

微生物自修复混凝土裂缝技术研究与应用国内外研究现状调研

材料所 刘艳霞，纪国晋，刘晨霞，田军涛

混凝土材料具有较高抗压强度、良好的耐久性及较低的成本，广泛应用于现代土木工程建设中。然而，混凝土结构的开裂一直是困扰学术界和工程界的难题，它不仅影响建筑的外观，造成混凝土承载能力和耐久性能的降低，甚至会危及结构的安全。针对这一问题，国内外提出了大量的裂缝修复技术，并且得到了广泛的应用，但仍存在着一些不足。

微生物矿化成岩在自然界中是一种普遍存在的现象，受到生物成岩现象的启发，荷兰代尔夫特理工大学的 Hendrik Jonkers 于 2007 年提出了利用诱导碳酸钙在混凝土裂缝内部沉淀和堆积进而修复混凝土裂缝的假想。该技术是一项微生物学、地球化学、材料化学等多学科交叉技术，由于其具有修复效果好、绿色环保等优点，故逐步成为这一领域的研究热点。目前，国内针对微生物自修复技术的研究主要在岩土领域和工业与民用建筑物领域，但至今尚未见该技术在水工领域的研究和应用。水工建筑物与工民建在使用环境、结构形式、裂缝控制等方面均存在较大差异，那么微生物自修复裂缝修补技术在水工混凝土中是否适用？该技术如何能更好的开发和应用于水工建筑物？

针对上述问题，本项目提出如下调研内容：1) 微生物矿化机理和微生物修复材料的制备技术；2) 微生物修复材料与混凝土的交互作用；3) 微生物修复混凝土的力学和耐久性等性能及修复效果；4) 微生物自修复混凝土的制备技术和性能特点；5) 微生物修复混凝土裂缝技术在国内外的应用情况，等。

经调研，得出如下结论：

(1) 微生物修复水泥基材料表面缺陷和裂缝是基于微生物诱导矿化沉积机理的一项技术。其中，微生物诱导矿化的被动修复技术主要是基于厌氧微生物的矿化沉积机理，需要采用菌液浸泡法或喷涂工艺等方法加速矿化过程以达到修复防护的目的。但该工艺无法满足原位修复要求，且修复周期过长，脲酶菌水解尿素产生的氨气 (NH_3) 影响大气环境，因此限制了其应用，尤其是在城市和地下工程中的应用。微生物诱导矿化的自修复技术主要是基于好氧微生物的矿化沉积机理，是一种多功能化、智能化且生态环保的技术。已有的研究表明该技术可以

有效修复混凝土裂缝，经修复后混凝土的抗压强度和抗渗性能都得到提高。

(2) 微生物修复材料对水泥基材料、水泥基材料对微生物之间有交互作用关系；混凝土的高碱性环境、水泥水化过程中微生物的存活空间不断减少等因素对微生物的生存和矿化修复是严峻的考验。通过采用多孔材料载体和微胶囊包覆能够一定程度上提高细菌在混凝土内部的存活率。目前报道中，微生物自修复技术可修复混凝土裂缝的最大宽度一般不超过 1cm，一旦裂缝过大，单纯微生物修复的效果难以令人满意。

(3) 微生物自修复混凝土裂缝技术不适用有水流冲刷的部位、不适用于突发事故引起的裂缝的紧急修复、不适用于水工混凝土建筑物的后期裂缝自修复。该技术可以应用于不受水流影响、处于潮湿环境的水工混凝土结构。

在充分调研和分析的基础上，提出如下建议：

(1) 微生物裂缝自修复技术还处于初步阶段，有许多问题亟待进一步研究，比如微生物修复的时效问题、修复后材料的长期修复效果和耐久性、载体与微生物的相容性及微生物、培养基和缓冲液品种优选和掺量优化等均有待进一步研究。

(2) 鉴于目前微生物自修复混凝土裂缝技术在菌种选择、预埋芽孢的有效激活及快速萌发为营养体、固载工艺、裂缝修复宽度、经济成本等方面都存在一定的局限性，真正将混凝土的微生物自修复技术工业化还需要很长时间，有一系列问题亟待解决，因此建议继续跟踪该方向的基础和应用研究，但目前不建议开展此技术的相关研究。

(3) 鉴于微生物自修复混凝土技术可修复裂缝最大宽度较小的问题，为保证修复效果，可以考虑将微生物裂缝自修复技术与其它自愈合技术相结合，从而实现各种裂缝修复机制的强强结合。

(4) 利用微生物实现对混凝土裂缝自修复是一项环境友好型新技术。目前研究还处于起步阶段，但随着研究深入，该技术的应用前景将会十分广阔。建议今后在技术成熟时通过环境模拟和现场试验，开展该技术在水工混凝土结构方面的应用和研究。目前可以尝试微生物矿化技术在土壤和砂土加固、岩土加固等领域的应用。