

再生骨料碳化改性机理及固碳效果研究*

Study on Carbonization Modification Mechanism and Carbon Fixation Effect of Recycled Aggregate

迟令军¹, 蔡迎春², 乔宝磊¹, 张少波¹, 崔浩^{2,3}

(1. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州, 450016; 2. 郑州大学 水利与土木工程学院, 河南 郑州, 450001;
3. 河南省公路工程局集团有限公司, 河南 郑州, 450052)

摘要: 为分析再生骨料碳化改性性能及固碳问题, 采用正交试验法对粉煤灰掺量、再生骨料取代率及水胶比等因素对再生混凝土抗碳化性能进行研究, 分析再生骨料取代率的合理利用以提高再生混凝土抗碳化能力。结果表明: 再生骨料取代率、水胶比、粉煤灰掺量的增加会加大再生混凝土的碳化深度, 且水胶比对碳化深度的影响最大; 水胶比取 0.5、粉煤灰掺量取 10%、再生骨料取代率取 25% 时, 再生混凝土抗碳化能力最强。提高再生骨料的固碳效率, 要合理选择摊铺方式, 以确保固碳效果。

关键词: 再生骨料; 抗碳化性能; 固碳效果

中图分类号: TU528.041

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249(2024)06-0024-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.005

CHI Lingjun¹, CAI Yingchun², QIAO Baolei¹, ZHANG Shaobo¹, CUI Hao^{2,3}

(1. China Construction Seventh Engineering Division. Corp., Ltd., Zhengzhou 450016, China; 2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
3. Henan Province Highway Engineering Bureau Group Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In order to analyze the performance of carbonization modification of recycled aggregate and the problem of carbon fixation. The anti-carbonation performance of recycled concrete was studied by using orthogonal test method, including fly ash content, recycled aggregate replacement ratio and water-binder ratio, the reasonable utilization of the replacement ratio of recycled aggregate is analyzed to improve the carbonation resistance of recycled concrete. The results show that the carbonation depth of recycled concrete increases with the increase of the replacement ratio of recycled aggregate, the water-binder ratio and the content of fly ash, and the water-binder ratio has the greatest influence on the carbonation depth. When the ratio of water to binder is 0.5, the content of fly ash is 10%, and the replacement ratio of recycled aggregate is 25%, the anti-carbonation ability of recycled concrete is the best. In order to improve the carbon fixation efficiency of recycled aggregate, we should choose reasonable spreading ways to ensure the carbon fixation effect.

Keywords: recycled aggregate; carbonization resistance; carbon fixation effect

0 引言

随着城镇化进程的不断推进, 公路固体废弃物特别是废弃混凝土的排量和存量不断增加, 现有公路固体废弃物的存量已达到数百亿吨, 其中公路废弃混凝土达到 50% 左右。如何处理和利用废弃混凝土

* 基金项目: 2021 河南省科技攻关项目 (212102310289)。

作者简介: 迟令军 (1988—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 道路桥梁。

通信作者: 崔浩 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 道路桥梁耐久性 & 结构抗震、固废材料二次利用等。

收稿日期: 2023-06-17

土已成为学者们关注的焦点问题。有学者提出将废弃混凝土作为砂石用于公路中,这样不但快速消纳固体废弃物,也在一定程度上解决砂石短缺问题,实现资源节约和绿色发展。然而,废弃混凝土再生品存在吸水率过高和品质波动大等问题,无法直接用于公路工程。因此,需要采取多因素优化及综合措施,解决再生混凝土吸水率过高和品质波动大的问题。

废弃混凝土再生骨料上会残余部分水泥固体,破碎过程也会形成微裂缝,与天然骨料相比其孔隙率和吸水率会更高,进而降低混凝土的力学性能和耐久性^[1-3]。有文献^[4-6]显示,碳化处理后的再生骨料碳化物能够提升水泥浆体的固相总体积,修补微裂缝,填充空隙,强化再生骨料基体,其力学性能及物理性能得到提升。杨海涛等^[7]、刘琼等^[8]、黄威武^[9]对再生粗骨料碳化处理后测定其吸水率、表观密度及压碎指标,认为增加碳化时间,再生粗骨料吸水率、压碎指标会下降,表观密度会增强。欧阳余辉^[10]采用高压二氧化碳气体对建筑再生细骨料进行碳化处理,研究不同压强、不同碳化时间下再生细骨料的性能,认为碳化处理可以增强砂浆的抗压强度和流动性能,干燥收缩变形及吸水率随之下降,再生细骨料的取代率为25%时最佳;增加碳化时间及压强后,碳化处理对再生砂浆性能的改善度降低。李海朝^[11]分析了碳化改性时间、温度、湿度、气压、二氧化碳浓度、再生骨料掺量等对混凝土再生骨料吸水率、坚固性、压碎值、表观密度的作用,认为碳化温度60℃、湿度60%且再生骨料掺量在3.3%~3.6%之间时,碳化改性耦合效应最佳,再生骨料成本系数与功能系数均较高。刘昂等^[12]采用纳米SiO₂和加速碳化方式对混凝土再生粗骨料进行改性,认为延长硫酸盐侵蚀时间,再生粗骨料混凝土的动弹性模量会逐渐减小。无论是侵蚀前还是侵蚀后,再生粗骨料混凝土的动弹性模量都呈现出随废弃混凝土粗骨料取代率增加而减小的趋势。这表明,长时间的硫酸盐侵蚀会进一步削弱混凝土的刚性,使其在受力时更容易发生变形。而在硫酸盐侵蚀的作用下,再生粗骨料混凝土的抗压强度也会受到影响。因为随着废弃混凝土粗骨料取代率的提高,混凝土立方体的抗压强

度逐渐降低。尽管适量的硫酸盐侵蚀在短期内可能会对混凝土立方体的抗压强度有一定的促进作用,但长期的侵蚀会导致抗压强度显著下降。刘赞等^[13]研究认为,废弃水泥类再生骨料的钙含量和孔隙率都较高,且强度低,利用吸收大气中的二氧化碳实现碳固定,若以此制备成碳捕集材料则能够提高废弃混凝土资源化利用率和降低碳排放。钱如胜等^[14]提出固碳强化能够降低混凝土再生骨料界面的过渡区宽度,增强砂浆硬度,降低再生骨料孔隙率。肖前慧等^[15]研究发现,增加再生粗骨料的取代率,再生混凝土抗碳化能力随之降低。吴波等^[16]研究显示,对再生骨料进行碳化反应能够提升再生骨料性能,且二氧化碳也较为固定。研究再生骨料的碳化改性问题对建筑固体废弃物的再生利用及碳排放的减排都具有重要现实意义^[17-18]。但目前的研究主要是再生骨料的碳化改性,探讨再生骨料的抗碳化性能及碳减排性的研究也多基于单因素影响的研究,很少基于多因素共同影响下再生骨料抗碳化性能的研究,对于再生骨料的固碳问题更少有研究,为此,通过正交试验测定再生骨料取代率、水胶比及粉煤灰掺量等组合下各试件的碳化深度,了解其抗碳化性的内在机理,确定其最佳配比组合及再生骨料固碳计算问题,为废弃混凝土再生骨料的再利用和碳减排等提供参考。

1 抗碳化试验

1.1 试验材料

水泥为P·O 42.5硅酸盐水泥;再生骨料为废弃混凝土再生骨料,所用产品均满足国家相关标准,生产工艺依据相关规范标准进行。对再生骨料进行预吸水处理,确保其表面干燥。再生骨料物理指标:吸水率为3.84%,压碎指标为11.4%,表观密度为2 615 kg/m³,粒径为6.0~31.5 mm。天然骨料为碎石;级配与再生骨料相同。以天然砂为细骨料,且符合相关规范标准。水为自来水,高效减水剂的减水率是15%。

1.2 正交试验

正交试验以再生骨料的取代率、水胶比和粉煤灰掺量作为影响因素,正交试验原料配比见表1。

材料科学

表 1 正交试验配比表

Table 1 Orthogonal test mix table

试件编号	A (水胶比)	B (再生骨料取代率/%)	C (粉煤灰掺量/%)
1	0.5	25	10
2	0.5	50	20
3	0.5	75	30
4	0.6	25	10
5	0.6	50	20
6	0.6	75	30
7	0.7	25	10
8	0.7	50	20
9	0.7	75	30

表 2 各碳化处理龄期再生骨料碳化深度

Table 2 Carbonation depth of recycled aggregate at different carbonation treatment ages

试件编号	碳化深度/mm			
	3 d	7 d	14 d	28 d
1	7.40	9.11	9.97	11.24
2	8.81	10.02	11.11	11.32
3	9.82	11.23	12.21	13.81
4	10.59	12.05	13.07	14.10
5	10.20	11.39	13.82	16.09
6	11.14	11.96	13.52	14.03
7	14.01	17.05	20.25	22.33
8	14.51	17.39	20.10	20.17
9	14.51	16.10	20.40	23.40

2 结果与分析

2.1 试验数据

9 组试件碳化处理时间分别是 3、7、14 及 28 d, 切割断面均喷酚酞酒精试剂, 碳化深度结果见表 2。

2.2 单因素下各龄期的碳化深度

2.2.1 再生骨料取代率的影响

由图 1 (a) 可知, 碳化深度随着再生骨料取代率增大而增加, 这是由于再生粗骨料孔隙率较天然骨料大, 增大再生骨料取代率, 再生混凝土孔隙率也随之变大, 导致其密实度下降, 加大碳化深度。但

再生骨料取代率在 25% 与 50% 时, 28 d 的碳化深度接近, 这是由于再生骨料表面存在一定的建筑固废基砂浆, 固废基砂浆增强了再生骨料的抗碳化能力, 从而使再生骨料的影响出现正、负两种现象, 取代率在 50% 时其正向影响接近负向影响, 造成碳化深度不断下降; 取代率在 75% 时负向影响比较大, 导致碳化深度不断增加。可见, 适当的取代率可以降低再生骨料的碳化深度, 过量取代则会加大碳化深度。选择再生骨料取代要考虑再生骨料再利用的应用条件、性能要求等, 综合考虑各种因素后再确定其比例。

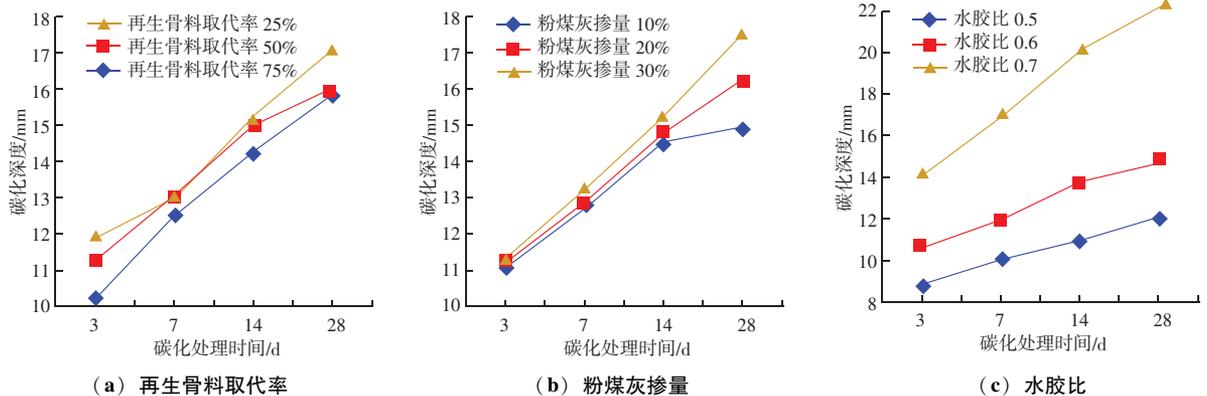


图 1 再生骨料取代率的试验配比

Fig. 1 The experimental ratio of regenerated aggregate replacement rate

2.2.2 不同掺量粉煤灰对再生骨料抗碳化性能的影响

由图 1 (b) 可知, 粉煤灰掺量为 10% 时, 再生混凝土中含有大量胶凝材料, 强度和密实性较高, 抗碳化性能与抗渗性能力均相对较高, 碳化深度为最小。增加粉煤灰掺量, 再生混凝土中胶凝材料的含量、强度及密实性均随之下降低, 抗碳化性能降低, 碳化深度增加。增加碳化处理龄期碳化速率也随之

下降。粉煤灰参与再生混凝土中的化学反应, 填充再生骨料空隙与毛细孔, 降低混凝土可碳化物质, 有效阻止二氧化碳等气体渗透, 增强再生混凝土的抗碳化能力。

2.2.3 不同水胶比对再生骨料抗碳化性能的影响

由图 1 (c) 可知, 再生混凝土碳化深度同水胶比间呈正相关性, 各龄期的碳化深度变化趋于相同。

水胶比对再生混凝土空隙结构的影响比较大, 增加水胶比后, 再生混凝土空隙率也随之加大, 二氧化碳的扩散系数也就越大, 加速碳化速度, 再生混凝土的碳化深度随之变大。水胶比达到 0.7 后, 再生混凝土碳化深度显著大于其他水胶比的增加幅度。不过, 水胶比过大或过小均会造成负向影响。在工程应用中要综合考虑各种因素再确定水胶比用量。

2.3 碳化深度的极差变化

由表 3 可知, 再生骨料取代率、水胶比、粉煤灰掺量三种因素的极差中, 水胶比极差值最大, 水胶比对再生混凝土抗碳化性能的影响最大。在快速碳化处理 3~6 d 龄期内, 再生骨料的材料可能还没有完全分解, 残留的有机物质较多, 再生骨料取代率对碳化性能的影响大于粉煤灰掺量的影响, 在 7~28 d 常规龄期内, 碳化过程则渗透到骨料内部形成彻

表 3 再生骨料碳化深度

Table 3 Carbonization depth of recycled aggregate /mm

碳化时间/d	分析指标	A	B	C	
3	E_1	26.01	31.98	33.02	
	E_2	32.00	34.35	34.68	
	E_3	42.99	35.39	33.97	
	e_1	8.70	10.71	11.03	
	e_2	10.74	11.22	11.31	
	e_3	14.29	11.76	11.30	
	R	5.70	1.17	0.36	
	7	E_1	30.28	38.21	38.47
		E_2	35.39	38.79	38.15
E_3		50.57	39.33	39.72	
e_1		10.08	12.75	12.89	
e_2		19.10	20.61	20.72	
e_3		17.39	20.08	20.20	
R		11.78	12.89	12.67	
14		E_1	33.28	43.30	43.62
		E_2	40.37	45.01	44.60
	E_3	60.77	46.11	46.31	
	e_1	11.08	14.39	14.56	
	e_2	13.50	15.00	14.83	
	e_3	20.22	15.40	15.47	
	R	9.20	0.97	0.91	
	28	E_1	36.28	47.60	45.41
		E_2	44.19	47.60	48.81
E_3		65.82	51.19	52.19	
e_1		12.07	15.90	15.11	
e_2		14.72	15.88	16.28	
e_3		21.98	17.04	17.37	
R		9.90	1.19	2.31	

注: E_1 、 E_2 、 E_3 为试验结果之和, e_1 、 e_2 、 e_3 为试验结果算术均值, R 为水胶比、取代率、粉煤灰掺量的均值极差。

底的碳化反应, 碳化产品更加纯净, 粉煤灰掺量对混凝土的强度影响相对较小, 但粉煤灰掺量为 25% 时, 28 d 强度最高。且增加龄期后, 其影响作用发生改变。再生骨料取代率为 25% 时, 7 d 龄期的碳化深度较 50%、75% 取代率时的碳化深度提高了 1.47% 与 2.81%; 取代率为 75% 时, 7 d 龄期的碳化速度提升速率比较小, 取代率为 25%、50% 时的提升速率却很大。因此, 7 d 龄期再生骨料的碳化深度极差处于下降状态。

在快速碳化处理的 28 d 内, 再生骨料碳化效果接近自然环境下碳化 50 年的效果, 所以, 以 50 年为设计年限时可以满足建筑物的耐久性要求。即水胶比对再生混凝土抗碳化性能的影响最大, 其次为粉煤灰掺量, 最后是取代率。当水胶比为 0.5 时再生混凝土的抗碳化性能最强, 当粉煤灰掺量为 10% 且再生骨料取代率为 25% 时, 其抗碳化能力最强。

快速碳化处理的时间可以根据具体技术和应用需求而变化, 7、14 与 28 d 的碳化效果在纯度、残留物和应用性能上可能存在显著差异。因此, 在再生骨料混凝土中, 需要根据具体情况合理确定粉煤灰的掺量, 以优化混凝土的综合性能。

3 再生混凝土算例分析

上述试验分析明确了再生骨料取代率、水胶化的影响、粉煤灰掺量、龄期等对再生骨料碳化深度的影响, 以及合理的配比设计对再生骨料抗碳化性能的强度增长, 这为分析再生骨料的固碳问题奠定了基础。为此, 以算例方式研究混凝土废料再利用时期的固碳量, 以确定其存放方式和固碳措施。在混凝土废料的再利用时期, 再生骨料的固碳反应表现为附着部分、未碳化砂浆构件的内部等。参照王佃超等^[19]研究, 假定混凝土构件中含有再生砂浆, 且未碳化的旧砂浆与再生砂浆体积比为 α_{mmf} , 单位体积内水泥用量、砂浆和混凝土碳化系数等分别是 C_R 、 k_{Rm} 、 k_{Rc} ; 碳化深度是 d_R , 而再生混凝土及其表面砂浆接触二氧化碳的面积与碳化深度则以 $A_{Rm}(d_R(\tau))$ 、 $A_{Rc}(d_R(\tau))$ 表示, 完全碳化时间是 t_{Rm} , 固碳量计算公式为:

材料科学

$$S_{\text{CO}_2} = \begin{cases} \xi_c \alpha_c C_R \alpha_{\text{mmf}} k_{\text{Rm}} \int_0^t d(A_{\text{Rm}}(d_R(\tau)) \sqrt{\tau}), t \leq t_{\text{Rm}} \\ S_{\text{Rm}} + \xi_c \alpha_c C_R \alpha_{\text{mc}} k_{\text{Rc}} \int_{t_{\text{m}}}^t d(A_{\text{Rc}}(d_R(\tau)) \sqrt{\tau}), t > t_{\text{Rm}} \end{cases} \quad (1)$$

式中： S_{Rm} 是完全碳化时的吸碳量； A_{Rm} 是一种利用信息技术和数据分析系统。选 C30 选混凝土剪力墙进行分析，按照相关规范标准及要求，假设剪力墙平均厚度 240 mm，完全暴露在室内、室外，剪力墙表面涂抹 20 mm 厚的抹灰层，且抹灰层室外的碳化系数是 10.2 mm/ $\sqrt{\text{年}}$ ，室内抹灰层的碳化系数设定 24.1 mm/ $\sqrt{\text{年}}$ ，假设剪力墙的混凝土服役寿命是 30 年，计算算例所涉的有关参数值。通过式 (1) 计算剪力墙水泥砂浆需要 0.7 (室外) 年、3.6 (室内) 年才能全部碳化，30 年的服役期后，其相应的碳化深度分别是 40.9 和 13.39 mm。

将拆除剪力墙后的骨料按照粒径范围 (堆放，计算固碳时粒径范围相同的料堆通过平均粒径去核算)。假设拆除剪力墙后骨料平均粒径分别为 2.4 (0 ~ 5 mm)、7.2 (5 ~ 10 mm)、15 (10 ~ 20 mm)、24 mm (20 ~ 30 mm)，室外无遮挡暴露，各参数取值见表 4。

表 4 不同粒径再生骨料二氧化碳的固碳参数值
Table 4 Parameters of carbon dioxide fixation of recycled aggregate with different particle sizes

参数	<5mm	5 ~ <10mm	10 ~ <20mm	20 ~ <30mm
ξ_c	0.4	0.4	0.4	0.4
$\theta/(\circ)$	34	34	34	34
$k(\text{mm}/\sqrt{\text{年}})$	2.3	2.3	2.3	2.3
D/m	17.2	17.2	17.2	17.2
$\rho_d(\text{kg}/\text{m}^3)$	969	1 250	1 269	1 298
d_a/mm	2.4	7.3	14.7	24.5
a_c	0.73	0.73	0.73	0.73
d/mm	16	31	59	88
H/m	4.8	4.8	4.8	4.8
$V_d/(\text{m}^3)$	2.39	4.78	9.60	14.32
$C_c/(\text{kg}/\text{m}^3)$	348	348	348	348
$\rho_c/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 397	2 397	2 397	2 397
最大二氧化碳 固定量/kg	14 170	18 202	18 527	18 970
n_a	1.20×10^8	1.12×10^7	2.85×10^6	9.42×10^5

采用固碳模型计算料堆的碳化体积开始阶段，料堆固碳现象明显，快速达到峰值。由于再生骨料的粒径会影响其固碳比以及达到最高固碳比所需的

处理时间。随着碳化时间延长后，碳化界面不断延伸到骨料内部，骨料中能够碳化的表面积下降，再生骨料碳化的深度、体积等增速放缓放慢，但减小粒径后碳化的体积减小率反而加大，再生骨料粒径在 5 mm 以内时碳化体积减小幅度最大，且 90 d 左右再生骨料的碳化体积会达到顶点，碳化反应停止。粒径在 5 ~ 10 mm 间时，碳化体积需要经过 23 年的碳化时间才能达到顶点。粒径在 10 mm 以上，再生骨料碳化体积达到顶点所需时间会更长。

依据碳化体积能够计算出各粒径下的固碳量，计算同料堆二氧化碳碳固量最大变化特征时，不同粒径的再生骨料会有不同的固碳比，堆料时间加大，固碳比提升后会慢慢稳定，即开始阶段快速加大，而堆料时间加大后则增幅变缓，一直到停止。骨料粒径与其固碳比成正比例关系，当粒径不足 5 mm，堆放 98 d 的固碳比是 0.9%，也是最大的固碳比。粒径在 5 ~ 10 mm 若要得到最大的固碳比需要堆放 2.3 年，此时固碳比是 1.8%。如果再生骨料的粒径为 20 ~ 30 mm，堆放 2 年其固碳比为 3.25%。所以，堆积放置废弃混凝土实现固碳吸收需要漫长的时间，固碳比也非常有限，需采取措施快速固碳。

4 固碳加速方式

再生骨料碳化处理不仅能够改善再生骨料的物理特性，还能减少公路垃圾的处理问题，促进资源的循环利用。再生骨料碳化的固碳加速方式，主要通过提高 CO_2 的浓度、增加碳化反应的速率、加适宜的温度 (20 ~ 40 $^\circ\text{C}$)、适当的气压在 1 ~ 3bar、骨料初始含水率在 25% ~ 75% 之间控制，以促进碳化反应的进行。

再生骨料的放置，通常采用堆积方式，这样堆料接触二氧化碳的面积变小，固碳比较小。而平铺放置则能增加接触二氧化碳的面积，设二氧化碳接触再生骨料的深度是 d ，按照相关文献^[17]构建平

铺放置中再生骨料碳化模型,表达式是:

$$S_{\text{CO}_2}(t) = \xi_c \alpha_c C_c V_c(t) \\ = \frac{\pi k \xi_c \alpha_c C_c V_0 \rho_d}{8 \nu_a \rho_c} \int_0^t \left(\frac{d_a^2}{\sqrt{\tau}} + 12k \sqrt{\tau} - 4kd_a \right) d\tau \quad (2)$$

式中:骨料堆积体积是 V_0 ,根据参数取值和固碳模型,计算平铺放置时的固碳比,相比不同堆积放置方式,平铺再生骨料能够增强其固碳比,经过特定的固碳强化处理后,其再生骨料固碳比最高可达76.9%。这一数据表明,再生骨料粒径的不同会导致再生骨料的表面积发生变化,从而影响因碳效率。测量普通环境下不同粒径再生骨料的碳化状态,验证模型分析固碳比所需时间,固碳过程中的温度和压力会影响二氧化碳的溶解度和反应速率,而再生骨料的初始含水率则直接影响碳化反应的进行。粒径的大小也会间接影响这些因素的效果,从而影响固碳比达到最高值所需的时间。由(式2)平铺放置再生骨料碳化模型验证结果显示,骨料初期碳化程度高于模型骨料碳化,因再生骨料在生产中已发生碳化,且骨料粒径越小,其初始碳化程度就越高。增加平铺放置时间后,模型预测再生骨料的碳化结果接近试验结果。

相较于与堆积方式,平铺放置方式要占用大量土地,粒径不同,占地面积也不同,粒径和占地面积的扩大量成负相关。如果粒径不足5 mm,其平铺堆放所占土地面积比堆放扩大790多倍,此方法不适合工厂化应用。

5 结语

(1) 降低水胶比能够提高再生混凝土抗碳化性能,增加水胶比,再生骨料的密实性下降,碳化深度加大,固碳性能下降。

(2) 再生骨料取代率的合理利用是提高再生混凝土抗碳化能力的关键,再生骨料取代率增加,再生混凝土密实性降低,而适度增加再生骨料取代率能够填充其空隙,增强混凝土密实性,抗碳化能力也随之提高。

(3) 粉煤灰掺量具有提高再生混凝土抗碳化能力的作用,增加掺量,混凝土密实性降低,适量增加掺量可以增强再生混凝土的抗碳化性。

(4) 水胶比、粉煤灰掺量、再生骨料取代率三种因素中,水胶比对再生骨料抗碳化性的影响最大。

(5) 再生骨料粒径不同,选择的放置方式也不同,且对应的固碳效率、固碳速率也不同,堆放的碳化时间相对长,固碳量极其有限,平铺放置则可改善其固碳效率,但所占用的土地面积相对大。应根据实际情况选择再生骨料堆积方式和水胶比、粉煤灰掺量及再生骨料的配比,以提高固碳效率和提高再生骨料的抗碳化性能。

(6) 碳化处理还能够改善再生混凝土新老砂浆界面的微观结构和固定大量空气中的 CO_2 ,这对于实现碳达峰和碳中和战略具有积极意义。

参 考 文 献

- [1] 蒲盛朋,孙毅,牟星明,等. 加压碳化再生混凝土粗骨料性能研究[J]. 重庆建筑, 2023, 22(2): 57-59.
- [2] 赵增丰,姚磊,肖建庄,等. 再生骨料 CO_2 碳化强化技术研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2296-2304.
- [3] 程雄飞,林忠财,任鹏飞. 混凝土及再生混凝土的二氧化碳养护概述[J]. 混凝土, 2020(7): 156-160.
- [4] 丁泽晨. 废弃混凝土原地再生利用及生物改性研究[D]. 南京:东南大学, 2020.
- [5] 张美香,丁亚红,杨小林,等. 纳米 SiO_2 复合碳化全再生骨料混凝土力学特性及强化机制[EB/OL]. 复合材料学报, [2024-05-23]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/20240523.html>.
- [6] 魏柯,孔爱散,詹培敏. 再生骨料混凝土碳化及固碳效率的研究进展[J]. 混凝土, 2023, (11): 165-169, 180.
- [7] 杨海涛,练鑫晟,柳苗,等. 混凝土全寿命周期固碳技术研究进展[EB/OL]. 材料导报, [2024-02-27]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/20240227.html>.
- [8] 刘琼,程安楠,肖建庄. 通过三步碳化强化再生透水混凝土的性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2023, 48(6): 1331-1339.
- [9] 黄威武. 碳化改性再生粗骨料及其与新砂浆界面性能试验研究[D]. 南昌:南昌大学, 2023.
- [10] 欧阳余辉. 碳化预处理再生细骨料聚苯颗粒混凝土性能研究[D]. 重庆:重庆科技学院, 2023.
- [11] 李海朝. 碳化改性对废弃混凝土再生骨料性能提升的耦合效应研究[D]. 常州:常州大学, 2023.
- [12] 刘昂,宫尧尧,高嵩,等. 碳化和纳米 SiO_2 改性再生粗骨料混凝土抗硫酸盐侵蚀性能[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 256-263.
- [13] 刘赞,曹万智,刘东升. 再生微粉碳捕集材料研究现状[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(7): 17-22.

材料科学

- [14] 钱如胜, 叶志波, 张云升, 等. 固碳强化再生粗骨料对其混凝土力学强度及体积稳定性的影响 [EB/OL]. 材料导报, [2024 - 07 - 16]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/20240716.html>.
- [15] 肖前慧, 郭欣怡, 邱继生, 等. 再生骨料掺量对混凝土碳化性能的影响 [J]. 西安科技大学学报, 2023, 43 (5): 972-979.
- [16] 吴波, 黄婷婷. 再生块体/骨料混凝土中不同界面的碳化性能及孔隙特征 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (7): 52-60.
- [17] 王玮, 高宝虎, 赵权, 等. 深圳地区模块化学校建筑的全生命周期碳排放研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (2): 132-136.
- [18] 赵怀轩, 张启志. 湿热-碳化下环氧树脂混凝土的抗碳化性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (1): 28-31.
- [19] 王佃超, 肖建庄, 夏冰, 等. 再生骨料碳化改性及其减碳贡献分析 [J]. 同济大学学报 (自然科学版) 2022 (11): 1610-1619.

(上接第 23 页)

砂流动度减小, 胶砂 1 和 3 d 的抗折、抗压强度逐渐降低, 28 d 的抗折、抗压强度均先增大后降低, 掺量为 6% 时强度最大, 28 d 抗折、抗压强度比分别为 1.049 和 1.014。

(2) 掺加 6% 降弹剂能够显著降低喷射混凝土的回弹率。胶凝材料总量为 430 kg/m^3 、胶集比约为 4.0、复掺 14% 粉煤灰和 6% 降弹剂试验组的综合回弹率最低, 仅为 8.09%。

(3) 掺加 6% 降弹剂能够促进喷射混凝土抗压强度的增长, 减小胶凝材料用量。

参 考 文 献

- [1] 王家赫, 谢永江, 冯仲伟, 等. 低回弹高早强喷射混凝土技术与工程应用 [J]. 混凝土与水泥制品, 2023 (2): 5-9.
- [2] 马召林. 铁路隧道喷射混凝土回弹率测试及优化 [J]. 低温建筑技术, 2019, 41 (1): 114-117.
- [3] 曾宪桃, 任振华, 王兴国. 磁化水降低喷射混凝土粉尘浓度与减少回弹的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (4): 705-712.
- [4] LEUNG C K Y, LAI R, LEE A Y F. Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition. Cement and Concrete Research, 2005, 35 (4): 788-795.
- [5] 张鹏. 基于正交试验混凝土湿喷回弹率的控制研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2014, 10 (9): 281-284.
- [6] 杨永民. 配合比参数对喷射混凝土回弹率的影响研究 [J]. 人民珠江, 2021, 42 (2): 57-60.
- [7] 张建. 公路隧道高性能湿喷混凝土配合比研究与应用 [J]. 公路交通技术, 2023, 39 (2): 152-158.
- [8] 张戈, 安明喆, 王月, 等. 隧道湿喷高性能喷射混凝土配合比试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2021 (12): 12-15, 28.
- [9] 黄天勇, 王栋民, 刘泽, 等. 湿式喷浆材料的选择及性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33 (3): 470-475.
- [10] 陈超, 孙振平. 灰灰对掺有无碱速凝剂水泥浆体性能的影响 [J]. 材料导报, 2019, 33 (14): 2348-2353.
- [11] ARMENGAUD J, CASAUX - GINESTET G, CYR M, et al. Characterization of fresh dry-mix shotcrete and correlation to rebound [J]. Construction and Building Materials, 2017, 135 (Mar. 15): 225-232.
- [12] 丁建彤, 吴勇, 雷英强. 纳米材料改善普通干湿喷射混凝土回弹率和强度现场工艺试验 [J]. 水力发电, 2017, 43 (9): 49-52.
- [13] 陈荣, 白远江, 郭雪微, 等. 无机纳米材料在地下厂房喷射混凝土中的应用 [J]. 人民长江, 2018, 49 (增刊 1): 269-272.
- [14] 聂荣辉, 李祖权, 田海龙. 纳米材料在隧道初支喷射混凝土中的试验研究 [J]. 广东土木与建筑, 2020, 27 (9): 84-86.
- [15] 魏子程, 王林, 贺鑫鑫, 等. 高强超微外加剂对喷射混凝土力学性能及回弹率的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (5): 82-86, 139.
- [16] 宁逢伟, 丁建彤, 白银, 等. 纳米级掺合料和粗合成纤维对湿喷混凝土回弹率的影响 [J]. 水利水运工程学报, 2019 (1): 42-49.
- [17] 李树繁, 李佳佳, 蒋鹤, 等. 矿物掺合料流变性能表征方法的适用性研究 [J]. 混凝土, 2021 (11): 104-107, 116.
- [18] 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法): GB/T 17671—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [19] 喷射混凝土应用技术规程: JGJ/T 372—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.