

丛书序一

深入推进固废资源化、大力发展循环经济已经成为支撑社会经济绿色发展、战略资源可持续供给和“双碳”目标实现的重要途径，是解决我国资源环境生态问题的基础之策，也是一项利国利民、功在千秋的伟大事业。党和政府历来高度重视固废循环利用与污染控制工作，习近平总书记多次就发展循环经济、推进固废处置利用做出重要批示；《2030年前碳达峰行动方案》明确深入开展“循环经济助力降碳行动”，要求加强大宗固废综合利用、健全资源循环利用体系、大力推进生活垃圾减量化资源化；党的二十大报告指出“实施全面节约战略，推进各类资源节约集约利用，加快构建废弃物循环利用体系”。

回顾二十多年来我国循环经济的快速发展，总体水平和产业规模已取得长足进步，如：2020年主要资源产出率比2015年提高了约26%、大宗固废综合利用率达56%、农作物秸秆综合利用率达86%以上；再生资源利用能力显著增强，再生有色金属占国内10种有色金属总产量的23.5%；资源循环利用产业产值达到3万亿元/年等，已初步形成以政府引导、市场主导、科技支撑、社会参与为运行机制的特色发展之路。尤其是在科学技术部、国家自然科学基金委员会等长期支持下，我国先后部署了“废物资源化科技工程”、国家重点研发计划“固废资源化”重点专项以及若干基础研究方向任务，有力提升了我国固废资源化领域的基础理论水平与关键技术装备能力，对固废源头减量—智能分选—高效转化—清洁利用—精深加工—精准管控等全链条创新发展发挥了重要支撑作用。

随着全球绿色低碳发展浪潮深入推进，以欧盟、日本为代表的发达国家和地区已开始部署新一轮循环经济行动计划，拟通过数字、生物、能源、材料等前沿技术深度融合以及知识产权与标准体系重构，保持其全球绿色竞争力。为了更好地发挥“固废资源化”重点专项成果的引领和应用效能，持续赋能循环经济高质量发展和高水平创新人才培养等方面工作，科学出版社依托该专项组织策划了“固废资源化技术丛书”，来自中国科学院过程工程研究所、五矿集团、矿冶科技集团有限公司、同济大学、北京工业大学等单位的行业专家、重点专项项目及课题负责人参加了丛书的编撰工作。丛书将深刻把握循环经济领域国内外学术前沿动态，系统提炼“固废资源化”重点专项研发成果，充分展示和深入分析典型无机固废

源头减量与综合利用、有机固废高效转化与安全处置、多元复合固废智能拆解与清洁再生等方面的基础理论、关键技术、核心装备的最新进展和示范应用，以期让相关领域广大科研工作者、企业家群体、政府及行业管理部门更好地了解固废资源化科技进步和产业应用情况，为他们开展更高水平的科技创新、工程应用和管理工作提供更多有益的借鉴和参考。

左铁镛

中国工程院院士

2023年2月

丛书序二

我国处于绿色低碳循环发展关键转型时期。化工、冶金、能源等行业仍将长期占据我国工业主体地位，但其生产过程产生数十亿吨级的固体废物，造成的资源、环境、生态问题十分突出，是国家生态文明建设关注的重大问题。同时，社会消费环节每年产生的废旧物资快速增加，这些废旧物资蕴含着宝贵的可回收资源，其循环利用更是国家重大需求。固废资源化通过再次加工处理，将固体废物转变为可以再次利用的二次资源或再生产品，不但可以解决固体废物环境污染问题，而且能够实现宝贵资源的循环利用，对于保证我国环境安全、资源安全非常重要。

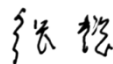
固废资源化的关键是科技创新。“十三五”期间，科学技术部启动了“固废资源化”重点专项，从化工冶金清洁生产、工业固废增值利用、城市矿产高质循环、综合解决集成示范等全链条、多层面、系统化加强了相关研发部署。经过三年攻关，取得了一系列基础理论、关键技术和工程转化的重要成果，生态和经济效益显著，产生了巨大的社会影响。依托“固废资源化”重点专项，科学出版社组织策划了“固废资源化技术丛书”，来自中国科学院过程工程研究所、中国地质大学（北京）、中国矿业大学（北京）、中南大学、东北大学、矿冶科技集团有限公司、军事科学院国防科技创新研究院等很多单位的重点专项项目负责人都参加了丛书的编撰工作，他们都是固废资源化各领域的领军人才。丛书对固废资源化利用的前沿发展以及关键技术进行了阐述，介绍了一系列创新性强、智能化程度高、工程应用广泛的科技成果，反映了当前固废资源化的最新科研成果和生产技术水平，有助于读者了解最新的固废资源化利用相关理论、技术和装备，对学术研究和工程化实施均有指导意义。

我带领团队从1990年开始，在国内率先开展了清洁生产与循环经济领域的技术创新工作，到现在已经30余年，取得了一定的创新性成果。要特别感谢科学技术部、国家自然科学基金委员会、中国科学院等的国家项目的支持，以及社会、企业等各方面的大力支持。在这个过程中，团队培养、涌现了一批优秀的中青年骨干。丛书的主编李会泉研究员在我团队学习、工作多年，是我们团队的学术带头人，他提出的固废矿相温和重构与高质利用学术思想及关键技术已经得到了重要工程应用，一定会把这套丛书的组织编写工作做好。

固废资源化利国利民，技术创新永无止境。希望参加这套丛书编撰的专家、

学者能够潜心治学、不断创新，将理论研究和工程应用紧密结合，奉献出精品工程，为我国固废资源化科技事业做出贡献；更希望在这个过程中培养一批年轻人，让他们多挑重担，在工作中快速成长，早日成为栋梁之材。

感谢大家的长期支持。



中国工程院院士

2022年12月

丛书前言

深入推进固废资源化已成为大力发展循环经济，建立健全绿色低碳循环发展经济体系的重要抓手。党的二十大报告指出“实施全面节约战略，推进各类资源节约集约利用，加快构建废弃物循环利用体系”。我国固体废物增量和存量常年位居世界首位，成分复杂且有害介质多，长期堆存和粗放利用极易造成严重的水-土-气复合污染，经济和环境负担沉重，生态与健康风险显现。而另一方面，固体废物又蕴含着丰富的可回收物质，如不加以合理利用，将直接造成大量有价资源、能源的严重浪费。

通过固废资源化，将各类固体废物中高品位的钢铁与铜、铝、金、银等有色金属，以及橡胶、尼龙、塑料等高分子材料和生物质资源加以合理利用，不仅有利于解决固体废物的污染问题，也可成为有效缓解我国战略资源短缺的重要突破口。与此同时，由于再生资源的替代作用，还能有效降低原生资源开采引发的生态破坏与环境污染问题，具有显著的节能减排效应，成为减污降碳协同增效的重要途径。由此可见，固废资源化对构建覆盖全社会的资源循环利用体系，系统解决我国固废污染问题、破解资源环境约束和推动产业绿色低碳转型具有重大的战略意义和现实价值。随着新时期绿色低碳、高质量发展目标对固废资源化提出更高要求，科技创新越发成为其进一步提质增效的核心驱动力。加快固废资源化科技创新和应用推广，就是要通过科技的力量“化腐朽为神奇”，将“绿水青山就是金山银山”的理念落到实处，协同推进降碳、减污、扩绿、增长。

“十三五”期间，科学技术部启动了国家重点研发计划“固废资源化”重点专项，该专项紧密面向解决固体废物重大环境问题、缓解重大战略资源紧缺、提升循环利用产业装备水平、支撑国家重大工程建设等方面战略需求，聚焦工业固废、生活垃圾、再生资源三大类典型固废，从源头减量、循环利用、协同处置、精准管控、集成示范等方面部署研发任务，通过全链条科技创新与全景式任务布局，引领我国固废资源化科技支撑能力的全面升级。自专项启动以来，已在工业固废建工建材利用与安全处置、生活垃圾收集转运与高效处理、废旧复合器件智能拆解高值利用等方面取得了一批重大关键技术突破，部分成果达到同领域国际先进水平，初步形成了以固废资源化为核心的技术装备创新体系，支撑了近 20 亿吨工业固废、城市矿产等重点品种固体废物循环利用，再生有色金属占比达到 30%，

为破解固废污染问题、缓解战略资源紧缺和促进重点区域与行业绿色低碳发展发挥了重要作用。

本丛书将紧密结合“固废资源化”重点专项最新科技成果，集合工业固废、城市矿产、危险废物等领域的前沿基础理论、创新技术、产品案例和工程实践，旨在解决工业固废综合利用、城市矿产高值再生、危险废物安全处置等系列固废处理重大难题，促进固废资源化科技成果的转化应用，支撑固废资源化行业知识普及和人才培养。并以此为契机，期寄固废资源化科技事业能够在各位同仁的共同努力下，持续产出更加丰硕的研发和应用成果，为深入推动循环经济升级发展、协同推进减污降碳和实现“双碳”目标贡献更多的智慧和力量。

李会泉 何发钰 戴晓虎 吴玉锋

2023年2月

前言

钢铁工业是支撑我国国民经济发展的基础性产业，铁矿资源作为钢铁生产的核心原料，其供应保障直接关乎工业体系的稳定运转。我国作为全球最大的钢铁生产国与铁矿消费国，铁矿资源“贫、细、杂”的禀赋特征尤为显著，导致开采与选矿环节产生巨量铁矿固废，主要包括铁矿废石、铁矿废石粉（机制砂生产伴生副产物）及铁尾矿三大类。数据显示，我国铁矿废石历史堆存量约 400 亿吨，存量消纳压力突出；同时，近年来我国尾矿年产生量保持在十亿吨级规模，其中铁尾矿占比约 43%~45%，是最主要的尾矿类型之一。这类大宗固废的长期堆存不仅占用大量优质土地资源，更易引发泥石流、土壤与水体污染等生态环境风险，且存在尾矿库渗漏、坍塌等安全隐患，已成为制约矿业绿色发展与生态环境保护的突出瓶颈。

与此同时，在“双碳”目标引领与生态文明建设深入推进的时代背景下，国家层面密集出台《2030 年前碳达峰行动方案》《固体废物综合治理行动计划》等重磅政策，明确将大宗固废综合利用列为核心任务，提出大掺量、规模化、高值化利用要求，鼓励替代原生砂石资源，为铁矿固废资源化利用创造了前所未有的政策红利。从市场需求来看，装配式建筑作为新型建筑工业化的重要方向，根据《“十四五”建筑业发展规划》，到 2025 年装配式建筑占新建建筑比例达到 30% 以上，对绿色低碳、性能稳定、成本可控的混凝土材料需求持续增加。同时，随着金属矿山开采深度增加，采空区治理对低成本、高稳定性充填材料的需求不断提升。铁矿固废以硅铝酸盐矿物为主体，具备力学性能稳定、来源广泛、成本低廉的天然优势，精准适配装配式建筑材料与矿山充填材料的应用场景，其高附加值利用已成为破解固废堆存危机、缓解资源短缺压力、推动产业绿色转型的关键路径。

尽管对铁矿固废资源化利用已开展部分探索，但当前研究与应用仍面临多重瓶颈：一是利用模式多集中于低附加值的基础建材生产、简单回填处置等领域，在装配式混凝土、矿山充填等高端场景的规模化应用不足；二是技术研究呈现“碎片化”特征，针对铁矿废石制备装配式结构混凝土的性能与微观结构调控、铁尾矿制备装配式非结构混凝土的配合比优化、铁尾矿超细粉料制备充填材料的流变特征等核心问题，缺乏系统性整合与跨领域协同创新；三是现有成果多分散于期刊论文、会议报告等载体，尚未形成覆盖“分类组成—关键技术—工程应用”的

完整技术体系，导致前沿技术与工业生产之间存在明显断层。

基于上述背景，本书聚焦含铁尾矿固废高附加值利用的核心需求，以铁矿废石、铁矿废石粉、铁尾矿的分类组成与资源化潜力为基础，系统开展三大核心方向的研究工作：在装配式结构混凝土领域，重点探索铁矿废石对混凝土强度与微观结构的影响规律；在装配式非结构混凝土领域，聚焦配合比优化设计与工作性、耐久性等性能调控技术；在矿山充填材料领域，深入研究铁尾矿超细粉料的配合比优化与流变特征调控方法。通过整合跨领域研究成果，破解高掺量应用下的强度损失、耐久性衰减及技术不成熟等关键技术瓶颈，构建“原料特性—技术优化—工程应用”的完整体系。

本书旨在为铁矿固废资源化利用提供系统性的理论支撑与工程实践指导：一方面，通过梳理铁矿固废的分类组成与理化特性，厘清不同固废的适配应用场景与技术路径；另一方面，通过深入剖析三大核心应用方向的技术瓶颈与解决方案，为科研工作者提供精准的研究参考，为企业工业化生产、工程实际应用及行业标准制定提供科学依据。期望通过本书的研究与总结，推动铁矿固废从“末端处置”向“源头减量—过程利用—高值转化”的全链条转型，助力实现固废资源化、建筑工业化与矿山绿色开采的协同发展，为我国生态文明建设与“双碳”目标达成贡献积极力量。

本书内容涉及的相关研究工作及出版得到了辽宁省科技重大专项“大宗工业固废含铁尾矿资源化处理技术及工程示范”（2020JH1/10300005）及国家出版基金的资助，在此表示衷心感谢。作者谨向李晓慧、王岫宇、迟浩峰、郭镇邦致以诚挚谢意，感谢其在实验工作中给予的支持与协助。同时感谢王营、王达伟、杨博涵、马以勒、黄东蔚、高文鑫等人在本书撰写与整理过程中付出的努力。

因研究领域的复杂性与前沿性，书中难免存在疏漏与不足，恳请广大读者批评指正。

作 者

2026 年 4 月

目 录

丛书序一

丛书序二

丛书前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 铁矿固废研究现状	3
1.2.1 铁矿固废的分类及组成	3
1.2.2 铁矿废石综合应用现状	5
1.2.3 铁矿废石粉综合应用现状	8
1.2.4 铁尾矿综合应用现状	12

第一部分 铁矿废石大掺量制备装配式结构混凝土研究

第 2 章 铁矿废石梯级精细化预处理研究	19
2.1 典型铁矿剥离岩石的工艺矿物学及力学性质	19
2.2 破碎方式对机制砂性能参数的影响	26
2.3 破碎方式对骨料颗粒级配的影响	27
2.4 破碎方式对骨料粒型的影响	39
第 3 章 铁矿废石骨料装配式结构混凝土性能及微观结构研究	51
3.1 试验概况	51
3.1.1 原材料	51
3.1.2 试验方案	52
3.1.3 试验方法	53
3.2 铁矿废石骨料性质	56
3.2.1 级配对比	56
3.2.2 圆度对比	57
3.3 工作性能	58

3.4	力学性能	59
3.4.1	抗压强度	59
3.4.2	抗折强度	60
3.4.3	劈裂抗拉强度	61
3.4.4	破坏模式	61
3.5	抗氯离子渗透性能	63
3.6	界面过渡区微观结构	64
第4章	铁矿废石骨料-掺合料协同制备装配式结构混凝土性能及微观结构研究	74
4.1	试验概况	74
4.1.1	原材料	74
4.1.2	试验方案	77
4.1.3	试验方法	78
4.2	工作性能	81
4.3	力学性能	82
4.3.1	抗压强度	82
4.3.2	抗折强度	83
4.3.3	劈裂抗拉强度	84
4.4	抗氯离子渗透性能	85
4.5	界面过渡区微观结构	87
4.6	微观结构强化机理	96

第二部分 铁尾矿制备装配式非结构混凝土研究

第5章	铁尾矿大掺量制备蒸压加气混凝土研究	103
5.1	试验概况	103
5.1.1	原材料	103
5.1.2	试验方案	105
5.1.3	试验方法	106
5.2	配合比优化设计	108
5.2.1	水料比	108
5.2.2	钙质材料选取	110
5.2.3	胶凝材料掺量	112
5.2.4	钙质材料掺量	114
5.2.5	配合比设计	117
5.3	孔结构优化	124

5.3.1	流动性	125
5.3.2	发气性能	126
5.3.3	物理性能	127
5.3.4	导热性能	128
5.3.5	孔隙结构	130
5.3.6	微观孔隙结构	132
5.4	水化产物及结构	133
5.5	HPMC 的增强机制	136
第 6 章	铁尾矿泡沫混凝土制备技术研究	139
6.1	试验概况	139
6.1.1	原材料	139
6.1.2	试验方案	142
6.1.3	试验方法	144
6.2	配合比优化设计	146
6.2.1	胶凝材料掺量	146
6.2.2	铁尾矿细度	150
6.2.3	细骨料	152
6.2.4	水胶比	153
6.2.5	泡沫掺量	154
6.2.6	聚乙烯醇掺量	156
6.2.7	纤维素醚掺量	159
6.2.8	减水剂掺量	160
6.2.9	配合比设计	161
6.3	水化产物及结构	172
6.4	抗冻融性能	174

第三部分 铁尾矿超细粉料制备充填材料研究

第 7 章	铁尾矿超细粉料制备充填胶凝材料研究	179
7.1	试验概况	179
7.1.1	原材料	179
7.1.2	试验方案	181
7.1.3	试验方法	181
7.2	充填胶凝材料配合比优化设计	184
7.2.1	铁尾矿的影响	184
7.2.2	矿渣掺量	188

7.2.3	脱硫石膏掺量·····	189
7.2.4	氧化钙掺量·····	191
7.2.5	硫酸钠掺量·····	192
7.2.6	配合比设计·····	193
7.3	充填料浆堆积密实度·····	196
7.4	充填料浆水膜厚度·····	200
7.5	充填料浆屈服应力·····	201
7.6	充填成本对比·····	204
参考文献·····		205

第1章

绪论

1.1 研究背景

我国作为全球矿业大国，铁矿资源“贫、细、杂”的禀赋特征尤为突出。伴随钢铁工业数十年的规模化发展，巨量含铁尾矿与铁矿废石的产生已成为工业固废治理领域的核心痛点。相关统计数据显示，2023 年我国尾矿总产生量约 14.24 亿吨，同比增长 0.56%；其中铁尾矿产生量约 6.17 亿吨，占尾矿总产生量的 43.30%，是我国最主要的尾矿类型之一。此外，我国铁矿石资源和原矿产量呈现明显区域集中分布特征，河北、辽宁、四川等地区为主要铁矿石产区，铁矿开发强度较高，相应带来的尾矿堆存压力也更为突出。与此同时，我国每生产 1 t 铁精粉平均需排放 5.78 t 采矿废石（较往年略有下降，反映开采技术优化成效）。2024 年，铁矿废石排放量增至 9.1 亿吨，利用率提升至 31.2%（较 2018 年提高 3.3 个百分点），但至 2025 年初，全国铁矿废石累计堆存量约 400 亿吨，存量消纳压力依然艰巨。这些大宗固废的长期堆存，不仅占用大量优质土地资源，还易引发泥石流、植被破坏、土壤与水体污染等生态环境问题，更存在尾矿库渗漏、坍塌等安全隐患，对矿区及周边生态安全构成持续性威胁。值得关注的是，这类固废主要成分包含硅酸盐、铝酸盐等矿物，具备力学性能稳定、强度较高的特性，天然契合建筑材料、充填骨料等资源化利用场景，为其高附加值转化提供了坚实的物质基础。

党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视生态文明建设与资源循环利用，将其作为关系中华民族永续发展的根本大计。习近平总书记深刻指出，节约资源是保护生态环境的根本之策，强调要抓住资源利用这个源头，推进资源总量管理、科学配置、全面节约、循环利用，全面提高资源利用效率。我国也明确提出加快构建废弃物循环利用体系，实施全面节约战略，推动资源利用方式根本转变，将固体废物从“环境包袱”转化为“宝贵资源”。在全国生态环境保护大会上，总书记进一步部署加强固体废物综合治理，加快“无废城市”建设，为大宗工业固废资源化利用指明了根本方向。在习近平生态文明思想指引下，大宗工业固废资源化利用已上升为国家战略，形成了系统完备的政策支撑体系。

国家层面密集出台的重磅政策，为含铁尾矿高附加值利用构建了全方位保障

体系。2021年，国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》，明确将尾矿、共伴生矿等大宗固废列为综合利用重点领域，支持大掺量、规模化、高值化利用模式，鼓励替代原生砂石资源，并设定到2030年大宗固废年利用量达45亿吨的刚性目标；国家发改委、生态环境部等部门联合发布《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》，提出“规模利用与高值利用相结合、消纳存量与控制增量相结合”的核心原则，要求新增大宗固废综合利用率达60%，推动尾矿等固废在建筑、矿山充填等领域的规模化应用。2024年，国务院办公厅印发《关于加快构建废弃物循环利用体系的意见》，进一步拓宽大宗固废综合利用渠道，明确支持在建筑领域推广应用，并畅通井下充填、生态修复等消纳路径。2026年初，国务院发布首个系统部署固体废物综合治理的行动计划——《固体废物综合治理行动计划》，将尾矿综合利用列为核心任务，提出促进尾矿就近充填回填，原则上不再批准无配套尾矿利用设施的选矿项目，要求到2030年完成全国60%以上历史遗留固体废物堆存场所治理，全面完成赤泥库、尾矿库环境风险隐患整治。上述政策从顶层设计到落地实施，形成了“战略引领—目标约束—路径明确—监管保障”的完整闭环，为铁尾矿在建筑、矿山充填等领域的高附加值利用提供了前所未有的政策红利与发展机遇。在政策红利的持续释放下，市场端的需求缺口与应用场景正加速打开，其中装配式建筑领域的爆发式增长，为含铁尾矿的规模化、高值化利用提供了最直接的市场承载。

从市场需求维度看，装配式建筑作为新型建筑工业化的核心方向，凭借高效、节能、环保的显著优势已进入普及化加速阶段。截至2026年5月，其渗透率已超40%，提前超额完成“十四五”规划目标，市场正逐步向三四线城市下沉，相关产业总市值已达1.25万亿元，市场需求持续旺盛。随着装配式建筑技术从第一代套筒连接体系向叠合剪力墙、模块化建造等第二代技术迭代升级，行业对混凝土材料的性能、成本与绿色属性提出了更高要求。然而，当前装配式混凝土生产主要依赖的天然砂石资源日益短缺，过度开采引发的生态破坏问题愈发突出，亟须寻找环保、廉价、性能稳定的替代材料。铁尾矿与铁矿废石经适当处理后，可作为混凝土骨料或掺合料广泛应用，既能有效降低生产成本，又能减少天然资源消耗，完全契合装配式建筑“绿色低碳”的发展趋势。

除建筑领域外，矿山充填工程的现实需求为含铁尾矿高附加值利用开辟了另一重要赛道。我国金属矿山开采深度持续增加，采空区治理已成为保障矿山安全生产、防止地表塌陷的关键环节，充填采矿法的应用比例不断提升，对充填材料的需求量呈爆发式增长。传统充填材料多采用水泥、天然砂石等优质资源，不仅成本居高不下，且资源消耗量大，难以满足大规模充填工程的经济性与可持续性要求。铁尾矿作为充填材料的核心优势日益凸显，同时能实现“以废治废”，将矿山产生的固废直接用于采空区充填，在减少堆存压力的同时大幅降低充填成本。

尽管目前废石-尾矿胶结充填等技术已在部分矿山试点应用,并取得回采率提升、贫化率降低的显著效果,但仍存在充填体强度不足、高掺量利用技术不成熟等共性问题,制约了其规模化推广。

综合来看,尽管含铁尾矿与铁矿废石的资源化利用已开展部分探索,但现有技术仍存在明显短板:铁矿废石在装配式结构混凝土中的大掺量应用面临强度损失、耐久性下降等技术瓶颈,限制了其在承重结构中的推广应用;铁尾矿制备装配式非结构混凝土的性能调控与工业化技术尚未完全成熟,产品质量稳定性有待进一步提升;铁尾矿在充填材料中的配比优化及流变特性演化研究仍显不足,难以满足复杂地质条件下的充填工程要求。而装配式建筑对混凝土材料绿色化、高性能化的迫切需求,以及矿山充填工程对低成本、高稳定性充填材料的现实诉求,与当前含铁尾矿利用效率低、附加值不高的现状形成鲜明矛盾。在此背景下,系统开展“铁矿废石大掺量制备装配式结构混凝土”“铁尾矿制备装配式非结构混凝土”“铁尾矿制备充填材料”三大方向的研究,既是深入贯彻习近平生态文明思想、落实国家固废资源化战略的必然要求,也是破解大宗含铁固废堆存危机、契合建筑工业化与矿山绿色开采双重需求的关键举措,对推动固废资源化、建筑工业化与矿山绿色开采的协同发展具有重要的理论意义与工程价值。

1.2 铁矿固废研究现状

1.2.1 铁矿固废的分类及组成

铁矿固废是铁矿开采过程中产生的主要固体废弃物,根据来源、加工工艺及物理形态的差异,核心可分为铁矿废石、铁矿废石粉及铁尾矿三大类。其分类主要基于产生环节与物理状态双重维度:按产生环节划分,铁矿废石源于露天采矿或地下采矿过程中剥离的围岩、夹石及低品位矿石(TFe含量通常低于20%,不具备直接选矿价值),铁尾矿是铁矿石经破碎、磨矿、分选等选矿工艺后排出的低品位尾矿浆经脱水处理形成的固体废弃物,铁矿废石粉则是铁矿废石加工利用过程中的核心衍生产物,尤其在铁矿废石制备机制砂的生产环节中,经破碎、筛分后产生的粒径小于0.075 mm(200目)的粉体副产物,是机制砂生产的必然伴生体,也是铁矿废石资源化利用的重要形态之一;按物理状态划分,铁矿废石以块状为主,粒径多在5 mm以上,铁矿废石粉为粉体形态[粒径通常小于0.075 mm,即200目,参照GB/T 14684—2022《建设用砂》粒径分级标准],铁尾矿通常以细粒或微细粒为主,粒径多集中于几十微米至数百微米范围,具体分布受磨矿细度、选矿工艺和脱水方式影响,部分细尾矿中小于0.075 mm的颗粒占比较高。

从三类铁矿固废的核心特征来看,铁矿废石作为矿山开采阶段的直接产物,其产生量与开采规模、矿山地质条件密切相关,我国每生产 1 t 铁精粉平均伴随 5.78 t 铁矿废石排放(2024 年行业统计数据),外观多为灰色、褐色块状,硬度较高,主要以原生矿物集合体形式存在,无明显磨矿加工痕迹;铁矿废石粉主要产生于铁矿废石制备机制砂的生产流程,是废石经破碎、研磨、筛分后,无法满足机制砂粒径要求的粉体副产物,根据研磨精度可进一步分为普通废石粉(粒径 $0.075\sim 0.01\text{mm}$)与超细废石粉(粒径 $<0.01\text{mm}$),其产生量与机制砂生产规模直接相关,可通过优化破碎筛分工艺参数调控产量与粒径分布,适配不同应用场景需求;铁尾矿作为选矿工艺的终端产物,2023 年我国产生量约 6.17 亿吨,占当年尾矿总产生量的 43.30%,为产生量最大的尾矿类型,2024 年全国尾矿总产生量超 15 亿吨,铁尾矿占比维持在 43%~45%区间,其颗粒经磨矿工艺处理后呈不规则细粒状,颗粒级配较均匀,天然含水率通常在 5%~15%,需经脱水处理后才能进行后续资源化利用。

三类铁矿固废的组成均与原矿地质条件、选矿工艺密切相关,但因产生环节与加工方式不同,在化学组成、矿物组成及物理特性上存在显著差异。化学组成方面,三者均以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 等氧化物为主,其中铁矿废石的 SiO_2 含量最高(50%~70%)、 Fe_2O_3 含量较低(5%~15%),是区别于铁矿石的核心指标;铁矿废石粉的化学组成与原生铁矿废石基本一致,仅因破碎研磨过程中少量矿物氧化, Fe_2O_3 含量略有上升(通常增加 0.5%~2%),且因与机制砂同源,其化学组分稳定性与机制砂原料高度匹配;铁尾矿的 SiO_2 含量为 45%~65%、 Al_2O_3 含量为 10%~18%。典型铁尾矿 SiO_2 含量可达 47.18%~50.08%、 Al_2O_3 含量 12.12%~13.34%, Fe_2O_3 含量相对较高(10%~20%),宁芜盆地玢岩型铁矿尾矿 Fe_2O_3 含量达 15.40%~17.91%,这是由选矿工艺未能完全回收铁矿物所致,且 CaO 、 MgO 含量略低于铁矿废石(3%~8%),部分尾矿会残留少量 SO_3 、 P_2O_5 (含量通常 $<1\%$),其中 S 主要赋存于黄铁矿中。

矿物组成方面,铁矿废石以石英、长石、云母等硅铝酸盐矿物为主(占比 70%~90%),伴生少量铁矿物(如赤铁矿、磁铁矿、褐铁矿)及碳酸盐矿物(如方解石、白云石),矿物结晶度高、结构致密、力学稳定性强;铁矿废石粉的矿物种类与铁矿废石及机制砂原料完全一致,仅破碎研磨过程导致矿物颗粒细化,部分块状矿物解理面暴露,晶体结构未发生本质改变,铁矿物呈分散状分布于粉体中,颗粒形态与机制砂的破碎特征具有同源性;铁尾矿的核心矿物仍为石英、长石等硅铝酸盐矿物(占比 60%~80%),宁芜盆地尾矿中钠长石占比 23.26%~24.58%、石英占比 15.31%~17.08%,铁矿物含量高于铁矿废石,主要以赤铁矿、磁铁矿的微细颗粒形式存在(占比 17.30%~21.99%),分散于其他矿物间隙中,此外还含有少量绿泥石、高岭石等黏土矿物,部分尾矿因选矿药剂残留会伴随微量有机杂质。

物理特性方面, 铁矿废石的堆积密度为 $1.6\sim 1.8\text{ g/cm}^3$, 表观密度为 $2.6\sim 2.8\text{ g/cm}^3$, 孔隙率为 $15\%\sim 25\%$, 莫氏硬度多在 $6\sim 7$ 级, 耐磨性与抗压强度较高, 但其颗粒形状不规则、棱角分明, 是制备机制砂的优质原料, 需经破碎整形处理优化颗粒形态; 铁矿废石粉的比表面积随粒径减小显著增大, 普通废石粉比表面积为 $300\sim 500\text{ m}^2/\text{kg}$, 超细废石粉可达 $800\sim 1000\text{ m}^2/\text{kg}$, 堆积密度降至 $1.2\sim 1.5\text{ g/cm}^3$, 流动性随粒径细化先改善后变差, 超细废石粉易因颗粒团聚导致流动性下降, 其物理特性与机制砂生产工艺参数(如破碎强度、筛分精度)直接相关; 铁尾矿的颗粒呈细粒状, 矿物嵌布关系复杂, 比表面积为 $100\sim 300\text{ m}^2/\text{kg}$, 堆积密度为 $1.4\sim 1.6\text{ g/cm}^3$, 表观密度为 $2.5\sim 2.7\text{ g/cm}^3$, 颗粒形状较铁矿废石更圆润但棱角仍较明显, 吸水率为 $5\%\sim 10\%$, 部分尾矿因级配不良需掺合其他材料改善性能。

三类铁矿固废均以硅铝酸盐矿物为主体, 具备稳定的化学性质与一定的力学性能, 为其作为建筑材料、充填骨料等资源化利用提供了物质基础, 且组成差异决定了其适配场景的不同: 铁矿废石因块状形态、高强度特性, 是制备机制砂的核心原料, 也适用于粗骨料的应用; 铁矿废石粉作为机制砂生产的副产物, 因与机制砂同源、性能匹配度高, 更适合与机制砂协同应用于混凝土、砂浆等体系, 作为掺合料通过火山灰活性或填充效应改善材料性能, 实现“砂粉协同利用”的资源化模式; 铁尾矿因颗粒细、铁含量相对较高, 除可作为细骨料外, 还可通过分选回收其中的铁矿物, 或制备超细粉体用于充填材料、功能建材等领域。其组成中的 SiO_2 、 Al_2O_3 含量直接影响资源化利用效率, 而 Fe_2O_3 、杂质氧化物含量及颗粒形态则是性能调控的核心靶点, 为后续有针对性开展应用技术研究提供了理论依据。

1.2.2 铁矿废石综合应用现状

在传统利用方式中, 铁矿废石主要用于地下充填、道路填料、铁路垫层等。铁矿废石充填的发展经历以下三个阶段: 将铁矿废石就近直接充填于采空区的干式充填; 将铁矿废石作为充填体粗骨料的胶结充填; 以铁矿废石-尾矿胶结充填为代表的高浓度充填^[1, 2]。利用铁矿废石充填的优势, 主要为工艺简单、成本低且施工高效等^[3]。但充填不当会导致土地沉降和滑坡等问题, 给周边环境和居民安全带来严重威胁。铁矿废石作为路基材料, 在应用方面具有成本低廉、力学性能优异等明显优势^[4-6]。李柏山提出大块的铁矿废石(直径大于 20 cm)可用于建筑基础的建设, 小块的铁矿废石可进一步破碎应用于铁路道渣中^[7, 8]。

近年来, 随着我国基础建设快速发展, 建筑行业对混凝土及其制品需求总量巨大。由于天然砂限制开采政策的实施和水泥行业产能过剩, 预期将有半数以上水泥生产线被淘汰, 天然砂和水泥价格增长明显。铁矿废石的储量巨大, 与天然

骨料相比具有低成本、强度高和力学性能稳定等优势。用铁矿废石制备混凝土用砂石骨料,不仅能缓解天然骨料的供应压力,还可以解决铁矿废石的堆存问题。另外,对于含有一定量的硅、铝等非金属元素的铁矿废石,可以将其破碎磨细,用于生产水泥、陶瓷、玻璃等建材产品^[9-11]。

对于含有铁、锰、钒等金属元素的铁矿废石,可以对有价金属进行回收利用^[12]。一些铁矿废石中还含有丰富的矿物质和微量元素,利用该特点可将其用于土壤改良和作为植物生长介质^[13-15]。通过添加适量的有机质和肥料,可以对铁矿废石的物理和化学性质进行改良,提高其在植物生长介质中的利用价值^[16]。铁矿废石中的硅、钙、镁、钾等有益元素搭配其他辅料可以制备出各类碱性和酸性的土壤改良剂,用于土壤重金属修复。修复机制主要是通过吸附、离子交换、还原和沉淀等作用,将土壤中的重金属固化或与其结合形成难溶性物质,从而减少重金属对土壤和植物的毒害。铁矿废石还可以提高土壤的保水性和通气性,促进土壤微生物的繁殖,增加土壤肥力和生产力^[17]。除此以外,铁矿废石粉还能在矿区景观建设和植被恢复等方面发挥重要作用。通过添加适量水泥、石灰等固化材料,可以将铁矿废石固化成为稳定的建筑材料,经过固化处理后铁矿废石可以用于矿区建设道路、桥梁等从而维护矿区的生态环境,提高其利用价值^[18]。

虽然铁矿废石的综合利用方式较为多样,但随着规模化消纳大宗固废理念的提出,将铁矿废石制备成骨料用于混凝土生产已成为大规模利用的重要途径之一。因此,众多学者主要对铁矿废石骨料制备混凝土的工作性能、力学性能以及耐久性能方面展开了一系列的研究。

良好的工作性能是获得优异力学性能和耐久性的重要先决条件^[19]。混凝土工作性能通常通过测定坍落度值来定量评价^[20]。铁矿废石骨料混凝土的坍落度取决于铁矿废石骨料的取代率,并与混凝土中使用的其他材料的性能有密切的关系。当铁矿废石骨料替代天然骨料时,混凝土的坍落度值随着铁矿废石骨料用量的增加而降低^[21]。反之也有研究结果发现,与低掺量铁矿废石骨料混凝土相比,高掺量铁矿废石骨料混凝土的坍落度值反而更高^[22]。这种矛盾现象产生的原因可能是等质量替换骨料导致原始骨料的级配被破坏。用铁矿废石骨料替代0~50%天然骨料,且其他成分不变的情况下,将水与胶凝材料的比例从0.16调整到0.18,可获得较好的流动性^[22]。混凝土的坍落度值随着铁矿废石骨料含量的增加而降低,加入0.5%的减水剂,坍落度值从10 mm增加到80 mm。矿物掺合料对混凝土坍落度值有正向影响。当粉煤灰替代水泥的比例为20%时,混凝土的坍落度值控制增幅为5.1%^[23]。此外,掺入粉煤灰和矿渣还可以提高铁矿废石骨料混凝土的保水性能^[24]。

混凝土的力学性能可以通过抗压性能、抗弯性能与抗拉性能来表现。抗压强度是建筑行业考虑的最基本性能之一,通常通过混凝土的抗压强度来判断混凝土

的整体性能。当铁矿废石骨料替代粒度相近的天然骨料时,抗压强度不会有明显变化。然而,当铁矿废石骨料的粒径小于天然骨料时,抗压强度随着铁矿废石骨料掺量的增加,呈现先增加后降低的趋势^[25]。掺加铁矿废石骨料提高混凝土抗压强度的原因有以下几点:铁矿废石骨料的粗糙表面改善了其与水泥浆之间的黏结性能;铁矿废石骨料的粒径比天然骨料细,在适当配比下,可以填充硬化混凝土中的空隙,提高混凝土的密实性;铁矿废石骨料单位面积上的水泥浆体减少,导致低黏结强度。由于铁矿废石骨料原料特性和其他因素在不同研究中存在差异,因此各研究给出的最佳替代率有所不同。抗弯性能可视作另一种间接拉伸指标,用于衡量抗弯曲失效的性能。铁矿废石骨料替代天然骨料的水平相对较低(40%),抗弯强度略有增加,但是进一步增加铁矿废石骨料的掺量会导致抗弯强度降低^[26]。当铁矿废石骨料掺量为40%时,弯曲强度略高于基准组。然而,当铁矿废石骨料掺量达到50%~80%时,抗弯强度显著降低^[27]。原因在于当铁矿废石骨料含量过高时,骨料之间的黏附性变差,从而导致界面过渡区更为薄弱。抗拉强度用于确定混凝土的抗裂能力和各组分间黏结强度。由于混凝土轴心抗拉强度试验结果的分散性较大,通常采用间接法来评定混凝土的抗拉强度,劈裂抗拉强度试验是最常用的方法之一。不同研究者得到了获得最大劈裂抗拉强度下对应的天然骨料替换率^[28, 29]。在最佳铁矿废石骨料含量之外,随着铁矿废石骨料量的增加,抗拉强度会降低。最佳铁矿废石骨料含量的存在是因为在最佳替换水平下,混凝土具有最紧密的填充结构,这导致骨料与水泥浆体之间的黏结性能得到改善。

虽然混凝土的工作性能和力学性能在建筑设计中起着至关重要的作用,但耐久性能是确保混凝土在长期使用中保持其力学性能、美观性和结构完整性的关键因素。混凝土体积稳定性是评估其耐久性的重要指标之一,由于收缩引发的体积稳定性变化引起了众多研究者的关注。当干燥收缩引起的收缩应力超过混凝土的抗拉强度时,混凝土表面会出现裂缝并向内部延伸。由于早期收缩裂缝很微小,难以观察到。随着干燥收缩的增加,裂缝逐渐显现。随着铁矿废石骨料的取代率增加,混凝土的干燥收缩减小。将天然骨料100%替换为铁矿废石骨料时,混凝土在90 d时的干燥收缩损失仅为对照组混凝土的42%。其他研究也发现,干燥收缩在早期是不稳定的,养护中后期才变得更为明显,并且干燥收缩随着铁矿废石骨料含量的提高而减小^[30]。此外,用铁矿废石骨料配制的C30和C60混凝土干燥收缩均小于天然骨料混凝土^[31]。

混凝土中的氢氧化钙与空气中的二氧化碳反应并形成碳酸钙是一个缓慢的碳化过程。虽然混凝土碳化对强度没有不利影响,但对混凝土中的钢筋危害很大。根据GB/T 50010—2010《混凝土结构设计规范》,在设计寿命为50年的混凝土结构中,一类环境下,混凝土保护层厚度至少为15 mm。虽然在实际工程中允许存在一定的碳化深度,但在结构的整个使用寿命期内,碳化深度必须小于混凝土保

护层。当铁矿废石作为细骨料引入时,碳化深度随着铁矿废石骨料掺量的增加而降低。当使用 100%铁矿废石骨料按质量取代天然骨料时,碳化深度降低了 51.98%。铁矿废石骨料含量较高的混凝土具有致密的孔结构和抵抗二氧化碳进入的相对湿度,从而导致其碳化深度较浅。抗冻性定义为混凝土在饱和状态下抵御冻融循环的能力,是评价混凝土在寒冷环境下耐久性的重要指标。通过快速和慢速冻融试验发现,铁矿废石骨料替代天然骨料配制的 C30 混凝土抗冻性接近天然骨料混凝土。随着铁矿废石骨料含量的增加,混凝土的质量损失和强度损失减小。当天然骨料取代量分别为 20%、40%、50%和 60%时,经过 200 次冻融循环后,铁矿废石骨料混凝土的质量损失均小于 5%,强度损失均小于 25%。因此,掺入铁矿废石骨料的混凝土抗冻性经过 200 次冻融循环后依然保持稳定。水渗透和快速氯离子渗透试验方法可用于评估混凝土渗透性。水工混凝土和地下结构混凝土的渗透性与铁矿废石骨料的掺入有直接关系。据报道,铁矿废石骨料混凝土具有高吸水性。随着混凝土中铁矿废石骨料含量的增加,吸水率和氯离子渗透性增加。高吸水率使水中的腐蚀性离子更易进入混凝土,从而对混凝土的抗腐蚀性产生严重影响。随着铁矿废石骨料置换率的增加,混凝土的透水性先减小后增大,置换率为 20%时,混凝土透水性最佳。但随着铁矿废石骨料掺量的增加,混凝土的透水性逐渐降低^[32]。

1.2.3 铁矿废石粉综合应用现状

石粉按照矿物成分可大致分为两类:钙质岩石基石粉和硅质岩石基石粉。常见的石粉包括钙质石粉、硅质石粉、镁质石粉和钙镁矿石粉等。石粉可用于建筑材料、土壤改良、橡胶制造、涂料、塑料、化妆品、食品添加剂等多个领域。

钙质岩石基石粉主要包括石灰岩石粉、白云岩石粉和大理岩石粉等,其主要成分是碳酸盐。钙质岩石基石粉通常是白色或灰色,细度较高,粒径在数微米至数十微米之间。其主要成分为 CaCO_3 或 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$,在水中溶解度较低。在水泥体系中,其主要通过填充效应、成核效应以及与铝酸盐相反应形成半碳铝酸盐或单碳铝酸盐等方式影响水化过程。

硅质岩石基石粉主要包括花岗岩石粉、玄武岩石粉和石英岩石粉等,其主要成分是硅酸盐。硅质岩石基石粉主要由石英及长石、云母、角闪石、辉石等硅酸盐或硅铝酸盐矿物组成,具体矿物比例随母岩类型而变化。硅质岩石基石粉通常是灰色或深灰色,细度较高,粒径在数微米至数十微米之间。由于其主要成分是硅酸盐,所以其酸碱度较低,不易在水中溶解。硅质岩石基石粉对水泥的影响比较复杂,因为其矿物组成差异较大,且其含有的石英、长石和云母等矿物也会影响其性能。一些研究表明,硅质岩石基石粉可以促进水泥的水化反应,提高混凝

土的强度和耐久性。此外,硅质岩石基石粉还具有较高的耐火性、化学稳定性和机械强度,可应用于高温材料、耐腐蚀材料和高强度复合材料等领域。

石粉作为一种重要的水泥掺合料,在混凝土中发挥着重要的作用。不同种类的石粉因其不同的矿物组成和化学成分,对混凝土的性能影响也不尽相同。因此,在混凝土配合比设计和生产中,需要根据具体情况选择合适的石粉类型和掺量,以达到最佳的混凝土性能。

石粉在水泥基材料中的应用主要包括用作水泥混合材、掺合料以及细骨料^[33]。石粉中最常用作水泥混合材的是石灰石粉,与矿渣、粉煤灰以及一些火山灰相比,它具有价格低廉、运输便利、无需烘干等优点,在水泥工业中体现出巨大的经济价值。在20世纪末,日本开始广泛应用石灰石粉于高流动性混凝土和高性能喷射混凝土中。尽管石灰石粉几乎不具有反应性,但石灰石粉的加入可以提高混凝土的早期强度,同时有助于改善水泥浆体的流动性^[34]。研究表明,磨细的石灰石粉添加后除可以发挥微集料作用外,还可以促进 C_3S 的水化、加速C-S-H成核,形成水化新相,从而提高水泥早期强度。石灰石粉对于水泥早期强度的提高源于其内部的活性因子,研究表明其活性因子约占总含量的5%^[35]。

除石灰石粉外,辉绿岩石粉也可以应用于水泥基材料作为掺合料。辉绿岩石粉作为碾压混凝土中的掺合料,当其部分或全部替代粉煤灰时,可以改善碾压混凝土的和易性以及可碾性,同时节约混凝土制造成本^[36]。此外,玄武岩石粉按不同粒径既可以作为掺合料,也可以作为细骨料。研究表明,玄武岩废石粉替代10%的水泥可以使发泡混凝土的干密度降低25.6%,吸水率降低7.69%,导热系数降低42%,强度提高4%^[37]。当玄武岩粉替代砂作为细骨料时,可以进一步提高混凝土的抗压和抗弯强度^[38]。基于玄武岩粉作细骨料的研究,将花岗岩废料作为硅质细砂可以制备出干密度为 638 kg/m^3 且抗压强度为3.92 MPa的加气块^[39]。

近些年来,花岗岩石粉更多地被用于制备地聚合物材料。针对花岗岩石粉大掺量制备地聚合物材料的研究表明,在碱硅酸盐溶液中,含硅铝质的花岗岩石粉和其他原料首先被分解成铝硅酸盐低聚体,然后通过脱羟基聚合反应生成铝硅酸盐胶体相,最终形成具有三维网络结构的地聚合物材料基体相^[40]。基于碱激发反应原理,加入3%的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水玻璃复合溶剂可以在一定范围内提升砂浆强度,但只能应用于对砂浆性能要求不高的场景^[41]。为了打破应用场景的束缚,将玄武岩石粉加入矿渣碱激发胶凝材料中,研究发现在碱激发剂固含量为25.08%~35.58%、模数为1.50~1.00时,可制得强度理想的玄武岩石粉-矿渣碱激发胶凝材料^[42]。除花岗岩和玄武岩石粉外,研究了五种不同类型的废弃石粉(waste stone powder, WSP)(长石、石灰石、泥灰岩、白云石、大理石)对地聚合物复合材料性能的影响,发现WSP添加物对地聚合物的力学或结构性能有微小但积极的影响。结果表明,不同类型的WSP可以作为地聚合物反应固化的促进剂,这对减轻

环境负担具有积极意义^[43]。此外,不同种类的石粉还可以用作涂料^[44]和建筑陶瓷^[45-47]等。

为了提高水泥基材料的性能,研究者们利用不同种类石粉对水泥基材料的工作性能、力学性能和耐久性能的影响进行了大量研究。石粉对水泥基材料工作性能影响的研究主要包括以下几个方面:不同种类石粉对工作性能的影响、复合石粉对不同类型混凝土的影响以及对石粉影响机制的探讨与揭示。

研究发现增大片麻岩石粉细度可以提高水泥浆体的流动性和强度^[48]。片麻岩石粉掺量超过 10%时,对混凝土的力学性能的发展非常不利;但混掺硅灰和片麻岩石粉后,可明显提升混凝土的抗压、劈拉及抗折强度^[49]。掺入花岗岩石粉可降低砼早期开裂面积、提高早期抗裂性能和流动度,但后期强度会降低^[50]。适量掺加花岗岩石粉可以提高水泥砂浆的流动度和抗压强度,但石粉细度增大会降低流动度,掺量需控制在 15%以下^[51]。超细石灰石粉与钛矿渣粉复掺,可改善新拌混凝土的和易性,降低混凝土的坍落度经时损失,降低混凝土的水化温升,改善混凝土的施工性能^[52]。增加石灰石粉的掺量可降低水泥浆体的绝热温升,但对早期温升速率和最高温度的出现时间没有显著影响^[53]。随着石灰石粉掺量增加和细度减小,水泥浆体的黏度会逐渐降低,因为石灰石粉的高 Zeta 电位可减少水泥浆体中的絮凝结构,增加颗粒湿堆积密实度,释放更多自由水,降低颗粒间相互作用力^[54]。10%的大理石粉替代水泥后并不影响水泥浆体的特性和抗压强度,但大量替代会延迟水化反应并产生多孔结构,对水泥浆体的力学性能不利^[55]。大理石粉会缩短水化诱导和加速阶段,并增加放热速率和水化热量,而花岗岩石粉则会延长这些阶段并降低放热速率和水化热量^[56]。白云石微粉可以明显地延缓水泥的初、终凝时间,取代量和细度越大,缓凝效果越明显。此外,白云石微粉还可以加速水泥的早期水化反应,并降低累计放热量^[57]。比表面积大于 $600 \text{ m}^2/\text{kg}$ 的玄武岩石粉能改善混凝土的工作性能与力学性能^[58]。采石场石粉替代部分水泥可改善超高性能混凝土(UHPC)的性能和耐久性,降低 CO_2 排放量,有望成为未来的环保绿色建筑材料^[59]。

通过对不同种类的单一石粉进行研究后,发现石灰岩石粉掺量不大于 10%、石英岩石粉掺量不大于 20%时,水泥胶砂流动度增大^[60]。对比分析石灰石、红砂岩和凝灰岩三种石粉的性能表明,石灰石粉具有最显著的减水作用和最小需水量,红砂岩粉和凝灰岩粉没有减水作用且红砂岩粉的需水量比凝灰岩粉大;石粉细度增加可以提高混凝土的流动性和工作性能,但当细度增至 10% ($45 \mu\text{m}$ 筛余)时,可能会出现工作性能劣化的现象^[61]。石灰岩石粉的掺量可显著提升复合胶凝材料浆体的流动度和工作性能,而石英岩石粉对浆体工作性能影响较小,凝灰岩石粉虽初期流动度提升但会降低浆体流动度保持,花岗岩石粉则对浆体的工作性能有负面影响;随着石粉比表面积增加,含石灰岩、石英岩和凝灰岩石粉的浆体初始