

# 模拟风沙环境下混凝土防护涂层 抗冲蚀性能的研究

刘艳晨<sup>a,b,c</sup>, 郝负洪<sup>a,b,c</sup>, 高峰<sup>b,c,d</sup>, 张飞龙<sup>b,c,d</sup>

(内蒙古工业大学 a.理学院 b.内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室 c.内蒙古自治区建筑检测鉴定与安全评估工程技术研究中心 d.土木工程学院, 呼和浩特 010051)

**摘要:** 目的 研究不同类型的防护涂层对风沙环境下混凝土抗冲蚀性能的影响规律及作用机理, 从而选取适合风沙环境且综合性能良好的混凝土防护涂层。方法 以聚氨酯、丙烯酸及环氧树脂为研究对象, 对三种混凝土结构防护涂层进行了研究。通过接触角和显微硬度对涂层的物理及力学性能进行了分析, 并利用模拟风沙环境侵蚀实验系统, 在不同冲蚀参数下, 对混凝土结构防护涂层体系的抗冲蚀性能的变化规律进行测试。结合混凝土防护涂层风沙冲蚀实验及扫描电镜表征, 探究风沙环境下混凝土防护涂层的冲蚀机理。结果 相同冲蚀条件下, 不同防护涂层的冲蚀率大小为: 聚氨酯防护涂层>环氧树脂防护涂层>丙烯酸防护涂层。喷涂丙烯酸防护涂层试样的抗冲蚀性能比喷涂聚氨酯防护涂层的试样提升了约 57.56%, 比喷涂环氧树脂防护涂层的试样提升了约 33.57%。冲蚀表面分形维数 ( $D_s$ ) 的变化在一定程度上反映了不同冲蚀阶段的变化, 结合  $D_s$  及被冲蚀后涂层表面的微观形貌特征, 发现在低角度冲蚀时, 受粒子拉应力影响, 涂层表面发生了撕裂及脱粘现象, 冲蚀率较高。在高角度冲蚀时, 受粒子压应力影响, 涂层表面出现隆起及空穴等塑性变形, 冲蚀表面  $D_s$  增加, 且在材料屈服应力范围内未造成损伤界面的脱落, 故冲蚀率较低, 显示出典型塑性材料冲蚀损伤的特征。结论 聚氨酯、丙烯酸及环氧树脂防护涂层体系, 均能提高混凝土的抗冲蚀性能。结合防护涂层的接触角及硬度测试结果, 发现丙烯酸防护涂层作为风沙环境中混凝土结构防护涂层时, 效果较好, 适用于该环境下的混凝土防护。不同防护涂层在受到冲蚀时, 不存在明显的塑性变形和脆性破坏阶段, 而是随冲蚀分量变化, 涂层由塑性变形向脆性破坏过渡, 且该现象存在于整个冲蚀过程中。

**关键词:** 风沙环境; 抗冲蚀性能; 聚氨酯涂层; 丙烯酸涂层; 环氧树脂涂层; 分形维数; 冲蚀机理

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)08-0273-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.025

收稿日期: 2020-10-16; 修订日期: 2021-03-01

Received: 2020-10-16; Revised: 2021-03-01

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51468049, 11662012, 11862022); 内蒙古自治区博士研究生创新项目 (B20191127Z); 内蒙古自治区自然科学基金面上项目 (2018MS05047); 内蒙古自治区青年科技英才支持计划项目 (NJYT-17-A09); 内蒙古自治区草原英才资助项目

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51468049, 11662012, 11862022), Inner Mongolia Autonomous Region Doctoral Student Innovation Project (B20191127Z), Inner Mongolia Autonomous Region Natural Science Foundation Project (2018MS05047), Mongolia Autonomous Region Youth Science and Technology Excellence Project (NJYT-17-A09), Inner Mongolia Autonomous Region Grassland Talent Project

**作者简介:** 刘艳晨 (1992—), 女, 博士研究生, 研究方向为工程材料耐久性。

**Biography:** LIU Yan-chen (1992—), Female, Doctoral candidate, Research focus: durability of engineering materials.

**通讯作者:** 郝负洪 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为区域特殊环境下工程结构和材料耐久性损伤及评价。

**Corresponding author:** HAO Yun-hong (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: damage mechanism and evaluation of engineering structures and materials under special regional environment.

**引文格式:** 刘艳晨, 郝负洪, 高峰, 等. 模拟风沙环境下混凝土防护涂层抗冲蚀性能的研究[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 273-281.

LIU Yan-chen, HAO Yun-hong, GAO Feng, et al. Study on erosion resistance of concrete protective coating under simulated desert environment[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 273-281.

## Study on Erosion Resistance of Concrete Protective Coating under Simulated Desert Environment

LIU Yan-chen<sup>a,b,c</sup>, HAO Yun-hong<sup>a,b,c</sup>, GAO Feng<sup>b,c,d</sup>, ZHANG Fei-long<sup>b,c,d</sup>

(a. School of Science, b. Inner Mongolia Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics, c. Inner Mongolia Autonomous Region Construction Inspection and Appraisal and Safety Assessment Engineering Technology Research Center, d. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**ABSTRACT:** The research is to study the influence law and the action mechanism of different types of protective coatings on the erosion resistance of the concrete in the wind sand environment, and then select the concrete protective coatings with the comprehensive performance in the wind sand environment. As the research objects, three kinds of protective coatings for the concrete structure including polyurethane, acrylic acid and epoxy resin were studied. The mechanical properties of the coatings were analyzed by the contact angle and hardness. The change rule of the erosion resistance of the system of protective coatings for the concrete structure with erosion parameters was tested by the simulated sand erosion experimental system. Combined with the sand erosion test of concrete protective coatings and the observation results of the scanning electron microscope, the erosion mechanism of concrete protective coatings in the wind sand environment was explored. Under the same erosion conditions, the erosion rate of different protective coatings was as follows: the polyurethane protective coating > the epoxy resin protective coating > the acrylic acid protective coating; the corrosion resistance of the protective coating sprayed acrylic was about 57.56% higher than that of the protective coating sprayed polyurethane, and 33% higher than that of the protective coating sprayed epoxy resin. The change of the fractal dimension  $D_s$  of the erosion surface reflects the change of different erosion stages. Combined with the fractal dimension  $D_s$  and the microscopic morphology after the erosion, it is shown that when eroded at low angle, tearing and debonding occur on the coating surface under the influence of particle tensile stress, and the erosion rate is higher. When eroded at high angle, plastic deformations such as a structure uplift and cavities are formed on the coating surface under the influence of particle compressive stress, which buffers the impact of sand particles on the coating, and the fractal dimension  $D_s$  of the erosion surface increases, and the damage interface does not fall within the yield stress range of the material, and the erosion rate is low, which shows the characteristics of the erosion damage of typical plastic materials. The system of protective coatings of polyurethane, acrylic acid and epoxy resin can improve the erosion resistance of the concrete. Combined with the comprehensive evaluation of the results of the contact angle and the hardness test of protective coatings, the protective coating of acrylic acid is more suitable for the concrete protection in the wind sand environment. When different protective coatings are eroded, there is no obvious plastic deformation and the brittle failure stage, but the transition mechanism from the plastic deformation to the brittle failure with the change of the erosion component, and this phenomenon exists in the whole erosion process.

**KEY WORDS:** wind sand environment; erosion resistance; polyurethane coating; acrylic coating; epoxy resin coating; fractal dimension; erosion mechanism

混凝土结构是工程中使用最为广泛的结构形式,但由于其所处外界环境复杂,在使用过程中,常受天气变化等外界因素的多重破坏,因此如何提高混凝土耐久性早已是研究的重点和热点<sup>[1]</sup>。目前,提高混凝土耐久性的措施主要有,掺杂纤维、粉煤灰等混合料改善内部结构<sup>[2-4]</sup>,或添加减水剂、早强剂等外加剂提高密实性<sup>[5-7]</sup>。但对于西部地区沙尘暴多发区域的混凝土结构,还遭受风沙冲蚀,严重影响了其正常使用<sup>[8]</sup>。风沙冲蚀主要是沙粒对混凝土表面反复冲击,造成表面及基材失效的过程<sup>[9]</sup>,所以在其表面制备一层耐冲蚀的涂层,对于防止和延缓混凝土结构受风沙冲蚀破坏具有重要意义。

对于提高环境中混凝土结构的耐久性而言,在混凝土表面制备防护涂层无疑是一种成本低廉、施工方便且较为有效的防护措施<sup>[10-11]</sup>,同时,还可以防御盐类侵蚀<sup>[12-13]</sup>、紫外老化<sup>[14]</sup>或冲蚀损伤<sup>[15-16]</sup>等破坏。目前,在混凝土结构中常用的防护涂层主要有聚脲防护涂层、环氧树脂防护涂层等多种类型。其中,高强度弹性体聚脲防护涂层可起到改善基体抗冲击和弹道载荷性能的作用<sup>[17-18]</sup>,并在使用期间可起到耐腐蚀<sup>[19]</sup>、抗风化作用<sup>[19-20]</sup>,但由于该涂层造价昂贵,所以对风沙环境中混凝土的防护而言,性价比较低。环氧树脂防护涂层由于特殊的“海岛结构”,能显著提高混凝土抗氯离子渗透能力<sup>[21-23]</sup>,常用于抑制氯盐侵蚀,提

升冻融环境中建筑物的使用寿命<sup>[24-26]</sup>，在风沙环境地区，常伴随大风严寒气候，所以该涂层成为风沙环境中混凝土防护的一种选择。丙烯酸酯类防护涂层由于具有较低的黏度及良好的力学性能<sup>[27-28]</sup>，常用于建筑物混凝土表面裂缝控制和修补<sup>[29-31]</sup>。沙粒对混凝土的冲蚀破坏主要体现为表面微裂纹的产生及扩展，所以丙烯酸防护涂层也可作为该特殊环境下混凝土的防护措施之一。聚氨酯防护涂层可通过加入不同树脂进行改性<sup>[32]</sup>，获得很高的附着力、耐候性、耐磨性<sup>[33]</sup>等，常用于提高混凝土结构的使用寿命<sup>[16,34]</sup>。该涂层是目前应用较为广泛的防护涂层之一，也可用于风沙环境中混凝土的防护。目前，关于混凝土防护涂层在风沙环境中抗冲蚀性能和损伤机制的研究还鲜有报道，其综合应用和研究有待进一步完善。

本文结合内蒙古地区实际风沙环境，选取聚氨酯、丙烯酸及环氧树脂三种防护涂层，通过接触角和显微硬度对涂层的物理及力学性能进行分析，并利用模拟风沙环境侵蚀实验系统，对不同冲蚀参数下，混凝土结构防护涂层体系的抗冲蚀性能变化进行研究。结合分形维数及冲蚀后的微观形貌特征，探究防护涂层的冲蚀机理，选取在风沙环境综合性能良好的混凝土防护涂层。

# 1 实验

## 1.1 实验材料和配合比

混凝土组成多为水泥砂浆，风沙及其他环境的侵蚀主要发生在混凝土表面。制作尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方体试块，根据 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》测试材料的抗压强度。配合比及抗压强度如表 1 所示。水泥选用 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥，细骨料选用天然水洗河砂，细度模数为 2.81，拌合采用自来水。

表 1 水泥砂浆配合比及抗压强度  
Tab.1 Mix proportions and compressive strength of the cement mortar

Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )			Compressive strength in 28 d/MPa
Water	Cement	Sand	
285	525	1304.88	58.21

防护涂层选用聚氨酯（PU）、丙烯酸（AR）及环氧树脂（ER），防护涂层的类型及力学参数见表 2，其中 W 为无防护涂层的水泥砂浆。其中，耐冲击性根据 GB/T 1732—1993《漆膜耐冲击测定法》<sup>[35]</sup>测得，标准规定耐冲击性检测结果以不引起涂膜破坏的最大高度表示，单位为 cm。

表 2 防护涂层的类型及力学参数  
Tab.2 Types and mechanical parameters of protective coatings

Specimen	Coating	Impact resistance/cm	Adhesion/level	Flexibility/mm
W	Uncoated			
PU	Polyurethane coating	50	≤1	1
AR	Acrylic resin coating	60	≤1	1
ER	Epoxy resin coating	50	≤1	1

## 1.2 试件制作和冲蚀实验方法

采用表 1 的配合比，制作尺寸为 80 mm×80 mm×10 mm 的冲蚀实验试件，浇筑完成后，将试块放入水中养护 28 d 后取出，置于自然环境中干燥后，喷涂聚氨酯、丙烯酸及环氧树脂防护涂层。喷涂完毕后，固化干燥一周，备用。

冲蚀实验在自主研发的模拟风沙环境侵蚀实验系统中进行，实验系统的原理如图 1 所示。该系统包

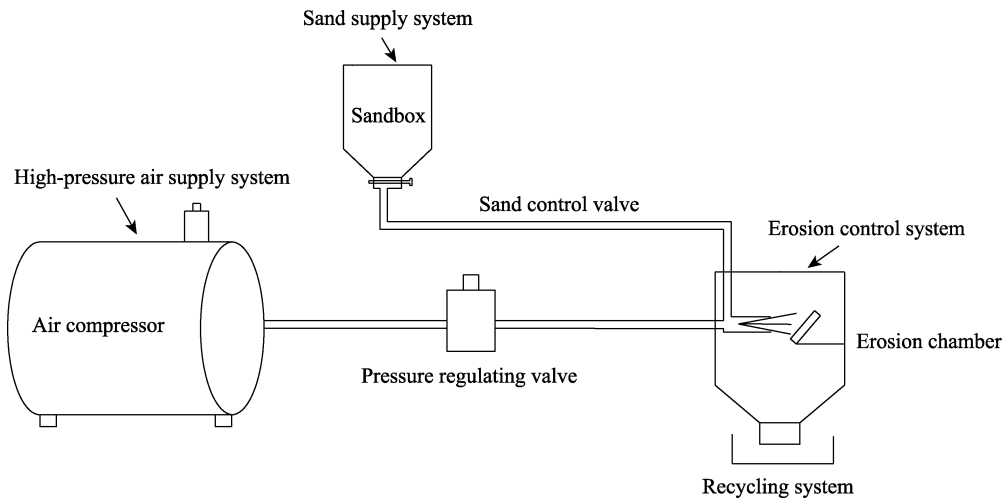


图 1 模拟风沙环境侵蚀实验系统示意图  
Fig.1 Schematic diagram of simulated sandstorm environment erosion test system

括风沙模拟装置和试件放置装置。风沙模拟装置包含沙源系统、冲蚀控制系统和沙回收箱,试件放置装置内的转动及移动调节组件可调节试件与风沙出口之间的距离与角度。实验过程中,通过高压气源以及落沙量控制装置实现对冲蚀速度以及下沙率的准确控制,有效模拟了实际风沙环境的特征。

### 1.3 实验用沙

在内蒙古中西部的腾格里沙漠进行现场采样,通过筛分法得到沙粒粒径分布情况。如图 2a 所示,此区域内的沙粒粒径分布不均匀,主要以极细沙与细沙为主,其中粒径在 0.08 mm 以下的沙粒占比为 5%左右,粒径为 0.08~0.16 mm 的沙粒占比达 72%以上,粒径为 0.16 mm 以上的沙粒占比在 20%左右。对沙粒进行微观形貌观察和分析,发现沙粒大小不均、表面粗糙且有撞击坑等特征(图 2b),这主要是由于沙粒受气流影响,发生跃起、碰撞、摩擦等周期性活动。

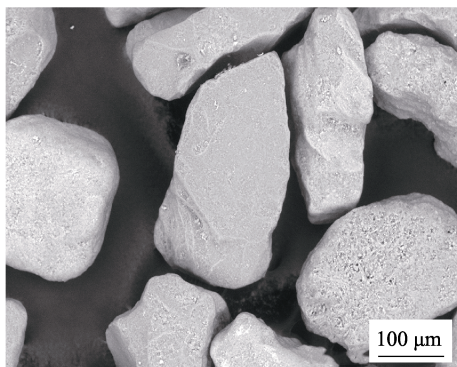
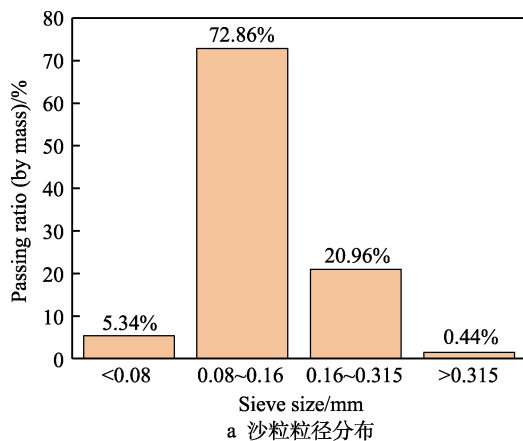


图 2 沙粒粒径分布及微观形貌

Fig.2 Sand size distribution and micro-morphology: a) sand size distribution; b) micro-morphology of desert sand

### 1.4 冲蚀程度评价

#### 1.4.1 冲蚀率评价

采用 OUHAUS-EP214C 电子精密分析天平(精度 0.1 mg, 量程 200 g)测量冲蚀前后试件的质量变化,通过试件的冲蚀率来评价防护涂层试样的损伤程

度,如式(1)所示。

$$\alpha = \frac{m_1 - m_2}{m_s \times t} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为冲蚀率,无量纲;  $m_1$  为冲蚀前试件质量, g;  $m_2$  为冲蚀后试件质量, g;  $m_s$  为下沙量, g/min;  $t$  为冲蚀时间, min。

#### 1.4.2 分形维数评价

分形维数是通过材料表面自相似性特征反映材料损伤程度的特征量<sup>[36]</sup>。目前,分形测量方法主要有变步距法、小岛法、盒维数法等<sup>[37]</sup>,本文主要利用盒维数法来估计冲蚀平面的分形维数  $D_s$ 。在冲蚀形貌图中,以边长为  $\varepsilon$  的正方形将图像分割成规格为  $\frac{l}{\varepsilon} \times \frac{l}{\varepsilon}$  的正交网格,设含有冲蚀部分的网格总数为  $N(\varepsilon)$ ,如果改变  $\varepsilon$ ,使其在值域范围内变化,则得到相应的值  $N(\varepsilon_n)$ 。将数据绘于双对数坐标系中,即  $\lg \varepsilon - \lg N(\varepsilon)$  的对应关系<sup>[36]</sup>。图 3 为分形维数  $D_s$  的算法示意图,如果存在线性特征,表明冲蚀表面分布具有分形特征,若线性部分的斜率为  $k$ ,则有以式(2)所示的关系。

$$D_s = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\varepsilon)}{\lg(\varepsilon)} = k \quad (2)$$

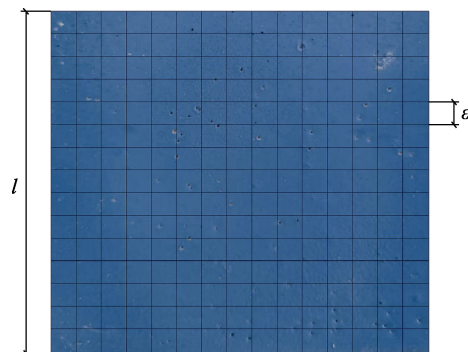


图 3 分形维数  $D_s$  算法示意图  
Fig.3 Fractal dimension algorithm

#### 1.4.3 形貌特征评价

材料冲蚀破坏行为可以由冲蚀损伤微观形貌进行判定。利用扫描电子显微镜观测受冲蚀部位的微观形貌变化,分析混凝土防护涂层损伤形貌特征和冲蚀机理。

### 1.5 风沙流参数设置

风沙流参数是冲蚀破坏的主要影响因素,包括冲蚀角度、冲蚀时间、冲蚀速度、下沙率。本实验中设置的风沙流参数为:冲蚀角度为 15°、30°、45°、60°、90°,冲蚀速度为 17、20、24、26 m/s,下沙率为 28 g/min。设置的风沙流参数是根据实际沙尘暴爆发工况,通过相似理论计算转化得出<sup>[38]</sup>。



## 2 防护涂层的物理及力学性能测试结果

### 2.1 接触角

材料表面的接触角反映了其疏水性, 疏水性强, 则材料不易被环境中的各项腐蚀性物质渗透。由于风沙地区伴随着氯盐侵蚀以及其他各项腐蚀性物质的渗透, 故对防护涂层进行接触角测试, 评定防护涂层在风沙及其复合环境下抵抗外界侵蚀的能力, 结果如图 4 所示。从疏水性的角度来说, 丙烯酸树脂防护涂层的接触角最大, 疏水性较好, 聚氨酯防护涂层次之, 环氧树脂防护涂层较差。以上结果表明, 喷涂防护涂层有助于提高水泥砂浆表面的疏水性, 提高其在环境中抗侵蚀能力。

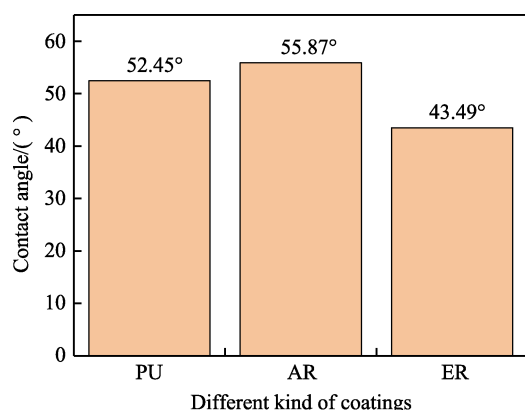


图 4 不同防护涂层接触角测试结果  
Fig.4 Contact angle of different kinds coatings

### 2.2 硬度

利用显微硬度仪表征防护涂层的硬度, 结果如图 5 所示。丙烯酸防护涂层的硬度为 13.11HV, 明显比聚氨酯防护涂层及环氧树脂防护涂层的硬度高, 说明丙烯酸防护涂层致密性更高, 能更好地抵抗外力作用。在基材表面沉积硬度较高的防护涂层, 可降低风沙环境对基材表面的冲蚀损伤<sup>[39]</sup>。

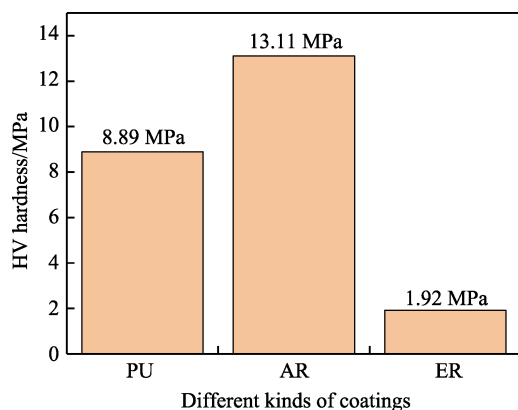


图 5 不同防护涂层硬度测试结果  
Fig.5 Hardness of different kinds coatings

## 3 防护涂层的抗冲蚀性能分析

### 3.1 冲蚀角度对防护涂层抗冲蚀性能的影响

图 6 是喷涂防护涂层的试样在冲蚀速度为 26 m/s、下沙率为 28 g/min 条件下, 冲蚀角度与冲蚀率关系。由图 6 可知, 在其他条件相同的情况下, 基体材料的最大冲蚀率出现在 90°, 且冲蚀率随角度增加而增加, 表现为脆性材料的冲蚀损伤特征。对比 3 种防护涂层在风沙冲蚀后的损伤情况, 发现聚氨酯防护涂层试样损伤最严重, 冲蚀角度约为 30°时, 存在最大冲蚀率; 其次是环氧树脂防护涂层试样, 冲蚀角度约为 15°~30°时, 存在最大冲蚀率; 抗冲蚀性能较好的是丙烯酸防护涂层试样, 冲蚀角度约为 15°~30°时, 有最大冲蚀率, 表现出典型塑性材料的冲蚀损伤特征。涂层硬度决定了防护涂层的抗冲蚀性能。由于丙烯酸硬度较高, 相同冲蚀条件下, 丙烯酸防护涂层具有较好的抗冲蚀性能, 冲蚀角度为 30°时, 其最大冲蚀率比聚氨酯防护涂层下降了约 57.56%, 比环氧树脂防护涂层下降了约 33.57%。

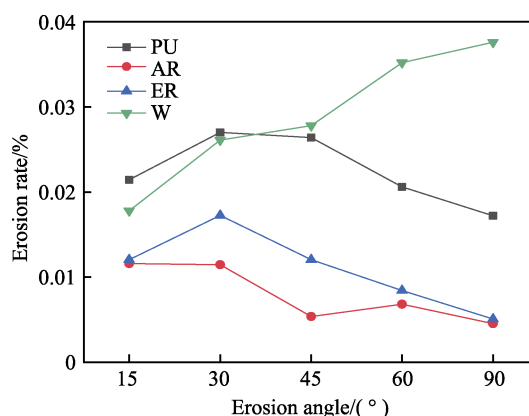


图 6 不同防护涂层冲蚀率与冲蚀角度的关系  
Fig.6 Relationship between erosion rate and erosion angle of different kinds coatings

### 3.2 冲蚀速度对防护涂层抗冲蚀性能的影响

图 7 是喷涂不同防护涂层试样在下沙率为 28 g/min、冲蚀角度为 30°条件下, 冲蚀速度与冲蚀率的关系。由图 7 可知, 随冲蚀速度增加, 基体试样的冲蚀率呈正比例增长, 且大于喷涂防护涂层的试样, 说明涂层起到了良好的抗冲蚀效果。在相同冲蚀条件下, 防护涂层试样的冲蚀率随冲蚀速度的变化趋势较为一致, 通过斜率观察到, 冲蚀率均呈现先缓慢增加后加速上升的趋势。出现该趋势的原因主要是, 涂层的冲蚀损伤是积累损伤的过程, 当速度较小时, 低于材料的弹性承受能力, 不足以使材料形成裂纹或失重, 但速度的增加导致涂层所受的最大拉应力会以较快速度达到屈服极限, 这与其他学者的研究成果也较为一致<sup>[40-41]</sup>。当冲蚀速度在 17~20 m/s 时, 防护涂层的冲蚀率随冲

蚀速度的增加而缓慢提升；当冲蚀速度大于 24 m/s 时，冲蚀率随冲蚀速度的增加而迅速增长。3 种防护涂层试样的冲蚀率大小为：无防护涂层试样（W）> 聚氨酯防护涂层试样（PU）> 环氧树脂防护涂层试样（ER）> 丙烯酸防护涂层试样（AR）。其中，丙烯酸防护涂层有良好的抗冲蚀性能。

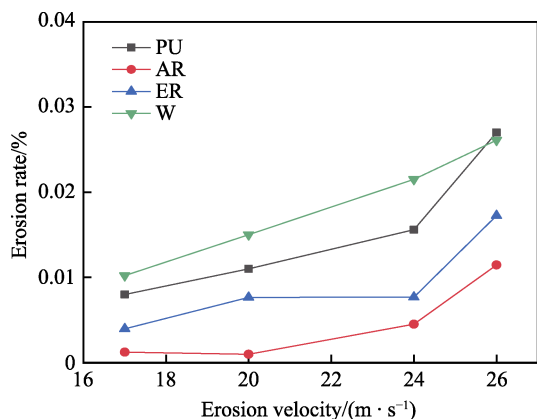


图7 不同防护涂层冲蚀率与冲蚀速度的关系

Fig.7 Relationship between erosion rate and erosion velocity of different kinds coatings

## 4 防护涂层的冲蚀机理分析

### 4.1 防护涂层的分形维数分析

冲蚀损伤是指流动的风沙粒子反复冲击试样表面，并在表面留下冲蚀痕迹的过程。由于冲蚀现象的复杂

性，对冲蚀损伤的评价存在很多困难，以往的研究多数只是利用冲蚀率来评价，未能利用冲蚀表面这一直接现象。分形几何分析法是描述冲蚀表面分形特征的一种有效方法，利用冲蚀痕迹表现出的自相似性特征，将分形维数作为反映冲蚀损伤程度的特征量，可评价实际冲蚀损伤程度<sup>[36]</sup>。但速度的变化是能量增减的过程，能量变化引起表面裂纹增多，导致分形维数变化的离散性较大，无法准确表征冲蚀表面在不同冲蚀阶段的变化过程，故选择在不同角度下对分形维数进行研究。

拍摄冲蚀角度为 30°及 90°下不同涂层的冲蚀形貌，对图像分析区域进行剪切，对原始图像选取了 1024×1024 个相同的区域进行计算，利用 Matlab 程序使之转化为灰度图像，并进行下一步分析，具体计算流程及结果如图 8 所示。经过上述图像处理，绘制的  $\lg \varepsilon - \lg N(\varepsilon)$  曲线呈现出明显的线性特征，冲蚀平面的分形维数  $D_s$  计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知，冲蚀损伤是一个动态变化过程。在冲蚀角度较高的情况下，沙粒的垂直冲击导致防护涂层表面产生较大的塑性变形，表面分形维数增加，被冲蚀表面粗糙，但未超过材料的屈服极限，冲蚀率较低；在冲蚀角度较低的情况下，沙粒的水平分量导致防护涂层表面能承受的最大拉应力达到材料屈服极限，涂层发生撕裂及脱粘，冲蚀率较高。冲蚀表面分形维数  $D_s$  的变化在一定程度上反映了不同冲蚀阶段的变化，利用分形结果可追溯冲蚀损伤产生的机理。以上分析也证明，利用分形几何分析冲蚀表面分形特征，可有效评价冲蚀损伤程度。

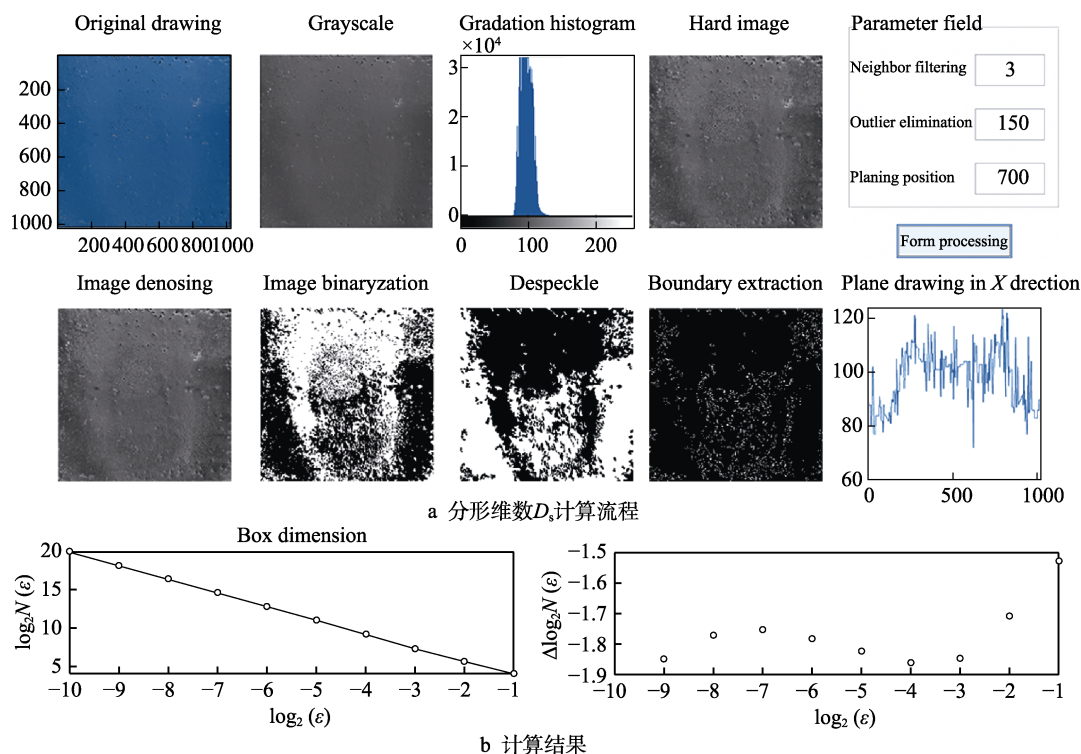


图8 分形维数  $D_s$  计算流程及结果

Fig.8 Calculation flow (a) and result (b) of fractal dimension  $D_s$



表 3 不同防护涂层在不同角度时冲蚀平面分形维数  $D_s$   
Tab.3 Fractal dimension  $D_s$  of different protective coatings at different angles

Angles/(°)	Polyurethane coating	Acrylic resin coating	Epoxy resin coating
30	1.7768	1.7865	1.7939
90	1.7863	1.7930	1.7940

4.2 防护涂层的冲蚀损伤微观形貌

首先对单颗沙粒的冲蚀实验进行分析,图 9 为颗粒在不同冲蚀角度下对防护涂层试样的冲蚀示意图。其中,  $N$  为涂层所受冲击力,  $N_y$  和  $N_x$  分别为涂层所受冲击力的轴向和径向分量。在低角度冲蚀下,塑形材料易受粒子拉应力  $N_x$  影响,使涂层表面形成韧性断裂,冲蚀率较高;在高角度冲蚀下,塑形材料表面主要受粒子压应力  $N_y$  影响,在涂层表面形成组织隆起,产生塑性变形,且在材料屈服应力范围内未造成损伤界面的脱落,冲蚀率较低。

在对单颗粒冲蚀涂层力学分析的基础上,对冲蚀速度为 26 m/s、沙流量为 28 g/min、冲蚀时间为 10 min、冲蚀角度分别为 30°和 90°时不同防护涂层的

冲蚀损伤微观形貌进行分析,如图 10 所示。由低角度冲蚀损伤形貌(图 10a、b、c)可知,丙烯酸防护涂层试样受到冲蚀后,试样表面出现微裂纹及断裂痕迹,但未出现明显的片层脱落;环氧树脂防护涂层试样表面受到冲蚀后,涂层与基体产生轻微分离,部分涂层脱粘,发生大面积切削损伤,伴随裂纹扩展现象;聚氨酯防护涂层试样表面受到冲蚀后,表面冲蚀损伤轮廓较为尖锐,出现片层脱落及韧性断裂。由图 10d、e、f 可知,随着冲蚀角度的增加,聚氨酯防护涂层试样表面受到的粒子垂直压力也不断增加,致使部分隆起的组织形成不规则冲蚀空穴,且周围伴有切削痕迹,分形维数比低角度时也略有增加;环氧树脂防护涂层试样表面受到冲蚀后,表面产生裂纹但仍处于粘结状态,冲蚀率较低;丙烯酸防护涂层的试样表面受到高角度冲蚀后,与损伤界面形成材料淤积,结构相对紧密,因此在冲蚀角度较高的冲蚀环境中,该防护涂层的抗冲蚀效果较好。通过以上分析发现,沙粒以不同角度冲蚀涂层时,涂层不存在明显的塑性变形和脆性破坏,而是随着冲蚀分量的变化,损伤形式由塑性变形向脆性破坏过渡,且该现象存在于整个冲蚀过程当中。

结合图 9、10 发现,由于聚氨酯防护涂层试样表面

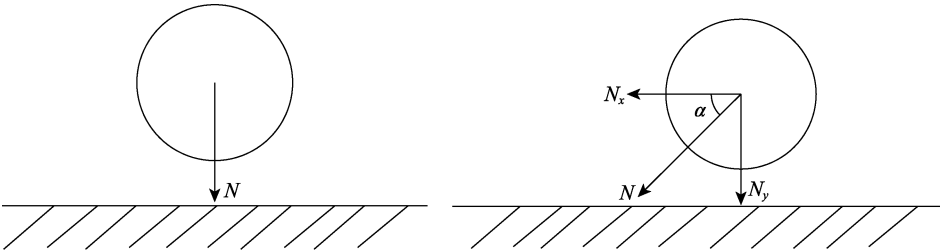


图 9 颗粒不同低角度时对涂层冲蚀示意图  
Fig.9 Diagram of erosion of particles on coating at different low angles

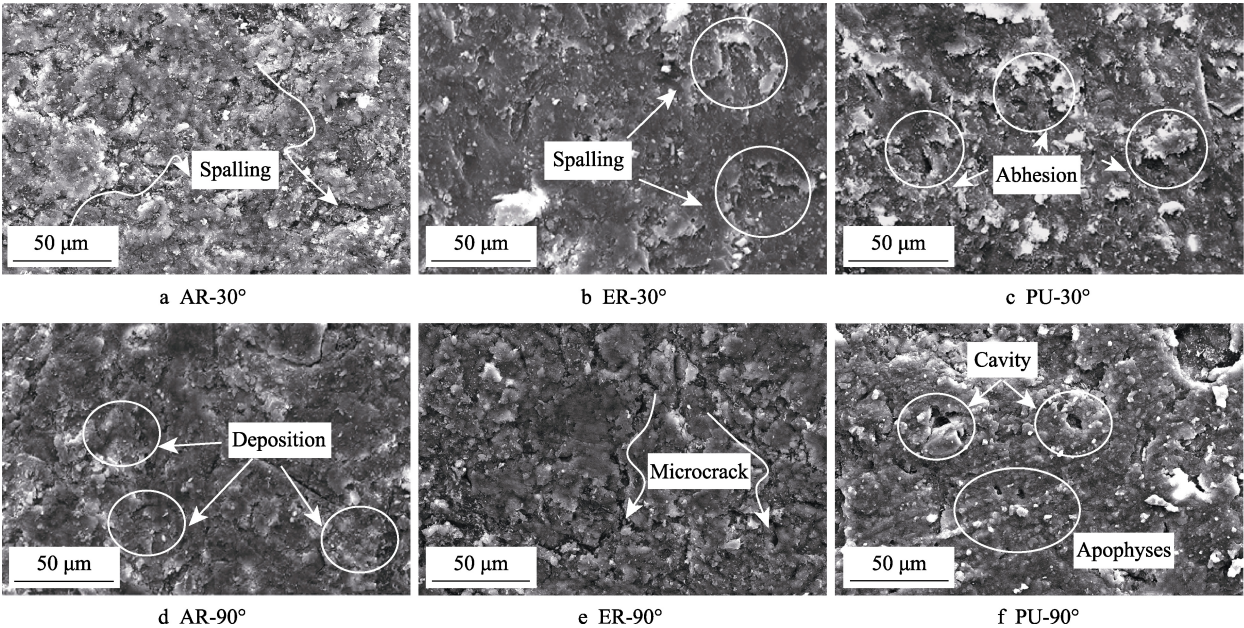


图 10 不同冲蚀角度时喷涂不同防护涂层的试样表面损伤形貌  
Fig.10 SEM micrographs of eroded coating surface

存在不规则气孔,组织不均匀,当受到粒子冲蚀时,气孔周围发生波浪状塑性变形,易发生较大面积的脱落,抗冲蚀能力较差;相比之下,丙烯酸防护涂层硬度高,表面较为密实,在受到冲蚀时,发生韧性撕裂和脱粘现象,抗冲蚀效果较好;环氧树脂防护涂层试样的破坏程度介于两者之间,在受到冲蚀时,冲蚀表面出现切削痕迹和未完全脱落的片层,相较于聚氨酯涂层,也具有更好的抗冲蚀性能。因此,通过喷涂防护涂层,可提高风沙环境中混凝土基础设施的抗冲蚀性能,结合防护涂层接触角及硬度测试结果,认为在风沙环境中,丙烯酸防护涂层在水工结构混凝土的防护上效果较好。

## 5 结论

1) 通过在混凝土表面喷涂防护涂层,可防御风沙环境造成的冲蚀破坏,提高其抗冲蚀性能。相同冲蚀条件下,丙烯酸防护涂层试样的抗冲蚀性能比聚氨酯防护涂层试样提升了约 57.56%,比环氧树脂防护涂层试样提升了约 33.57%。结合防护涂层的接触角及硬度测试结果,认为在风沙环境中,丙烯酸防护涂层在水工结构混凝土的防护上效果较好。

2) 不同冲蚀速度下,不同防护涂层冲蚀率的变化趋势较为一致,均呈现先缓慢增加、后加速损伤的趋势。当冲蚀速度介于 17~20 m/s 时,防护涂层的冲蚀率随冲蚀速度的增加而缓慢提升;当冲蚀速度大于 24 m/s 时,其冲蚀率随冲蚀速度的增加而迅速加快。相同冲蚀条件下,不同防护涂层冲蚀率大小为:聚氨酯防护涂层>环氧树脂防护涂层>丙烯酸防护涂层。

3) 随冲蚀角度变化,不同防护涂层的冲蚀率出现了不同的峰值。低角度冲蚀时,防护涂层的冲蚀率较高,冲蚀角度约在 30°时,聚氨酯防护涂层有最大冲蚀率,冲蚀角度在 15°~30°时,环氧树脂及丙烯酸防护涂层有最大冲蚀率。与低角度下的冲蚀率相比,防护涂层在高角度时的冲蚀率较低,抗冲蚀性能较好,表现出典型的塑性材料冲蚀损伤特征。在不同角度下冲蚀防护涂层时,不存在明显的塑形变形和脆性破坏阶段,而是随冲蚀分量变化,产生塑性变形向脆性破坏过渡的机制,且该现象存在于整个冲蚀过程中。

4) 分析表面分形维数  $D_s$  及受冲蚀后的微观形貌,发现低角度冲蚀时,沙粒压力的水平分量致使防护涂层所受的最大拉应力达到材料屈服极限,发生撕裂及脱粘,冲蚀率较高;高角度冲蚀时,沙粒的垂直分量致使其表面出现隆起及空穴等塑性变形,分形维数  $D_s$  增加,且在未超过材料屈服应力前,不会造成损伤界面的脱落,冲蚀率较低。

## 参考文献:

[1] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性[M].北京:科学

出版社,2014.

JIN Wei-liang, ZHAO Yu-xi. Durability of concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[2] ÇAVDAR A, YETGIN Ş. Investigation of abrasion resistance of cement mortar with different pozzolanic compositions and subjected to sulfated medium[J]. Construction and building materials, 2010, 24(4): 461-470.

[3] DEGHAN A, PETERSON K, SHVARZMAN A. Recycled glass fiber reinforced polymer additions to Portland cement concrete[J]. Construction and building materials, 2017, 146: 238-250.

[4] SELVI M T, THANDAVAMOORTHY T S. Mechanical and durability properties of steel and polypropylene fibre reinforced concrete[J]. International journal of earth sciences and engineering, 2014, 7(2): 696-703.

[5] SUJJAVANICH S, SIDA V, SUWANVITAYA P. Chloride permeability and corrosion risk of high-volume fly ash concrete with mid-range water reducer[J]. ACI materials journal, 2005, 102(3): 177-182.

[6] DEMIR İ, SEVİM Ö, TEKİN E. The effects of shrinkage-reducing admixtures used in self-compacting concrete on its strength and durability[J]. Construction and building materials, 2018, 172: 153-165.

[7] MALTESE C, PISTOLESI C, LOLLI A, et al. Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars[J]. Cement and concrete research, 2005, 35(12): 2244-2251.

[8] HAO Yun-hong, FENG Yu-jiang, FAN Jin-cheng. Experimental study into erosion damage mechanism of concrete materials in a wind-blown sand environment[J]. Construction and building materials, 2016, 111: 662-670.

[9] ARABNEJAD H, MANSOURI A, SHIRAZI S A, et al. Development of mechanistic erosion equation for solid particles[J]. Wear, 2015, 332-333: 1044-1050.

[10] 何真. 混凝土磨蚀冲蚀与其它环境因素的耦合作用[J]. 水利学报, 2015, 46(2): 138-145.

HE Zhen. Interactions between severe environment and concrete resistance to abrasion and erosion[J]. Journal of hydraulic engineering, 2015, 46(2): 138-145.

[11] 刘芳,尤占平,关博文,等. 外墙涂层对混凝土耐久性的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 1-5.

LIU Fang, YOU Zhan-ping, GUAN Bo-wen, et al. Impact of exterior wall coating on concrete durability[J]. Surface technology, 2014, 43(3): 1-5.

[12] 李伟华,廖晓,季涛,等. 氟碳涂层对海洋环境下混凝土抗氯离子渗透性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 43-47.

LI Wei-hua, LIAO Xiao, JI Tao, et al. Effects of fluorocarbon coating on resistance to chloride ion penetration of concrete in marine environment[J]. Surface technology, 2017, 46(12): 43-47.

[13] EL-HAWARY M M, ABDUL-JALEEL A. Durability assessment of epoxy modified concrete[J]. Construction and building materials, 2010, 24(8): 1523-1528.

- [14] HORGNIER M, WILLIEME P, GABET O. Influence of the surface properties of concrete on the adhesion of coating: Characterization of the interface by peel test and FT-IR spectroscopy[J]. *Progress in organic coatings*, 2011, 72(3): 360-379.
- [15] 王媛怡, 陈亮, 汪在芹. 水工混凝土大坝表面防护涂层材料研究进展[J]. *材料导报*, 2016, 30(9): 81-86.  
WANG Yuan-yi, CHEN Liang, WANG Zai-qin. Research progress of dam surface coating material for concrete in hydraulic engineering[J]. *Materials review*, 2016, 30(9): 81-86.
- [16] MEDEIROS M H F, HELENE P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption[J]. *Construction and building materials*, 2009, 23(3): 1476-1484.
- [17] 李炳奇, 刘小楠, 李云途. 水工结构聚脲防渗透涂层的力学性能与寿命预测研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(3): 268-275.  
LI Bing-qi, LIU Xiao-nan, LI Yun-tu. Study on durability and life prediction of polyurea composite anti-seepage coatings[J]. *Journal of hydraulic engineering*, 2020, 51(3): 268-275.
- [18] IQBAL N, SHARMA P K, KUMAR D, et al. Protective polyurea coatings for enhanced blast survivability of concrete[J]. *Construction and building materials*, 2018, 175: 682-690.
- [19] PARNIANI S, TOUTANJI H. Monotonic and fatigue performance of RC beams strengthened with a polyurea coating system[J]. *Construction and building materials*, 2015, 101: 22-29.
- [20] 黄微波, 刘旭东, 丁国雷, 等. 桥梁混凝土聚脲防护涂层配套底漆性能研究[J]. *混凝土*, 2009(12): 121-122.  
HUANG Wei-bo, LIU Xu-dong, DING Guo-lei, et al. Research on the primer of polyurea coating for the protection of bridge concrete[J]. *Concrete*, 2009(12): 121-122.
- [21] 张伟平, 管小军, 任佳俊, 等. 环氧涂层对混凝土抗氯离子渗透性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(3): 339-344.  
ZHANG Wei-ping, GUAN Xiao-jun, REN Jia-jun, et al. Experimental study on chloride permeability of concrete surface-treated with epoxy resin[J]. *Journal of building materials*, 2008, 11(3): 339-344.
- [22] MERAH A, KHENFER M M, KORICHI Y. The effect of industrial coating type acrylic and epoxy resins on the durability of concrete subjected to accelerated carbonation[J]. *Journal of adhesion science and technology*, 2015, 29(22): 2446-2460.
- [23] 阮峥, 刘朝辉, 成声月, 等. 水性环氧防水涂层材料对混凝土吸水性能的影响[J]. *表面技术*, 2015, 44(4): 97-103.  
RUAN Zheng, LIU Zhao-hui, CHENG Sheng-yue, et al. Research on the effect of waterborne epoxy resin coating on water-absorption properties of concrete[J]. *Surface technology*, 2015, 44(4): 97-103.
- [24] 钟世云, 陈志源, 龚宇辰, 等. 表面处理水泥砂浆试样的氯离子扩散系数[J]. *建筑材料学报*, 2000, 3(1): 53-58.  
ZHONG Shi-yun, CHEN Zhi-yuan, GONG Yu-chen, et al. Chloride diffusion coefficient of surface-treated mortar specimens[J]. *Journal of building materials*, 2000, 3(1): 53-58.
- [25] 买淑芳, 方文时, 李敬玮. “海岛结构”环氧“合金”抗冲磨防护材料的开发及应用[J]. *施工技术*, 2005, 34(4): 36-39.  
MAI Shu-fang, FANG Wen-shi, LI Jing-wei. Study and application of “sea island structure” epoxy resin “alloy” materials resistant to erosion and abrasion[J]. *Construction technology*, 2005, 34(4): 36-39.
- [26] YANG X, ZHANG T, WANG H, et al. A new solvent-free super high build epoxy coating evaluated by marine corrosion simulation apparatus[J]. *Materials and corrosion*, 2012, 63(4): 328-332.
- [27] SARASWATHY V, RENGASWAMY N S. Adhesion of an acrylic paint coating to a concrete substrate[J]. *Journal of adhesion science and technology*, 1998, 12(7): 681-694.
- [28] RIBEIRO C C, PINTO J D D S, GODOY G C, et al. Microstructural and topographic characterization of concrete protected by acrylic paint[J]. *Materials research*, 2013, 16(4): 817-823.
- [29] 耿飞, 高培伟, 徐少云, 等. 高性能丙烯酸类混凝土裂缝修补材料的制备[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(2): 255-259.  
GENG Fei, GAO Pei-wei, XU Shao-yun, et al. Study on repairing material made of high performance acrylic acid species for concrete pavement cracks[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(2): 255-259.
- [30] 路维. 水工混凝土结构修复材料述评[J]. *四川建筑科学研究*, 2014, 40(2): 229-231.  
LU Wei. Review of hydraulic concrete structure repair materials[J]. *Sichuan building science*, 2014, 40(2): 229-231.
- [31] ALMUSALLAM A A, KHAN F M, DULAIJAN S U, et al. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability[J]. *Cement and concrete composites*, 2003, 25(4-5): 473-481.
- [32] 孙德文, 冉千平, 杨冲, 等. 聚氨酯-聚脲复合防护层的构筑及其在混凝土表面防护中的应用[J]. *腐蚀与防护*, 2013, 34(11): 967-971.  
SUN De-wen, RAN Qian-ping, YANG Chong, et al. Design and application of polyurethane/polyurea protective coating and its application to surface protection of concrete[J]. *Corrosion & protection*, 2013, 34(11): 967-971.
- [33] 刘腾飞, 胡昱, 李祥, 等. 聚氨酯防水保温材料对混凝土抗冻性能的影响[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(1): 132-138.  
LIU Teng-fei, HU Yu, LI Xiang, et al. Effects of polyurethane coating on concrete freezing resistance[J]. *Journal of hydroelectric engineering*, 2011, 30(1): 132-138.