

混凝土裂缝自愈合的研究现状与发展

鹿丙全¹ 王小艳² 刘冬³ 刘肖²

1. 徐州市贾汪区水务保障中心 江苏 徐州 221000

2. 徐州市水利工程运行管理中心 江苏 徐州 221000

3. 沛县水利局沛城镇水利管理服务站 江苏 徐州 221000

摘要: 混凝土是现代建筑广泛使用的材料,其裂缝问题影响结构耐久性和安全。混凝土裂缝自愈合技术是解决这一问题的新兴方法,具有潜在优势。本文详细阐述了自愈合的机理、目前常用的自愈合方法及其效果评估,并对未来的研究方向和应用前景进行了展望,旨在为混凝土裂缝自愈合技术的进一步研究和工程实践提供全面而系统的参考。

关键词: 混凝土裂缝;自愈合;机理;发展趋势

引言

当前工程建设由于多种原因,混凝土结构中常见裂缝,这些裂缝不仅影响外观,还可能降低结构承载力和耐久性,导致有害物质侵入,引发钢筋锈蚀等问题,威胁结构安全。传统裂缝修复方法虽能解决裂缝问题,但操作复杂、成本高、耐久性有限,且难以有效修复微小裂缝。混凝土裂缝自愈合技术通过引入自愈合机制,使其能够在裂缝产生后自动进行修复,恢复结构的完整性和性能,提供了一种全新的裂缝修复思路和方法,具有重要的研究价值和广阔的应用前景。

1 混凝土裂缝自愈合机理

1.1 基于化学反应的自愈合机理

(1) 水泥基材料的继续水化。在混凝土裂缝形成后,未水化的水泥颗粒以及水泥水化产物(如氢氧化钙等)暴露在空气中或与裂缝中的水分接触,在一定条件下会继续发生水化反应。这种基于水泥基材料自身特性的继续水化反应是一种较为常见的自愈合机理,尤其在早期混凝土裂缝自愈合中发挥着重要作用。^[1]其反应速度和愈合效果受到混凝土内部湿度、温度以及水泥品种和剩余未水化水泥含量等因素的影响。(2) 膨胀性产物的生成。添加具有膨胀性的材料,如膨胀水泥或膨胀剂。当混凝土出现裂缝后,水分进入裂缝与这些膨胀性材料接触,引发化学反应产生膨胀性产物,如钙矾石等。钙矾石的生成会产生膨胀压力,促使裂缝两侧的混凝土相互挤压靠近,同时填充裂缝空间,实现裂缝的自愈合。然而,这种自愈合机理需要精确控制膨胀性产物的生成量和反应速度,否则可能会因过度膨胀导致混凝土结构产生内部应力,反而影响结构性能。

1.2 基于材料特性的自愈合机理

(1) 矿物掺合料。粉煤灰、矿渣粉等不仅能够改善混凝土的工作性能和耐久性,当混凝土裂缝出现后,以上这些矿物掺合料中的活性成分(如硅铝酸盐等)会在碱性环境和水分的作用下发生火山灰反应。该反应生成的水化产物能够填充裂缝,促进裂缝愈合。此外,矿物掺合料还可以改善混凝土内部的微观结构,提高混凝土的密实度,从而减少裂缝的产生和发展。例如,粉煤灰的微珠结构能够填充混凝土中的孔隙,增强混凝土的抗裂性能,并且在裂缝出现后,其活性成分有助于裂缝的自愈合过程。(2) 纤维增强材料。混凝土中的碳纤维、玻璃纤维等能在混凝土裂缝自愈合过程中起到辅助作用。一方面形成桥接作用,限制裂缝的进一步扩展,为自愈合反应提供相对稳定的环境。另一方面,纤维表面的特殊处理或其本身的化学性质可以促进混凝土中其他自愈合物质的反应。例如,碳纤维具有良好的导电性和化学稳定性,在混凝土中可以作为导电通道,促进电化学自愈合反应的进行;玻璃纤维表面经过特殊处理后,可以吸附和催化一些自愈合反应的物质,提高自愈合效率。

1.3 微生物诱导的自愈合机理

微生物诱导的混凝土裂缝自愈合是近年来研究的热点领域之一。其原理是在混凝土中掺入特定的微生物菌剂以及其生长所需的营养物质。当混凝土出现裂缝后,水分和氧气进入裂缝,为微生物提供了适宜的生长环境。微生物在裂缝中代谢活动产生碳酸钙等沉淀物质,填充裂缝空间,实现裂缝愈合。例如,一些芽孢杆菌能够在碱性环境下将尿素分解为铵根离子和碳酸根离子,碳酸根离子与混凝土中的钙离子结合生成碳酸钙沉淀。这种自愈合机理具有环境友好、自愈合效果较好等优点,但微生物的存活和生长条件较为苛刻,需要精确控

制混凝土内部的环境参数（如温度、湿度、pH值等）以及营养物质的含量和释放速度，以确保微生物能够在裂缝产生后及时发挥作用。

2 混凝土裂缝自愈合方法

混凝土裂缝自愈合方法是指通过特定的技术手段，利用科学的方法和材料，使得混凝土在出现裂缝之后能够自行进行修复，从而达到延长其使用寿命和提高结构安全性的一种创新方法。这种技术通常涉及在混凝土中加入特殊的自愈合材料，或者采用生物技术等手段，当混凝土出现微小裂缝时，这些材料或技术能够响应裂缝的产生，通过化学反应或物理作用，促使裂缝闭合，恢复混凝土的完整性和承载能力。

2.1 内置愈合剂法

内置愈合剂法是利用愈合剂在裂缝中流动、填充，并通过化学反应固化，从而修复裂缝，主要通过胶囊型愈合剂以及纤维管型愈合剂的内置实现。前者是将具有修复功能的化学物质（如环氧树脂、聚氨酯等）封装在微小的胶囊中，在混凝土搅拌过程中将胶囊均匀分散在混凝土中。当混凝土出现裂缝并扩展到胶囊所在位置时，胶囊破裂，释放出内部的愈合剂。例如，以脲醛树脂为外壳、环氧树脂为芯材的胶囊型愈合剂，在混凝土裂缝产生后，脲醛树脂外壳在裂缝应力作用下破裂，环氧树脂流出并在裂缝中固化，恢复混凝土的整体性。胶囊的尺寸、强度、壁材的渗透性以及愈合剂的种类和性能等因素都会影响这种自愈合方法的效果。^[2]一般来说，胶囊尺寸越小，越容易在混凝土中均匀分散，但破裂难度可能会增加；而愈合剂的固化速度、与混凝土的粘结性等则直接关系到裂缝修复的质量和速度。后者纤维管型愈合剂是将愈合剂填充在中空纤维管内，然后将纤维管掺入混凝土中。当混凝土裂缝与纤维管相交时，纤维管破裂或其端口暴露，愈合剂流出并在裂缝中发生愈合反应。与胶囊型愈合剂相比，纤维管型愈合剂具有更大的储存容量和更好的定向性。然而，纤维管在混凝土中的分散性以及与混凝土的相容性需要进一步优化，否则可能会影响混凝土的力学性能和自愈合效果。

2.2 表面涂覆自愈合材料法

表面涂覆自愈合材料法是在混凝土结构表面涂覆一层具有自愈合功能的涂层。这种涂层通常由聚合物材料（如丙烯酸酯类聚合物、有机硅聚合物等）、功能添加剂（如催化剂、交联剂等）以及可能的纳米材料（如纳米二氧化硅、纳米碳酸钙等）组成。涂层在混凝土表面形成一层保护膜，当混凝土表面出现裂缝时，涂层中的自愈合成分能够在光照、温度变化或水分作用下发生

化学反应，修复裂缝。例如，一些光固化的自愈涂层，在混凝土表面裂缝暴露在阳光下时，涂层中的光引发剂引发聚合反应，使裂缝处的涂层材料重新聚合，封闭裂缝。自愈涂层的厚度、柔韧性、耐候性以及自愈合效率等性能指标是衡量其优劣的关键因素。涂层过厚可能会导致涂层与混凝土之间的粘结力下降，容易剥落；而柔韧性不足则可能在混凝土变形时产生开裂；耐候性差则会影响涂层在不同环境条件下的自愈合效果。自愈合材料的涂覆工艺包括喷涂、刷涂、辊涂等。不同的涂覆工艺对涂层的均匀性、厚度控制以及与混凝土表面的粘结效果有不同的影响。例如，喷涂工艺能够快速大面积地施工，但可能会导致涂层厚度不均匀；刷涂工艺虽然能够较好地控制涂层厚度，但施工效率较低。在实际应用中，表面涂覆自愈合材料法对于混凝土表面的微小裂缝具有较好的修复效果，能够有效防止水分、氯离子等有害物质的侵入，提高混凝土结构的耐久性。但对于混凝土内部深处的裂缝或较大尺寸的裂缝，其修复能力有限，需要与其他自愈合方法相结合使用。

2.3 电化学自愈合方法

电化学自愈合方法是利用电化学原理在混凝土裂缝中沉积修复物质。在混凝土中埋置金属电极（如锌电极、镁电极等），当混凝土出现裂缝并与电解质溶液（如混凝土孔隙中的碱性溶液）形成回路时，在电场作用下，金属电极发生氧化反应，释放出金属离子。这些金属离子在裂缝中迁移并与溶液中的氢氧根离子或其他阴离子结合，形成金属氢氧化物或其他沉淀物质，填充裂缝。电化学自愈合方法的效果取决于电极材料的选择、电流密度的控制、混凝土内部的电导率以及裂缝的宽度和深度等因素。合适的电极材料能够提供足够的金属离子，电流密度过大可能会导致电极过快消耗或混凝土内部结构破坏，过小则可能使自愈合反应过慢；混凝土内部电导率影响电流的分布和金属离子的迁移速度；裂缝宽度和深度决定了自愈合物质的沉积量和沉积位置。但值得注意的是，当前，电化学自愈合方法在应用过程中仍存在一些限制。首先，它依赖外部电源，增加了成本和操作复杂性。其次，电化学过程可能引起钢筋腐蚀，需采取保护措施，如使用隔离层或防腐处理。此外，对于非导电裂缝或杂质多的情况，自愈合效果会降低。但尽管如此，电化学自愈合方法对于一些特殊环境下（如海洋环境中存在大量电解质的情况）的混凝土结构裂缝修复仍具有一定的研究价值和应用潜力。

3 混凝土裂缝自愈合效果评估

自愈合效果的评估可以帮助了解裂缝在一定条件下

能否自行修复,以及修复的程度和速度,这对于混凝土结构的长期安全和维护具有重要意义。^[3]评估混凝土裂缝自愈合效果的方法多种多样,包括但不限于现场监测、实验室测试和数值模拟等。每种方法都有其优势和局限性,在实际应用中,需要结合多种方法来进行综合评估。

3.1 裂缝愈合程度的直接观测

采用光学显微镜和电子显微镜可以直接观察混凝土裂缝在自愈合前后的微观结构变化。通过制备混凝土裂缝截面的薄片试样,在显微镜下可以清晰地看到裂缝的宽度、深度以及裂缝中自愈合产物的形态、分布等信息。这种直接观测方法能够提供关于裂缝自愈合最直观的信息,但它只能观察到试样局部区域的情况,对于整个混凝土结构中的裂缝愈合情况难以全面评估,并且需要对混凝土试样进行破坏取样,不适用于在役混凝土结构的检测。超声检测技术是通过测量超声波在混凝土中的传播速度、衰减等参数来评估裂缝的愈合程度。当混凝土存在裂缝时,超声波在裂缝处会发生反射、折射和散射,导致传播速度降低、衰减增大。在裂缝自愈合过程中,随着裂缝逐渐被填充修复,超声波的传播特性会逐渐恢复正常。通过对比自愈合前后超声波的检测结果,可以定量地评估裂缝愈合的程度。超声检测技术具有非破坏性、检测速度快、能够大面积检测等优点,但它对裂缝的取向、形状以及混凝土内部的不均匀性较为敏感,可能会影响检测结果的准确性。

3.2 力学性能恢复评估

混凝土裂缝自愈合后,其力学性能的恢复程度是衡量自愈合效果的重要指标之一。通过对自愈合后的混凝土试件进行抗压强度和抗拉强度测试,并与未开裂的混凝土试件以及开裂但未自愈合的试件进行对比,可以评估自愈合对混凝土力学性能的影响。一般来说,裂缝自愈合后,混凝土的抗压强度会有一定程度的恢复,但很难恢复到未开裂时的水平,抗拉强度的恢复则相对更困难,此外,弹性模量反映了混凝土抵抗变形的能力。在混凝土裂缝自愈合效果评估中,弹性模量测试同样重要。自愈合后混凝土弹性模量的恢复情况取决于裂缝愈合的质量、自愈合产物与混凝土基体的粘结性以及混凝土内部微观结构的恢复程度等因素。采用动态弹性模量测试仪或静态弹性模量测试方法(如轴心抗压试验),测量自愈合后混凝土的弹性模量,并与未开裂混凝土进行对比。

3.3 耐久性相关性能评估

混凝土裂缝的存在会大大增加其渗透性,而自愈合后裂缝的封闭情况可以通过渗透性测试来评估。常用的渗透性测试方法包括水渗透试验、气体渗透试验等。例如,水渗透试验可以采用稳态渗透法或非稳态渗透法,测量自愈合前后混凝土试件的渗透系数。根据达西定律计算渗透系数的变化率,以评估裂缝自愈合对混凝土抗渗性的影响。^[4]自愈合后混凝土渗透系数越小,说明裂缝愈合效果越好,混凝土的抗渗性得到有效恢复,能够更好地阻止水分、氯离子等有害物质的侵入,提高混凝土结构的耐久性。同时对于处于海洋环境或使用除冰盐环境中的混凝土结构,抗氯离子侵蚀能力尤为重要。通过测试自愈合后混凝土中氯离子的扩散系数或氯离子含量,可以评估其抗氯离子侵蚀的能力。例如,采用氯离子扩散试验(如快速氯离子迁移试验RCM法),测量自愈合前后混凝土试件中氯离子的扩散系数。自愈合后混凝土氯离子扩散系数降低,表明自愈合能够有效减少氯离子在混凝土中的扩散路径,增强混凝土的抗氯离子侵蚀能力,从而延长混凝土结构在恶劣环境下的使用寿命。

结语

混凝土裂缝自愈合技术随着研究和技术进步,在工程领域展现出广阔应用前景。通过在新建混凝土结构中应用自愈合技术,可以提升结构耐久性和可靠性,降低维护成本。例如,在桥梁、高层建筑和大坝等基础设施中,自愈合混凝土能预防裂缝,延长使用寿命,确保安全。此外,自愈合技术在既有结构修复中也显示出优势,能自动修复新裂缝,提升结构性能和耐久性,为结构改造提供新方法。总体而言,这项技术有望成为混凝土工程的关键技术,推动建筑行业向绿色、智能、可持续发展。

参考文献

- [1]刘玲.混凝土裂缝自愈合技术机理及表征评价体系研究[J].施工技术(中英文),2023,52(16):69-77.
- [2]郑乔木,何倍,李晨,等.超高性能混凝土裂缝自愈合研究进展[J].硅酸盐学报,2021,49(11):2450-2461.
- [3]李梦苑,谢雷.量化混凝土裂缝自愈合性的方法[J].四川水泥,2020,(08):37-38.
- [4]武少赞.混凝土裂缝自愈合机理研究[D].导师:王立成.大连理工大学,2019.