

# 桥梁裂缝检测与处理技术

刘新建

中交中南工程局有限公司 湖南 长沙 410004

**摘要：**桥梁裂缝是桥梁结构中普遍存在的病害，成因复杂，类型较多。裂缝检测技术涵盖传统人工检测与智能检测两大类别，传统技术成本较低但效率有限、存在检测盲区；智能技术各具优势与应用局限，需结合实际场景综合选型。裂缝处理技术包括传统修复方法与新型修复材料及技术，传统方法技术成熟但存在一定短板，新型技术与材料则展现出良好应用潜力。桥梁裂缝防治需聚焦检测技术升级、修复材料创新及施工工艺优化，通过多维度提升检测效率与可靠性，精准匹配不同裂缝场景的处理需求，从源头减少裂缝诱发因素，保障桥梁结构安全稳定。

**关键词：**桥梁裂缝；检测技术；智能监测；修复技术；病害防治

## 1 桥梁裂缝成因与分类

桥梁裂缝作为桥梁结构最常见的病害之一，其形成原因复杂多元，主要可归纳为四大核心因素：

**荷载作用：**当桥梁承受的荷载超出设计承载能力，或长期处于超载运行状态，结构内部应力会突破材料极限，进而在梁体底部受拉区等关键部位引发裂缝。

**温度应力：**桥梁结构会随环境温度变化热胀冷缩，若这种变形受到约束，将产生温度应力。以混凝土桥梁为例，夏季高温时膨胀受阻、冬季低温时收缩受限，均易产生裂缝。

**材料与施工因素：**混凝土原材料质量不合格、配合比设计不当，或施工过程中振捣不密实、养护措施不到位等，都会降低混凝土的强度与耐久性，为裂缝产生埋下隐患<sup>[1]</sup>。

**地基承载力不足：**地基承载力不够、地基不均匀沉降造成桥涵混凝土结构物破坏。

从分类来看，按裂缝走向可分为纵向、横向及不规则裂缝；按裂缝深度可分为表面、深层及贯穿裂缝。不同类型的裂缝对桥梁结构安全性、耐久性的影响程度存在差异，精准判定裂缝成因与类型，是制定针对性维修加固方案、保障桥梁安全运行的前提。

## 2 桥梁裂缝检测技术

### 2.1 传统检测技术

传统人工检测凭借检测工具简单，操作简便、成本低廉的优势，在桥梁日常巡检、裂缝初步排查中应用广泛。

检测人员通过肉眼观察，借助裂缝宽度、裂缝深度测定仪等工具测量，记录裂缝的位置、走向及发展趋势。裂缝宽度测定仪可直接读取数值，精度达0.01mm；裂缝深度测定仪基于超声波反射原理，通过发射与接收超声波信号，根据传播时间计算裂缝深度。

**钻芯法：**钻芯法通过钻取混凝土芯样，直接观察内部裂缝情况并测定强度，检测结果更为精准可靠。

**传统检测技术存在局限：**人工检测效率低、劳动强度大，对大跨度桥梁、高耸结构及复杂隐蔽部位的检测存在盲区；检测结果受人员经验与责任心影响较大，难以实现裂缝的实时监测与早期预警。

### 2.2 智能检测技术

#### 2.2.1 无人机与机器视觉

无人机与机器视觉融合的检测技术，是破解传统人工检测痛点的新型智能手段，在大跨度、复杂结构桥梁检测中优势突出。

该技术通过搭载高清摄像头、红外热像仪等传感器的无人机，按预设航线对桥梁进行全方位航拍，获取结构表面高清图像并传输至后台系统。机器视觉算法对图像进行预处理后，采用灰度阈值分割等技术精准识别裂缝、提取特征参数，排除环境干扰，自动测量裂缝宽度、长度等数据并生成检测报告。红外热像仪还可辅助检测混凝土内部缺陷，为裂缝成因分析提供支撑。

该技术具备检测效率高、覆盖范围广、安全性强的特点，既能实现快速巡检与大面积检测，又能动态监测裂缝发展趋势，为养护决策提供精准数据，但恶劣天气会影响无人机飞行稳定性与图像采集质量。

#### 2.2.2 光纤传感技术

光纤传感技术是基于光纤传输特性的新型智能检测技术，具有灵敏度高、抗干扰能力强、耐久性好的优势，适用于桥梁裂缝长期实时监测。

该技术通过在桥梁混凝土结构中布设光纤传感器，利用光弹效应等原理，将裂缝引发的结构变形转化为光信号变化，再通过解调设备获取裂缝相关参数。可根据需求选择不同类型传感器：分布式传感器能实现全结构

全程监测，精准定位裂缝位置；点式传感器可对关键部位裂缝进行实时监测，测量精度达微米级。

该技术不受电磁干扰等环境因素影响，能在恶劣环境下长期稳定工作，传感器体积小、重量轻。通过构建监测网络，可实现全方位、立体化监测，捕捉裂缝早期发展迹象，但前期设备投入与布设成本较高，施工工艺要求严苛。

### 2.2.3 三维激光扫描

三维激光扫描技术是高精度立体检测技术，通过获取桥梁三维点云数据，实现裂缝精准检测与结构变形分析，在桥梁病害检测与评估中应用广泛。

该技术利用三维激光扫描仪发射激光束，对桥梁进行全面扫描，通过测量激光传播时间与角度计算目标点三维坐标，形成密集点云模型。经去噪、拼接等处理后生成三维可视化模型，再通过专业软件分析，精准识别裂缝参数，同时检测结构变形与沉降情况<sup>[2]</sup>。

该技术具备检测精度高、速度快、非接触式的特点，能快速获取桥梁结构详细信息；通过对比不同时期数据，可精准掌握裂缝扩展与结构变形趋势，但扫描易受遮挡影响，对内部及隐蔽部位检测存在局限，且点云数据处理需专业软件与技术人员支撑。

### 2.2.4 物联网（IoT）集成

物联网（IoT）集成检测技术是多技术融合的智能监测方案，通过整合感知设备、通信网络与数据平台，实现桥梁裂缝的全面感知、实时传输与智能分析。

该技术在桥梁关键部位布设多种感知设备，同步采集裂缝参数、环境因素（温度、湿度）及结构受力状态等多维度数据；通过无线通信模块将数据实时传输至云端平台；平台利用大数据与人工智能算法处理数据，实现裂缝自动识别、风险等级评估，并在出现异常时自动报警。

该技术实现了数据采集与传输的自动化，减少人工干预，提升检测效率与数据可靠性；多维度数据融合分析可深入探究裂缝成因，为防治工作提供科学依据。支持远程监控与移动端访问，实现桥梁智能化管理，但系统结构复杂，前期投入成本高，对数据安全与平台维护要求严格。

## 2.3 检测技术对比与选型建议

不同检测技术在精度、效率、成本及适用场景上差异显著，需结合桥梁类型、规模、服役年限及检测需求综合选型：

**传统检测技术：**检测精度受人工经验影响较大，效率偏低，但成本低、操作简便，适用于中小跨度桥梁日常巡检、临时检测及裂缝初步排查。

**无人机与机器视觉：**检测效率高、覆盖范围广，精

度能满足常规检测需求，适用于大跨度、复杂结构桥梁的快速巡检与大面积裂缝排查，尤其适合高空、高危部位检测，恶劣天气下适用性受限。

**光纤传感技术：**精度高、耐久性好，支持长期实时监测，适用于重要桥梁关键部位的裂缝早期预警与长期跟踪，但成本高、布设复杂，不适用于临时检测或大面积排查。

**三维激光扫描技术：**精度极高，可同步检测裂缝与结构变形，适用于桥梁病害详细检测、结构安全评估及改扩建前期勘察，数据处理难度大，易受遮挡影响。

**物联网集成技术：**支持多参数同步监测与智能分析，适用于大型桥梁、重要交通枢纽桥梁的全生命周期监测，系统复杂、成本高。

**选型原则：**日常巡检优先选用传统技术或无人机技术；关键部位长期监测首选光纤传感技术；病害详细检测与结构评估采用三维激光扫描技术；大型桥梁全生命周期管理可采用物联网集成技术。

## 3 桥梁裂缝处理技术

### 3.1 传统修复方法

传统修复方法技术成熟、应用广泛，需根据裂缝宽度、深度及危害程度选择适配方案：

**表面封闭法：**适用于宽度小于0.2mm的表面微裂缝。通过清除裂缝表面杂物、灰尘，涂抹环氧树脂砂浆、密封胶等材料形成封闭层，阻止水分与有害物质渗入。仅能处理浅层裂缝，无法解决结构内部隐患<sup>[3]</sup>。

**压力注浆法：**针对宽度0.2mm以上的中深层裂缝。利用注浆泵将环氧树脂、水泥浆等浆液高压注入裂缝内部，浆液凝固后与混凝土形成整体，恢复结构整体性与承载能力。

**加固补强法：**适用于裂缝严重、结构承载力下降的场景。通过粘贴钢板、粘贴碳纤维布、增设钢筋网、外包混凝土等方式，增强结构受力性能，补强效果显著，但施工周期长、工艺要求高，对桥梁正常通行影响较大。

### 3.2 新型修复材料与技术

#### 3.2.1 自修复混凝土

自修复混凝土是具备自主修复裂缝能力的新型材料，通过在混凝土中掺入特定功能组分，裂缝产生时可自动触发修复机制，填充裂缝并恢复结构性能，为裂缝防治提供了新思路。

该材料主要分为两类：微生物自修复混凝土在制备时掺入含产酸菌及营养物质的载体，裂缝出现后，水分与氧气渗入激活微生物代谢，产生碳酸钙等矿物质填充裂缝，实现裂缝自主修复。

自修复混凝土修复及时、耐久性好，能在裂缝早期自主修复，避免病害扩展，减少人工养护成本。但修复剂封装工艺、修复效率仍需进一步优化，对宽裂缝的修复效果有待提升。

### 3.2.2 形状记忆合金（SMA）

形状记忆合金（SMA）修复技术利用其独特的形状记忆效应与超弹性特性，实现桥梁裂缝的修复与加固，修复效果好、耐久性强，适用于桥梁关键部位裂缝处理。

该技术通过将形状记忆合金丝、板等构件嵌入或粘贴在裂缝区域，裂缝产生时，通过加热或利用结构自身应力变化触发合金的形状恢复效应，使构件产生收缩力，对裂缝两侧混凝土施加压力，促使裂缝闭合；同时，合金的超弹性可吸收结构振动与温度变化产生的应力，抑制裂缝再次扩展。

## 4 桥梁裂缝防治的优化方向

### 4.1 检测技术升级

桥梁裂缝检测技术需向智能化、精准化、实时化方向升级，通过多技术融合与设备创新，提升检测效率与可靠性，实现裂缝早期预警与动态监测。

推动智能检测设备向小型化、集成化升级：优化无人机传感器性能，提升恶劣天气下的图像采集质量；结合深度学习算法，提高裂缝识别准确率与参数测量自动化程度，实现检测数据实时分析；研发便携式高精度光纤传感设备，降低部署成本，扩大监测覆盖范围。

构建多源数据融合监测体系：整合无人机、光纤传感、三维激光扫描等技术的检测数据，结合桥梁结构参数、运营荷载数据，利用大数据分析平台深度挖掘裂缝成因，精准预测发展趋势。

引入数字孪生技术：构建桥梁数字孪生模型，同步实时检测数据，实现裂缝发展的可视化模拟与提前预警，为养护决策提供直观、科学的依据；推动检测技术标准化建设，制定统一的操作规范与数据标准，确保检测数据可比、可追溯。

### 4.2 修复材料创新

修复材料创新是提升裂缝防治效果的核心，需聚焦高耐久性、多功能性与绿色环保性，开发适配不同裂缝场景的新型材料，同时完善材料性能评价体系。

优化自修复材料性能：提升微生物自修复混凝土中微生物的活性与载体稳定性，延长微生物存活时间，提高对宽裂缝的修复效率；研发复合型胶囊自修复材料，实现裂缝的多阶段、深层次修复。

推动纳米改性材料应用：将纳米技术与传统修复材料结合，开发纳米硅烷改性环氧树脂、纳米碳酸钙增强

水泥浆等材料，提升材料的粘结强度、抗腐蚀能力与渗透性能，增强与混凝土基体的结合力，延长修复寿命。

研发专用环保材料：选用、开发环保型修复材料，减少对环境的影响；针对氯盐腐蚀、冻融循环等特殊环境，开发专用修复材料，提升裂缝修复后的环境适应性。

建立综合性能评价体系：从强度、耐久性、环保性等多维度对修复材料进行综合评估，为不同场景下的材料选型提供科学依据，推动创新材料的工程化应用。

### 4.3 施工工艺优化

施工工艺优化需贯穿桥梁设计、施工及运营养护全过程，通过标准化、精细化施工，减少裂缝源头诱发因素，提升结构抗裂能力与修复效果。

设计阶段：结合桥梁所处地质条件、环境特征与交通荷载，优化结构设计方案，增强结构整体刚度与抗裂性能；利用BIM等信息化手段模拟施工过程，预判裂缝风险，提前制定针对性改进措施。

施工阶段：推广精细化施工技术，采用自动化搅拌设备精准控制混凝土配合比，确保拌合物和易性稳定；应用智能振捣设备，根据混凝土坍落度调整振捣频率与时长，避免过振或漏振；推行模块化施工，减少现场作业量，提升施工质量稳定性。

养护阶段：加强施工期养护监测，利用无线传感技术实时监测混凝土温度与应变变化，及时调整养护方案；采用智能养护设备（如自动喷淋系统）实现养护过程的自动化控制，减少早期收缩裂缝。

修复施工优化：开发便捷化、高效化的修复施工设备，提升修复施工的精准度与效率；制定修复施工质量验收标准，加强施工过程质量管控，确保修复效果达标。

结束语：桥梁裂缝检测与处理技术是桥梁结构安全运行的保障，直接关系到桥梁的使用寿命与通行安全。当前，裂缝检测技术呈现传统与智能互补发展的态势，修复技术则在传统方法基础上向新型材料、新技术方向革新。未来，需持续推动检测技术的智能化升级、高性能修复材料的创新与施工工艺的精细化优化，通过多技术融合、多维度管控，实现裂缝的精准检测、高效修复与源头防控，为桥梁工程的高质量发展提供坚实保障。

## 参考文献

[1]杨国俊,齐亚辉,石秀名.基于数字图像技术的桥梁裂缝检测综述[J].吉林大学学报(工学版),2024,54(2):313-332.

[2]吴昊天.公路桥梁裂缝检测与养护加固技术研究[J].科技与创新,2025(16): 147-150.

[3]刘京峰,丁洋,王贊.桥梁结构裂缝病害识别检测技术研究[J].云南民族大学学报(自然科学版),2025,34(3): 356-362.