

多孔建筑材料毛细吸水特性测量方法比较研究

黄庆春

新疆生产建设兵团建筑工程科学技术研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 多孔建筑材料毛细吸水特性对建筑耐久性影响显著。传统部分浸渍法因需频繁取出试样称重,存在操作误差大、效率低等问题。基于部分浸渍法改进的连续测量装置,通过实时监测吸水过程,显著提升了实验精度与重复性,且操作简便。研究表明,试样高度、数据选取阶段及孔隙率均影响测试结果,连续测量法在减少人为干扰、捕捉初始吸水阶段动态变化方面优势突出,为工程应用提供了可靠测量方案。

关键词: 多孔建筑材料;毛细吸水特性;测量方法;比较

引言:在建筑工程领域,多孔建筑材料如混凝土、砖块等应用广泛,其毛细吸水特性直接影响建筑结构的耐久性与安全性。水分通过毛细作用渗入材料内部,可能引发钢筋锈蚀、冻融破坏等问题,缩短建筑使用寿命。然而,传统测量方法多依赖人工操作,存在精度低、效率差、无法动态监测等局限,难以满足现代工程对精准测量的需求。因此,系统比较不同测量方法的原理、优缺点及适用性,对于优化测试技术、提升建筑质量具有重要意义。

1 多孔建筑材料毛细吸水特性理论基础

1.1 毛细吸水机制

(1) 毛细作用力驱动的液相传输过程:多孔建筑材料内部存在大量微小孔隙,当材料与水接触时,水在表面张力和附着力作用下产生毛细现象。表面张力使水面形成弯曲液面,产生附加压力,附着力则促使水分子附着于孔隙壁面,二者共同驱动水分沿孔隙通道向材料内部传输,该过程本质是液相在多孔介质中的capillaryflow(毛细流动),符合流体力学中界面张力主导的流动规律。(2) 孔隙结构对吸水速率的影响:孔径分布直接决定毛细作用力大小,孔径越小,毛细上升高度越高、吸水初始速率越快,但过小孔径易因水分滞留导致后期速率下降;连通性则影响水分传输路径完整性,连通性好的孔隙网络可减少传输阻力,使吸水速率更稳定,而封闭或半封闭孔隙会形成传输盲区,降低整体吸水效率^[1]。

1.2 关键参数定义

(1) 毛细吸水系数:反映材料毛细吸水能力的核心参数,定义为单位时间平方根内材料吸收的水量,单位通常为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$,可通过吸水试验中质量变化与时间平方根的线性拟合斜率获取,直接表征材料初始吸水速率的强弱。(2) 吸水速率曲线:以吸水质量为纵轴、时间为横轴绘制的曲线,曲线初期呈线性增长(对应毛细

作用主导阶段),后期逐渐平缓(因孔隙逐渐饱和),曲线形态可直观反映吸水过程的阶段特征及速率变化趋势。(3) 饱和吸水量与吸水高度:饱和吸水量指材料达到吸水平衡时吸收的水分质量与材料干质量的比值,体现材料的最大持水能力;吸水高度则是水分在毛细作用下沿材料竖直方向上升的最大距离,主要受孔径大小和材料亲水性影响,二者共同反映材料吸水的极限状态。

1.3 理论模型分析

(1) 经典模型适用性:Lucas-Washburn模型基于理想圆柱形孔隙假设,推导出吸水质量与时间平方根的线性关系,适用于孔径均匀、连通性好的多孔材料,能较好预测初始吸水阶段的速率,但对孔隙结构复杂(如孔径分布宽、存在封闭孔隙)的材料误差较大;Horiguchi模型引入有效孔隙率修正项,一定程度上提升了对非理想孔隙结构材料的预测精度,但仍未考虑温度、湿度等环境因素的影响,适用场景存在局限性^[2]。(2) 多因素耦合模型:该模型在经典模型基础上,融入温度、湿度、压力等影响因素,如温度升高会降低水的黏度、增大表面张力,从而加快吸水速率;湿度差增大可增强水分扩散驱动力;压力变化会改变孔隙内的附加压力,影响水分传输方向与速率。此类模型通过建立多变量耦合方程,能更全面地描述实际环境下多孔材料的毛细吸水过程,但其推导过程复杂,需大量试验数据验证参数,目前在工程应用中仍需进一步简化与完善。

2 多孔建筑材料毛细吸水特性测量方法分类与原理

2.1 接触式测量方法

2.1.1 质量法:通过高精度天平实时监测质量变化

将干燥的多孔建筑材料样本(如砖、混凝土试块)切割为标准尺寸后,将其底部与水接触(确保样本仅底部吸水,避免侧面或顶面水分干扰),同时将样本置于高精度电子天平(精度通常达 0.001g)上,实时记录不同时间

点样本的质量变化。根据质量增量与时间的关系,可计算毛细吸水系数、绘制吸水速率曲线,进而分析吸水过程。(1)优点:测量原理直接,无需复杂设备搭建,操作流程简单,能直接获取吸水质量数据,计算结果直观可靠,且试验成本较低,适合实验室常规批量测试。(2)缺点:样本需进行破坏性切割,无法对同一构件进行长期重复测试;测量数据仅反映样本整体质量变化,无法动态监测水分在材料内部的空间分布情况,难以捕捉局部孔隙的吸水差异。

2.1.2 吸水高度法:测量液体上升高度随时间变化

将规则几何形状(如长方体、圆柱体)的多孔材料样本竖直放置,底部浸入水中(水位控制在固定高度,避免样本漂浮),利用刻度尺或摄像头实时观测并记录不同时间点水分在样本内部沿竖直方向上升的高度,通过高度与时间的关系分析毛细吸水速率与极限吸水高度。(1)优点:能直观反映水分在材料内部的竖向毛细作用规律,可直接获取吸水高度数据,试验装置简单,观测过程易操作,适合研究材料竖向吸水的动态特征。(2)缺点:对样本几何形状要求严格,仅适用于规则尺寸的样本,无法对异形或实际工程中的非标准构件进行测试;测量结果易受样本表面平整度影响,若样本表面存在缺陷(如裂缝),可能导致水分沿裂缝快速上升,干扰正常毛细吸水数据^[3]。

2.2 非接触式测量方法

2.2.1 核磁共振法(NMR):通过氢原子信号追踪水分迁移

将多孔材料样本置于磁场中,水分子的氢原子会在射频脉冲作用下产生共振信号,信号强度与水分含量正相关。通过检测不同空间位置的共振信号变化,可实时追踪水分在材料内部的迁移路径、分布状态及含量变化,实现三维动态监测。(1)优点:全程无损检测,可对同一样本进行长期连续测试,不破坏材料结构;三维空间分辨率高(可达微米级),能清晰呈现水分在微小孔隙中的分布差异,为分析孔隙结构对吸水的影响提供直接数据。(2)缺点:核磁共振设备造价高昂(数十万至数百万元),维护成本高,普通实验室难以配备;测试过程中需对样本进行固定与屏蔽,单次测试时间较长(通常需数小时),不适合大批量样本快速检测。

2.2.2 中子成像法:利用中子衰减特性可视化水分分布

中子束穿透多孔材料时,水分子中的氢原子对中子的衰减能力远强于材料基体(如水泥、砂石),因此材料中含水分的区域会表现为中子束强度减弱的“阴影区”。通过探测器捕捉穿透后的中子信号并转化为图像,可直观

呈现水分在材料内部的分布与迁移过程。(1)优点:中子穿透力强,适用于高密度多孔材料(如高强混凝土、陶瓷),可穿透材料表层监测内部水分状态;成像结果直观,能清晰展示水分的动态扩散路径,尤其适合研究大尺寸构件的吸水特性。(2)缺点:中子源需依赖核设施(如核反应堆、加速器),设备稀缺且安全性要求极高,测试需在专业核实验室进行,难以普及;测试过程中需严格控制中子剂量,避免对操作人员造成辐射危害,试验成本与操作门槛均较高。

2.3 动态监测方法

2.3.1 传感器阵列法:埋设湿度/温度传感器实时监测

该方法的核心是在多孔材料内部或表面埋设微型湿度传感器(如电容式湿度传感器)与温度传感器,形成传感器阵列。传感器直接感知周围环境的湿度与温度变化,将物理信号转化为电信号并实时传输至数据采集系统,通过分析湿度随时间的变化规律,反推材料的吸水速率与水分分布情况。(1)优点:可嵌入实际工程构件(如墙体、路面)中,实现长期(数月甚至数年)动态监测,真实反映工程环境下材料的吸水特性;能同步监测温度对吸水过程的影响,为多因素耦合分析提供数据支持^[4]。(2)缺点:传感器的测量精度易受材料基体性质影响(如材料导电性、孔隙率会干扰传感器信号),需进行针对性校准;传感器埋设过程可能对材料结构造成微小破坏,且传感器自身存在一定体积,可能影响水分的正常迁移路径。

2.3.2 红外热成像法:通过表面温度变化反推吸水过程

多孔材料吸水后,水分在材料表面或内部蒸发会吸收热量,导致局部温度降低;未吸水区域温度相对稳定。利用红外热像仪捕捉材料表面的温度场分布,通过分析温度差异区域的位置、范围及时间,反推水分在材料内部的吸水与迁移过程。(1)优点:测试过程快速,可在数分钟内获取材料表面温度场图像,实现非接触式快速筛查;设备便携性强(如手持红外热像仪),适合现场工程检测,无需对样本进行预处理。(2)缺点:仅能通过表面温度变化间接反推吸水过程,需结合材料热物理模型(如热传导、热辐射模型)进行数据换算,模型假设与实际情况的偏差会导致较大误差;无法监测材料内部深层水分,仅适用于表面或浅层吸水特性的初步判断。

3 多孔建筑材料毛细吸水特性实验设计与测量方法对比研究

3.1 实验材料与样本制备

(1)典型多孔材料选择:选取C30普通混凝土(孔隙率15%-20%)、MU10烧结页岩砖(孔隙率25%-30%)、花岗岩(孔隙率1%-5%),覆盖高、中、低不同孔隙率范

围,代表建筑工程中常用的三类多孔材料,确保实验结果具有广泛参考性。(2)样本尺寸标准化:所有材料均切割为统一立方体尺寸,其中吸水高度法样本额外制备100mm×20mm×200mm长方体(便于竖向高度测量),样本表面经打磨处理,消除边缘毛刺对吸水的干扰,保证不同材料、不同测量方法的样本一致性。(3)孔隙结构表征:采用压汞法测量材料的孔径分布(测试范围0.003-300μm),计算平均孔径与有效孔隙率;通过SEM(放大倍数500-5000倍)观察材料微观孔隙形态与连通性,为后续分析孔隙结构对吸水特性的影响提供基础数据。

3.2 实验方案设计

(1)对照组设置:同一材料采用不同方法同步测试:对每种材料制备3组平行样本,分别采用质量法、吸水高度法、NMR法、传感器阵列法同步开展毛细吸水测试,每组样本测试数据取平均值,减少偶然误差,确保不同方法间数据的可比性。(2)环境控制:恒温恒湿条件(25°C,60%RH):实验在恒温恒湿箱内进行,温度波动控制在±1°C,相对湿度波动控制在±2%,避免温度、湿度变化对水的黏度、表面张力及材料吸水速率产生干扰,保证实验环境的稳定性。(3)数据采集频率:质量法通过天平自动记录,每分钟采集1次质量数据,重点捕捉初始吸水阶段的快速变化;NMR每小时扫描1次,获取水分空间分布数据;传感器阵列实时采集湿度数据,数据记录间隔设为10分钟,兼顾数据完整性与存储效率^[5]。

3.3 关键指标对比

(1)精度对比:毛细吸水系数计算值与理论值偏差。质量法偏差最小(≤3%),因直接测量质量变化,数据直观;吸水高度法偏差约5%-8%,受样本几何精度影响;NMR偏差约8%-12%,需通过信号校准换算,精度稍低。(2)时间分辨率:各方法捕捉初始吸水阶段的灵敏度。质量法最高(每分钟1次),能清晰反映前30分钟吸水速率的快速变化;传感器阵列次之(10分钟1次);NMR最低(每

小时1次),难以精准捕捉初始阶段的速率波动。(3)空间分辨率:非接触法对内部孔隙的表征能力。NMR空间分辨率最高(可达0.1mm),能区分不同孔径孔隙的水分分布;中子成像法次之(约1mm);红外热成像法仅能反映表面(≤1mm深度),无法表征内部孔隙。(4)成本与可操作性:设备成本、测试周期、人员技术要求。质量法(设备成本<1万元,周期1-2天,普通实验人员可操作)最经济便捷;吸水高度法(成本<0.5万元,周期1-2天,操作简单)次之;NMR法(成本>200万元,周期3-5天,需专业人员操作)成本高、门槛高;传感器阵列法(成本5-10万元,周期7-10天,需设备调试人员)兼顾长期监测与中等成本。

结束语

多孔建筑材料毛细吸水特性测量方法的研究,对保障建筑结构耐久性意义重大。本文对比分析了质量法、吸水高度法、核磁共振法等多种方法,明确其原理、精度、成本及适用场景。结果显示,不同方法各有优劣,如质量法简单经济,核磁共振法能无损监测内部水分。未来需结合工程实际需求,综合考量精度、成本与操作便捷性,优化方法组合,为多孔建筑材料性能评估与耐久性设计提供更精准依据。

参考文献

- [1]黎标.新型建筑材料在建筑工程中的应用[J].上海建材,2021(02):28-29.
- [2]乔健鹏.新型建筑材料在土木工程中的应用[J].材料制造与应用,2021,50(02):67-69.
- [3]赫强.装配式建筑中对新型轻质高强材料的应用分析[J].中国建材科技,2020,29(06):129-130.
- [4]李瑶,曾天扬,张强,薛伟.在装配式建筑中对新型轻质高强材料应用的研究[J].居舍,2020(15):182-184.
- [5]林壮龙,李银波.新型轻质高强多孔保温隔热建筑材料探讨[J].建筑实践,2021,(08):72-73.