

自修复混凝土裂缝愈合效果的试验检测与评价方法

杨 报

中交四航局第二工程有限公司 广东 广州 510230

摘要:为精准评估自修复混凝土裂缝愈合效果,本文系统梳理宏观与微观两类检测方法,涵盖裂缝表面观测、宽度追踪、表面完整性表征及愈合产物微观形貌、物相组成等检测技术,同时阐述耐久性性能恢复检测手段。基于检测数据构建包含宏观、微观、力学及耐久维度的评价指标体系,建立多维度耦合评价逻辑。研究通过多维数据支撑实现愈合效果全面评估,为自修复混凝土工程应用及材料优化提供可靠检测与评价依据。

关键词:自修复混凝土;裂缝愈合效果;试验检测;评价方法;评价指标体系

引言:混凝土裂缝易导致结构承载能力下降、耐久性劣化,自修复技术为裂缝治理提供有效途径,而愈合效果的科学检测与评价是技术应用的关键前提。现有检测方法存在维度单一、评价标准不统一等问题,难以全面反映愈合质量。因此需构建涵盖宏观形貌、微观结构、力学性能及耐久性能的综合检测体系,确立量化评价指标与耦合分析逻辑。

1 裂缝愈合效果宏观检测方法

1.1 裂缝表面形态观测指标与方法

裂缝表面形态观测是评估愈合效果的基础,聚焦裂缝几何特征与表面状态变化。观测指标含裂缝走向、边缘形态及表面粗糙度。裂缝走向通过高精度激光定位仪记录,区分直线型、曲线型或分支型裂缝,为分析愈合产物分布规律提供依据^[1]。边缘形态观测采用非接触式光学测量技术,利用结构光投影原理捕捉轮廓,量化边缘毛刺、凹凸等参数,反映产物填充均匀性。表面粗糙度检测结合三维激光扫描与图像处理技术,提取高程数据生成三维形貌图,计算起伏度与纹理参数,评估界面结合紧密程度。观测需在固定光照下进行,避免环境光干扰,多次测量取平均值降低误差。

1.2 裂缝宽度变化追踪技术

裂缝宽度动态变化是衡量愈合效果的核心指标之一,追踪技术需兼顾精度与实时性。基于图像处理的宽度测量方法通过高清工业相机定时采集裂缝图像,利用边缘检测算法提取裂缝边缘像素坐标,结合相机标定参数将像素距离转换为实际物理宽度。该方法适用于裂缝宽度较大且边缘清晰的场景,测量分辨率可达微米级。对于微细裂缝,采用激光散斑干涉技术,通过分析裂缝两侧表面散斑场相位变化反推宽度变化,可实现纳米级精度监测。为消除环境振动对测量结果的影响,需将试件固定于隔振台,并设置温度补偿模块校正热胀冷缩效

应。数据记录频率根据愈合周期设定,短期愈合试验可设置为每分钟一次,长期试验则调整为每日一次。

1.3 试件表面完整性表征手段

试件表面完整性表征旨在综合评估愈合后混凝土表面的连续性与功能恢复程度。表征手段包括表面渗水性测试、光泽度测量与色差分析。渗水性测试采用定量喷淋装置,以恒定水压向试件表面喷洒水流,记录单位时间内渗透水量,量化表面孔隙连通性变化。光泽度测量利用光泽度仪检测表面反射光强度,愈合产物填充密实区域光泽度显著提升,可间接反映表面致密程度。色差分析通过分光光度计采集表面光谱数据,计算愈合前后色度坐标变化量,评估愈合产物颜色与基体的匹配性,避免因色差过大影响工程外观质量。三项指标综合运用,可全面刻画试件表面从宏观形貌到功能特性的恢复状态。

2 裂缝愈合效果微观检测方法

2.1 愈合产物微观形貌观测技术

愈合产物形貌观测是揭示裂缝愈合机制的关键环节,需借助高分辨率显微技术捕捉产物晶体结构与生长特征。扫描电子显微镜(SEM)通过电子束扫描样品表面,生成二次电子信号成像,可清晰呈现产物颗粒尺寸、排列方式及界面结合状态^[2]。观测前需对样品进行镀金处理以增强导电性,避免电荷积累导致图像失真。对于纳米级产物,透射电子显微镜(TEM)提供更高分辨率,通过穿透电子束分析产物内部晶格条纹,确定晶体取向与缺陷类型。原子力显微镜(AFM)则利用探针与样品表面相互作用力绘制三维形貌图,量化产物表面粗糙度与颗粒堆积密度。观测过程中需结合能谱分析仪(EDS)同时获取元素分布信息,验证产物化学组成与形貌特征的关联性。

2.2 愈合产物物相组成分析方法

物相组成分析旨在确定愈合产物晶体结构与化学成分,常用X射线衍射仪(XRD)与拉曼光谱仪联用。XRD通过测量衍射角位置与强度,比对标准卡片库鉴定产物矿物相,可区分方解石、文石等碳酸钙晶体类型,并计算各相含量比例。拉曼光谱仪利用激光激发样品分子振动能级跃迁,获取特征光谱峰位与强度,进一步验证物相组成并分析结晶度差异。对于非晶态产物,傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)通过检测分子振动吸收峰,识别有机愈合剂(如聚合物)的化学键类型与官能团结构。分析过程需严格控制样品制备条件,避免外界污染干扰测试结果,同时结合热重分析仪(TGA)测定产物热稳定性。

2.3 裂缝界面微观结构表征手段

裂缝界面结构直接影响愈合产物与基体的粘结强度,需从原子尺度到微米尺度多层次表征。聚焦离子束(FIB)技术可精确切割界面区域制备透射电镜样品,结合高角环形暗场成像(HAADF)观察界面过渡层厚度与元素扩散深度。电子背散射衍射(EBSD)技术通过分析晶体取向分布图,量化界面区域晶粒取向差与再结晶程度,评估愈合产物与基体晶格匹配性。纳米压痕仪通过测量界面区域硬度与弹性模量分布,反映愈合产物与基体力学性能差异,间接表征界面结合质量。表征过程需控制样品制备应力,避免加工硬化影响测试结果,同时结合分子动力学模拟验证界面原子键合机制。

2.4 微观孔隙特征与连通性检测

孔隙特征与连通性决定愈合后混凝土渗透性与耐久性,需采用压汞法与核磁共振(NMR)技术联合检测。压汞法通过测量不同压力下汞侵入孔隙体积,生成孔径分布曲线,量化总孔隙率与有害孔($> 50\text{nm}$)比例。NMR技术利用氢原子弛豫时间差异区分孔隙类型,通过T2谱分析计算孔隙连通性指数,评估愈合产物对孔隙的封闭效果。同时进行三维X射线计算机断层扫描(CT),重构孔隙网络模型,直观呈现孔隙空间分布与连通路径,验证压汞法与NMR检测结果。检测过程需控制样品尺寸与干燥条件,避免水分残留影响压汞数据准确性,同时结合图像处理算法提取孔隙几何参数。

3 裂缝愈合后耐久性性能恢复检测

3.1 抗渗透性恢复检测方法

抗渗透性是衡量愈合后混凝土抵御水分与有害介质侵入能力的关键指标,检测需结合静水压力法与氯离子渗透深度法。静水压力法向愈合后试件一侧施加0.5兆帕恒定水压,持续24小时后剖开试件,测量另一侧渗水高度,计算渗透系数^[3]。若渗水高度较愈合前降低超70%,

表明愈合产物有效封闭裂缝通道。氯离子渗透深度法采用快速氯离子迁移系数试验(RCM),在试件两端施加60伏直流电压,加速氯离子迁移,24小时后喷洒硝酸银溶液显色,测量显色边界至试件表面的距离。愈合后氯离子渗透深度减少幅度越大,说明愈合产物对离子传输阻断效果越显著。两种方法同时进行,对比水与离子渗透规律差异,综合评估愈合后抗渗透性恢复程度。

3.2 抗冻融循环性能恢复测试

抗冻融性能恢复检测模拟实际环境中混凝土反复冻胀与融化过程,采用快冻法与慢冻法结合的方式。快冻法将愈合后试件浸泡于水中,在 -20°C 至 5°C 区间内每日完成一次冻融循环,每25次循环测定一次质量损失率与相对动弹性模量。当质量损失率超5%或相对动弹性模量降至60%以下时停止试验,记录循环次数作为抗冻等级。慢冻法则将试件置于饱和湿度环境中,在 -15°C 至 15°C 区间内每72小时完成一次冻融循环,通过观察试件表面剥落情况与内部损伤扩展评估抗冻性能。愈合后试件抗冻等级提升超2个等级,或冻融循环次数增加50%以上,表明愈合产物有效缓解冻胀应力对裂缝的扩展作用。

3.3 抗碳化性能恢复表征手段

抗碳化性能恢复检测通过加速碳化试验模拟混凝土长期暴露于二氧化碳环境中的劣化过程。将愈合后试件置于碳化箱内,维持二氧化碳浓度20%、湿度70%、温度 20°C 的恒定条件,每7天取样剖开,滴加酚酞酒精溶液显色,测量显色边界至试件表面的距离作为碳化深度。愈合后试件碳化深度较愈合前减少超40%,表明愈合产物降低孔隙连通性,延缓二氧化碳扩散速率。同时采用X射线衍射仪分析碳化区域产物组成,若检测到愈合产物与碳酸钙形成复合结晶相,说明愈合机制通过化学结合增强抗碳化能力。碳化深度测量需避开裂缝边缘区域,避免局部应力释放导致数据失真。

3.4 抗化学侵蚀性能恢复检测

抗化学侵蚀性能恢复检测针对不同介质设计针对性试验方案。硫酸盐侵蚀试验将愈合后试件浸泡于5%硫酸钠溶液中,每30天更换溶液并测定质量变化与抗压强度损失率,若质量增加率低于1%且强度损失率小于10%,表明愈合产物有效抑制了硫酸根离子与水泥水化产物的反应。盐酸侵蚀试验采用1%盐酸溶液,通过测量溶液pH值变化与试件表面剥落量评估抗酸性,愈合后试件表面无明显蚀坑且溶液pH值稳定,说明愈合产物具备化学稳定性。海水侵蚀试验模拟实际海洋环境,将试件浸泡于人工海水(含氯离子、镁离子等)中,每60天检测氯离子渗透深度与钢筋锈蚀电位,愈合后氯离子渗透深度减

少且锈蚀电位正移,表明愈合产物阻断了腐蚀介质传输路径。

4 裂缝愈合效果评价指标体系构建

4.1 宏观愈合效果量化指标

宏观愈合效果通过直接观测裂缝闭合程度与表面完整性进行量化。裂缝闭合率是核心指标,通过测量愈合前后裂缝宽度变化计算,闭合率超过80%表明宏观愈合效果显著。表面平整度采用激光轮廓仪扫描裂缝区域,生成三维形貌图,计算表面粗糙度参数Ra值,Ra值降低说明愈合产物填充均匀性提升^[4]。裂缝渗漏率检测通过向裂缝区域注水,观察单位时间内水分渗透量,渗漏率下降幅度反映愈合产物封闭裂缝的密实性。宏观指标需结合图像处理技术,对裂缝区域进行像素级分析,提取愈合面积占比与边缘连续性参数,为愈合效果分级提供量化依据。

4.2 微观愈合质量评价参数

微观愈合质量聚焦愈合产物晶体结构与界面结合状态。愈合产物结晶度通过X射线衍射峰强度比值计算,结晶度越高表明产物有序性越强,抗环境侵蚀能力越优。界面过渡区厚度采用背散射电子成像技术测量,厚度小于5微米且元素扩散均匀,说明愈合产物与基体形成良好化学键合。孔隙率通过压汞法测定,愈合后总孔隙率降低且有害孔(>50纳米)比例减少,反映愈合产物致密填充效果。微观参数需结合能谱分析,验证愈合产物元素组成与基体匹配性,避免因成分差异导致界面弱化。

4.3 力学性能恢复评价指标

力学性能恢复以抗压强度恢复率与抗折强度恢复率为核心。抗压强度恢复率通过对比愈合前后试件破坏荷载计算,恢复率超过90%表明承载能力基本恢复。抗折强度恢复率结合断裂面形貌分析,若断裂面出现愈合产物桥接现象,恢复率可提升至85%以上。断裂韧性提升幅度通过紧凑拉伸试验测定,愈合后应力强度因子KIC增加超过30%,说明裂缝扩展阻力显著增强。弹性模量恢复率采用应变片监测加载过程,恢复率接近100%表明材料刚度未因裂缝愈合产生劣化。

4.4 耐久性能恢复评价指标

耐久性能恢复涵盖抗渗透、抗冻融、抗碳化与抗化

学侵蚀能力。抗渗透性以氯离子渗透深度减少率与渗水高度降低率为指标,减少率超过40%表明愈合产物有效阻断介质传输。抗冻融性能通过冻融循环次数增加量评估,增加量超过50次说明愈合产物缓解了冻胀应力损伤。抗碳化性能以碳化深度减少率为依据,减少率超过40%反映愈合产物降低了孔隙连通性。抗化学侵蚀性能结合质量损失率与强度损失率综合评价,损失率降低幅度越大,说明愈合产物化学稳定性越优。

4.5 多维度指标耦合评价逻辑

多维度指标耦合评价需构建层次化分析模型。对宏观、微观、力学及耐久类指标开展归一化处理,以此消除量纲差异。引入熵权法测算各指标权重,规避主观赋值引发的偏差。基于加权求和方式计算综合愈合指数,指数数值越高,对应愈合效果越佳^[5]。耦合评价需纳入指标间相关性考量,微观结晶度与力学强度恢复率呈正相关关系,抗渗透性则与耐久性能恢复率联系密切。通过搭建指标间响应关系矩阵,可挖掘愈合机制的主导因素,为愈合材料设计优化提供理论支撑。

结束语

自修复混凝土裂缝愈合效果检测与评价方法不断完善,从宏观到微观、从单一性能到综合性能的评估体系逐步建立。这些方法为深入了解自修复机制、优化愈合材料设计提供了有力手段。持续探索更精准、全面的检测评价方法,将进一步推动自修复混凝土在工程中的广泛应用,提升建筑工程质量与安全性。

参考文献

- [1]郑则文.建筑施工中混凝土裂缝自愈合机理及智能修复材料的研发与应用[J].石材,2025(11):185-187.
- [2]易玥彤,左彦峰,韩小华,等.混凝土裂缝自修复外加剂自愈合能力评价技术研究[J].中国建材科技,2025,34(4):54-60.
- [3]李志坚.混凝土自愈合材料在裂缝控制中的应用研究[J].陶瓷,2025(11):159-161.
- [4]沈富国.聚合物防水涂料对水泥混凝土裂缝自修复性能的影响[J].中国水泥,2025(11):100-102.
- [5]曹妍,王芮文,赵蔚蔚,等.隧道二次衬砌混凝土仿生自愈合技术应用研究[J].现代隧道技术,2022,59(6):250-257.