

高层建筑混凝土结构检测的关键技术研究

文 / 刘畅 安庆市九华工程质量检测有限公司

摘要：在城市化进程不断加快的背景下，高层建筑大量出现，高层建筑的结构安全问题直接影响着人们的生命财产安全。高层建筑混凝土结构是建筑的主体，其长期服役过程中极易受环境侵蚀和荷载作用等诸多因素的影响而出现裂缝，碳化和钢筋锈蚀。这些病害在影响建筑物美观和功能的同时，还会严重威胁到结构安全。所以高层建筑混凝土结构检测技术是非常重要的。本次研究主要围绕高层建筑混凝土结构检测关键技术展开，目的是利用先进检测手段对结构内部缺陷进行准确辨识，从而为安全评估和加固维修工作提供科学依据，确保高层建筑安全、可靠地运行。
关键词：高层建筑；混凝土结构检测；关键技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.004

引言

高层建筑施工和运行期间，混凝土结构质量和安全问题一直是人们关注的焦点问题。在检测技术日益发展的今天，多种新型无损检测技术相继出现，对高层建筑混凝土结构健康监测工作起到强有力的支撑作用。这些技术既可以对结构内部缺陷进行非破坏性检测，又可以对应变和温度进行实时监控，从而为结构安全评估提供完整而精确的信息。在对高层建筑中混凝土结构的病害特性和成因进行深入探讨的基础上，本研究全面整理了目前混凝土结构检测的核心技术，其中包含了超声脉冲的检测方法、红外热成像探测，冲击回波探测等技术，旨在为高层建筑混凝土结构探测及评价提供技术参考及实际指导。

一、高层建筑混凝土结构病害特征及成因分析

（一）裂缝病害

1. 特征

裂缝是高层建筑混凝土结构最常见的病害形式之一，它以表面或者贯穿性裂缝的形式出现，形态各异，有横向，纵向，斜向和网状等。裂缝宽度差异显著，微观裂缝仅可通过专业仪器检测（ $<0.1\text{mm}$ ），而宏观裂缝肉眼可见（ $>0.3\text{mm}$ ）。裂缝主要分布在梁，板，柱受力集中区或者结构交接处，例如梁柱节点和预埋件四周。裂缝的存在不仅会影响建筑的美观，而且会减弱结构的承载力，使钢筋锈蚀加快，耐久性降低，严重者会危及结构的安全（如图1高层建筑裂缝）^[1]。



图1 高层建筑裂缝

2. 成因

裂缝的出现和很多因素有关。在设计中，配筋不充分，结构计算模型简化过多或者没有充分考虑温度应力以及地基不均匀沉降都会诱发裂缝的产生。施工因素中，混凝土配合比不当（如果水泥用量过多，水灰比过大）、养护不充分导致早期收缩裂缝，或模板拆除过早引发应力集中。环境因素如温度变化（热胀冷缩）、冻融循环、化学侵蚀（如氯离子侵入）等，也会加剧裂缝扩展。另外长期超载，地震或者风荷载等疲劳损伤以及地基不均匀沉降等都会引起结构性裂缝。

（二）混凝土碳化与钢筋锈蚀

1. 特征

混凝土碳化的特征是表面硬度下降，色泽变为灰白色，严重者伴有粉化剥落和保护层的开裂及锈胀裂缝的产生。当钢筋锈蚀时，锈蚀产物的体积会发生膨胀并进一步加剧裂缝的扩展，从而造成保护层的脱落和钢筋截面积的缩小以及力学性能的劣化。锈蚀钢筋的表面呈现红棕色，降低了其对混凝土的粘结力，对结构的耐久性造成了严重影响。这类病害在潮湿环境或者缺少养护的陈旧建筑上普遍存在（如图2混凝土碳化与钢筋锈蚀）^[2]。



图2 混凝土碳化与钢筋锈蚀

2. 成因

混凝土碳化及钢筋锈蚀的主要原因是材料劣化，环境侵蚀等。混凝土密实性不足（若振捣不紧，保养不当）

导致二氧化碳渗透，碳化反应降低混凝土碱度，破坏钢筋钝化膜。潮湿环境（如海洋、工业区）加速氯离子侵入，直接腐蚀钢筋；酸雨或者工业废气里的酸性物质会加重碳化进程。施工质量问题（如果保护层的厚度不够，钢筋间距太密等）也会形成蜂窝孔洞等缺陷，为侵蚀介质提供通道。从长期效应来看，碳化和锈蚀的进程较慢但是具有较强的累积性，最终危及结构的安全。

（三）结构变形与倾斜

1. 特征

结构变形包括整体倾斜、局部挠曲或不均匀沉降，表现为墙体开裂、门窗变形、楼地面不平整等。倾斜严重时，结构重心偏移可能导致失稳甚至倒塌，威胁生命安全。此类病害常见于地基承载力不足或地质条件复杂的建筑中，如软土地基未处理、地下水位变化等。

2. 成因

结构变形及倾斜产生原因有地基问题，荷载差异，结构老化等。地基承载力不足（如软土地基未加固）、地质条件复杂（如岩溶、断层）或地下水位变化，易引发不均匀沉降。相邻结构荷载差异过大（如加层改造）、施工堆载不均或设备振动，也会导致附加变形。长期荷载作用下，混凝土徐变、钢筋松弛或材料性能退化（如碳化、锈蚀），进一步降低结构刚度。此外，设计缺陷（例如，基础形式的选择不恰当，抗震设计不完善等）也会加剧变形风险。

二、高层建筑混凝土结构检测的关键技术

（一）超声脉冲检测技术

超声波检测技术是利用发射高频声波和接收声波在混凝土内部传播信号来根据波速，振幅和频率的变化来评价结构内部缺陷和材料性能的方法。它的核心原理是：超声波在密实混凝土内部传播的过程中能量衰减很小，当遭遇裂缝，空洞或者不密实区的时候波速明显减小，振幅衰减增强^[3]。这种技术一般采用单发双收或者阵列式传感器排布方式，通过比较和分析健康区域和疑似缺陷区域声波参数的不同来达到准确定位和规模量化缺陷。如在混凝土柱内裂缝探测中，可沿柱高方向设置若干测点，采用跨孔对测法建立裂缝三维分布模型以直观地显示缺陷形态。

高频超声波（>50kHz）对微小缺陷（如早期收缩裂缝）具有更高灵敏度，能够捕捉混凝土内部的细微损伤；而低频超声波（<20kHz）则适用于深层缺陷探测，可穿透较厚混凝土结构。这种技术具有非破坏性，实时性强和可重复检测等优点，适合对在役建筑进行定期检测和长期监测。然而，混凝土的非均质性、钢筋干扰及环境噪声可能影响信号质量，需结合数值模拟与信号处理技术（例如小波分析，滤波算法等）提升检测精度。另外，在检测之前需要将混凝土表面整平，优化传感器耦合方式才能保证声波信号高效发射和接收。

（二）红外热成像检测技术

红外热成像检测技术通过捕捉混凝土表面温度场分布的不同，来揭示其内部缺陷或者性能退化。其原理基于缺陷区域（如裂缝、空洞）因热传导受阻，导致表面温度异常，形成与周围密实区的温差梯度。检测前需对结构表面进行均匀加热（如红外灯照射）或冷却处理，以增强温差对比，确保热辐射图像的清晰度。采用高分辨率红外热像仪（像素精度 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$ ）扫描结构表面，结合图像处理算法（例如，边缘检测，区域分割等），可精准提取温度异常区域^[4]。

例如：当探测楼板底部开裂后，由于空气隔热效应，开裂处将出现低温条带，内部潮湿区域由于水分蒸发吸热使温度降低，从而形成显著的热异常区域。这项技术拥有广泛的快速扫描能力，特别适合于检测那些难以察觉的缺陷，例如深层的裂痕或空洞区域。但其探测结果容易受到环境温度的波动，表面发射率的不同以及太阳辐射的干扰等因素的影响，需要采用现场校准和多时段观测等方法来增强可靠性。另外，在探测时还应尽量避免大风或雨、雪等天气的影响，保证热像仪垂直于混凝土表面，同时对发射率参数的设定进行优化，减小误差。这一技术对高层建筑混凝土结构健康监测，提供一种有效，直观，非破坏性的检测方法。

（三）冲击回波检测技术

冲击回波检测技术根据应力波反射原理，利用激振器对混凝土表面产生瞬态冲击荷载以激励高频应力波进入结构内部进行无损检测。当应力波遇到缺陷界面（如脱空、分层或裂缝）时，会发生反射现象，反射波的传播时程与缺陷深度呈线性关系。通过高灵敏度传感器接收反射信号，并利用频谱分析（如快速傅里叶变换）提取反射波的主频特征，可精确计算缺陷的位置与规模。以混凝土板厚探测为例，冲击回波的主频和板厚呈反比：板厚越小，主频越大；但脱空缺陷的特征是反射波时程的明显减小和主频的偏移。该技术采用单点激振-多点接收模式，通过多点信号对比分析，可进一步提高检测精度，尤其适用于楼板、桥面等薄壁结构的浅层缺陷（<1m）筛查^[5]。

它具有操作方便，检测效率高的优点，可对脱空和不密实的隐蔽性缺陷进行迅速定位。但在检测过程中需要严格控制激振能量和传感器灵敏度之间的匹配关系，以免高频噪声对信号质量造成干扰。另外由于混凝土材料非均质性强，其检测结果会受到骨料分布和钢筋间距的影响，需要通过钻孔验证或者超声波检测相结合的方法对其进行校正。这一技术对高层建筑混凝土结构健康监测，特别是对施工质量控制及既有结构病害诊断等方面有着广泛的应用前景，是一种有效而可靠的无损检测方法。

（四）光纤传感监测技术

光纤传感监测技术通过分布式光纤传感器实时监测混凝土结构的应变、温度及裂缝扩展，其核心原理在于外界物理量（如应变、温度）改变光纤的折射率或长度，导致光信号发生相位、频率或强度调制。这项技术使用的是空间分辨率不超过 1cm 的分布式光纤传感器，并将其嵌入混凝土中以构建传感网络，从而能够覆盖广泛的建筑结构，并能进行长距离（>10km）的监控。如高层建筑地基沉降监测时，可以通过实测沿光纤应变分布来反演出地基的沉降曲线；并通过光纤断裂或者局部应变突变对裂缝扩展进行准确定位，从而为结构的健康评价提供关键数据。

光纤传感技术有着显著的优点：它的耐久性出众，能够抵抗腐蚀和高温环境的影响，适合长期的健康监测；同时具有较强的抗电磁干扰能力，保证了信号传输稳定。但在实际应用中需要解决光纤和混凝土协同变形的问题，以免由于材料不同而造成监测误差；另外，在施工中还需要对光纤进行严格的防护，以防机械损伤或者折断。为提升监测精度，还需开发高效的数据解译算法，以区分环境荷载（如温度变化）与结构损伤信号。这一技术为高层建筑混凝土结构全生命周期管理，特别是复杂环境和超高层建筑的智能化和高精度监测提供了一种新的手段。

（五）微波检测技术

微波检测技术通过利用高频电磁波（频率范围 300MHz-300GHz）在混凝土中的传播和反射特性，实现了对结构内部缺陷和材料性能的非破坏性评估。它的原理是根据电磁波在密实混凝土内部传播过程中能量衰减很小，同时遭遇裂缝，空洞或者含水区域后由于介电常数的改变会引起反射信号的增强或者相位偏移。这项技术能够通过发射天线向混凝土表面发射微波信号，并利用接收天线捕获反射波，再结合时域反射（TDR）或频域分析（FDR）技术，实现对缺陷位置的精确定位和规模的量化。如探测混凝土墙体中的含水层，微波信号会由于水的吸收作用而明显减弱，根据对反射波幅值和相位变化的分析，可以推测含水层的深度和厚度。

微波检测技术的优势在于对水分敏感、穿透深度大（可达数米），适用于大体积混凝土结构（如桥墩、坝体）的深层缺陷检测。另外，这种技术还可以将多频段天线整合在一起，对多频信号进行比较分析，从而提高检测精度。但混凝土骨料的分布和钢筋的布置方式可能会对电磁波的传播路径产生影响，因此需要结合数值模拟对天线的布局方式进行优化。这一技术对高层建筑基础及地下结构病害诊断，特别是潮湿环境或者含水区域的病害诊断，提供了高效且抗干扰能力较强的探测方法，有其独特的优点。

（六）声发射检测技术

声发射检测方法是通过对混凝土材料在受力时内部微小裂纹的形成、扩展以及在宏观破裂时释放的弹性应力波，从而实时追踪结构损伤的进展情况。原理是根据材料在变形或者破裂过程中所释放出的能量会以瞬态弹性波的形式向外扩散，利用高灵敏度传感器阵列对这些声发射信号进行接收和分析，就可以推测出裂纹的位置、种类和扩展速率。以混凝土梁为例，加载试验过程中声发射信号随着裂纹扩展表现出阶段性强化，利用频谱分析和模式识别技术可以分辨剪切裂纹和拉伸裂纹声发射特性。

该项技术具备实时动态监测的功能，适合结构健康监测和损伤预警。它具有对早期损伤反应灵敏、能捕捉到微裂纹萌生阶段声发射信号等优点，从而为结构寿命的预测奠定基础。但是声发射信号很容易受到环境噪声的干扰，需要利用滤波算法和信号分类技术来增强信噪比。另外，传感器的布置密度和位置对检测结果有显著影响，需要结合有限元模拟对传感器网络进行优化设计。声发射检测技术是高层建筑混凝土结构服役期内损伤累积评估和剩余寿命预测的主动式，全过程监控手段，特别是对地震，风振及其他动态荷载作用下结构的安全评价有很大价值。

结语

通过对高层建筑中混凝土结构检测关键技术进行了深入的研究，不难看出每种检测技术均具有自身特有的优点以及适用范围。实际工作中要结合结构特点，病害类型和检测需求等因素选用适宜的检测技术和采用多种方法进行全面评价。与此同时，伴随着科学技术的日益进步，新型检测技术也会层出不穷，从而为高层建筑混凝土结构健康监测工作提供了更准确和有效的解决方案。在今后的工作中，要不断加强检测技术研究和运用，促进高层建筑混凝土结构检测技术不断提升，助力城市建筑安全可持续发展。

参考文献

- [1] 宋文霞. 高层建筑混凝土结构检测的关键技术与难点突破 [J]. 中国水泥, 2025, (03): 84-86.
- [2] 李书源. 复杂劲性钢筋混凝土结构超高层建筑施工关键技术研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2024, (21): 117-119.
- [3] 熊刚. 超高层建筑型钢混凝土结构关键技术研究 [J]. 城市建筑, 2020, 17(32): 149-151.
- [4] 高层建筑装配式混凝土结构检测技术研究. 上海市, 上海市建筑科学研究院有限公司, 2018-12-20.
- [5] 唐伟耀. 高层建筑型钢混凝土结构施工关键技术研究 [J]. 建筑施工, 2013, 35(11): 992-994.

作者简介：刘畅，1988年6月，男，汉，安徽省安庆市人，本科，工程师，研究方向建筑工程检测。