

水泥安定性检测常见问题与改进方法的试验研究

尹杨

绍兴东盛交通工程检测有限公司，浙江绍兴，312300；

摘要：水泥安定性检测的准确性直接关乎工程结构耐久性，但传统方法存在测试误差大、环境干扰显著及制备工艺缺陷等瓶颈问题，本研究通过系统分析沸煮法与压蒸法的操作局限性、试件成型质量波动及温湿度干扰机制，提出多因素正交试验设计与动态环境模拟相结合的改进路径，为水泥质量管控提供了兼具理论深度与实践价值的技术方案。

关键词：水泥安定性；检测方法；正交试验

DOI：10.69979/3029-2727.25.02.047

引言

水泥作为建筑工程的核心胶凝材料，其体积安定性缺陷可能导致结构开裂甚至垮塌，因而精准检测安定性已成为质量控制的关键环节，现行检测标准虽规范了沸煮法、压蒸法等基础方法，但在实际操作中仍面临试件成型变异大、环境参数干扰难消除、结果判读主观性强等突出问题，严重制约检测数据的工程指导价值，本研究通过机理分析与试验验证相结合的研究方式，系统剖析测试方法、制备工艺与环境控制三者的缺陷耦合机制，创新性提出多维度改进策略，为提升水泥制品全生命周期可靠性提供技术支撑。

1 水泥安定性检测的常见问题分析

1.1 测试方法局限性

水泥安定性检测的核心方法长期依赖于沸煮法和压蒸法，但其固有的技术局限性已成为制约检测结果可靠性的关键因素，以沸煮法为例，其操作流程虽在标准规范中具有明确要求，但在实际应用中仍难以规避人为干预导致的误差，由于检测过程需通过肉眼观察试件在高温沸煮后的形态变化，操作人员的主观判断往往直接影响最终结论的准确性，尤其当试件边缘出现细微裂纹时，不同检测者可能因经验差异对“临界状态”的判定标准产生分歧，进而导致同一批试件在不同试验室或不同批次检测中出现结果波动。除此之外，压蒸法虽能通过高压蒸汽环境加速水泥中安定性有害成分的化学反应，但其技术缺陷同样显著，该方法需依赖高精度压力容器和长时间恒压维持，导致单次检测周期长达数小时甚至数十小时，难以满足工程现场快速检测的需求，更

为关键的是，压蒸设备的高昂购置与维护成本限制了其在中小型试验室或施工单位的普及，而频繁的高压操作亦对试验人员的安全防护提出严苛要求。

1.2 试件制备缺陷

试件制备作为检测流程的初始环节，其质量直接决定后续检测数据的可信度，而现有工艺中的系统性缺陷尚未得到充分重视，首当其冲的是试模精度不足对成型质量的影响，标准雷氏夹或试饼模具在长期使用中易因金属疲劳或机械磨损产生形变，导致试件尺寸偏差超出规范允许范围，例如：雷氏夹两针尖平行度偏差若超过 0.5 毫米，将直接改变试件在煮沸过程中的应力分布模式，使膨胀变形量的测量值失真。另一深层次矛盾集中于养护环节的环境控制缺失，现行标准虽规定了试件成型后的养护温湿度范围，但多数试验室仍采用简易养护箱或自然条件静置，难以实现参数精准调控，水泥水化反应对温度波动极为敏感，若养护期间温度超出 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 的阈值，将显著改变水化产物形态与孔隙结构发育进程，导致试件强度与膨胀特性的不可逆改变，例如：低温养护会延缓钙矾石生成速率，而高温环境则可能促使石膏过早消耗，二者均可能掩盖水泥中安定性有害成分的真实活性^[1]。

1.3 环境因素干扰

水泥安定性检测的可靠性高度依赖于试验环境的稳定性，而实际检测过程中环境参数的不可控波动往往成为干扰结果准确性的潜在诱因，首要问题源于试验室模拟环境与工程现场条件的显著差异，标准检测规程通常要求在恒温恒湿的试验室环境中完成试件制备与检

测,但施工现场的实际工况往往存在昼夜温差大、湿度波动频繁等复杂特征,这种环境参数的错位直接导致实验室检测结果与水泥在真实服役环境中的表现存在系统性偏差,例如:试验室中恒定养护的试件因水化反应充分且均匀,其膨胀变形可能被控制在阈值内,但在昼夜温差达 15℃ 以上的露天工地中,水泥制品内部易因温度应力产生微裂纹,这些由环境交变引发的缺陷在试验室静态检测中难以被有效捕捉。另一关键干扰源来自检测过程中水质与温度参数的局部波动,以煮沸法为例,标准规定需采用洁净淡水作为加热介质,但实际操作中因水源质量差异可能引入不可预见的化学反应,当水体含有较高浓度的氯离子或硫酸盐时,煮沸过程中这些离子可能与水泥中的碱金属成分发生置换反应,生成膨胀性盐类物质,此类外源性膨胀会与水泥自身安定性缺陷导致的体积变化叠加,造成检测结果的误判,与此同时,要注意水温控制的精度问题,尽管规范明确要求煮沸阶段维持水温在特定区间,但传统加热设备普遍存在升温速率不均或恒温阶段温度震荡的现象,例如:电热管功率波动可能导致局部水温瞬时超过 100℃,引发试件表面剧烈汽化,这种非均匀热冲击可能诱发试件内部应力集中,形成与材料安定性无关的人为裂纹。

2 试验设计与方法改进研究

2.1 试验方案设计

2.1.1 多因素正交试验

正交试验设计作为系统性优化检测方法的有效工具,其核心价值在于通过有限次数的试验揭示多变量交互作用对水泥安定性的影响规律,针对传统检测方法中单一变量研究的局限性,可选取试件尺寸、养护时间及检测方法组合作为关键变量,构建三因素三水平正交试验矩阵,试件尺寸的差异直接影响内部应力分布模式,例如标准雷氏夹试件与缩小尺寸试件在煮沸过程中可能因表面积与体积比的变化导致水分渗透速率差异,进而改变膨胀变形量的表征精度;而延长或缩短养护时间则可能通过调控水泥水化进程的完成度,影响安定性有害成分(如游离氧化钙)的反应活性。检测方法组合的引入旨在探索煮沸法、压蒸法与辅助技术的协同效应,例如在压蒸前通过无损检测筛选试件内部初始缺陷,可避免无效试验对资源的浪费,正交试验的显著性分析将聚焦于各因素主效应及交互效应的量化评估,例如通过极差计算明确养护时间对膨胀率变异性的贡献度,或揭

示试件尺寸与检测方法间的隐性耦合关系,从而为后续方法改进提供方向性依据。试验设计的另一创新点在于引入环境参数的动态模拟,传统正交试验通常将温湿度等环境条件设为固定参数,但实际工程中水泥构件的安定性劣化往往与温湿循环、干湿交替等动态条件密切相关,因此可在正交框架内增设梯度变化的环境模拟模块,例如在部分试验组中周期性调节养护箱的温湿度以模拟昼夜交替或季节性气候波动,这样可以更真实地反映水泥在实际服役环境中的行为,通过对比静态与动态试验组的数据差异,识别环境参数突变对安定性检测结果的干扰机制^[2]。

2.1.2 对比试验组与对照组设置

对比试验的逻辑内核在于通过变量隔离实现因果关系的有效验证,可设置两类对照组,第一类为完全遵循现行标准规程的传统方法组,其试件制备、养护条件与检测流程均严格参照 GB/T 1346 规范,旨在锚定基准数据以量化改进方法的效果;第二类为“缺陷模拟组”,通过人为引入制备缺陷(如试模精度偏差、养护温湿度超限)或环境干扰(如使用含氯离子水源),系统性构建典型干扰场景下的检测案例库,试验组则采用改进后的制备工艺、环境控制策略及检测技术组合,例如使用数控加工的高精度试模搭配恒温恒湿全自动养护箱,并在煮沸阶段集成水质过滤与温度闭环控制系统,通过对比试验组与两类对照组的检测结果离散度、误判率等核心指标,可逐层解析各改进措施的实际贡献度。除此之外,试验架构的精细化设计还体现在多维度交叉对比策略的运用,针对同一批水泥样本,试验组与对照组除了进行整体性能对比,还通过分段式检测实现过程变量的动态追踪,例如:在试件养护阶段增设中间检测节点,利用超声波时域反射技术监测水化过程中内部微裂纹的萌生与扩展轨迹,并与最终煮沸后的宏观形变数据进行时空关联分析,这种“过程-结果”双轨对比模式能够揭示传统终检法无法捕捉的隐性规律,例如某些试件虽然在终检时未超出膨胀率阈值,但其内部微裂纹在养护中期已呈现加速扩展趋势,此类潜在风险仅通过单一终检指标极易被漏判。

2.2 新型检测技术探索

新型检测技术的引入旨在突破传统方法对人工经验与静态条件的过度依赖,通过技术创新提升检测过程的客观性与结果的可解释性,首项探索聚焦于超声波脉

冲反射技术的适应性改造,该技术通过分析高频声波在水泥试件中的传播特性,可非破坏性获取材料内部孔隙率与微裂纹分布信息,相较于依赖表面形变的传统方法,超声波检测能够穿透试件本体,捕捉深层结构缺陷的早期信号,例如:当水泥中游离氧化钙局部富集时,其水化反应生成的氢氧化钙晶体会改变声波阻抗,导致特定频段的反射波形出现特征性畸变,通过建立波形特征与安定性指标的关联模型可实现对潜在膨胀风险的定量预判。另一突破方向在于机器视觉与深度学习算法的融合应用,通过高分辨率工业相机采集试件在沸煮前后的表面形貌图像,结合卷积神经网络(CNN)进行裂纹特征提取与分类,可显著降低人工判读的主观性,算法训练中需构建包含不同裂纹形态、光照条件及背景噪声的样本库,通过数据增强技术提升模型泛化能力,例如:对边缘模糊的微裂纹采用自适应阈值分割算法,能够有效区分真实裂纹与制备过程中产生的划痕或污渍,其核心挑战在于动态环境下的图像稳定性控制,沸煮过程中蒸汽冷凝可能造成镜头模糊,需设计气幕隔离装置维持成像清晰度^[3]。

2.3 试件制备优化

试件制备的标准化程度直接决定检测数据的可比性,而现有工艺的改进空间集中于模具精度提升与养护过程动态调控,模具结构的优化设计需兼顾材料刚度与耐久性,采用数控机床加工的高强度不锈钢模具可将关键尺寸公差控制在 ± 0.02 毫米以内,显著降低试件成型过程中的几何变异,例如:雷氏夹的环形开口宽度偏差从传统模具的 ± 0.1 毫米缩减至 ± 0.03 毫米后,试件在沸煮中的膨胀位移测量重复性提高30%以上。除此之外,养护环境的精准控制是制备优化的另一核心环节。传统养护箱的温湿度波动范围常达 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 与 $\pm 10\text{RH}$,而新型全自动养护装置通过PID算法与多传感器反馈系统,可将参数稳定在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 与 $\pm 2\text{RH}$ 区间内,例如:在水泥水化放热高峰期,装置内置的半导体冷却模块可实时抵消温度爬升,避免试件内部因局部过热产生热应力裂纹;湿度控制方面,采用超声雾化与冷凝除湿双模式切换技术,以此防止高湿环境下试件表面结露。

2.4 环境控制优化

环境干扰的主动抑制策略需从介质纯净度与热力学参数稳定性两方面协同推进,针对沸煮水质的影响,可设计多级复合过滤系统,第一级通过活性炭吸附去除悬浮颗粒与有机杂质;第二级采用离子交换树脂选择性脱除氯离子与硫酸根;第三级利用反渗透膜将水质电导率控制在 $\leq 10\mu\text{S}/\text{cm}$ 的超纯水平,该系统的引入可消除外源性离子与水泥组分的异常反应,例如氯离子的完全脱除能够避免沸煮过程中Friedel盐的生成,进而准确区分材料固有缺陷与外界污染引发的膨胀效应。另一方面,温度控制的革新则体现在非线性热载荷的精准模拟与抑制。传统沸煮设备的加热功率调节存在严重滞后性,导致水温在沸腾阶段持续波动 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以上,为此,可研发基于模糊PID算法的智能温控系统,通过热电偶阵列实时监测水域温度场分布,动态调节环形加热管的输出功率,将沸煮阶段的水温波动压缩至 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 以内,同时在升温曲线设计中嵌入工程现场常见的热冲击模式,以此评估试件对极端温变条件的耐受阈值。

3 结束语

本研究通过系统性试验与理论分析,揭示了水泥安定性检测中测试方法局限、制备工艺缺陷及环境干扰协同作用的本质矛盾,提出了涵盖试验设计优化、智能检测技术融合、精密制备装备研发与环境控制强化的四位一体改进方案,未来研究需进一步探索水泥矿物组分与安定性劣化的定量关联模型,开发基于物联网的在线检测系统并建立不同气候区环境参数的动态修正数据库,为基础设施长效安全运维提供科学保障。

参考文献

- [1] 吴国林, 石川, 杨鹏飞, 等. 水泥安定性检测方法研究[J]. 广东建材, 2025, 41 (02): 71-72.
- [2] 李燕. 隧道施工中水泥安定性检测技术分析[J]. 运输经理世界, 2024, (33): 85-87.
- [3] 王秋懿. 建筑工程检测中水泥检测的要素探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (25): 94-96.
- [4] 魏环. 建筑工程检测中水泥检测的要素探讨[J]. 大众标准化, 2022, (08): 184-186.