

# 水泥化学组成快速检测方法研究及在实际生产中的应用

黎 帆

广东省广业检验检测集团有限公司 广东 广州 510000

**摘要：**水泥组分化学组成精准检测对保障产品质量、优化生产工艺意义重大。X射线荧光光谱法、X射线衍射法、红外光谱法及热分析等快速检测技术，凭借高灵敏度、高效率等优势，成为水泥生产质量管控的关键手段。这些方法可对水泥原料、生料、熟料及成品组分进行快速定量分析，实现生产全过程动态监控，为原料配比调整、工艺参数优化提供数据支撑，有效提升水泥生产质量稳定性与生产效率，推动水泥行业高质量发展。

**关键词：**水泥组分；快速检测方法；实际生产；应用

## 引言

在水泥工业蓬勃发展的当下，产品质量与生产效率的提升成为行业核心诉求。水泥组分复杂，各成分含量直接影响其物理化学性能与最终使用效果。传统检测方法存在耗时长、精度低等弊端，难以满足现代化水泥生产对实时、精准检测的需求。本文聚焦X射线荧光光谱法、X射线衍射法等先进快速检测技术，深入探究其原理与应用优势，旨在为水泥生产质量控制与工艺优化提供科学依据与技术支持。

## 1 水泥的主要组分及其作用

### 1.1 主要组分

水泥是由多种复杂成分构成的胶凝材料，其主要组分包括硅酸盐水泥熟料、石膏以及混合材料。硅酸盐水泥熟料是水泥的核心成分，主要由四种矿物组成：硅酸三钙（ $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ ）、硅酸二钙（ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ）、铝酸三钙（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ）和铁铝酸四钙（ $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ ）。其中，硅酸三钙和硅酸二钙是决定水泥强度的关键矿物，二者在熟料中的占比通常超过60%。石膏一般采用天然二水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）或硬石膏，主要作用是调节水泥的凝结时间。混合材料分为活性混合材料和非活性混合材料，前者如粒化高炉矿渣、火山灰质材料、粉煤灰等，具有潜在水硬性；后者如石英砂、石灰石等，主要起填充作用，改善水泥的某些性能。这些组分经过合理配比与高温煅烧等工艺，共同构成了水泥的物质基础。

### 1.2 作用

水泥各组分在水化过程中发挥着不同作用，共同塑造了水泥的性能。硅酸三钙具有较高的早期水化活性，与水反应迅速，生成大量的水化硅酸钙凝胶和氢氧化钙晶体，能在较短时间内产生强度，是水泥早期强度增长的主要贡献者。硅酸二钙早期水化速度较慢，但后期水

化活性显著增强，持续生成水化产物，使水泥的强度在28天龄期后仍能持续增长，保障水泥后期强度发展。铝酸三钙水化速度极快，放热集中，早期产生的强度较低且强度增长不明显，但其生成的水化铝酸钙晶体能填充水泥孔隙，改善水泥浆体的可塑性。铁铝酸四钙具有一定的强度，同时能降低水泥熟料的烧成温度，改善水泥的流动性和抗冲击性能。石膏与铝酸三钙反应生成难溶的钙矾石，包裹在铝酸三钙颗粒表面，阻碍其快速水化，从而有效延缓水泥的凝结时间。活性混合材料在水泥水化产物氢氧化钙的激发下，发生二次水化反应，消耗氢氧化钙，生成更多的水化硅酸钙凝胶，提升水泥石的密实度，改善耐久性；非活性混合材料则通过物理填充作用，优化水泥颗粒级配，降低生产成本。

## 2 水泥组分快速检测方法研究

### 2.1 X射线荧光光谱法（XRF）

X射线荧光光谱法的工作原理基于原子的内层电子跃迁。当高能X射线照射水泥样品时，样品中原子的内层电子被激发逸出，外层电子迅速填补内层空穴，在这一过程中会发射出具有特定能量的X射线荧光。不同元素的原子，其电子能级结构各异，因此发射出的X射线荧光能量也各不相同，通过精确测定这些荧光的能量和强度，便能实现对水泥中元素种类及含量的定性与定量分析。该方法具有显著优势，分析速度极快，能在短时间内完成大量样品检测，高效满足水泥生产过程中的质量控制需求。其检测灵敏度高，对痕量元素也能精准识别，并且具有良好的无损性，不会对样品造成物理或化学破坏，可确保样品后续能进行其他分析。在水泥组分检测中，XRF能准确测定水泥中的钙、硅、铝、铁等主要元素含量，为水泥的配方优化、质量监控提供关键数据支持，助力生产出性能稳定、质量优良的水泥产品<sup>[1]</sup>。

### 2.2 X射线衍射法（XRD）

X射线衍射法利用X射线与晶体物质相互作用时产生的衍射现象来分析水泥组分。当X射线照射到水泥中的晶体颗粒时，由于晶体内部原子呈规则周期性排列，X射线会在晶体中发生衍射，产生特定的衍射图案。每种晶体物质都有其独特的晶体结构，对应着独一无二的衍射图谱，如同人的指纹一般具有标识性。通过将实际测得的衍射图谱与已知晶体结构的标准图谱进行细致比对，就能准确鉴别出水泥中所含的晶体矿物种类，如硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙等，并进一步通过对衍射峰强度等参数的分析，实现对这些矿物相对含量的半定量评估。这一技术在水泥研究领域作用重大，它能清晰揭示水泥在水化过程中晶体矿物的种类、含量以及微观结构的动态变化，帮助科研人员深入理解水泥的水化硬化机理，为研发新型水泥材料、改进生产工艺提供重要的理论依据。XRD对水泥中晶相的分析精度高，不受非晶相物质的干扰，结果可靠，为水泥产品质量的精准把控提供了有力手段。

### 2.3 红外光谱法（IR）

红外光谱法基于分子振动-转动光谱原理。当红外光照射水泥样品时，样品中的分子会吸收特定频率的红外光，引发分子振动和转动能级的跃迁，产生独特的红外吸收光谱。不同化学键或官能团在红外光作用下，具有不同的振动频率和吸收特征，反映在光谱图上就是一系列特征吸收峰。例如，水泥中的硅氧四面体、铝氧八面体等结构单元，各自对应着特定的红外吸收区域。通过对这些吸收峰的位置、强度及形状进行深入分析，可推断出水泥中所含的化学键类型、官能团种类，进而确定其中有机和无机化合物的成分。红外光谱法具有特征性强的显著特点，每种化合物的红外光谱都是其分子结构的独特反映，有助于准确鉴别水泥中的各种添加剂、杂质等。该方法分析速度快，样品用量少，且对样品的物理状态要求宽松，无论是固体、液体还是气体样品都能适用。在水泥生产中，IR可用于快速检测水泥原料的成分一致性，监控水泥生产过程中的化学反应进程，确保产品质量稳定，还能有效检测水泥中是否存在有害杂质，保障建筑工程的安全<sup>[2]</sup>。

### 2.4 热分析方法

热分析方法是在程序控制温度下，精确记录水泥样品的物理化学性质随温度变化的关系。水泥在受热过程中，会发生诸如晶型转变、熔融、脱水、热分解等一系列物理和化学变化，这些变化往往伴随着热量的吸收或释放、质量的改变以及尺寸的变化等。通过热重分析（TG），可以精准测量水泥样品在升温或降温过程中的

质量变化，确定水泥中结晶水、吸附水的含量以及矿物的热分解温度和分解过程中的质量损失，以此推断水泥的矿物组成和含量。差示扫描量热分析（DSC）则能够测量样品与参比物之间的能量差随温度的变化，精确测定水泥水化反应的热效应，明确水泥的水化进程和反应动力学参数。热分析方法可在宽广的温度范围内对水泥样品进行全面研究，能获取丰富的信息，帮助科研人员深入了解水泥的热行为特性，为水泥的生产工艺优化、产品性能提升提供重要参考。该方法所需样品量少，仪器灵敏度高，可与其他分析技术联用，进一步拓展了对水泥组分分析的广度和深度，为水泥行业的技术创新和质量提升发挥关键作用。

## 3 水泥组分快速检测方法在实际生产中的应用

### 3.1 原料质量控制

（1）在水泥生产中，原料质量直接决定最终产品性能，快速检测方法可实时分析石灰石、黏土、铁粉等原材料的化学成分与矿物组成。通过X射线荧光光谱（XRF）技术，能在数分钟内精确测定原料中氧化钙、二氧化硅、三氧化二铁等关键氧化物含量，帮助生产人员及时掌握原料波动情况，避免因原料质量异常影响后续生产流程。（2）针对原料中有害成分如游离氧化钙、氧化镁的检测，快速检测设备可通过红外光谱分析等手段，精准识别潜在风险。一旦发现原料中有害成分超标，能立即启动原料调配方案，调整不同批次原料的配比，确保进入生料制备环节的物料符合工艺要求，从源头保障水泥质量稳定性。（3）对于混合材等辅助原料，快速检测方法可快速评估其活性指数、烧失量等指标。通过激光粒度分析仪测定混合材的颗粒级配，结合强度活性试验，准确判断混合材的适用性，优化混合材掺量，在保证水泥质量的同时降低生产成本，提升生产效益。

### 3.2 生料和熟料质量监控

（1）生料制备过程中，快速检测方法可实时监控生料的化学成分与细度。利用在线分析仪对生料进行连续检测，及时反馈碳酸钙分解率、硅率、铝氧率等参数，为粉磨系统和均化库的调控提供依据。若生料成分偏离目标值，可迅速调整原料配比和粉磨工艺参数，确保生料质量稳定，为生料煅烧创造良好条件。（2）在熟料煅烧环节，快速检测技术对熟料质量监控至关重要。借助热分析技术（DTA-TG），能快速测定熟料矿物组成，精准分析C<sub>3</sub>S、C<sub>2</sub>S等矿物含量与比例，清晰判断熟料煅烧程度及质量优劣。再结合扫描电子显微镜（SEM）观察微观结构、评估晶体发育状况，从而为窑炉温度、通风量等工艺参数的调整提供科学指导。（3）快速检测方法

还可对出窑熟料的游离氧化钙、安定性等指标进行快速测定。一旦发现游离氧化钙含量异常,及时调整煅烧温度和时间,避免因安定性不良导致水泥废品产生。通过快速检测反馈的熟料质量数据,优化冷却机运行参数,提高熟料冷却效率和质量,保障水泥生产的连续性和稳定性<sup>[3]</sup>。

### 3.3 水泥成品质量控制

(1) 水泥成品质量控制是生产过程的关键环节,快速检测方法可快速测定水泥的物理性能和化学成分。利用全自动强度检验设备,模拟实际养护条件,快速检测水泥的3天和28天抗压、抗折强度,结合水泥标准稠度用水量、凝结时间等指标检测,全面评估水泥的使用性能,确保出厂水泥符合国家标准和客户需求。(2) 在水泥化学成分检测方面,快速检测技术可精准测定水泥中三氧化硫、氯离子等有害成分含量。通过离子色谱仪等设备,快速分析水泥中氯离子浓度,防止因氯离子超标导致混凝土钢筋锈蚀问题。严格控制三氧化硫含量,确保其与水泥矿物成分相匹配,保障水泥的体积安定性和强度发展。(3) 针对水泥成品的颗粒级配检测,采用激光粒度仪快速分析水泥颗粒分布情况。合理的颗粒级配能优化水泥的水化速率和堆积密度,提高水泥强度和施工性能。根据检测结果,调整水泥粉磨工艺参数,如选粉机转速、研磨压力等,生产出不同性能要求的水泥产品,满足建筑工程多样化的需求,提升企业市场竞争力。

### 3.4 生产工艺优化

(1) 基于水泥组分快速检测获取的大量数据,可对生产工艺进行深度分析与优化。通过对原料质量、生料和熟料成分及成品性能等数据的综合分析,建立生产过程的数学模型,模拟不同工艺参数变化对产品质量和产

量的影响,找出最佳工艺参数组合,实现生产过程的精准控制。(2) 快速检测方法能够及时发现生产过程中的异常波动,为工艺调整提供快速响应支持。当检测到某一环节质量指标偏离目标值时,迅速追溯原因,判断是原料波动、设备故障还是工艺参数不合理导致,针对性地调整工艺操作。例如,根据熟料矿物组成变化,及时优化窑炉煅烧制度,提高煅烧效率,降低能耗。(3) 在长期生产过程中,利用快速检测积累的历史数据做趋势分析,预测质量问题与设备故障。借助数据挖掘找潜在规律和优化空间,持续改进工艺。对比不同批次产品检测数据评估改进效果,不断优化流程,提高水泥生产质量稳定性、效率及效益,推动企业可持续发展<sup>[4]</sup>。

### 结语

综上所述,X射线荧光光谱法、X射线衍射法等快速检测技术在水泥生产质量控制与工艺优化中展现出显著成效。通过对水泥各生产环节组分的快速、精准检测,实现了原料质量把控、生料熟料监控及成品质量保障,有效提升了生产效率与产品稳定性。未来,随着检测技术的不断革新,将进一步深化与智能化、自动化生产系统的融合,为水泥行业绿色、高效发展注入新动力。

### 参考文献

- [1]刘爽,黄上敏,徐乐,等.自动成为化学组分测定仪测定化学组分P和S的试验研究[J].水泥,2024(7):69-71.
- [2]殷翠玲,郑伟,王文淑,等.成为化学组分含量与掺量试验对比[J].中国水泥,2022(10):97-99.
- [3]蔡淑娇.成为化学组分的定量测定方法[J].江西建材,2020(10):45-46.
- [4]易建军.成为组分测定计算方法的探讨[J].数码-移动生活,2022(1):258-261.