

钢渣/粉煤灰等固废替代水泥原料的配比技术

杨亮

陕西富平生态水泥有限公司, 陕西省渭南市, 711709;

摘要: 本文聚焦于钢渣、粉煤灰等固废替代水泥原料的配比技术。通过对钢渣和粉煤灰等固废特性的分析, 探讨其在水泥生产中替代原料的可行性。详细阐述了固废替代水泥原料的配比原则、方法以及影响配比的关键因素, 并结合实际案例分析了不同配比方案的效果。研究表明, 合理利用固废替代水泥原料不仅能降低生产成本, 还能有效减少环境污染, 具有显著的经济和环境效益。

关键词: 钢渣; 粉煤灰; 固废替代; 水泥原料配比

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 06. 022

引言

随着水泥行业的快速发展, 其对自然资源的消耗和环境的影响日益凸显。寻找可替代的水泥原料成为行业可持续发展的关键。钢渣和粉煤灰等工业固废产量巨大, 若能将其合理应用于水泥生产, 替代部分传统水泥原料, 不仅可以解决固废堆积造成的环境问题, 还能降低水泥生产成本, 实现资源的循环利用。因此, 研究钢渣/粉煤灰等固废替代水泥原料的配比技术具有重要的现实意义。

1 钢渣和粉煤灰等固废的特性

1.1 钢渣的特性

钢渣是炼钢过程中产生的废渣, 其化学成分主要包括氧化钙 (CaO)、二氧化硅 (SiO_2)、三氧化二铁 (Fe_2O_3)、氧化镁 (MgO) 等。钢渣具有一定的胶凝性, 其矿物组成主要有硅酸三钙 (C_3S)、硅酸二钙 (C_2S) 等, 与水泥熟料的矿物组成有相似之处。然而, 钢渣中含有游离氧化钙 (f-CaO) 和游离氧化镁 (f-MgO), 这些物质在水化过程中会发生体积膨胀, 可能导致水泥开裂, 影响水泥的安定性。此外, 钢渣的硬度较大, 粉磨难度较高, 需要采用特殊的粉磨工艺来提高其活性^[1]。

1.2 粉煤灰的特性

粉煤灰是火力发电厂燃煤锅炉排出的废弃物, 主要由硅铝酸盐玻璃微珠和少量的晶体矿物组成。其化学成分主要为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 , 具有火山灰活性。在水泥水化过程中, 粉煤灰能与氢氧化钙发生二次水化反应, 生成具有胶凝性的水化硅酸钙和水化铝酸钙, 从而提高水泥的后期强度。粉煤灰还具有形态效应、活性效应和微集料效应, 能改善水泥的工作性能, 如流动性、保水性等。但粉煤灰的质量波动较大, 其活性受燃烧方式、煤种、收集方式等因素的影响^[2]。

1.3 其他固废的特性

除了钢渣和粉煤灰外, 还有一些其他的工业固废也可用于替代水泥原料, 如矿渣、煤矸石等。矿渣是炼铁过程中产生的废渣, 其主要化学成分与钢渣相似, 但活性较高。矿渣具有潜在的水硬性, 在碱性激发剂的作用下能发生水化反应, 生成具有胶凝性的产物。煤矸石是煤炭开采和洗选过程中产生的固体废弃物, 含有一定量的 SiO_2 、 Al_2O_3 等成分, 经过煅烧后具有一定的火山灰活性。

2 固废替代水泥原料的可行性分析

2.1 资源利用角度

我国钢渣和粉煤灰等工业固废产量巨大, 但综合利用率相对较低。大量的固废堆积不仅占用土地资源, 还会对土壤、水体和大气环境造成污染。将这些固废用于替代水泥原料, 能够实现资源的有效利用, 减少对天然石灰石、黏土等原料的开采, 缓解资源短缺的压力。

2.2 技术可行性角度

从化学成分和矿物组成来看, 钢渣、粉煤灰等固废与水泥原料有一定的相似性, 具备替代部分水泥原料的潜力。通过合理的配比和工艺处理, 可以使固废在水泥生产中发挥良好的作用。例如, 利用钢渣的胶凝性和粉煤灰的火山灰活性, 能够提高水泥的强度和耐久性。同时, 随着粉磨技术、激发技术等不断发展, 固废的活性可以得到有效激发, 进一步提高其在水泥中的替代比例。

2.3 经济可行性角度

使用固废替代水泥原料可以降低水泥生产成本。一方面, 固废的价格相对较低, 能够减少原料采购成本; 另一方面, 固废的综合利用可以获得一定的政策支持和税收优惠, 提高企业的经济效益。此外, 利用固废生产的水泥产品在市场上具有一定的竞争力, 有助于企业拓展市场份额^[3]。

3 固废替代水泥原料的配比原则

3.1 满足水泥性能要求

水泥作为建筑工程的基础材料,其性能直接关系到结构安全与工程寿命,因此满足相关标准和工程使用要求是配比设计的首要原则。在强度指标上,需同时保障早期强度与后期强度的稳定性:早期强度决定了施工进度与脱模效率,后期强度则关乎结构的长期承载能力,两者均需严格符合国家标准中的限值要求。

安定性是水泥性能的另一关键指标,需重点控制固废中游离氧化钙($f\text{-CaO}$)和游离氧化镁($f\text{-MgO}$)的含量。这些成分在水泥硬化后会缓慢水化并产生体积膨胀,可能导致水泥石开裂,影响结构的整体性和耐久性。因此,在配比设计中,需通过原料预处理或搭配调整,将其含量控制在安全范围内。

3.2 充分利用固废特性

不同类型的固废因来源和成分差异,具有独特的物理化学特性,配比方案需基于这些特性进行针对性设计,以实现资源的高效利用。例如,矿渣作为高炉炼铁的副产品,含有较多活性二氧化硅和氧化铝,在激发剂作用下能表现出良好的胶凝活性,因此在配比中可适当提高其替代比例,既能减少水泥熟料用量,又能提升水泥的后期强度和耐久性。

对于钢渣这类活性较低的固废,直接大量替代可能影响水泥性能,需先通过物理或化学激发技术提高其活性。物理激发可采用超细粉磨等方式增加其比表面积,促进水化反应;化学激发则可通过掺入石膏、碱类物质等调节水化环境,激发潜在活性。经处理后,钢渣可与其他固废协同配合,在合理比例范围内发挥其填充或胶凝作用^[4]。

固废之间的协同效应是提升配比效果的重要途径。例如,粉煤灰具有较好的火山灰活性和形态效应,可改善水泥的流动性和需水性;钢渣则具有较高的密度和强度,能提升水泥石的结构致密性。将两者按适当比例搭配使用,可实现性能互补,不仅能提高水泥的综合性能,还能提高固废的整体利用效率,降低单一固废使用带来的局限性。

3.3 考虑生产工艺条件

配比方案的可行性很大程度上取决于与现有生产工艺的适配性,需充分考虑水泥生产各环节的技术要求和设备能力。在原料预处理阶段,不同固废的粒度差异可能影响粉磨效率,例如钢渣硬度较高,若直接与其他原料混合粉磨,可能增加粉磨设备的能耗和磨损,因此在配比设计中需考虑单独粉磨或分级粉磨的可能性,确保原料粒度符合后续工艺要求。

煅烧环节对原料的化学成分和热稳定性有严格要求。固废中的某些成分可能影响窑内的热工制度,例如含有可燃物的固废可能改变燃烧速度和温度分布,含硫、氯等元素的固废则可能导致窑内结皮或腐蚀。因此,在配比时需通过成分分析和小试验证,控制有害成分的累积量,确保煅烧过程的稳定进行,避免因原料变化导致窑况波动或产品质量下降。

3.4 遵循环保和可持续发展原则

固废替代水泥原料的核心目标之一是减少环境影响,因此配比过程需将环保理念贯穿始终,实现经济效益与环境效益的统一。在固废选择上,应优先选用对环境友好的类型,避免使用含有重金属、持久性有机污染物等有害物质的固废,防止其在水泥生产和使用过程中释放,造成土壤、水体或大气污染。

提高固废的综合利用效率是可持续发展的重要体现。通过优化配比方案,在保证水泥性能的前提下,最大限度提高固废的替代比例,减少天然资源的开采和消耗。同时,需考虑固废的区域可获得性,优先利用本地固废资源,降低运输过程中的能耗和碳排放,形成区域性的资源循环利用体系。

从行业长远发展来看,配比方案还需兼顾生态效益与经济可行性的平衡。在降低水泥生产对环境负荷的同时,通过技术创新降低固废处理和利用成本,提高企业的参与积极性。例如,开发低成本的固废活化技术、优化生产工艺以减少能耗等,推动水泥行业向低碳、循环、可持续的方向转型,为实现“双碳”目标贡献力量^[5]。

4 固废替代水泥原料的配比方法

4.1 经验配比法

经验配比法是根据以往的生产经验和试验结果,初步确定固废的替代比例。这种方法简单易行,但缺乏科学性和准确性。在实际应用中,需要根据具体情况进行调整和优化。例如,根据水泥企业的生产历史数据,参考类似固废在其他企业的使用情况,确定一个大致的配比范围,然后通过小试和中试进行验证和调整。

4.2 理论计算配比法

理论计算配比法是根据水泥的化学成分和矿物组成要求,通过化学反应方程式和物料平衡原理,计算出固废的替代比例。这种方法具有较高的科学性和准确性,但需要掌握一定的化学知识和计算技巧。在计算过程中,要考虑固废的化学成分波动、生产过程中的损耗等因素。例如,根据水泥熟料的矿物组成目标,计算出所需的 CaO 、 SiO_2 等化学成分的含量,然后根据固废和其他原料的化学成分,计算出固废的替代比例。

4.3 试验优化配比法

试验优化配比法是在经验配比法和理论计算配比法的基础上,通过大量的试验来确定最佳的配比方案。试验内容包括强度试验、安定性试验、工作性能试验等。通过对不同配比方案的试验结果进行分析和比较,找出满足性能要求且成本最低的配比方案。例如,采用正交试验设计方法,研究不同固废种类、替代比例、激发剂种类和用量等因素对水泥性能的影响,从而确定最佳的配比参数。

5 影响固废替代水泥原料配比的关键因素

5.1 固废的质量和活性

固废的质量和活性是影响配比的重要因素。不同来源的钢渣、粉煤灰等固废,其化学成分、矿物组成和活性差异较大。质量较好、活性较高的固废可以适当提高其替代比例;而质量较差、活性较低的固废则需要降低替代比例或进行预处理。例如,对于活性较低的粉煤灰,可以通过磨细、添加激发剂等方式提高其活性,然后再增加其在水泥中的替代比例。

5.2 水泥的品种和性能要求

不同品种的水泥对原料的要求不同,因此固废的替代比例也会有所差异。例如,普通硅酸盐水泥对强度和安定性的要求较高,固废的替代比例相对较低;而矿渣硅酸盐水泥可以适当提高矿渣的替代比例。此外,工程对水泥的性能要求也会影响配比,如对早期强度要求较高的工程,需要控制固废的替代比例,以保证水泥的早期强度。

5.3 生产工艺条件

生产工艺条件对固废的替代比例也有一定的影响。先进的粉磨技术和煅烧工艺可以提高固废的活性和反应程度,从而允许更高的替代比例。例如,采用辊压机联合粉磨系统可以提高钢渣的粉磨效率,使钢渣的比表面积增大,活性提高,进而提高其在水泥中的替代比例。同时,煅烧设备的热工性能也会影响固废的分解和反应,要根据生产工艺条件合理调整配比。

5.4 成本因素

成本是企业确定配比方案时需要考虑的重要因素。固废的采购成本、运输成本、预处理成本等都会影响配比决策。在保证水泥性能的前提下,要尽量选择成本较低的固废和配比方案。例如,当某种固废的价格较低且活性满足要求时,可以适当提高其替代比例,以降低生产成本。

6 结论与展望

6.1 结论

钢渣、粉煤灰等固废替代水泥原料具有可行性,通过合理的配比技术可以实现资源的有效利用和水泥性能的优化。固废替代水泥原料不仅能降低生产成本,减少对天然资源的依赖,还能减少固废堆积对环境的污染,具有显著的经济和环境效益。在确定配比方案时,要遵循满足水泥性能要求、充分利用固废特性、考虑生产工艺条件和遵循环保和可持续发展原则等配比原则,采用经验配比法、理论计算配比法和试验优化配比法等方法,并考虑固废的质量和活性、水泥的品种和性能要求、生产工艺条件和成本因素等关键因素。

6.2 展望

未来,随着环保要求的不断提高和资源短缺问题的日益突出,钢渣/粉煤灰等固废替代水泥原料的技术将得到更广泛的应用。为了进一步提高固废的替代比例和水泥的性能,需要加强以下方面的研究:一是深入研究固废的活性激发机理和技术,提高固废的活性和利用率;二是开发新型的水泥生产工艺和设备,适应高比例固废替代的要求;三是建立完善的固废质量评价体系和配比数据库,为配比方案的设计提供科学依据;四是加强固废综合利用的政策支持和技术推广,促进水泥行业的可持续发展。

参考文献

- [1]王柯. 纳米二氧化硅增强固废再生混凝土的力学性能[J]. 低温建筑技术, 2025, 47 (06): 145-148.
- [2]许麒麟, 周大春, 杨忠, 等. 高钛重矿渣在混凝土中运用的研究试验[C]//衡水积土科技有限公司. 低碳混凝土应用. 攀枝花天硕商品混凝土有限责任公司; , 2024: 136-141.
- [3]杨科, 何淑欣, 何祥, 等. 煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52 (04): 69-82.
- [4]李松, 牛子恒, 暴斌硕, 等. 碳限额与交易政策下沥青混合料生产企业碳排放技术优化[J/OL]. 交通运输工程学报, 1-21 [2025-07-31].
- [5]张延年, 李云凯, 林吉森, 等. 锂渣基多固废掺和料力学性能及水化机理研究[J]. 非金属矿, 2023, 46 (06): 78-81.

作者简介: 杨亮, (1993-), 男, 汉, 陕西白水, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水泥工艺。