

碳化作用下混凝土的微生物表面处理

徐 晶, 王先志

(同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 利用脲解型微生物的成矿效应对碳化后的混凝土表面进行处理. 测试了处理后混凝土的毛细吸水、抗水渗透和快速氯离子渗透性, 并测定了表面接触角, 综合分析了表面产物的微观形貌和组成. 结果表明, 碳化和微生物表面处理均能提高混凝土抗渗性能并降低吸水性, 后者形成了粗大的方解石晶体并紧密附着在混凝土表面. 碳化并不影响微生物成矿产物的晶型和形貌, 然而是否碳化却对微生物表面处理后的混凝土的吸水和抗渗行为有不同的作用规律. 碳化后再进行微生物表面处理, 混凝土表层吸水系数的降低幅度相比未碳化直接处理更高, 其主要原因在于微生物表面处理能够改善碳化所带来的亲水问题.

关键词: 混凝土; 碳化; 微生物; 表面处理; 耐久性

中图分类号: TQ172.1

文献标志码: A

Microbial Surface Treatment of Concrete Under Carbonation

XU Jing, WANG Xianzhi

(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In this paper, the mineralization effects of ureolytic type microorganism were employed in the surface treatment of concrete after carbonation. The capillary water absorption, resistance to water permeation, and rapid chloride permeation (RCP) of concrete were tested after treatment. The contact angle of the surfaces was measured. The morphology and composition of the deposits were comprehensively studied. The results show that both carbonation and microbial surface treatment can increase the resistance to permeability while reducing the water absorption of concrete. Large calcite crystals, which tightly adhered to the concrete surfaces, are formed by microbial treatment. Carbonation has no impact on the crystalline and morphology of microbial precipitates. However, after microbial surface treatment, different effects are observed on the water absorption and permeation of concrete with or without

carbonation. When microbial surface treatment is performed after carbonation, the range of further reduction in terms of water absorption coefficient is higher compared with the reduction by the treatment on uncarbonated concrete. The main reason for this phenomenon is that the degree of hydrophilicity of concrete after carbonation decreases after microbial surface treatment.

Key words: concrete; carbonation; microorganism; surface treatment; durability

作为一种多孔准脆性材料, 混凝土在各种环境侵蚀性介质的作用下, 会由于复杂的物理、化学过程导致劣化, 甚至引发内部钢筋锈蚀, 进而造成结构整体破坏, 无法满足现代混凝土结构对耐久性的需求^[1-5]. 为阻止有害介质的侵蚀, 延长结构寿命, 对混凝土进行表面处理是一种非常有效的方式. 目前已有各种有机或无机类表面处理剂, 其在混凝土结构的表面防护中发挥了重要作用. 但既有材料不同程度上存在易老化、相容性差、环境污染等缺陷^[6-9].

近来, 微生物诱导沉积作为一种新的防护手段而受到关注. 由于沉积产物环境友好、与基体相容性好等优势, 已被用于混凝土的表面处理^[10-16]. De Muynck 等^[17]利用微生物对混凝土表面进行沉积处理, 发现处理后混凝土的毛细吸水率、气体渗透率与传统硅烷处理剂的效果接近. 王瑞兴等^[18]将琼脂作为菌株和营养物的载体, 对水泥基材料表面进行涂刷处理, 7 d 后发现表面紧附着一层连续的碳酸钙层, 有效地封闭了材料表面孔隙, 其表面吸水率显著降低, 在材料表面形成了有效的防护.

实际上, 混凝土在服役过程中均会产生不同程度的碳化, 但迄今大部分的研究工作都未考虑碳化作用对微生物表面沉积处理的影响. 因此, 本文拟将碳化因素纳入研究体系, 通过琼脂负载, 利用微生物

收稿日期: 2018-04-04

基金项目: 国家自然科学基金(51378011); 国家重点研发计划(2016YFC0700802); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 徐 晶 (1984—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为先进水泥基材料. E-mail: nanonewman@126.com

矿化沉积对经历加速碳化后的混凝土表面进行处理,并评价处理效果。

1 试验方法

1.1 细菌及其培养方式

菌株全程采用巴氏芽孢杆菌 (*Sporosarcina pasteurii*)。首先配制 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 蛋白胨, $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 牛肉膏和 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 尿素混合营养液并分装于锥形瓶,在高压灭菌锅中于 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 灭菌 20 min 。将菌株以 1% (体积分数) 进行接种后,在温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、振荡频率 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的恒温摇床中振荡培养 7 d 。随后以 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速离心 10 min ,再经 3 次无菌生理盐水洗涤后,借助显微计数镜检法稀释成颗粒浓度为 $1.7 \times 10^{10} \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的菌液并置于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中保存备用。

表1 混凝土试块尺寸、表面处理方式以及测试项目

Tab.1 Size of concrete specimens, method of surface treatment, and items of testing

组别	试块高度/mm	试块直径/mm	加速碳化	微生物表面沉积处理	测试项目
N-C1	50	100	否	否	毛细吸水、快速氯离子渗透
N-S1	50	100	否	是	毛细吸水、快速氯离子渗透
N-C2	100	46	否	否	抗水渗透
N-S2	100	46	否	是	抗水渗透
C-C1	50	100	是	否	毛细吸水、快速氯离子渗透
C-S1	50	100	是	是	毛细吸水、快速氯离子渗透
C-C2	100	46	是	否	抗水渗透
C-S2	100	46	是	是	抗水渗透

1.3 微生物表面沉积处理

在直径 100 mm 和 46 mm 的试块表面分别滴加 10.0 mL 和 2.0 mL 颗粒浓度为 $3 \times 10^8 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 菌液并涂匀,待其表面干燥后,将经 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 高压蒸汽灭菌 20 min 后冷却至 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 的琼脂基营养液与过滤灭菌的尿素溶液混合,得到质量浓度为 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 尿素、 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 蛋白胨、 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 牛肉膏、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化钙、 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 琼脂的营养液。迅速在直径 100 mm 和 46 mm 试块上表面各添加 15.0 mL 和 3.2 mL 营养液并待其凝固。将试块置于室温进行微生物沉积。另配制 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 尿素、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化钙无菌混合液,前 3 d 每隔 6 h 添加 1.0 mL 尿素和氯化钙混合液,之后的 4 d 每隔 12 h 添加 1.0 mL 混合液。沉积完成后,采用 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 热水浸泡并冲洗以去除残余琼脂和其他残余物,最后观察表面沉积效果。

1.4 表征测试

1.4.1 毛细吸水测试

将直径为 100 mm 的试块表面处理,置于 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱内干燥 3 d ,取出并称量初始质量。然后将试

1.2 混凝土样品制备

水泥为 P·II 52.5 水泥;细骨料选用粒径为 $0.075 \sim 5 \text{ mm}$,细度模数为 2.6 的中砂;粗骨料选用 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 连续级配的玄武岩碎石。水:水泥:砂:碎石为 $1.00:2.09:3.20:5.17$ (质量比)。成型两种不同尺寸的圆柱形试块以进行不同项目的测试(表 1)。试块成型 1 d 后脱模,于 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 在饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中养护 28 d 。养护结束后置于 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱内烘干 24 h ,随后在试块侧面涂刷环氧树脂密封。将试块分为碳化与非碳化两大组,碳化组按照标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB / T50082—2009)进行加速碳化。试块置于 CO_2 体积分数为 $(20 \pm 3)\%$ 、相对湿度为 $(70 \pm 5)\%$ 的碳化箱中,加速碳化 3 d 后取出。不同尺寸的试块各取 3 块,利用压力机将试块沿轴向劈开,喷洒酚酞溶液以测量碳化深度。经测试,所有试块的平均碳化深度为 1.6 mm 。

块置于去离子水中,经表面处理的面朝下,并保证水淹没试块高度的 $2/3$ 。每隔一段时间取出试块,用拧干的湿毛巾将试块侧面与底部的水分擦去后称重,然后再放回。测试持续 36 h ,试件毛细吸水系数 k 可由以下公式计算:

$$k = \frac{Q}{A\sqrt{t}} \quad (1)$$

式中: Q 为试件吸水量, g ; A 为试件吸水表面积, cm^2 ; t 为试件吸水时间, h ; k 为试件毛细吸水系数, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-0.5}$ 。

1.4.2 抗水渗透测试

采用上海东兴建材试验设备有限公司生产的抗水渗透仪(型号 SS-1.5)。测试过程参考标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB / T 50082—2009),将烘干后的直径 46 mm 试块置于抗渗仪上,施加 1 MPa 水压并持压 24 h 后取出。利用压力机将试块沿轴向劈开,随后用记号笔描出水的痕迹,每个试块选取 6 点测量水渗透深度。试件相对渗透系数 S_k 通过以下公式获得:

$$S_k = \frac{mD_m^2}{2TH} \quad (2)$$

式中: S_k 为试件相对渗透系数, $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$; m 为混凝土吸水率, 一般取 0.03; D_m 为试件平均渗水高度, mm ; T 为保持水压时间, h ; H 为水压力, 以水柱高度表示, mm .

1.4.3 快速氯离子渗透测试

测试参照标准《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》(GB / T 50082—2009), 对直径 100 mm 的试块进行快速氯离子渗透试验, 测试持续 6 h, 每隔 10 min 记录电流值并观察温度变化, 最后计算总电通量.

1.4.4 微观形貌及物相分析

将试块破坏后, 敲取包含沉积产物的小块, 分别采用扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM)、能谱仪 (energy dispersive X-ray spectrometer, EDS) 进行形貌和元素分析. 同时刮取表面沉积产物, 采用 X 射线衍射分析仪 (X-ray diffraction, XRD) 进行物相分析.

1.4.5 表面接触角测试

在处理过的试块表面采用躺滴照相法记录液滴在气、液、固三相交点处经液滴内部至气液界面的夹角 θ , 以此夹角作为表面接触角, 采用图像分析软件进行分析计算.

2 试验结果

2.1 吸水和抗渗性能

混凝土吸水和抗渗性测试包括毛细吸水、抗水渗透以及快速氯离子渗透三个方面. 各组混凝土试块的毛细吸水率测试结果如图 1 所示. 未经任何处理试块的吸水系数最大, 36 h 达到了 $0.013 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-0.5}$. 碳化或微生物表面处理均能不同程度

降低混凝土的吸水系数, 且以微生物处理效果更为显著. 若分别以未碳化以及碳化的试块作为基准, 再进行微生物表面处理, 吸水系数下降的幅度分别可达 35% 和 70%. 可见, 碳化后再进行微生物表面处理, 其降低混凝土表层吸水的程度相比未碳化直接进行微生物表面处理的试件有明显提升.

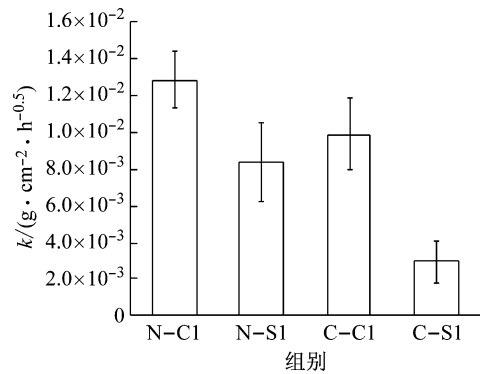


图 1 毛细吸水性能

Fig. 1 Performance of capillary water absorption

图 2a 为抗水渗透测试结果, 其中未经任何处理试块的相对渗透系数最大, 平均为 $2.1 \times 10^{-6} \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. 经碳化和微生物表面处理后的相对渗透系数下降了 47% 和 81%. 若将碳化后的试块作为基准, 则再经微生物处理后的相对渗透系数下降了 57%. 因此, 碳化后再进行微生物表面处理, 其提高混凝土抗水渗透的程度相比未碳化直接进行微生物表面处理有所下降. 图 2b 为电通量测试结果. 基准试块的 6 h 电通量达到了 3 463 C, 而经碳化和微生物表面处理后的电通量相对基准降低了 11% 和 10%. 同样, 若以碳化后的试块为基准, 再进行微生物处理后相对下降幅度为 9%. 与抗水渗透结果类似, 碳化后再进行微生物表面处理, 其改善混凝土抗氯离子渗透的程度相比未碳化直接进行微生物表面处理有所降低.

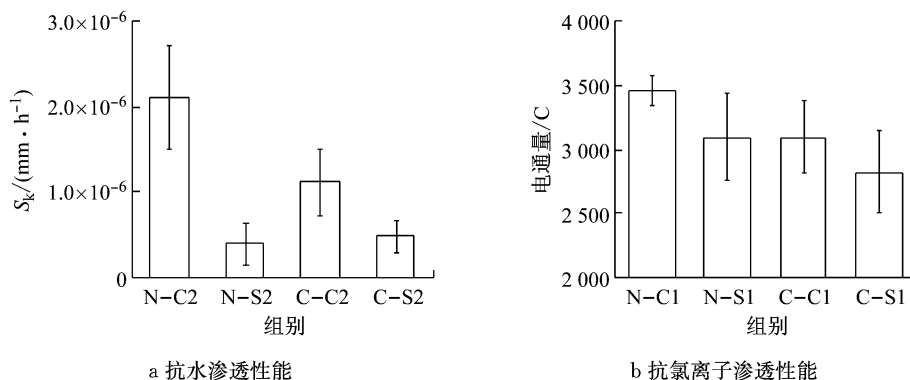


图 2 抗水渗透及抗氯离子渗透性能

Fig. 2 Performance of resistance to water and chloride ions permeation

2.2 表面微观形貌及物相分析

采用 SEM 表征了经不同方式的表面处理后混凝土表层微观形貌. 图 3a 是未经任何处理的基准样品, 表面主要为颗粒状产物, 以无定形水化产物 C-S-H 凝胶为主, 且表面较疏松多孔. 图 3b 是经碳化处理的样品, 相比基准样品其表面致密性明显提高, 孔隙相对细化, 并且存在少量粒径在 1 μm 左右的六面体状 CaCO_3 晶体颗粒. 图 3c、3d 均为经微生物表面处理后的表面形貌, 可见无论之前是否经过碳化, 微

生物沉积都获得了大量的六面体状 CaCO_3 晶体, 且晶粒尺寸远大于碳化所产生的晶粒, 其粒径在 10 μm 以内. 同时, 晶粒紧密堆叠并均匀覆盖在表面, 因此能够进一步提升混凝土表层致密度.

在更高放大倍数的 SEM 照片上选区进行能谱元素分析(见图 3a~3d 右上角选区), 发现元素主要以 Ca、C、O 为主, 结合 XRD 分析充分证实了沉积产物的主要成分是方解石型 CaCO_3 晶体, 如表 2、图 4 所示.

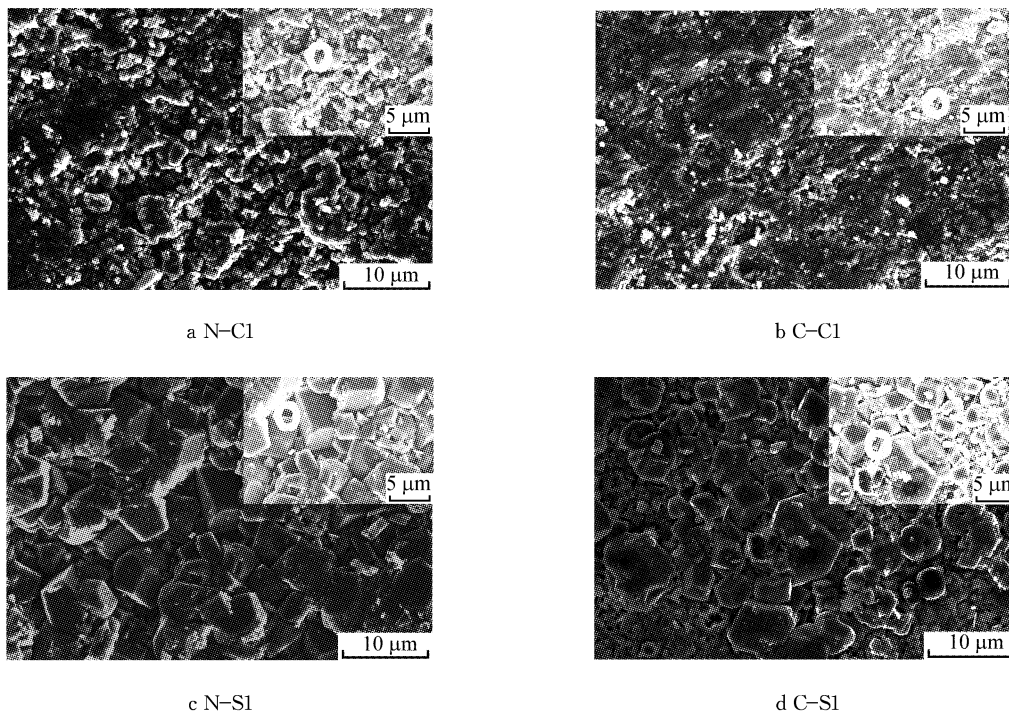


图 3 混凝土表面 SEM 照片
Fig.3 SEM images of concrete surfaces

表 2 EDS 元素分析结果

Tab.2 Results of EDS element analysis

组别	$w(\text{C})/\%$	$w(\text{O})/\%$	$w(\text{Ca})/\%$	$w(\text{Si})/\%$	$w(\text{Al})/\%$
N-C1		43.75	49.09	4.54	0.93
C-C1	3.50	23.50	68.65	2.77	0.01
N-S1	11.23	39.94	48.02	0.71	0.08
C-S1	18.85	49.56	31.34	0.26	

2.3 表面接触角

表 3 为经不同表面处理过程后所测定的样品表面接触角. 由表 3 可见, 碳化后混凝土表面接触角明显减小, 即亲水性增强, 使得混凝土表面更易吸水. 而经微生物表面处理后接触角下降程度并不明显. 然而, 在碳化后再进行微生物表面处理, 表面接触角相比碳化后得到明显提高, 即疏水性能获得了提高.

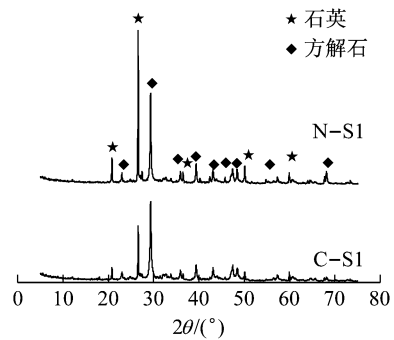


图 4 微生物表面处理产物的 XRD 分析
Fig.4 XRD analysis of deposits after microbial surface treatment

表 3 混凝土表面接触角分析

Tab.3 Analysis of contact angle of concrete surfaces

组别	接触角/(°)	
	平均值	标准差
N-C1	86.00	0.07
N-S1	79.50	0.08
C-C1	58.00	0.10
C-S1	70.25	0.11

3 讨论分析

通过对测试结果的描述,首先可发现,碳化作用本身就能在一定程度上改善混凝土的输运性,表现为吸水系数、水相对渗透系数和氯离子电通量下降。由 SEM 分析可见,碳化后混凝土表面致密程度提高。由于在碳化过程中,外界的 CO_2 会由混凝土表面向内部进行扩散,与主要水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应并生成 CaCO_3 ,这一过程能够堵塞孔隙,从而降低混凝土整体输运性。已有研究发现,碳化后混凝土的抗气渗性提高,而孔隙率下降,且此效应对于高水灰比(质量比)、低强度等级的混凝土尤为明显^[19-20]。不过本文同时也发现,碳化后混凝土的表面接触角下降,倾向于更亲水,这可能是由于碳化改变了混凝土表面的物理化学状态和孔结构。Johannesson 等^[21]的研究表明,碳化尽管降低了总孔隙率,却提高了 2~7 nm 范围内的微孔体积,这将造成表面自由能提高。Smarzewski 等^[22]则证实,高的表面能会导致混凝土表面亲水性提高。

利用微生物矿化沉积作用对混凝土表面进行处理,就改善输运性而言也能获得与碳化类似的效果,并且其幅度更显著。与碳化不同的是,微生物矿化沉积所产生的 CaCO_3 晶体尺寸大,基本在 1~10 μm 范围。所形成的 CaCO_3 晶体一方面作为沉积层致密地覆盖在混凝土表面,另一方面也能堵塞较大尺寸的毛细孔,因而可以有效降低混凝土输运性,既有的研究工作也揭示了类似的现象^[23-25]。同时还可发现,微生物矿化所形成的 CaCO_3 沉积层并未明显改变混凝土表面的润湿性,这与 De Muynck 等^[26]的研究结果也是一致的。

本文研究结果表明,碳化作用并不影响微生物成矿产物的晶型和形貌,而是否碳化却对微生物表面处理后混凝土的吸水和抗渗行为有不同的作用规律。若分别以未碳化和碳化后的混凝土试件作为基准,随后进行微生物表面处理,可以发现:未碳化试件直接进行微生物表面处理,其吸水系数降低幅度低于碳化后再进行微生物表面处理的试件;而与之

相反,前者的水相对渗透系数和氯离子电通量在微生物表面处理后的下降幅度均高于后者。这种差异主要还是由于吸水和抗渗的影响机制不同所致。一般而言,混凝土的抗渗性主要取决于孔隙率、孔分布以及孔的连通性,而吸水性则还与表面的亲水程度相关。由接触角测试结果可知,碳化后再进行微生物表面处理,混凝土的表面接触角得到明显提高。针对碳化之后的混凝土,微生物表面处理不仅提高了表面致密度,降低了孔隙率,还更大程度上改变了碳化后所造成的亲水性状况,减小了混凝土吸水能力,提升了混凝土的耐久性。然而,亲水性状况的改善并不直接影响混凝土孔体系,因此其对抗水渗透和抗氯离子渗透的作用并不明显。

4 结论

碳化和微生物表面处理均能提高混凝土表面致密度,从而降低混凝土吸水性并提高抗渗性。碳化作用并不影响微生物成矿产物的晶型和形貌,但是否碳化却对微生物表面处理后混凝土的吸水和抗渗行为有不同的作用规律。微生物表面处理对非碳化和碳化混凝土的表层吸水系数降低幅度分别达到 35% 和 70%,而水相对渗透系数下降幅度则分别为 81% 和 57%,电通量下降幅度分别为 10% 和 9%。即相比未碳化混凝土直接进行微生物处理,碳化后再进行微生物处理的吸水系数降低幅度扩大,而渗透系数降低幅度收窄。该差异主要是由于吸水性不仅取决于孔体系,还与混凝土表面亲水状态有关,而微生物表面处理恰恰能够改善碳化所带来的亲水问题。

参考文献:

- [1] NOLAN É, BASHEER P A M, LONG A E. Effects of three durability enhancing products on some physical properties of near surface concrete[J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(5): 267.
- [2] QIAN C, WANG J, WANG R, et al. Corrosion protection of cement-based building materials by surface deposition of CaCO_3 by bacillus pasteurii[J]. Materials Science & Engineering C, 2009, 29(4): 1273.
- [3] AGUIAR J B. Coatings for concrete protection against aggressive environments[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2008, 6(1): 243.
- [4] IBRAHIM M, AL-GAHTANI A S, MASLEHUDDIN M, et al. Use of surface treatment materials to improve concrete durability[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(1): 36.
- [5] MUYNCK W D, DEBROUWER D, BELIE N D, et al.

- Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(7): 1005.
- [6] PAN X, SHI Z, SHI C, *et al.* A review on concrete surface treatment. Part I: types and mechanisms[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 132(8): 578.
- [7] PAN X, SHI Z, SHI C, *et al.* A review on surface treatment for concrete. Part 2: Performance [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 133(2): 81.
- [8] 徐晶,姚武. 微生物非脲解作用诱导碳酸钙沉积研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(10): 1542.
XU Jing, YAO Wu. Non-ureolytic microbiologically-induced calcium carbonate precipitation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(10): 103.
- [9] MTAYER-LEVREL G L, CASTANIER S, ORIAL G, *et al.* Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 126(1/4): 25.
- [10] DICK J, DE WINDT W, DE GRAEF B, *et al.* Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by bacillus species[J]. *Biodegradation*, 2006, 17(4): 357.
- [11] CHEN H, QIAN C, HUANG H. Self-healing cementitious materials based on bacteria and nutrients immobilized respectively[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 126(3): 297.
- [12] WILLIAMS S L, KIRISITS M J, FERRON R D. Influence of concrete-related environmental stressors on biomineralizing bacteria used in self-healing concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 139(S C): 611.
- [13] MUYNCK W D, COX K, BELIE N D, *et al.* Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5): 875.
- [14] NEMATI M, VOORDOUW G. Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ [J]. *Enzyme & Microbial Technology*, 2003, 33(5): 635.
- [15] WANG R. Study on microbiological precipitation of CaCO_3 [J]. *Journal of Southeast University*, 2005, 35(S1): 191.
- [16] XU J, YAO W, JIANG Z W. Non-ureolytic bacterial carbonate precipitation as a surface treatment strategy on cementitious materials[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(5): 983.
- [17] DE MUYNCK W, COX K, BELIE N D, *et al.* Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5): 875.
- [18] 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): 37.
WANG Ruixing, QIAN Chunxiang. Restoration of defects on the surface of cement-based materials by microbiologically precipitated CaCO_3 [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, 36(4): 37.
- [19] CLAISSE P A, EL-SAYAD H, SHAABAN I G. Permeability and pore volume of carbonated concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 1999, 96(3): 378.
- [20] SONG H W, KWON S J. Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure[J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(6): 909.
- [21] JOHANNESSON B, UTGENANNT P. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(6): 925.
- [22] SMARZEWSKI P, BARNAT-HUNEK D. Mechanical and durability related properties of high performance concrete made with coal cinder and waste foundry sand[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 121(5): 9.
- [23] DE MUYNCK W, DEBROUWER D, DE BELIE N, *et al.* Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(7): 1005.
- [24] CHUNXIANG Q, JIANYUN W, RUIXING W, *et al.* Corrosion protection of cement-based building materials by surface deposition of CaCO_3 by *Bacillus pasteurii*[J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, 29(4): 1273.
- [25] WANG R X, QIAN C X, WANG J Y. Bio-deposition of a calcite layer on cement-based materials by brushing with agar-immobilised bacteria[J]. *Advances in Cement Research*, 2011, 23(4): 185.
- [26] DE MUYNCK W, COX K, DE BELIE N, *et al.* Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(10): 875.