

Research Progress on Bionic Self-Healing Technology of Marine Concrete

Huawei Zhang*, Xinwei Ma#

Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai Shandong
Email: 947476324@qq.com, 18S130338@stu.hit.edu.cn, #maxinwei@hitwh.edu.cn

Received: Jun. 11th, 2019; accepted: Jun. 21st, 2019; published: Jun. 28th, 2019

Abstract

The self-healing of marine concrete is based on the principle of self-healing of the organism after injury. In the concrete, the microbial spores and their carriers are compounded. When the concrete is cracked, the microbe can repair the cracks to heal, restore and even increase the strength of the concrete and prevent harmful ions, such as chlorine ions, erode internal steel and concrete. The marine concrete self-repairing system will save the high cost of concrete repair, save the maintenance cost of the building, and help to improve the safety and durability of the building. This paper briefly introduces the principle of self-healing of marine organisms and self-healing of marine concrete, summarizes the research status of self-healing of common concrete and marine concrete in the world, and analyzes the feasibility of introducing ordinary concrete self-healing technology into self-healing of marine concrete. The problems in the future and the future development direction are forecasted.

Keywords

Marine, Concrete, Self-Healing, Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP), Microorganisms

海洋混凝土仿生自修复技术研究进展

张华玮*, 马新伟#

哈尔滨工业大学(威海)土木工程系, 山东 威海
Email: 947476324@qq.com, 18S130338@stu.hit.edu.cn, #maxinwei@hitwh.edu.cn

收稿日期: 2019年6月11日; 录用日期: 2019年6月21日; 发布日期: 2019年6月28日

摘 要

海洋混凝土自修复是根据生物体受伤后机体自修复的原理, 在混凝土中复合微生物孢子及其载体, 当海

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张华玮, 马新伟. 海洋混凝土仿生自修复技术研究进展[J]. 土木工程, 2019, 8(4): 916-922.

DOI: 10.12677/hjce.2019.84106

洋混凝土出现裂缝时, 微生物能够智能修复裂缝使其愈合, 恢复甚至提高混凝土强度, 阻止氯离子等有害离子侵蚀内部钢筋及混凝土。海洋混凝土自修复系统将会节省混凝土修补所需的高额费用, 节省建筑的维护费用, 有利于提高建筑物的安全性和耐久性。本文简要介绍了生物体自修复和海洋混凝土自修复的原理; 综述了国际有关普通混凝土和海洋混凝土自修复的研究现状; 分析了将普通混凝土自修复技术引入海洋混凝土自修复的可行性、目前研究中存在的问题并对未来的发展方向进行了展望。

关键词

海洋, 混凝土, 自修复, 微生物诱导碳酸沉淀, 微生物

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着海洋资源的不断开发以及沿海地区的飞速经济发展, 港口、码头、跨海大桥、海底隧道等海洋建筑物在发挥越来越重要的作用, 服役于海洋环境的钢筋混凝土结构也越来越多[1]。然而, 在海洋恶劣的腐蚀环境下, 一个影响海洋工程耐久性的重要因素就是结构混凝土的开裂问题。“十遂九裂”、“十坝九裂”, 裂缝问题总是与结构混凝土相伴而生, 且随着混凝土强度等级的提高而更加严重, 裂缝将成为氯离子在混凝土与钢筋表面之间侵蚀的通道, 从而降低工程的耐久性。

海洋腐蚀造成的经济损失是十分巨大的, 从事海洋腐蚀与防护研究工作的侯保荣院士指出, 与其他腐蚀相比, 海洋腐蚀尤为严重, 海洋腐蚀损失约占总腐蚀损失的 1/3, 达 7000 亿元[2]; 在美国, 1975 年由于腐蚀引起的混凝土损失达 700 亿美元, 其中由于钢筋混凝土结构的腐蚀引起的损失约占 40%; 1985 年则达到 1680 亿美元, 现在每年的维护费用更是高达 3000 亿美元以上[3]; 在英国, 每年的混凝土维护费用需要花费 200 亿英镑[4]。增强海洋设施的安全性和耐久性, 降低海洋腐蚀造成的巨大经济损失, 是需要迫切解决的重要问题。

修复海洋混凝土裂缝的方法分为被动修复和主动修复。胡鹰等[5]介绍了支设模板法对混凝土缺陷进行修复的方法, 储洪强等[6]、黄学松等[7]采用电化学沉积法修复混凝土裂缝, 上述两种方法是在混凝土出现肉眼可见裂缝时, 采用人工的方法进行混凝土的修复, 属于被动修复, 监测、维护等费用较高, 尤其是电化学沉积会造成氢脆、钢筋与混凝土之间握裹力降低等负面影响; 此外, 海洋混凝土一部分处于海洋环境中, 为裂缝的被动修复具有一定的困难。

海洋混凝土裂缝的主动修复主要指混凝土自修复技术, 分为化学自修复、物理自修复和生物自修复[8], 其中, 生物自修复由于其利用微生物的新陈代谢产生沉淀, 与原混凝土有良好的相容性, 对环境影响较小, 日益受到人们的关注。为促进海洋混凝土自修复技术的发展与推广, 本文总结了国际上关于海洋混凝土自修复技术的研究, 结合目前的研究现状, 提出了需要进一步研究和发展的方向, 希望能为海洋混凝土仿生自修复技术的发展提供一定的建议和指导。

2. 混凝土自修复技术研究进展

再生机能是生物体的显著特点之一, 机体在受到破坏以后能自行修补创伤。图 1 所示为骨的自修复过程[9], 自修复是生物体的一种自我保护、自我恢复的方式, 是对外界损伤的敏感响应[10]。

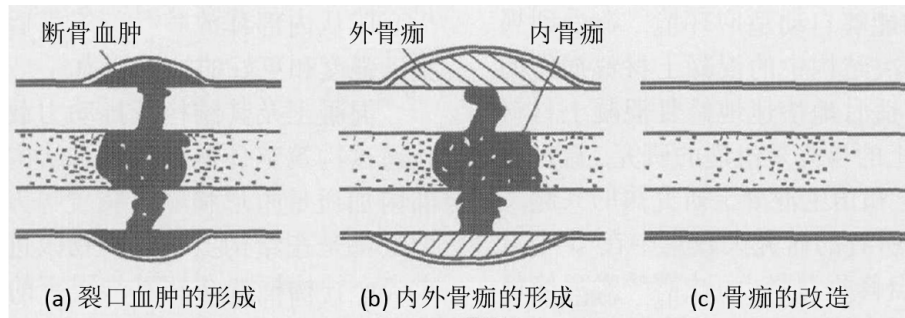


Figure 1. Self-repair of broken bone
图 1. 断骨的自修复

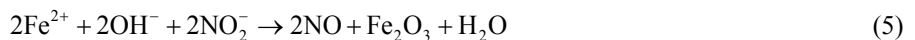
人们从人体自修复中获得灵感, 希望混凝土能自感知裂缝的产生, 通过微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)完成自修复。混凝土自修复技术的核心在于微生物的选择与固载。

2.1. MICP 原理及微生物的选择

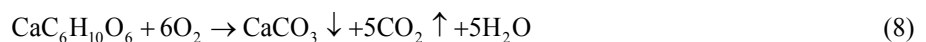
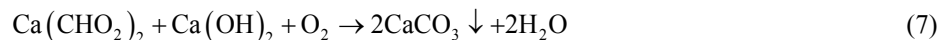
微生物诱导碳酸钙沉积可以在有氧和无氧环境下进行。以巴氏芽孢杆菌(*Bacillus pasteurii*) [11]、球形芽孢杆菌(*Bacillus sphaericus*) [12]、*Bacillus* sp. CT-5 [13]等为代表的厌氧菌产生脲酶, 将尿素分解为二氧化碳和氨气。氨气的产生导致 pH 升高, 将二氧化碳转化为碳酸根离子, 在钙的存在下沉淀为碳酸钙, 化学反应方程式[14]如下:



在无氧条件下, 某些兼性厌氧菌以硝酸盐作为呼吸链最终氢受体, 由硝酸盐还原酶催化产生亚硝酸盐 NO_2^- , 起到了抗腐蚀的作用。Rosemberg 等[15]发现, 在钝化氧化层被破坏的区域, 氯离子与亚铁离子形成配合物, 产生膨胀腐蚀产物。使用适当剂量的亚硝酸根离子可避免这一过程, 亚硝酸根离子与亚铁离子的反应化学方程式如下:



除了上述方式之外, 以科式芽孢杆菌(*Bacillus cohnii*)、假坚强芽孢杆菌(*Bacillus pseudofirmus*) [16]等为代表的细菌可以通过有氧呼吸诱导产生碳酸钙沉积, 反应的化学方程式[17]如下:



2.2. 载体的选择

混凝土是一种高度干燥的碱性环境, 因此并非所有细菌都适合掺入混凝土。然而, 在地球表面深处以及高度干燥和碱性的环境中发现了各种极端细菌。细菌用于处理这些极端环境的生存策略是形成孢子。孢子是特异的、坚固的细菌细胞, 与植物的种子有些类似。这些坚固的细胞非常适合混凝土掺入, 因为

它们可以承受机械压力, 并且在干燥状态下可以休眠 200~300 年[18]。

Jonkers 等[16]首先在水泥浆中加入细菌, 用于开发自主细菌为基础的自愈混凝土, 发现直接添加到糊状物中的细菌仅存活 4 个月, 分析认为, 后期养护时, 水泥空隙减小, 部分裸露的芽孢因生存空间不足死亡。可见, 通过载体为矿化细菌提供适当的生长空间、保持细菌酶化活性是十分必要的。

目前, 在载体选择主要分为天然载体材料和人工合成载体材料两种。

在天然载体材料方面, De Belie 等[19]采用硅藻土(DE)作为脲酶菌保护剂, 发现 DE 本身对细菌活性影响很小, 能抵御高碱环境对细菌的损伤, 从而保证细菌酶化活性, 当硅藻土用量为细菌用量 60%, 细菌具有最大酶化活力, 可修复 0.15~0.17 mm 的裂缝, 降低毛细吸水率 70%。钱春香[20]将脲酶菌载于琼脂或海藻酸钠, 涂刷于水泥石表面进行混凝土修复, 可降低 75%~90%吸水率。以上天然载体材料存在良好的生物相容性, 但容易被分解, 寿命较短。

在人工合成载体材料方面, Wiktor 等[21]将膨胀黏土颗粒负载耐碱芽孢杆菌掺入水泥砂浆试件, 愈合了 0.46 mm 的裂缝。Jiayun Wang [22]对比研究了硅凝胶(Silica gel)和聚氨酯多孔泡沫(PU)作为载体材料固载脲酶菌时的混凝土裂缝修复效果, 发现 PU 固载细菌修复砂浆试件在强度恢复率和渗透系数方面表现更好。罗园春[23]采用了环氧树脂 E-51 为壁材, 通过油相悬浮分散法制备了科氏芽孢杆菌 DSM6307 孢子的生物微胶囊, 可修复 0.1 mm 的裂缝。Jiayun Wang 等[24]利用微胶囊 MC 固载脲酶菌, MC 在混凝土搅拌过程中表现出柔韧性, 在混凝土水硬化后表现脆性, 实验发现, 修复后的混凝土渗水率降低近 10 倍, 80%裂缝可以被修复, 可修复 970 μm 的裂缝。人工合成载体材料相对天然载体而言, 具有不易分解、强度高、寿命长, 且价格低廉等特性。

3. 微生物修复海洋混凝土技术研究进展

目前, 对于微生物修复海洋混凝土技术的研究不多, 截至 2019 年 2 月, 从 Web of Science、Engineering Village、中国知网中检索海洋混凝土、微生物、自修复等关键词, 主要有以下研究成果。

3.1. 微生物的选择

适合海洋混凝土自修复的微生物需要满足的条件有: 能在混凝土的碱性环境中休眠, 在混凝土产生裂缝后芽孢可被激活; 可以在高压、高盐、高碱、低温、低氧环境下工作; 能利用海水中的离子或营养物质的离子产生沉淀。

目前, 海洋混凝土自修复的微生物选择是通过筛选适合在海洋混凝土环境下工作的微生物实现的。荷兰代尔夫特理工大学 Palin, D.等[25] [26] [27], 在西班牙的苏打湖沉积物样品上进行了浓缩。通过以下方式对菌种进行了筛选:

- 1) 巴氏灭菌(以分离孢子形成物),
- 2) 低温(以分离嗜冷菌),
- 3) 高碱度(以分离嗜碱性物质),
- 4) 海水盐度(以分离嗜盐菌),
- 5) 硝酸盐(以分离硝酸盐还原剂),
- 6) 乳酸盐和酵母菌(以分离乳酸盐和酵母菌作为营养素的细菌)。

Palin, D.等通过以上筛选条件的菌种中, 分离出 8 种形态的菌落, 命名为 PSY 1-8, 分别通过低温(8°C)、盐水(含盐度 3%)、高碱(pH = 9.2)、醋酸镁(价格低廉, 对压缩强度的影响最小, 镁与水泥浆中的氢氧根离子之间的反应产生的氢氧化镁已被证明有助于海水浸没水泥试样的自愈合能力[28] [29])、谷氨酸钠为营养物质进行筛选, 研究发现 PSY 5 能满足上述条件, 且在光学显微镜下发现其存在孢子。

此外, 研究人员发现 PSY 5 能够在需氧条件下使用氧气作为电子受体, 在厌氧条件下使用硝酸盐。如果要硝酸盐添加到愈合剂中, 那么这些细菌分离物将能够在可用时使用“游离”氧气呼吸, 并在氧气变得有限时转换为硝酸盐, 从而在缺氧条件下进行愈合。此外, 厌氧细菌还原硝酸盐的副产物的亚硝酸盐可以抑制钢筋腐蚀[30]。分离株 PSY 5 以登录号 KY548393 保藏在 Genbank 中。

韩国先进科学技术研究所 Kim, H.Y. [31]在韩国西部海域采集了海水, 在含尿素的培养基中培养后, 根据颜色变化来选择出了一种尿素分解菌。细菌的详细情况在一篇准备发表的论文: Isolation of ureolytic bacteria in marine for concrete crack healing material 中。

3.2. 载体的选择

荷兰代尔夫特理工大学 Palin, D. [32]等提出了一种由藻酸钙包封的细菌孢子和矿物前体化合物组成的微胶囊, 用于低温海洋环境中混凝土自修复。研究人员评估了氧气消耗、溶胀、以及在 8℃下在模拟海洋环境(SMCCS)混凝土裂缝溶液中形成生物复合材料的能力。浸入 SMCCS 六天后, 细菌在其表面形成方解石壳, 形成方解石-藻酸盐生物复合物。微胶囊膨胀 300%至最大直径 3 毫米, 理论计算估计 0.112 克微胶囊浸泡 14 天后, 能够产生约 1 立方毫米的方解石。此微胶囊在低温海洋环境中显示出自愈混凝土的巨大潜力, 为海洋混凝土自修复的载体研究提供了参考方向。

3.3. 淡水混凝土自修复技术引入到海洋混凝土自修复的可行性分析

微生物修复海洋混凝土的原理和修复淡水混凝土的原理基本相同, 微生物在海洋混凝土环境下形成孢子进行在载体内休眠, 当裂缝产生、海水进入裂缝, 海水等营养物质会激活孢子, 形成营养细胞, 使其产生沉淀封堵裂缝, 阻止海水进入混凝土内部侵蚀钢筋及混凝土。

除了 Palin D 等通过设置多个条件筛选适合在海洋混凝土环境下工作的微生物的方法外, 还可以通过现有研究进一步探究选择适合在海洋混凝土中进行工作的微生物。上海交通大学宋泉颖[33]发现球形赖氨酸芽孢杆菌(*L. sphaericus*)和嗜冷芽孢八叠球菌(*S. psychrophila*)在 15℃和 30℃、20 MPa 高压条件下可介导形成白云石晶体。分离自西太平洋 1914 米深海沉积物中的 *Shewanella piezotolerans* WP3, 既是耐压菌, 又是低温菌, 也能在一定成矿环境条件下产生极其微量的白云石沉淀。可以进一步探究是否能在混凝土环境介导沉淀。此外, 深圳大学彭慧等[34]总结了普通环境下不同菌种沉积碳酸钙修复效果, 可以探究在海洋环境下的修复效果。

在载体的选择方面, 人工合成载体材料相对天然载体而言, 具有不易分解、强度高、寿命长, 且价格低廉等特性, 可作为微生物载体的研究方向。

4. 结语与展望

裂缝仿生自修复海洋混凝土是一种自感知、自修复的智能材料, 能够对外界的变化进行响应, 并进行自我修复, 具有良好的经济、环境效益。虽然国内外研究人员对此展开了重要的工作, 但仍存在以下几个问题和挑战需要研究。

1) 修复微生物的选择

在微生物的选择方面, 目前, 能实现海洋混凝土自修复的微生物研究较少, 缺少修复效果的横向比较。此种微生物需要满足在混凝土的碱性环境中休眠, 在混凝土产生裂缝后芽孢可被激活, 且能在高压、高盐、高碱、低温、低氧环境下进行产生沉淀的工作, 要求较为苛刻。

2) 多次修复的可行性

目前研究的胶囊只能修复一次, 不能对混凝土同一位置的裂纹进行持续修复, 而跨海大桥等工程往往存在动荷载及海浪冲击的荷载, 可能在同一位置重复出现裂缝。鉴于此, 一种在开始搅拌时不激发微

生物活性、可持续修复混凝土的胶囊研究迫切需要进行。

3) 海洋自修复混凝土性能研究

目前, 单个因素对海洋混凝土自修复的强度、耐久性的研究较多, 对多种因素对自修复的耦合作用相关的模拟较少。海洋环境模拟(SMCCS)能够还原真实的海洋环境, 加速混凝土在海洋环境下的侵蚀, 海洋混凝土自修复在海洋环境模拟下的实验数据, 是加速自修复技术应用的重要依据。

4) 微生物修复的经济性

海洋混凝土自修复材料会带来材料本身和施工成本的提高, 但可以降低后期维修成本, 海洋混凝土自修复技术的经济高效性也是需要关注的方面。

未来建筑材料的发展趋势之一是智能化, 因此发展智能混凝土是不可避免的, 海洋混凝土自修复技术领域还存在许多问题, 需要对自修复系统进行检测与评价, 分析海洋混凝土自修复的机理, 推进海洋混凝土仿生自修复技术在工程中的应用。这是一门生物学、化学、土木工程、材料学等学科交叉性很强的科学, 需要多学科共同的交流与协作。

参考文献

- [1] 李文莉, 吕平, 井晓菲, 林静. 海洋混凝土腐蚀研究进展[J]. 环保科技, 2018, 24(3): 60-64.
- [2] 侯保荣. 献身腐蚀防护事业降服“吃金属的老虎”——专访中国工程院院士侯保荣[J]. 表面工程与再制造, 2016, 16(3): 2-8+1.
- [3] 金立兵. 多重环境时间相似理论及其在沿海混凝土结构耐久性中的应用[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [4] Mehta, P.K. (1997) Durability—Critical Issues for the Future. *Concrete International*, **19**, 27-33.
- [5] 胡鹰, 高翔, 袁新顺. 海工码头混凝土缺陷修复新材料与新工艺[J]. 建材世界, 2017, 38(3): 13-15.
- [6] 储洪强, 王培铭, 蒋林华. 电化学沉积法修复混凝土裂缝的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(11): 120-123.
- [7] 黄学松, 马永栋, 马龙, 何小松. 阴极保护技术在海工钢筋混凝土结构修复中的应用[J]. 中国港湾建设, 2014(8): 34-36.
- [8] 张鹏, 冯竟竟, 陈伟, 刘虎, 杨进波. 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.
- [9] 吴人洁. 复合材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000: 224-227.
- [10] 匡亚川, 欧进萍. 混凝土裂缝的仿生自修复研究与进展[J]. 力学进展, 2006, 36(3): 406-414.
- [11] Stocks-Fischer, S., Galinat, J.K. and Bang, S.S. (1999) Micro Biological Precipitation of CaCO₃. *Soil Biology and Biochemistry*, **31**, 1563-1571. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00082-6)
- [12] De Muynck, W., Cox, K., Belie, N.D. and Verstraete, W. (2008) Bacterial Carbonate Precipitation as an Alternative Surface Treatment for Concrete. *Construction and Building Materials*, **22**, 875-885. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.011>
- [13] Achal, V., Mukerjee, A. and Sudhakara Reddy, M. (2013) Biogenic Treatment Improves the Durability and Remediate the Cracks of Concrete Structures. *Construction and Building Materials*, **48**, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.061>
- [14] 袁雄洲, 孙伟, 陈惠苏. 水泥基材料裂缝微生物修复技术的研究与进展[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(1): 160-170.
- [15] Rosemberg, A.M. and Gaidis, J.M. (1979) Mechanism of Nitrite Inhibition of Chloride Attack on Reinforcing Steel in Alkaline Aqueous Environments. *Materials Performance*, **18**, 45-48.
- [16] Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O. and Schlangen, E. (2010) Application of Bacteria as Self-Healing Agent for the Development of Sustainable Concrete. *Ecological Engineering*, **36**, 230-235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036>
- [17] 徐晶. 基于微生物矿化沉积的混凝土裂缝修复研究进展[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(11): 2020-2027.
- [18] Schlegel, H.G., Zaborosch, C. and Kogut, M. (1993) *General Microbiology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [19] Wang, J.Y., Belie, N.D. and Verstraete, W. (2012) Diatomaceous Earth as a Protective Vehicle for Bacteria Applied for Self-Healing Concrete. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, **39**, 567-577.

<https://doi.org/10.1007/s10295-011-1037-1>

- [20] 王瑞兴, 钱春香. 微生物沉积碳酸钙修复水泥基材料表面缺陷[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(4), 457-464.
- [21] Wiktor, V. and Jonkers, H.M. (2011) Quantification of Crack-Healing in Novel Bacteria-Based Self-Healing Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **33**, 763-770. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.012>
- [22] Wang, J., Verstraete, W., Tittelboom, K.V., De Belie, N. and Verstraete, W. (2012) Use of Silica Gel or Polyurethane Immobilized Bacteria for Self-Healing Concrete. *Construction & Building Materials*, **26**, 532-540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054>
- [23] 罗园春. 生物微胶囊的制备及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2015.
- [24] Wang, J., Belie, N.D. and Verstraete, W. (2011) Self-Healing Concrete by Use of Diatomaceous Earth Immobilized Bacteria. *3rd International Conference on Self-Healing Materials*, Bath, 27-29 June 2011, 293-294.
- [25] Palin, D., Wiktor, V. and Jonkers, H.M. (2014) Towards Cost Efficient Bacteria Based Self-Healing Marine Concrete. In: Grantham, M., Muhammed Basheer, P.A., Magee, B. and Soutsos, M., Eds., *Proceedings of Concrete Solutions, 5th International Conference on Concrete Repair*, CRC Press, Boca Raton, FL, 105-108.
- [26] Palin, D., Wiktor, V. and Jonkers, H.M. (2016) A Bacteria-Based Bead for Possible Self-Healing Marine Concrete Applications. *Smart Materials and Structures*, **25**, Article ID: 084008. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/084008>
- [27] Palin, D., Geleijnse, M., Abbas, B., Wiktor, V. and Jonkers, H. (2018) A Bacteria-Based Agent for Realizing Cost-Effective Self-Healing Concrete in Low Temperature Marine Environments. *Microorganisms-Cementitious Materials Interactions*, Toulouse, 25 June 2018.
- [28] Palin D., Wiktor, V. and Jonkers, H.M. (2015) Autogenous Healing of Marine Exposed Concrete: Characterization and Quantification through Visual Crack Closure. *Cement and Concrete Research*, **73**, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.021>
- [29] Palin D., Jonkers, H. and Wiktor, V. (2016) Autogenous Healing of Sea-Water Exposed Mortar: Quantification through a Simple and Rapid Permeability Test. *Cement and Concrete Research*, **84**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.011>
- [30] Erşan, Y.Ç., Verbruggen, H., De Graeve, I., Verstraete, W., De Belie, N. and Boon, N. (2016) Nitrate Reducing CaCO₃ Precipitating Bacteria Survive in Mortar and Inhibit Steel Corrosion. *Cement and Concrete Research*, **83**, 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.01.009>
- [31] Kim, H.Y., Son, H.M. and Lee, H.K. (2018) Concrete Crack-Healing Materials Using Biocalcification by Ureolytic Bacteria Isolated in Marine Environment: An Overview. *Techconnect Briefs*, **2**, 223-226.
- [32] Palin, D. (2015) Bacteria-Based Agent for Self-Healing Marine Concrete. *International Conference on Self-Healing Materials 2015*, Durham, NC, 22-24 June 2015.
- [33] 宋泉颖. 微生物介导的白云石快速形成[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [34] 彭慧, 张金龙, 刘冰, 邓旭, 邢锋. 混凝土的微生物自修复技术研究进展[J]. 混凝土, 2014(8): 38-42+48.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org