文章编号:1007-9629(2024)01-0030-07

TA/SiO_2 疏水涂层及其对混凝土抗侵蚀性能的影响

来晓鹏¹, 王元战^{1,*}, 王禹迟², 孙熙平²
(1.天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;
2.交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要:基于贻贝仿生原理,成功制备了单宁酸(TA)/SiO2疏水涂层,通过设置22组工艺组合,综合水接触角、电通量和表面微观结构,得到了涂层的最优制备工艺.针对最优制备工艺涂层,通过自然扩散试验研究了其对混凝土抗离子渗透性能的影响,并采用磨耗和酸碱腐蚀试验研究了涂层稳定性. 结果表明,TA/SiO2疏水涂层表面具有丰富的微纳米结构,水接触角达148.1°,至少能够减少 75.31%的离子渗透进入混凝土,且稳定性优良.

关键词:疏水涂层;混凝土;离子渗透;贻贝仿生

中图分类号:TU593 文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.01.005

TA/SiO₂ Hydrophobic Coating and Its Effect on Corrosion Resistance of Concrete

LAI Xiaopeng¹, WANG Yuanzhan^{1,*}, WANG Yuchi², SUN Xiping²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: A new type of anticorrosive coating for concrete, glycerite(TA)/SiO₂ hydrophobic coating was developed successfully based on the mussel bionic principle. Twenty-two sets of process combinations were set up to obtain the optimal preparation process for the coating in terms of the water contact angle, electric flux value and surface microstructure. The effect of the coating from the optimal preparation process on the anti-ionic penetration performance of concrete was investigated by natural diffusion test, and the stability of the coating surface has rich micro and nano structures, with a water contact angle 148.1°, which can improve the ion penetration of concrete by at least 75.31%, and has excellent stability.

Key words: hydrophobic coating; concrete; ion permeation; mussel bionic

海洋工程中,复杂的海洋环境对混凝土材料的 服役性和耐久性带来了严峻的考验^[1-3],传统防腐涂 层存在附着力差或环境污染等问题^[4],开发新型环保 涂层的需求日益迫切.受粘附在海边礁石上贻贝的 启发,Benedict等^[5]研究发现贻贝足丝蛋白中的多巴 是这种黏附能力的关键成分.多巴的自聚产物聚多 巴胺具有超强黏附性^[6-7]和优良的耐腐蚀性^[8-9],为开 发新型混凝土防腐涂层提供了思路.但高成本的多 巴胺难以在工程中大面积应用,低成本的单宁酸 (TA)与多巴胺有类似的结构和性质,是多巴胺优良 的替代品^[10].Xiao等^[11]首次在混凝土表面制备了TA/ Fe(Ⅲ)涂层,涂层水接触角为70.9°,可使混凝土抗氯

第一作者:来晓鹏(1998—),男,山东日照人,天津大学硕士生.E-mail: 313892173@qq.com 通讯作者:王元战(1958—),男,天津人,天津大学教授,博士生导师,博士.E-mail: yzwang@tju.edu.cn

收稿日期:2023-02-01;修订日期:2023-05-20

基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2022YFB2603001);中央级公益性质科研院所科研创新基金资助项目(TKS20220514);国家 自然科学基金资助项目(51979191)

离子渗透性提高24%.但贻贝仿生涂层在混凝土防 护领域研究较少,且防护效果与商用涂层差距较大.

针对TA亲水基团的负面影响,本文引入强度较高的纳米SiO₂分子,并进行疏水改性,开发了一种新型贻贝仿生涂层——TA/SiO₂疏水涂层,其将TA和纳米SiO₂二者的优点相结合,提升了涂层的防护效果和应用潜力.此外,该涂层的制备方法简单温和,环境友好,原材料廉价易得,解决了疏水涂层工艺复杂、成本高、不够环保等缺点.采用控制变量试验得到了涂层的最优制备工艺,通过自然扩散试验研究了涂层对混凝土抗氯离子和硫酸盐渗透性能的改善能力,并采用磨耗和酸碱腐蚀试验研究了涂层的稳定性.

1 试验

1.1 原材料

TA、纳米SiO₂、硝酸铁、γ-氨丙基三乙氧基硅烷 (APTES)、十六烷基三甲氧基硅烷(HDTMS)、无水 乙醇均为分析纯.水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥; 细骨料为细度模数2.61的天然河砂;粗骨料为粒径 5~25mm连续级配的天然碎石.

1.2 试件制备

设计混凝土强度等级为C35,水灰比为0.50(质量比,文中涉及的含量、水灰比等均为质量分数或质量比),制备尺寸为 ϕ 100×50 mm的标准圆柱体试件和100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件.混凝土中水、水泥、石、砂的用量分别为195.0、390.0、1212.4、652.8 kg/m³,其28 d抗压强度为38.16 MPa. 试件成型24 h 后拆模,在标准养护箱中养护至28 d; 在涂覆涂层前对混凝土试件表面进行打磨,再将表面附着物清理干净.

涂层为三层结构:底层采用硅烷偶联剂 APTES 作为试件表面处理剂,加强涂层与混凝土之间的黏 结性;中间层为TA和纳米SiO₂构成的微纳米层;面 层采用低表面能的HDTMS修饰,实现疏水性.TA/ SiO₂疏水涂层制备过程为:首先,将混凝土试件放入 APTES溶液中,在磁力搅拌条件下浸泡2h,使 APTES充分水解吸附,将试件取出晾干;接着,将经 APTES表面处理后的试件放入TA/SiO₂混合溶液 (pH=8)中,在室温下磁力搅拌24h,取出洗净后放 入硝酸铁溶液中浸泡30min,取出洗净晾干;最后,将 试件浸泡在HDTMS乙醇溶液中,2h后取出晾干.

涂层的密实性、粗糙度等性质主要受反应物浓度、pH值、反应温度及反应时间等因素的影响,其中 pH值、反应温度及反应时间等因素已有学者进行了 研究^[11-12],故本文仅针对TA/SiO₂的质量浓度 ρ 、 APTES的含量 w_{APTES} 、HDTMS的含量 w_{HDTMS} 及 TA/SiO₂中TA、SiO₂的质量比*M*进行研究,以得到 涂层的最优制备工艺.采用控制变量法,设置了22组 工艺组合,其试验方案见表1.

表1 试验方案 Table 1 Experimental scheme

Group number	$w_{\rm APTES}/\%$	$w_{ m HDTMS}/\%$	$\rho/(\mathrm{mg}\cdot\mathrm{mL}^{-1})$	M
1	0.25	3	4	1:1
2	0.50	3	4	1:1
3	0.75	3	4	1:1
4	1.00	3	4	1:1
5	1.25	3	4	1:1
6	1.50	3	4	1:1
7	1.00	3	1	2:1
8	1.00	3	1	1:1
9	1.00	3	1	1:2
10	1.00	3	2	2:1
11	1.00	3	2	1:1
12	1.00	3	2	1:2
13	1.00	3	4	2:1
14	1.00	3	4	1:2
15	1.00	3	8	2:1
16	1.00	3	8	1:1
17	1.00	3	8	1:2
18	1.00	1	4	1:1
19	1.00	5	4	1:1
20	1.00	7	4	1:1
21	1.00	10	4	1:1
22	1.00	15	4	1:1

1.3 测试方法

1.3.1 表面分析与表征

采用TM4000Plus型扫描电子显微镜(SEM)观 察涂层的表面形貌;利用JC200D2M型光学接触角 测量仪测量涂层的水接触角δ;使用Nicolet iS20型 傅立叶变换红外光谱仪(FTIR)对涂层粉末样品进 行红外扫描.

1.3.2 离子渗透试验

离子渗透试验采用电通量法和自然扩散法.电 通量法依照JTS/T 236—2019《水运工程混凝土试 验检测技术规范》,采用尺寸为 ¢100×50 mm的标准 圆柱体试件,测定其在6h内通过的电荷量 Q.自然扩 散法模拟全日潮条件(循环周期为24h),氯离子渗透 试验采用3.10%的NaCl、0.43%的Na₂SO₄及0.55% 的MgCl₂混合溶液来模拟海水.硫酸盐渗透试验采用 5.00%的Na₂SO₄溶液.采用边长为100 mm的立方体 试件,保留2个对面为扩散面,其余面刷涂环氧树脂 以阻断离子传输.达到相应暴露时间*t*(30、60、100、 140、180 d)后取出试件,在试件扩散面沿扩散方向向 内逐层磨粉取样.对取得的混凝土粉末,分别采用自 动电位滴定仪和紫外可见分光光度计测定粉末样本 中的氯离子含量*w*(Cl⁻)和SO₄²⁻含量*w*(SO₄²⁻).

1.3.3 涂层稳定性试验

涂层耐酸碱性能试验是将涂层试件涂层面朝上 分别浸泡在pH值为4、5、6、7、8、9、10的溶液中,30d 后取出测量其水接触角并进行电通量试验.涂层耐 磨损性能通过往复运动磨耗试验来测试,将立方体 试件涂层面朝下放置在25 μm(500目)砂纸上,荷载 压力约为2.4 kPa.水平推动试件在砂纸上做往复运 动,每运动2 m后测试其水接触角.对摩擦距离 d 为 0、4、8、12、16、20 m的试件进行模拟海水自然扩散试 验(t=120 d);当 d=45 mm时,测试得到TA/SiO₂疏 水涂层的水接触角为104.5°.

2 结果与讨论

2.1 涂层的最优制备工艺

2.1.1 底层

硅烷偶联剂 APTES 作为表面处理剂,能够改善 有机涂层和混凝土材料界面相容性差的问题^[13],同 时硅烷偶联剂处理过的混凝土抗氯离子侵蚀能力也 有一定的提高^[14-15].

在 $M=1:1,\rho=4$ mg/mL、 $w_{HDTMS}=3\%$ 的条件下,改变 w_{APTES} ,测试涂层混凝土的电通量和水接触角,结果见图1.由图1可见,涂层混凝土的电通量随着 w_{APTES} 的增大而缓慢下降,水接触角维持在147.0° 左右.可见增大 w_{APTES} 能够小幅度提高试件的抗氯离子渗透能力,但是无法提高其疏水性.这是因为底层主要起着改善有机-无机界面黏结性的作用,加之其本身也具有一定的耐蚀性,因此涂层的防护性能有





所提升.但是涂层的防护性和疏水性主要由中间层和面层来实现,因此增大w_{APTES}无法提高涂层的疏水性,且对混凝土抗渗性的改善也是有限的.当 w_{APTES}>1.00%后,增大w_{APTES}对涂层的防护性影响不大,结合成本确定APTES的最优含量为1.00%. 2.1.2 中间层

在 w_{APTES} =1.00%、 w_{HDTMS} =3%的条件下,改变 $M 和 \rho$,测试涂层的疏水性和抗渗性,结果见图2.由 图2可见:当 ρ =4 mg/mL、M=1:1时,涂层性能最 优,此时水接触角为146.3°.





and M

不同 TA/SiO₂溶液质量浓度和质量比下涂层的 SEM 照片见图 3.由图 3可见:当 ρ 较低时,不足以形成 足够厚度的黏附层,存在部分未被覆盖的混凝土基材 (见图 3(a));当 ρ 较高时,TA在溶液中的自发聚合形 成黏附性较差的团聚物,导致所形成的涂层变得松 散,难以形成均匀致密的涂层(见图 3(c));当 ρ = 4 mg/mL时,涂层的微纳米结构最为丰富且覆盖性 最好;在任一 ρ 下,M=1:1时,涂层的抗渗性和疏水 性均优于M为2:1、1:2的混凝土,且M=1:1时,涂 层表面的三维微纳米结构更加丰富和致密,防护效 果更优.综上,TA和SiO₂的最优质量比为1:1.

2.1.3 面层

在 w_{APTES} =1.00%、M=1:1、 ρ =4 mg/mL 的条 件下,改变 w_{HDTMS} ,测试涂层的疏水性和抗渗性,结果 见图 4. 由图 4 可见:随着 w_{HDTMS} 的增大,涂层的水接 触角增大,电通量减小.可见 w_{HDTMS} 越大,涂层的疏水 性和抗渗性越好,结合成本确定 HDTMS 的最优含 量为10%.

综上,TA/SiO₂疏水涂层最优制备工艺为: w_{APTES} = 1.00%、 ρ =4 mg/mL、M=1:1、 w_{HDTMS} =10%.此时涂









层均匀致密,无明显的空洞和裂隙,表面存在大量的球 形微纳米颗粒凸起,水接触角达148.1°,疏水性能优异.

2.2 涂层的红外光谱

TA/SiO₂疏水涂层底层的APTES通过水解缩 合与混凝土表面产生Si—O—Si共价键作用,牢固地 粘附在混凝土表面,形成一层连续的硅烷薄膜. APTES分子另一端的氨基能够与TA分子发生马克 尔加成反应/席夫碱反应,从而使其交联在一起,增 强了涂层和混凝土间的黏附性.由于TA和纳米SiO₂ 分子表面均含有大量的羟基,因此二者能够通过氢 键相络合,形成粗糙的微纳米结构,且羟基的存在也 使得TA和SiO₂能够与HDTMS发生反应,接枝更 多的烷基长链,从而降低涂层的表面能.

TA/SiO₂疏水涂层和无涂层混凝土的红外光谱 见图 5. 由图 5 可见:对TA/SiO₂疏水涂层,新出现 的 1 690 cm⁻¹ 处 C=O 伸缩振动吸收峰,1 580、 1 500、1 450 cm⁻¹处苯环环振吸收峰和1 050 cm⁻¹处 C—O伸缩振动吸收峰为TA的3个特征吸收峰,此 外3351 cm⁻¹处—OH吸收峰增强,均证明了TA成 功聚合于试件表面;2920、2850 cm⁻¹处出现的C—H 伸缩振动吸收峰表明试件表面有硅烷的烷基链覆 盖,1400 cm⁻¹处C—N伸缩振动吸收峰属于APTES 分子,从而证明了APTES和HDTMS的成功引入; 1112、766、466 cm⁻¹处SiO₂的特征吸收峰证明了涂 层中存在SiO₂粒子.综上,TA/SiO₂疏水涂层已被成 功制备于混凝土表面.





2.3 涂层混凝土抗氯离子渗透性能

通过模拟海水的自然扩散探究了涂层在长期 侵蚀作用下的抗氯离子侵蚀能力及其稳定性.不同 暴露时间下混凝土的氯离子含量见图 6. 由图 6 可 见;随着暴露时间的增加,相同扩散深度处的w(Cl⁻) 逐渐增加,表层增加更为显著;涂层混凝土w(Cl⁻) 及其增量明显低于无涂层混凝土,可见涂层对氯离 子有着良好的阻隔作用;氯离子扩散深度也有着明



显不同,涂层混凝土在 t=180 d时刚扩散至14 mm 处,而无涂层混凝土在 t=60 d时就已扩散到 14 mm处,表明涂层极大地延缓了混凝土中氯离子 的扩散速率.



图 6 不同暴露时间下混凝土内氯离子含量 Fig. 6 $w(C\Gamma)$ in concretes under different exposure time

计算渗透进入混凝土的氯离子总量 m 及涂层改 善效率,结果见表2.由表2可见:渗透进入混凝土的 氯离子总量随着暴露时间的增加逐渐增大;涂层混 凝土的氯离子总量远小于无涂层混凝土,约为无涂 层混凝土的20%,可见涂层对氯离子的侵蚀起到了 较好的阻隔作用;涂层改善效率随着暴露时间的增 加略有减小,但总体较为稳定,始终维持在79.00% 以上,可见 TA/SiO₂疏水涂层对混凝土抗氯离子侵蚀 能力改善效果显著,且在海水的长期浸泡下仍能保 持良好的稳定性.

2.4 涂层混凝土抗硫酸盐渗透性能

由于海水中SO⁴-浓度较低,无法在短期内评估 涂层的抗硫酸盐渗透性,因此采用高浓度Na₂SO₄溶 液来加速扩散过程.不同暴露时间下混凝土内SO⁴-



<i>t</i> /d	m/g		Improvement
	Uncoated concrete	Coated concrete	efficiency/%
30	0.300	0.051	82.78
60	0.473	0.086	81.85
100	0.674	0.116	82.51
140	0.853	0.171	79.99
180	1.032	0.217	79.01

含量的分布见图7.由图7可见:在相同暴露时间下, 涂层混凝土中的w(SO²⁻)和侵蚀深度均明显小于无 涂层混凝土;随着暴露时间的增加,涂层混凝土 中w(SO²⁻)的增量也明显低于无涂层混凝土.



Fig. 7 $w(SO_4^{2-})$ in concretes under different exposure time

渗透进入试件的SO₄⁻⁻总量*m*[']及涂层改善效率见表 3.由表3可见:渗透进入混凝土的SO₄²⁻⁻总量随着暴露时 间的增加逐渐增大;涂层混凝土的SO₄⁻⁻总量和增速均 远小于无涂层混凝土,表明涂层阻隔了绝大多数的 SO²⁻.由于扩散进入涂层混凝土试件SO²⁻的量较少,因 此涂层改善效率存在一定波动,但总体保持在75.00% 以上,且随着暴露时间的增加未见明显衰减,表明涂层 在长期高浓度硫酸盐浸泡下具有较好的稳定性.

表 3 混凝土内 SO_4^2 ⁻ 总量及涂层改善效率 Table 3 m' and improvement efficiency of coating of concretes

<i>t</i> /d	m'/g		Improvement
	Uncoated concrete	Coated concrete	efficiency/%
30	0.515	0.047	90.85
60	0.770	0.070	90.97
100	0.902	0.223	75.31
140	1.175	0.198	83.11
180	1.356	0.299	77.93

2.5 涂层稳定性

当*t*=120 d时,不同摩擦距离下涂层混凝土内的 氯离子含量见图 8. 由图 8 可见:随着磨擦距离的增 加,扩散进入混凝土内的氯离子含量逐渐增大.



图 8 不同摩擦距离下涂层混凝土内的氯离子含量 Fig. 8 w(Cl⁻) in coated concrete under different friction distances

不同摩擦距离下涂层混凝土内的氯离子总量 m"、水接触角及涂层改善效率见表4.由表4可见:经 过d=12m的摩擦后,涂层对混凝土抗氯离子渗透能 力改善效率仍为70.61%,保持着优良的抗渗性;当 d=20m时,其改善效率下降至56.01%,虽然涂层出 现了一定的损坏,但仍具有一定的耐蚀能力;涂层的 水接触角随着摩擦距离的增大而减小,经过d=12m 的摩擦后,水接触角仍为143.2°,直至d=20m时,水 接触角下降至138.4°,仍远大于90.0°,具有较好的疏水 性.采用商用疏水剂处理的水泥基材表面经d=45m 往复摩擦后已完全丧失疏水能力^[16],而TA/SiO₂疏水 涂层经过d=45m往复摩擦后水接触角为104.5°,仍 具有一定的疏水能力,可见该涂层的耐摩擦能力 优良.

表 4	不同摩擦距离下涂层混凝土内的氯离子总量、水接触角
	和涂层改善效率

Table 4 m'', δ and improvement efficiency of coating of coated concretes under different fraction distances

d/m	$m''/{ m g}$	$\delta/(^{\circ})$	Improvement efficiency/ $\%$
0	0.171	147.3	82.73
4	0.217	146.6	78.00
8	0.244	145.1	75.25
12	0.290	143.2	70.61
16	0.361	142.5	63.45
20	0.435	138.4	56.01

将涂层混凝土在酸碱腐蚀溶液中浸泡 30 d 后, 其电通量、水接触角及涂层改善效率见表 5. 由表 5 可 见,浸泡 30 d 后,涂层仍表现出优异的疏水性和抗氯 离子侵蚀性,腐蚀介质未对涂层疏水性产生明显的 破坏,涂层改善效率均保持在 60.00% 以上. 且涂层 未见气泡、剥落、粉化等现象,可见 TA/SiO2疏水涂 层具有良好的耐酸碱性.

表5 酸碱腐蚀溶液浸泡后涂层混凝土的电通量、水接触角和 涂层改善效率

Table 5 Q, δ and improved efficiency of coating of coated concretes after immersion in acid-base corrosion solution

pH value	Q/C	$\delta/(°)$	Improvement efficiency/ %
4	655.76	144.4	60.44
5	604.52	144.7	63.54
6	581.48	145.0	64.92
7	519.50	146.3	68.66
8	593.11	145.9	64.22
9	596.77	145.1	64.00
10	621.72	144.6	62.50

3 结论

(1) 开发了一种由 APTES 表面处理层、TA/SiO₂微纳米层和HDTMS低表面能修饰层构成的新型TA/SiO₂疏水涂层,其最优制备工艺为:APTES含量为1.00%、TA/SiO₂溶液的质量浓度为4 mg/mL、TA/SiO₂中TA与SiO₂的质量比为1:1、HDTMS的含量为10%.

(2)TA/SiO₂疏水涂层具有优异的疏水性和抗氯 离子、硫酸根离子渗透性.涂层表面水接触角可达到 148.1°,能够至少减少75.31%的离子渗透进入混凝 土,且涂层具有优良的耐摩擦和耐酸碱腐蚀稳定性.

(3)本文重点关注涂层对混凝土的防护性能,尚缺 乏对涂层自身性质的相关研究,如:受力、生物吸附等 因素对涂层稳定性的影响;表面粗糙度、表面能与涂层 疏水性的关系等,因此有待进一步展开相关研究.

参考文献:

- [1] 麻海燕,宋姗姗,余红发,等.环渤海湾海洋混凝土结构的长寿命研究与分析[J].建筑材料学报,2023,26(8):897-905.
 MA Haiyan, SONG Shanshan, YU Hongfa, et al. Bohai bay sea long lifetime study and analysis of the concrete structure [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(8):897-905.(in Chinese)
- [2] 喻宣瑞,刘慧平.基于贝叶斯机械算法探究氯离子在钢筋混凝
 土结构中的扩散规律[J].建筑材料学报,2022,25(12):
 1248-1254.

YU Xuanrui, LIU Huiping. Study on diffusion law of chloride ions in reinforced concrete structures based on Bayesian mechanical algorithm [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(12): 1248-1254.(in Chinese)

- [3] 庄宁,夏浩瑜,董洪汉,等.海洋环境中CFRP钢管混凝土复合 桩基腐蚀试验研究[J].建筑材料学报,2022,25(12):1262-1268.
 ZHUANG Ning, XIA Haoyu, DONG Honghan, et al. Experimental study on corrosion of CFRP concrete composite pile foundation in marine environment [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(12):1262-1268.(in Chinese)
- [4] ALMUSALLAM A. Performance of concrete coatings under varying exposure conditions[J]. Materials and Structures, 2005, 35:487-494.
- [5] BENEDICT C V, WAITE J H. Location and analysis of byssal structural proteins of mytilus edulis[J]. Journal of Morphology, 1986, 189(2):171-181.
- [6] SILVERMAN H G, ROBERTO F F. Understanding marine mussel adhesion[J]. Marine Biotechnology, 2007, 9(6):661-681.
- [7] LEE H, DELLATORE S M, MILLER W M, et al. Mussel-inspired surface chemistry for multifunctional coatings[J]. Science, 2007, 318:426-430.
- [8] YUF, CHENSG, LIHM, et al. Application of self assembled 6-aminohexanol layers for corrosion protection of 304 stainless steel surface[J]. Thin Solid Films, 2012, 520(15):4990-4995.
- [9] CHEN S G, CHEN Y, LEI Y H, et al. Novel strategy in enhancing stability and corrosion resistance for hydrophobic

functional films on copper surfaces [J]. Electrochemistry Communications, 2009, 11(8):1675-1679.

- [10] SILEIKA T S, BARRETT D G, ZHANG R, et al. Colorless multifunctional coatings inspired by polyphenols found in tea, chocolate, and wine [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2013, 52:10766-10770.
- [11] XIAO Z, LIU Y, WANG Y Z, et al. TA/Fe(III) anti-chloride coating to protect concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259:120922.
- [12] RAHIM M A, BJOERNMALM M, BERTLEFF Z, et al. Rust-mediated continuous assembly of metal-phenolic networks
 [J]. Advanced Materials, 2017, 29(22):1606717.
- [13] 冯新军,陈旺,李旺.硅烷偶联剂改性煤矸石粉沥青胶浆路用 性能及改性机理[J].建筑材料学报,2020,23(5):1121-1129, 1152.

FENG Xinjun, CHEN Wang, LI Wang. Road performance and modification mechanism of coal gangue powder asphalt mortar modified by silane coupling agent [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5):1121-1129, 1152. (in Chinese)

- [14] 李克非,景炜,杨睿.混凝土表面硅烷浸渍及其长期防护效果研究进展[J].硅酸盐学报,2019,47(8):1181-1190.
 LI Kefei, JING Wei, YANG Rui. Concrete surface silane impregnation and long-term protection research progress [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(8):1181-1190. (in Chinese)
- [15] 王海良,李懿祯,荣辉,等.有机硅防护剂对铝酸盐水泥砂浆 防护性能的影响[J].建筑材料学报,2019,22(4):516-522.
 WANG Hailiang, LI Yizhen, RONG Hui, et al. Effect of organosilicon protective agent on protective properties of aluminate cement mortar [J]. Journal of Building Materials, 2019,22(4):516-522. (in Chinese)
- [16] 孔祥清, 杜昊然, 殷胜光, 等. 高稳定性超疏水水泥基材料涂 层制备及性能研究[J]. 功能材料, 2022, 53(9):9201-9208.
 KONG Xiangqing, DU Haoran, YIN Shengguang, et al.
 Preparation and properties of superhydrophobic cement-based coatings with high stability [J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(9):9201-9208. (in Chinese)