

工业固废替代原料在水泥生产中的应用及超低排放协同效应研究

刘 畅

天津金隅振兴环保科技有限公司 天津 300400

摘 要：本文聚焦工业固废替代原料在水泥生产中的应用及超低排放协同效应。首先分析常见工业固废的种类、来源、化学成分、矿物组成、活性与潜在危害；接着阐述替代原料在水泥生产中的应用技术，包括选择配比、预处理及工艺调整；探讨其对水泥物理、化学性能的影响及改善措施；最后分析污染物排放特性，揭示超低排放协同效应的实现机制。研究表明，合理利用工业固废替代原料，可实现资源化利用，提升水泥性能，达成超低排放，具有显著的经济与环境效益。

关键词：工业固废；水泥生产；原料替代；超低排放

引言：工业发展产生大量工业固废，若随意堆放，不仅占用土地，还会污染环境。水泥生产作为高能耗、高排放行业，面临资源短缺与环保压力。在此背景下，将工业固废作为水泥生产替代原料成为研究热点。工业固废种类繁多，成分复杂，其特性决定了能否用于水泥生产。研究工业固废替代原料在水泥生产中的应用及超低排放协同效应，既能解决固废处理难题，又能推动水泥行业绿色转型，实现资源高效利用与环境保护的双赢。

1 工业固废替代原料的特性分析

1.1 常见工业固废的种类与来源

常见工业固废指工业生产过程中产生的固态废弃物，种类繁多且来源广泛，其产生量与工业产业结构密切相关。冶金行业产生的高炉矿渣、钢渣，源于铁矿石冶炼及钢材加工过程，是产量最大的工业固废之一，仅钢铁企业每吨钢就会产生0.3-0.5吨钢渣。电力行业以燃煤发电为主，产生大量粉煤灰和炉底渣，粉煤灰是煤粉燃烧后从烟气中捕集的细灰，炉底渣则为炉膛底部沉积的残渣。化工行业产生磷渣、电石渣、脱硫石膏等，分别来自磷肥生产、电石水解及烟气脱硫工序。建材行业自身会产生废陶瓷、废水泥熟料等^[1]。另外，煤炭开采与洗选过程产生煤矸石，矿业开采产生尾矿。这些固废若随意堆放，不仅占用土地资源，还可能引发环境污染，而合理筛选后可作为水泥生产替代原料，实现资源化利用。

1.2 工业固废的化学成分与矿物组成

工业固废的化学成分与矿物组成具有显著差异性，主要取决于其产生源头与生产工艺，这也是决定其能否作为水泥替代原料的核心因素。多数工业固废富含硅、铝、钙、铁等氧化物，与水泥原料成分高度契合，如粉

煤灰主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 ，含量合计可达70%以上，还含少量 Fe_2O_3 、 CaO 及微量元素。高炉矿渣以 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 为主要成分，矿物组成包括硅酸二钙、硅酸三钙、铝酸钙等活性矿物。钢渣中 CaO 含量较高，可达40%-50%，同时含 SiO_2 、 Fe_2O_3 及少量 MgO 、 MnO ，矿物相以硅酸三钙、硅酸二钙、RO相为主。磷渣富含玻璃体，主要成分为 SiO_2 、 CaO ，活性成分含量较高。而煤矸石、尾矿等则因产地不同，成分波动较大，部分含硫、砷等有害成分，需针对性检测分析，确保符合替代原料要求。

1.3 工业固废的活性与潜在危害

工业固废的活性指其在特定条件下与水或其他物质发生化学反应，形成具有胶凝性能产物的能力，分为火山灰活性和潜在水硬性两类。粉煤灰、硅灰等具有火山灰活性，需与石灰、水泥熟料等碱性物质反应才能产生强度；高炉矿渣、钢渣等具有潜在水硬性，自身加水后反应缓慢，掺入激发剂可显著提升活性。活性高低直接影响其在水泥生产中的替代效果与掺量。同时，工业固废存在潜在危害，部分固废含重金属离子、可溶性盐、放射性物质等，如某些尾矿含铅、镉、汞等有害元素，随意堆放可能通过雨水淋溶渗入土壤和水体，污染周边环境。煤矸石、粉煤灰等若露天堆放，遇风易产生扬尘污染大气。部分固废还存在体积安定性不良问题，如钢渣中的游离氧化钙、氧化镁，若未妥善处理，会导致后续制品开裂，影响工程质量，需通过预处理消除危害。

2 工业固废替代原料在水泥生产中的应用技术

2.1 替代原料的选择与配比优化

替代原料的选择需遵循适配性、安全性与经济性原

则, 优先选取成分稳定、活性适宜、有害成分达标的工业固废, 结合水泥生产工艺特点与产品性能要求筛选。首先需检测固废的化学成分、矿物组成、活性及有害杂质含量, 排除放射性超标、重金属含量过高的固废。在此基础上进行配比优化, 核心是通过调整替代原料与传统原料的掺混比例, 平衡水泥生产的煅烧性能与成品质量。采用正交试验、响应面法等优化手段, 确定最佳掺量, 如粉煤灰替代黏土的掺量通常控制在10%-20%, 高炉矿渣替代熟料的掺量可达30%-50%。配比优化需兼顾煅烧效率, 降低能耗, 同时确保水泥的胶凝性能达标^[2]。还需考虑原料成本与供应稳定性, 优先选用本地固废, 减少运输成本, 通过配比调整实现原料互补, 弥补单一固废的性能缺陷, 保障生产连续性与产品一致性。

2.2 预处理技术与工艺

工业固废成分复杂、性质各异, 往往需经过科学合理的预处理, 才能满足水泥生产的高标准要求。预处理技术并非千篇一律, 而是依据固废的独特特性与应用场景进行差异化设计。破碎与粉磨是基础且关键的预处理工序。对于钢渣、高炉矿渣等块状固废, 它们硬度大、粒径大, 先借助颚式破碎机、圆锥破碎机进行粗碎和细碎, 将其破碎至适宜粒径, 再通过球磨机进一步粉磨至特定细度。如此处理, 能使固废颗粒细小均匀, 便于与传统原料充分均匀混合, 有效提升其反应活性, 为后续水泥生产反应奠定良好基础。烘干处理主要针对含水量较高的固废, 像脱硫石膏、电石渣等。水分过高会影响生料均化效果和煅烧质量, 采用回转烘干机、气流烘干机等设备, 可将固废水分降至1%以下, 保障生产顺利进行。磁选、筛分工艺则用于去除固废中的金属杂质与大块惰性物质, 例如钢渣中的废钢颗粒, 提升原料纯度, 保证水泥质量。对于活性较低的固废, 采用激发处理技术提升其胶凝活性。另外, 对含有害成分的固废进行固化稳定化处理, 降低有害物浸出风险, 确保生产安全环保, 且预处理工艺要与后续生产环节紧密衔接, 提升整体生产效率。

2.3 水泥生产工艺的适应性调整

引入工业固废替代原料后, 需对传统水泥生产工艺进行适应性调整, 涵盖生料制备、煅烧、粉磨等全流程, 确保生产稳定与产品合格。生料制备阶段, 调整均化工艺参数, 延长均化时间, 优化均化设备运行参数, 弥补固废成分波动大的缺陷, 提升生料均化效果。煅烧环节是调整核心, 因固废的燃烧性能、熔融特性与传统原料存在差异, 需调整回转窑的转速、煅烧温度与时间, 通常将煅烧温度波动控制在 $\pm 50^{\circ}\text{C}$, 同时优化喷煤量

与风量配比, 避免出现结圈、结瘤等问题。对于活性较高的固废, 可适当降低煅烧温度, 减少能耗。水泥粉磨阶段, 调整粉磨设备的研磨体级配、粉磨时间, 控制成品细度与比表面积, 确保替代原料与熟料、石膏等充分混合反应。优化收尘系统参数, 适应原料粉磨过程中粉尘特性的变化, 同时调整篦冷机运行参数, 提升熟料冷却效果, 保障水泥性能稳定, 实现工艺与替代原料的高效适配。

3 工业固废替代原料对水泥性能的影响

3.1 对水泥物理性能的影响

工业固废替代原料对水泥物理性能的影响体现在凝结时间、强度、细度、需水量等关键指标上, 且影响效果随固废种类、掺量不同存在差异。粉煤灰、硅灰等细颗粒固废, 适量掺加可优化水泥颗粒级配, 降低标准稠度需水量, 改善和易性, 但过量掺加会延缓水泥凝结时间, 尤其是低温环境下, 初凝时间可能延长2-4小时, 早期强度(3天、7天)显著下降, 后期强度(28天)虽有增长, 但难以弥补早期强度损失。高炉矿渣、钢渣等活性固废, 掺量适宜时, 后期强度可接近甚至超过基准水泥, 且体积安定性良好。部分固废如磷渣, 若处理不当, 会导致水泥凝结迟缓, 强度发展缓慢。此外, 固废的细度影响水泥的水化速率, 粉磨越细, 水化反应越充分, 强度发展越快, 但过细粉磨会增加能耗与需水量, 反而影响水泥物理性能, 需通过精准控制掺量与细度, 平衡各物理指标^[3]。

3.2 对水泥化学性能的影响

工业固废替代原料主要通过改变水泥的水化反应过程与产物, 影响其化学性能, 核心指标包括水化热、耐腐蚀性、碱骨料反应抑制能力等。粉煤灰、矿渣等低钙固废掺加后, 可降低水泥的水化热峰值, 延缓水化热释放速率, 减少大体积混凝土因温差产生的裂缝, 适用于大体积工程。同时, 这些固废水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量降低, 生成更多水化硅酸钙凝胶, 提升水泥的耐硫酸盐、耐氯盐腐蚀性, 改善化学稳定性。但部分固废含碱金属氧化物, 过量掺加会增加水泥的碱含量, 引发碱骨料反应, 导致混凝土膨胀开裂, 影响结构耐久性。含硫固废可能增加水泥中的 SO_3 含量, 若超过标准限值, 会与水化铝酸钙反应生成钙矾石, 导致体积膨胀, 破坏水泥结构。部分固废中的有害杂质可能在水化过程中浸出, 需通过化学检测与控制, 确保水泥化学性能达标。

3.3 水泥性能的改善措施

在工业生产中, 利用工业固废替代部分水泥原料虽具有环保与资源利用优势, 但也可能对水泥性能产生不

利影响。为此,需从多方面采取针对性改善措施,保障水泥性能达标。原料处理上,要优化固废预处理工艺。通过精准粉磨严格控制细度,让固废颗粒更均匀细小,增强反应活性。采用复合固废搭配使用,充分发挥不同固废性能互补性。例如,将粉煤灰与矿渣复合掺加,粉煤灰可改善水泥工作性,矿渣能提升后期强度,二者结合可平衡水泥的早期与后期强度。工艺优化方面,调整水泥煅烧与粉磨参数至关重要。精确控制煅烧温度、时间等,提升熟料质量,为水泥性能奠定基础。同时,优化生料配比,确保各成分比例合理,使水化反应充分进行,提高水泥强度。外加剂掺加是高效改善手段。掺入早强剂如氯化钙、硫酸钠,能加速水泥早期水化反应,提升早期强度,缓解凝结迟缓问题;掺入缓凝剂如木质素磺酸盐,可调节凝结时间,满足不同施工需求;掺入减水剂可降低需水量,改善和易性,进一步提升强度。要严格控制固废掺量在合理范围,根据不同性能要求灵活调整掺比,对含碱量高的固废,选用低碱熟料搭配,抑制碱骨料反应,实现水泥性能优化提升。

4 工业固废替代原料在水泥生产中的超低排放协同效应

4.1 污染物排放特性分析

工业固废替代原料在水泥生产中应用,会改变污染物排放特性,主要涉及颗粒物、SO₂、NO_x、重金属等污染物,排放规律与固废种类、掺量及生产工艺密切相关。颗粒物排放方面,固废破碎、粉磨过程会产生额外粉尘,但通过优化收尘系统,可实现颗粒物高效捕集,且部分细颗粒固废可吸附烟气中粉尘,降低排放浓度。SO₂排放受固废含硫量影响,脱硫石膏等含硫固废掺加可能增加SO₂排放,而高炉矿渣、粉煤灰等低硫固废可替代高硫原料,减少SO₂生成,同时水泥窑高温环境可促进SO₂与CaO反应,实现原位脱硫。NO_x排放方面,固废中的碳质成分可作为还原剂,在水泥窑还原区参与脱硝反应,降低NO_x排放,但部分固废会增加燃烧负荷,需控制燃烧条件避免NO_x升高。重金属排放因固废种类差异较大,含重金属固废可能导致烟气与废渣中重金属含量上升,需通过高温固化与末端治理,控制其排放与浸出风险。

4.2 超低排放协同效应的实现机制

工业固废替代原料在水泥生产中超低排放协同效应的实现,依托原料特性、生产工艺与末端治理的协同作用,形成多污染物协同控制体系。原料层面,利用固废成分实现原位治理,如含钙固废(电石渣、钢渣)可作为脱硫剂,在煅烧过程中与SO₂反应生成稳定硫酸盐,替代传统脱硫剂,降低脱硫成本;固废中的碳颗粒、有机质可在还原氛围下还原NO_x,实现脱硝协同^[4]。工艺层面,优化水泥窑煅烧参数,构建“高温煅烧+还原脱硝+原位脱硫”一体化工艺,调整窑内温度场与气流场,提升污染物原位去除效率,同时利用固废替代部分熟料,降低煅烧能耗,减少污染物生成。末端治理层面,整合高效收尘、脱硝、脱硫设备,与工艺优化衔接,形成互补,如采用袋式除尘器高效捕集颗粒物,结合SCR脱硝、石灰石-石膏脱硫技术,进一步降低污染物排放。另外,固废资源化利用减少了填埋产生的渗滤液污染,实现“以废治废”,构建环保与资源利用协同发展的良性循环。

结束语

工业固废替代原料在水泥生产中的应用研究意义重大。通过合理筛选与配比优化,工业固废可有效替代传统原料,实现资源化利用,降低生产成本。同时,其应用对水泥性能的影响可通过多种措施改善,保障水泥质量。在环保方面,工业固废替代原料能改变污染物排放特性,通过原料、工艺与末端治理协同,实现超低排放。未来,应进一步深入研究,优化应用技术,推动工业固废在水泥行业更广泛、高效的应用,助力水泥行业可持续发展。

参考文献

- [1]宋晓玲,刘龙敏,杨忠,等.氯元素对全废渣水泥性能的影响[J].环境工程学报,2022,16(09):2971-2981.
- [2]陈峰,阚侃,刘子龙,等.水泥行业二氧化碳排放核算方法对比研究[J].计量科学与技术,2025,69(07):42-51+66.
- [3]金玲玲,刘桂林.水泥窑协同处置工业废水污泥的技术性研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(04):179-181+188.
- [4]黄汝锦.搅拌站生产中水泥胶凝材料配比优化措施研究[J].中国厨卫,2024,23(9):97-98.