

西北盐渍土地区光伏支架混凝土修复界面 耐久性研究

宋山茂¹,王瑞骏²,李占海¹,王琦¹,孙斌¹,李阳²,王博楠²

(1. 青海黄河上游水电开发有限责任公司新能源工程建设分公司, 青海 西宁 810000;

2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

A Study on Durability of the Concrete Repair Interface of the Photovoltaic Bracket in the Saline Soil Area of Northwest China

SONG Shanmao¹, WANG Ruijun², LI Zhanhai¹, WANG Qi¹, SUN Bin¹, LI Yang², WANG Bonan²

(1. New Energy Engineering Construction Branch of Qinghai Upper Yellow River Hydropower Development Co., Ltd., Xining 810000,

Qinghai, China; 2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

ABSTRACT: Under the effects of sulfate erosion and freeze-thaw cycles, the concrete of photovoltaic bracket foundations in the northwest saline soil area deteriorates rapidly. This article presents interface durability tests on cement mortar-concrete, studying the changes in durability indicators under different erosion effects, establishing a damage degree based on the loss rate of interface shear strength, and analyzing the micro-structure of the specimens using scanning electron microscopy. The results show that the damage to the specimen is the most severe under alternating action, followed by salt freezing cycle and finally dry wet cycle. The damage caused by alternating action on the specimen is a superimposition effect, with a damage degree 6.43% higher than that of a single erosion superimposition result. Compared to $MgSO_4$ solution, Na_2SO_4 solution causes more severe interface degradation, with damage levels of 95.24% (Na_2SO_4) and 82.41% ($MgSO_4$) after 6 cycles of alternating action. Microscopic experiments show that after undergoing alternating effects, the bonding interface of the specimen expands and widens, and erosion products are generated.

KEY WORDS: cement-based mortar; interface; dry wet cycle; salt freezing; alternation action

摘要: 在冻融、盐蚀作用下,西北盐渍土地区光伏支架基础混凝土劣化迅速。针对水泥基砂浆-混凝土界面进行耐久性试验,研究不同侵蚀作用后耐久性指标的变化规律,建立以界面抗剪强度损失率为指标的损伤度,利用扫描电镜对试件的微观结构进行分析。分析结果表明:交替作用下试件损伤最严重,其次为盐冻循环,最后为硫酸盐干湿循环,且交替作用对试件所造成的损伤为超叠加效应,其损伤度比单一侵蚀叠加结果高 6.43%;相比于 $MgSO_4$ 溶液, Na_2SO_4 溶液对界面劣化更为严重,交替作用 6 次时两者损伤程度分别为 95.24% (Na_2SO_4) 和 82.41% ($MgSO_4$);微观试验显示,在经历交替作用后,试件粘结界面扩展变宽,并有侵蚀产物生成。

关键词: 水泥基砂浆;界面;干湿循环;盐冻;交替作用

随着我国“双碳”目标的提出,国内光伏电站数量明显增多^[1-2]。由于西北盐渍土地区昼夜温差大,该地区光伏电站基础混凝土常遭受冻融、盐蚀破坏^[3],从而危及电站安全^[4]。采用修复材料对基础混凝土进行修补加固是解决这一问题的关键手段。

近年来,国内外学者针对混凝土修复界面性能的研究已经取得较为丰硕的成果。CAO 等^[5]基于界面粘结滑移退化模型提出了可用于准确预测界面盐冻损伤的方法。王伯昕等^[6]研究了不同冻融循环次数对于粉质黏土-混凝土界面剪切性能的影响,发现界面的剪切性能在冻融循环作用下逐渐劣化。朱本清等^[7]研究了盐冻环境下混凝土界面宏观和细观

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JQ-357)。

Project Supported by Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province(2022JQ-357).

力学性能的变化规律,结果表明在盐冻过程中界面粘结强度呈现出初始的强化阶段和后期的劣化阶段。李伟文等^[8]对复合材料-混凝土界面粘结性能进行研究,发现了经历硫酸盐干湿循环后混凝土性能劣化明显,复合材料性能保持良好。当前研究大多集中在单一作用对于粘结界面耐久性的影响,而对多因素耦合作用下的界面耐久性研究较少,所以深入且多层次地研究多因素耦合作用下界面的损伤特性是必要的。

本文开展了硫酸盐干湿循环作用、盐冻循环作用及硫酸盐干湿循环与盐冻循环交替作用下水泥基砂浆和基底混凝土界面的宏观耐久性试验及微观试验,确定了水泥基砂浆-基底混凝土的界面耐久性能及微观结构,为提升修复砂浆-混凝土界面的耐久性提供了参考。

1 材料与试验方法

1.1 原材料及配合比

试验所用水泥基砂浆拌制的具体混合比例见表1。混凝土设计强度等级为C40,采用海螺牌普通硅酸盐水泥,强度等级为P.O 42.5;粗骨料采用级配良好的碎石,粒径范围为5~25 mm;细骨料采用渭河级配连续的天然河沙,细度模数为2.7。基底混凝土的具体配合比见表2。

表1 水泥基砂浆混合比例

Table 1 Mixture proportions of cement based mortar 单位:kg/m³

成分	水	水泥	细骨料	防锈剂	早强剂
用量	225	500	1 500	11	22

表2 基底混凝土配合比

Table 2 Mixture proportion of base concrete

成分	用量
w/c	0.4
水/(kg/m ³)	146
水泥/(kg/m ³)	317
粉煤灰/(kg/m ³)	49
粗骨料/(kg/m ³)	1 234
细骨料/(kg/m ³)	691
减水剂/%	0.960
引气剂/%	0.027

1.2 试件成型

参考《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150—2017)^[9],制备 100 mm×100 mm×100 mm 的混凝土试

件。将该试件养护好后切割成 100 mm×100 mm×50 mm 的长方体,并在界面进行粗糙度处理,见图1。将处理好的试件放置于立方体模具中,先用德国某斯夫建材系统有限公司生产的界面剂涂抹在混凝土界面上,再将拌制好的水泥基砂浆装填至模具中,并在成型脱模后养护 28 d。



图1 基底混凝土粗糙度处理

Fig.1 Roughness treatment of base concrete

1.3 试验方法

参照《普通混凝土长期耐久性试验方法标准》(GB/T50082—2009)^[10]进行硫酸盐干湿循环试验和盐冻循环试验。硫酸盐干湿-盐冻交替作用按照上述相关步骤,先进行 15 次硫酸盐干湿循环试验,再进行 25 次盐冻循环试验,此为 1 次交替作用。对经过上述试验的试件,进行表观形态、质量损失率、抗剪强度分析以及微观检测。

2 结果与分析

2.1 表观形态

图2显示了不同侵蚀作用后,试件表面的损伤情况。

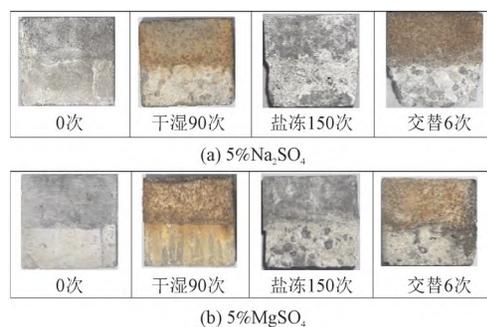


图2 不同侵蚀作用下水泥基砂浆-基底混凝土表观形态
Fig.2 Apparent morphology of cement-based mortar-concrete substrate under different erosion effects

由图 2 可知,试件在经历干湿循环后,试件表面有部分结晶盐析出,混凝土表面出现掉渣现象,砂浆表面则较为完整;试件在经历盐冻循环后的侵蚀破坏主要发生在混凝土上,在经历 150 次盐冻循环后混凝土出现骨料裸露现象;相比于单一侵蚀,交替作用劣化更为明显,试件表面白色结晶数量增加、劣化严重,混凝土表面骨料外露,边缘砂浆掉落。此外,在 Na₂SO₄ 溶液中经历交替作用的试件劣化更为严重。这一方面是由于 Na₂SO₄ 的溶解度较低,由盐结晶积累所导致的物理破坏作用更强;另一方面, MgSO₄ 中镁离子和氢氧化钙反应所生成的 Mg(OH)₂ 膜包裹着试件,起到了削弱硫酸盐和冻融双重破坏的作用^[8]。

2.2 质量损失

不同侵蚀作用下,试件质量损失率的变化见图 3。由图 3(a)可知,质量损失率的干湿循环分为 2 个阶段:循环次数在 0~30 内,为下降阶段;30 次以后为上升阶段。试件在 Na₂SO₄ 和 MgSO₄ 溶液中干湿循环 90 次后的质量损失率分别为 0.25% 和 0.12%。由图 3(b)可知,试件在盐冻循环过程中,质量损失率的变化与干湿循环类似。由图 3(c)可知,试件在交替作用 1 次后,质量损失率分别下降

了-0.39%(Na₂SO₄)和-0.36%(MgSO₄)。这是由于钙矾石、石膏等侵蚀产物的生成,以及溶液结冰使部分小孔被撑破,导致更多溶液进入试件内部而增加了其质量^[11]。在 1 次交替作用后,质量损失率开始增加,6 次交替作用后试件质量损失率分别增加了 6.04%(Na₂SO₄)和 4.91%(MgSO₄)。这是由于试件内部结构被破坏,浆体与骨料逐渐剥落^[12]。

综上,试件在交替作用下质量损失率更高。此外,在 Na₂SO₄ 溶液中试件质量损失相比在 MgSO₄ 溶液中更明显。这是由于 Na₂SO₄ 在侵蚀过程中对试件的物理破坏作用比 MgSO₄ 更强^[7]。

2.3 界面抗剪强度

图 4 显示了不同侵蚀作用后,试件的界面抗剪强度及界面抗剪强度损失率。

由图 4(a)可知,随着干湿循环次数的增加,试件的界面抗剪强度表现为先增大后减小的趋势^[13]。在 Na₂SO₄ 和 MgSO₄ 溶液中经历 15 次干湿循环后,界面抗剪强度分别上升了 3.03% 和 11.76%;随后抗剪强度开始下降,90 次干湿循环时强度分别下降了 24.2% 和 17.6%。由图 4(b)可知,经历盐冻循环后,试件界面抗剪强度的变化同样为先增大后减小。

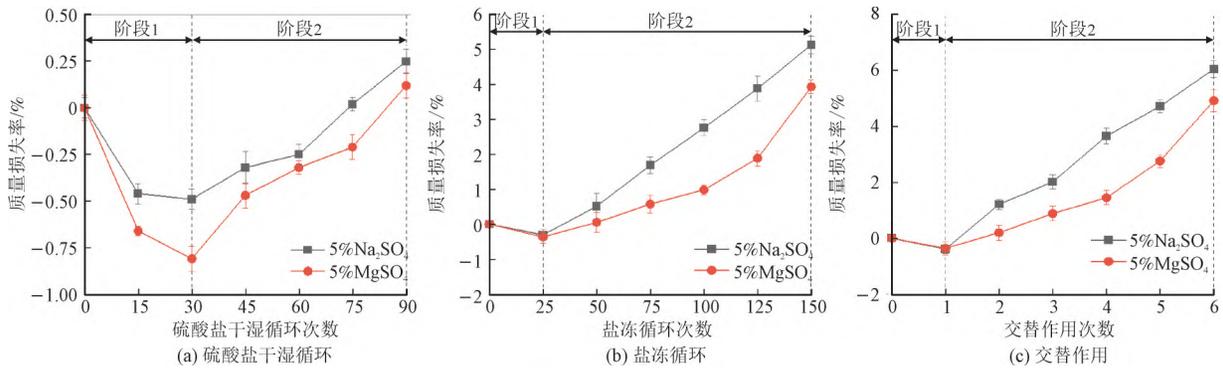


图3 不同侵蚀作用下水泥基砂浆-基底混凝土的质量损失率

Fig.3 Mass loss rate of cement-based mortar-concrete substrate under different erosion effects

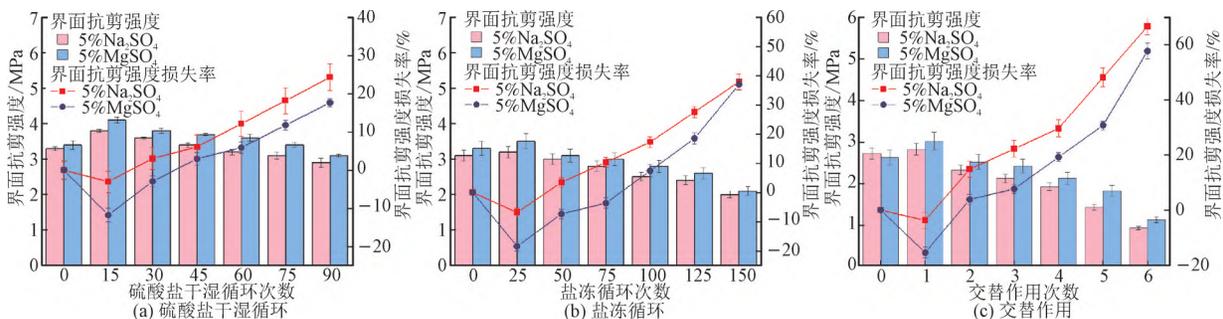


图4 不同侵蚀作用下水泥基砂浆-基底混凝土界面抗剪强度

Fig.4 Interface shear strength of cement-based mortar-concrete substrate under different erosion effects

由图 4(c)可知,在 1 次交替作用后,试件界面抗剪强度分别增加了 0.36% (Na₂SO₄ 溶液)和 0.39% (MgSO₄ 溶液);随着交替作用次数的增加,干湿和盐冻的双重破坏作用逐渐增强^[14],在经历 6 次交替作用后抗剪强度分别降低了 48.48% (Na₂SO₄ 溶液)和 37.14% (MgSO₄ 溶液)。

综上,试件在交替作用下的抗剪强度明显低于单一侵蚀作用。此外,在 Na₂SO₄ 溶液中试件的界面抗剪强度相比 MgSO₄ 溶液更低。这是由于 Mg(OH)₂ 致密层阻碍硫酸盐向试件内部迁移,并对其强度有一定的补偿作用。

2.4 界面剪切破坏形态

图 5 显示了不同侵蚀作用后,试件界面的剪切破坏形态。图 5 中,左边为水泥基砂浆,右边为混凝土,其中标注部分为混凝土。未经历侵蚀的试件发生混合型破坏模式,而在干湿循环 90 次或盐冻循环 150 次后,剪切破坏转变在混凝土面,这表明此时水泥基砂浆与基底混凝土的界面粘结强度大于基底混凝土本体的强度;交替作用下,试件剪切破坏也发生在混凝土面,但破坏更为明显,这表明水泥基砂浆抗渗性能、抗干湿-盐冻性能高于基底混凝土。此外,相比 Na₂SO₄ 溶液,试件在 MgSO₄ 溶液中经历不同侵蚀作用后的劣化程度较小,但变化规律基本一致。

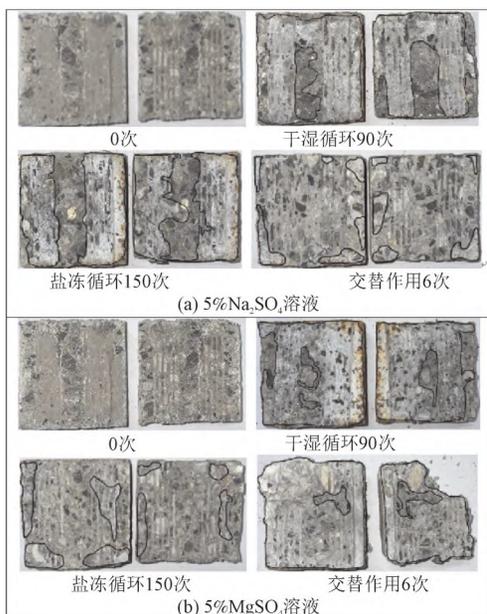


图 5 不同侵蚀作用下水泥基砂浆-基底混凝土的剪切破坏形态

Fig.5 Interface shear failure mode of cement-based mortar-concrete substrate under different erosion effects

2.5 试件损伤度

为了对比不同侵蚀作用下试件的损伤程度,以界面抗剪强度损失率为指标,建立不同侵蚀下的试件损伤度 D 。当抗剪强度损失率达到 70% 时则认为损伤度为 100%,试件损伤度的计算公式为

$$D_n = \frac{f_0 - f_n}{f_0} \div 70\% \quad (1)$$

式中: D_n 为循环 n 次时试件的损伤度; f_0, f_n 分别为试件的初始抗剪强度和循环 n 次时的抗剪强度。根据试验数据,分别计算不同侵蚀作用下试件的损伤度,结果见表 3。

表 3 不同侵蚀作用下试件在不同循环次数下的损伤度
Table 3 Damage of specimens subjected to different erosion effects under different number of cycles

因素	数据					
干湿循环次数	15	30	45	60	75	90
损伤度(Na ₂ SO ₄)/%	-4.33	4.33	8.66	17.31	25.97	34.63
损伤度(MgSO ₄)/%	-16.80	-4.20	4.20	8.40	16.80	25.21
盐冻循环次数	25	50	75	100	125	150
损伤度(Na ₂ SO ₄)/%	-9.86	4.93	14.77	24.63	39.40	56.19
损伤度(MgSO ₄)/%	-26.46	-10.59	-5.29	10.59	26.46	52.90
交替作用次数	1	2	3	4	5	6
损伤度(Na ₂ SO ₄)/%	-5.29	21.16	31.74	42.33	68.79	95.24
损伤度(MgSO ₄)/%	-16.49	5.50	10.99	27.47	43.96	82.41

采用函数关系式拟合的不同侵蚀作用下损伤度与循环次数的关系式为

$$D = Ax + B \quad (2)$$

$$D = Ax^2 + Bx + C \quad (3)$$

式中: D 为损伤度; x 为循环次数; A, B, C 均为系数。

试件在 3 种侵蚀作用下的拟合关系式及拟合精度见图 6。其中,试件在不同侵蚀作用下损伤度拟合曲线的 R^2 均大于 0.97,因此,所得拟合曲线可以较好地表示不同侵蚀作用下试件的损伤程度。

由图 6 可知,干湿循环作用下,试件的损伤度曲线拟合为一次函数;而盐冻循环和交替作用下,则拟合为二次函数。以 Na₂SO₄ 溶液为例,对水泥基砂浆-混凝土试件损伤度拟和曲线进行整体分析的结果可知,交替作用下试件的损伤度比单一因素叠加的结果更高。在 6 次交替作用后,试件损伤度比单一因素叠加结果高了 6.43%。因此,交替作用对试件造成的损伤是一种超叠加效应,而不是简单的叠加。

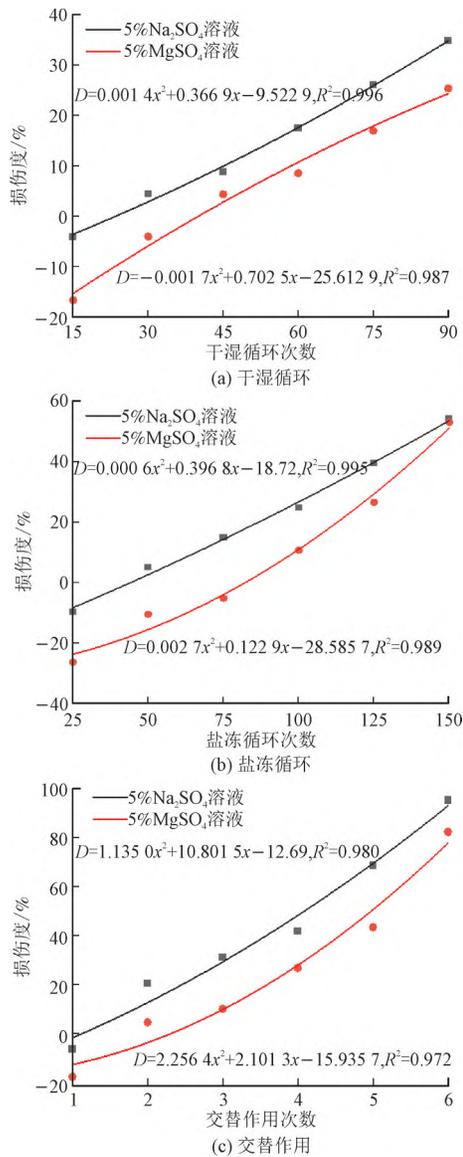


图6 不同侵蚀作用下损伤度与循环次数关系曲线
 Fig.6 Curve of damage degree versus number of cycles under different erosion effects

2.6 界面微观结构

未经历侵蚀作用与经历6次交替作用后,试件界面的微观形貌见图7。

由图7可知,未经历侵蚀作用时,试件界面处的混凝土及水泥基砂浆较为致密,并可以观察到Ca(OH)₂;试件在Na₂SO₄溶液中经历6次交替循环后,盐冻和干湿循环的双重作用使得粘结界面变宽,不仅在基底混凝土区域内发现大量针状钙矾石以及被侵蚀的Ca(OH)₂,而且在水泥基砂浆区域也生成了钙矾石,但钙矾石数量不及基底混凝土区域;在MgSO₄溶液中经历6次交替循环后,可以看

到有部分Mg(OH)₂覆盖在混凝土表面,因其可以在一定程度上阻挡硫酸盐侵蚀,所以在MgSO₄中经历交替循环后的试件界面被侵蚀的程度相对较小。但是由于混凝土中产生的水化硅酸钙与镁离子反应生成水化硅酸镁,导致混凝土及砂浆被剥蚀,裂纹扩展,粘结界面变宽。

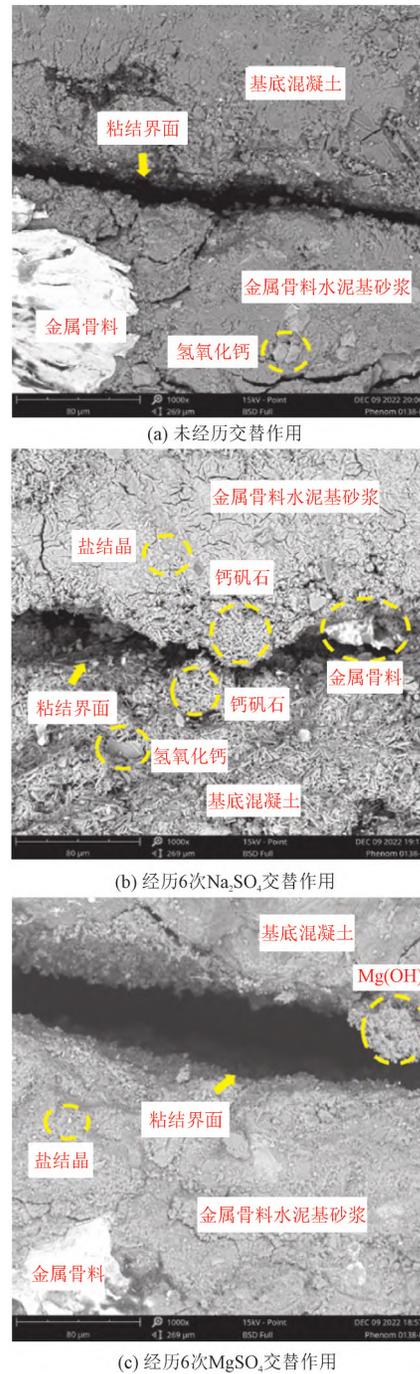


图7 水泥基砂浆-基底混凝土界面微观形貌
 Fig.7 Microscopic morphology of the interface between cement-based mortar and concrete substrate

3 结论

1) 在3种侵蚀作用下,试件损伤最严重的为交替作用,其次为盐冻作用,最轻为干湿作用。随着侵蚀次数的增加,混凝土表面的劣化相较于水泥基砂浆更加严重。试件质量损失率均呈现先减小后增加的趋势,交替作用6次后质量损失率最大为6.04%。

2) 随着侵蚀次数的增加,试件的剪切破坏形态由混和破坏模式转化为基底混凝土破坏。界面抗剪强度表现为先增高后降低的趋势,交替作用6次时抗剪强度损失率最大为66.67%。交替作用对试件造成的损伤是一种超叠加效应,而不是单一叠加。

3) 试件在经历交替作用后界面扩展变宽,并有盐结晶产生。相比于 $MgSO_4$ 溶液, Na_2SO_4 溶液对水泥基砂浆-基底混凝土界面耐久性的劣化更为严重。 Na_2SO_4 溶液对试件既有物理盐结晶破坏又有化学侵蚀破坏,而 $MgSO_4$ 溶液主要以化学侵蚀破坏为主。

参考文献

[1] 董明,李晓枫,杨章,等.基于数据驱动的分布式光伏发电功率预测方法研究进展[J].电网与清洁能源,2024,40(1):8-17,28.
DONG Ming, LI Xiaofeng, YANG Zhang, et al. Research progress on data-driven prediction methods for distributed photovoltaic power generation[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 8-17, 28.

[2] 魏伟,叶利,方毅,等.考虑碳排放配额和碳交易的新能源电力系统日前优化调度[J].电网与清洁能源,2024,40(1):130-136.
WEI Wei, YE Li, FANG Yi, et al. Day-ahead optimal scheduling of new energy power system considering carbon emission quota and carbon trading[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1):130-136.

[3] 张廷毅,汪自力,郑光和,等.碳化与硫酸盐溶液干湿循环后混凝土断裂韧度[J].水利学报,2016,47(8):1062-1069.
ZHANG Tingyi, WANG Zili, ZHENG Guanghe, et al. Fracture toughness of concrete after carbonation and wet-dry cycle of sulfate solution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(8):1062-1069.

[4] 杨冬鹏,郭卫民,王宝民.基于Weibull模型的混凝土冻

融损伤寿命预测及应用[J].水利学报,2022,53(8):977-983.

YANG Dongpeng, GUO Weimin, WANG Baomin. Prediction and application of freezing-thawing damage life of concrete based on Weibull model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(8):977-983.

[5] CAO J, WU F, LEI S, et al. Experimental study on the bonding performance of engineered cementitious composites to normal concrete interface subjected to salt freeze-thaw cycles[J]. Composite Structures, 2024, 330(15): 117828.

[6] 王伯昕,刘佳奇,王清,等.冻融循环条件下粉质黏土-混凝土界面微观损伤及宏观剪切性能研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(增刊1):3792-3800.

WANG Boxin, LIU Jiaqi, WANG Qing, et al. Study of meso-damage and macroscopic shear performance of silty clay-concrete interface under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S1):3792-3800.

[7] 朱本清,余红发,巩旭,等.除冰盐冻融作用下混凝土界面粘结强度与界面过渡区细观力学性能的关系[J].材料导报,2024,38(5):1-17.

ZHU Benqing, YU Hongfa, GONG Xu, et al. Relationship between bond strength of concrete interface and meso-mechanical properties of interface transition zone under freezing-thawing action of deicing salt[J]. Materials Reports, 2024, 38(5):1-17.

[8] 李伟文,徐文冰,周英武,等.硫酸盐溶液干湿循环对FRP加固混凝土梁抗剪性能的劣化作用[J].北京工业大学学报,2014,40(8):1226-1231.

LI Weiwen, XU Wenbing, ZHOU Yingwu, et al. Effect of sulfate solution dry-wet cycling environment on shear behavior of concrete beam externally bonded FRP[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(8): 1226-1231.

[9] 中华人民共和国国家能源局.水工混凝土试验规程DL/T 5150—2017[S].北京:中国电力出版社,2017.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准GB/T 50082—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[11] 张爱勤,贾坚,刘芝敏,等.环氧树脂对混凝土抗盐冻能力的影响研究[J].硅酸盐通报,2019,38(4):1278-1283.

ZHANG Aiqin, JIA Jian, LIU Zhimin, et al. Influence of epoxy resin on salt scaling resistance of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(4): 1278-1283.

- [12] 靳文强, 胡珈源, 王琦, 等. 硫酸盐干湿环境下CFRP-粘土砖砌体界面性能试验[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), 2023:1-10[2024-05-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20230327.0856.002.html>.
JIN Wenqiang, HU Jiayuan, WANG Qi, et al. Experiment on interfacial bonding performance between CFRP and clay brick under sulfate attack of wetting-drying cycles[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023:1-10[2024-05-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.202303277.0856.002.html>.
- [13] 郭凯, 马浩辉, 杨丰硕, 等. 冻融循环作用下GO-RC界面过渡区的微观力学性能[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1): 230-238.
GUO Kai, MA Haohui, YANG Fengshuo, et al. Micromechanical properties of GO-RC interface transition zone under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):230-238.
- [14] 张学鹏, 张戎令, 杨斌, 等. 冻融-硫酸盐腐蚀耦合作用下早龄期混凝土强度演变及预测模型研究[J]. 材料导报,

2024, 38(5):205-213.

ZHANG Xuepeng, ZHANG Rongling, YANG Bin, et al. Research on strength evolution and prediction model of early-age concrete under the coupling action of freeze-thaw and sulfate corrosion[J]. Materials Reports, 2024, 38(5):205-213.

收稿日期:2024-04-15。 修回日期:2024-05-22。

作者简介:

宋山茂(1981—),男,本科,高级工程师,研究方向为电力工程技术;

王瑞骏(1963—),男,博士,教授,研究方向为混凝土耐久性 & 损伤修复;

李占海(1989—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力工程技术;

王琦(1988—),男,本科,研究方向为电力工程技术;

孙斌(1992—),男,本科,研究方向为电力工程技术;

李阳(1991—),男,博士,副教授,研究方向为混凝土耐久性;

王博楠(1988—),男,博士,工程师,研究方向为地下结构抗震与可靠性分析。

(编辑 卢秀)