

镁质膨胀剂在混凝土裂缝自愈合中的研究进展

刘 野 丁子奇

扬州大学建筑科学与工程学院绿色建筑材料研究所 江苏 扬州 225127

【摘 要】：混凝土裂缝自愈合技术作为智能混凝土体系重要组成部分，近些年发展正方兴未艾。氧化镁作为一种新型膨胀剂，可以利用其延迟微膨胀特性促进裂缝的自愈合，已受到越来越多国内外学者的关注。本文综述了国内外近年来基于氧化镁膨胀剂在混凝土裂缝自愈合中的研究成果和相关进展，并在此基础上探讨目前所研究的不足及发展前景，为氧化镁膨胀剂在混凝土裂缝自愈合方面的应用提供理论支撑。

【关键词】：自愈合；智能混凝土；氧化镁膨胀剂；延迟微膨胀

上个世纪八十年代，在我国东北地区的某些大坝中发现利用氧化镁延迟微膨胀的特性可以改善混凝土的开裂问题，后来经过许多学者的理论研究和实际应用，氧化镁逐渐作为混凝土膨胀剂用于补偿大体积混凝土温降收缩和自收缩，避免裂缝的产生。近几年，国外学者研究发现，氧化镁膨胀剂在混凝土裂缝自愈合方面有着巨大潜力^[1-2]。氧化镁膨胀剂的自愈合机理主要包括两部分：①氧化镁的水化产物氢氧化镁，体积增大，限制裂缝的开展；②二氧化碳和水分通过裂缝进入混凝土内部，进一步与氧化镁及其水化产物发生反应，生成稳定的碳酸镁沉淀填充在裂缝两侧，达到修复的目的^[3]。

本文综述了国内外近年来基于氧化镁膨胀剂在混凝土裂缝自愈合中的研究成果和相关进展，并在此基础上探讨目前所研究的不足及发展前景，为氧化镁膨胀剂在混凝土裂缝自愈合方面的应用提供理论支撑。

1 镁质膨胀剂的活性及掺量对混凝土裂缝自愈合的影响

近几年来，关于氧化镁膨胀剂在混凝土裂缝自愈合方面的影响，国外学者研究的较多，而国内研究相对很少。一些学者首先考虑的是将氧化镁膨胀剂按照不同活性、不同掺量直接添加到混凝土中，研究对裂缝自愈合的影响。Qureshi等^[4]利用氧化镁膨胀剂(MEA)的膨胀特性，在混凝土中添加N50、92-200两种型号的MEA，研究对裂缝自愈合的影响。通过浇筑后28天的自然干燥收缩，在带有约束端棱柱的样品中预制裂缝。然后将试件放置在水中修复28天和56天，并从力学性能恢复、裂缝密封效率和耐久性改善方面研究自愈能力。最后，利用X射线衍射分析(XRD)和扫描电镜(SEM)观察愈合产物的微观结构。试验结果表明：与92-200试件组相比，N50试件组表现出更好的愈合效果；含氧化镁试件的自愈效果均比对照组要好，经过28天修复后，可愈合高达500 μ m宽的裂缝。对愈合产物进一步分析，可发现有、方解石、水镁石、钙矾石、水化硅酸钙等物质生成。Sherir等^[5]

采用不同的测试方案，通过研究预加载试件的多种损伤（裂缝）的强度和超声波脉冲速度（UPV）的恢复和发展，来量化所提出的含有氧化镁膨胀剂的应变硬化水泥基复合材料（SHCC）的自愈能力。试验结果表明：预加载产生裂缝的SHCC-MgO试样通过修复微裂缝具有很高的恢复原始（未开裂）试样力学性能的能力。山东农业大学冯竟竟^[6]将不同活性（M型、R型），不同掺量（5%、10%）的氧化镁膨胀剂掺入混凝土中，研究它们对混凝土早期裂缝自愈合性能的影响，并从混凝土的限制膨胀率、裂缝形态、裂缝宽度变化及抗压强度恢复率评价最终的愈合效果。结果表明：混凝土的限制膨胀率随着氧化镁膨胀剂的活性和掺量的增大而进一步增大，在相同龄期条件下，相同初始宽度的混凝土裂缝自愈合效果越好；早期裂缝宽度的大小将直接影响最终的愈合效果，在氧化镁膨胀剂的活性和掺量相同时，当初始宽度小于0.4mm时，展现出较好的愈合效果，而当初始宽度超过0.4mm时，裂缝最终的愈合效果相对较差。青岛理工大学戴雨晴将预裂后掺有氧化镁膨胀剂的应变硬化水泥基复合材料（SHCC）分别放入干燥环境、水雾环境、清水环境，饱和氢氧化钙溶液中修复，从裂缝宽度变化以及毛细吸水量的变化两个方面探究不同的修复环境对掺有氧化镁膨胀剂的SHCC裂缝自愈合的影响。试验结果表明：水分是裂缝能够发生自愈合的必要条件，干燥环境中由于缺少充足的水分，即使SHCC中含有氧化镁膨胀剂，其裂缝最终也达不到百分百愈合；与空白对照组相比，饱和氢氧化钙溶液修复环境下掺有氧化镁膨胀剂的SHCC裂缝愈合效果最差。Liu等为了能够改善不同活性的氧化镁膨胀剂的膨胀特性，将混掺后的氧化镁膨胀剂添加到水泥浆体中。结果发现：混掺后的水泥浆体的膨胀可从早龄期持续到晚龄期，因此，氧化镁膨胀剂的膨胀特性可通过混掺不同活性的氧化镁得到调节。Zhang等将不同活性，不同含量的氧化镁膨胀剂掺入SHCCS中，通过四点弯曲试验诱导裂缝，然后将其暴露在水雾环境下进行修复，研究不同活性，不同掺量的氧化镁膨胀剂对SHCCS裂缝自愈合的影响。结果表明：三种不同活性的氧化镁膨胀剂均

能提高 SHCCS 裂缝的愈合效率；然而，当活性相同时，掺有 5% 氧化镁膨胀剂的试件表现出最好的愈合效果。

2 镁质膨胀剂与其它矿物材料对混凝土裂缝自愈合的影响

为了能够充分利用矿物掺合料与水泥基材料反应特性，更好的修复裂缝，有些学者考虑将粉煤灰、膨润土等材料与氧化镁膨胀剂混合后掺入混凝土中，研究对裂缝自愈合的影响。Qureshi 等将氧化镁和膨润土添加到混凝土中，研究它们对混凝土裂缝自愈合的影响。试验结果表明：当氧化镁掺量为 5% 时，裂缝会随着修复时间的增加表现出更好的愈合趋势；而当掺量增加到 10% 时，裂缝的自愈合效果降低。除此之外，裂缝的初始宽度也是影响愈合效果的重要因素，当裂缝宽度小至 0.15mm 时，愈合速度将变快。Mohamed 等将氧化镁膨胀剂 (MEA) 和粉煤灰掺入工程水泥基复合材料 (ECCS) 中，并对试样进行加速高压釜、SEM、水固化线性膨胀等试验，研究它们对 ECCS 裂缝自愈合的影响。试验结果表明：使用 MEA 制备氧化镁-ECCS 表现出很强的自愈合效果，这归因于 MEA 在后期生成具有黏性胶凝为特征的硅酸镁水合物

(M-S-H) 可以补充早期形成的水化硅酸钙 (C-S-H) 产物，从而使微观结构更致密；5% 氧化镁膨胀剂与 F 级粉煤灰替代 55% 水泥结合使用，是生产氧化镁-ECCS 自愈系统的最佳配比。Zhang 等研究在干湿循环环境下，基于活性氧化镁和粉煤灰两种混合物的工程水泥基复合材料 (ECC) 的自愈合性。结果表明：通过光学显微镜观察，含有氧化镁膨胀剂的 ECC 中的裂缝可在 7 个周期内完全愈合，其共振频率的恢复率超过 90%，但是抗拉强度没有完全恢复；通过 SEM、XRD 等微观测试手段，确定愈合产物为碳酸镁石微晶。

3 载体包裹镁质膨胀剂对混凝土裂缝自愈合的影响

氧化镁膨胀剂的直接加入将会产生以下问题：①使新拌混凝土的和易性降低，②与胶凝材料过早反应，导致裂缝自愈合效率降低。因此，一些学者考虑将氧化镁封装到某种载体材料中（如 PVA），研究它们对裂缝自愈合的影响。Jasser 等将矿物掺合料氧化镁和硅灰混合后作为自愈剂，然后用水泥浆作为覆膜材料将其包裹，研究它们对于砂浆裂缝自愈合的影响。结果表明：添加 10% 试样的抗压强度可在修复时间为 7 天、14 天、28 天、56 天得到恢复，而添加 5% 试样的抗压强度在 28 天和 56 天分别恢复约 60% 和 51%。Qureshi 等将氧化镁、膨润土和生石灰按照不同的比例封装在玻璃管胶囊内，然后将封装后的玻璃管胶囊掺入砂浆中，分别设置三种不同的修复环境：水养、湿度环境、自然环境，研究它们对砂浆裂缝自愈合的影响。试验结果表明：试验组 SHC-D（5% 氧化镁，5% CaO，2.5% 膨润土）的愈合效果最好，其次是试验组 MD（只含氧化镁），对照组的愈合效果最差；而对于

不同的修复环境，其愈合效果由高到低分别为：水养 > 湿度环境 > 自然环境。Alghamri 等将商用重烧氧化镁颗粒包裹到 PVA 材料的薄膜涂层中，然后制成球团掺入水泥基材料中，研究以重烧氧化镁颗粒为自愈剂的球团对水泥基材料裂缝自愈合的影响。试验结果表明：在修复 30 天和 120 天时，包裹氧化镁颗粒球团的试样的强度分别得到了 14.6% 和 18.5% 的强度恢复；相比之下，对照组和未掺有包裹氧化镁颗粒球团的试样强度恢复率最多不超过 9%；此外，微观分析表明，与原始样品和未涂覆颗粒试样裂缝部分愈合相比，包含涂覆氧化镁颗粒的混凝土样品的裂缝完全愈合。随后几年，Alghamri 等又将聚乙烯醇 (PVA) 包裹氧化镁、硅灰和膨润土三种不同的自愈剂制成颗粒，将颗粒掺入砂浆中，研究它们对于砂浆裂缝的自愈以及愈合后性能的影响。试验结果表明：通过显微镜观察和超声波裂缝深度测量，发现可愈合 300 宽的裂缝，气体渗透性和水渗透性方面试验组均好于对照组；此外，含有颗粒的样品在水下对开裂试样进行两轮修复后，其抗弯强度有着很大的恢复。

4 结语与展望

本文总结了国内外氧化镁膨胀剂在混凝土裂缝自愈合中的研究进展，分析了影响裂缝最终愈合效果的因素，介绍了几种表征愈合效果的方法，阐述了相应的愈合机理，得到以下结论：

(1) 裂缝最终的愈合效果与氧化镁膨胀剂的活性及种类、初始裂缝宽度、修复环境、修复龄期等因素密切相关。选用活性越高，掺量越多的氧化镁膨胀剂，其膨胀越大，对混凝土早期裂缝的愈合效果越好，但对后期改善效果不太明显；裂缝的初始宽度越小，其愈合效果越明显，但当裂缝宽度大于一定数值时 (例如 0.4mm)，其愈合效果将显著降低；修复环境中水的存在是裂缝愈合的必要条件；随着修复龄期的增长，裂缝愈合效果将会越来越好。

(2) 目前常用的混凝土裂缝自愈合评价方法主要包括宏观性能评价（如裂缝表面宽度、力学性能恢复、水渗透性等）和微观分析（利用扫描电镜、X 射线衍射分析、能谱分析等微观测试手段分别从愈合产物的组成、形貌、分布来评价愈合效果），对于应用领域和部位的不同应根据具体情况来选择合适的评价值。

(3) 在实际应用时，氧化镁膨胀剂可以结合其它的一些矿物掺合料例如矿渣、粉煤灰、膨润土等，利用它们与水泥基材料的火山灰反应生成水化硅酸钙 (C-S-H)、水化铝酸钙等物质，更好地促进裂缝愈合。

氧化镁膨胀剂作为一种新型膨胀剂，与硫铝酸钙类等传统膨胀剂相比，由于具有水化需水量少、产物较稳定等优点，

已被广泛用于大坝混凝土补偿收缩裂缝,目前对于裂缝自愈合方面的研究大多仍处于实验室阶段。由于传统的工民建混凝土与大坝混凝土在规模、水化热速率等方面有很大的不同,因此氧化镁膨胀剂无论是在补偿收缩裂缝还是自愈合方面都不适用于工民建结构。其次,水泥中若含有过高的氧化镁时,极易造成结构体积安定性不良,因此在进行氧化镁膨

胀剂相关研究时,需要重点考虑其掺量问题。采用氧化镁膨胀剂自修复不仅意味着我国在混凝土自修复领域中的研究取得了新突破,而且还促进了生物、物理、化学等不同学科的交叉研究,尤其是对海工、水工、地下、隧道等混凝土工程具有重大的意义。

参考文献:

- [1] Du C J. A Review of Magnesium Oxide in Concrete[J]. Concrete International, 2005, 27(12): 45-50.
- [2] Mo L W, Deng M, Tang M S, et al. MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 57: 1-12.
- [3] 张鹏, 冯竟竟, 陈伟, 等. 混凝土损伤自修复技术的研究与进展[J]. 材料导报, 2018, 32(19): 3375-3386.
- [4] Qureshi T S, A-T A. Self-healing of drying shrinkage cracks in cement based materials incorporating reactive MgO[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(8): 084004.
- [5] Sherir M A A, Hossain K M A, Lachemi M. Development and recovery of mechanical properties of self-healing cementitious composites with MgO expansive agent[J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 789-810.
- [6] 冯竟竟, 张鹏, 陈伟, 等. 氧化镁膨胀剂对混凝土早期裂缝自愈合性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(04): 656-662.

作者简介: 刘野(1996年—), 男, 汉族, 江苏省徐州市, 在读研究生, 扬州大学, 研究方向: 土木工程材料。