

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.05.002

水泥-抗水性自修复固化剂稳定 工业建筑固废的性能研究

唐西娅¹, 周君豪¹, 曹雅利¹, 陈树华¹, 张恒勇², 张 昉¹

(1. 湖南工业大学 土木与环境工程学院, 湖南 株洲 412007;
2. 中交三航局第八工程(湖南)有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要: 基于工业建筑固废资源化再生处置利用, 研究以新型抗水性自修复土壤固化技术-飞灰基土壤固化剂“路液”对工业建筑固废的固化处置方法, 将土壤固化剂掺入建筑固废与水泥稳定, 以不同掺量作对照, 分别从强度、抗水性、自修复性方面研究建筑固废固化后的材料性能。研究表明: 固化剂“路液”在不同水泥掺量下均对建筑固废的强度、抗水性、自修复性有增强作用。水泥掺量为5%的再生集料添加固化剂“路液”后, 7d无侧限抗压强度高于水泥掺量为6%的再生集料不添加固化剂“路液”的强度。实验结果表明, 这种粒料类固体废物作为路面基层材料具有较大的工程实用性, 固化剂“路液”能加强再生集料的固化作用, 从而降低水泥胶凝材料的掺量, 可以实现降低工程成本的目的。

关键词: 建筑固废; 土壤固化剂; 无侧限抗压强度; 路面基层

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2025)05-0008-08

引文格式: 唐西娅, 周君豪, 曹雅利, 等. 水泥-抗水性自修复固化剂稳定工业建筑固废的性能研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(5): 8-15.

Study on the Performance of Cement-Water-Resistant Self-Healing Curing Agent in Stabilizing Industrial Construction Solid Waste

TANG Xiya¹, ZHOU Junhao¹, CAO Yali¹, CHEN Shuhua¹, ZHANG Hengyong², ZHANG Fang¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. CCCC Third Navigation Bureau Eighth Engineering (Hunan) Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: On the basis of the resource recycling and utilization of industrial construction solid waste, an investigation has been made of the solidification and disposal method of industrial construction solid waste by adopting a new type of water resistant self-healing soil solidification technology-fly ash-based soil curing agent “road fluid”. By adding the soil curing agent to the construction solid waste and cement for stabilization, a research is conducted on the material properties of the solidified construction solid waste from the perspectives of strength performance, water resistance performance, and self-healing performance, with different dosages used as controls. Research results show that the curing agent “road fluid” is catheterized with an enhancing effect on the strength, water resistance, and self-healing performance of construction solid waste at different cement dosages. The unconfined compressive strength

收稿日期: 2024-08-22

基金项目: 湖南省科技厅联合基金资助项目(2023JJ50185)

作者简介: 周君豪, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为工业建筑遗产保护与再利用, 工业建筑固废处置,
E-mail: 1346654918@qq.com

通信作者: 唐西娅, 女, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为工业遗产保护与再利用, 木结构建筑,
E-mail: 251704110@qq.com

of recycled aggregate with a cement content of 5% and the addition of curing agent “road fluid” after 7 days is higher than that of recycled aggregate without the addition of curing agent “road fluid” with a cement content of 6%. The experimental results show that this granular solid waste finds its great engineering practicality as a pavement base material. The curing agent “road fluid” helps to enhance the curing effect of recycled aggregates, thereby reducing the dosage of cement binder and achieving the goal of reducing engineering costs.

Keywords: construction solid waste; soil curing agent; unconfined compressive strength; road base layer

0 引言

由于城市化加速和产业结构调整,大规模工业场地建筑逐渐荒废,给环境和社会带来了严峻挑战。这些废弃的工业建筑往往包含复杂的结构和多样化的材料,其处理涉及环境保护、资源恢复和城市再生等多个方面。因改建所产生体量巨大的工业建筑固体废物处理已然成为了政府“碳减排”工作的改革难点。以往,工业建筑遗址固体废物多采用末端治理的方法进行掩埋处置,不仅造成了大量的场地浪费,增加了城市环境的二次污染,而且在一定程度上影响了周围建筑物的使用安全。因此,如何处理这些固体废物已成为当今社会关注的重点^[1]。

目前,工业建筑遗址景观营造中的固废材料低碳处置作为工业城市经济发展中平衡城市建设与生态关系的核心方式之一,其固废物的低碳开发与再生利用受到了政府和业界的高度关注。据报道,一些发达国家的建筑固废再生利用率已经达到90%以上,而我国仅为5%,远低于韩国、日本、德国等国家。许多学者开展了关于固废材料固化后用作道路基层的可行性研究^[2-3]。但是,通过再生处理后的大量工业建筑固废材料,其主要成分为砖和混凝土,再生砖渣和混凝土集料的性能远低于天然集料^[4];且其内部结构存在一定程度的损伤,单一利用水泥固化稳定,存在强度低、水稳定性差、自修复能力弱等弱点,且较高比例的再生混凝土骨料对其力学性能和疲劳特性有不利影响,不利于工程实践应用^[5],综合原因导致工业建筑固废利用率低。而利用固化剂可以改变再生集料的性质,提高固废材料的强度和压实性^[6],如NS-SL型土壤固化剂在固化土方面具有较好的水稳性,能提高路用性能^[7],也有学者发现通过添加碱性激发剂和矿渣,水泥稳定再生骨料混合料的力学性能可以有所提高,超越了天然骨料混合料^[8]。

基于抗水性自修复材料的低碳型地聚物研发技术,多用于路基和土处理^[9-10],但在工业建筑固废中还没有成熟的复制的处置技术。本文将土壤固化剂掺入建筑固废与水泥稳定碎石,以不同掺量作对照,

分别从强度、抗水性、自修复性方面研究建筑固废固化后的材料性能,分析固化剂对建筑固废的固化影响规律以及固化剂掺入建筑固废的生效方式,为工业建筑固废再生应用提供理论基础。

1 试验材料与试件制备

1.1 试验材料

水泥采用P-C42.5复合硅酸盐水泥,由华新水泥(株洲)有限公司生产,华新堡垒牌,水泥符合《公路路面基层施工技术细则》JTG/T F20—2015规范的要求^[11]。

再生集料,为株洲清水塘片区工业建筑遗址经拆除、分拣、破碎和筛分形成的粒料类建筑固废,其主要成分为混凝土,质量分数约占69.9%,砖块约占30%,碎石、金属、木材和玻璃约占0.1%。在烘干后使用尺寸为31.5, 19, 9.5, 4.75, 2.36, 0.6, 0.075 mm标准筛过筛,按照粒径分成7档放入密封袋中备用。根据《公路工程集料试验规程》(JTG 3432—2024)分别对大于4.75 mm粒径的粗集料和小于4.75 mm粒径的细集料的基本性能进行测试,测得再生集料基本性能符合JTG/T F20—2015规范的要求^[11-12],具体性能见表1和表2。

表1 再生粗集料基本性能

表观密度 / (g · cm ⁻³)	压碎值 / %	针片状颗粒含量 / %	吸水率 / %
2.601	32.1	7.2	7.82

表2 再生细集料基本性能

表观密度 / (g · cm ⁻³)	吸水率 / %	液限	塑限	塑性指数
2.335	11.13	27.8	20.6	7.2

再生粗集料的针片状颗粒含量、吸水率等主要的性能指标均达标路用性能。而且再生集料压碎值为32.1%,大于《公路路面基层施工技术细则》JTG/T F20—2015规范中规定的高速公路和一级公路基层最高压碎值26%和底基层最高压碎值30%,只能满足二级和二级以下公路基层压碎值小于35%的要求。

再生细集料的塑性指数为 7.2, 显然满足不超过 17 的规范要求^[11]。

新型抗水性自修复高聚物强基材料抗水性自修复强基固化剂, 又名 SRR 型固化剂“路液”, 常温下为棕色液体, 加水易稀释, 不易燃、不易挥发, 无毒无腐蚀性, 结构稳定。“路液”固化后可以形成均一的分子网络结构, 而在这种物质中借助多元醇化合物的添加和强电荷离子的作用, 利用其丰富的氢键, 来削弱颗粒内的吸水性, 达到颗粒抗水功能。通过向水性聚合物分子链结构中添加具有自修复性的 Diels-Alder 双烯加成反应活性基团, 并向材料内部注入富含活性物质的大量微胶囊, 实现了硬化固废颗粒受应力裂纹时微胶囊断裂并响应的自我修复机制。这项技术是实现道路路基微损伤后自我修复的关键技术之一。“路液”的基本物理性质见表 3。

表 3 “路液”的基本物理性质指标

Table 3 Basic physical property indicators of “road fluid”

密度 / (g·cm ⁻³)	pH 值	水溶性 / %	挥发率 / %	沸点 / °C	凝点 / °C
1.05~1.10	7~8	100	< 1	> 100	< 0

1.2 级配

建筑固废再生集料材料级配, 按照《公路沥青路面设计规范》(JTG 3441—2024) 中推荐的水泥稳定级配, 取碎石或砂砾推荐级配的骨架密实型级配范围的中值^[13], 见表 4。

表 4 建筑固废再生集料材料级配

Table 4 Grading of recycled aggregate materials for construction solid waste

筛孔尺寸 / mm	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
基层	100	68~86	38~58	22~32	16~28	8~15	0~3
中值级配	100	77	48	27	22	11.5	1.5

1.3 最佳含水率和最大干密度测试

根据建筑固废再生集料材料级配, 按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009) 中的 T0804—1994 无机结合料稳定材料击实试验方法, 由于最大粒径大于 19 mm 采用丙法, 对水泥稳定再生骨料混合料进行最佳含水率及最大干密度测试^[14]。

工程实际中水泥稳定碎石基层的水泥掺量一般为 3%~7%, “路液”的掺量一般为 300 mL/m³, 本研究设计水泥掺量为 3%, 4%, 5%, 6%, 7% 与固化剂“路液”掺量为 0 mL/m³, 300 mL/m³ 作对照实验, 不同掺量的水泥与固化剂“路液”工业建筑固废再生集料的最佳含水率与最大干密度试验结果如表 5 所示。

表 5 击实试验结果

Table 5 Compaction test results

水泥掺量 / %	“路液”掺量 / (mL·m ⁻³)	最佳含水率 / %	最大干密度 / (g·cm ⁻³)	再生砖混集料级配	
3	0	10.36	1.893 1	$m_{4.75} : m_{9.5} : m_{31.5} = 27 : 21 : 52$	
4		10.44	1.914 6		
5		10.53	1.935 3		
6		10.61	1.951 7		
7		10.69	1.965 9		
3		300	9.84		1.953 1
4			9.90		1.958 5
5	10.03		1.966 2		
6	10.18		1.974 4		
7	10.26		1.980 7		

表 5 所示试验结果表明: 1) 有无添加固化剂“路液”的情况下再生集料的最大干密度和最佳含水率均随水泥掺量的增加而增大。2) 在同一水泥掺量下, 再生集料最大干密度因固化剂“路液”的掺入而增大, 最佳含水率因固化剂“路液”的掺入而降低。因为固化剂“路液”利用聚合反应改变了再生集料松散的物理结构, 形成的高聚物分子胶粒对细集料进行吸附与填充, 提高了再生集料的力学性能与坚实性; 基于再生集料水胶连结和胶结连结的特点, 对连结截至的位置进行改变, 形成结晶体, 阻断自由水的进入, 实现固化剂“路液”材料的抗水性能, 从而实现最佳含水量降低。

1.4 试件制备

试件制备参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》JTG E51—2009 中 T0805—1994 试验方法进行^[14]。将再生集料由最佳干密度按照级配进行称量, 并按照再生集料最佳含水率并预留 1%~2% 的水进行拌和, 拌匀后放入密闭容器内浸润备用。浸润 4 h 后加入不同掺量的水泥进行搅拌, 在搅拌过程中, 为了使再生集料达到最佳含水率, 将预留的水加入搅拌。将上述混合料搅拌均匀后, 在 1 h 内^[15]通过振动压实制作成 $\Phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 圆柱体标准试件, 在 2~6 h 后进行脱模, 脱模后称取试件质量, 测量试件高度。

2 试件测试方法

2.1 强度试验

强度试验采用无侧限抗压强度试验与劈裂强度试验。每组做 13 个试件, 分别采用 3%, 4%, 5%, 6%, 7% 的水泥掺量与固化剂“路液”掺量为 0 mL/m³, 300 mL/m³ 作对照实验。将试件放在标准养护室中养护, 在养护期最后一天取出浸水泡 24 h 后, 进行强度测试^[15]。在进行结果分析时采用 3 倍均方差方法

剔除异常值,异常值数量超过2个时试验重做。

2.2 水稳定性试验

每组做12个试件,其中6个采用标准养护龄期7d,养护龄期最后一天浸于(20±2)℃的水中。另外6个采用标准养护至同龄期(不浸水)。分别对养护后的试件开展无侧限抗压强度试验,并通过式(1)计算水稳定性系数。

$$WSC = R_d^1 / R_d^0 \times 100\% \quad (1)$$

式中:WSC为水稳定性系数,%; R_d^0 为不浸水的无侧限抗压强度,MPa; R_d^1 为浸水24h的无侧限抗压强度,MPa。

将不添加固化剂的材料作为基准试件,添加固化剂的材料作为检测试件,通过检测试件的水稳定性系数与基准试件的水稳定性系数的比,计算水稳定性系数比,如式(2)。

$$WSCR = \frac{WSC_1}{WSC_0} \quad (2)$$

式中:WSCR为水稳定性系数比;WSC₀为基准试件的水稳定性系数,%;WSC₁为检测试件的水稳定性系数,%。

2.3 自修复性试验

每组做12个试件,采用标准养护龄期7d。养护结束后,其中6个试件开展劈裂强度试验,并计算最大荷载 f_d 和劈裂强度 R_i^0 。另外6个试件加载至最大荷载的80%后卸载,然后放置于标准养护室中养护15d后开展劈裂强度试验,计算劈裂强度 R_i^1 ,并通过式(3)计算稳定材料的自修复系数。

$$SHC = R_i^1 / R_i^0 \times 100\%, \quad (3)$$

式中:SHC为自修复系数,%; R_i^0 为7d劈裂强度,MPa; R_i^1 为养护15d后的劈裂强度,MPa。

将不添加固化剂的稳定材料作为基准试件,添加固化剂的稳定材料作为检测试件,通过检测试件的自修复性系数与基准试件的自修复性系数的比计算自修复系数比:

$$SHCR = \frac{SHC_1}{SHC_0} \quad (4)$$

式中:SHCR为自修复系数比;SHC₀为基准试件的自修复性系数,%;SHC₁为检测试件的自修复性系数,%。

3 试验结果与分析

3.1 强度性能

3.1.1 无侧限抗压强度

再生集料在有无“路液”下和不同水泥掺量下的

7d无侧限抗压强度对照,见图1。

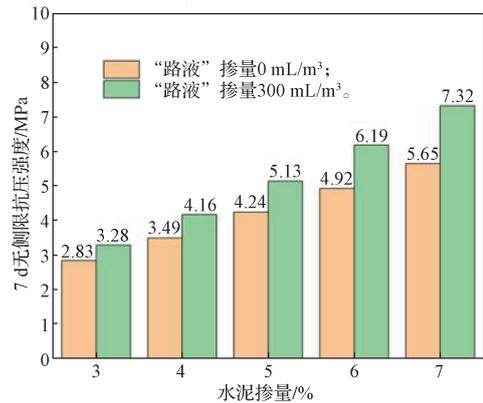


图1 有无“路液”再生集料7d无侧限抗压强度图

Fig. 1 7-day unconfined compressive strength diagram of recycled aggregate with or without “road liquid”

由图1可知,不添加固化剂“路液”再生集料水泥掺量为3%,4%,5%,6%,7%的7d无侧限抗压强度分别为2.83,3.49,4.24,4.92,5.65 MPa,抗压强度随着水泥掺量的增加而增强。添加了固化剂“路液”再生集料水泥掺量为3%,4%,5%,6%,7%的7d无侧限抗压强度分别为3.28,4.16,5.13,6.19,7.32 MPa,相较不添加固化剂“路液”再生集料的抗压强度分别提高了15.90%,19.20%,20.99%,25.81%,29.56%。由《公路路面基层施工技术细则》JTG/T F20—2015规范可知,对重交通二级和二级以下公路的基层材料的7d无侧限抗压强度要求为3~5 MPa,因此单一水泥稳定再生集料在水泥掺量为3%,不添加固化剂时,无法满足规范要求,但在添加固化剂后可以满足规范要求。表明同等水泥掺量下,添加固化剂“路液”再生集料的强度能得到明显增加。试验结果显示:水泥掺量为5%的再生集料添加固化剂“路液”后7d无侧限抗压强度略高于水泥掺量为6%的再生集料不添加固化剂“路液”的无侧限抗压强度,说明在工程实践中可以通过添加固化剂“路液”来减少水泥的掺量,达到降低工程成本的目的。同时,随着水泥掺量提高,添加固化剂“路液”再生集料的抗压强度提升幅度逐渐升高,说明固化剂“路液”能促进水泥与再生集料的固化作用。

图2为在有无固化剂“路液”、不同掺量水泥下再生集料固化后28d无侧限抗压强度。无固化剂“路液”再生集料28d无侧限抗压强度与7d无侧限抗压强度对应相同水泥掺量再生集料的强度分别提高了40.99%,38.68%,33.25%,33.74%,31.15%,添加固化剂“路液”的再生集料28d无侧限抗压强度与7d无侧限抗压强度对应相同的水泥掺量再生集料的强度分别提高了39.63%,35.34%,31.97%,29.89%。

28.55%。

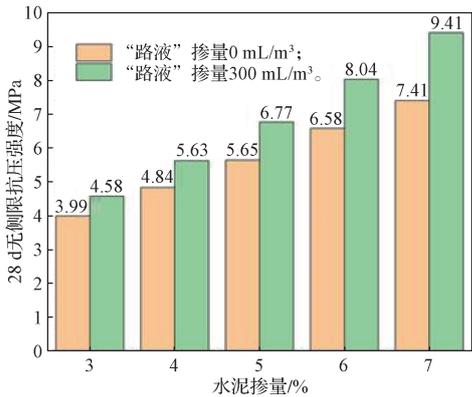


图2 有无“路液”再生集料 28 d 无侧限抗压强度图
Fig. 2 28-day unconfined compressive strength diagram of recycled aggregate with or without “road liquid”

由图2可知，在7 d至28 d的养护期内，添加固化剂“路液”再生集料的无侧限抗压强度增幅，低于无添加固化剂“路液”再生集料的无侧限抗压强度增幅。说明添加固化剂“路液”再生集料的无侧限抗压强度增长速率先快后慢，强度形成主要在前期，能更快满足工程实际需求。

3.1.2 劈裂强度

有无固化剂“路液”再生集料在不同龄期下的劈裂强度见图3。

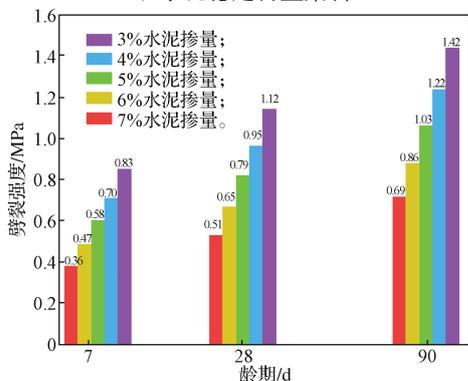
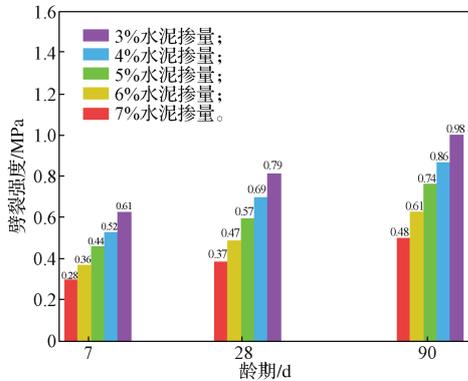


图3 有无“路液”再生集料在不同龄期下劈裂强度
Fig. 3 Chart of splitting strength of recycled aggregates with and without “road fluid” at different ages

由图3可知，添加固化剂“路液”在各水泥掺量下均能提高水泥稳定再生集料的劈裂强度。添加了固化剂“路液”再生集料7 d的劈裂强度在各水泥掺量下，相较于不添加固化剂“路液”再生集料7 d的劈裂强度，分别提高了28.57%、30.56%、31.82%、34.62%、36.07%。其发展趋势与无侧限抗压强度的一致，均随着水泥掺量的提高，添加固化剂“路液”再生集料的劈裂强度提升幅度逐渐升高。并且劈裂强度的提升幅度高于再生集料7 d无侧限抗压强度的增加量，说明固化剂“路液”能更好地提高再生集料的抗拉性能。不添加固化剂“路液”再生集料90 d劈裂强度与28 d劈裂强度对应相同水泥掺量再生集料的强度分别提高了29.73%、29.79%、29.82%、24.64%、24.05%。添加固化剂“路液”再生集料90 d劈裂强度，与28 d劈裂强度对应相同的水泥掺量再生集料的强度，分别提高了35.29%、32.31%、30.38%、28.42%、26.79%。表明固化剂“路液”对再生集料的固化具有长期增强作用，添加固化剂“路液”不仅能快速满足强度需求，也能保持后期强度的需要。

3.2 水稳性性能

再生集料在有无“路液”下不同水泥掺量的吸水率见表6。

表6 有无“路液”再生集料在不同水泥掺量下的吸水率

Table 6 Water absorption rate of recycled aggregate with and without “road liquid” with different dosages of cement

水泥掺量 / %	固化剂掺量 / (mL·m ⁻³)	质量 / g		吸水率 / %
		浸水前	浸水后	
3	0	5 648	5 884	4.18
4	0	5 475	5 689	3.91
5	0	5 637	5 845	3.69
6	0	5 506	5 689	3.32
7	0	5 499	5 666	3.04
3	300	5 537	5 667	2.35
4	300	5 382	5 489	1.99
5	300	5 350	5 437	1.63
6	300	5 548	5 622	1.33
7	300	5 615	5 670	0.98

由表6可知，随着水泥掺量的提高，再生集料的吸水率逐渐降低，说明水泥掺量的提高能减少再生集料的孔隙率，从而降低吸水率。添加固化剂“路液”后再生集料的吸水率进一步降低。

分别对不同水泥掺量下再生集料做水稳性试验，试验结果如表7所示。

表7 不同水泥掺量再生集料水稳定性试验结果

Table 7 Water stability test results of recycled aggregates with different cement dosage

水泥掺量 /%	基准试件抗压强度 /MPa		WSC ₀ /%	检测试件抗压强度 /MPa		WSC ₁ /%	WSCR
	R _d ⁰	R _d ¹		R _d ⁰	R _d ¹		
3	3.29	2.83	86.02	3.66	3.28	89.62	1.04
4	4.05	3.49	86.17	4.53	4.16	91.83	1.07
5	4.86	4.24	87.24	5.43	5.13	94.48	1.08
6	5.60	4.92	87.86	6.46	6.19	95.82	1.09
7	6.38	5.65	88.56	7.49	7.32	97.73	1.10

由表7可知,在各水泥掺量下,添加“路液”的再生集料的水稳定性系数均高于不添“路液”的。各水泥掺量下的水稳定性系数比均大于1,表明添加“路液”有利于提高再生集料的抗水性能,且随着水泥掺量的增加,水稳定性系数比增大,水稳定性能更好。这是因为“路液”中加入了多元醇化合物,强电荷离子利用其富含的氢键减弱再生集料内部吸水性,从而实现再生集料的抗水功能。

3.3 自修复性能

目前国内外混凝土自修复技术主要基于化学原理、基于物理学原理以及基于生物学原理^[16]。本研

究基于化学原理的自修复,分析以添加水泥的自然自愈自修复与添加固化剂“路液”的基于胶囊的自修复相结合,寻找更好的自修复方法。通过劈裂强度试验,分析单一只添加水泥稳定再生集料的自修复性能,以及添加固化剂“路液”与水泥共同稳定再生集料的自修复性能,所得结果如表8所示。由表8可知,随着水泥掺量的增加,再生集料自修复系数增大。这是由于随着水泥掺量的增加,在开始养护7d后,存在未水化或未完全水化的水泥,在后续养护时间内继续反应生成水化产物聚集在裂缝周围,体积发生膨胀,从而达到愈合的效果。

表8 不同水泥掺量再生集料自修复性试验结果

Table 8 Self-healing test results of recycled aggregates with different cement dosages

水泥掺量 /%	基准试件抗压强度 /kPa		SHC ₀ /%	检测试件抗压强度 /kPa		SHC ₁ /%	SHCR
	R _i ¹	R _i ⁰		R _i ¹	R _i ⁰		
3	221.12	282.59	78.25	304.53	362.48	84.01	1.07
4	308.98	356.24	86.73	439.89	466.33	94.33	1.09
5	411.16	436.83	94.12	596.76	576.92	103.44	1.10
6	533.59	517.86	103.04	813.12	696.17	116.80	1.13
7	665.69	606.88	109.69	1 081.89	827.13	130.80	1.19

各水泥掺量下的自修复系数比均大于1,说明添加固化剂“路液”与水泥共同稳定再生集料的自修复性能,均高于单一只添加水泥稳定再生集料的自修复性能。表明添加固化剂“路液”对再生集料的自修复性能有明显作用。这是由于固化剂“路液”中混入大量富含活性物质的微胶囊,当硬化后的土方受到应力开裂时,微胶囊破裂,内部的修复剂流出扩散至损伤处,并与预混合的催化剂接触,起到填充裂缝的功能,同时起到裂缝自我修复功能。从自修复系数比来看,随着水泥掺量增加,自修复系数比增大,表明添加水泥的自然自愈自修复方法与添加固化剂“路液”的基于胶囊的自修复方法可以共同作用,更好地实现再生集料的自修复能力。

4 微观性能分析

4.1 XRD 测试性能分析

图4为水泥固化与添加了固化剂“路液”固化

的再生集料的XRD谱图。通过2个样品谱图的物相分析可知:2个样品的主要成分为SiO₂、Ca(OH)₂、CaCO₃、Ca₂SiO₄等。其中添加固化剂会导致XRD峰位的强度增加,这是由于固化剂促进了固化体中的结晶过程、减小了晶格畸变,以及增大了结晶体的体积。由于固化剂中有一些飞灰和金属离子,所以在样品2中,出现了一些固化剂的特征衍射峰,如Al₂O₃、CaO和FeO的特征衍射峰。由于飞灰中有一定的SiO₂,因此样品2中SiO₂的峰强大幅度增加,说明样品2存在大量SiO₂。在试样的内部进行化学反应,会发生水化反应以及碳化反应,生成氢氧化物以及碳酸盐等,其中包括Ca(OH)₂、CaCO₃和C—S—H凝胶。试样抗压强度大幅提升的主要原因就在于这些碳酸盐晶体的生成,它们能有效粘结颗粒并充填颗粒间孔隙,并与颗粒表面粘结,从而形成一个更加紧密的整体结构,提高试样强度。C—S—H凝胶是一种非晶物质,在XRD图谱上表现出弥散峰,这些凝胶

物质在材料中起着重要的胶结作用,使材料体系更紧密。综上所述,固化剂“路液”的存在有助于增强固化体的结构稳定性,提高再生集料强度。

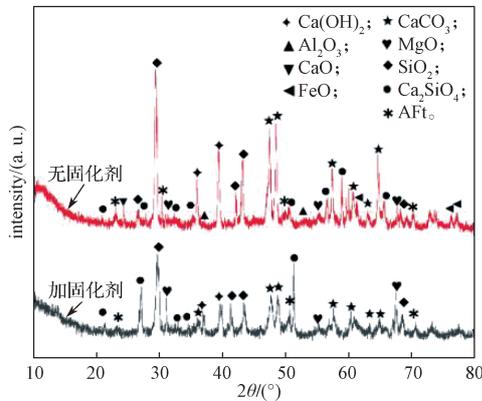
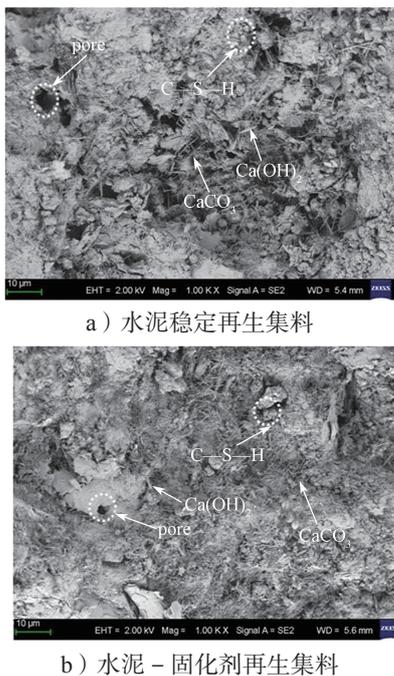


图4 有固化剂“路液”再生集料的XRD光谱图

Fig. 4 XRD spectrum of recycled aggregate with or without curing agent “road liquid”

4.2 SEM 测试性能分析

水泥固化与添加了固化剂固化的再生集料的SEM图,如图5所示。



a) 水泥稳定再生集料

b) 水泥-固化剂再生集料

图5 有无固化剂“路液”再生集料的微观形貌图

Fig. 5 Microscopic morphology of recycled aggregate with or without curing agent “road liquid”

对2个样品的形貌图进行分析:可知试样颗粒大小存在一定的差异,整体分布比较均匀。颗粒间接触的方式以面-面接触为主,有利于形成更加紧密的结构。颗粒间存在孔隙,且孔隙大小不一,架空孔隙较少。与样品1相比,样品2图中的孔隙(pore)明显减少,说明添加“路液”可以提高试样的整体紧密度,从而提高试样强度,这与XRD谱图分析结果吻

合。试样中均有晶体附着在颗粒周围,晶体主要为柱状和针状,颗粒表面分布有丝状絮状物。C—S—H凝胶具有不规则的球状体形态,这些球状体会相互堆积在一起,形成致密的结构。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 形状尺寸通常呈片状。试样内部有较多 CaCO_3 与C—S—H凝胶交错生长,并彼此交织在一起,使得两者之间的结合更加紧密,发挥粘结土颗粒并充填孔隙的作用,这种交错生长和结合可以增加水泥基材料的强度和耐久性。

5 结论

1) 固化剂“路液”在不同水泥掺量下均对再生集料的无侧限抗压强度有增强作用,水泥掺量为5%的再生集料,添加固化剂“路液”后7d无侧限抗压强度略高于水泥掺量为6%的再生集料不添加固化剂“路液”7d无侧限抗压强度,这说明在工程实践中,可以通过添加固化剂“路液”来降低水泥的掺量,达到降低工程成本的目的。

2) 随着水泥掺量的提高,添加固化剂“路液”再生集料的强度提升幅度逐渐升高,并且劈裂强度的增加量高于无侧限抗压强度的增加量,说明固化剂“路液”能更好地提高再生集料的抗拉性能。

3) 由无侧限抗压强度的增长速率,可知添加固化剂“路液”强度的增长速率先快后慢,强度形成主要在前期。由劈裂强度随龄期的变化可知,添加固化剂“路液”的强度在后期仍有一定的增长空间。说明添加固化剂“路液”,不仅能快速满足强度需求,也能保持后期强度的需要。

4) 添加固化剂“路液”后,各水泥掺量下的水稳定性系数比与自修复系数比均大于1,这说明添加“路液”可以提高再生集料的抗水性能,加强再生集料的自修复性能。添加水泥的自然自愈自修复方法与添加固化剂“路液”的基于胶囊的自修复方法,可以共同作用,更好地实现再生集料的自修复能力。

5) 通过微观机理分析可知,固化剂促进了固化体中的结晶过程、减小了晶格畸变以及增大了结晶体的体积,在固化体内部进行水化反应以及碳化反应,生成氢氧化物以及碳酸盐等,其中包括 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 和C—S—H凝胶。它们能有效粘结颗粒,充填颗粒间孔隙,并与颗粒表面粘结,从而形成一个更加紧密的整体结构,提高试样强度。

参考文献:

- [1] 肖杰,吴超凡,湛哲宏,等.水泥稳定砖与混凝土再生集料基层的性能研究[J].中国公路学报,2017,

- 30(2): 25-32.
XIAO Jie, WU Chaofan, ZHAN Zhehong, et al. Research on Performances of Cement Stabilized Brick and Concrete Recycled Aggregate Base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 25-32.
- [2] 田 振. 含建筑垃圾水稳碎石路面基层材料的使用性能 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
TIAN Zhen. Performance of Base Material of Water-Stabilized Macadam Pavement Containing Construction Waste[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [3] 弓扶元, 曹万林, 王栋民, 等. 工业与建筑固废高效利用混凝土及其工程结构防灾研究[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(1): 1-18.
GONG Fuyuan, CAO Wanlin, WANG Dongmin, et al. Research Progress on Efficient Utilization of Solid Waste in Concrete and Disaster Prevention of Engineering Structures[J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(1): 1-18.
- [4] 黎小华, 肖 杰, 吴超凡, 等. 建筑固体废物再生骨料基层混合料的永久变形特性研究 [J]. 中外公路, 2022, 42(1): 221-225.
LI Xiaohua, XIAO Jie, WU Chaofan, et al. Study on Permanent Deformation Characteristics of Construction and Demolition Waste Recycled Aggregate Base Mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 221-225.
- [5] CHIRANJEEVI K, YATISH R G, KUMAR D H, et al. Utilization of Recycled Concrete Aggregates for Pavement Base Courses-A Detailed Laboratory Study[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134122.
- [6] 佟英男. 砖混集料水泥稳定碎石基层材料的设计研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
TONG Yingnan. Design and Research of Brick-Concrete Aggregate Cement Stabilized Macadam Base Material[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2023.
- [7] 董博闻, 王修山, 周恒宇. 应用 NS-SL 型土壤固化剂固化淤泥的路用性能试验研究 [J]. 公路, 2021, 66(8): 13-17.
DONG Bowen, WANG Xiushan, ZHOU Hengyu. Research on Road Performance of Solidified Silt with NS-SL Soil Stabilizer[J]. Highway, 2021, 66(8): 13-17.
- [8] 宋 洋, 靳 猛, 邱 浩. 碱激发矿渣再生骨料半刚性基层性能 [J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41(3): 455-461.
SONG Yang, JIN Meng, QIU Hao. Properties of Alkali Activated Slag Recycled Aggregate Semi-Rigid Base[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2023, 41(3): 455-461.
- [9] 蒋爱明, 杨 凯, 温肖博. 一种新型抗水性自修复材料固化土技术研究 [J]. 路基工程, 2023(1): 107-112.
JIANG Aiming, YANG Kai, WEN Xiaobo. Research on a New Technology for Water-Resistant Self-Healing Soil Solidification[J]. Subgrade Engineering, 2023(1): 107-112.
- [10] 侯有为. 复合 SRR 型固化土路用性能与应用研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
HOU Youwei. Study on Road Performance and Application of Composite SRR Solidified Soil[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2023.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 5-10.
Ministry of Transport of the Republic of China. Technical Guidelines for Construction of Highway Roadbases: JTG/T F20—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015: 5-10.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程集料试验规程: JTG 3432—2024[S]. 北京: 人民交通出版社, 2024: 16-21.
Ministry of Transport of the Republic of China. Test Methods of Aggregate for Highway Engineering: JTG 3432—2024[S]. Beijing: China Communications Press, 2024: 16-21.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面设计规范: JTG 3441—2024[S]. 北京: 人民交通出版社, 2024: 15-20.
Ministry of Transport of the Republic of China. Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement: JTG 3441—2024[S]. Beijing: China Communications Press, 2024: 15-20.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTGE51—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 12-18.
Ministry of Transport of the Republic of China. Test Methods of Materials Stabilized with Inorganic Binders for Highway Engineering: JTGE51—2009[S]. Beijing: China Communications Press, 2009: 12-18.
- [15] 陈瑞娟. 新疆地区路面水泥稳定砂砾配合比设计研究 [J]. 交通标准化, 2013(19): 106-108.
CHEN Ruijuan. Mix Proportion Design of Cement Stabilized Gravel of Pavement in Xinjiang Region[J]. Transportation Standardization, 2013(19): 106-108.
- [16] 张 鹏, 冯竟竟, 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.
ZHANG Peng, FENG Jingjing, CHEN Wei, et al. Self-Healing Performance of Concrete: A Technological Review[J]. Materials Review, 2018, 32(19): 3375-3386.

(责任编辑: 姜利民)