

无损检测技术在混凝土结构耐久性评估中的应用进展

邱翊宸

黑龙江哈尔滨，哈尔滨市呼兰区，150500；

摘要：随着基础设施建设的飞速发展，混凝土结构因其优异的性能被广泛应用。然而，在长期使用过程中，混凝土结构受到各种环境因素和荷载的作用，耐久性问题逐渐凸显。无损检测技术作为一种有效的检测手段，能够在不破坏结构的前提下，对混凝土结构的耐久性进行评估，为结构的维护和加固提供重要依据。本文详细阐述了无损检测技术在混凝土结构耐久性评估中的应用进展，介绍了常用的无损检测方法，分析了其原理、特点及应用案例，并对未来发展趋势进行了展望。

关键词：混凝土结构；耐久性评估；无损检测技术；应用进展

DOI：10.69979/3029-2727.25.05.026

引言

混凝土结构因其强度高、可塑性好、耐久性强和成本低，在土木工程中广泛应用。但服役期间，多种因素导致其微观结构劣化，引发耐久性问题，影响结构功能和安全，造成经济损失和社会影响。

传统评估方法依赖破坏性试验，虽准确但损伤结构、成本高、周期长。无损检测技术可快速、低成本评估混凝土结构内部缺陷和材料性能，满足大规模工程检测需求，近年来得到快速发展。

1 混凝土结构耐久性影响因素

1.1 材料因素

1.1.1 水泥

水泥品种和质量对混凝土耐久性有重要影响。不同品种水泥的矿物组成和化学成分差异，影响其水化特性和抗侵蚀能力。例如，普通硅酸盐水泥早期强度发展快，但抗硫酸盐侵蚀能力较弱；矿渣硅酸盐水泥则具有较好的抗硫酸盐侵蚀性能和后期强度增长潜力。水泥细度、安定性等指标也会影响混凝土性能。细度过细可能导致水化热集中释放，增加混凝土内部温度应力，引发裂缝；安定性不良可能导致混凝土硬化后膨胀、开裂。

1.1.2 骨料

骨料是混凝土主要组成部分，质量和性能对耐久性起关键作用。骨料强度、粒径分布、级配、含泥量等因素影响混凝土强度和抗渗性。高强度骨料能提高混凝土整体强度，抵抗外部荷载；良好级配使骨料形成紧密堆积结构，减少孔隙率，提高抗渗性和抗冻性。骨料含泥

量过高会降低骨料与水泥石粘结力，增加孔隙率，降低耐久性。活性成分可能与水泥碱发生反应，导致体积膨胀、开裂，影响结构耐久性。

1.1.3 外加剂

外加剂在混凝土中使用量少，但显著影响性能。减水剂减少用水量，降低水灰比，提高强度和耐久性。引气剂引入微小气泡，改善和易性，提高抗冻性和抗渗性。然而，不当选择或使用过量外加剂可能负面影响耐久性。某些早强剂可能增加收缩和开裂风险；过量引气剂会降低强度。

1.2 环境因素

1.2.1 化学侵蚀

在各类环境因素中，化学侵蚀对混凝土结构耐久性的影响最为显著。混凝土所处的环境中如果存在酸性物质、硫酸盐、氯离子等侵蚀性介质，会与混凝土中的水泥石发生化学反应，导致混凝土结构的劣化。例如，酸性介质会与水泥石中的氢氧化钙等碱性物质发生中和反应，破坏水泥石的结构，降低混凝土的强度；硫酸盐会与水泥石中的水化铝酸钙反应生成钙矾石，产生体积膨胀，导致混凝土开裂；氯离子能够穿透混凝土保护层，到达钢筋表面，破坏钢筋表面的钝化膜，引发钢筋锈蚀，铁锈的体积膨胀进一步导致混凝土保护层开裂、剥落。

1.2.2 冻融循环

在寒冷地区，混凝土结构经常会遭受冻融循环的作用。当混凝土内部的孔隙水在低温下结冰时，体积会膨胀约 9%，产生巨大的膨胀压力。随着冻融循环次数的增

加，这种膨胀压力反复作用于混凝土内部，导致混凝土内部的微裂缝不断扩展、连通，最终使混凝土的强度和耐久性严重下降。混凝土的抗冻性与其孔隙率、孔隙结构以及饱水程度密切相关。孔隙率低、孔径细小且分布均匀的混凝土，其抗冻性相对较好；而饱水程度越高，混凝土在冻融循环过程中遭受的破坏就越严重。

1.2.3 温度和湿度变化

温度和湿度的变化也是影响混凝土结构耐久性的主要环境因素。温度的剧烈变化会使混凝土产生热胀冷缩，在混凝土内部产生温度应力。当温度应力超过混凝土的抗拉强度时，就会导致混凝土开裂。此外，温度还会影响化学反应的速率，加速混凝土内部的化学侵蚀过程。湿度的变化会引起混凝土的干缩湿胀，干湿循环会导致混凝土内部的微裂缝发展，降低混凝土的耐久性。在潮湿环境中，混凝土中的水分会为化学侵蚀和钢筋锈蚀提供必要的条件；而在干燥环境中，混凝土容易发生收缩开裂，使侵蚀性介质更容易侵入混凝土内部。

1.3 荷载因素

1.3.1 静荷载

长期承受静荷载作用会使混凝土发生徐变现象。徐变是指混凝土在长期恒定荷载作用下，随时间而增长的变形。徐变会导致混凝土结构的变形增加，在超静定结构中还可能引起内力重分布。过大的徐变变形可能会影响结构的正常使用功能，如导致梁的挠度过大、柱的垂度过发生变化等。此外，徐变还可能会使混凝土内部的微裂缝进一步发展，降低混凝土的强度和耐久性。

1.3.2 动荷载

动荷载如车辆荷载、地震荷载等对混凝土结构的作用具有反复性和冲击性。在动荷载作用下，混凝土结构会产生疲劳应力。当疲劳应力超过混凝土的疲劳极限时，混凝土内部会逐渐产生疲劳损伤，表现为微裂缝的萌生和扩展。随着动荷载循环次数的增加，疲劳损伤不断累积，最终导致混凝土结构的破坏。与静荷载作用下的破坏相比，混凝土在动荷载作用下的破坏往往更为突然，对结构的安全性威胁更大。

2 无损检测技术概述

无损检测技术（NDT）指在不破坏被检对象的前提下，利用物理或化学手段对其内部结构、缺陷及性能进行检测评估。其优势包括：非破坏性，不影响结构正常

使用；高效快速，可短时完成大面积检测；可重复检测，便于对比性能变化；成本低于破坏性检测。

无损检测按原理分为声学类（超声波、声发射）、电磁类（雷达、电磁感应）、热学类（红外热成像）及射线类（X射线、 γ 射线）。在混凝土耐久性评估中需根据检测目标、结构类型及环境条件选择适用方法。

3 常用无损检测技术在混凝土结构耐久性评估中的应用

3.1 超声波检测技术

3.1.1 原理

超声波检测技术是利用超声波在混凝土中传播的特性来检测混凝土内部缺陷和性能的一种无损检测方法。超声波是一种频率高于20kHz的机械波，具有波长短、方向性好、穿透能力强等特点。当超声波在混凝土中传播时，如果遇到缺陷（如裂缝、空洞、疏松等），会发生反射、折射和散射现象，导致接收信号的幅值、频率、传播时间等参数发生变化。通过分析这些参数的变化，可以推断混凝土内部缺陷的位置、大小和性质。

3.1.2 应用

超声波检测技术在混凝土结构耐久性评估中应用广泛，包括检测裂缝深度、评估密实度、推算强度和监测钢筋锈蚀。超声波在混凝土中的传播速度和时间差可用于这些评估。例如，在某桥梁工程中，超声波检测准确识别了箱梁内部的裂缝和疏松区域，为加固提供了依据。

3.1.3 特点

超声波检测技术具有检测速度快、操作简便、对人体无害、检测结果较为准确等优点。但其也存在一定的局限性，如对检测人员的技术水平要求较高，检测结果容易受到混凝土内部骨料分布、湿度等因素的影响，对于形状复杂或尺寸较小的构件检测难度较大。

3.2 雷达检测技术

3.2.1 原理

雷达检测技术通过发射高频电磁波到混凝土中，利用反射波来探测内部结构和缺陷。不同介质的介电常数差异导致电磁波传播速度和反射系数不同，从而分析内部界面位置和性质。

3.2.2 应用

雷达检测技术在混凝土结构耐久性评估中用于检

测钢筋位置、直径、保护层厚度，发现内部空洞和疏松缺陷，以及监测碳化深度。例如，在高层建筑检测中，准确确定了墙体内部钢筋情况和缺陷。

3.2.3 特点

雷达检测技术快速、范围广、非接触式、无损伤。结果以图像形式呈现，直观易分析。但设备成本高，对参数敏感，需专业操作和分析。对于厚结构，可能需分层检测。

3.3 红外热成像检测技术

3.3.1 原理

红外热成像检测技术是利用物体表面温度分布的差异来检测物体内部缺陷的一种无损检测方法。任何物体只要其温度高于绝对零度，都会向外辐射红外线。当混凝土结构内部存在缺陷（如裂缝、空洞、脱粘等）时，由于缺陷部位与周围正常部位的热传导性能不同，在外部热源的作用下，混凝土表面会形成温度分布差异。红外热像仪能够接收混凝土表面辐射的红外线，并将其转化为电信号，通过图像处理技术生成混凝土表面的热像图。根据热像图中温度异常区域的分布和特征，可以推断混凝土内部缺陷的位置、大小和形状。

3.3.2 应用

在混凝土结构耐久性评估中，红外热成像检测技术主要用于以下方面：一是检测混凝土表面的裂缝。裂缝部位的热传导性能与正常混凝土不同，在热像图上会呈现出明显的温度异常，从而可以清晰地显示出裂缝的位置和走向；二是检测混凝土内部的空鼓和脱粘。当混凝土内部存在空鼓或脱粘现象时，其表面温度分布会发生变化，通过红外热成像检测可以发现这些缺陷；三是评估混凝土结构的均匀性。通过分析混凝土表面的温度分布均匀性，可以判断混凝土内部材料的均匀性和施工质量。

例如，在某大型水利工程的大坝检测中，采用红外热成像检测技术对大坝混凝土表面进行了检测。通过热像图，发现了大坝表面存在的多处裂缝和内部空鼓区域，为大坝的安全运行评估提供了重要信息。

3.3.3 特点

红外热成像检测技术具有检测速度快、可大面积检测、能够实现非接触式检测、检测结果直观等优点。它可以在短时间内获取混凝土结构表面的温度分布信息，快速发现潜在的缺陷。但是，红外热成像检测技术受环

境温度、湿度、日照等因素的影响较大，检测结果的准确性需要结合其他检测方法进行验证。此外，对于混凝土内部较深位置的缺陷，由于热量传递的衰减，检测难度较大。

3.4 电磁感应检测技术

3.4.1 原理

电磁感应检测技术是基于电磁感应原理，通过检测混凝土结构中电磁参数的变化来评估结构性能和缺陷的一种无损检测方法。当在混凝土结构附近施加交变磁场时，混凝土中的钢筋等导电体在交变磁场的作用下会产生感应电流，进而产生二次磁场。检测仪器通过测量二次磁场的强度、相位等参数，来推断混凝土中钢筋的位置、直径、锈蚀程度等信息。同时，混凝土内部的缺陷（如裂缝、空洞等）也会影响电磁参数的分布，从而可以通过电磁感应检测来发现这些缺陷。

3.4.2 应用

在混凝土结构耐久性评估中，电磁感应检测技术主要用于检测钢筋的锈蚀情况。钢筋锈蚀会导致其电阻增大，电磁感应特性发生变化。通过检测钢筋电磁参数的变化，可以定量评估钢筋的锈蚀程度。此外，该技术还可以用于检测混凝土内部钢筋的位置和保护层厚度，为混凝土结构的维护和加固提供依据。

例如，在某既有建筑物的改造工程中，采用电磁感应检测技术对混凝土梁中的钢筋进行了检测。通过检测钢筋的电磁参数，准确地判断出了钢筋的锈蚀程度和位置，为后续的钢筋加固处理提供了关键数据。

3.4.3 特点

电磁感应检测技术具有检测速度快、操作简便、对钢筋锈蚀检测灵敏度高等优点。它能够在不破坏混凝土结构的前提下，快速获取钢筋的相关信息。然而，电磁感应检测技术容易受到周围环境中其他电磁干扰源的影响，检测结果的准确性可能会受到一定程度的影响。此外，该技术对于混凝土内部较深位置的钢筋检测精度会有所降低。

3.5 声发射检测技术

3.5.1 原理

声发射检测技术是通过监测混凝土结构在受力过程中内部材料因变形、开裂等产生的声发射信号来评估结构状态和损伤程度的一种无损检测方法。当混凝土结

构受到外部荷载或内部应力作用时，其内部的微裂纹会不断萌生、扩展和贯通，在这个过程中会释放出弹性波，即声发射信号。声发射传感器接收这些信号，并将其转化为电信号，通过信号处理系统对声发射信号的幅值、频率、能量等参数进行分析，从而判断混凝土结构内部的损伤情况和发展趋势。

3.5.2 应用

在混凝土结构耐久性评估中，声发射检测技术主要用于实时监测混凝土结构在荷载作用下的损伤发展过程。通过对声发射信号的连续监测，可以及时发现混凝土结构内部新裂缝的产生和已有裂缝的扩展，评估结构的剩余寿命。此外，该技术还可以用于检测混凝土结构中的隐蔽缺陷，如内部的孔洞、疏松等。

例如，在某大型桥梁的荷载试验中，采用声发射检测技术对桥梁结构进行了实时监测。在加载过程中，通过分析声发射信号的变化，准确地判断出了桥梁结构中出现损伤的部位和程度，为桥梁的安全性评估提供了重要依据。

3.5.3 特点

声发射检测技术具有实时性强、能够动态监测结构损伤发展过程、对微小缺陷敏感等优点。它可以在结构正常工作状态下进行检测，获取结构实际受力情况下的损伤信息。但是，声发射检测技术的信号容易受到环境噪声的干扰，需要采取有效的降噪措施。此外，该技术对检测仪器和数据分析方法的要求较高，检测结果的解释需要丰富的经验。

参考文献

- [1] 孙其臣. 冲击弹性波技术在水工混凝土结构无损检测中的应用研究[D]. 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [2] 郝挺宇, 惠云玲, 梅名虎, 等. 结构混凝土耐久性无损检测技术[C]//第五届混凝土结构耐久性科技论坛论文集. 2006. DOI: ConferenceArticle/5aa2575bc095d72220a02f03.
- [3] 谢强. 无损检测技术在混凝土结构中的应用[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术:00021-00021[2025-05-07].