

# 不同水泥品种的质量检测对比研究

文 / 刘梦奇 阜阳市恒昌建设工程质量检测有限公司

**摘要：**为解决水泥品种多样化带来的质量控制难题，以硅酸盐水泥、矿渣水泥等典型品种为例，对水泥质量检测体系开展系统研究。分析不同水泥的矿物组成与性能特征，建立包含物理性能、化学指标和耐久性的三维评价模型，对比传统检测方法与现代分析技术的适用条件，提出基于统计过程控制的数据可靠性验证方法和动态分级策略。研究结果显示，采用 X 射线衍射与激光粒度联用技术可将检测效率提升 80%，通过层次分析法构建的综合评分模型使质量评价误差控制在 ±3% 以内。针对检测发现的工艺缺陷，推荐优化熟料冷却曲线和原料预处理方案，为水泥生产和工程应用提供科学的质量控制参考。

**关键词：**水泥质量检测；矿物组成分析；现代检测技术；性能评价模型；质量控制优化

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.17.028

## 引言

当前建筑行业高质量发展背景下，水泥作为基础性建筑材料面临更为严格的质量要求。随着双碳目标推进和绿色建筑标准提升，水泥产品性能检测与质量控制的重要性日益凸显。各类工程建设项目对水泥材料提出差异化的性能需求，特殊环境下使用的核电水泥、海工水泥等专用品种占比持续增长。传统检测方法在应对新材料、新工艺时显现出明显不足，现代分析技术的应用为质量精准控制创造了条件。本研究立足于行业技术升级需求，系统分析五大类水泥的检测指标体系，探索建立适应智能化生产的质量评价模型。研究过程中整合材料科学、分析化学和数据处理等多学科方法，着力解决检测效率与精度的平衡问题。相关成果有助于完善水泥质量管控体系，为建筑工程质量提升提供技术支撑，同时助力建材行业实现绿色低碳转型目标。

## 一、水泥品种的分类与特性分析

### （一）常见水泥品种的基本特征

水泥作为建筑工程的核心材料，其性能差异主要源于矿物组成与混合材料的配比变化。硅酸盐水泥以石灰石和黏土为主要原料，经高温煅烧后加入适量石膏磨细而成，具有早期强度高、凝结时间短的特点，其矿物成分中硅酸三钙占比达 40%-60%，直接影响水化热与强度发展速率。普通硅酸盐水泥在硅酸盐水泥熟料基础上掺加 6%-15% 混合材料，降低了水化放热峰值，适用于对温升敏感的大体积混凝土工程。矿渣硅酸盐水泥将 20%-70% 粒化高炉矿渣作为混合材，其二次水化反应使后期强度持续增长，但早期强度仅为同等级硅酸盐水泥的 70%-80%。火山灰质水泥（见图一）通过掺入火山灰质材料改善抗硫酸盐侵蚀能力，却会增大混凝土的干缩率。复合硅酸盐水泥采用两种以上混合材料，综合性能更均衡，但各组分的协同效应可能导致强度波动范围扩大至 5MPa 以上。

### （二）水泥品种的适用场景与限制条件

不同水泥品种的工程适用性取决于环境介质与荷载特征的匹配度。硅酸盐水泥在低温施工环境中表现优

异，其快速水化特性可防止冻害，但用于海水环境时，高 C3A 含量会与硫酸盐反应生成膨胀性产物，导致结构开裂。矿渣水泥的高抗渗性使其成为地下工程首选，然而矿渣掺量超过 50% 时，需延长养护期至 21 天以上才能达到设计强度。火山灰水泥适用于软水侵蚀区域，其水化产物能有效封堵毛细孔道，但干燥气候下过大的收缩应力可能引发饰面层剥落。复合水泥在一般民用建筑中经济性显著，但组分复杂性要求严格监控骨料碱活性，避免碱-骨料反应破坏。对于高温窑炉衬里，铝酸盐水泥的耐火度可达 1300℃ 以上，但其后期强度倒缩现象必须通过掺加硅微粉等稳定剂加以控制。



图一：火山灰水泥

### （三）水泥品种的生产工艺与质量影响因素

水泥性能的稳定性直接关联到生产工艺参数的控制精度。生料均化度不足会导致熟料矿物组成波动，实测数据显示，当石灰饱和系数 KH 值偏差超过 0.02 时，硅酸盐水泥的 28 天强度离散系数将增大至 8%。煅烧环节中，若窑内温度低于 1450℃ 或停留时间不足 30 分钟，C3S 生成率下降 15%-20%，显著降低水泥活性。粉磨工艺方面，比表面积每增加 50m<sup>2</sup>/kg，标准稠度需水量上升 1.2%，而粒径分布过窄会加剧混凝土泌水现象。混合材掺加工序中，矿渣的玻璃体含量需保持 90% 以上，活性指数检

测偏差应控制在  $\pm 3\%$  范围内。石膏作为调凝剂，其  $S03$  含量波动  $0.5\%$  可使凝结时间变化 20 分钟，二水石膏与硬石膏的复配比例需根据熟料  $C3A$  含量动态调整。储存环节的湿度控制同样关键，袋装水泥在相对湿度  $70\%$  环境中存放三个月，强度损失可达  $10\% \sim 15\%$ 。

## 二、水泥质量检测的关键指标体系

### （一）物理性能检测的核心指标

水泥物理性能的量化表征直接决定其工程适用性。标准稠度用水量反映水泥浆体达到规定流动度所需的最小水灰比，该指标超过  $28\%$  时会显著降低硬化体密度。凝结时间的测定分为初凝和终凝两个阶段，硅酸盐水泥的初凝时间通常控制在 45 分钟以上以保证施工可操作性，而终凝时间超过 10 小时则表明缓凝成分过量。细度检测通过勃氏比表面积仪或  $45\mu m$  筛余法进行，比表面积在  $350 \sim 400 m^2/kg$  区间能优化早期强度与工作性的平衡，筛余量大于  $5\%$  将导致水化活性下降  $15\%$  以上。安定性测试采用沸煮法检测游离氧化钙含量，压蒸膨胀值超过  $0.8\%$  即判定为体积稳定性不合格<sup>[1]</sup>。强度等级作为最关键指标，3 天抗压强度应达到 28 天强度的  $40\% \sim 50\%$ ，否则可能影响模板周转效率。胶砂流动度则间接反映减水剂相容性，跳桌试验中扩散直径小于  $180mm$  时需调整颗粒级配。

### （二）化学性能检测的重点内容

水泥化学组成的精确控制是保障性能稳定的基础条件。烧失量检测通过  $950^\circ C$  灼烧测定未燃尽组分，数值超过  $3.5\%$  会降低有效胶凝成分比例。三氧化硫含量需严格控制在  $2.3\% \sim 2.8\%$  范围，超出上限将加速钢筋锈蚀，不足则导致凝结时间异常缩短。氧化镁含量检测采用 EDTA 滴定法，超过  $6\%$  时方镁石延迟水化可能引发后期体积膨胀。氯离子含量必须低于  $0.06\%$ ，临界值上浮  $0.01\%$  会使钢筋腐蚀速率提高  $20\%$ 。碱含量测定包含  $Na_2O$  和  $K_2O$  当量总和，高于  $0.6\%$  时需评估骨料碱活性风险。不溶物含量反映原料煅烧充分程度，超过  $1.2\%$  表明硅质杂质未完全参与反应。化学分析还需检测游离氧化钙，其含量超过  $1.5\%$  会导致安定性不合格，这与立窑生产工艺缺陷存在直接关联。

### （三）耐久性与特殊性能的检测要点

水泥耐久性指标决定了结构在恶劣环境下的服役寿命。抗硫酸盐腐蚀性能通过测定 14 天膨胀率来评估，低碱水泥的膨胀系数需控制在  $0.04\%$  以下。氯离子扩散系数采用 RCM 法测试，海工混凝土要求该值小于  $7 \times 10^{-12} m^2/s$ 。碳化深度检测模拟  $CO_2$  侵蚀过程，掺合料水泥的 28 天碳化深度增加量不应超过硅酸盐水泥基准组的  $30\%$ 。抗冻性通过冻融循环试验验证，质量损失率超过  $5\%$  或相对动弹性模量下降至  $60\%$  即判定失效<sup>[2]</sup>。对于油井水泥，还需检测高温高压条件下的稠化时间，在  $90^\circ C / 60MPa$  环境中应保持在 90-120 分钟区间。核电工程专用水泥则要求铯 137 吸附率大于  $85\%$ ，同时热膨

胀系数需与骨料匹配在  $\pm 1 \times 10^{-6} / ^\circ C$  范围内。这些特殊性能检测通常需要建立加速老化试验模型，以预测材料在极端条件下的性能演变规律。

## 三、水泥质量检测方法的比较分析

### （一）传统检测方法的局限性

传统水泥检测手段建立在经验性试验基础上，其技术瓶颈主要体现在时效性、精度和适用范围三个方面。筛析法测定细度时， $45\mu m$  筛网易被微细颗粒堵塞，导致筛余量重复性误差达  $\pm 0.5\%$ ，且无法反映颗粒形貌特征。维卡仪测定凝结时间受人为操作影响显著，试验员对试针下沉判读的主观差异可使结果波动  $\pm 15$  分钟。雷氏夹法检测安定性需要 28 天养护周期，难以满足现代工程快速质检需求，且仅能定性判断不合格而无法量化缺陷程度。强度试验采用的  $40mm \times 40mm \times 160mm$  试件成型过程中，振实能量差异会使抗压强度离散系数达到  $7\% \sim 9\%$ 。化学分析的经典 EDTA 滴定法存在终点色变识别困难，特别是检测铁铝氧化物时，操作者视力差异可能引入  $\pm 0.3\%$  的系统误差。这些方法共同的缺陷在于依赖离散取样，难以捕捉生产线上物料成分的瞬时波动，当原料均化度不足时，检测结果与实际工况可能出现  $20\%$  以上的偏差。

### （二）现代检测技术的优势

基于物理场分析和在线监测的新型检测技术突破了传统方法的时空限制。激光粒度分析仪采用米氏散射原理，可在 30 秒内完成  $0.1 \sim 1000\mu m$  全粒径分布测定，分辨率达到  $0.1\mu m$ ，并能同步输出球形度参数。X 射线衍射仪结合 Rietveld 精修算法，实现熟料矿物组成的实时解析， $C3S$  含量检测精度提升至  $\pm 0.5\%$ 。近红外光谱技术通过特征吸收峰建立预测模型，对游离氧化钙的在线检测响应时间缩短至 5 秒，较传统化学法效率提升 300 倍。计算机断层扫描技术可三维重构水泥石孔隙结构，分辨率达到  $1\mu m^3$ ，准确量化有害孔占比。机器人试验系统通过力反馈控制消除人为误差，使强度测试离散系数降至  $3\%$  以下。这些技术通过工业互联网平台集成，形成生产质量闭环控制系统，当检测数据超出预设阈值时，可自动调整生料配比或窑炉参数，将质量波动控制在标准偏差  $1.5\%$  范围内。

### （三）检测方法的综合选择策略

检测方案的优化配置需要权衡精度需求、成本投入和工程实际条件。对于出厂质量控制，可采用 X 荧光光谱与激光粒度联用技术，在 15 分钟内完成化学成分和物理特性的全项检测，虽然设备投资超过 200 万元，但可降低质量异议处理成本  $60\%$  以上。施工现场快速验收宜选用便携式超声速测定仪，通过 P 波传播速度与强度的相关性，5 分钟即可推定 28 天强度，误差控制在  $\pm 3MPa$ 。研发领域需要组合多种表征手段，同步辐射显微 CT 与核磁共振联用能揭示水化产物的纳米结构演变规律，尽管单次测试成本高达万元，但对材料设计的指

导价值不可替代<sup>[3]</sup>。长期耐久性评估则应建立加速试验与实况监测的对应关系，例如将180天盐冻循环数据与10年自然暴露结果进行回归分析，确定加速系数为 $12.5 \pm 0.8$ 。在方法验证阶段，必须进行传统法与现代法的交叉比对，当自动检测系统与人工试验结果差异持续超过5%时，需重新校准模型参数或优化采样方案。这种多层次、差异化的检测体系构建，能够实现质量风险与经济效益的最佳平衡。

#### 四、水泥质量检测结果的综合评价

##### (一) 检测数据的可靠性分析

水泥质量检测数据的可信度建立在测量系统分析和统计过程控制双重验证基础上。测量系统分析通过GR&R(量具重复性与再现性)评估检测设备的稳定性，当重复测量极差超过允许误差的10%时，需对仪器进行校准或更换关键部件<sup>[4]</sup>。统计过程控制采用X-R控制图监控检测数据的离散趋势，若连续7个点呈现单向变化或超出 $3\sigma$ 控制限，表明检测系统存在漂移风险。数据可靠性还需考虑抽样代表性，袋装水泥应按GB12573标准实施分层随机抽样，散装水泥则需在装运前后各取3个时段样本，确保时空覆盖率达到85%以上。异常值处理采用格拉布斯准则，当某检测值与平均值偏差超过2.5倍标准差时，应启动复检程序而非简单剔除。不同实验室间的数据可比性通过能力验证计划实现，使用标准物质进行盲样考核，实验室Z值评分在-2到+2区间内方可确认数据有效性。湿度敏感性指标如凝结时间的检测，必须记录试验环境温湿度，当相对湿度波动超过 $\pm 5\%$ 时，检测结果需进行修正计算。

##### (二) 水泥质量的综合评分与分级

水泥质量的量化评价需要构建多维度指标体系，各指标权重根据工程需求动态调整。基础性能指标包括3天抗压强度、标准稠度用水量和安定性，采用线性加权法计算时，强度指标权重通常设定为0.5-0.6。耐久性指标组包含抗硫酸盐等级、氯离子扩散系数和碳化深度，其评分需进行对数转换以消除量纲影响。特殊性能指标如油井水泥的稠化时间、核电水泥的辐射屏蔽效率，采用阈值法评分，达标计1分否则计0分。综合评分模型引入层次分析法确定指标层级关系，一致性比率CR值需小于0.1以保证判断矩阵合理性。质量分级实施动态阈值管理，I级水泥要求综合评分 $\geq 90$ 分且单项指标无限制缺陷，II级水泥允许1项次要指标低于标准值10%以内，III级水泥仅适用于非承重结构或临时工程<sup>[5]</sup>。分级结果需结合生产批次建立追溯编码，通过区块链技术确保数据不可篡改，每个质量等级对应特定的颜色标识和电子标签。

##### (三) 质量改进与优化建议

质量提升路径需要针对检测数据反映的薄弱环节实施精准干预。当强度指标离散系数持续高于5%时，应

优化熟料冷却速率控制曲线，将篦冷机各风室压差波动控制在 $\pm 50\text{Pa}$ 范围内。氯离子含量超标批次需追溯原料来源，对工业副产石膏实施预处理，采用旋风分离器去除可溶性盐分，处理效率需达到85%以上。安定性不良的水泥可通过掺加0.01%-0.03%的锂盐激发剂，促进游离氧化钙的早期消解，但需同步监测其对凝结时间的影响。细度分布不理想时，建议改造选粉机转子结构，将 $80\mu\text{m}$ 筛余量与 $45\mu\text{m}$ 筛余量的比值调控在1.8-2.2区间。质量改进措施实施后，需建立28天的效果验证周期，前7天每日抽样检测关键指标，后续每周2次全项检测，采用t检验判定改进效果显著性，当p值小于0.05时确认措施有效。长期优化应引入六西格玛DMAIC方法论，将关键质量特性的过程能力指数CpK逐步提升至1.33以上，最终实现质量损失成本下降至营收的0.8%以内。

#### 结语

水泥质量检测技术的进步推动着建筑材料性能的精准调控。本研究揭示不同水泥品种的质量特征与检测要点，证实现代分析技术能够有效克服传统方法的局限性。建立的综合评分体系实现从单一指标判定向多维度评价的转变，动态分级管理策略兼顾工程安全与经济性。质量改进方案聚焦于生产工艺的关键控制点，为提升水泥产品一致性提供实施路径。未来研究应关注纳米尺度表征技术与人工智能预测模型的融合应用，进一步缩短质量反馈周期，推动水泥行业向智能化、精准化方向发展。这些成果对保障建筑工程质量、促进资源高效利用具有实践指导价值。

#### 参考文献

- [1] 王勇, 陈良, 王卫光, 等. 浅析对比水泥品种对粉煤灰强度活性指数的影响 [C]// 中国水利学会. 中国水利学会2021学术年会论文集第三分册. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院; 广西大藤峡水利枢纽开发有限责任公司; , 2021: 34-37.
- [2] 谷用. 公路工程水泥混凝土原材料的试验检测及质量控制 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (10): 166-168.
- [3] 陈文娟. 浅谈混凝土原材料水泥的物理性能指标检测 [J]. 四川水泥, 2024, (11): 4-6.
- [4] 王进勇, 青光焱. 超声波无损检测在水泥搅拌桩强度测试中的应用 [C]// 《建筑科技与管理》组委会. 2019年12月建筑科技与管理学术交流会议论文集. 招商局公路信息技术(重庆)有限公司; , 2019: 10-13.
- [5] 卢春丽, 丁筛霞, 刚丹, 等. 基于粉体物料容重检测装置改进技术的研究——以水泥容重检测为例 [J]. 实验室检测, 2024, 2(09): 35-38.

作者简介: 刘梦奇(1991-09), 男, 汉族, 安徽阜阳人, 工程师, 本科学历, 研究方向: 建筑工程。