

# 水泥窑协同处置危废对熟料质量的影响分析

杨亮

陕西富平生态水泥有限公司, 陕西省渭南市, 711709;

**摘要:** 本文聚焦水泥窑协同处置危废对熟料质量的影响。通过对水泥窑协同处置危废的原理和现状进行阐述, 深入分析危废成分对熟料化学成分、矿物组成、物理性能等方面的影响。探讨了处置过程中可能出现的问题及应对策略, 旨在为合理利用水泥窑协同处置危废、保障熟料质量提供理论依据和实践参考。研究表明, 科学控制危废投入量和处置工艺, 可有效降低对熟料质量的不利影响, 实现危废处置与水泥生产的双赢。

**关键词:** 水泥窑; 协同处置; 危废; 熟料质量

**DOI:** 10. 64216/3080-1508. 25. 07. 031

## 引言

随着工业的快速发展, 危险废物的产生量日益增加, 其处理问题成为环保领域的重要挑战。水泥窑协同处置危废作为一种新兴的危废处理方式, 具有处置量大、处理彻底、资源利用等优点, 逐渐受到广泛关注。然而, 危废中复杂的化学成分和物理性质可能会对水泥熟料的质量产生影响。因此, 深入分析水泥窑协同处置危废对熟料质量的影响, 对于确保水泥产品质量、推动水泥窑协同处置危废技术的健康发展具有重要意义。

## 1 水泥窑协同处置危废概述

### 1.1 水泥窑协同处置危废的原理

水泥窑协同处置危废是指将经过预处理的危险废物投入水泥窑中, 利用水泥窑内高温、碱性环境等条件, 使危废中的有机物完全燃烧分解, 无机物参与水泥熟料的形成反应。在水泥窑高温煅烧过程中, 温度可达 1450℃左右, 能够有效分解危废中的有害物质, 如二噁英等在高温下可被彻底分解。同时, 水泥窑内的碱性环境可以中和危废中的酸性物质, 减少对设备的腐蚀。此外, 危废中的一些金属元素和矿物质可以作为水泥熟料形成的原料, 在一定程度上替代部分天然原料, 实现资源的有效利用<sup>[1]</sup>。

### 1.2 水泥窑协同处置危废的现状

近年来, 水泥窑协同处置危废技术在我国得到了快速发展。随着环保要求的不断提高, 越来越多的水泥企业开始采用该技术进行危废处理。目前, 我国已经建立了一系列相关的标准和规范, 对水泥窑协同处置危废的技术要求、污染控制等方面进行了明确规定。然而, 在实际应用过程中, 仍然存在一些问题, 如危废来源复杂、成分不稳定, 导致水泥窑运行和熟料质量控制难度增大等<sup>[2]</sup>。

## 2 危废成分对熟料化学成分的影响

### 2.1 主要化学成分的变化

危废中往往蕴含多样的化学成分, 其中既包含硅、铝、铁、钙等常见氧化物, 也不乏铅、汞等重金属元素。当这类危废投入水泥窑后, 其所含成分会深度参与熟料的形成反应, 进而显著改变熟料的化学成分构成。

具体来看, 若危废中硅含量较高, 在反应过程中可能促使熟料中硅酸三钙和硅酸二钙的含量相应增加; 而铝含量的波动, 则会直接影响铝酸三钙的生成量, 对熟料的矿物组成比例产生重要作用。

值得注意的是, 危废中含有的铅、汞等重金属元素, 即便其初始含量通常较低, 但在熟料形成的高温反应环境中, 仍会出现一定程度的富集现象。这种富集不仅可能改变熟料的化学稳定性, 还可能对其力学性能等产生潜在的不利影响, 需在实际应用中加以关注和控制。

### 2.2 化学成分变化对熟料质量的潜在影响

熟料化学成分的改变, 会直接牵动其矿物组成与性能, 进而对熟料质量产生多方面的潜在影响。作为熟料强度的核心来源, 硅酸三钙的含量变化影响显著: 含量增加能有效提升熟料的早期强度, 有利于缩短工程早期养护周期; 但一旦含量过高, 会使熟料凝结时间大幅缩短, 给混凝土浇筑、振捣等施工环节带来极大困扰, 甚至影响施工质量。

铝酸三钙的含量若超出合理范围, 会加快熟料的水化反应速度, 同时释放出大量水化热, 这种集中释放的热量易使混凝土内部产生温度应力, 进而导致裂缝出现, 影响结构稳定性。

## 3 危废成分对熟料矿物组成的影响

### 3.1 矿物组成的改变

水泥熟料的主要矿物组成包括硅酸三钙 ( $C_3S$ )、

硅酸二钙 ( $C_2S$ )、铝酸三钙 ( $C_3A$ ) 和铁铝酸四钙 ( $C_4AF$ )。危废成分的加入会改变这些矿物的形成过程和含量比例。例如,危废中的某些微量元素可能会作为矿化剂,促进硅酸三钙的形成,提高其含量。而一些有害物质可能会抑制矿物的形成,导致某些矿物含量降低。

### 3.2 矿物组成改变对熟料性能的影响

不同的矿物组成对熟料的性能有不同的影响。硅酸三钙和硅酸二钙是熟料强度的主要贡献者,其中硅酸三钙早期强度高,硅酸二钙后期强度增长快。铝酸三钙水化速度快,放热多,对熟料的凝结时间和早期强度有重要影响。铁铝酸四钙具有较好的抗冲击性能和抗硫酸盐侵蚀性能。因此,危废成分导致的矿物组成改变会直接影响熟料的强度发展、凝结时间、水化热等性能<sup>[3]</sup>。

## 4 危废对熟料物理性能的影响

### 4.1 强度

危废的掺入对熟料强度的影响呈现出显著的复杂性,这种复杂性源于危废成分与熟料矿物之间的多元反应。部分危废中含有的硅、铝等活性成分,在高温煅烧及后续水化过程中能发挥类似活性混合材的作用,通过参与水化反应生成更多凝胶类产物,填充熟料孔隙,从而有助于提升硬化体的结构致密性,间接促进强度发展。例如,某些工业废渣中的玻璃体结构在水化环境下会逐渐解体,释放出活性离子与水泥熟料中的水化产物结合,形成更稳定的空间网络结构,对强度产生正向贡献。

然而,更多情况下,危废中的有害成分会成为强度降低的诱因。当危废中含有过量氯离子时,这些离子会与熟料中的铝酸三钙发生化学反应,生成具有膨胀性的 Friedel 盐。这种物质在硬化体系内的生长会导致内部应力集中,破坏原有结构的完整性,进而造成强度持续下降。此外,危废自身的不均匀性也是不可忽视的因素。不同批次甚至同一批次的危废在成分、粒度分布上存在差异,会导致熟料煅烧过程中的反应程度不一致,最终表现为强度波动,给产品质量控制带来挑战。

### 4.2 凝结时间

凝结时间作为熟料物理性能的重要指标,对混凝土施工效率和工程质量有着直接影响,而危废中的化学成分是改变这一指标的关键因素。碱金属离子是常见的促凝成分,它们在水化体系中能够加速熟料矿物的溶解与水化产物的形成,缩短水泥从塑性到硬化的转变时间。若危废中此类离子含量过高,可能导致凝结时间过短,使混凝土在施工过程中失去可塑性,难以完成浇筑和振捣作业。

与之相反,硫酸根离子则通常表现出缓凝作用。当

危废带入的硫酸根离子与熟料中的铝酸三钙相遇时,会优先反应生成钙矾石。这种针状晶体在体系内的大量生成会包裹未水化的熟料颗粒,阻碍水化反应的进一步进行,从而延缓凝结时间。若硫酸根离子过量,可能导致凝结时间过长,影响工程进度,甚至因长期不硬化而降低结构强度。因此,在水泥窑协同处置危废的过程中,必须通过精准检测把控危废的成分及投入量,确保熟料凝结时间处于合理范围,兼顾环保效益与产品质量<sup>[4]</sup>。

### 4.3 安定性

熟料的安定性是指水泥在硬化过程中体积变化的均匀性。危废中如果含有过多的游离氧化钙、氧化镁等物质,在水泥硬化后会继续水化,产生体积膨胀,导致水泥石开裂,影响水泥的安定性。此外,危废中的一些有害物质可能会与水泥中的成分发生反应,产生新的化合物,也可能影响熟料的安定性。因此,在处置危废时,需要对危废进行严格的预处理,降低其中可能影响安定性的物质含量。

## 5 水泥窑协同处置危废过程中存在的问题及应对策略

### 5.1 存在的问题

在水泥窑协同处置危废的过程中,危废成分的复杂性是首要难题。这些危险废物来源极为广泛,涵盖了工业生产的各个环节、医疗领域的废弃物品以及日常生活中产生的特殊垃圾等,导致其成分呈现出高度的复杂性和不稳定性。不同来源的危废在化学成分上存在巨大差异,有的富含重金属,有的则含有大量有机污染物,且各类有害物质的含量波动极大。这种成分的不确定性给水泥窑的稳定运行带来了极大挑战,不仅会干扰窑内的热工制度,影响煅烧过程的均衡性,还会对最终熟料的质量控制造成严重阻碍——难以准确预判其对熟料强度、耐久性等关键性能的影响,进而可能影响水泥产品的整体品质。

### 5.2 设备腐蚀问题

设备腐蚀问题同样不容忽视。危废中常常含有各类酸性物质、氯离子以及其他腐蚀性成分,在水泥窑高温煅烧的特殊环境下,这些物质会发生一系列化学反应,生成具有强烈腐蚀性气体或熔融态物质。它们会持续侵蚀水泥窑的耐火材料内衬,使其表面逐渐剥落、变薄,降低耐火材料的隔热和耐高温性能;同时,对于窑体的金属部件,如窑筒、托轮等,这些腐蚀性物质会加速金属的氧化和锈蚀,导致部件的强度下降、密封性受损,严重缩短设备的使用寿命,增加设备维修和更换的频率,给企业带来沉重的经济负担。

尽管水泥窑协同处置技术在设计上具备一定的污染控制能力,高温环境也能分解大部分有害物质,但如果在处置过程中操作不当,比如危废进料量不稳定、窑内温度控制失衡,或者尾气净化系统出现故障,就可能导致未完全分解的污染物排放到大气中,其中包括氮氧化物、二氧化硫等气态污染物,以及少量重金属颗粒物。这些污染物一旦超标排放,不仅会对周边生态环境造成破坏,还会威胁人体健康,违背协同处置技术的环保初衷。

### 5.3 应对策略

在水泥窑协同处置危废的过程中,系统性的应对策略是保障处置效率与环境安全的核心。强化危废预处理环节是首要防线,需建立全流程分类体系,依据危废的物理形态、化学性质及热值差异进行精细划分,避免不同性质的废物混合导致反应失控。通过破碎与筛分工艺将大块废物细化,确保其在窑内均匀分散,同时借助专业除杂设备剔除玻璃、金属等惰性物质,减少对窑内工况的干扰。针对高风险成分,采用水洗、化学中和等技术定向去除过量氯离子与重金属,从源头降低有害物质对熟料质量的潜在影响,为后续处置奠定稳定基础。

### 5.4 运行参数

动态优化水泥窑运行参数是实现安全处置的关键。需建立危废成分与窑况参数的联动调节机制,实时追踪入窑废物的热值、水分及化学成分变化,灵活调整焚烧温度区间,确保有害物质在高温下充分分解。当检测到废物中易燃成分占比升高时,通过智能风阀系统精准增加一次风与二次风的配比,强化湍流混合效果,避免局部燃烧不充分形成的二噁英前驱物。同时优化物料喂料速率,维持窑内物料填充率的稳定,减少因负荷波动引发的窑温骤变,保障熟料的标号与稳定性不受影响。

### 5.5 设备维护与监测体系

构建全周期设备维护与监测体系能有效降低运行风险。制定分级巡检制度,定期对窑衬耐火材料进行厚度检测,及时更换受高温腐蚀或机械冲击受损的区域,防止局部过热导致的设备故障。针对窑尾烟室、分解炉等易结皮部位,采用在线清堵装置与红外测温技术,实时监控积料与温度变化,避免因结皮脱落引发的系统堵塞。建立关键设备的振动、电流等参数数据库,通过 AI 算法分析运行趋势,实现故障的提前预警与精准排查,确保生产连续性。

严格污染物排放控制是守住生态底线的关键。采用“低温脱硝+高效布袋除尘+湿法脱酸”的组合工艺,精

准去除烟气中的氮氧化物、颗粒物与酸性气体,确保排放浓度远低于国家标准限值。在废物入窑前进行重金属浸出毒性检测,通过配伍调整控制入窑重金属总量,并在熟料冷却环节设置重金属稳定化处理工艺,防止其在环境中迁移扩散。建立烟气在线监测系统,实时传输污染物浓度数据至环保部门,接受社会监督,实现绿色处置的全透明化<sup>[5]</sup>。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

水泥窑协同处置危废是一种有效的危废处理方式,但危废成分会对熟料的化学成分、矿物组成和物理性能产生一定的影响。通过科学控制危废的投入量和处置工艺,加强危废预处理和水泥窑运行管理,可以有效降低危废对熟料质量的不利影响,实现危废的无害化处理和资源的有效利用。同时,加强对水泥窑协同处置危废过程的监测和研究,不断优化处置技术和工艺,对于确保水泥产品质量和推动该技术的可持续发展具有重要意义。

### 6.2 展望

未来,随着环保要求的进一步提高和水泥窑协同处置危废技术的不断发展,需要进一步加强对危废成分与熟料质量关系的研究,建立更加完善的质量控制体系。同时,开发更加高效的危废预处理技术和水泥窑运行优化技术,提高危废处置效率和熟料质量稳定性。此外,还应加强与其他环保技术的协同应用,实现危废的全生命周期管理,为环境保护和资源循环利用做出更大的贡献。

### 参考文献

- [1] 谢志英. 水泥窑协同处置危险废物消防系统的探讨[J]. 水泥技术, 2025, (04): 71-75.
- [2] 苏航, 张迪. “双碳”背景下水泥窑替代燃料发展路径研究[J]. 水泥, 2023, (07): 18-22.
- [3] 王成言. 赛柏斯等防水材料在混凝土坝中应用的试验研究[D]. 西安理工大学, 2006.
- [4] 冯云, 李榛, 张文涛, 等. 含氟污泥对熟料凝结时间影响的研究进展[J]. 水泥技术, 2023, (03): 91-96.
- [5] 代小佩. 工厂烟囱装上“超级净化器”[N]. 科技日报, 2025-07-16 (008).

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。