

自愈混凝土损伤修复机理的研究进展

李凯¹, 王玉洁¹, 徐涛², 刘晓凤², 徐沛保^{1, 2}

(1. 安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽四建控股集团有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘要: 自愈混凝土是一种能够主动修复混凝土损伤的智能建筑材料, 其损伤修复机理研究正处于蓬勃发展的阶段, 同时也面临着极大的挑战。本文围绕自愈混凝土损伤修复机理依次从物理、化学和生物三个方面分类概述了自愈混凝土的研究进展: 首先阐释混凝土损伤自愈的机理和分析国内外最新研究现状; 其次论述材料成分和环境等因素对混凝土损伤自愈的影响; 再次介绍自愈混凝土的专利应用情况; 最后总结了目前各类自愈技术存在的问题并探讨了混凝土自愈技术的发展方向。

关键词: 自愈混凝土; 损伤; 修复方法; 专利; 进展

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)02-014-07

Research Progress on the Damage Repair Mechanism of Self-healing Concrete

LI Kai¹, WANG Yujie¹, XU Tao², LIU Xiaofeng², XU Peibao^{1, 2}

(1. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2. Anhui Sijian Holding Group Co.LTD., Hefei 230001, China)

Abstract: Self-healing concrete is an intelligent building material that can actively repair concrete damage, and its damage repair mechanism research is in a flourishing stage, while facing great challenges. Summarized from three aspects of physics, chemistry and biology, the research progress discussed the repair mechanism of self-healing concrete and the latest research status at home and abroad, explained the influences of material composition and environment on the self-healing progress, introduced the related patent application, and explored existing problems in various self-healing technologies as well as the development trend.

Keywords: self-healing concrete; damage; repair method; patent; progress

混凝土是当代应用最广泛的建筑材料之一, 其应用领域覆盖土木工程、水利与海港工程等。由于混凝土本身具有抗压强度高、耐久性好以及成本低等优点, 已经成为不可或缺的建筑材料。混凝土作为一种脆性材料, 其开裂是不可避免的, 这已经成为普遍存在的质量问题。混凝土裂缝的产生主要是由变形(主要包括温度变化、收缩、不均匀沉降

等原因)和外部荷载(动、静荷载)引起的。混凝土裂缝一旦出现, 受到结构和外部环境的影响, 裂缝的数量、宽度和深度等会不断增加。这使得混凝土结构的适用性、耐久性和抗渗性降低, 甚至会影响结构的安全性。产生的裂缝若不及时修补, 可能会影响结构的使用寿命, 甚至威胁到人们的安全, 带来不可估量的损失。传统的混凝土裂缝修复方

收稿日期: 2021-09-05

基金项目: 安徽省自然科学基金青年项目(2008085QA50、2008085QE245); 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2020A0452、KJ2019A0747); 住房和城乡建设部科技项目(2019-K-060)

作者简介: 李凯(1982-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向: 智能建筑材料;

徐沛保(1986-), 通讯作者, 男, 讲师, 博士, 研究方向: 智能建筑材料。E-mail: peibaoru@qq.com

式主要是事后维修和定时维修,但这些修复方式一般适用于裂缝宽度较明显的开裂,而且修复很难维持长久,容易产生二次开裂。因此,传统方法越来越满足不了人们对混凝土结构修复的需求和期望。随着建筑材料不断向智能化的趋势发展,为了减轻或避免裂缝对混凝土结构的危害,阻止有害物质损害混凝土内部结构,一种新型的智能材料应运而生——自愈混凝土。自愈混凝土是混凝土结构在早期出现裂缝时,就能够感知裂缝的产生并主动阻止裂缝的产生或释放物质修补裂缝的一种智能建筑材料。在传统混凝土材料中加入特殊成分,自愈混凝土材料能够提前感知和主动修复混凝土结构出现的裂缝,同时能够恢复甚至提高结构的力学性能,延长使用寿命。目前国内外现有的混凝土裂缝自愈方式主要有:纤维增强自愈法、形状记忆合金自愈法、自然自愈法、电沉积自愈法、渗透结晶自愈法、微胶囊自愈法及微生物自愈法等。

本文通过混凝土自愈机理的不同将自愈技术分为三个部分,分别是物理自愈、化学自愈和生物自愈,并依次介绍了这三种混凝土自愈机理的研究概况、专利应用情况、当前研究阶段的局限性以及未来在工程材料领域的重要性和发展方向。

1 基于物理机理的混凝土自愈研究概况

1.1 混凝土损伤自愈的物理机理研究现状

混凝土损伤自愈的物理机理是在普通混凝土中掺入智能修复材料,利用材料良好的物理力学性能和原理(包括热学、力学和电学等)来预防和抑制裂缝的形成。混凝土损伤自愈物理机理根据作用方式不同,可以分为纤维增强自愈法和形状记忆合金自愈法。

1.1.1 混凝土纤维增强自愈法研究现状

纤维增强混凝土材料,是在普通混凝土中掺入适量的碳纤维、钢纤维、玻璃纤维及混杂纤维等,从而降低混凝土结构早期收缩裂缝、温度裂缝和长期收缩裂缝。当混凝土受到荷载时,纤维能够有效控制裂缝宽度和抑制裂缝的形成^[1]。Sahmaran等^[2]研究发现,在混凝土材料中加入矿渣能有效促进裂缝愈合;Eisa等^[3]分析了橡胶屑与钢纤维的结合对钢筋混凝土梁性能的影响,研究发现将钢纤维与掺

量超过10%的橡胶混凝土混合使用,能有效提高混凝土的力学性能;翟红侠等^[4]通过试验研究发现在泡沫混凝土中加入聚丙烯纤维可对混凝土起到阻裂和增韧的作用;戚宇涵等^[5]通过研究分析发现竹纤维加入混凝土中能减少或延缓裂缝的产生,并提高混凝土的抗拉强度。

纤维增强自愈混凝土能有效改善混凝土脆性大和抗拉强度低的缺点,纤维能够改变混凝土的内部微观结构,减少裂缝的产生,从而提高混凝土的抗渗性和耐久性。但是纤维的制作成本较高且耗时间较长,因而限制了这种技术的推广和使用。

1.1.2 混凝土形状记忆合金自愈法研究现状

形状记忆合金(Shape Memory Alloys,简称SMA)是一种特殊的合金,具有良好的形状记忆、超弹性能和耐腐蚀性能,其发挥形状记忆功能的原因是热弹性马氏体相变。在混凝土结构中容易产生裂缝的位置提前放置SMA,当混凝土在室温下产生裂缝时,对SMA加热温度超过一定上限值(即马氏体相变温度),SMA就会在强大的形状记忆性能下对混凝土构件的损伤部位施加压应力,消除室温下产生的变形,促使裂缝修复闭合^[6]。形状记忆效应示意图如图1所示。

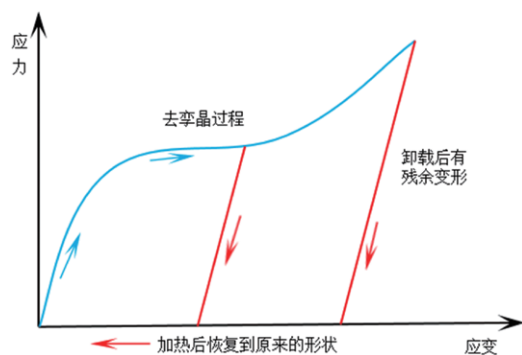


图1 形状记忆效应示意图

阎石等^[7]发现通过电加热方法,能够使SMA丝在混凝土梁产生裂缝时产生恢复变形;Liu等^[8]基于SMA材料的热力学本构模型和电阻特性,建立了SMA智能混凝土裂缝监测的理论模型,在加载卸载阶段,SMA导线电阻与裂缝宽度的相对变化几乎呈分段线性关系;张亚楠等^[9]将形状记忆合金材料加入混凝土材料中,发现裂缝修复效果受试件尺寸大小的影响,且试验试件只能修复裂缝的10%。

SMA 智能材料的裂缝修复效果受到很多因素的影响,主要包括 SMA 的直径、电流大小、裂缝宽度和温度等,混凝土的承载能力随 SMA 的截面面积的增大而提高。SMA 混凝土的工作性能存在一些局限性,比如 SMA 加热通电时由于电流过大,会存在安全隐患,因此需要找到更合适的加热方式。SMA 与混凝土之间要有稳定的锚固方式来确保承载力。

1.2 专利及其应用情况

1.2.1 纤维增强自愈法相关专利

徐金俊等^[10]公开了一种纤维增强复合材料约束混凝土极限压应变概率建模方法,能够考虑到各种限制因素并计算出混凝土的极限压应变;宋千军^[11]公布一种钢骨-纤维混凝土墙体结构,在混凝土结构中设有纤维,在墙体的受集中荷载部位和强度承担比较薄弱的部位设置承重钢骨,这样既满足结构受力要求,又能简化施工工艺。

1.2.2 形状记忆合金自愈法相关专利

徐龙河等^[12]公开了一种 SMA 自复位混凝土剪力墙,当墙体产生侧向变形时会产生强大的驱动力实现墙体的复位;王欣国^[13]公开了一种应用自愈混凝土填充道路桥梁缝的结构,结构顶部阶梯的 SMA 限制裂缝形成初期混凝土板之间的拉力,能够实现混凝土裂缝的自愈加固。

2 基于化学机理的混凝土自愈研究概况

2.1 混凝土损伤自愈的化学机理研究现状

混凝土损伤自愈的化学机理复杂多样,具体包括:混凝土结构本身未水化的水泥浆继续水化生成结晶沉淀;海工结构等在电场作用下发生化学反应的电化学原理;在传统混凝土中复合化学活性物质催化沉淀物的产生;混凝土内含修复剂与固化剂反应生成粘结性物质主动修复裂纹损伤等。目前常用的技术主要有:自然自愈法、电沉积自愈法、渗透结晶自愈法和微胶囊自愈法等。

2.1.1 混凝土自然自愈法研究现状

自然自愈是指混凝土本身具有修复能力,即普通混凝土结构在出现裂缝的部位有尚未水化或未完全水化的水泥浆体,与潮湿环境中的二氧化碳和水分发生反应生成碳酸钙等结晶沉淀覆盖在裂缝处填充裂缝,使之得到修复。刘素瑞

等^[14]研究发现,与水环境相比, Na_2SO_4 溶液能有效促进混凝土裂缝的自愈;石宝存等^[15]试验研究了不同 pH 溶液 (pH=5、7 和 12) 环境下混凝土砂浆裂缝的自愈效果,发现酸性和中性环境下修复效果不明显,只有在碱性环境作用下修复效果比较明显;马强等^[16]试验研究发现液态水的存在有利于碳酸钙晶体的析出,但在空气环境下裂缝几乎不会愈合。

自然自愈若没有外加的促进措施,修复效果进展缓慢,所需时间较长,且修复效果不明显,只有宽度较小时才能有愈合效果。愈合过程中,碳酸钙结晶的形成必须要有足够的湿度、适宜的 pH 值和温度。

2.1.2 混凝土电沉积自愈法研究现状

电沉积自修复法利用电化学原理,将混凝土结构中的钢筋充当电化学反应的阴极,在水中放置阳极,在两极之间通微电流就会发生一系列的电化学反应,生成不溶于水的化合物 (如 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 ZnO 和 CaCO_3 等) 覆盖在混凝土的外表面裂缝处,在一定程度上阻止了内部有害物质流动对结构的侵蚀^[17]。图 2 绘制了电沉积自愈法原理示意图。

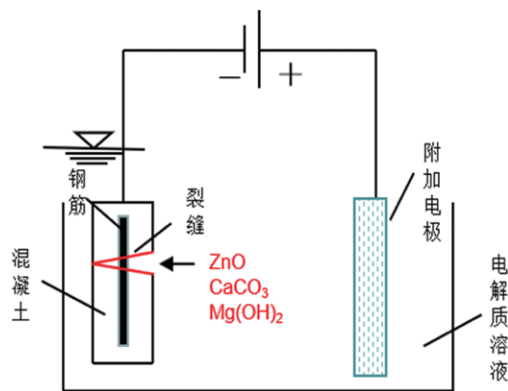


图 2 电沉积自愈法示意图

蒋正武等^[18]在电沉积试验研究中发现,裂缝的愈合效果与电解质浓度以及电流密度等有关;张铁男等^[19]通过试验发现, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 电解液的修复效果优于 ZnSO_4 电解液的修复效果,且两种溶液都不能将裂缝完全填充愈合;左清媛等^[20]研究发现掺加十六烷基三甲基溴化铵的电解质沉积物成分不变,但裂缝愈合效果有明显提高;Touazi 等^[21]研究了不同电位下,锌锰电化学沉积对混凝土性能保护的效果;Koster 等^[22]提出一种数学模型,这种模型能预测在一定电流密度下 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 析出的位置。

根据电化学反应原理,电沉积自修复效果与混凝土结构所处的电解质溶液种类、附加电极、电流密度、电极距离、通电时间以及混凝土微观结构等相关,不同的电解质所生成的沉积物不同,裂缝的修复效果和混凝土的力学性能明显不同。

2.1.3 混凝土渗透结晶自愈法研究现状

混凝土渗透结晶自愈法的修复机理如图3所示。在普通混凝土中掺入具有活性的外加剂,或在混凝土的外表覆盖一层含渗透结晶材料的活性外加剂,这种渗透结晶材料在混凝土干燥时处于稳定的休眠状态。当混凝土一旦开裂有潮气进入内部或者混凝土处于水养护条件下时,活性外加剂会被激活。在水的渗透作用下,激活后的外加剂随水渗入到混凝土的毛细孔和微孔中,对未完全水化的水泥颗粒发生催化作用,从而生成不溶于水的结晶体。结晶体堵塞了裂缝,使混凝土致密达到自修复效果。当混凝土再次开裂时,该活性物质会再次被激活和催化,发生水化反应,直到裂缝完成修复为止^[23]。

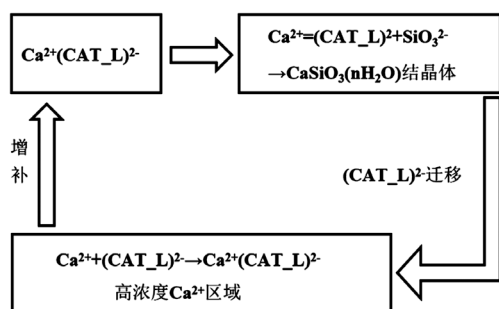


图3 渗透结晶自愈法反应原理图

姚嘉诚等^[24]研究发现渗透结晶防水材料和纳米二氧化硅的掺入,能促进混凝土裂缝处晶体的形成;郭宁林等^[25]发现影响混凝土抗渗性能的主要因素是晶体的结构形貌和物质数量;李冰等^[26]通过试验确定内掺渗透结晶型混凝土中水泥的最佳水灰比为0.5,此时混凝土内部晶体最多,能有效修补裂缝;Liu等^[27]通过试验研究发现,水泥基渗透结晶材料能有效提高混凝土的强度、抗碳化性能和抗氯离子能力;何原野等^[28]研究发现,防水材料的涂量对渗透结晶型混凝土吸水性能的影响很大,混凝土吸水量随涂量增大而减小。

渗透结晶修复技术能有效提高混凝土结构的抗渗性能,渗透结晶修护过程需要充分的湿气或

水。实际上,混凝土裂缝的自修复效果与混凝土的成分、养护时间和温度相关。这种自修复技术的缺点在于当裂缝宽度大于0.4 mm时,修复效果不明显^[29-30]。

2.1.4 混凝土微胶囊自愈法研究现状

微胶囊自愈修复技术原理如图4所示。首先将液体修复剂放入微胶囊或者空心纤维,然后将其均匀地搅拌在混凝土中。当混凝土受力产生微裂缝时,微胶囊的囊壁就会受力破裂,内部的修复剂流出,随毛细作用渗入裂缝的周围与水泥中的固化剂发生固化反应,最终裂缝被粘结愈合,实现自修复^[31]。

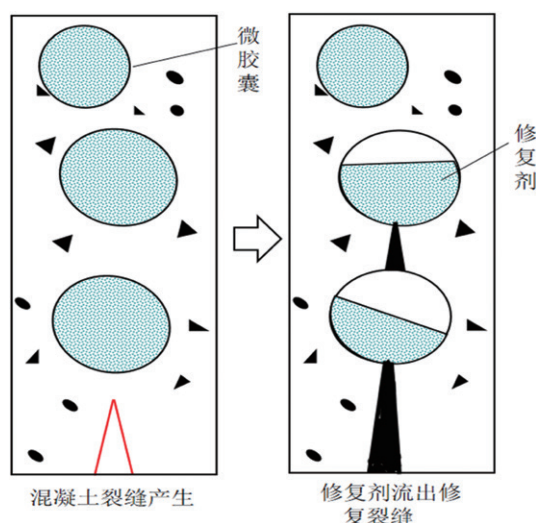


图4 微胶囊自愈修复混凝土的修复机理图

林智扬等^[32]在制备一种微胶囊自愈修复混凝土时,加入三种氟硅酸盐为固化剂,对比发现,氟硅酸钠的自修复性能最好;沈霖等^[33]在混凝土中加入被脲醛树脂囊壁包裹的环氧树脂微胶囊,当构件被破坏,微胶囊壁破裂释放出环氧树脂渗入裂缝中,使裂缝愈合,混凝土经修补后抗拉强度修复率为45%;Milla等^[34]研究了硝酸钙微胶囊自愈混凝土在钢纤维混凝土梁中的封缝效果,发现所有含微囊标本在21天和42天后的自愈效率均显著高于对照组,最大的密封裂缝有290 mm。

微胶囊自愈混凝土制备方法简单、成本较低,但微胶囊在经历搅拌、振捣等制作流程中,很容易发生破裂,因此要研究新的混凝土制作工艺来确保微胶囊不会在发挥作用前破裂。微胶囊或者纤维中的修复黏合剂应当具有一定的粘结强度,能够恢复甚至提高修复后的混凝土强度和性能。

2.2 专利及其应用情况

2.2.1 电沉积自愈法相关专利

苏红军等^[35]公开了一种混凝土裂缝电沉积法修复装置,该装置密封性和绝缘性较高,裂缝修复效果明显;蒋林华等^[36]公开了一种脉冲电沉积修复混凝土裂缝的装置,该装置结构简单、成本低且修复效果好。

2.2.2 渗透结晶自愈法相关专利

邹继军等^[37]公开了一种水泥基渗透结晶型防水材料,该渗透结晶防水材料解决了水泥基体易开裂和抗渗不足等问题,具有抗冻、抗裂及抗碱性能;黄维军等^[38]公开了一种水泥基渗透结晶型防水保温体系,该结构能解决复杂情况下的渗透问题,防止涂层较厚造成整块脱落的问题。

2.2.3 微胶囊自愈法相关专利

尚文涛^[39]公开了一种自修复微胶囊混凝土,这种混凝土将二氧化碳转化成碳酸钙而减少二氧化碳的排放,并回收利用二氧化碳固体吸附剂,减少废弃物产生;任俊等^[40]公开了一种具有物理触发功能的混凝土自修复微胶囊,这种微胶囊可以调整囊壁材料不同组分之间的比例,有效减少微胶囊的破损率。

3 基于生物机理的混凝土自愈研究概况

3.1 混凝土损伤自愈的生物机理研究现状

混凝土损伤生物自愈机理是指利用微生物新陈代谢产生碳酸钙沉淀,达到混凝土裂缝自修复的效果。此方法具有环境友好的特点,可实现绿色无污染。

微生物自修复法是指利用好氧微生物发生矿化反应生成沉积物修补裂缝,矿化反应的产物碳酸钙与混凝土结构有较好的相容性^[41]。在搅拌混凝土时提前加入微生物、所需的营养物和底物,成型后混凝土中的微生物处于休眠状态,当混凝土构件出现开裂,好氧微生物会和渗入的空气和水发生一系列的生物矿化反应。此时,二氧化碳与钙离子结合最终生成碳酸盐沉淀,并附着在混凝土构件表面,形成闭合空间,实现混凝土自修复。当裂缝被填充后,微生物再次休眠。微生物修复混凝土原理示意图如图 5 所示。

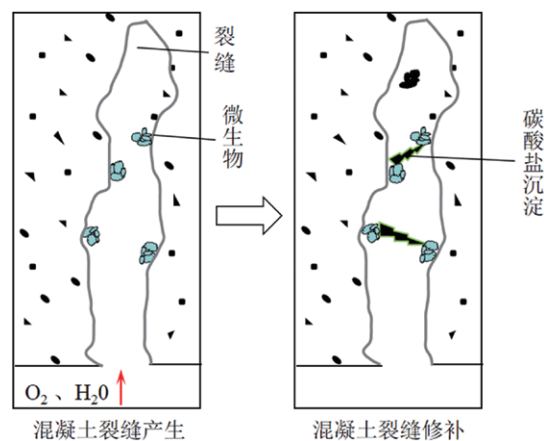


图 5 微生物修复混凝土示意图

王柏顺等^[42]发现基于膨胀珍珠岩固载微生物的自修复混凝土,混凝土力学性能会随着这种载体掺量的增大而降低;任立夫等^[43]研究了以琼脂作为载体条件下的碳酸酐酶微生物在混凝土裂缝处的酶化反应过程,通过扫描电子显微镜观察到:碳酸酐酶微生物吸收空气中的二氧化碳,诱导碳酸钙沉积产生,在混凝土表面形成密实的复合膜层,但这种膜层只适合修复宽度小于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的表面裂缝,当裂缝较大时,修复效果不明显;徐晶等^[44]以多孔陶粒作为微生物载体,将微生物芽孢掺入混凝土进行混凝土裂缝修复研究,发现混凝土裂缝经过 28 天后被填充,且抗压强度恢复率接近 63%。

微生物自修复法目前处于实验室研究阶段,微生物对生长环境有严格的要求,这点给试验的进行带来了挑战。此外,反应所必需的水和氧气、营养物质以及微生物的菌种这些都会对矿化反应中微生物与混凝土的相容性和混凝土的耐久性产生影响。

3.2 专利及其应用情况

李敏等^[45]公开了一种基于荧光材料的微生物自修复混凝土裂缝的标记方法,该方法能够通过紫外灯照射清晰显示混凝土裂缝修复时产生碳酸钙的位置;张家广等^[46]公开了一种高效的微生物自修复混凝土,能实现裂缝高效自修复,同时节约微生物的培养成本。

4 结论与展望

自愈混凝土作为一种新型智能建筑材料,能够对损伤裂缝主动监测和修复,降低混凝土结构的检测和维护成本,并可有效提高结构耐久性和安全

性,有望解决传统混凝土在开裂方面难以克服的问题。本文主要论述了自愈混凝土物理、化学和生物三种修复机理的研究进展,对各种自愈技术作以下分析总结和展望。

4.1 结论

(1) 物理修复技术方面:纤维增强自愈混凝土技术受到纤维种类、成本的影响很大,其中钢纤维力学性能较好,但价格较高;聚丙烯纤维成本低,但与混凝土之间粘结性能差,且易成团,可考虑掺入复合纤维材料以提升修复效果和降低成本;形状记忆合金自愈法目前所用的通电激励加热方法容易造成安全隐患,且实际工程中形状记忆合金与混凝土之间锚固不够稳定。

(2) 化学修复技术方面:自然自愈法、电沉积自愈法、渗透结晶自愈法都需在有水的环境下才能达到裂缝修复效果,对环境条件要求较高导致适用范围受限。微胶囊自愈法修复效果较明显,但微胶囊自愈法中活性粘结剂一般耐久性能较差,且在搅拌过程中容易提前破裂导致无法修复裂缝。因此针对微胶囊的局限性,在实际应用前应试验筛选出合适的活性粘结剂和微胶囊等。

(3) 生物修复技术方面:微生物自愈技术对微生物的生长环境有严格要求,且微生物培养成本较高,反应所必需的水、氧气、营养物质以及微生物的菌种等都会对矿化反应中微生物与混凝土的相容性和混凝土的耐久性及强度产生影响。因此,需要更多科研工作者的参与和探索,找到降低成本和改善强度等性能的新方法。

(4) 共性方面:目前对自愈混凝土的研究处于初级阶段,许多自修复技术还不成熟,能够应用到实际工程上的实例较少,许多关键问题需要突破和解决,其中包括掺入的智能材料与混凝土基体之间的相容性、最佳掺量和裂缝的修复效果评价等。不同自愈混凝土技术的影响因素各不相同,应该将不同影响因素综合起来考虑,避免片面地研究某一种因素对混凝土裂缝修复效果的影响。不同自愈技术的适用范围不同,每种技术都具有自己的优点和局限性。因此,在实际应用中应根据具体情况选择最适宜的自愈技术以扬长避短达到最佳效果。

4.2 展望

根据自愈混凝土技术的研究现状,针对现有研

究成果中存在的问题,拟提出关于自愈混凝土技术的一些研究方向:

(1) 自愈混凝土目前没有得到广泛应用的原因包括自愈混凝土原材料的生产制备成本较高和自愈技术适用范围窄等。因此,自愈混凝土在未来的发展中,需要不断发展新的自愈技术,并朝着绿色环保、经济和适用性广的方向发展。

(2) 在实际工程中,混凝土结构不仅会受到静荷载还会受到动荷载作用,应多开展动荷载作用下的试验,研究动荷载作用下自愈混凝土的修复技术。

(3) 由于影响混凝土损伤自愈效果的因素较多,目前还没有成熟完整的自愈效果评价体系,因此建立一套有效的自愈效果评价标准是自愈混凝土技术未来重要的研究内容之一。

参考文献:

- [1] 寇佳亮,邓明科,梁兴文. 延性纤维增强混凝土单轴拉伸性能试验研究[J]. 建筑结构,2013,43(1):59-64.
- [2] Sahmaran M, Yildirim G, Erdem T K. Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 35(1):89-101.
- [3] Eisa A S, Elshazli M T, Nawar M T. Experimental investigation on the effect of using crumb rubber and steel fibers on the structural behavior of reinforced concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119078.
- [4] 翟红侠,杨启安,廖绍锋,等. 聚丙烯纤维增强泡沫混凝土性能研究[J]. 安徽建筑大学学报,2016,24(2):82-86.
- [5] 戚宇涵,卢平. 竹纤维混凝土结构加固方法的分析[J]. 安徽建筑大学学报,2015,23(6):38-41.
- [6] 陈晓丹. 预应力 SMA 智能混凝土梁自修复性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2016.
- [7] 阎石,孙静,王伟. 形状记忆合金混凝土连续梁自修复特性试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(6):1080-1084.
- [8] Liu B F, Wang Q F, Yin K, et al. An analytical model for crack monitoring of the shape memory alloy intelligent concrete[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2020, 31(1):100-116.
- [9] 张亚楠,李军超,王庆菲,等. SMA 智能混凝土材料裂缝监测与修复机理和试验研究[J]. 固体力学学报,2020,41(2):170-181.
- [10] 徐金俊,陈文广,黄新良,等. 纤维增强复合材料约束混凝土极限压应变概率建模方法:

- CN111414678A[P].2020-07-14.
- [11] 宋千军.一种钢骨-纤维混凝土墙体结构:CN211007179U[P].2020-07-14.
- [12] 徐龙河,张焱,李忠献.一种内置形状记忆合金自复位混凝土剪力墙:CN110005096B[P].2020-04-10.
- [13] 王欣国.应用自愈混凝土填充道路桥梁缝的结构:CN207259954U[P].2018-04-20.
- [14] 刘素瑞,杨久俊,王战忠,等.硫酸钠溶液环境下混凝土的自愈合性能[J].硅酸盐学报,2015,43(8):1083-1089.
- [15] 石宝存,张士萍,荣飞亚,等.不同pH值环境下砂浆裂缝的自愈合行为[J].混凝土,2020(4):118-124.
- [16] 马强,单立福,袁连旺,等.环境因素对砂浆裂缝自愈合的影响[J].济南大学学报(自然科学版),2020,34(3):224-229.
- [17] Reinhardt H W, Jooss M. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(7): 981-985.
- [18] 蒋正武, 荆锋, 孙振平, 等. 电沉积法修复钢筋混凝土裂缝的基础研究[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 5-8, 20.
- [19] 张铁男, 陈正发, 刘桂凤, 等. 电沉积法修复钢筋混凝土裂缝效果的研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(9): 25-29.
- [20] 左清媛, 储洪强, 杨晓培, 等. 阳离子表面活性剂对电沉积法修复混凝土裂缝的愈合效果的影响研究[J]. 混凝土, 2020(3): 33-38.
- [21] Touazi S, Bučko M, Makhloufi L, et al. The electrochemical behavior of Zn-Mn alloy coating in carbonated concrete solution[J]. Surface Review and Letters, 2016, 23(4): 1650030.
- [22] Koster T, Peelen W, Larbi J, et al. Numerical model of Ca(OH)₂ transport in concrete due to electrical currents[J]. Materials and Corrosion, 2010, 61(6): 518-523.
- [23] 胡宝云, 管婧超. 自修复混凝土的国内研究现状与发展趋势[J]. 广东化工, 2018, 45(8): 170-171.
- [24] 姚嘉诚, 延永东, 徐鹏飞, 等. 水泥基渗透结晶型防水材料和纳米二氧化硅改性混凝土自修复性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(6): 1772-1777.
- [25] 郭宁林, 郭荣鑫, 马倩敏, 等. 内掺型 CCCW 对混凝土自愈合及抗渗性能的影响[J]. 非金属矿, 2019, 42(6): 38-40.
- [26] 李冰, 郭荣鑫, 颜峰. 水灰比对渗透结晶防水混凝土自愈性能研究[J]. 非金属矿, 2019, 42(2): 84-86.
- [27] Liu J B, Qin H G, Geng F, et al. Effect of cement-based permeable crystallization material on the performance of deterioration concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 368/369/370: 905-910.
- [28] 何原野, 刘清, 王克新, 等. 水泥基渗透结晶型防水材料对混凝土吸水性能的影响[J]. 混凝土, 2015(12): 63-66.
- [29] 陈海燕. 浅谈渗透结晶在混凝土应用中的若干问题[J]. 珠江水运, 2010(5): 70-71.
- [30] 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.
- [31] 张家宁, 王媛媛. 微胶囊自修复高性能混凝土的应用研究概述[J]. 山东英才学院学报, 2019, 15(3): 32-35, 40.
- [32] 林智扬, 刘荣桂, 汤灿, 等. 包裹硅酸钠的微胶囊自修复混凝土在不同修复剂下的修复性能[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(4): 1092-1099.
- [33] 沈霁, 阙丽虹, 郑同鑫. 环氧树脂微胶囊自愈混凝土的性能研究[J]. 中国建材科技, 2020, 29(2): 28-29.
- [34] Milla J, Hassan M M, Rupnow T, et al. Measuring the crack-repair efficiency of steel fiber reinforced concrete beams with microencapsulated calcium nitrate[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201: 526-538.
- [35] 苏红军, 于文起, 柳在明, 等. 一种电沉积法水中混凝土裂缝修复装置:CN210164281U[P].2020-03-20.
- [36] 蒋林华, 储洪强, 蒋侃, 等. 一种脉冲电沉积修复混凝土裂缝的方法及装置:CN101418595B[P].2011-01-12.
- [37] 邹继军, 邹继敏. 一种水泥基渗透结晶型建筑防水材料及其制备方法:CN110981374A[P].2020-04-10.
- [38] 黄维军, 杨德富, 雷团结, 等. 一种水泥基渗透结晶型防水保温体系:CN210062271U[P].2020-02-14.
- [39] 尚文涛. 一种可固定二氧化碳的自修复微胶囊混凝土:CN107500589B[P].2020-06-30.
- [40] 任骏, 王险峰, 邢锋, 等. 具有物理触发功能的混凝土自修复微胶囊及其制备方法:CN111268937A[P].2020-06-12.
- [41] 李珠, 冯涛, 周梦君, 等. 基于科式芽孢杆菌矿化沉积的混凝土裂缝自修复性能试验研究[J]. 混凝土, 2017(6): 5-8.
- [42] 王柏顺, 张家广, 周梦君, 等. 基于膨胀珍珠岩固载微生物的裂缝自修复混凝土劈裂抗拉强度试验研究[J]. 混凝土, 2020(3): 20-23, 28.
- [43] 任立夫, 钱春香. 碳酸酐酶微生物沉积碳酸钙修复水泥基材料表面裂缝[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(11): 1389-1395.
- [44] 徐晶, 王彬彬. 陶粒负载微生物的混凝土开裂自修复研究[J]. 材料导报, 2017, 31(14): 127-131.
- [45] 李敏, 陈沁文, 钱春香. 一种基于荧光材料的微生物自修复混凝土裂缝的标记方法:CN111044336A[P].2020-04-21.
- [46] 张家广, 范月东, 周爱娟, 等. 一种廉价高效的微生物裂缝自修复混凝土制备方法:CN112299767A[P].2021-02-02.