

DOI: 10.12164/j.issn.1003-8965.2023.03.010

自修复混凝土技术的现状与发展

Research status and development of self-healing concrete technology

闫新

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛, 266000)

YAN Xin

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266000)

摘要: 自修复混凝土(SHC)技术是一种新型混凝土修补技术,利用混凝土中添加的自修复剂或微生物等使得混凝土中的裂缝自行愈合,从而延长混凝土使用寿命,减少环境污染和资源浪费。本文介绍了自修复混凝土技术的原理、发展、研究热点及未来的趋势和应用前景。

关键词: 自修复混凝土;应用前景

Abstract: Self-healing concrete (SHC) technology is a new type of concrete repair technology, that utilizes self-healing agents or microorganisms added in concrete to self-heal cracks in concrete, thereby extending the service life of concrete and reducing environmental pollution and waste of resources. This paper introduces the principle, development process, current research hotspots, future trends and application prospects of self-healing concrete technology.

Key words: self-healing concrete; application prospects

中图分类号: TU528.01 文献标志码: A 文章编号: 1003-8965(2023)03-0037-05

0 引言

混凝土在使用过程中容易出现裂缝和损伤,导致其力学性能下降和使用寿命缩短,给工程安全带来威胁。传统的混凝土修补技术需要人工干预,费时费力,且修补后的混凝土容易再次出现裂缝和损伤。由此,自修复混凝土(SHC)技术应运而生。自修复混凝土技术通过向混凝土中引入自修复剂、微生物等,使其具有自主完成裂缝修复和损伤修复的能力。这种技术不仅可以提高混凝土的使用寿命和可靠性,还能减少维护修缮成本,有广泛的应用前景。本文主要介绍自修复混凝土技术的原理、发展历程、目前的研究热点以及未来的发展趋势和应用前景。

1 自修复混凝土技术的原理和分类

自修复混凝土技术指预先在混凝土中添加自修复剂或微生物等,当混凝土表面或内部出现裂缝时,这些修复剂和微生物能迅速释放或生成新物质对裂缝进行填充、封闭的一种新型技术。从修复机理角度,自修复混凝土技术可分为物理自修复、化学自修复和生物自修复三类^[1],见表1所示。

物理自修复是利用自修复剂的物理性质来实现自修复,自修复过程中自修复剂未与混凝土内部物质发生反应,仅通过自身的物理拉伸和粘结作用填充混凝土结构中的裂缝,从而实现自修复。常见的物理修复类型有物理粘结自修复、纤维增强混凝土自修复和形状记忆合金自修复

表1 自修复混凝土技术原理及局限性

Tab.1 Principles and limitations of self-healing concrete technology

自修复技术	原理	局限性
物理粘结自修复	裂缝开裂致使粘结剂流出, 粘结剂固化修复裂缝	细观修复效果较差
纤维增强混凝土自修复	在混凝土中加入不同类型的纤维有助于裂缝愈合	适用于窄裂缝, 纤维掺量、比例影响愈合效果
形状记忆合金自修复	利用 SMA 自身特性达到限制或修复裂缝的效果	成本较高, 工序复杂
渗透结晶自修复	在混凝土中掺入含活性组分的渗透结晶材料, 当混凝土发生开裂且渗水时, 活性组分发生化学反应生成新的结晶物质, 填充裂缝 ^[2]	在有水或湿度较高的环境易激发, 受裂缝宽度限制
电解沉积自修复	利用电化学技术在混凝土表面生成 CaCO ₃ 等不溶于水的化合物填充裂缝	适用于水工环境, 且受电解质种类、电流密度影响
胶囊自修复	将自修复剂填入胶囊中, 混凝土出现裂缝时, 裂缝周围胶囊破裂流出自修复剂, 与混凝土中的固化剂或其他化合物发生反应, 达到修复目的	微胶囊在混凝土中掺量和均匀性较难控制
微生物自修复	微生物新陈代谢, 产生相对不溶或难溶的化合物以达到混凝土自修复效果	修复过程漫长, 对宽裂缝修复作用有限

作者简介: 闫新(1995-), 硕士, 从事结构工程研究。

(SMA)等。

化学自修复是利用自修复剂的化学反应来实现自修复。在混凝土中添加修复剂,当混凝土的表面出现裂缝时,修复剂自身或与混凝土内物质发生化学反应,产生碳酸盐等物质以填充裂缝。较常见的化学修复类型有渗透结晶自修复、电解沉积自修复、胶囊自修复和其他化学反应修复等。

生物自修复是利用微生物新陈代谢,产生相对不溶或难溶的化合物以达到混凝土自修复效果,如巴氏芽孢杆菌、巴氏芽孢八叠球菌等。当混凝土表面出现裂缝时,水分和空气中的 O_2 或 CO_2 等进入混凝土内部与微生物发生反应,诱导裂缝周围生成碳酸钙,以此进行裂缝填充。

2 自修复混凝土技术的发展以及研究现状

自修复混凝土领域的国内外研究集中在自修复混凝土制备工艺的提出、制备容器的选择、胶粘剂的选择以及混凝土自修复效果的评估等。

2.1 国外的发展及研究现状

20世纪20年代, Abram发现测试28d抗压强度的损伤混凝土试件置于户外环境长达8年,其抗压强度会提高至28d的两倍以上,首次揭示了混凝土自我修复现象^[3]。随后,挪威的Stefan将遭受冻融损伤的混凝土放在水中2~3个月,发现混凝土抗压强度出现4%~5%的恢复^[4]。日本Nobuaki和美国Ryu采用电沉积技术在混凝土表面和裂缝中析出电沉积物,可有效修复混凝土表面裂纹^[5]。90年代初,美国Carolyn和日本三桥博三在混凝土中加入内含粘结剂的空心胶囊或玻璃纤维,混凝土一旦受力开裂,会使其内部胶囊或空心纤维破裂,粘结剂流出覆盖裂缝,从而达到修复混凝土的目的^[6-7]。1995年,美国Illinois大学通过使用传感器来监测混凝土裂纹的产生,同时释放修复剂来促进裂缝的自愈,实现混凝土的自我诊断和自我修复^[8]。1998年,美国密歇根大学Victor等将含有超强力胶水的空心纤维管预埋在混凝土中,通过测试梁的抗弯刚度进一步验证了混凝土裂缝的恢复效果^[9]。Motuku等^[10]研究了裂缝修复液体储存容器的选择、修复液在基体中的空间分布及修复液的释放,结果表明玻璃管有较好的修复效果。Lee等^[11]采用40组试验研究超吸水性聚合物(SPA)对裂缝的修复性能,发现增加SPA会加速混凝土裂缝的密封,但是会降低强度。2001年,White^[12]在环氧树脂基体中加入微胶囊愈合剂,裂缝侵入时释放并与催化剂接触引发愈合剂聚合,可以实现裂缝的自修复,结果表明,使用环氧树脂材料的自修复效率可达75%。

近年来,Zheng等^[13]使用低碱磺基铝酸盐水泥(SC)作为载体包封孢子,研究了孢子群和微生物群对混凝土基本性能的影响,采用不同的评价指标评估裂缝的自修复效率。其研究发现,两种微生物自愈剂对混凝土性能具有一定的影响,并探讨了不同的微生物自愈剂对混凝土裂缝的自愈机理。

Taheri等^[14]介绍了一种新型纳米胶囊自修复混凝土。

根据纳米胶囊的可用性、强度和耐温性可分为:类型1为URF,聚乙烯(PE)为外壳,纳米二氧化硅(SiO_2)为芯;类型2为URF,PE为外壳,纳米二氧化硅(SiO_2)为芯;类型3为PE为外壳,纳米二氧化硅(SiO_2)为芯。分别将0.5%、1%、1.5%和3%纳米胶囊混合在混凝土样品中,进行了抗压强度、氯离子和水渗透深度等测试。经研究,URF-PE- SiO_2 纳米胶囊的最佳配比为0.5%。

Stryszewska等^[15]通过添加矿物添加剂来提高混凝土的自修复能力,采用多种手段评估愈合过程,使用EDS检测器进行成分分析。研究发现,这些矿物添加剂可利用水的累积反应对混凝土裂缝进行修复。

Riad等^[16]研究了在无菌与营养物质配比标准的情况下,营养物质与细菌配比及细菌浓度对自愈混凝土性能的影响。将巴氏芽孢杆菌DSM-33和球形芽孢杆菌DSM-396引入混凝土,选择细菌浓度为 2×10^9 和 2×10^{10} 单位/毫升的菌落和细菌比例占水泥重量为0.5%、1%、4%和10%四组试件进行研究,同时分别以水泥重量的0.25%、0.5%和1%的乳酸钙作为细菌营养。结果表明,细菌掺量为10%、养分为1%时,混凝土抗压强度显著提高,因为方解石充填了混凝土裂缝。此外,细菌减少了氯化物对混凝土的渗透,提高了对硫酸盐进入的抵抗力。

Nardi等^[17]提出一种新型仿生凝胶材料,采用3D打印的四面体微血管网络(MVN)储存愈合剂并将其输送到凝胶基质内的损伤部位,充当可用于多种损伤愈合事件的愈合剂储库,试验结果表明,封装在MVN中的修复剂可在毛细管驱动作用下输送到混凝土构件的裂缝区域,还能提高混凝土强度、刚度和断裂能。

Su等^[18]将蛭石作为细菌和营养物质载体,研究该载体的固定能力、保护作用、修复性能和机械相容性。结果表明,膨胀蛭石是适宜的微生物载体,考虑其巨大的吸水能力和对细菌的静电吸附,低碱硫铝酸盐水泥包裹的外保护层对提高耐水性有重要意义,且包裹蛭石的微生物自愈剂与混凝土具有优异的相容性。

Reyad等^[19]引入方解石沉淀中的蜡样芽孢杆菌MG708176,将其固定在木灰单元上作为生物修复剂加入混凝土试样中,并对经7d、14d和28d水处理的试样进行测试。结果表明,使用木灰细菌的砂浆,破坏的标本在所有时间间隔内完全愈合。细菌性木灰处理混凝土的抗压、弯曲和抗拉强度大于对照组,透过SEM图像可见致密结构,混凝土的愈合效率和机械性能得到了改善。

Shaheen等^[20]对嗜碱性非孢子原种黄菌、关节杆菌和棒状杆菌作为愈合剂在水泥基环境中的存活时间进行了评估,以检查自修复混凝土的机械性能、自修复和耐久性。结果表明,菌株能沉淀出大量方解石,平均愈合裂缝为0.8mm,强度恢复率为86%。这些菌株能通过延长结构寿命、降低维修成本和保护自然资源来赋予混凝土结构可持续性。

2.2 国内的发展及研究现状

国内对混凝土自修复技术做了大量研究。1997年,南京航空航天大学利用形状记忆合金对复合材料结构中的损伤进行自诊断、自修复^[21]。此后,研究者纷纷开展自修复

混凝土技术研究。

鲍俊杰等^[22]提出一种制备混凝土裂缝修复胶液的方法,首先制备聚氨酯预聚体,然后与丙烯酸酯、环氧树脂反应制成修复胶液。结果表明,聚氨酯预聚体、丙烯酸酯和聚氨酯配比为1:7:2的情况下,所制备修复胶液具有低粘度、固化快、抗压折强度高、韧性好的特点,且成本低,工艺简单,绿色环保。

张英杰^[23]通过将丙烯酸酯胶液和环氧树脂胶液注入石英空心玻璃管中,并埋入混凝土标准试块内,对比研究两种修复胶液对损伤混凝土的修复效果和埋入修复剂后混凝土的承载能力。结果表明,环氧树脂修复胶液流动性较差,但对混凝土的修复效果更好,修复后的梁抗弯刚度提高效果明显。

阚黎黎等^[24]研究了不同龄期下高延展性纤维增强水泥基复合材料的自修复特性,发现90d龄期的裂缝宽度明显缩小,主要原因为较长龄期试件进一步水化导致基体化学粘结力的增强以及更多沉淀物填充了裂缝。此外,材料中的聚乙烯醇纤维具有亲水性,有助于碳酸钙生成。

曾俊杰等^[25]研究了结晶型混凝土的自修复特性,评价了不同裂缝宽度的修复效果和修复后的抗渗性能。结果显示,裂缝宽度对修复效果有重要影响,但在实际应用中难以操作,通过比较修复前后的力学性能也能对混凝土自修复性能进行有效评估。

张家广等^[26]以高孔隙率的膨胀珍珠岩作为微生物载体,研制了具有裂缝自诊断和自修复能力的混凝土,考察不同类型的矿化微生物对混凝土裂缝自修复效果的影响。结果表明,科氏芽孢杆菌及所选择的好氧型、兼性厌氧型、厌氧型混合菌种都表现出较好的矿物沉淀作用,在修补养护28d后,其裂纹愈合率分别为73.3%、83.3%、63.3%和41.5%。

赵涵等^[27]提出了一种使用剩余污泥中的微生物修复混凝土裂缝的方法。先对残余污泥进行人工培养,获得耐盐碱和产脲酶菌株,在此基础上利用细菌呼吸、三羧酸循环、脲酶代谢诱发CaCO₃沉淀,实现对混凝土裂纹的修补,效果良好。

林智扬等^[28]以硅酸钠为主要芯材,乙基纤维素为壁材,制备了一种自修复混凝土微胶囊。以三种氟硅酸盐为固化剂,研究不同固化剂和不同微胶囊含量下水泥砂浆的基本力学性能和自修复性能。结果表明,以氟硅酸钠为固化剂的复合材料具有明显的自愈合性能。

赖小颖^[29]选用珊瑚礁作为载体材料,研究固载后的微生物在混凝土中的自修复效果。将珊瑚礁固载的微生物掺入混凝土试件中,通过吸水率、压碎值试验及XRD分析等进行探究。结果表明,珊瑚礁可以为微生物提供足够的生存空间及较好的生长环境,是载体的良好选择。固载后的微生物在混凝土中有良好的碳酸钙结晶效果,能明显提高混凝土耐久性能。实体工程裂缝修复发现,养护后的裂缝处检测出微生物矿化生成的方解石,对裂缝有较好的修复效果。

王柏顺等^[30]使用膨胀珍珠岩作为好氧型嗜碱科氏芽孢杆菌的载体,研究掺入该微生物修复剂对混凝土劈裂抗拉

强度的影响。结果表明,加入膨胀珍珠岩的量越多,混凝土劈裂抗拉强度降低效果越明显;加入珍珠岩的同时,加入硅灰可减轻对强度的影响;同时加入珍珠岩、硅灰和聚丙烯纤维可提高混凝土劈裂抗拉强度,降低其脆性,修复效果较好。

左清媛等^[31]采用电化学法研究阳离子表面活性剂(CTAB)对混凝土自修复效果的影响,通过测定沉积过程中试件的表面覆盖率、裂缝愈合率及渗透系数来评估修复效果,并对裂缝中的沉积物进行微观分析。结果显示,将CTAB加入硫酸锌和硫酸镁溶液中进行电液处理5d,修复效果最佳。

牛申龙^[32]利用试验确定空心玻璃双管的厚度、长度及体积率,根据混凝土自修复机理选择C30混凝土为基体,内置玻璃双管,采用多组分胶粘剂对修复体系进行三点弯曲试验,通过修复胶液的流出情况和破损情况检测了混凝土的自修复性能。

黄益蛟^[33]从动力性能角度探究了微胶囊自修复混凝土的修复效果,使用霍普金森杆装置研究微胶囊混凝土自修复体系的力学性能。结果显示,随着微胶囊掺入量的增加,混凝土抗压强度下降,但劈拉强度增强。结果表明,微胶囊的掺入量可适应实际工程需要。

Wang等^[34]通过强碱性驯化对巨型芽孢杆菌在不同pH值下的生长性能以及菌株在碱性环境下的繁殖性能和脲酶活性进行了试验。研究结果表明,在pH为7的环境中,巨型芽孢杆菌的生长和繁殖速度最快,脲酶活性最强,同时,增加尿素可以显著地提高微生物在碱性环境下的繁殖特性、脲酶活性和产钙率。采用碱性驯化巨型芽孢杆菌能够更好降低混凝土的透水特性,大幅提高混凝土的强度修复效果。

Fan等^[35]综述了常见矿化细菌的矿化机理,分析了温度、pH值和培养基成分等对细菌繁殖和碳酸钙沉淀的影响,介绍了各种混凝土裂缝修复策略,并根据修复试件的强度和耐久性评价了修复效果,探讨海洋环境和海水中离子对细菌繁殖、碳酸钙产率和裂缝修复的影响。还讨论了微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)工艺对环境和钢筋腐蚀的潜在不利影响,提出了促进MICP在海洋混凝土修复中应用的建议。

3 自修复混凝土技术的研究热点

目前自修复混凝土技术的研究热点集中在自修复材料的研发和自修复混凝土的性能评估方面。

自修复材料的研发是自修复混凝土技术的关键。近年来,国内外已开发出多种自修复材料,包括各种微生物、含修复剂微胶囊、纳米纤维等^[36-37],但还存在一些问题,例如,某些细菌代谢时会产生对人体有害的气体,某些细菌寿命较短,死亡后留在混凝土中会削弱混凝土强度等。未来的研究方向应是开发更高效、低成本的自修复剂,加强对自修复剂修复效果的评估和控制。

自修复混凝土的性能评估也是当前的热点。目前的评估方法主要包括力学性能评价、抵抗性的恢复、可视化的

表征等^[4]。力学性能评价主要通过对比开裂后自修复混凝土力学性能和未开裂混凝土样品的力学性能来评价修复效果。抵抗性的恢复主要通过检测自修复混凝土与未开裂混凝土样品的电阻率、传输性及连续性,分析其恢复程度来进行评估。可视化的表征指通过特定的仪器对比分析修复后的混凝土结构、释放修复剂的过程及裂缝愈合过程等微观特征,来评估混凝土的自修复效果。

4 自修复混凝土技术的应用前景

自修复混凝土在一定程度上可以有效修复裂缝和缺陷,提高混凝土的强度和耐久性,提高工程寿命,因此在海洋工程、建筑工程、交通工程、水利工程等领域均有广阔的应用前景。

海洋工程中的混凝土结构常面临海水、氯盐等腐蚀因素的侵蚀,可通过引入具有吸水性和防腐性的材料来实现自修复。建筑工程中的混凝土结构常面临气候变化、地震等自然灾害及建筑材料老化等因素的影响,可通过引入具有耐候性和弹性变形的材料来实现自修复。交通工程中的混凝土结构常面临重载车辆的冲击、道路盐霜等因素的影响,可通过引入具有抗压性和吸水性的材料来实现自修复。水利工程中的混凝土结构常面临水体的冲击等因素的影响,可以通过引入具有防水性和弹性变形的材料来实现自修复。

此外,自修复混凝土技术还可以应用于其他领域,如核能工程、航空航天等。

5 结语

自修复混凝土技术在解决混凝土开裂和缺陷修复方面具有巨大潜力,当前的研究取得了一定的进展,但还存在一些问题和挑战。目前,该技术的成本较高,需开发更经济实用的自修复剂。自修复混凝土技术还需解决耐久性等问题,特别是针对大面积破损的混凝土结构的修复等。

参考文献

- [1]李小鹏.桥梁结构混凝土微观裂缝自修复技术研究[D].北京:交通运输部公路科学研究所,2021.
- [2]张鹏,冯竟竞,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.
- [3]ABRAMS A. Autogenous healing of concrete[J]. Concrete, 1925(10):50.
- [4]张士萍,刘俊亮.混凝土裂缝自修复技术的研究现状[J].混凝土,2017,332(06):17-20.
- [5]RYU J, OTSUKI N. Crack closure of reinforced concrete by electrodeposition technique[J]. Cement and research, 2002,32(1):159-164.
- [6]侯子义.裂缝自愈混凝土研究现状与发展趋势[J].中南公路工程,2005,30(1):165-167.
- [7]DRY C, MCMILLAN W. Three-part methylmethacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete[J]. Smart materials and

structures, 1998,5(3):297-300.

[8]CAROLYN D. Repair and prevention of damage due to transverse shrinkage cracks in bridge decks[C]//Proceedings of SPIE, 1999(3671):253-256.

[9]LI V C, LIM Y M, CHAN Y W. Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite[J]. Composites engineering part B, 1998,29(6):819-827.

[10]MOTUKU M, VAIDYA U K, JANOWSKI G M. Parametric studies on self-repairing approaches for resin infused composites subjected to low velocity impact[J]. Smart materials and structures, 1999,8(5):623-638.

[11]LEE H X D, WONG H S, BUENFELD N R. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers[J]. Cement and concrete research, 2016(79):194-208.

[12]WHITE S R, SOTTOS N R, GEUBELLE P H, et al. Autonomic healing of polymer composites[J]. Nature, 2001,409(6822):794-797.

[13]ZHENG T W, SU Y L, ZHANG X, et al. Effect and mechanism of encapsulation-based spores on self-healing concrete at different curing ages[J]. ACS applied materials & interfaces, 2020,12(47):52415-52432.

[14]TAHERI M N, SABET S A, KOLAHCHI R. Experimental investigation of self-healing concrete after crack using nano-capsules including polymeric shell and nanoparticles core[J]. Smart structures and systems, 2020,25(3):337-343.

[15]STRYSZEWSKA T, DUDEK M. Microstructure of autonomous self-healing concrete[J]. Web of conferences, 2020,322(6):01022.

[16]RIAD I M, ELSHAMI A A, ELSHIKH M M Y. Influence of concentration and proportion prepared bacteria on properties of self-healing concrete in sulfate environment[J]. Innovative infrastructure solutions, 2022,7.

[17]NARDI C D, GARDNER D, JEFFERSON A D. Development of 3D printed networks in self-healing concrete[J]. Materials, 2020,13(6):1328.

[18]SU Y L; JIN P. Application of encapsulated expanded vermiculites as carriers of microorganisms and nutrients in self-repairing concrete[J]. Biochemical engineering journal, 2022,187:108672.

[19]REYAD A M, MOKHTAR G. Impact of the immobilized Bacillus cereus MG708176 on the characteristics of the bio-based self-healing concrete[J]. Scientific reports, 2023,13(1).

[20]SHAHEEN N, KHUSHNOOD R A, MEMON S A, et al. Feasibility assessment of newly isolated calcifying bacterial strains in self-healing concrete[J]. Construction and building materials, 2023,362:129662.

[21]陶宝祺,梁大开,熊克,等.形状记忆合金增强智能复合材料结构的自诊断、自修复功能的研究[J].航空学

报,1998(02):123-125.

[22]鲍俊杰,刘都宝,纪学顺. 聚氨酯环氧丙烯酸酯混凝土裂缝修补胶的研究[J]. 化学建材,2007(05):48-49+52.

[23]张英杰. 混凝土结构裂缝自修复技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.

[24]阚黎黎,施惠生,翟广飞. 高延展性纤维增强水泥基复合材料自愈合行为[J]. 硅酸盐学报,2011,39(04):682-689.

[25]曾俊杰,范志宏,王胜年. 混凝土裂缝渗透结晶自愈合评价方法研究[J]. 硅酸盐通报,2015,34(10):3051-3052+3062.

[26]张家广,许顺顺,冯涛,等. 不同矿化微生物对混凝土裂缝自修复效果影响[J]. 清华大学学报(自然科学版),2019,59(08):607-613.

[27]赵涵,徐苏云,张雨辰. 剩余污泥中驯化耐盐碱菌修复混凝土裂缝[J]. 材料科学与工程学报,2020,38(06):966-970.

[28]林智扬,刘荣桂,汤灿. 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(04):1092-1099.

[29]赖小颖. 珊瑚礁固载微生物在混凝土裂缝自修复中的效果研究[D]. 舟山:浙江海洋大学,2022.

[30]王柏顺,张家广,周梦君. 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(03):20-23+28.

[31]左清媛,储洪强,杨晓培. 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(03):33-38.

[32]牛申龙. 混凝土裂缝自修复试验研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.

[33]黄益蛟. 微胶囊自修复混凝土冲击力学性能及自修复性能研究[D]. 深圳:深圳大学,2019.

[34]WANG M, WU L, XIE X H, et al. Study of concrete crack repair using bacillus megaterium[J]. Advances in materials science and engineering, 2022(S2):1-13.

[35]FAN QI, FAN L, QUACH W M, et al. Application of microbial mineralization technology for marine concrete crack repair: A review[J]. Journal of building engineering, 2023,69:106299.

[36]姚嘉诚,延永东,徐鹏飞,等. 水泥基渗透结晶型防水材料 and 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(06):1772-1777.

[37]CUENCA E, POSTOLACHI V, FERRARA L. Cellulose nanofibers to improve the mechanical and durability performance of self-healing ultra-high performance concretes exposed to aggressive waters[J]. Construction and building materials, 2023,374:130785.