部分都小于 1 mm,颜色呈灰黑色。杨永浩等^[4]通过显微图像技术,从细观层面表征尾矿的物理与力学特性,研究显示随着尾矿粒径的减小,圆度变大,表面轮廓趋近于圆形。巫尚蔚等^[5]则通过侧限压缩与显微观测相结合手段从宏观与微观角度表征尾矿压缩固结特性,结果表明含有黏性成分尾矿颗粒压缩固结特性强。

在我国,由于选矿工艺与铁矿地域性存在差异^[3](见表 1),所以化学成分含量也不尽相同,主要化学成分为 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO 和 MgO。铁尾矿经过一定的工艺处理后可以制备出相应的建材,实现经济与环境双效益^[6-7]。

表 1 不同地区铁尾矿的主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of iron tailings in different regions

产地	质量分数/%										
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	LOI
商洛	2.21	9.32	12.10	43.34	2.41	0.58	0.67	11.57	13.45	4.05	2.18
临沂	0.10	4.60	12.00	24.20	—	0.30	6.10	0.50	51.80	—	—
攀枝花	2.50	5.80	15.80	38.30	—	0.43	0.12	15.80	15.60	—	0.44
唐山	—	3.20	6.10	72.80	—	0.10	—	4.90	4.50	—	0.70
本溪	1.10	3.80	4.40	72.10	—	0.40	1.10	2.90	12.90	—	1.10
密云	—	5.30	7.50	65.30	—	—	—	3.80	11.80	—	2.10

1.2 铁尾矿生产水泥熟料

水泥熟料的主要化学成分为 CaO、SiO₂ 和少量的 Al₂O₃ 和 Fe₂O₃,矿物相包括四种:硅酸三钙(C₃S)、硅酸二钙(C₂S)、铝酸三钙(C₃A)和铁铝酸四钙(C₄AF)。近年来,控制温室气体排放,实现“碳达峰、碳中和”目标是大势所趋,通过开展工业固废替代水泥原材料的研究,可显著降低对天然矿产资源和能源消耗。

Zhao 等^[8]利用铁尾矿制备硫铝酸盐水泥,28 d 抗压强度达到了 52.5 MPa,符合 GB 175—2023《通用硅酸盐水泥》相关规范标准。徐庆荣^[9]为了减少黏土等自然资源的开采与使用,利用质量比 70% 石

灰粉、17% 铁尾矿、13% 钢渣,1400 °C 下煅烧 25 min 得到基本性能符合 GB/T 21372《硅酸盐水泥熟料》要求的水泥熟料。与徐庆荣不同的是,杨飞等^[10]以质量比为 20% 钒钛磁铁尾矿、75% 石灰石、5% 石英,1400 °C 下煅烧 30 min,制备出的水泥熟料中再掺入 5% 石膏,得到性能优良的 P·O 42.5R 水泥。综上,通常用铁尾矿与石灰石复掺,高温煅烧的途径生产水泥熟料。

1.3 铁尾矿制备混凝土骨料

现阶段,利用铁尾矿制备混凝土骨料的研究方向主要有两类:利用 0.15 ~ 4.75 mm 粒径范围内铁尾矿制备尾矿砂混凝土,以及利用粒径大于 4.75 mm

铁尾矿替代碎石制备尾矿石混凝土。

1.3.1 铁尾矿作粗骨料制备混凝土

目前,混凝土粗骨料多为天然骨料,随着资源的不断消耗,亟需寻找天然骨料的替代品。利用尾矿代替天然骨料是一条可行的路径,但是尾矿在组成成分、颗粒级配与形状等方面与天然骨料相比存在较大差异,其混凝土制品工作性能、力学性能和耐久性能表现如何还需深入研究与验证^[11-13]。陈博文等^[14]用粒径在 0.5~15 mm 范围内的尾矿石作为粗骨料制备混凝土,研究级配与混凝土工作性能之间的关系,用改进后的 Fuller 曲线表达式发现 0.532 为混凝土最佳级配指数,此时混凝土坍落度与稠度均满足泵送混凝土要求且力学性能良好。康迎杰等^[15]利用铁尾矿砂石制备全铁尾矿骨料混凝土,通过添加 0.042 kg/m³ 的 HPMC (羟丙基甲基纤维素),优化全铁尾矿骨料混凝土配合比,使得混凝土坍落度为 200 mm,工作性能良好。

力学性能上,刘佳^[16]研究发现使用北京密云和首钢的铁尾矿废石,通过替换天然混凝土粗细骨料可以生产出一种高性能绿色混凝土。陈杏婕等^[17]实验结果表明,当粗骨料粒径在 2.36~26.5 mm 范围内,能够降低孔隙率,减少对混凝土抗压强度的影响;利用铁尾矿制备全固废高强混凝土,28 d 抗压强度可达 75.92 MPa,满足 C60 混凝土的要求。王宇琨^[18]首先将铁尾矿粉与水泥拌合,然后通过先进成球技术将其制成球状,最后采用烧结等工序生产出粒径大小在 9.5~16 mm、内部硬度大约为 30~40 MPa 的铁尾矿粉球,与一般天然卵石相比,压碎值和坚固性均占有明显优势,适合配制 C40 混凝土的生产。

1.3.2 铁尾矿砂细骨料制备混凝土

铁尾矿砂因其粗糙的表面会降低混凝土和易性能,唐可等^[19]利用铁尾矿砂制备混凝土,研究尾矿砂替代率与混凝土和易性之间的关系,结果表明当铁尾矿砂替代率范围为 25%~50% 时,混凝土流动性较好;但随着替代率增大,和易性降低。顾晓薇等^[20]基于颗粒最紧密堆积理论,利用铁尾矿砂制备 UHPC (超高性能混凝土),结果表明随着铁尾矿砂掺量的增加,UHPC 流动度不断降低;当掺量超过 40% 时,流动度大幅度降低,给施工带来明显的不利影响。同时刘文燕等^[21]研究表明,当铁尾矿砂替

代率为 40% 时,混凝土坍落度为 205 mm,满足泵送要求。姚磊等^[22]通过对铁尾矿砂、天然砂与人工粗砂级配进行优化后,配制不同等级的混凝土,研究发现,混凝土和易性与铁尾矿砂掺量之间存在负相关,然而配制的 C30、C40 混凝土随着铁尾矿砂掺量的增加其抗压强度表现小幅度提升。

铁尾矿砂由于矿物相石英的存在使其具有较高的硬度,粗糙的表面与棱角可以形成稳定的框架结构,不断调整与优化细集料级配可以提高铁尾矿砂混凝土力学强度。刘震等^[23]用 20% 掺量铁尾矿砂组成细度模数为 2.8 的混合砂配制混凝土与单一机制砂混凝土比较强度,发现铁尾矿复合砂混凝土 28 d 抗压强度比单一石灰岩机制砂混凝土抗压强度提高了 2.5 MPa。张玉琢等^[24]以辽宁本溪地区铁尾矿砂为研究对象,探索混合砂在合理的级配关系中混凝土的强度与工作性能,结果表明,当铁尾矿砂与天然砂比例为 1:1 时,混合砂级配关系最好;替代率低于 50%,混凝土 28 d 抗压强度高于普通混凝土,但脆性较差。蔡基伟等^[25]则以铁尾矿砂石完全替代天然砂石,利用活性矿物掺合料优化混凝土配合比,结果发现在此条件下,较大的水胶比可以使得铁尾矿砂混凝土抗压强度略高于普通混凝土,且满足 C70 以下泵送混凝土的要求。由此可见,在优化级配关系条件下铁尾矿砂作细集料配制混凝土方案是可行的。除此之外,铁尾矿砂在高强度与高性能混凝土方面也取得了广泛地应用。郑永超等^[26-27]利用 70% 掺量的铁尾矿成功制备出抗压强度 100 MPa 与 89 MPa 的高强结构材料,固废总利用率高达 87%,结构的高强度与铁尾矿高掺量也为大宗工业固废高附加值利用提供全新的思路。狄燕青等^[28]采用梯级粉磨依次对铁尾矿、矿渣、水泥熟料和石膏进行粉磨,最终以 62.5% 替代率制备出 28 d 抗压强度达 84.56 MPa 的高性能混凝土。赵杰^[29]将铁尾矿砂与机制砂复掺,完全替代天然砂制备混凝土,发现在铁尾矿砂掺量达到 60% 时,复合砂混凝土强度在任意龄期内均高于天然砂混凝土,且收缩率最小。除此之外,铁尾矿砂中加入纤维应用于喷射混凝土施工中,鲁丽华等^[30]在铁尾矿砂混凝土中掺入钢纤维配置成钢纤维喷射混凝土解决了巷道衬砌问题,发现钢纤维掺量为 40 kg/m³ 时混凝土力学性能达到最优值,为铁尾

材料科学

矿砂综合利用提供一条全新思路。

在我国东北、西北地区,当季节交替变化时冻融现象显著,对混凝土制品抗冻融性能提出较高要求。王雪等^[31]利用不同铁尾矿砂替代率制备混凝土试件研究其耐久性,结果发现,随着铁尾矿砂替代率的增加,冻融循环后的混凝土相对弹性模量降低、质量损失率增加;微观上分析可知,过高铁尾矿砂替代率会造成混凝土孔径分布不均匀,使得铁尾矿砂混凝土抗冻融能力下降。康迎杰等^[15]研究发现,利用铁尾矿机制砂完全替代天然砂石制备出全铁尾矿骨料混凝土,其抗冻性与天然混凝土接近,为铁尾矿大规模应用提供了借鉴。另外,大多数混凝土结构长时间暴露在环境中,面临一种或多种自然因素侵蚀,对混凝土结构耐久性设计有着更高的要求。例如东南沿海地区,在海水、海风和干湿循环等耦合作用下,混凝土结构经常受到环境中氯盐的侵蚀,造成混凝土内部钢筋锈蚀,结构使用寿命大大缩减,带来巨大的安全隐患与经济损失,而利用铁尾矿砂制备混凝土,因致密孔隙结构使其拥有高于普通混凝土的抗氯离子渗透性能。艾洪祥等^[32]通过优化再生细骨料颗粒级配发现,采用Ⅱ区再生粗砂等质量替代20%天然砂配置混凝土,其抗氯离子渗透性能达到Ⅳ等级。王宁^[33]以全浸泡方式模拟氯盐侵蚀环境,研究掺特细铁尾矿砂混凝土抗氯离子能力,研究表明,氯离子浓度变化呈指数函数分布。张信龙等^[34]研究酸雨-冻融耦合作用下对铁尾矿砂混凝土耐久性影响,结果表明,随着铁尾矿砂取代率的增加,质量损失率、强度损失率和中性化深度均随冻融循环次数和酸雨侵蚀时间的增加而增大,动弹性模量随循环次数的增加而下降,根据动弹性模量和中性化深度指标分析,建议工程上铁尾矿砂取代率不超过75%。张玉琢等^[35]通过配置不同浓度NaCl溶液,并加速冻融循环试验,研究冻融-冰盐耦合作用下铁尾矿砂混凝土耐久性能,结果表明,冻融循环可加速氯离子扩散速率,扩大氯离子扩散区域,随着盐冻次数增加,质量损失与动弹性模量均出现不同程度的劣化,在3%NaCl溶液中,混凝土抗压强度降低幅度最大。

1.3.3 铁尾矿作为矿物掺合料制备混凝土

随着铁尾矿粉磨程度的增加,粒径小于0.15 mm

的铁尾矿粉颗粒占比越来越高,该粒径的铁尾矿不再适合作为细骨料配制混凝土,可作为矿物掺合料制备混凝土^[36]。

高敏^[37]在“铁尾矿制备矿物掺合料和再生集料的关键技术研究”中指出,机械-热活化对铁尾矿活性增强效果不明显,意义不大。朴春爱等^[38]研究铁尾矿粉在化学-机械耦合作用下胶凝材料的活性,研究表明耦合机制下,机械研磨使铁尾矿粉颗粒逐渐细化、化学激发剂提高铁尾矿粉活性,胶凝材料7 d与28 d活性指数达到最大,最大程度上激发了铁尾矿活性。通过添加化学助磨剂也可以大幅度提高铁尾矿粉活性,李萌等^[39]在铁尾矿粉中掺入0.7%脱石膏湿磨3 h后,铁尾矿粉活性指数达到91.27%,为铁尾矿高附加值利用提供借鉴。田尔布等^[40]将铁尾矿粉作为矿物掺合料单掺时发现,掺量超过10%时,混凝土抗折、抗压强度均呈下降趋势,且抗折强度下降速度更快。马雪英、王安岭等^[41-42]用铁尾矿粉与矿渣粉组成复合胶凝材料,探究铁尾矿粉掺量及比例对混凝土强度的影响,结果表明,复合胶凝材料对增强混凝土后期强度效果更加显著,不同龄期下混凝土强度随着铁尾矿替代率增加均出现下降趋势,说明复合胶凝材料中铁尾矿替代率也存在最优值。另外,铁尾矿粉在不同的养护条件下对混凝土强度贡献率也存在差异,陈梦义等^[43]指出:标准养护、热水及高温养护下,铁尾矿粉以微集料填充效应增强混凝土力学强度,而在蒸压养护条件下具备明显的增强效应,20%掺量下蒸压养护56 d对混凝土强度贡献率达到30.9%。

近年来,随着工业产值增加,CO₂等气体排放量也逐年上升,加剧温室效应,大量CO₂气体对混凝土抗碳化性能构成严峻挑战。铁尾矿作为矿物掺合料制备混凝土时,一方面,其内部活性SiO₂与Ca(OH)₂发生二次水化反应,OH⁻减少使得混凝土内部pH值降低,抗碳化性能下降^[44];另一方面,二次水化反应生成C-S-H凝胶和铁尾矿的填充效应会使混凝土结构变得更加致密,阻止CO₂气体进入并减小扩散,增加混凝土抗碳化性能^[45],所以在分析混凝土抗碳化性能时要综合评估这两方面作用。程云虹等^[46]研究发现,经机械力活化后的高硅型铁尾矿作辅助胶凝材料制备混凝土,当水泥取代量为

20%~40%时,各个龄期内混凝土碳化深度随着铁尾矿粉取代量增加而增大,高于基准混凝土,但都小于20 mm,均达到工程要求。所以,铁尾矿基混凝土抗碳化性能弱于水泥基混凝土抗碳化性能,原因是外部 CO_2 和内部 SiO_2 均消耗水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,使得混凝土内部pH值下降,抗碳化能力下降。

硫酸盐侵蚀环境下混凝土材料耐久性表现如何,国内外学者作了广泛深入的研究,一致认为造成混凝土宏观劣化的根本原因是孔隙结构中发生一系列物理、化学过程。很多学者从水胶比、矿物掺合料和硫酸根离子浓度等因素去分析耐久性降低原因。高润东等^[47]从水灰比角度阐述,低水灰比混凝土微观结构变得致密,阻止硫酸根离子进入混凝土内部,因此在保证混凝土和易性的条件下,较低水灰比可以增强混凝土抗硫酸盐侵蚀性。李涛等^[48]研究表明,在距离扩散源越近的地方,硫酸根离子浓度越高,反应速度越快,随着浸泡时间的延长,混凝土强度先增后减,原因是钙矾石由填充作用变为孔隙挤压,与硫酸盐侵蚀机理一样。在矿物掺合料对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能研究中,黄泽轩等^[49]用低活性铁尾矿微粉取代部分粉煤灰配制C30和C50混凝土,研究发现,铁尾矿微粉主要改善混凝土结构,通过填充和堆积作用减少其多害孔和有害孔数量,使混凝土微观结构变得更加致密,提高抗硫酸盐侵蚀性能,但替代粉煤灰比例不宜过高,宜在30%以内。程云虹等^[50]采取机械活化方式使铁尾矿具备活性,利用其“火山灰”效应消耗水泥净浆中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,减少易被硫酸盐腐蚀的组分,从而提高混凝土抗硫酸盐侵蚀性能。

1.4 利用铁尾矿制备其他建筑材料

针对铁尾矿的综合利用,全球的学者提出了不同的研究方案,早在上个世纪六十年代^[51],前苏联就开始尝试用铁尾矿制作建筑材料,60%建筑材料中均含有铁尾矿。随着科技发展,铁尾矿材料被广泛应用在生产生活中,如陶瓷建材、烧结建材、加气混凝土砌块与微晶玻璃等。

当前用固体废弃物制造加气混凝土是建筑材料研究的热门领域,利用铁尾矿表面粗糙、易产生孔隙与富含硅质、钙质原材料等特点,以铝粉为发气剂,在蒸压工艺条件下制成具备了隔热、保温、环

保等优势的新型多孔轻质建材。石磊等^[52]以承德地区的钒钛磁铁尾矿为主要原料,用质量比为铁尾矿(粉磨20 min):水泥:石灰:石膏=60:20:15:5的工艺条件,可制备出吸水性能与耐水性能较优,综合性能符合A4.5等级的蒸压加气混凝土砌块。叶鹏飞^[53]以钒钛铁尾矿为主要原料,通过材料预处理、成型、烧结等工艺,优化多元固废颗粒级配,最终制备出抗压强度为64 MPa、透水系数0.062 cm/s的高强透水砖,为钒钛铁尾矿制备高强透水砖提供理论借鉴。

2 结论

以铁尾矿资源化利用为导向,总结论述铁尾矿制备煅烧水泥熟料、利用粒径较大铁尾矿石代替天然粗骨料制备高性能混凝土、较小铁尾矿砂代替天然细骨料制备绿色混凝土、磨细铁尾矿粉用作矿物掺合料制备混凝土及整体利用铁尾矿制备其他建筑材料;着重论述并分析铁尾矿混凝土工作、力学及耐久性能,阐述宏观性能与微观机理间的相关性,综上所述,合理铁尾矿粗细骨料替代率与复合胶凝材料体系配比均能使铁尾矿微观表现更加致密,有害孔尺寸及数量得到进一步优化,较大的密实度有效阻止有害物质进入混凝土内部,宏观上表现为强度与耐久性能提升。铁尾矿混凝土在常见冻融循环、氯离子渗透、硫酸盐与 CO_2 侵蚀及多种腐蚀性因素耦合作用下,得益于“充填效应”与“火山灰效应”,二者均能显著改善混凝土孔结构,使得铁尾矿混凝土耐久性能优于普通混凝土。就尾矿材料充分利用与环境保护角度而言,尾矿综合利用技术的发展使铁尾矿利用率逐年提高,但其规模化应用尚有许多不足之处,综合利用存在一定的限制。

参 考 文 献

- [1] 顾晓薇,张伟峰. 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): 1-3.
- [2] 王微微,刘海卿. 高温后铁尾矿砂混凝土力学性能试验研究[J]. 金属矿山, 2019, 42(5): 42-44.
- [3] 申艳君. 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): 846-847.
- [4] 杨永浩,魏作安,陈宇龙,等. 基于图像处理技术的尾矿颗粒形态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1):

材料科学

3689-3695.

- [5] 巫尚蔚, 杨春和, 胡晓明, 等. 尾矿颗粒性质与压缩固结特性的关联性研究 [J]. 华中科技大学学报, 2017, 45 (11): 121-126.
- [6] MENDES B C. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks [J]. Construction and Building Materials, 2019 (227): 1-13.
- [7] HANSEN R N. Intercomparison geochemical modelling approaches and implications for environmental risk assessments: A Witwatersrandgold tailings source term characterization study [J]. Applied Geochemistry, 2018 (95): 71-84.
- [8] ZHAO J S. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties [J]. Construction and Building Materials, 2021, 286: 122968.
- [9] 徐庆荣. 利用铁尾矿烧制硅酸盐水泥熟料 [J]. 现代矿业, 2018 (5): 165-168.
- [10] 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.
- [11] 邱洪强. 机制砂颗粒形状及石粉含量对混凝土性能的影响 [D]. 深圳: 深圳大学, 2015.
- [12] 李北星, 王威, 陈梦义, 等. 粗骨料的等轴率、圆度和球度及其相互关系 [J]. 建筑材料学报, 2015, 18 (4): 531-536.
- [13] 李晓光, 陈婷, 卢攀. 铁尾矿颗粒形貌对砂浆尺寸稳定性影响的研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2016 (9): 86-90.
- [14] 陈博文, 梅甫定, 杨柳, 等. 粗磷尾矿胶结充填级配及料浆和易性规律研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (13): 25-35.
- [15] 康迎杰, 郭自利, 潘鹏. 全铁尾矿骨料混凝土的工作性、力学性能及耐久性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022, (4): 89-93.
- [16] 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, 2014.
- [17] 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.
- [18] 王宇琨. 以尾矿粉制球替代粗骨料的新型混凝土性能研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
- [19] 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.
- [20] 顾晓薇, 徐建宇, 贾泽藩, 等. 极细高硅型铁尾矿制备超高性能混凝土研究 [J]. 金属矿山, 2022 (547): 71-75.
- [21] 刘文燕, 张友来, 李绍纯, 等. 铁尾矿砂对机制砂混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2020 (12): 84-86.
- [22] 姚磊, 李晓芝, 鲁明星. 铁尾矿砂掺量对混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2019 (10): 97-100.
- [23] 刘震, 周明凯, 陈潇, 等. 左权铁尾矿在混凝土中的研究与工程应用 [J]. 新型建筑材料, 2021, 48 (2): 52-57.
- [24] 张玉琢, 周梅, 刘凯, 等. 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): 57-66.
- [25] 蔡基伟, 张少波, 侯桂香, 等. 铁尾矿对混凝土工作性和强度的影响 [J]. 武汉理工大学学报, 2016 (7): 104-107.
- [26] 郑永超, 倪文, 郭珍妮, 等. 铁尾矿制备高强结构材料的试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2009 (3): 2-4.
- [27] 郑永超, 倪文, 徐丽, 等. 铁尾矿的机械力活化及制备高强结构材料 [J]. 北京科技大学学报, 2010, 32 (4): 504-508.
- [28] 狄燕清, 崔孝炜. 掺尾矿高性能混凝土的制备 [J]. 商洛学院学报, 2015, 29 (6): 32-36.
- [29] 赵杰. 铁尾矿砂和机制砂复掺制备高性能混凝土 [J]. 散装水泥, 2022 (1): 171-173.
- [30] 鲁丽华, 罗丰, 刘文胜, 等. 尾矿砂钢纤维喷射混凝土在铁矿巷道中的应用 [J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40 (1): 109-114.
- [31] 王雪, 张少峰, 鲍文博, 等. 铁尾矿砂混凝土耐久性能的试验研究 [J]. 混凝土, 2020 (4): 93-97.
- [32] 艾洪祥, 刘洋, 卢霄, 等. 再生细骨料的级配优化及对混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022 (7): 92-96.
- [33] 王宁. 掺特细铁尾矿砂混凝土的耐久性试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
- [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): 107-114.
- [35] 张玉琢, 马洁, 刘海卿. 冰冻-氯盐循环下铁尾矿砂混凝土耐久性 [J]. 混凝土, 2018 (11): 29-31.
- [36] 于森, 倪文, 刘佳. 磨细铁尾矿粉粒度分布分形维数的研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35 (2): 26-31.
- [37] 高敏. 铁尾矿制备矿物掺合料和再生集料的关键技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [38] 朴春爱, 王栋民, 张力冉, 等. 化学-机械耦合效应对铁尾矿粉胶凝活性的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24 (6): 1100-1109.
- [39] 李萌, 周庆立, 白丽梅, 等. 机械力化学效应提高铁尾矿活性实验研究 [J]. 矿产综合利用, 2021 (1): 179-185.
- [40] 田尔布, 康海鑫, 跃宗. 铁尾矿微粉混凝土的力学性能分析 [J]. 三明学院院报: 2021, 38 (3): 106-112.
- [41] 马雪英, 王安岭, 杨欣. 铁尾矿粉复掺和料对混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土世界, 2013, 7 (49): 90-95.
- [42] 王安岭, 马雪英, 杨欣, 等. 铁尾矿粉用作混凝土掺合料的活性研究 [J]. 混凝土世界, 2013, 8: 66-69.
- [43] 陈梦义, 李北星, 王威, 等. 铁尾矿粉的活性及在混凝土中的增强效应 [J]. 金属矿山, 2013 (5): 164-168.
- [44] CHENG Y H. Durability of concrete incorporated with siliceous iron tailings [J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118147.
- [45] 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): 15-22.
- [46] 程云虹, 黄菲, 齐珊珊, 等. 高硅型铁 (下转第30页)

材料科学

2.4 自密实抑温防水复合材料对混凝土抗压性能影响试验

根据表 8 中配合比制成立方体混凝土试件,按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行 3、7、28 d 混凝土抗压试验,试验结果见表 9,从抗压强度值可以看出,掺抑温材料的混凝土试块与空白组混凝土试块相比,3、7 d 龄期的混凝土强度相近,28 d 混凝土强度还略有提升,表明在混凝土成型过程中掺入自密实抑温防水复合材料不会影响混凝土早期强度,还会增强混凝土 28 d 强度,有利于增强后期混凝土抗裂性能。

表 9 混凝土抗压强度

Table 9 Compressive strength values of concrete /MPa

组别	3 d	7 d	28 d
空白组	13.4	27.0	39.7
YX-W 组	13.2	26.1	40.3

3 结论

(1) 自密实抑温防水复合材料掺入混凝土中,使工程中侧墙中部和下部的应变分别为分别降低了 30.2%、13.7%,很大程度地减少温度裂缝的产生。特别是对于地下室侧墙等薄壁结构,在减少裂缝产生的同时,材料中的高分散抗静电纤维,在混凝土中呈现三维杂乱分布,对结构进行增韧,能够大幅

度提高混凝土抗裂性能。

(2) 自密实抑温防水复合材料在地下室工程使用中,实现了结构的自防水功能,使地下室防水工程重心从外防水转移到结构自防水上,并且取得了较好的效果。

参 考 文 献

- [1] 苏建滨. 大体积混凝土温度裂缝控制与优化分析 [J]. 散装水泥, 2022 (1): 124-126.
- [2] 乔永立. 大体积混凝土温度裂缝的分析与控制措施 [J]. 中国建材科技, 2022, 31 (2): 137-138, 84.
- [3] 王明, 郭海龙, 周清松, 等. 结构自防水在地下混凝土工程中的应用 [J]. 混凝土世界, 2022 (6): 62-65.
- [4] 李明, 姚婷, 王育江, 等. 基于多场耦合机制的混凝土墙板结构裂缝控制 [J]. 混凝土, 2017 (11): 58-62.
- [5] 黄河, 冯雁波, 杨鹏, 等. 混凝土抗裂能力的评价探讨 [J]. 工程建设与设计, 2022 (15): 219-221.
- [6] 邓其岳. 大体积混凝土温度裂缝防控措施 [J]. 江西建材, 2021 (5): 165, 168.
- [7] 罗雷, 杨奇玮. 高效抗裂防水剂在地下工程大体积混凝土中的应用技术研究 [J]. 中国建筑防水, 2016 (4): 21-25.
- [8] 张海军. 浅谈超长混凝土结构温度收缩裂缝的预防措施 [J]. 四川建筑, 2013, 33 (1): 113-114, 118.
- [9] 万里长, 范玮武, 叶庭, 等. 大体积混凝土温度裂缝控制技术的运用 [J]. 河南科技, 2020, 39 (34): 119-121.
- [10] 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, 2019, 40 (1): 121-149.
- [11] 高润东, 赵顺波, 李庆斌, 等. 干湿循环作用下混凝土硫酸盐侵蚀劣化机理试验研究 [J]. 土木工程学报, 2010, 43 (2): 48-84.
- [12] 李涛, 朱鹏涛, 张彬, 等. 硫酸盐侵蚀下混凝土内腐蚀反应-扩散过程的实验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (1): 50-55.
- [13] 黄泽轩, 侯义辉, 宋少民. 铁尾矿微粉对混凝土收缩及耐久性能的影响 [J]. 混凝土, 2020 (5): 56-59.
- [14] 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, 2019, 40 (1): 121-149.
- [15] 常宁. 钕钛磁铁尾复合胶凝材料制备隔声板材的研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [16] 石磊, 宋宵. 钕钛磁铁尾矿对蒸压加气混凝土砌块的影响 [J]. 钢铁钕钛, 2020, 41 (3): 84-89.
- [17] 叶鹏飞. 钕钛铁尾矿高强烧结透水砖的制备及机理研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.

(上接第 20 页)