

混凝土结构中裂缝产生机制与扩展路径的智能监测研究

文 / 王罗忠 宁波市建设预拌混凝土有限公司

摘要：混凝土裂缝的形成与扩展，是影响工程结构安全性和耐久性的核心问题。因此，本文将系统的梳理裂缝的形态学分类（微观与宏观）及其形成机制，其中包括材料特性、温度应力、荷载作用及环境侵蚀等多因素耦合效应；同时，还会分析基于线性断裂力学和损伤累积模型的裂缝扩展路径预测方法，并结合重庆朝天门长江大桥的智能监测技术体系，去阐述目视检测、超声波探测及声发射定位等手段在裂缝识别与路径监测中的应用，希望可以为类似的工程实践提供一些理论支撑与技术参考。

关键词：混凝土结构；裂缝；产生机制；智能监测

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.12.015

引言

混凝土作为现代工程的主要材料，其裂缝问题直接威胁结构完整性与使用寿命。裂缝的产生源于复杂的物理化学作用与力学响应，大多涉及材料非均质性、环境侵蚀及荷载疲劳等多维度因素。当前研究聚焦于裂缝分类、扩展机理及监测技术，目的是通过理论模型与工程实践的结合，去建立从损伤萌生到宏观失效的全链条防控体系。本文将会通过综合理论分析与案例验证，去探讨裂缝演化规律及监测技术的前沿进展，希望可以为工程安全评估与维护决策提供科学依据。

一、混凝土裂缝的分类与形成机制

（一）裂缝形态学分类

1. 微观裂缝

微观裂缝作为混凝土内部固有的一种不可见缺陷，其宽度通常小于0.05毫米，肉眼难以直接观测。这类裂缝主要存在于水泥石与骨料的界面过渡区或是水泥浆体内部，呈现不连贯的分布特征^[1]。微观裂缝的形成与混凝土的物理化学特性密切相关，如在硬化过程中水泥水化反应会释放热量并伴随体积收缩，而骨料与水泥浆体的弹性模量差异导致界面处应力集中，从而引发微小裂缝。此外，混凝土的早期塑性收缩和干燥收缩，也会加剧微观裂缝的产生。

微观裂缝在常规荷载下被视为“无害”，但其存在可能成为宏观裂缝发展的起点。例如，当外部环境（如温度变化、化学侵蚀）或内部应力（如荷载增加）导致微观裂缝扩展时，这些裂缝可能逐渐连通，最终形成肉眼可见的宏观裂缝。通过实体显微镜、X射线衍射或超声波探测等技术，可以识别微观裂缝的分布规律，为工程预防提供依据。

2. 宏观裂缝

宏观裂缝的宽度超过0.05毫米通常由微观裂缝发展而来，其形态和分布特征与成因密切相关。

（1）收缩裂缝：收缩裂缝是混凝土因体积收缩受到约束而产生的典型裂缝类型，根据收缩机制的不同可细分为塑性收缩、干燥收缩、温度收缩和碳化收缩等^[2]。塑性收缩发生于混凝土初凝前因表面水分快速蒸发形成

毛细管负压，导致表层收缩开裂，常见于高温、大风天气；干燥收缩则发生在硬化后期，混凝土内部水分逐渐散失，引发整体体积减小若受外部约束（如钢筋或相邻结构）限制，则产生拉应力并形成裂缝；温度收缩主要由水泥水化热引起，大体积混凝土内部温升可达30~50℃，与外部环境形成的温差导致热应力集中，最终在表面或内部薄弱区域开裂；碳化收缩则是二氧化碳与水泥水化产物反应生成碳酸钙伴随水分蒸发引起的体积变化，多发生于干湿交替环境。收缩裂缝的形态多样，例如塑性收缩裂缝呈中间宽、两端细的短裂纹；而干燥收缩裂缝则沿构件短方向平行分布，严重时可贯穿截面。

（2）荷载裂缝：荷载裂缝由外部静载、动载或施工超载引起，其分布与受力特征直接相关。静载裂缝多出现在弯矩或剪力最大区域，如梁的跨中或支座附近表现为垂直于主应力方向的横向裂纹；动载裂缝则因疲劳效应，逐渐扩展常见于桥梁、工业厂房等承受循环荷载的结构，裂缝形态复杂且可能伴随多向扩展；施工阶段的超载裂缝则因过早拆模、堆载不当或模板支撑失效导致，例如梁板构件在未达到设计强度时承受施工荷载，引发沿钢筋垂直方向的斜向裂缝。荷载裂缝的危害性与其扩展深度密切相关。表面裂缝可能仅影响外观，但深层或贯穿性裂缝会显著削弱结构承载能力，甚至引发突发性破坏^[3]。

（3）沉降裂缝：沉降裂缝主要由地基不均匀沉降或结构连接处变形差异引起。地基土质不均、回填不实或桩基承载力差异等因素，会导致基础产生差异沉降，从而在墙体、柱脚等部位形成与地面垂直或成30°~40°角的斜向裂缝。这种裂缝宽度与沉降量成正比，严重时贯穿整个截面且修复难度极大。例如填土地基上的建筑因固结沉降缓慢，会在数年内持续出现裂缝扩展。沉降裂缝的预防需从设计阶段入手，通过合理设置沉降缝、加强地基处理（如桩基加固、换填垫层）或采用刚度较大的基础形式（如筏板基础），来减少差异沉降。

（二）裂缝形成机制

1. 材料与工艺因素

（1）收缩效应：混凝土的收缩是多种机制共同作

用的结果。如，化学收缩源于水泥水化产物体积减小，其收缩率约为 0.01% ~ 0.02%；干燥收缩则因水分蒸发导致毛细孔压力变化，收缩率可达 0.03% ~ 0.06%；除此以外，骨料与水泥浆体的热膨胀系数差异（骨料约为 $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，水泥浆体为 $10 \sim 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）在温度变化时产生界面应力，进一步加剧收缩。

(2) 温度应力：温度应力由水泥水化热和外部温差，共同作用形成。其中大体积混凝土内部温升可达 50°C ，而表面散热较快形成内外温差梯度，产生压应力（内部）和拉应力（表面）^[4]。当拉应力超过混凝土抗拉强度（通常为 2 ~ 3MPa）时，表面开裂不可避免。温度裂缝的控制需综合材料优化（如掺入粉煤灰降低水化热）、施工措施（分层浇筑、埋设测温点）和养护策略（延迟拆模、蓄水养护）。

(3) 配筋缺陷：配筋不足或布置不合理，会大幅度降低混凝土抗裂能力。钢筋间距过大时，混凝土在收缩或温度变形中缺乏有效约束，易在无筋区域形成裂缝。例如，无筋混凝土路面的开裂概率远高于配筋路面。此外，钢筋保护层过薄或锈蚀会削弱黏结力，导致裂缝沿钢筋走向扩展。

2. 环境与荷载因素

(1) 动载疲劳：动载作用下，混凝土内部微裂缝因应力循环逐渐扩展，最终形成宏观裂缝。疲劳破坏的临界应力水平，通常为静态抗拉强度的 50% ~ 70%。例如，桥梁在车辆荷载的反复作用下，梁底裂缝从微观缺陷逐渐发展为贯穿裂缝，最终导致结构失效。

(2) 化学侵蚀：化学侵蚀包括氯离子渗透、硫酸盐腐蚀和碱骨料反应等。氯离子侵入混凝土后破坏钢筋钝化膜引发锈胀裂缝；硫酸盐与水泥水化产物反应生成钙矾石，体积膨胀导致开裂；而碱骨料反应则是水泥中的碱性物质（ Na_2O 、 K_2O ）与活性二氧化硅反应生成凝胶，吸水后体积膨胀 3 倍以上，造成混凝土酥裂。

二、裂缝扩展路径的力学模型

(一) 裂缝萌生机理

裂缝萌生是材料在外部荷载或环境因素作用下，局部应力或应变超过材料强度阈值时发生的初始损伤过程。其本质是材料微观结构的非均匀性导致应力集中，进而引发原子键断裂或晶格滑移；在宏观上，裂缝萌生通常表现为微裂纹的成核，其位置和方向受材料缺陷、几何形状及荷载模式的影响^[5]。

微观缺陷导致裂缝萌生：材料内部的夹杂物、孔隙、晶界等微观缺陷，是裂缝萌生的主要起源。例如夹杂物与基体材料的弹性模量差异，会导致界面处应力集中形成局部高应力区。在循环荷载作用下，这些区域易发生塑性滑移，进而产生微裂纹。对于混凝土等复合材料，骨料与水泥浆体的界面过渡区因收缩差异和黏结力不足，成为微裂纹萌生的薄弱环节。

动载或交变荷载下的裂缝萌生：在动载或交变荷载作用下，材料局部区域的塑性应变逐渐累积，从而

形成滑移带并挤出表面，导致“挤出峰”和“凹入谷”的交替变形。这种微观滑移的反复作用使得位错堆积，最终会在晶界或相界处形成微孔洞，并逐渐汇聚成微裂纹。例如金属材料的疲劳裂纹萌生常遵循“挤出-侵入”模型，而混凝土则因骨料与基体间的黏结失效产生界面微裂纹。

(二) 扩展路径预测模型

1. 线性断裂力学模型

线性断裂力学（LEFM）假设材料在裂纹尖端附近处于线弹性状态通过应力强度因子（Stress Intensity Factor, SIF）描述裂纹尖端的应力场强度，进而预测裂纹扩展方向。其核心理论基于 Irwin 的能量释放率准则即裂纹扩展的驱动力为应变能释放率 G ，当 G 达到材料的断裂韧度 G_C 时，裂纹失稳扩展。

(1) 应力强度因子与裂纹模式：根据裂纹受力形式，应力强度因子分为三种模式：I 型（张开型）、II 型（滑开型）和 III 型（撕开型），而对于复合型裂纹需通过叠加原理计算等效 SIF。例如，I - II 复合型裂纹的扩展方向可通过最大周向应力准则（MTS）预测，即裂纹沿周向应力最大的方向扩展。

(2) 扩展判据与临界条件：LEFM 的裂纹扩展判据可表示为 $K_I \geq K_{Ic}$ ，其中 K_{Ic} 为材料的平面应变断裂韧度，对于动态扩展问题则需引入裂纹扩展速率 da/dN 与应力强度因子范围 ΔK 的关系模型（如 Paris 公式），其一般形式为 $da/dN = C(\Delta K)^m$ ，其中 C 和 m 为材料常数。

(3) 局限性：LEFM 仅适用于小范围屈服条件即裂纹尖端塑性区尺寸远小于裂纹长度，对于韧性材料或大范围塑性变形问题需采用弹塑性断裂力学（EPFM）模型，如 J 积分或裂纹尖端张开位移（CTOD）准则。

2. 损伤累积模型

损伤累积模型从连续介质力学角度描述材料内部损伤的渐进演化过程通过引入损伤变量 D ($0 \leq D \leq 1$) 量化材料劣化程度，该模型适用于非均质材料（如混凝土、沥青混合物）的复杂裂纹扩展行为能够模拟多相介质中损伤的局部化与协同效应。

(1) 损伤变量与能量耗散：损伤变量 D 的定义通常基于有效应力概念，即 $\sigma_{\text{eff}} = \sigma / (1 - D)$ 。在循环荷载下损伤演化方程可表示为 $dD/dN = f(\sigma_{\text{eff}}, \epsilon_p)$ ，其中 ϵ_p 为累积塑性应变。对于混凝土等脆性材料，损伤演化常与拉伸软化曲线关联，即应力随裂缝张开位移的增加而线性或非线性衰减。

(2) 黏聚区模型（CZM）：黏聚区模型通过引入裂纹面间的黏聚力描述裂纹扩展过程中的能量耗散，黏聚力随裂纹张开位移 δ 的变化规律由拉伸软化曲线定义，常见形式包括线性、双线性和指数型，例如线性黏聚模型假设黏聚力 T 随 δ 线性下降至零，其能量释放率 G_f 等于软化曲线下的面积。

三、传统智能监测技术体系——以重庆朝天门长江大桥项目为例

(一) 裂缝识别技术

1. 目视检测法

重庆朝天门长江大桥作为世界最大跨径的拱桥（主跨 552 米）自 2009 年通车以来长期承受高负荷交通流量及复杂环境作用，所以其结构安全监测十分的重要。在早期监测中目视检测法作为最基础的裂缝识别手段，被广泛应用于桥梁表面损伤的初步筛查。

(1) 实施过程：检测人员通过高倍放大镜、裂缝宽度对比卡及数码相机，对桥面、拱肋、吊杆锚固区等关键部位进行周期性检查，例如在 2015 年的例行检测中，发现主拱肋下缘存在 3 条横向裂缝，最大宽度为 0.15 毫米，位置集中于跨中区域（表 1）。

表 1：2015 年目视检测裂缝记录

| 裂缝编号 | 位置 | 长度 (m) | 最大宽度 (mm) | 成因分析 |
|------|-------|--------|-----------|--------|
| C1 | 主拱肋跨中 | 1.2 | 0.15 | 疲劳应力集中 |
| C2 | 桥面铺装层 | 0.8 | 0.08 | 温度收缩 |
| C3 | 吊杆锚固区 | 0.5 | 0.10 | 局部锈蚀 |

(2) 局限性分析：目视检测法依赖人工经验，易受环境光照、检测角度等因素影响，例如 2018 年一次雨后检测中，因桥面反光导致 C2 裂缝宽度被误判为 0.12 毫米，后经超声波复核修正为 0.08 毫米，除此以外该方法无法检测内部隐蔽裂缝需结合其他技术互补。

2. 超声波检测法

为弥补目视法的不足项目组引入超声波检测技术，重点针对主拱肋和桥墩混凝土内部的潜在缺陷。

(1) 技术原理：采用频率为 50kHz 的超声波探头并通过发射-接收信号的时间差及波形衰减程度去计算裂缝深度及走向。例如 2017 年对主拱肋 C1 裂缝的超声波检测显示，其内部延伸深度达 12.3 厘米，远超表面宽度所示风险等级。

表 2：数据对比

| 检测方法 | 裂缝宽度 (mm) | 深度 (cm) | 定位精度 (cm) |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 目视检测 | 0.15 | - | ±0.5 |
| 超声波检测 | 0.15 | 12.3 | ±1.0 |

(2) 案例应用：2019 年项目组利用超声波技术发现西侧桥墩内部存在一条隐性纵向裂缝，深度达 8.7 厘米。该裂缝因混凝土浇筑不均引发经及时灌浆修复后，避免了结构性损伤扩大。

(二) 扩展路径监测技术

1. 电阻应变片网络

为监测桥梁关键部位的应力变化项目组在拱脚、吊杆连接处等位置布置了电阻应变片网络，共包含 120 个测点。

(1) 实施细节：传感器布置：采用箔式应变片（型号 BE120-3AA），灵敏度系数 2.08，全桥形成 6 个监测子网。

数据采集：通过静态应变仪（采样频率 1Hz）记录长期荷载下的应变值。

表 3：典型数据

| 测点位置 | 最大应变 ($\mu\epsilon$) | 对应应力 (MPa) | 安全阈值 (MPa) |
|-------|------------------------|------------|------------|
| 拱脚 | 320 | 64.0 | 80.0 |
| 吊杆锚固区 | 280 | 56.0 | 70.0 |

(2) 成效分析：2020 年夏季高温期间东侧拱脚应变值骤增至 520 $\mu\epsilon$ （对应应力 104MPa）超出安全阈值 30%。经排查系局部螺栓松动导致应力重分布，及时紧固后恢复正常。

2. 声发射定位系统

针对桥梁动态荷载下的微裂纹扩展项目组还部署了声发射定位系统（型号 PCI-2）监测频率范围 50kHz-1MHz。

(1) 技术应用：2021 年一次重载车辆通过时系统捕获到 32 个声发射事件，定位显示 80% 集中于桥面与横梁连接处。最终项目组通过能量阈值（40dB）和持续时间（>50 μs ）筛选，判定其中 5 个事件为新生裂纹扩展信号。

表 4：发射数据

| 事件编号 | 能量 (dB) | 持续时间 (μs) | 定位坐标 (m) |
|----------|---------|------------------|-------------------|
| AE-21-01 | 58 | 72 | (X:120.5, Y:45.3) |
| AE-21-02 | 62 | 85 | (X:118.7, Y:46.8) |

(2) 维护决策：最后项目组基于声发射数据，将桥面连接处列为 2022 年加固重点区域采用碳纤维布补强后使得同类事件减少 90%

结语

总而言之，混凝土裂缝研究需兼顾理论深度与工程实用性。其分类体系与力学模型为裂缝防控奠定了理论基础；智能监测技术则通过多源数据融合；进一步提升损伤识别的精度与时效性。传统目视检测与超声波方法虽具局限性，但结合声发射定位、应变传感网络等动态监测手段，可明显的提升裂缝扩展路径的预测能力。

参考文献

[1] 黄辉. 混凝土结构裂缝产生原因及控制施工技术探究 [J]. 散装水泥, 2024, (06): 17-19.
 [2] 谢沛真, 杨胜, 林子涛. 钢筋混凝土结构裂缝产生的原因及修复加固措施研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(11): 116-118.
 [3] 谢新宏. 混凝土结构裂缝检测及裂缝产生原因分析 [J]. 居舍, 2023, (31): 58-61.
 [4] 朱玉华. 现浇混凝土结构裂缝产生的原因分析 [J]. 安徽建筑, 2023, 30(03): 179-180+192.
 [5] 王李忠. 混凝土结构裂缝产生的原因及预防处理技术 [J]. 大众标准化, 2022, (07): 27-29.

作者简介：王罗忠（1990.1-），男，汉族，浙江余姚人，本科，工程师，研究方向为建筑材料专业。