

自愈合防水材料的性能试验及应用研究

洪弼宸

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 混凝土目前已成为各建设行业中应用量最大的一种材料,其最大的缺点是在材料制备、工程施工及后期使用环境影响下自身内部会产生细小的微裂缝,这些局部损伤若得不到及时修复,不仅会影响混凝土的使用性能,并有可能产生贯穿裂缝直至影响结构安全。通过对水泥基型自愈合防水添加剂进行实验研究,采用内掺试件与基准试件进行实验对比,对试件的抗压、抗折强度、抗盐抗冻性以及抗渗性进行定量分析,发现内掺试件在强度、耐久性、抗渗性方面均有较大的性能提升;同时与传统防水做法在施工难度、施工周期和材料性能进行了全面对比,得到自愈合防水添加剂可有效提高结构的安全性和可靠性的结论。

关键词: 混凝土裂缝;自愈合防水材料;抗渗实验;耐久性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0360-06

Performance Experiment and Application Research of Self-healing Waterproof Material

HONG Bichen

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The concrete has become the most widely used materials in various construction industries. Its biggest drawback is that it will develop tiny micro-cracks inside under the influence of material preparation, engineering construction and the later usage environment. If not be repaired in time, these local damages will not only affect the usability of concrete, but also be possible to cause the penetrating cracks until affecting the structural safety. Through the experimental research on cement-based self-healing waterproof additives, the experimental comparisons are conducted using the internal doping specimens and the reference specimens to quantitatively analyze the compressive and flexural strength, the salt and frost resistance, and the impermeability of the specimens. It is found that the internal doping specimens have significant performance improvements in terms of strength, durability and impermeability. At the same time, compared with the traditional waterproof method in construction difficulty, construction period and material performance, the self-healing waterproof additive can effectively improve the safety and reliability of the structures.

Keywords: concrete cracks; self-healing waterproof material; impermeability test; durability

0 引言

混凝土微观裂缝的产生原因是多变且难以控制的,在施工过程和长期使用阶段中,建筑物所处的环境复杂多样,如早期的微裂缝得不到及时的重视和修复,不仅会影响材料的使用性能,并有可能进一步产生贯穿裂缝直至影响结构自身的安全。长期以来混凝土裂缝一直是困扰工程界和学术界的一大难题。根据大量调查和数据研究,混凝土裂缝产生的原因主要包括:由温差湿度引起的结构自身形变、由外部动静荷载产生附加应力、由于建筑地基不均匀

沉降产生的整体变形等等^[1-3]。国内外对此类问题均做了大量的研究及实验,并有一系列关于混凝土裂缝成因^[4-5]、安全评估^[6]与结构修补^[7-8]的成果。

自愈合防水材料是一种无机水泥基渗透结晶型防水添加剂,其是以无定形活性硅为主的微粉末级的无机防水材料,具有“微膨胀、抗裂、抑制水泥水化热、增密、防水、裂缝自愈”等功能。通过水与混凝土内添加剂发生重复的化学反应,可产生致密晶体,增加混凝土密实度,使混凝土裂缝得到自愈,从而达到永久性防水、裂缝自愈合的作用^[9-10]。此种材料国内于20世纪80年代引进,目前已实现了材料国产化^[11],逐渐应用于民用建筑、水利、工业、基础建设等领域^[12-15]。常规的添加剂如膨胀剂、抗裂纤维等只能对混凝土养护期间因水泥水化热引起的裂缝具

收稿日期: 2024-12-11

作者简介:洪弼宸(1990—),男,硕士,工程师,从事给排水结构设计工作。

有抑制作用,而针对后期因荷载变化、基础不均匀沉降、温差等原因引起的裂缝没有效果^[16-18]。而这一类的裂缝造成的渗漏现象在已建成的地下室中成为了一种通病,极大地影响了地下室的使用功能。无机自愈合防水材料对混凝土既有初期抗裂的效果,又可以对后期裂缝形成自愈合效应。

1 混凝土自愈合的概念

混凝土自愈合是指内掺自愈合防水添加剂的混凝土结构在其施工或正常使用等环境因素影响下,添加剂与裂缝中的水发生化学反应,形成新的无机类致密物质对裂缝进行封闭、进而愈合裂缝。这种自愈合对混凝土的外观效果和结构性能不会产生影响,并能有效地提升及恢复混凝土原有的抗渗性能,从而达到永久的混凝土防水效果并实现真正意义上的材料和结构同寿命^[19-23]。

2 自愈合混凝土性能实验研究

2.1 自愈合材料对混凝土抗压强度、抗折强度影响的试验研究

(1) 研究方案

为研究自愈合材料对混凝土抗压强度、抗折强度的影响进行测试及对比分析,测试方法遵照国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080)、《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081)执行,试样混凝土配合比见表1所列。

表1 混凝土配合比

水灰比	砂率/%	水泥/kg	砂/kg	石子/kg	水/kg
0.62	40	330	749	1 123	204.6

注:基准组和内掺组采用相同的混凝土配合比

(2) 试块尺寸及养护情况

试样尺寸根据相应规范制备,其中抗压强度试验所用的混凝土试件尺寸为10 cm×10 cm×10 cm,抗折强度试验所用混凝土试件尺寸为10 cm×10 cm×40 cm,试件浸泡及养护方式见表2所列。

表2 抗压、抗折试验用试件浸泡及养护方式

组别	浸泡及养护方式
基准	标准养护至36 d(28 d+1 d+1 d+6 d)
内掺	标准养护至36 d(28 d+1 d+1 d+6 d)

注:其中后8 d为干养。

两组试样养护过程见图1和图2所示。

(3) 强度试验结果及分析

两组试块在养护36 d后进行抗压、抗折强度实验,结果见表3所列。

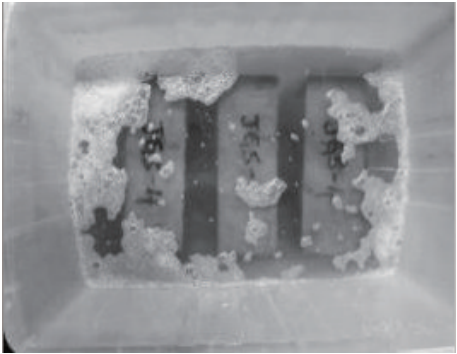


图1 基准养护组

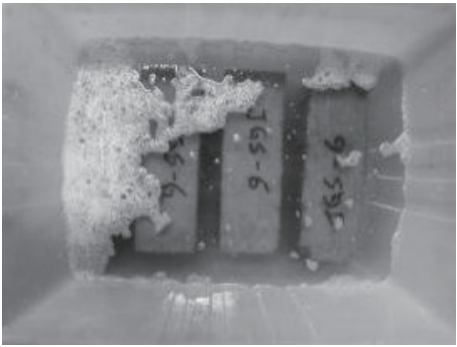


图2 内掺养护组

表3 自愈合混凝土对抗压强度、抗折强度影响结果

组别	坍落度/ mm	抗压强度/ MPa	抗压强度 对比/%	抗折强度/ MPa	抗折强度 对比/%
基准	80	38.8	—	5.5	—
内掺	70	41.9	108	5.8	105

根据以上实验结果表明,内掺自愈合材料组较基准组的抗压强度比和抗折强度比分别为108%和105%,说明内掺自愈合材料对混凝土的抗压强度及抗折强度有一定的提高。

2.2 自愈合材料对混凝土抗盐及抗冻性能影响的试验研究

(1) 研究方案

为研究自愈合材料对混凝土抗盐及抗冻的影响进行测试及对比分析,测试按照国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T50082执行。

该实验采用的混凝土配合比同表1,抗盐抗冻试验中所用到的混凝土试件尺寸为15 cm×15 cm×15 cm,试件浸泡及养护方式为:脱模后水养7 d,试件经切割加工后室内干养1 d+标养8 d+干养9 d,再进行密封后继续干养3 d后开始测试(总龄期28 d)。

(2) 性能测试方法

试件的切割加工、密封及测试应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082)中的单面冻融法(即盐冻法)试验的

有关规定,相关实验试块在16次及24次循环结果如图3所示。

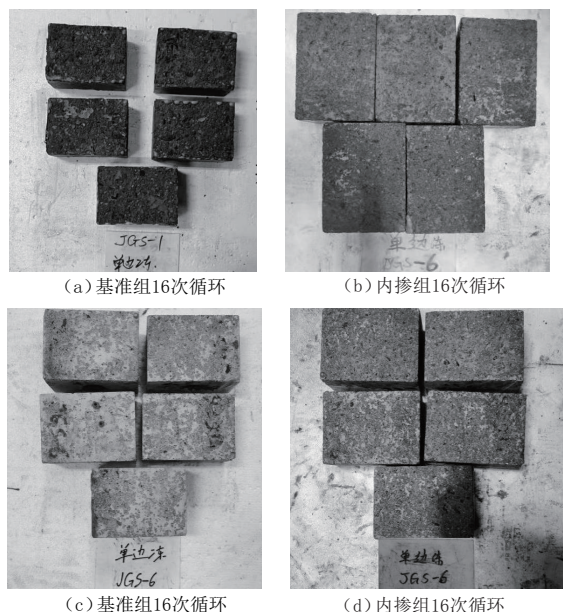


图3 抗盐抗冻性试验样品冻融试验结果

(3)抗盐冻实验结果及分析

自愈合材料对基准混凝土抗盐抗冻的影响结果,详见表4所列。

表4 自愈合材料对抗盐抗冻试验剥落物总质量的影响

组别	循环次数/次					
	4	8	12	16	20	24
基准组	170	461	951	1 609	—	—
内掺组	93	297	579	1 118	1 463	1 694

注:以上结果指标为单位表面积剥落物总质量, g/m^2 。

以上实验结果表明,内掺自愈合材料组相比基准组对抗盐抗冻性能有明显提升,且循环次数越多,实验得到的抗盐冻性能越突出。

2.3 自愈合材料对混凝土自修复性能影响的试验研究

(1)研究方案

为了解自愈合材料对混凝土裂缝自修复性能的影响,通过试验研究并以裂缝自修复能力、二次抗渗压力两种指标定量分析,对比基准和内掺两组试件对裂缝的修复能力。混凝土的配合比按现行国家标准《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T17671),其混凝土配合比详见表5所列。

(2)性能测试方法

表5 实验混凝土配合比

组别	水泥/g	标准砂/g	水/g	自愈合添加剂/g
基准	450	1 350	225	0
内掺	450	1 350	225	4.5

注:两组试件的流动度应保持基本一致,流动度通过用水量进行调节。

内掺试件对比基准试件的裂缝自修复试验采用试件尺寸为 $\phi 10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$,每组配合比采用的试件各两个,具体实验过程如下。

a. 先对两组试件进行7 d的标准养护,然后擦拭表面使试件表面干燥,由于渗透试验为单向加压,故在侧面采用橡胶胶带进行密封,缠绕的次数不少于5圈,且密封的总厚度不小于0.25 mm。

b. 对缠绕密封后的试件用夹具固定,并放置于劈裂液压机面板上,在此过程中应保证夹具固定的稳定性,同时试样应放置在加载装置的正中央以保证加压后产生的裂缝沿中心径向。设置液压机的加载速度为0.1 kN/s,开启试验机进行加载,加载过程应缓慢进行,当试件径向出现贯穿裂缝后及时停止,此时取下试件。

c. 按上述过程(1)继续对试件的侧面加强密封。同时将密封好后的试样装入硅胶材质的密封筒底,密封筒的尺寸为内径 $\phi 10 \text{ mm}$ 、高20 cm。再用和试件尺寸匹配的不锈钢钢箍抱紧试样,以保证试样的密封稳定性。

d. 准备一个大小合适的实验槽进行渗水实验,在上述硅胶密封筒内加入1 L的水,此时开始计时并待水全部从套筒内渗出后停止计时,此时间便为渗水总时间,将单位时间的通过水量记为初始渗水率。

e. 将试件从套筒中取出并将其继续养护至28 d。

f. 到达养护时间后,取出试件,装入有机硅胶筒中,进行最终渗水率测试,若橡胶筒内水未能在4 h内全部渗出,则记录测试时间,并立即将橡胶筒内水倒出,测量剩余水的体积。

g. 预制裂缝的基准试件和内掺试件渗水率按下式计算,精确至0.001:

$$K = \frac{1\,000 - V_t}{t}$$

式中: K 为渗水率, mL/min ; V_t 为橡胶筒内剩余水的体积, mL ; t 为测试时间, min 。

(3) 预制裂缝的基准试件和内掺试件相对渗水系数按下式计算,精确至0.1%:

$$\beta_c = \frac{K_n}{K_0}$$

式中: β 为相对渗水系数, %; K_n 为最终渗水率, mL/min ; K_0 为初始渗水率, mL/min 。

(9) 受检试样的裂缝自修复能力比按下式计算,精确至1%。

$$R = \frac{100 - \beta_s}{100 - \beta_c}$$

式中: R 为裂缝自修复能力比,%; β_s 为内掺试样的相对渗水系数,%; β_c 为基准试样的相对渗水系数,%。

(3) 试验过程图片

内掺自愈合材料对混凝土裂缝自修复性能的试验过程详如图 4 各图所示。

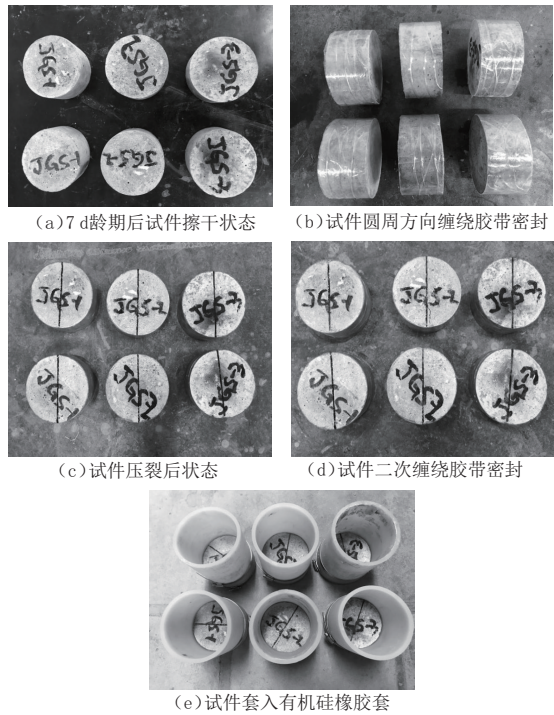


图 4 混凝土裂缝自修复性能试验过程

(4) 实验结果分析

自愈合材料对混凝土裂缝自修复性能的影响结果见表 6 所列。

表 6 自愈合材料对混凝土裂缝自修复性能影响的试验结果

组别	流动度/ mm	渗水率/ (mL·min ⁻¹)		相对渗水率/%		裂缝自 修复能力 比/%
		初始	最终	实测	平均值	
基准	223	5.747	4.630	80.6	82.6	—
		6.329	5.348	84.5		
内掺	227	6.173	3.250	52.6	54.9	259
		5.076	2.896	57.1		

根据以上实验结果,在基本相同的初始流动度条件下,基准组相对渗水系数为 83.6%,内掺组相对渗水系数为 54.9%,即裂缝自修复能力比为 259%,实验结果表明混凝土内掺自愈合材料后的裂缝自修复性能显著提升。

3 自愈合防水材料与传统混凝土防水的对比

3.1 传统防水卷材的缺陷

传统防水卷材具有以下缺点^[24-27]。

(1) 桩头节点难处理,底板做不到理想状态下全封闭效果,实际底板的防水系统“千疮百孔”。

(2) 垫层与结构层沉降不一致导致防水层与结构层之间脱空,进而窜水;当地基的沉降大于基桩的沉降时(此种现象尤以基底土为软弱地层的工程为甚),垫层与基础底板及地基之间就会产生缝隙。在强大的水压力作用下,地下水只要穿透任一点,就可以传到整个结构底板。然后沿着结构底板上某条裂缝渗漏入室内,并且无法准确判断外防水的渗漏位置,因而也就无法彻底修复漏水点,给后期维修造成很大困难。

(3) 随着主体结构荷载增加,结构开裂可能会拉裂防水层,使防水层失效。

(4) 现场的卷材施工在搭接可靠性方面难以控制,如一座 2 万 m² 的地下室防水,按单幅卷材宽为 1 m 计算,仅卷材搭接的平面长度即达 40 km,极容易窜水,一处渗漏则整个防水系统全部失效。

(5) 传统卷材对施工要求高,对基层含水率、清洁度、平整度等要求高,节点复杂,较难处理。

(6) 有机类材料易老化,寿命一般不超过 10 a。

3.2 自愈合防水材料的优缺点

根据上述各类实验结果表明,自愈合防水材料除了能提高混凝土抗压、抗折强度、抗盐冻能力性及抗渗性能外,还拥有抗腐蚀能力,并保证在一定时间内混凝土无起泡、无开裂、无剥落。但自愈合技术的应用仍存在一些局限性,其只能修复较小的裂缝,对于较大的损伤无法起到修复的作用。

综上所述,自愈合防水系统与传统卷材防水系统在施工难度、条件、周期及材料性能的对比见表 7。

4 混凝土自愈合材料的应用

随着混凝土自愈合技术的不断发展,其已经在以下诸多领域成功得到应用。

(1) 建筑工程中的应用

自愈合技术已经应用于许多建筑结构中,如工业民用建筑、隧道、地下工程等。这类结构在施工和后期使用过程中容易受到外力因素的影响,自愈合技术的应用可以大大提高结构的使用寿命和安全性。典型应用案例如故宫博物院北院区工程、武汉东湖隧道工程、苏州市中医院工程等,工程案例及其自修复效果如图 5 至图 7 所示。

(2) 水利工程中的应用

水利工程中的混凝土结构容易出现开裂、渗漏等问题,自愈合技术的应用可以有效地解决这些问题。其已成功应用于水坝、水渠等水利工程中^[28],可

表7 自愈合防水系统与传统卷材防水系统对比表

对比内容	传统卷材防水系统	自愈合防水系统
基面处理	需清理或抹光	不需要
基面找平	需找平处理	不需要
施工方法	布料形式	预先铺设,或热熔施工
		材料制备时直接添加
保护层	需要	不需要
施工条件	空间	基坑需留肥槽及足够的铺设空间
	基面条件	保证干燥且对含水率有一定的限制
施工周期	铺设工期	需额外的粘贴工序
		随混凝土结构浇筑,不需要额外的时间
	基坑回填	混凝土结构需养护28 d后并施工保护层后才能回填
材料性能	防水性	可靠性较差,尤其在卷材搭接处质量难控制
	耐久性	有机类材料易老化
	自愈合性	无
	环保性	有机类材质在生成和施工阶段污染环境
防水有效年限	一般不超过10 a	与混凝土结构同寿命
缺陷维修	隐蔽工程,如失效很容易形成串水,且难找到渗水源头、难以维修	混凝土具有自修复功能,微小裂缝可自愈无需维修



图5 武汉东湖隧道工程



图6 苏州市中医院工程

提高结构抗裂性和防渗性,如在云南向家坝水电站工程、北京密云水库工程及南水北调中线工程中得

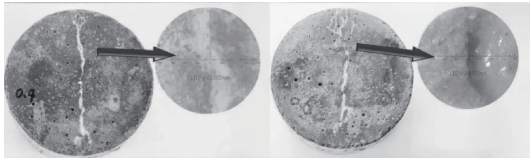


图7 混凝土裂缝在0.4 mm及0.6 mm时的自修复效果

到了应用,工程案例如图8,图9所示。

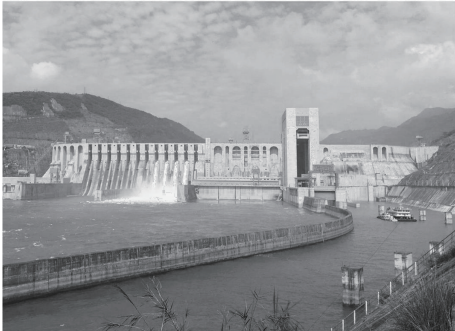


图8 向家坝水电站工程



图9 北京密云水库工程

(3)道路和机场工程建设中的应用

道路和机场工程建设中的混凝土结构很容易受到损伤和磨损,自愈合技术的应用可以减少路面的开裂和坑洼,提高公路和机场路面^[29-30]的使用寿命和耐久性,典型应用案例如乌鲁木齐机场改扩建工程、浙江杭绍甬高速工程等。

(4)其他领域的应用

自愈合技术还可以应用于其他领域,如核电站、航天工程、污水处理厂等,在这些领域中,结构的安全性和可靠性至关重要,自愈合技术的应用可使以上要求得到充分满足和保障。

5 结 语

本文对混凝土自愈合防水材料的作用机理及应用发展进行了论述,并通过对照实验研究表明该材料对混凝土的抗压、抗折强度、抗盐抗冻性及自修复性能均有较大的提升。同时文章指出传统卷材防水的诸多缺陷,并列举了该自愈合材料在建筑工程、水利工程、市政工程等各个领域的成功应用案例。混凝土自愈合技术作为一种新兴技术,其应用可以提

高混凝土结构的长期使用性能,后期可节省大量维修、保养等成本,具有较好的经济效益。随着科技的不断进步和创新,自愈合混凝土的性能和效果将会得到进一步的提高和优化,其应用也将会得到更加广泛的推广和应用,并对行业的可持续发展做出贡献。

参考文献:

- [1] 贺罗,李雄飞,唐斌峰.桥梁施工中大体积混凝土裂缝成因及处理对策[J].公路,2019,64(9):98-101.
- [2] 李密良,宋家茂,张勇.综合管廊施工期间混凝土裂缝成因及其防治[J].混凝土,2019,357(7):157-160.
- [3] 付海峰,王新刚.大面积薄层混凝土裂缝成因分析及控制措施[J].中国港湾建设,2011,172(1):20-22.
- [4] 胡旭方,刘海涛.某泄水闸混凝土裂缝成因分析及防治措施[J].施工技术,2013,391(12):71-73.
- [5] 陈志斌.房屋建筑工程钢筋混凝土裂缝产生原因及防治措施[J].城市建筑空间,2023,30(增刊1):439-440.
- [6] 李杰.持载条件下混凝土断裂性能与裂缝扩展过程研究[D].大连:大连理工大学,2020.
- [7] 钱春香,罗勉,潘庆峰,等.自修复混凝土中微生物矿化方解石的形成机理[J].硅酸盐学报,2013,290(5):620-626.
- [8] 钱春香,李瑞阳,潘庆峰,等.混凝土裂缝的微生物自修复效果[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(2):360-364.
- [9] 谭燕,赵桦,肖衡林,等.渗透结晶型防水剂对PE-ECC力学和自愈合性能影响[J].人民长江,2023,706(9):206-215.
- [10] 侯世珺,黄伟,贺雄飞,等.水泥基渗透结晶型防水材料的制备及性能[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2022,154(2):153-158;164.
- [11] 周宁,徐莉莉,周茂,等.用于水泥基材料的自修复渗透剂及制备方法:中国,CN118495849A[P].2024-08-16.
- [12] 罗程,夏海廷,颜峰,等.水灰比和裂缝宽度对渗透结晶型混凝土的自愈合性能影响[J].混凝土,2023,401(3):26-31.
- [13] 张鹏,冯竟竞,陈伟,等.混凝土损伤自修复技术的研究与进展[J].材料导报,2018,32(19):3375-3386.
- [14] 石宝存,陈景雅,朱润禹,等.基于不同湿度环境下高分子修复剂对混凝土裂缝自愈合性能的影响研究[J].工业建筑,2023,603(4):154-160;172.
- [15] 余万.温拌沥青混凝土感应加热自愈合性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2017.
- [16] 符琼林,曾庆有,张必胜,等.滨海地区用自愈次轻混凝土材料的制备与性能研究[J].工业建筑,2023,53(增刊1):637-641.
- [17] 孙培君,卢孟柯.工民建中混凝土结构性裂缝的原因与控制措施[J].技术与市场,2012,220(4):129.
- [18] 张小亮.混凝土裂缝成因分析及控制[J].山西建筑,2010,36(4):160-161.
- [19] 李泽鹏,黄耀英,余正源,等.早龄期损伤水工混凝土自然自愈合效果试验研究[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2023,21(6):511-518.
- [20] 文一鸣.多尺度混杂组料对混凝土自愈合能力的影响[J].中国新技术新产品,2023,494(16):103-105;142.
- [21] 董克义,李宪立,李艳丽,等.基于纳米材料的自愈合混凝土研究进展[J].陶瓷,2023,454(8):63-66.
- [22] 王险峰,陈少聪,刘建,等.掺入矿物和吸水树脂的轻骨料混凝土自愈性能[J].深圳大学学报(理工版),2023,182(5):564-570.
- [23] 阚黎黎,乔宏卓,王飞,等.超高性能混凝土的自愈合及抗冻性能[J].复合材料学报,2023,40(4):2251-2260.
- [24] 肖建庄,俞才华,肖绪文,等.废弃防水卷材资源化基本问题与发展路径研究[J].中国工程科学,2023,25(5):210-221.
- [25] 谢延合.复合防水在地下室的应用[J].建筑,2021,930(10):79-80.
- [26] 陈兴元,屈建,王博,等.SBS改性沥青防水卷材老化耐久性研究进展[J].化工新型材料,2021,49(增刊1):268-272.
- [27] 窦登裕,吴士玮.不同分子质量SBS对湿铺自粘沥青防水卷材粘接性能的影响研究[J].新型建筑材料,2020,479(11):37-39.
- [28] 侯国辉.水利工程混凝土的早期强度发展与养护方法研究[J].中国水泥,2024,263(4):73-75.
- [29] 杜振宇.基于公路养护下自修复材料的应用研究[J].产品可靠性报告,2024,172(5):107-109.
- [30] 王友成.使用混凝土自修复技术提高道路和桥梁耐久性的研究[J].建材发展导向,2024,405(8):16-18.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

