

固废生态混凝土的降碱技术研究

南书婷¹,程霄智²,朱亚光^{1,*},徐培蓁¹,毕雯惠¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 中北大学 环境与安全工程学院, 太原 030003)

摘要: 固废生态混凝土的碱度决定了植物生长性, 拟采取碳化钢渣、钢渣微粉、粉煤灰和脱硫石膏等多种固废材料制备生态混凝土, 并通过碳化、喷涂硅烷、碳化和喷涂硅烷复合的 3 种方法降低固废生态混凝土碱度, 分析不同降碱方法对固废生态混凝土抗压强度和碱度的影响。结果表明, 碳化和喷涂硅烷都可以在一定程度上降低固废生态混凝土的碱度, 小幅度提高混凝土的抗压强度; 采用碳化降碱时, 快速碳化的降碱效果优于自然碳化, 且快速碳化 7 d 时混凝土的抗压强度和碱度最佳; 采用喷涂硅烷降碱、喷涂 2 次时, 抗压强度和碱度最佳。当固废生态混凝土快速碳化 7 d 后喷涂 2 次硅烷时降碱效果和抗压强度最优, pH 值可降至 9.3 左右, 抗压强度提高 10%~20%。

关键词: 固废生态混凝土; 降碱; 抗压强度; 碱度

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)06-0074-07

Research on the alkalinity reduction of solid waste eco-concrete

NAN Shuting¹, CHENG Xiaozhi², ZHU Yaguang^{1,*}, XU Peizhen¹, BI Wenhui¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030003, China)

Abstract: The alkalinity of solid waste eco-concrete plays a crucial role in determining plant growth. This study utilizes various solid waste materials to prepare eco-concrete, including carbonized steel slag, steel slag micropowder, fly ash and desulfurized gypsum. Three methods are employed to reduce the alkalinity of solid waste eco-concrete: carbonation treatment, silicone spraying and a combination of carbonation treatment and silicone spraying. It then analyzes the effects of these three alkalinity reduction methods on the compressive strength and alkalinity of solid waste eco-concrete. The findings reveal that both carbonization treatment and silicone spraying can effectively reduce the alkalinity to some extent and slightly improve the concrete's compressive strength at the same time. When carbonization treatment is employed, rapid carbonization exhibits better results in terms of alkalinity reduction compared to natural carbonization, yielding optimal compressive strength and alkalinity levels during the 7-day rapid carbonization process. When silicone spraying is employed, two rounds of spraying results in superior compressive strength and alkalinity levels. Combining a 7-day rapid carbonization with two rounds of silicone spraying achieves the best results of

收稿日期: 2023-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878365)

作者简介: 南书婷(1999—), 女, 山东菏泽人。硕士, 研究方向为建筑废弃物与工业废渣资源化利用。E-mail: 2429306849@qq.com。

* 通信作者: 朱亚光(1974—), 男, 吉林洮安人。博士, 副教授, 主要从事固废资源化利用方面的研究。E-mail: zyqq@sina.com。

reducing pH value to approximately 9.3 while increasing compressive strength by 10%~20%.

Key words: solid waste eco-concrete; alkalinity reduction; compressive strength; alkalinity

为了协调城市发展与生态环境之间的关系,学者们提出了具有中国特色的海绵城市思路,通过“绿色”与“灰色”基础设施相结合,使城市像有弹性海绵一样,实现城市雨水的渗排、储蓄和净化^[1-2]。生态混凝土具备很多连续孔隙,利于绿植生长,是一种适用于“海绵城市”的新型环保材料^[3]。但生态混凝土使用水泥作为胶凝材料,水泥水化时会产生强碱矿物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,使得混凝土碱度高达 12~14,而植物适于生长的碱度仅为 6~10^[4],故降低生态混凝土的碱度就变得尤其重要。

另一方面,随着工业化的迅猛发展,工业固体废弃物大量积累,使环境污染越来越严重。有学者发现粉煤灰和矿粉等固废材料在水泥水化后期发生火山灰反应^[5],能消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 从而降低混凝土的碱度,因而可使用固废材料部分代替水泥制备固废生态混凝土。高婷^[6]、王凤池^[7]等采用掺入矿粉或粉煤灰的方法制备生态混凝土,但降碱幅度较小。唐瑞^[8]采用碳化降低混凝土的碱度,碳化 14 d 可使碱度降至 10.9 左右,要降至满足生态混凝土的要求仍需要较长碳化时间,而碳化时间过长会影响混凝土强度。王志鹏等^[9]采用喷涂硅烷处理混凝土,碱度立即降低至 8.75,但养护 7 d 后碱度反而升至 9.04。由此可见,仅掺入固废材料掺合料降低碱度还不能满足生态混凝土的要求,而碳化降碱需要较长时间,喷涂硅烷降碱初始降碱后碱度很低,但随着时间增加,内部 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 逐渐扩散,碱度仍会逐渐上升。因此,为了实现生态混凝土经济、高效降碱,需要研究复合降碱方式的降碱效果。

拟采用多种固废材料制备生态混凝土,探讨碳化、喷涂硅烷、碳化和喷涂硅烷复合的 3 种处理方式对固废生态混凝土的降碱效果及抗压强度的影响。

1 试验原材料和配合比

1.1 试验原材料

1) 水泥:选用 P·I 42.5 水泥,化学成分见表 1,物理性能见表 2。

2) 粉煤灰:选用 F 类二级粉煤灰,45 μm 筛余量为 27.8%,密度为 2.35 g/cm^3 ,28 d 活性指数为 70.4%。

3) 脱硫石膏:化学成分见表 3。

4) 钢渣微粉:密度为 3.32 g/cm^3 ,28 d 活性指数为 70.4%,化学成分见表 3。

5) 硅灰:化学成分见表 3。

表 1 水泥的主要化学成分与矿物组成 %

组成	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	f-CaO	其他
质量分数	63.43	20.3	3.99	5.42	2.03	0.97	0.87	2.99

表 2 水泥的物理力学性能

技术指标	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
取值	350	125	190	26.8	44.0	6.4	7.7

表 3 脱硫石膏、钢渣微粉、硅灰的化学组成及质量分数 %

试验原料	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	SO ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	其他
脱硫石膏	40.59	3.50	0.62	1.47	0.30	—	52.96	0.21	—	0.35
钢渣微粉	43.14	14.34	26.50	5.45	2.20	3.32	0.70	—	2.14	2.21
硅灰	0.10	96.76	0.07	0.30	0.11	—	—	—	—	2.66

6) 粗骨料:选用碳化钢渣,将钢渣放入碳化釜,碳化 4 d,碳化釜中 CO_2 浓度为 99.9%,压力为 0.7 MPa,骨料基本性能见表 4。

7) 水:选用实验室自来水。

表4 碳化钢渣骨料的基本性能

粒径/mm	松散堆积密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	紧密堆积密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	表观密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	针片状/%	吸水率/%	含水率/%	压碎指标/%
10~16	1580	1760	3180	9.3	2.2	0.1	6.3
5~10	1603	1741	3286	9.2	2.3	0.1	6.0

1.2 试验配合比设计

以水泥、脱硫石膏、钢渣微粉、粉煤灰、硅灰质量分数比为 42.3 : 2.7 : 22.5 : 22.5 : 10.0 作胶凝材料,以 5~10 mm、10~16 mm 碳化钢渣作粗骨料,制备固废生态混凝土,配合比见表 5。

表5 固废生态混凝土配合比

编号	水胶比	钢渣粒径/mm	水泥	脱硫石膏	钢渣微粉	粉煤灰	硅灰	水	钢渣
A-1	0.27	10~16	148.10	9.45	78.78	78.78	35.01	85.07	1480
B-1		5~10	155.57	9.93	82.75	82.75	36.78	89.37	
A-2	0.30	10~16	141.00	9.00	75.00	75.00	33.33	90.00	
B-2		5~10	148.52	9.48	79.00	79.00	35.11	94.80	

注:A、B分别表示 10~16 mm、5~10 mm 粒径的钢渣;1、2 分别表示 0.27、0.30 的水胶比。

2 试验方法

2.1 固废生态混凝土的制备

搅拌:采用胶凝材料裹石法拌制混凝土试件。首先向搅拌机内加入全部粗骨料和 70% 的水,搅拌 60 s,再加入一半的胶凝材料搅拌 60 s,最后加入剩余材料搅拌 120 s 后停止。

成型:采用人工插捣成型的方法制备试件。拌和结束后,将搅拌机中的混凝土取出,分 3 次装进尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的模具中,每次都用钢棒插捣,最后抹平混凝土表面后覆膜,室外养护 1 d 再移入养护室养护,在标准养护条件下养护至 28 d。

2.2 测试方法

将标准养护 28 d 的固废生态混凝土试块分为 2 组进行碳化,一组放入碳化箱进行快速碳化,一组在空气中自然放置,分别碳化 3、7 和 20 d 后测试其强度和碱度。碳化箱湿度为 (65±5)%,温度为 20℃,CO₂ 体积分数为 20%。

对标准养护 28 d 的固废生态混凝土试块进行喷涂硅烷处理,硅烷均匀喷涂在试块表面,共 3 次,每间隔 24 h 喷涂 1 次,每次喷涂后测试其抗压强度和碱度。抗压强度参照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)进行测试。碱度采取固液萃取法进行测试,将相应龄期试件压碎,按照固液比为 1:1,浸泡 24 h 后使用 Ph-220 型 pH 计测试桶内溶液碱度。

3 试验结果与分析

3.1 碳化的影响

3.1.1 碳化方式对固废生态混凝土碱度的影响

在不同碳化龄期下,不同碳化方式对固废生态混凝土的碱度影响如图 1 所示。快速碳化和自然碳化均可以降低固废生态混凝土的碱度,且各个试件碱度降低趋势较为接近。以试件 A-2 为例,在快速碳化 3、7、20 d 后碱度分别下降至 10.28、10.02、9.13,在自然碳化 3、7、20 d 后的碱度分别下降至 10.68、10.58、10.26。这是因为 CO₂ 气体通过混凝土的孔隙进入内部,与水泥水化生成的 Ca(OH)₂、C-S-H、C₃S 和 C₂S 等物质发生反应,生成碳酸盐和水,消耗了混凝土内部的碱性物质,改变了混凝土的化学组成成分与微观组织结构,使混凝土碱度降低^[10]。

相同配合比的固废生态混凝土,相较于自然碳化,快速碳化 3 d 的碱度整体下降 0.2~0.4;快速碳化 7 d 碱度整体下降 0.5~0.6;快速碳化 20 d 碱度整体下降 1.0~1.2。快速碳化的降碱效果优于自然碳

化,这是因为快速碳化试验是在 CO₂ 体积分数高达 20%、湿度保持为 65%的条件中进行的,而大气中 CO₂ 的体积分数仅为 0.0415%^[11],快速碳化的 CO₂ 浓度远高于自然碳化,碳化速度会大大加快,因而快速碳化的固废生态混凝土碱度明显降低。

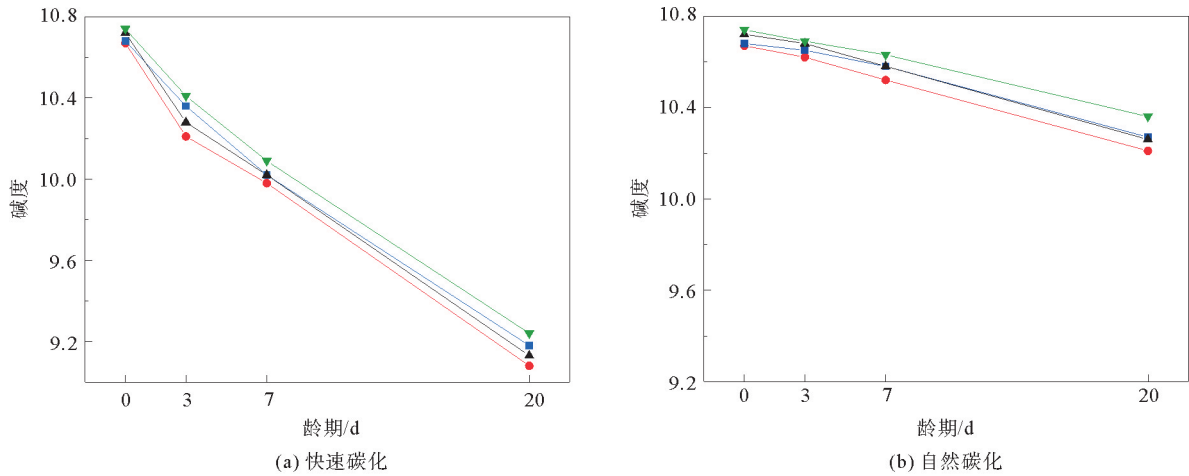


图 1 碳化方式对碱度的影响
 —●— A-1; —■— B-1; —▲— A-2; —▼— B-2

3.1.2 碳化方式对固废生态混凝土抗压强度的影响

在不同碳化龄期下,不同碳化方式对固废生态混凝土的抗压强度的影响如图 2 所示。快速碳化和自然碳化的固废生态混凝土抗压强度在一定的碳化龄期内均有一定程度的增加。以试件 A-2 为例,相较于标准养护 28 d 下的抗压强度,快速碳化 3、7、20 d 后分别增加了 6.67%、20.00%、2.20%,自然碳化 3、7、20 d 后分别增加了 2.20%、6.40%、7.80%。强度上升的原因其一是固废生态混凝土在碳化时会产生水,这些水会促进未水化的水泥进一步水化^[12],因而生成更多的水化产物;其二是 CO₂ 与水泥水化生成的 Ca(OH)₂、C-S-H 等物质发生反应生成碳酸盐结晶,少量的碳酸盐结晶可以填充混凝土的孔隙,提高水泥石和界面区的微观结构的密实度,从而提高混凝土的强度^[13]。

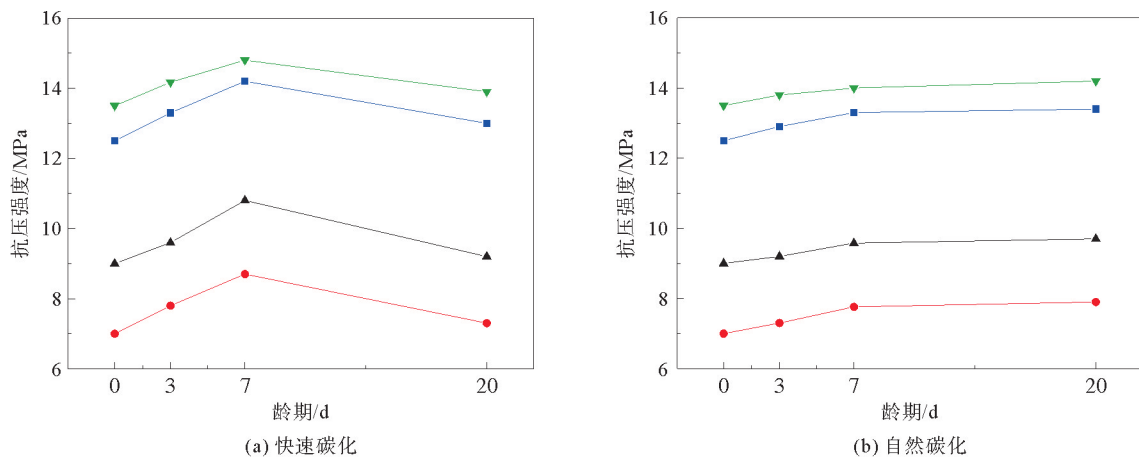


图 2 碳化方式对抗压强度的影响
 —●— A-1; —■— B-1; —▲— A-2; —▼— B-2

对于同一组配合比,相较于自然碳化,快速碳化的固废生态混凝土 3 d 抗压强度增加 2.50%~6.50%,快速碳化 7 d 的增加 5.70%~12.70%。在碳化龄期 7 d 内快速碳化对固废生态混凝土抗压强度的提升效果优于自然碳化,主要是因为快速碳化 CO₂ 的浓度大且湿度也大,碳化反应更充分,生成较多的碳酸盐物质填充基体,大大提高了固废生态混凝土的强度;但是快速碳化 20 d 后固废生态混凝土抗压强度明显下降,是因为 Ca(OH)₂、C-S-H 等物质不断与 CO₂ 反应,生成过量低强度的碳酸盐物质,使混凝土

基体变得松散,因而导致固废生态混凝土抗压强度降低^[14-15],所以快速碳化要控制碳化时间,不易过长。

3.2 喷涂硅烷的影响

3.2.1 喷涂硅烷次数对固废生态混凝土碱度的影响

喷涂硅烷次数对固废生态混凝土碱度的影响如图3所示。硅烷喷涂1~3次后,固废生态混凝土碱度显著降低,在喷涂3次硅烷后碱度都在10左右,试件A-2在喷涂硅烷1、2、3次后的碱度分别下降至10.09、10.05、10.03,试件B-2在喷涂硅烷1、2、3次后的碱度分别下降至9.98、9.93、9.90。硅烷会在固废生态混凝土表面形成一层高分子聚合物薄膜,使混凝土产生憎水性,大幅度降低水分子和有害物质的渗透,同时这些高分子聚合物薄膜也将碱性物质封锁在水泥石中抑制碱的析出,从而降低固废生态混凝土的碱性^[9]。相较于前一次,固废生态混凝土的碱度在1次喷涂硅烷时降低0.67,在2次喷涂硅烷时降低0.05,而3次时仅降低了0.02,这表明喷涂2次硅烷后,混凝土孔隙已经被硅烷形成的保护膜封锁,再增加硅烷喷涂次数对固废生态混凝土的降碱效果没有显著影响。

3.2.2 喷涂硅烷次数对固废生态混凝土抗压强度的影响

喷涂硅烷次数对固废生态混凝土抗压强度的影响如图4所示。固废生态混凝土的抗压强度在喷涂硅烷后小幅增加,并且随着喷涂次数的增加,混凝土的抗压强度缓慢上升,试件B-1在喷涂硅烷1、2、3次后的抗压强度分别提高了1.60%、3.20%、4.00%,试件A-2在喷涂硅烷1、2、3次后的抗压强度分别提高了2.20%、3.30%、6.67%。这是因为硅烷分子进入混凝土的孔隙中,与水分子、游离碱物质发生化学反应,聚合形成网状的高分子羟基团和枝蔓状晶体物质,这些物质堆积固化在混凝土孔隙内,密实了混凝土胶结层的孔隙结构^[16]。

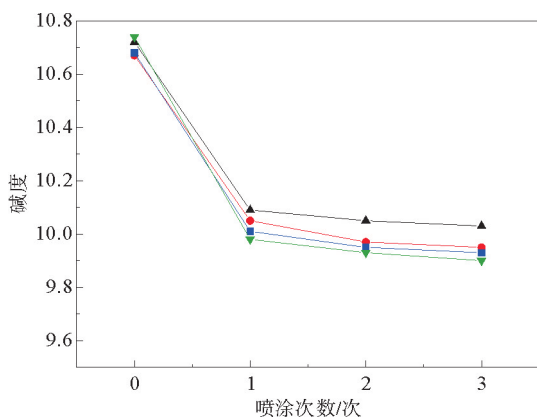


图3 喷涂硅烷次数对碱度的影响
—●— A-1; —■— B-1; —▲— A-2; —▼— B-2

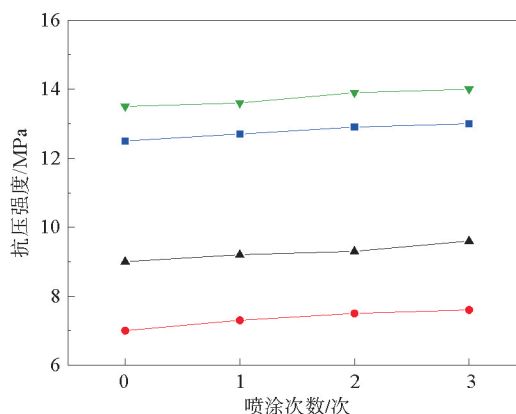


图4 喷涂硅烷次数对抗压强度的影响
—●— A-1; —■— B-1; —▲— A-2; —▼— B-2

3.3 碳化与喷涂硅烷复合技术的影响

使用工业固废材料改变胶凝材料组分制备的固废生态混凝土,虽然可以降低生产成本和能耗,但是对混凝土的降碱效果并不显著。采取快速碳化和喷涂硅烷的方法对固废生态混凝土进行降碱,快速碳化的降碱原理为消耗混凝土中碱性物质,喷涂硅烷的降碱原理为隔绝混凝土中碱性物质析出,二者对生态混凝土的抗压强度均有提高作用。结合二者降碱技术的优势,养护28 d后对固废生态混凝土快速碳化7 d,再喷涂2次硅烷,然后对其进行抗压强度和碱度测试。由表6可知复合技术降碱后固废生态混凝土的碱度

表6 复合技术降碱后固废生态混凝土的抗压强度与碱度

编号	碱度				强度/MPa			
	养护28 d	快速碳化7 d	喷涂硅烷1次	喷涂硅烷2次	养护28 d	快速碳化7 d	喷涂硅烷1次	喷涂硅烷2次
A-1	10.67	9.98	9.36	9.28	7.00	8.70	9.00	9.20
B-1	10.68	10.02	9.34	9.29	12.50	14.20	14.40	14.70
A-2	10.72	10.02	9.39	9.32	9.00	10.80	11.00	11.20
B-2	10.74	10.09	9.36	9.33	13.50	14.80	14.90	15.10

都在 9.3 左右,适宜植物生长;抗压强度均有所增加,试件 A-1、B-1、A-2 和 B-2 的抗压强度相较于标准养护条件下分别增加了 31.4%、17.6%、24.4%和 11.9%。

3.4 植生试验

选取 A-2 配合比制作 300 mm×300 mm×80 mm 的混凝土板,通过先快速碳化 7 d 后喷涂 2 次硅烷的方法进行降碱处理。将营养液和土覆盖在混凝土板上,选取高羊茅草草种进行植生试验,试验采取上置式种植方式。植生情况如图 5 所示,经测量,高羊茅草在播种 3 d 后发芽,种植 7、14、28、65、90 d 时植株的平均高度分别达 10.1、11.0、12.3、13.6、14.2 cm。由此可见,高羊茅草可在降碱处理后的固废生态混凝土上茁壮生长,实现了固废生态混凝土的植生性能。

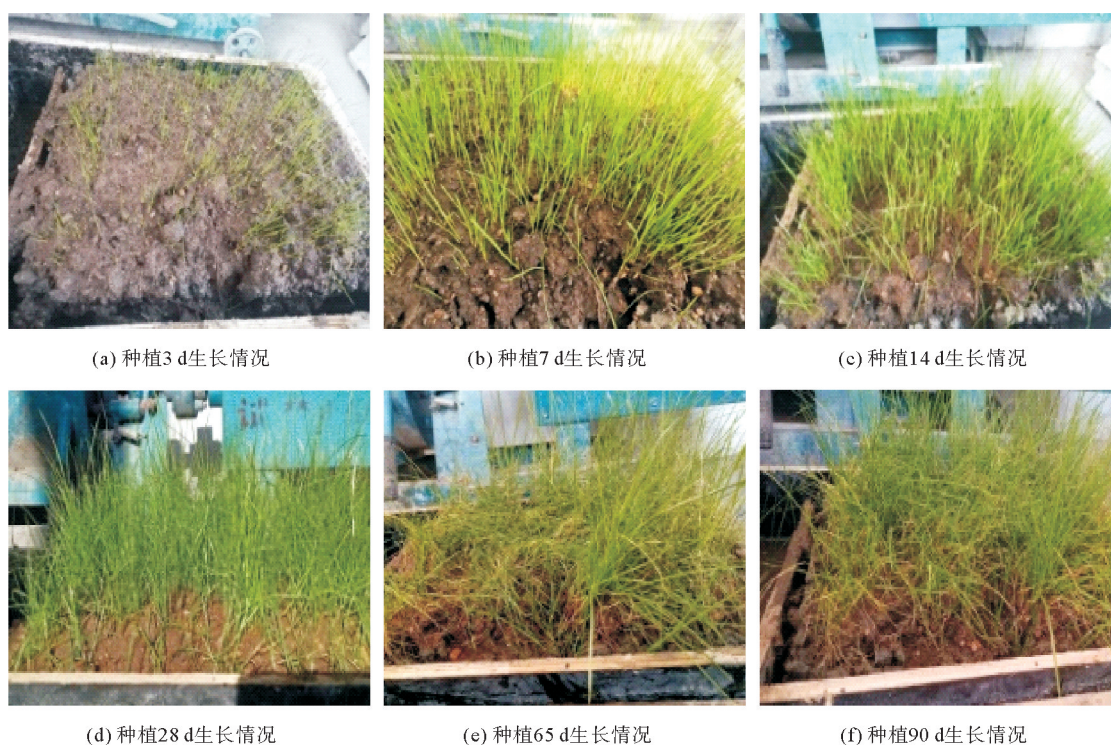


图 5 不同时间植生效果

4 结论

1) 碳化可以降低固废生态混凝土的碱度,快速碳化降碱效果优于自然碳化,快速碳化 7 d 后其碱度降低至 10 左右,并可提高抗压强度。

2) 喷涂硅烷可以降低固废生态混凝土的碱度,喷涂 2 次硅烷,碱度下降至 10 左右,并可小幅度提高混凝土抗压强度。

3) 固废生态混凝土快速碳化 7 d 后再喷涂 2 次硅烷,其碱度降至 9.3 左右,抗压强度提高 10%~30%。在降碱处理后的固废生态混凝土上进行播种,植物生长旺盛,90 d 后高羊茅草长度可达 14.2 cm,实现了固废生态混凝土的植生性能。

参考文献(References):

- [1] 吴元梅,郭凯先,贾海峰. 生态混凝土在海绵城市中的应用及其特性试验设计[J]. 混凝土,2018(7):122-125.
WU Yuanmei, GUO Kaixian, JIA Haifeng. Application of ecological concrete in sponge city construction and its characteristic experiment design[J]. Concrete, 2018(7):122-125.
- [2] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建[Z]. 北京:中国建筑工业出版社,2014:2-7.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Sponge city construction technical guide: Low impact development stormwater

- system construction[Z]. Beijing:China Architecture & Building Press,2014;2-7.
- [3] 李霞晨.生态混凝土材料的应用实践研究论述[J].施工技术,2016,45(S2):551-553.
LI Xiachen. Application of ecological concrete material[J]. Construction Technology,2016,45(S2):551-553.
- [4] 廖文宇,石宪,黄泽峰,等.植生混凝土的降碱技术及种植效果研究[J].混凝土,2013(7):155-158.
LIAO Wenyu,SHI Xian,HUANG Zefeng,et al. Study on decreasing alkalinity of planting concrete and the resulting planting effect[J]. Concrete,2013(7):155-158.
- [5] 张雷,郭利杰,李文臣.矿物掺合料对水泥孔溶液碱度和强度影响及机理研究[J].中国矿业,2020,29(9):141-146.
ZHANG Lei,GUO Lijie,LI Wenchen. Effect of mineral admixtures on alkalinity and strength of cement pore solution and its mechanism[J]. China Mining Magazine,2020,29(9):141-146.
- [6] 高婷,尹健,桑正辉,等.绿色生态混凝土降碱试验研究[J].建筑技术,2017,48(1):10-12.
GAO Ting,YIN Jian,SANG Zhenghui,et al. Research on decreasing alkalinity of green ecological concrete[J]. Architecture Technology,2017,48(1):10-12.
- [7] 王凤池,孙畅,丁向群,等.植生再生混凝土降碱技术及其对抗压强度的影响[J].混凝土,2020(3):160-163.
WANG Fengchi,SUN Chang,DING Xiangqun,et al. Alkalinity reduce technology of plant-growing recycled concrete and the effect of compressive strength[J]. Concrete,2020(3):160-163.
- [8] 唐瑞.植生混凝土的制备及其河道护坡性能的研究[D].绵阳:西南科技大学,2018.
TANG Rui. Preparation of eco-concrete and research on its performance of river slope protection[D]. Mianyang:Southwest University of Science and Technology,2018.
- [9] 王志鹏,张伟锋,韦未,等.硅烷浸渍对大孔隙生态混凝土的降碱效果研究[J].混凝土,2019(3):157-160.
WANG Zhipeng,ZHANG Weifeng,WEI Wei,et al. Study on the effect of silane soakage technique on the alkali reduction of macroporous ecological concrete[J]. Concrete,2019(3):157-160.
- [10] 李晟,尹健,张贵,等.绿色生态混凝土碳化降碱技术研究[J].湘潭大学自然科学学报,2017,39(2):33-37.
LI Sheng,YIN Jian,ZHANG Gui,et al. Research on alkalinity reduction of green eco-concrete by carbonization[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University,2017,39(2):33-37.
- [11] 郭英楠.大气二氧化碳浓度达历史顶点[J].生态经济,2019,35(7):5-8.
GUO Yingnan. The concentration of carbon dioxide in the atmosphere is at an all-time high[J]. Ecological Economy,2019,35(7):5-8.
- [12] 赵冰华,费正岳,赵宇,等.碳化对混凝土性能的影响[J].硅酸盐通报,2012,31(6):1641-1644.
ZHAO Binghua,FEI Zhengyue,ZHAO Yu,et al. Effect of carbonation on the performance of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2012,31(6):1641-1644.
- [13] 谢东升.高性能混凝土碳化特性及相关性能的研究[D].南京:河海大学,2005.
XIE Dongsheng. Study on the high performance concrete carbonization and correlative capability[D]. Nanjing:Hohai University,2005.
- [14] 邓方园,于宝国,张鸿涛,等.基于净浆浸泡法的植生混凝土降碱处理试验研究[J].施工技术(中英文),2021,50(15):83-86.
DENG Fangyuan,YU Baoguo,ZHANG Hongtao,et al. Experimental study on alkali reducing treatment of planting concrete based on pure slurry soaking method[J]. Construction Technology,2021,50(15):83-86.
- [15] 刘星伟,李秋义,李艳美,等.再生细骨料混凝土碳化性能的试验研究[J].青岛理工大学学报,2009,30(4):159-161.
LIU Xingwei,LI Qiuyi,LI Yanmei,et al. The experimental study on the carbonation of the recycled fine aggregate concrete[J]. Journal of Qingdao Technological University,2009,30(4):159-161.
- [16] 谭思琪.植生混凝土降碱技术及植物适生性研究[D].广州:广州大学,2020.
TAN Siqi. Study on the technology of reducing alkali in planting concrete and the adaptability of plants[D]. Guangzhou:Guangzhou University,2020.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)