

高延性水泥基复合材料与既有混凝土结合面的抗溶蚀性

王少伟, 肖焰钰, 朱平华, 严先萃, 吕奇峰

(常州大学环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

摘 要: 针对触水混凝土结构补强加固中高延性水泥基复合材料(ECC)与既有混凝土结合面的抗溶蚀性, 采用 0.5 mol/L 的硝酸溶液对含结合面的 ECC-既有混凝土复合试件进行加速溶蚀实验, 研究既有混凝土界面凿毛、湿饱和及涂刷界面剂 3 种处理方式对结合面黏结强度、溶蚀深度和钙溶蚀量 3 种评价指标的时变影响规律, 并通过扫描电子显微镜对结合面抗溶蚀性提升效果进行微观机理分析。结果表明: 3 种界面处理方式均能有效提高结合面的初始黏结强度和抗溶蚀性, 且对溶蚀过程的时变影响规律基本一致, 可用溶蚀前的黏结强度评价结合面的抗溶蚀性; 凿毛对提升结合面初始黏结强度最有效, 而界面剂更有利于减缓溶蚀过程中界面处理提升效果的劣化速度; 组合处理模式下各界面处理方式的单一提升效果明显优于其单独使用时, 且组合的其它处理方式越多, 优势越明显; 环氧树脂界面剂的提升效果略优于水泥净浆界面剂。

关键词: 结合面; 界面处理; 黏结强度; 抗溶蚀性

中图分类号: TU528.01 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)10-2692-09

网络出版时间: 2022-08-29



Leaching Resistance of Bonding Interface Between Engineered Cementitious Composite and Existing Concrete

WANG Shaowei, XIAO Yanyu, ZHU Pinghua, YAN Xiancui, LV Qifeng

(School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, China)

Abstract: The calcium leaching resistance of bonding interface between engineered cementitious composite (ECC) and existing concrete is a key issue in reinforcement engineering. A nitric acid solution of 0.5 mol/L was used to carry out the accelerated leaching test, and the time-dependent influences of interface treatment methods (*i.e.*, roughening, wet saturation and interfacial agent) were investigated *via* indications of bonding strength, leaching depth and cumulative leached calcium ion. The improvement mechanism in micro scale was analyzed by scanning electron microscopy. The results show that the three interface treatment methods can effectively improve the bonding quality, and their time-dependent influences are similar. The bonding strength before leaching can be used to evaluate the leaching resistance of bonding interface. Roughening is more effective to improve the initial bonding strength, while interfacial agent is helpful to slow down the deterioration rate of interface treatment effect in the leaching process. The improvement effect of combined treatment methods is better than that of single treatment method.

Keywords: bonding interface; interface treatment methods; bonding strength; leaching resistance

具有多缝稳态开裂和自愈合特性的高延性水泥基复合材料(ECC), 作为面层补强加固材料已在混凝土坝、输水渠道和桥墩等工程中取得了良好的应用效果, 但工程实践表明, ECC 与既有混凝土结合面的黏结效果是至关重要的^[1-2]。国内外学者对此开展了系统研究, 结果表明, 既有混凝土表面的粗糙

度、干湿状态、界面剂、砂灰比及 ECC 浇筑方式等对结合面黏结效果的影响较大。总体而言, 黏结强度随界面粗糙度的增大而增大, 界面湿饱和、涂刷界面剂和加大 ECC 砂灰比均可有效提升结合面的黏结强度^[3-6], 如王楠等^[3]发现湿饱和状态可使结合面劈裂抗拉强度比干燥状态下高 5%~35%; 丁祖德等^[7]

收稿日期: 2022-03-25。 修订日期: 2022-04-13。

基金项目: 国家自然科学基金(51709021); 湖南省自然科学基金(2020JJ5317)。

第一作者: 王少伟(1988—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2022-03-25. Revised date: 2022-04-13.

First author: WANG Shaowei (1988—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: shaowei2006nanjing@163.com

研究得出环氧树脂、膨胀水泥浆和水泥净浆 3 种界面剂的提升效果依次减弱; 王孟伟^[8]发现黏结强度与粗糙度成二次多项式关系, 界面最佳粗糙度为 3~4 mm。

恶劣服役环境下 ECC 补强加固工程运行一段时间后, 经常出现沿结合面开裂的现象, 表明结合面是抗环境侵蚀作用的薄弱部位^[9]。围绕结合面的物质传输性能, 丁祖德等^[7]发现结合面的抗渗性随界面粗糙度的增大而提高, 凿毛处理可使结合面渗透系数降至 21.77%; 欧阳志鹏等^[10]发现结合面碳化速率明显大于混凝土本体, 不做任何处理情况下可达 3.0 倍; Qian 等^[11]发现相同时间内, 含结合面混凝土的通过电荷量是无结合面情况下的 1.5 倍。针对触水混凝土构筑物的溶蚀病害, 国内外学者针对整浇混凝土和 ECC 研究了其抗溶蚀性, 发现溶蚀作用下二者的力学性能均随溶蚀时间的延长而下降^[12-13]。此外, 王少伟等^[14]研究发现层间间歇时间和凿毛处理对混凝土浇筑层面抗溶蚀性有显著影响, 间歇 12 h 将导致层面耐溶蚀年限缩减 61%。

将 ECC 用于挡墙、隧道和大坝下游面等混凝土结构背水侧的表面修复时, 老结构既有裂缝中的水

渗透, 以及大坝、渠道、桥墩等迎水侧 ECC 开裂向内渗水情况下, 结合面长期处于湿润状态, 进而因溶蚀引起结合面黏结失效的可能性增大。ECC 与既有混凝土结合面的耐久性直接决定着补强加固效益, 当前对结合面抗溶蚀性的研究尚不透彻。对此, 本文以界面粗糙度、干湿状态和界面剂为控制因素, 通过化学溶液浸泡法, 对 ECC-既有混凝土复合试件进行加速溶蚀实验, 开展结合面抗溶蚀性的定量评价研究, 并结合扫描电子显微镜(SEM)进行微观分析, 诠释界面处理对结合面抗溶蚀性的提升机理。

1 实验

1.1 原材料及试件成型

ECC-既有混凝土复合试件中材料配合比如表 1 所示, 其中混凝土目标强度等级为 C30。水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 表观密度为 2 963 kg/m³, 化学组分如表 2 所示; 粗骨料为花岗岩碎石, 最大粒径为 9.5 mm, 级配良好; 细骨料为天然河砂, 细度模数为 2.46, 属于中砂; 拌合水为普通自来水。ECC 中采用一级粉煤灰, 细骨料为粒径 0.6 mm 左右的石英砂, 聚羧酸减水剂, 国产聚乙烯醇(PVA)纤维。

表 1 材料配合比
Table 1 Mixture of material

Material	Cement	Aggregate	Sand	Fly ash	Water	Water-reducing agent	PVA
Concrete	467	1 022	681		280		
ECC	393		457	865	311	5	26

表 2 水泥的化学组分
Table 2 Chemical composition of cement

Component	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	Others
Mass fraction/%	61.01	20.41	7.42	3.74	1.26	0.15	0.75	0.28	2.07	0.26	2.65

化学溶液浸泡法加速溶蚀实验中, 浸泡液浓度梯度会随溶蚀深度的增大而减小, 后期溶蚀进程非常缓慢, 而溶蚀深度较浅时, 可获取的实验数据点较少, 无法合理表征较大溶蚀程度下的演变规律。对此, 选用边长为 50 mm 的立方体非标准试件, 以期最终溶蚀面积比超过 50%。ECC-既有混凝土复合试件采用分层浇筑的方法, 先浇下层 25 mm 厚的混凝土层, 养护 28 d 后, 按照预定的实验方案对浇筑成型面加工处理后, 再浇筑上层 25 mm 厚的 ECC 层, 之后继续养护 28 d。为确保溶蚀仅发生在试件的四周, 取出复合试件阴干 24 h 后, 在平行于结合面的试件上下表面涂抹乙烯基树脂涂层, 并继续阴干不少于 24 h, 之后进

行加速溶蚀实验。

1.2 样品制备

为考察既有混凝土界面凿毛、湿饱和及涂刷界面剂 3 种界面处理方式, 在单一和组合处理模式下对 ECC-既有混凝土结合面抗溶蚀性的影响, 含结合面复合试件共分为 9 组, 试件编号如表 3 所示。所有下层混凝土试件均用细钢丝刷除去浇筑成型面上的浮浆, 凿毛处理(R)则进一步用粗钢丝刷凿至试件表面露出部分粗骨料, 并控制粗糙度基本一致。选用工程中常用的 2 种界面剂, 分别为水泥净浆(C)和环氧树脂(H)。界面干湿状态有湿饱和(W)和干燥(D)2 种, 在浇筑上层 ECC 前, 前者将下层混凝土试件放在水中浸泡 24 h 后, 取出阴干至表

面无明水,后者将自然阴干混凝土试件放置于温度为 60 ℃ 的干燥箱中干燥 24 h,拿出待冷却后,再

浇筑上层 ECC。对照组为混凝土整浇(C0)和 ECC 整浇(E0)试件。

表 3 ECC-既有混凝土复合试件编号

Table 3 ECC-existing concrete composite specimen number

Sample No.	D	W	RD	RW	DC	WC	RDC	RWC	RWH
Interfacial agent	No	No	No	No	C	C	C	C	H
Wet saturation	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes
Roughening	No	No	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes

Note: R, D, W, C and H represent five single treatment methods of roughening, drying, wet saturation, brushing cement paste and epoxy resin interface agents on the joint interface, respectively. For the specimen number contains two or more letters, it means a combined treatment mode. Taking the RWC as an example, the interface of this specimen is roughened, wet saturated, and then coated with cement paste interface agent.

1.3 样品表征

溶蚀介质选用 0.5 mol/L 的硝酸溶液,利用全浸泡法对试件进行加速溶蚀。浸泡液的初始 pH 值为 0.3,定期测量浸泡液 pH 值,并及时添加硝酸溶液,使浸泡液的 pH 值保持在 0.3,以确保浸泡液浓度保持稳定。复合试件的结合面黏结强度按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,由 YNS 300 型电液伺服万能试验机沿结合面进行劈裂测试,由于 ECC 和混凝土的弹性模量不一致,因此结合面黏结强度不宜采用劈裂抗拉强度计算公式进行描述,在各组试件结合面面积相同情况下,直接以劈裂力的形式进行表征。溶蚀深度采用酚酞指示剂法,先用厚胶带把结合面两侧 ECC 和混凝土分别包裹,在结合面放置薄刀片,沿结合面 4 个侧边缓慢劈开试件,对劈开面喷涂质量分数 0.5% 的酚酞指示剂,未溶蚀区颜色变成紫红色后,测量试件边缘到变色分界线的距离,每边设置 8 个测点并取其平均值。浸泡液钙离子浓度参照 SL/T352—2020《水工混凝土试验规程》,采用 EDTA 络合滴定法测试。切割并打磨制备尺寸为 5 mm×5 mm×2 mm 左右的含结合面试样,使用日本电子 JSM-IT100 扫描电子显微镜(SEM)观测结合面的微观形貌,观测时先将试样放大 50 倍,找到结合面分界线后,再逐步放大至 1 000 倍。

2 结果与讨论

2.1 未溶蚀状态下结合面劈裂力

图 1 为溶蚀前 ECC-既有混凝土结合面的劈裂力。从图 1 可以看出,无界面剂状态下样品 D、样品 W、样品 RD 和 RW 所产生的界面处理效果依次提升,后 3 者的劈裂力较 D 组分别提高了 5.83%、16.34%和 24.27%;样品 DC、样品 WC、样品 RDC 和 RWC 均是在水泥净浆界面剂基础上进行的,处理效果最为明显的是 RWC,较 D 组提高了 40.78%,而 DC 组的提升幅度为 8.41%;RWC 与 RWH 的区

别仅在于界面剂种类的不同,分别为水泥净浆和环氧树脂,后者处理效果略好于前者,较 D 组提高了 43.53%。由此表明:既有混凝土界面的 3 种处理方式均可有效提升结合面的黏结强度,整体而言,凿毛、湿饱和、水泥净浆界面剂和环氧树脂界面剂可分别使结合面黏结强度平均提升 18.15%、7.53%、10.74%和 15.49%,且组合模式下各界面处理方式的提升效果均优于其单独使用时,与已有实验结果相符^[3-5, 7],王楠等^[3]在既有混凝土抗压强度与本文相近情况下,发现界面湿饱和状态可使结合面劈裂抗拉强度提升约 5.00%,丁祖德等^[7]研究得出凿毛处理较无处理时的结合面极限劈裂力提高 20.03%。综上,复合试件界面处理方式及其提升效果符合已有规律,可据此开展结合面的抗溶蚀性研究。

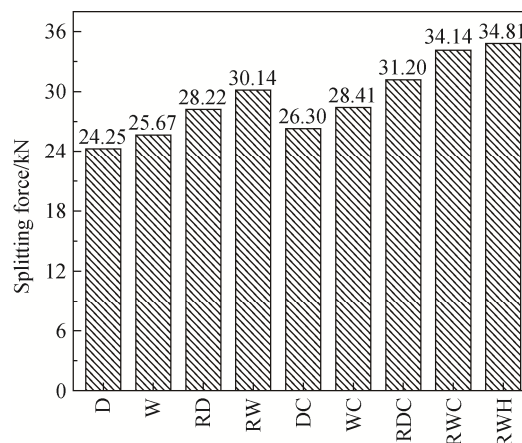


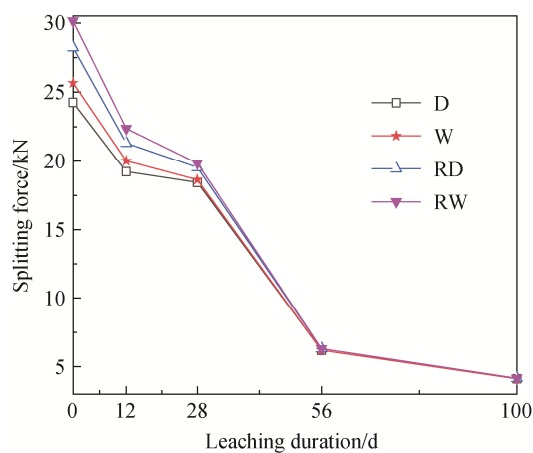
图 1 溶蚀前 ECC-既有混凝土结合面的劈裂力

Fig. 1 Splitting force of bonding interface before leaching

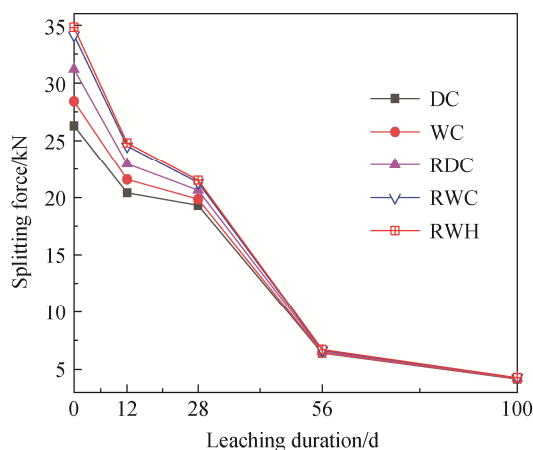
2.2 溶蚀评价指标的时变规律

图 2 为不同界面处理方式下结合面劈裂力随溶蚀时间的变化规律。从图 2 可以看出,结合面劈裂力随溶蚀时间的延长而逐渐下降,且与溶蚀时间平方根之间具有近似的线性衰减关系,与王少伟等^[14]所得溶蚀环境下普通混凝土浇筑层面劈裂抗拉强度

的劣化规律相似; 相同溶蚀时间, 不同界面处理方式下劈裂力的大小顺序与未溶蚀状态下完全一致, 无界面剂组中从高到低依次为 RW、RD、W、D, 有界面剂组从高到低依次为 RWH、RWC、RDC、WC、DC; 随着溶蚀程度的发展, 不同界面处理方式下劈裂力之间的差异性逐渐减小, 由此呈现出结合面黏结强度的初始值越高, 其在溶蚀作用下衰减速度越快的现象, 原因就在于: 尽管采取了界面处理, 但结合面始终是 ECC-既有混凝土复合试件的薄弱区^[7, 9], 其孔隙率大、且孔隙连通程度高, 进而溶蚀作用下结合面快速劣化, 其中, 0~56 d(56 d 时的结合面溶蚀深度约 11 mm)内劈裂力的衰减速度较快, 平均下降速率为 0.41 kN/d, 而 56~100 d 的平均下降速率为 0.05 kN/d, 并最终劣化至有无界面处理情况下基本相似的结果。



(a) Without interfacial agents



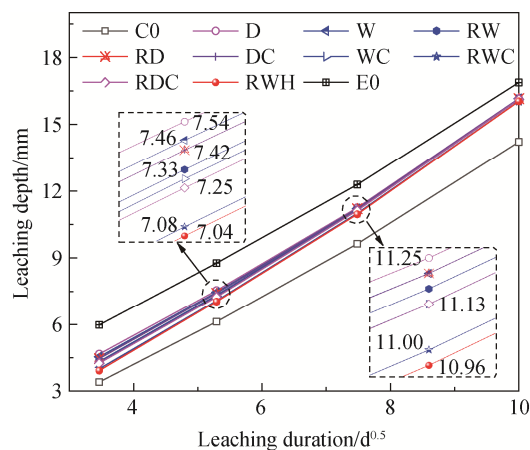
(b) With interfacial agents

图 2 结合面劈裂力随溶蚀时间的变化规律

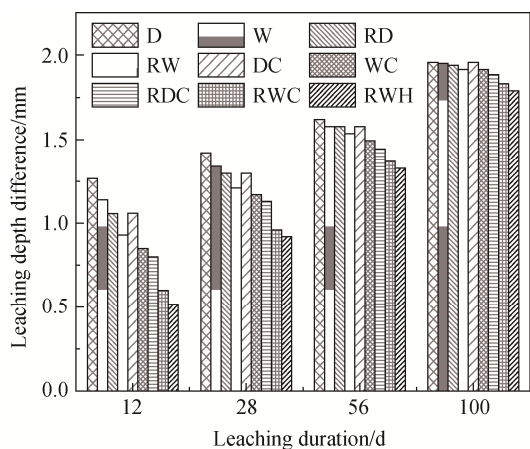
Fig. 2 Evolution of splitting force of bonding interface with respect to leaching duration

图 3 为溶蚀作用下结合面溶蚀深度的变化规律。从图 3a 可以看出, 结合面溶蚀深度与溶蚀时

间平方根之间呈现为正线性关系, 满足 Fick 第二定律, 与混凝土和 ECC 本体的溶蚀规律一致^[15]; 结合面溶蚀深度越小, 表明界面处理效果越好, 因此无界面剂组 D、W、RD 和 RW 的处理效果依次递增, 有界面剂组由低到高依次为 DC、WC、RDC、RWC 和 RWH, 其与图 2 所示各界面处理方式对结合面劈裂力的时变影响规律完全相同。溶蚀时间越长, 不同界面处理方式下结合面溶蚀深度之间的差异性也逐渐减小, 溶蚀 28 d 时, RW 和 RWC 的溶蚀深度比 D 组分别减小 6.63% 和 6.10%, 而 56 d 时, 衰减至 2.58% 和 2.22%。此外, 相同溶蚀时间下, ECC 本体的溶蚀深度最大, 结合面次之, 混凝土本体最小, 表明 ECC 的抗溶蚀性较差, 溶蚀 100 d 后较混凝土增加 18.71%, 原因在于: ECC 的水灰比高达 0.79 且不含粗骨料, 而 Yang 等^[16]和 Nguyen 等^[17]分别发现净浆溶蚀深度随水灰比的增大而增大, 以及粗骨料的不可渗透性使得砂浆的溶蚀深度略大于混凝土; 此外,



(a) Evolution of leaching depth with respect to leaching duration



(b) Leaching depth difference between bonding interface and concrete

图 3 ECC-既有混凝土结合面的溶蚀深度

Fig. 3 Leaching depth of bonding interface

ECC 中掺入了大量粉煤灰, 其水化速度慢, 导致 ECC 的早期孔隙率偏高。结合面与混凝土之间的溶蚀深度差如图 3b 所示, 其随溶蚀时间的延长而增大, 但不同界面处理方式下的差异性逐渐减小, 由此表明, 随着溶蚀程度的发展, 结合面作为薄弱部位将会逐渐发展成溶蚀通道, 溶蚀 100 d 时, RWH 和 RWC 的溶蚀深度比混凝土本体分别增加 12.59% 和 12.87%。

图 4 为钙溶蚀量随溶蚀时间的变化规律。从图 4 可以看出, 不同层面处理方式下钙溶蚀量均随溶蚀时间的延长而逐渐增加; 相同溶蚀时间下, 混凝土整浇试件的钙溶蚀量均小于 ECC-既有混凝土复合试件, 而纯 ECC 试件由于其自身初始固相钙含量最高且溶蚀深度最大, 因而钙溶蚀量最多, 溶蚀 100 d 时, 其相对混凝土整浇试件增加 4.10%; 在界面处理方式的影响方面, 相同溶蚀时间下, D 组的溶蚀量最大, RWH 最小, RWC 次之, 其影响规律与结合面劈裂力和溶蚀深度完全一致, 溶蚀时间 28 d 时, RWH 和 RWC 的钙溶蚀量分别较 D 组减小 7.50% 和 6.25%, 而 56 d 时, 分别减小 2.26% 和 1.89%, 因而结合面劈裂力、溶蚀深度和钙溶蚀量 3 种指标均反映出: 界面处理对 ECC-既有混凝土结合面所产生的提升效果随着溶蚀时间的延长而逐渐削弱。

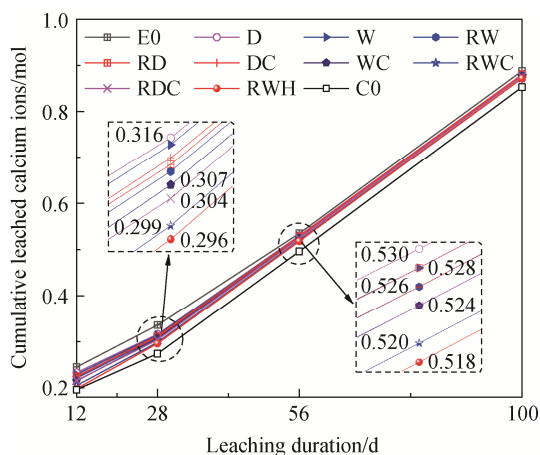


图 4 钙溶蚀量随溶蚀时间的变化规律

Fig. 4 Evolution of cumulative leached calcium ions with respect to leaching duration

图 5 为溶蚀过程中劈裂力降幅与结合面溶蚀面积比之间的关系, 后者可借鉴用于反映结合面的平均溶蚀程度。由图 5 可见, 本次实验中溶蚀面积比不超过 55.0% 时, 两者之间近似呈正线性关系, 但溶蚀面积比超过 40.0% 之后, 劈裂力的降幅已经开始明显减缓, 其中各组的平均溶蚀面积比由 39.6%

增至 54.1% 时, 结合面劈裂力平均降幅由 77.8% 增至 85.5%, 与图 2 所示规律一致, 溶蚀后期结合面残余黏结强度趋于稳定; 既有混凝土界面处理方式的影响方面, 整体上, 各实验组所示两者之间的演变规律基本一致, 但相同溶蚀面积比下, 界面处理使得结合面初始劈裂力越高, 溶蚀引起的劈裂力降幅越大, 其原因也是因为溶蚀后期各组的结合面劈裂力残余值均衰减至有界面处理情况下基本相近的结果。

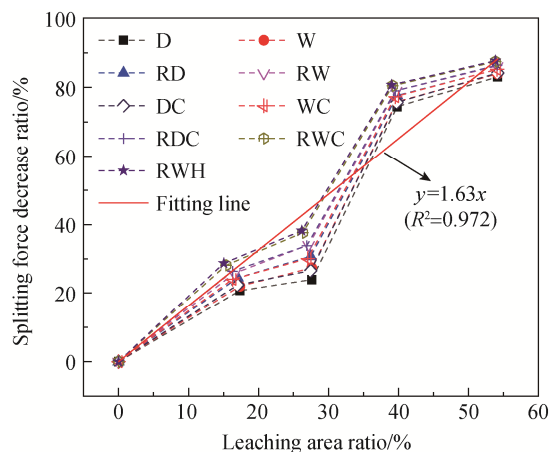
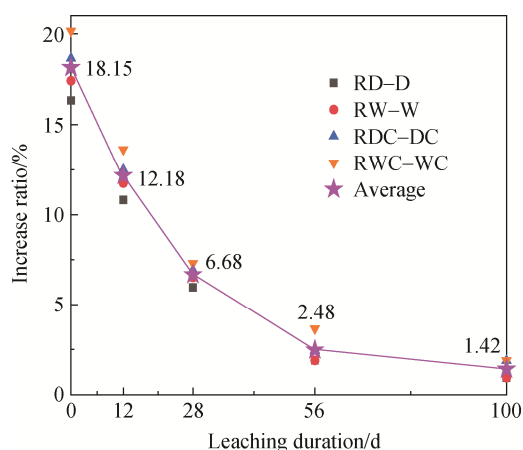


图 5 劈裂力降幅随溶蚀面积比的变化规律

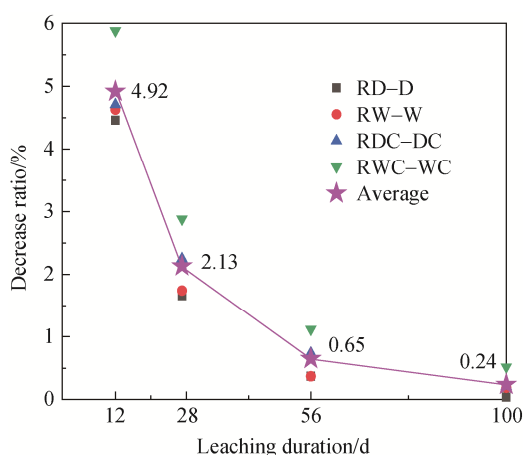
Fig. 5 Evolution of splitting force decrease ratio with respect to leaching area ratio

2.3 界面处理方式对结合面抗溶蚀性的影响

界面处理对钙溶蚀量和结合面溶蚀深度的时变影响规律基本一致。既有混凝土界面有无凿毛处理情况下, 结合面劈裂力提升比和溶蚀深度减小比均随溶蚀时间的延长而逐渐减小, 如图 6 所示, 由此表明: 凿毛处理可有效提升结合面的抗溶蚀性, 但溶蚀时间越长, 凿毛处理的改善效果逐步减弱, 其中 0~56 d 内下降速率较快, 且呈现为线性衰减关系, 56~100 d 内下降速率则趋于减缓, 溶蚀 100 d 后, 2 指标的提升或减小比分别由 12 d 时的 12.18% 和 4.92% 减小至 1.42% 和 0.24%; 相同溶蚀时间下, 4 个有无凿毛处理对比组之间的差值也随溶蚀时间的延长而逐渐减小, 这是由于溶蚀后期结合面逐渐成为溶蚀通道, 溶蚀速率加快, 凿毛处理相对无处理时的提升效果快速减弱, 但凿毛处理在不同对比组中产生的提升效果明显不同, 从大到小依次为: RWC-WC、RDC-DC、RW-W、RD-D。由此表明, 湿饱和基础上配套使用水泥净浆界面剂, 可进一步提高凿毛处理对结合面的提升效果, 即组合处理模式下各界面处理方式的单一提升效果明显优于其单独使用时, 且组合的其它处理方式越多, 优势越明显。



(a) Increase ratio of splitting force



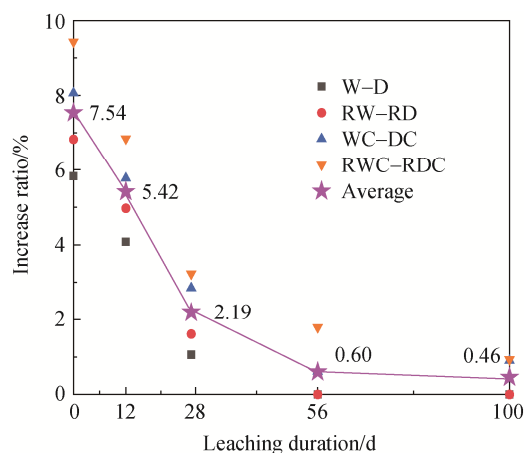
(b) Decrease ratio of leaching depth

图 6 结合面有无凿毛处理情况下的评价指标变化比

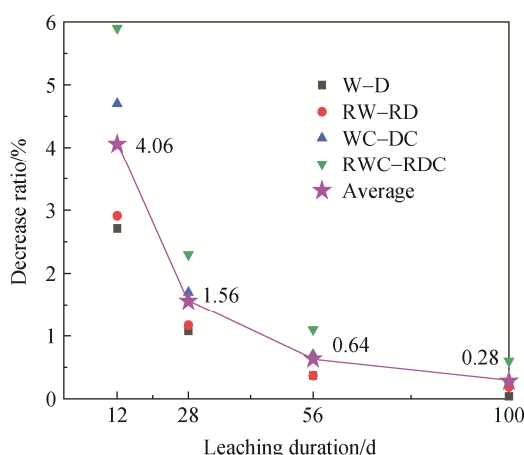
Fig. 6 Evaluation index change ratio of bonding interface roughening treatment

图 7 为界面干湿对比组中溶蚀评价指标变化比的时变规律。由图 7 可见, 湿饱和和处理在提升结合面初始黏结强度的同时, 可有效提高结合面的抗溶蚀性, 其原因就在于湿饱和和处理后结合面微观结构的改善。欧阳志鹏等^[10]在研究结合面抗碳化能力中发现洒水湿润可使结合面处后浇 ECC 的水化更彻底, 结合面微观结构更加密实, 由此使得结合面碳化系数降低 24.45%; 各干、湿处理对比组中, 结合面劈裂力提升比和溶蚀深度减小比随溶蚀时间的整体变化规律同凿毛处理情况下基本相同, 均随时间的延长而呈现为衰减速度逐渐减缓的减小趋势, 且湿饱和和处理提升效果在不同对比组之间的差异性也逐渐减小, 溶蚀 100 d 后, 2 指标的平均提升或减小比分别由 12 d 时的 5.42% 和 4.06% 减小至 0.46% 和 0.28%; 此外, 湿饱和和处理在不同对比组中产生的提升效果也明显不同, 从大到小依次为: RWC-RDC、WC-DC、RW-RD、W-D, 也同样表

明了组合处理模式更有利于发挥既有混凝土界面的单一处理效果。



(a) Increase ratio of splitting force



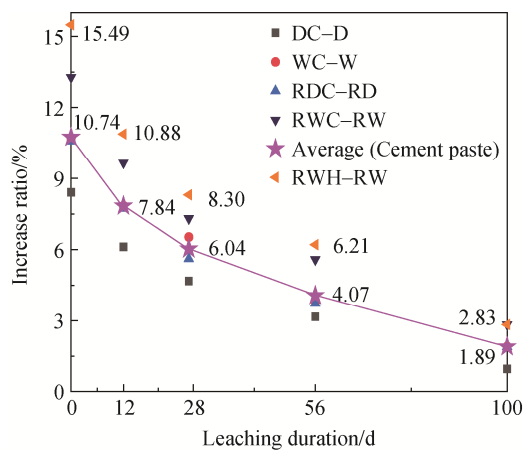
(b) Decrease ratio of leaching depth

图 7 结合面处于干湿状态下的评价指标变化比

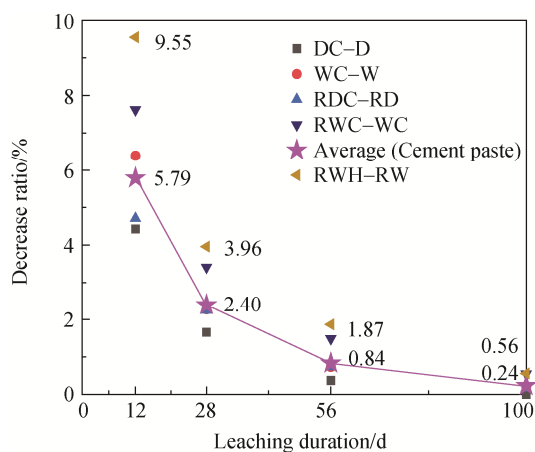
Fig. 7 Evaluation index change ratio of bonding interface in dry and wet saturation condition

图 8 为涂刷不同界面剂情况下结合面溶蚀评价指标变化比的时变规律。由图 8 可见, 界面剂处理提升效果的时变规律与凿毛和湿饱和处理的规律基本相同, 尽管前者对结合面黏结强度的初始提升效果不如凿毛处理, 两者分别为 10.74% 和 18.15%, 但溶蚀作用下前者黏结强度提升效果的衰减速度明显慢于后两者, 溶蚀 100 d 后分别衰减至 1.89% 和 1.42%, 由此表明, 使用界面剂可有效减缓溶蚀过程中结合面黏结强度提升效果的衰减速度, 进而减缓荷载作用下 ECC 与既有混凝土的剥离, 其原因就在于: 界面剂对提高结合面密实度最有效(见图 11), 并且可对结合面提供额外的黏结力。此外, 湿饱和状态下和凿毛处理后涂刷水泥净浆界面剂的处理效果均分别优于干燥状态下和未凿毛时的涂刷效果。

在界面剂种类上, 环氧树脂的提升效果明显优于水泥净浆, 以黏结强度提升效果为例, 未溶蚀和溶蚀 100 d 后, 前者比后者分别高 44.2% 和 49.7%, 与丁祖德等^[7]所得结论相近, 其发现环氧树脂界面剂处理后的结合面极限劈裂力比使用水泥净浆时高 38.7%。相同溶蚀时间下, 界面剂处理效果由小到大依次为 DC、WC、RDC、RWC、RWH。



(a) Increase ratio of splitting force



(b) Decrease ratio of leaching depth

图 8 结合面在有无界面剂下的评价指标变化比

Fig. 8 Evaluation index change ratio of bonding interface with and without interfacial agents

结合面劈裂力提升比与溶蚀深度减小比之间的关系如图 9 所示。从图 9 可以看出, 凿毛和湿饱和 2 种情况下 2 指标之间均呈正线性关系, 表明既有混凝土界面凿毛和湿饱和和处理在提升结合面力学性能和抗溶蚀性方面所起的作用是相似的, 但前者的比例系数明显大于后者, 表明凿毛处理对提升溶蚀结合面力学性能更为有利, 这与凿毛处理主要是通过增大结合面的接触面积, 从而使得机械咬合力和离子扩散路径增大的工作原理相吻合; 然而, 涂刷

界面剂情况下, 两者之间为负指数函数关系, 其原因就在于上述分析中所得结论: 界面剂直接产生的黏结力, 可有效减缓溶蚀过程中结合面黏结强度提升效果的衰减速度。

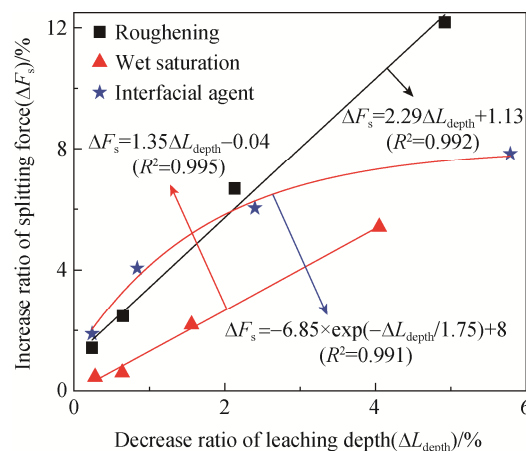


图 9 劈裂力提升比与溶蚀深度减小比之间关系

Fig. 9 Relationship between increase ratio of splitting force and decrease ratio of leaching depth

上述分析表明, 组合处理模式下各界面处理方式所达到的提升效果均优于其单独使用时。为评价组合处理模式下的提升效果, 以 D 作为对照组, 所得 RWC 和 RWH 的劈裂力提升效果如图 10 所示, 其在未溶蚀和溶蚀 100 d 后分别提升 40.78%、43.53% 和 3.81%、3.81%。

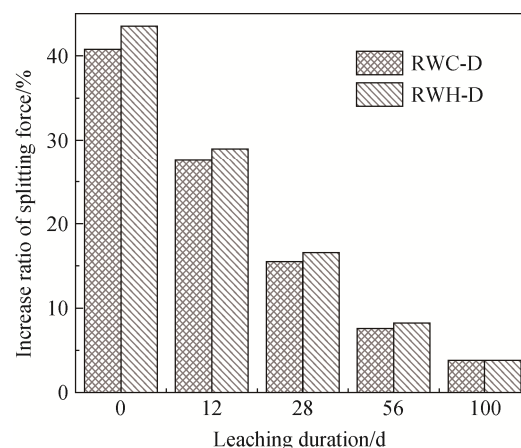


图 10 RWC 和 RWH 相对 D 组的劈裂力提升比

Fig. 10 Increase ratio of splitting force of RWC and RWH with respect to D

2.4 界面处理提升效果的微观机理分析

图 11 为溶蚀前 ECC 与既有混凝土结合面的 SEM 照片。在界面干燥情况下, 对比图 11a、图 11b 和图 11c, 可见微裂缝宽度和缝面光滑度由大到小依次为: D、RD、RDC, 而微裂缝越宽、越光滑, 黏结强度和抵抗物质传输能力越差, 故 3 种处理方

式下结合面提升效果由大到小为: RDC、RD、D; RD 和 RWC 试件的微裂缝宽度明显分别小于 D 和 WC, 由此可从微观角度解释凿毛处理通过增大接触面积来增强结合面的机械咬合力; RWC 的微裂缝宽度明显小于 RDC, 且前者已无明显连通的扩散通道。由此可知, 在粗糙度相仿、界面剂相同的情况下, 湿饱和处理可有效阻止结合面扩散通道的形成, 其原因就在于干燥状态下的既有混凝土会快速吸收结合面附近新浇 ECC 中的水分, 导致结合面处水泥水化不充分, 进而形成连通的薄弱通道; 对比图 11e

和图 11f, 可见 RWC 处理方式下, ECC 与既有混凝土的结合仍较为疏松, 存在少量的细微裂缝, 这是因为水泥净浆界面剂在后期硬化过程中存在不可避免的收缩问题, 需要进一步添加硅灰和膨胀剂才能使结合面更加致密^[8], 而相比之下, RWH 的结合面更为密实, 已看不到微裂缝, 表明 RWH 的结合面黏结质量最好。上述微观尺度上观测到的界面处理方式对结合面形貌及密实度的影响规律, 与宏观尺度上结合面溶蚀评价指标的演变规律相一致, 较好地解释了界面处理方式对结合面性能的提升机理。

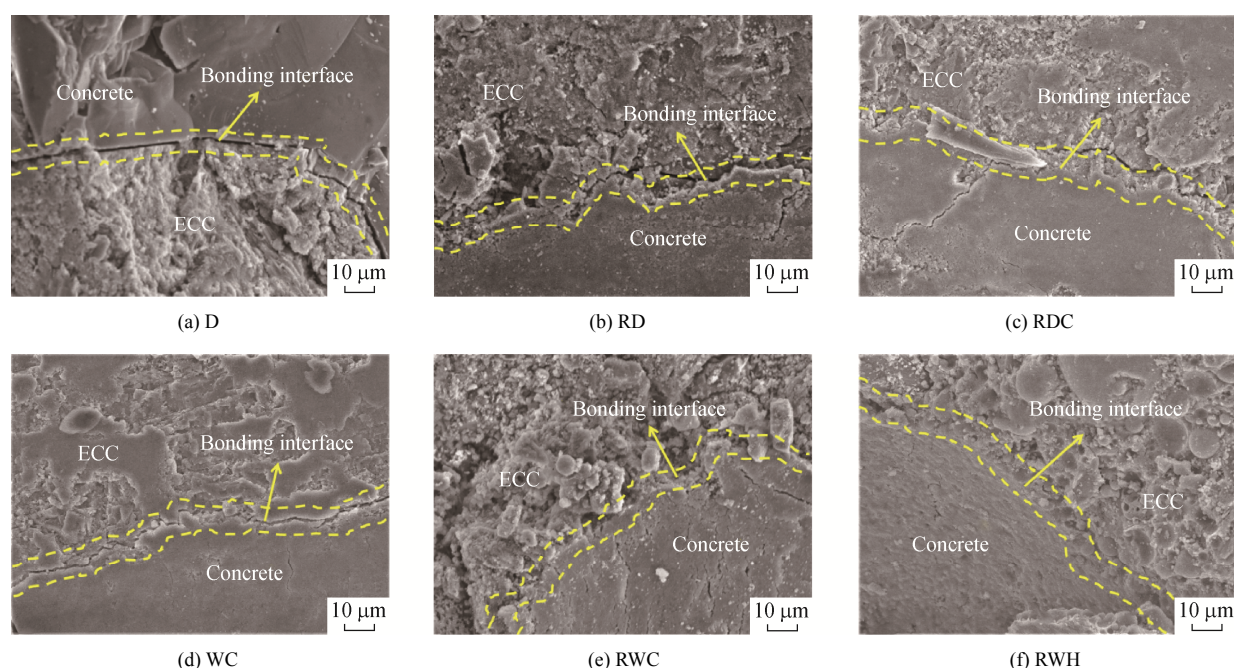


图 11 溶蚀前 ECC-既有混凝土结合面 SEM 照片
Fig. 11 SEM images of bonding interface before leaching

图 12 为溶蚀 28 d 后在结合面溶蚀锋附近的 SEM 照片。由图 12 可见, 溶出物堆积在结合面处, 使得结合面微裂缝出现了一定程度的自愈现象, 微裂缝已经变得比较模糊, 但溶蚀后微裂缝影响带的宽度增大, 表明结合面的两向溶蚀已使其成为溶蚀通道。与图 11 所示溶蚀前的微观结构对比可看出,

溶蚀前, 微裂缝两侧内部结构较为致密, 存在大量 CH 晶体和 C-S-H 凝胶, 而溶蚀 28 d 后结合面两侧已明显变得疏松, 有剥蚀痕迹, CH 晶体和 C-S-H 凝胶减少, 孔洞明显增大、增多, 结合面附近剥蚀程度从高到低依次为 RDC、RWC 和 RWH, 由此进一步说明 RWH 结合面的抗溶蚀性最好。

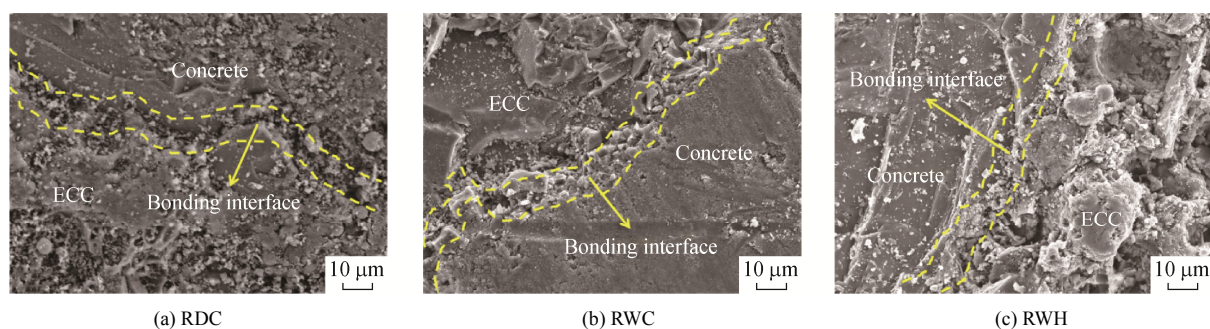


图 12 溶蚀 28 d 后结合面溶蚀锋处 SEM 照片
Fig. 12 SEM images at dissolution front of bonding interface after 28 days of immersion leaching

3 结论

1) 既有混凝土界面凿毛、湿饱和及涂刷水泥净浆和环氧树脂界面剂均可提高 ECC-既有混凝土结合面的黏结强度和抗溶蚀性, 其对未溶蚀状态下结合面黏结强度的平均提升幅度分别为 18.15%、7.53%、10.74%和 15.49%, 且组合模式下各界面处理方式的提升效果均优于其单独使用时。

2) 凿毛处理对提升结合面初始黏结强度更为有利, 而使用水泥净浆和环氧树脂界面剂可有效减缓溶蚀过程中结合面黏结强度提升效果的劣化速度, 进而延长结合面的耐溶蚀年限, 且环氧树脂界面剂较水泥净浆界面剂的提升及延缓效果更好。

3) 在凿毛加湿饱和的基础上, 涂刷水泥净浆和环氧树脂界面剂, 可使结合面初始黏结强度分别提高 40.78%和 43.53%, 溶蚀 100 d 后均衰减至 3.81%。此外, 高水灰比和粉煤灰掺量, 使得早龄期 ECC 抗溶蚀性较差, 溶蚀 100 d 后, 溶蚀深度和钙溶蚀量较 C30 混凝土分别增加 18.71%和 4.10%, 因此将其用于触水混凝土结构的补强加固时, 需考虑 ECC 及结合面的抗溶蚀性。

参考文献:

- [1] LI Victor C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 531–536.
LI V C. J Chin Ceram Soc, 2007, 35 (4): 531–536.
- [2] ZHANG N, GU Q, DONG Y, et al. Seismic performance of bridges with ECC-reinforced piers[J]. Soil Dyn Earthq Eng, 2021, 146: 106753.
- [3] 王楠, 徐世烺. 超高韧性水泥基复合材料与既有混凝土黏结性能[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3): 317–323.
WANG Nan, XU Shilang. J Build Mater (in Chinese), 2011, 14(3): 317–323.
- [4] 余江滔, 许万里, 张远淼. ECC-混凝土黏结界面断裂试验研究[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 958–963.
YU Jiangtao, XU Wanli, ZHANG Yuanmiao. J Build Mater (in Chinese), 2015, 18(6): 958–963.
- [5] XU S L, MU F J, WANG J Y, et al. Experimental study on the interfacial bonding behaviors between sprayed UHTCC and concrete substrate[J]. Constr Build Mater, 2019, 195: 638–649.
- [6] 邓宗才, 薛会青. 高韧性纤维增强水泥基复合材料与老混凝土的界面直剪试验研究[J]. 公路, 2011, (2): 118–122.
DENG Zongcai, XUE Huiqing. Highway (in Chinese), 2011, (2): 118–122.
- [7] 丁祖德, 文锦诚, 李晓琴, 等. PVA-ECC 与既有混凝土黏结面抗渗及劈裂抗拉试验[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3): 356–362.
DING Zude, WEN Jincheng, LI Xiaoqin, et al. J Build Mater (in Chinese), 2019, 22(3): 356–362.
- [8] 王孟伟. ECC 与既有混凝土粘结性能的影响因素研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
WANG Mengwei. Research on factors affecting bonding behavior between existing concrete and ECC (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2018.
- [9] 李国平, 胡皓, 任才, 等. 桥梁混凝土结构接缝的耐久性能[J]. 土木工程学报, 2018, 51(7): 98–103.
LI Guoping, HU Hao, REN Cai, et al. China Civil Eng J (in Chinese), 2018, 51(7): 98–103.
- [10] 欧阳志鹏, 孙彬, 王霓, 等. 装配式结构混凝土结合面碳化性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(5): 126–132.
OUYANG Zhipeng, SUN Bin, WANG Ni, et al. Build Struct (in Chinese), 2021, 51(5): 126–132.
- [11] QIAN P, XU Q J. Experimental investigation on properties of interface between concrete layers[J]. Constr Build Mater, 2018, 174: 120–129.
- [12] HUANG B, QIAN C X. Characterization and stress-strain relationship of leached concrete[J]. J Chin Ceram Soc, 2011, 39(1): 87–91.
- [13] WU H L, ZHANG D, DU Y J, et al. Durability of engineered cementitious composite exposed to acid mine drainage[J]. Cement Concrete Comp, 2020, 108: 103550.
- [14] 王少伟, 徐应莉, 朱平华, 等. 溶蚀作用下混凝土层面劈裂抗拉强度试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 1–10.
WANG Shaowei, XU Yingli, ZHU Pinghua, et al. Adv Sci Tech Water Resour (in Chinese), 2022, 42(1): 1–10.
- [15] LI X N, ZUO X B, ZOU Y X. Modeling and simulation on coupled chloride and calcium diffusion in concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 271: 121557.
- [16] YANG H, JIANG L H, ZHANG Y, et al. Predicting the calcium leaching behavior of cement pastes in aggressive environments[J]. Constr Build Mater, 2012, 29(4): 88–96.
- [17] NGUYEN V H, COLINA H, TORRENTI J M, et al. Chemo-mechanical coupling behaviour of leached concrete Part I: Experimental results[J]. Nucl Eng Des, 2007, 237(20): 2083–2089.