

文章编号:1007-9629(2024)10-0938-08

钢纤维增强碱矿渣再生混凝土的力学性能及碳排放评价

夏冬桃^{1,2}, 喻诗汀¹, 李彪^{1,*}, 王煜¹, 吴晨¹

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068;

2. 湖北工业大学 河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室, 湖北 武汉 430068)

摘要: 使用工业副产品矿渣和再生骨料制备碱矿渣再生混凝土(AARAC), 符合中国“双碳”和“可持续发展”战略目标的要求。通过 13 组试件的基本力学性能试验, 研究了再生骨料取代率和钢纤维掺量对 AARAC 基本力学性能的影响, 并从原材料端对其进行了碳排放评价。结果表明: 当再生骨料取代率为 75% 时, AARAC 的力学性能指标与普通水泥混凝土相当; 掺加钢纤维有效缓解了再生骨料对 AARAC 力学性能的负面影响; 当再生骨料取代率为 50%、钢纤维掺量为 0.5% 时, AARAC 的力学性能优良, 可持续性强; 基于本文及相关文献的试验数据, 建立了 AARAC 力学强度和弹性模量的计算公式, 计算结果与试验结果吻合良好。

关键词: 碱激发混凝土; 再生骨料; 钢纤维; 力学性能; 碳排放评价

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.10.009

Mechanical Properties and Carbon Emission Assessment of Steel Fiber Reinforced Alkali-Activated Slag Recycled Aggregate Concrete

XIA Dongtao^{1,2}, YU Shiting¹, LI Biao^{1,*}, WANG Yu¹, WU Chen¹

(1. School of Civil Engineering Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of River and Lake, Ministry of Education, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: It will conform to the development goals of “carbon peaking and carbon neutrality” and sustainability to reutilize industrial by-products such as slag and recycled aggregate (RA) to fabricate alkali-activated slag recycled aggregate concrete (AARAC). The effect of RA content and steel fiber volume fraction on the mechanical properties of AARAC were studied through 13 groups of basic mechanical property tests and the carbon emissions of raw materials in concrete were evaluated. The results show that the mechanical properties of AARAC with 75% RA content are comparable to those of ordinary Portland cement concrete. The negative effect of RA on the AARAC can be alleviated by the addition of steel fiber (SF). In addition, the AARAC with 50% RA and 0.5% SF has excellent mechanical and sustainability performance. Finally, given the effect of RA content and SF volume fraction, equations are developed to predict the mechanical strength and elastic modulus of AARAC, whose calculated values fit the tested values very well.

Key words: alkali-activated concrete; recycled aggregate; steel fiber; mechanical property; carbon emission assessment

收稿日期: 2024-01-26; 修订日期: 2024-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52308248)

第一作者: 夏冬桃 (1975—), 女, 湖北蕲春人, 湖北工业大学教授, 硕士生导师, 博士. E-mail: dtxia@hbut.edu.cn

通讯作者: 李彪 (1990—), 男, 河南南阳人, 湖北工业大学讲师, 硕士生导师, 博士. E-mail: libiao@hbut.edu.cn

用低碳排放的工业固废矿渣替代传统水泥以及用建筑废弃混凝土再生骨料(RA)取代天然骨料,发展碱矿渣再生混凝土(AARAC),可以大幅降低混凝土生产过程中的碳排放,实现建筑废弃物的循环利用,符合中国“双碳”和“可持续发展”战略目标的要求。相关研究结果表明,与普通水泥混凝土(OPC)相比,在相同水胶比条件下,碱矿渣混凝土(AAC)的早期强度更高^[1],骨料-基体界面过渡区的微观结构更致密^[2],力学性能和耐久性指标更好^[3]。此外,再生骨料表面的残余砂浆呈碱性,可以促进矿渣的水化反应,而RA中未水化水泥颗粒的再次水化使得界面过渡区更为致密^[4]。与相同强度等级的OPC相比,AARAC的碳排放量可降低50%以上^[5]。

然而,与OPC类似,AARAC的抗拉强度低,脆性较大,延性和韧性较差。为解决其固有缺点,在自密实碱矿渣基体中掺入钢纤维(SF),其劈裂抗拉强度和弯曲强度显著增强,且增强效果与SF掺量呈正相关^[6]。但也有研究表明,添加SF降低了AAC的抗压强度^[7]。综上,现有关于SF和RA对碱激发混凝土力学性能影响的结论并不一致,SF掺量和RA取代率对AAC力学性能的协同影响尚需进一步的研究。另外,还缺少对钢纤维增强碱矿渣再生混凝土

(SFRAARAC)的碳排放评价。

本文对13组试件进行了基本力学性能试验,建立了AARAC力学强度和弹性模量的计算公式。最后,采用生命周期评价(LCA)方法从原材料生产端对AARAC的碳排放进行了评价。

1 试验

1.1 原材料

选用武汉微神科技有限公司生产的S95磨细矿渣粉制备C40碱矿渣混凝土,水胶比(质量比,文中涉及的水胶比、减水率等除特别说明外均为质量比或质量分数)为0.42;采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥制备OPC试件作为对照组。细骨料为河砂,细度模数2.7;粗骨料采用连续级配天然碎石(NA)和由武汉某建筑拆除物加工所得的RA,其基本性能指标如表1所示。钢纤维为剪切波纹理型纤维,长度为32 mm,等效直径为0.65 mm,抗拉强度不低于1 200 MPa。减水剂采用减水率不低于28%的羧系高效减水剂。基于前期试配结果及文献[8]的结论,采用模数为2.25的水玻璃(SiO_2 和 Na_2O 的含量分别为29.99%和13.75%,波美度为50°Bé)与片状NaOH固体(纯度大于96%)混合配置目标模数为2.0的碱激发溶液,固定碱掺量为6%。

表1 粗骨料的物理性能指标
Table 1 Physical characteristics indexes of coarse aggregates

Type	Aggregate size/ mm	Bulk density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Water absorption (by mass)/%	Crushing value (by mass)/%	Specific gravity/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
NA	5-20	1 431	1.68	9.7	2 873
RA	5-20	1 366	5.85	15.3	2 655

SF掺量(体积分数)为0%、0.5%、1.0%和1.5%,RA取代率(R_A)为0%、25%、50%、75%和100%,试件的配合比见表2。其中,RA00、RA25、RA50、RA75、RA100表示再生骨料取代率分别为0%、25%、50%、75%、100%,SF00、SF05、SF10、SF15表示钢纤维掺量分别为0%、0.5%、1.0%、1.5%。每组配合比制备18个边长为100 mm的立方体试件,分别用于立方体抗压强度(f_{cu})和劈裂抗拉强度(f_{st})试验,3个100 mm×100 mm×300 mm棱柱体试件用于轴心受压强度(f_c)试验。塑料模标本在(20±5)℃、相对湿度65%的环境中保存24 h。脱模后将试件置于(20±2)℃、相对湿度大于95%的环境下养护至相应的龄期。

1.2 试验方法

采用ZKLJ-03型压力试验机测试试件的 f_{cu} 和 f_{st} ,采用MTS-411.31型电液伺服试验机测试试件的

f_c ;弹性模量(E_c)根据ASTM C1609/C1609M-12 *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete(Using Beam with Third-Point Loading)*,取自单轴受压应力-应变曲线上纵向应变 50×10^{-6} 和对应于峰值应力40%应变之间的割线模量。

2 结果与分析

2.1 抗压强度

2.1.1 立方体抗压强度

表3为试件的力学性能。由表3可知:

(1)试件RA00SF00的28 d立方体抗压强度可达65 MPa以上,相比试件OPC提高了38%;试件RA25SF00、RA50SF00、RA75SF00、RA100SF00的28 d立方体抗压强度分别为60.10、59.40、52.30、44.63 MPa,均满足强度设计值要求;试件RA50SF00

表 2 试件的配合比
Table 2 Mix proportions of specimens

Unit: kg/m³

Specimen	Cement	Slag	NA	RA	River sand	SF	Sodium silicate	Sodium hydroxide	Water	Water reducer
OPC	417.0	0	1 086.0	0	724.0	0	0	0	175.0	3.3
RA00SF00	0	417.0	1 086.0	0	724.0	0	161.8	3.6	84.0	3.3
RA25SF00	0	417.0	814.5	271.5	724.0	0	161.8	3.6	84.0	3.3
RA50SF00	0	417.0	543.0	543.0	724.0	0	161.8	3.6	84.0	3.3
RA75SF00	0	417.0	271.5	814.5	724.0	0	161.8	3.6	84.0	3.3
RA100SF00	0	417.0	0	1 086.0	724.0	0	161.8	3.6	84.0	3.3
RA50SF05	0	417.0	543.0	543.0	724.0	39.3	161.8	3.6	84.0	3.3
RA50SF10	0	417.0	543.0	543.0	724.0	78.5	161.8	3.6	84.0	3.3
RA50SF15	0	417.0	543.0	543.0	724.0	117.8	161.8	3.6	84.0	3.3
RA00SF10	0	417.0	1 086.0	0	724.0	78.5	161.8	3.6	84.0	3.3
RA25SF10	0	417.0	814.5	271.5	724.0	78.5	161.8	3.6	84.0	3.3
RA75SF10	0	417.0	271.5	814.5	724.0	78.5	161.8	3.6	84.0	3.3
RA100SF10	0	417.0	0	1 086.0	724.0	78.5	161.8	3.6	84.0	3.3

表 3 试件的力学性能
Table 3 Mechanical properties of specimens

Specimen	f_{cu}/MPa			f_c/MPa		f_{st}/MPa			E_c/GPa
	3 d	7 d	28 d	28 d		3 d	7 d	28 d	28 d
OPC	33.39	42.61	47.53	33.62		2.88	2.98	3.26	20.45
RA00SF00	57.33	59.64	65.50	45.23		3.79	4.05	4.57	21.08
RA25SF00	52.99	56.74	60.10	43.30		3.74	3.94	4.68	20.38
RA50SF00	50.89	53.82	59.40	44.60		3.39	3.71	4.56	19.54
RA75SF00	45.46	46.40	52.30	39.23		3.29	3.41	4.01	17.61
RA100SF00	32.4	41.99	44.63	27.28		2.73	3.07	3.92	12.00
RA50SF05	51.57	53.04	58.38	42.96		3.78	4.20	4.72	19.81
RA50SF10	53.30	54.44	61.05	45.03		3.98	4.42	4.91	20.36
RA50SF15	48.82	54.48	68.32	45.80		4.03	4.95	6.16	20.83
RA00SF10	59.78	61.48	75.78	39.64		4.40	4.86	5.23	21.44
RA25SF10	60.55	63.33	65.58	46.61		4.03	4.55	4.77	21.19
RA75SF10	47.94	54.25	56.75	44.16		3.90	4.23	4.28	18.66
RA100SF10	30.94	43.07	45.12	31.42		3.38	3.80	4.18	15.01

和RA75SF00的28 d立方体抗压强度与试件OPC相比分别提高了25%、10%,但试件RA100SF00的28 d立方体抗压强度略有下降.其原因主要在于:AAC的基体致密,具有少量小孔隙,AARAC中NA-基体的界面过渡区较为致密^[9];RA表面的碱性砂浆促进了矿渣水化反应,生成的水化硅酸钙(C-S-H)和水化硅铝酸钙(C-A-S-H)凝胶有助于填补RA表面的孔隙^[4];RA中未水化的水泥颗粒在碱性环境中再次水化,使得旧骨料界面过渡区更为致密^[4].

(2)AAC的28 d立方体抗压强度随着SF掺量的增加而增大,但其增长幅度有限.原因在于SF天然的亲水性,导致SF-基体界面处形成“水膜层”,SF表面

处的水胶比较基体略高,在水膜层中最先生成氢氧化钙(CH)和钙矾石(Aft).此时由于水胶比较高,水化反应充分,使得SF-基体界面处CH凝胶和低密度的C-S-H凝胶呈定向排列,阻止了C-S-H与SF的接触,使SF紧靠界面处的基体成为高孔隙率结构^[10].

(3)随着水化的进一步进行,CH的含量增加,基体内形成大量多孔疏松的弱结构,严重削弱了混凝土基体.试件RA00SF00、RA25SF00、RA50SF00、RA75SF00、RA100SF00掺加1.0%SF后的28 d立方体抗压强度分别增长了17%、9%、3%、8%、11%,这是由于SF的桥梁作用和高弹性模量,缓解了掺入RA对立方体抗压强度的负面影响.掺加SF

使试件 RA50SF10 的 3 d 抗压强度相较 RA50SF00 增加了 41%, 但试件 RA50SF10 的 28 d 抗压强度相较于 RA50SF00 仅增加了 3%, 表明 SF 的加入对 AARAC 早期强度的贡献较大。

2.1.2 轴心抗压强度

由表 3 可知: SFRAARAC 轴心抗压强度的变化规律与立方体抗压强度基本一致; 相较于试件 RA00SF00, 试件 RA25SF00、RA50SF00、RA75SF00、RA100SF00 的 28 d 轴心抗压强度分别下降了 4%、1%、13%、40%, 而掺入 1.0% SF 使其分别提高了 8%、1%、13%、15%。然而, 与试件 RA00SF00 相比, 试件 RA00SF10 的 28 d 轴心抗压强度下降, 这可能是由于骨料的“壁效应”, SF 会定向排列在粗骨料的表面和周围, 粗骨料周围的 SF 和砂浆包裹物引起更多的初始缺陷^[10]。SF 对 AARAC 轴心抗压强度的改善效果优于立方体抗压强度, 这主要由于轴心抗压强度试件破坏时两端受加载设备的约束较小, SF 更能发挥裂缝桥接作用, 从而提高了试件的轴向承压能力。

2.2 劈裂抗拉强度

由表 3 可知:

(1) 试件 RA75SF00 和 RA100SF00 的 28 d 劈裂抗拉强度相比试件 RA00SF00 分别下降了 12%、14%, 这是由于高 RA 取代率增大了基体中新旧界面的数量, 导致劈拉破坏的薄弱区增多。旧界面断裂能比新界面低, 在荷载作用下对高 RA 取代率的混凝土劈裂抗拉强度影响更大。但试件 RA100SF00 的 28 d 劈裂抗拉强度相比试件 OPC 提高了 20% 以上。

(2) 掺入 1.0% SF 使试件 RA00SF00、RA25SF00、RA50SF00、RA75SF00、RA100SF00 的 28 d 劈裂抗拉强度分别提高了 14%、2%、8%、7%、7%。这表明在劈拉作用下, 裂缝开展所需消耗的能量以及 RA 带来的不利影响, 可以通过 SF 的桥接作用和 NA 自身强度的抵抗来抵消。

(3) 试件 RA50SF05、RA50SF10、RA50SF15 的 28 d 劈裂抗拉强度相比试件 RA50SF00 分别提高了 4%、8%、35%。

2.3 弹性模量

由表 3 可知:

(1) 试件 RA00SF00 的弹性模量较试件 OPC 提高了 3%。矿渣在碱性环境中水化生成大量的 C-S-H 凝胶, 由于其优异的微观力学性能而具有较高的弹性模量^[11]。随着 RA 取代率的增大, 试件的弹性模量不断减小, 降幅为 3.33%~43.07%, 这是由于: 相比于 NA, RA 的弹性模量较低, 其内部存在较多初始微

缺陷和微孔洞, 降低了 AARAC 的整体弹性模量。掺加 1.0% 掺量的 SF, 使试件 RA25SF00、RA50SF00、RA75SF00、RA100SF00 的弹性模量分别提高了 4.00%、4.20%、6.00%、25.00%。随着 SF 掺量从 0.5% 增加至 1.5%, 试件 RA50SF05、RA50SF10、RA50SF15 的弹性模量相较于试件 RA50SF00 分别提高了 1.20%、4.00%、6.60%。

(2) 随着 SF 掺量的增加, AARAC 的弹性模量不断增大; 当 SF 掺量为 0.5% 时, 试件的弹性模量出现小幅度降低。这是由于: ①纤维数量有限, 其裂缝桥接作用难以抵消 SF 掺入带来的基体损伤所引起的性能下降; ②SF-基体是弱界面, 其显微硬度和弹性模量小于混凝土基体^[5]。综上, SF 的加入可缓解 RA 取代引起的 AARAC 弹性模量的下降。当 SF 掺量由 1.0% 增加至 1.5%, 纤维数量增加, 裂缝桥接能力增强, 但 SF 主要在混凝土塑性开裂阶段发挥作用, 而弹性模量在受压弹性阶段测定, 其增强效果有限, 增强幅度约为 10.00%。此外, 掺入 SF 会给基体带来更多的孔隙, 孔洞分布在 SF 周围, 降低了 SF 与基体的结合性能。

3 力学性能指标计算方法

3.1 抗压强度计算公式

采用线性回归方式, 结合文献[13]的试验数据进行拟合, 结果如式(1)所示。立方体抗压强度与轴心抗压强度呈良好线性关系, 拟合系数 R^2 为 0.99。由于 RA 取代率及 SF 掺量对 AAC 的抗压强度有显著影响, 故建议采用 SFRAARAC 试件与对照组试件 R00SF00 立方体抗压强度的比值作为影响指数(ζ_1)。考虑 RA 掺量和 SF 增强系数($R_1 = V_{SF} \times l_{SF} / d_{SF}$, V_{SF} 、 l_{SF} 和 d_{SF} 分别为钢纤维的体积分、长度和直径)^[14], 由于本文数据的有限性, 拓展结合文献[6, 14, 16-22]的数据拟合得到式(2), 拟合系数 R^2 为 0.72, 如图 1 所示。联立得到 SFRAARAC 的 f_{cu} 与 f_c 转换方程式(3)。

$$f_c = 0.69f_{cu} \quad (1)$$

$$\zeta_1 = 1 - 0.0026R_A + 0.297R_1 \quad (2)$$

$$f_c = 0.69f_{cu}(1 - 0.0026R_A + 0.297R_1) \quad (3)$$

3.2 劈裂抗拉强度计算公式

同理, 采用线性回归方式, 结合文献[13]的试验数据进行拟合, 结果如式(4)所示。考虑 RA 掺量和 SF 增强系数, 结合文献[6, 14, 16-17, 19, 22-23]的数据, 拟合得到劈裂抗拉强度影响指数(ζ_2), 见式(5)。拟合系数 $R^2 = 0.78$, 如图 2 所示。联立得到 SFRAARAC 的 f_{st} 和 f_{cu} 的转换方程式(6)。

$$f_{st} = 0.083f_{cu} \quad (4)$$

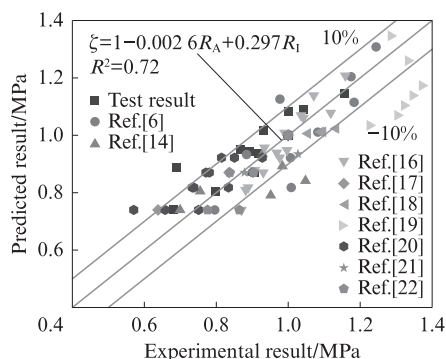


图1 轴心抗压强度实际值和预测值比较

Fig. 1 Comparisons between predicted results and test results of cubic compressive strength

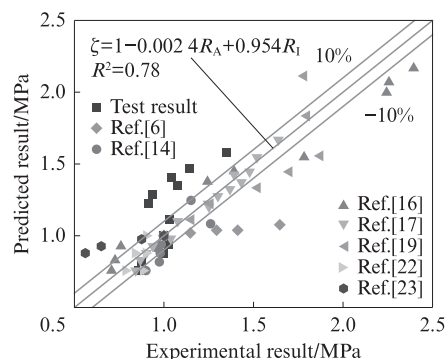


图2 立方体抗压强度实际值和预测值比较

Fig. 2 Comparisons between prediction and test results of splitting tensile strength

$$\zeta_2 = 1 - 0.002 4R_A + 0.954R_1 \quad (5)$$

$$f_{st} = 0.083f_{cu} (1 - 0.002 4R_A + 0.954R_1) \quad (6)$$

3.3 弹性模量计算公式

SFRAARAC作为一种新型建筑材料,其弹性模量的预测公式目前暂无规范可以参考.本文将试验结果与普通水泥混凝土、碱激发混凝土等相关规范和文献提出的计算方法^[22-27](如表4所示)进行对比分析,结果如图3所示.从图3中可以看出,现有计算式的预测值高于试验值,这是由于AAC的微观结构较

OPC更加复杂且致密,AAC的抗压强度比OPC更高,采用适用于低强度混凝土的弹性模量预测方程来推测AAC的弹性模量,结果偏大.而美国混凝土学会^[24-25]所提出的公式与本文试验测试结果具有相同趋势.因此,本文采用美国混凝土学会所建议的幂指数形式,考虑RA掺量和纤维增强指数建立预测方程式(7),拟合系数 R^2 为0.94.所提模型的预测结果与试验结果之比的平均值为1.04,变异系数为0.08%,预测结果良好.

表4 混凝土立方体抗压强度和弹性模量的关系

Table 4 Expressions between compressive strength and elastic modulus of concrete

Reference	Equation	Note
[22]	$E_c = \frac{10^5}{2.2 + 34.7/f_c}$	$15 \text{ MPa} \leq f_c \leq 80 \text{ MPa}$
[23]	$E_c = 4.24\sqrt{f_c} - 0.09R_A + 1.1\varphi(\text{SF})$	Alkali-activated slag concrete
[24]	$E_c = 4730\sqrt{f_c}$	Normal-strength concrete and $f_c \leq 40 \text{ MPa}$
[25]	$E_c = 3320\sqrt{f_c} + 6900$	$21 \text{ MPa} \leq f_c \leq 83 \text{ MPa}$
[26]	$E_c = 9979.4f_c^{0.33}$	$f_c \leq 80 \text{ MPa}$
[27]	$E_c = 5.5056 \times 0.75 \times \sqrt{f_c}$	Steel fiber-reinforced alkali-activated slag concrete

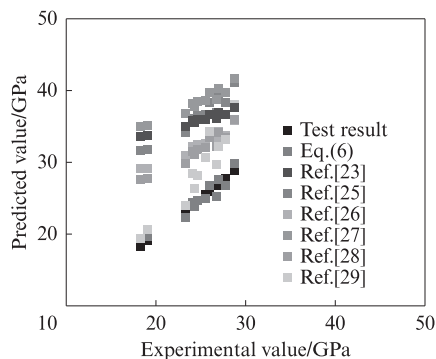


图3 弹性模量模型预测与试验结果对比

Fig. 3 Comparison between model predicted value and experimental value of elastic modulus

$$E_c = 3.26\sqrt{f_{cu}} + 0.372R_1 - 0.042R_A \quad (7)$$

综上,SFRAARAC的宏观力学及微观性能受到多种因素影响,建立弹性模量预测关系式并用于实践,还需进一步定量分析SFRAARAC的弹性模量预测关系式.

4 碳排放评估

4.1 碳排放分析

生命周期评价(LCA)是评价一种产品从“摇篮到坟墓”全过程总体环境影响的成熟手段.相关研究表明,混凝土原材料生产排出的碳排放量占混凝土

制造所排出碳排放量总量的 84%~93%^[28]. 本文基于 LCA 生命周期评价方法,采用 1 m³混凝土作为评估功能单元,考虑从“摇篮到大门”的系统阶段对 SFRAARAC 各配合比原材料端的碳排放量进行评估. 参考 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》和文献[29-30]总结的 SFRAARAC 各材料组分生产所引起的碳排放因子如表 5 所示,根据式(8)计算各试验组的碳排放量如表 6 所示. 当使用低价值废料作为原料时,可忽略其上游过程的碳排放. 当使用其他再生原料时,按照 GB/T 51366—2019 的要求,应按其所替代的初生原料碳排放的 50% 计算.

$$C_{sc} = \sum_{i=1}^n m_i F_i$$

(8)

式中: C_{sc} 为原材料生产阶段的碳排放量,kgCO₂-eq/m³; m_i 为第 i 种原材料的消耗量,kg/m³; F_i 为第 i 种原材料的碳排放因子,kgCO₂-eq/kg.

由表 6 可知,试件 OPC 的碳排放量为 310.709 5 kgCO₂-eq/m³,其中水泥生产所引起的碳排放占比为 98.64%. 同强度等级试件 RA00SF00 的碳排放量为 122.859 3 kgCO₂-eq/m³,其中碱激发剂的碳排放量占总排放量的 96.58%,相较试件 OPC 的碳排放量减少了 60.46%. 随着 RA 取代率的增加,AARAC 的碳排放量呈现下降趋势,但降幅不明显. 因此,靠 RA 取代天然骨料实现的碳排放量降低有

限. SFRAARAC 的碳排放量随着 SF 掺量的增加而增大,当 SF 掺量分别为 0.5%、1.0%、1.5% 时, SFRAARAC 的碳排放量分别增加 48.04%、96.08%、144.12%. 试件 RA00SF10 相比于试件 OPC 的碳排放量减少了大约 22.65%,在达到优异力学性能的同时,降低了混凝土材料生产阶段给环境带来的负面影响.

4.2 环境效益分析

添加 SF 可有效提高 AARAC 的力学性能,但其碳排放量也随之提高. 因此,考虑力学性能和碳排放量进行环境效益评估^[31],根据式(9)计算环境效益因子,结果如表 7 所示.

$$L_i = \frac{C_{sc}}{f_i}$$

(9)

式中: L_i (L_{cu} 、 L_{st} 、 L_c)分别为对应 f_i (f_{cu} 、 f_{st} 、 f_c)与碳排放量的环境效益因子.

由表 7 可见,从混凝土的力学性能和碳排放量两方面考虑,试件 RA50SF00 的环境效益因子较低,RA 的取代量不宜超过 50%. 由于 SF 生产阶段产生了大量的碳排放,环境效益因子随着 SF 掺量的增加不断增大. 试件 SFRAARAC 的环境效益因子均小于试件 OPC,进一步说明 SFRAARAC 是可减碳、可持续使用的绿色混凝土胶凝材料. 考虑 RA 取代量和 SF 掺量的协同影响,试件 RA50SF05 的环境效益及

表 5 SFRAARAC 中材料的碳排放因子
Table 5 Carbon emission factors of materials in SFRAARAC

Unit: kgCO ₂ -eq/kg								
Slag	NA	RA	Sand	SF	Sodium silicate	Sodium hydroxide	Water	PC
0 ^[29]	0.002 2 ^[29]	0.001 1 ^[29]	0.002 5 ^[29]	1.496 5 ^[30]	0.700 0 ^[31]	1.514 0 ^[31]	0.000 2 ^[31]	0.735 0 ^[29]

表 6 SFRAARAC 中材料的碳排放量
Table 6 Carbon emission of materials in SFRAARAC

Unit: kgCO ₂ -eq/m ³										
Specimen	Slag	NA	RA	Sand	SF	Sodium silicate	Sodium hydroxide	Water	PC	Total
RA00SF00	0	2.367 5	0	1.817 2	0	113.225 0	5.435 3	0.014 3	0	122.859 3
RA25SF00	0	1.775 6	0.295 9	1.817 2	0	113.225 0	5.435 3	0.014 3	0	122.563 3
RA50SF00	0	1.183 7	0.591 9	1.817 2	0	113.225 0	5.435 3	0.014 3	0	122.267 4
RA75SF00	0	0.591 9	0.887 8	1.817 2	0	113.225 0	5.435 3	0.014 3	0	121.971 5
RA100SF00	0	0	1.183 7	1.817 2	0	113.225 0	5.435 3	0.014 3	0	121.675 5
RA50SF05	0	1.183 7	0.591 9	1.817 2	58.737 6	113.225 0	5.435 3	0.014 3	0	181.005 0
RA50SF10	0	1.183 7	0.591 9	1.817 2	117.475 3	113.225 0	5.435 3	0.014 3	0	239.742 6
RA50SF15	0	1.183 7	0.591 9	1.817 2	176.212 9	113.225 0	5.435 3	0.014 3	0	298.480 3
RA00SF10	0	2.367 5	0	1.817 2	117.475 3	113.225 0	5.435 3	0.014 3	0	240.334 5
RA25SF10	0	1.775 6	0.295 9	1.817 2	117.475 3	113.225 0	5.435 3	0.014 3	0	240.038 6
RA75SF10	0	0.591 9	0.887 8	1.817 2	117.475 3	113.225 0	5.435 3	0.014 3	0	239.446 7
RA100SF10	0	0	1.183 7	1.817 2	117.475 3	113.225 0	5.435 3	0.014 3	0	239.150 8
OPC	0	2.367 5	0	1.817 2	0	0	0	0.029 8	306.495 0	310.709 5

表7 SFRAARAC的环境效益因子
Table 7 Environmental efficiency of SFRAARAC

Specimen	L_{cu}	L_{st}	L_c	Specimen	L_{cu}	L_{st}	L_c
OPC	6.54	95.31	9.24	RA50SF10	3.93	48.83	5.32
RA00SF00	1.88	26.88	2.72	RA50SF15	4.37	48.45	6.52
RA25SF00	2.04	26.19	2.83	RA00SF10	3.17	45.95	6.06
RA50SF00	2.06	26.81	2.74	RA25SF10	3.66	50.32	5.15
RA75SF00	2.33	30.42	3.11	RA75SF10	4.22	55.95	5.42
RA100SF00	2.73	31.04	4.46	RA100SF10	5.30	57.21	7.61
RA50SF05	3.10	38.35	4.21				

经济指标最低,是一种可持续性使用的绿色复合胶凝材料。

5 结论

(1)当再生骨料取代率分别为50%、75%时,碱矿渣再生混凝土(AARAC)的28 d立方体抗压强度较普通水泥混凝土(OPC)提高了25%、10%。钢纤维的桥接作用有效补偿了再生骨料取代对碱矿渣混凝土(AAC)宏观力学性能的削弱作用,且钢纤维对抗拉强度的增强效果优于抗压强度。

(2)钢纤维增强碱矿渣再生混凝土(SFRAARAC)是一种多相复合胶凝材料。基于本文和相关文献试验结果,引入再生骨料取代率和钢纤维增强系数,建立了立方体抗压强度与轴心抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量之间的转换预测方程,方程的适用性更强。

(3)AAC的碳排放总量显著低于OPC,碳减排的潜力主要在于高炉矿渣取代水泥。AAC的碳排放量仅为OPC的39.54%,矿渣取代水泥使碳排放量降低了60.46%。再生骨料取代率为50%且钢纤维掺量为0.5%的试件RA50SF05不仅具有优良的力学性能,同时生态环境效益良好,适宜推广应用。

参考文献:

- [1] AYDIN S, BARADAN B. Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 57:166-172.
- [2] 王怀亮. 碱激发混凝土单双轴压强度和变形特性研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):40-47, 63.
WANG Huailiang. Uniaxial and biaxial compressive strength and deformation characteristic of alkali-activated concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):40-47, 63. (in Chinese)
- [3] 丁兆洋, 苏群, 李明泽, 等. 水玻璃模数对地聚物再生混凝土力学性能影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(1):61-70.
DING Zhaoyang, SU Qun, LI Mingze, et al. Water-glass modulus on mechanical properties of geopolymer recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):61-70. (in Chinese)
- [4] 王超然. 碱激发矿渣再生混凝土力学性能与耐久性试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
WANG Chaoran. Experimental study on mechanical performance and durability of recycled aggregate based alkali activated slag concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [5] NANAYAKKARA O, GUNASEKARA C, SANDANAYAKE M, et al. Alkali activated slag concrete incorporating recycled aggregate concrete: Long term performance and sustainability aspect[J]. Construction and Building Materials, 2020, 271:121512.
- [6] NIS A, EREN N Q, CEVIK A. Effects of nanosilica and steel fibers on the impact resistance of slag based self-compacting alkali-activated concrete[J]. Ceramics International, 2021, 47(17):23905-23918.
- [7] BERNAL S, GUTIERREZ R D, DELVASTO S, et al. Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(2):208-214.
- [8] SUN B B, SUN Y B, YE G, et al. A mix design methodology of slag and fly ash-based alkali-activated paste[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 126:104368.
- [9] XIE J H, WANG J J, RAO R, et al. Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate[J]. Composite Part B: Engineering, 2019, 164:179-190.
- [10] LI B, WU C, WANG S N, et al. Monotonic and cyclic compressive behavior of ultra-high performance concrete with coarse aggregate: Experimental investigation and constitutive model[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 68:106002.
- [11] FANG G H, WANG Q, ZHANG M Z. Micromechanical analysis of interfacial transition zone in alkali-activated fly ash-slag concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 119:103990.
- [12] EL-HASSAN H, MEDLJY J, EL-MAADDAWY T. Properties of steel fiber-reinforced alkali-activated slag concrete made with recycled concrete aggregates and dune sand[J]. Sustainability, 2021, 13:8017.
- [13] LI B, XU L H, CHI Y, et al. Experimental investigation on the stress-strain behavior of steel fiber reinforced concrete subjected to uniaxial cyclic compression[J]. Construction and Building Materials, 2017, 140:109-118.
- [14] 陈庞, 王政轩, 张健新, 等. 钢纤维增强碱矿渣再生骨料混凝土的力学性能[J/OL]. 土木与环境工程学报, 2023:1-9 [2024-01-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20221129.2347.002.html>.
CHEN Pang, WANG Zhengxuan, ZHANG Jianxin, et al. Mechanical properties of fiber reinforced alkali-slag recycled aggregate concrete[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023:1-9 [2024-01-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20221129.2347.002.html>. (in Chinese)

- [15] 谢萌. 纤维增强地聚物再生混凝土基本力学性能试验研究[D]. 天津:天津大学, 2021.
XIE Meng. Experimental study on mechanical properties of fiber reinforced geopolymer concrete with recycled aggregate [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021. (in Chinese)
- [16] SHI X S, COLLINS F G, ZHAO X L, et al. Mechanical properties and microstructures analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 237/238:20-29.
- [17] 曾宪帅. 纤维增强地聚物混凝土力学性能及韧性试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
ZENG Xianshuai. Experimental study on mechanical properties and toughness of fiber-reinforced geopolymer concrete [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [18] XIE J H, WANG J J, ZHANG B X, et al. Physicochemical properties of alkali activated GGBS and fly ash geopolymeric recycled concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204:384-398.
- [19] LEE N K, LEE H K. Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 1201-1209.
- [20] 赵岩伟. 地聚物再生混凝土受压基本力学性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
ZHAO Yanwei. Study on basic mechanical properties of geopolymer recycled concrete under compression loading [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [21] HASNAOUI A, GHORBEL E, WARDEH G. Performance of metakaolin/slag-based geopolymer concrete made with recycled fine and coarse aggregates[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 42:102813.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [23] EL-HASSAN H, ELKHOLY S. Performance evaluation and microstructure characterization of steel fiber-reinforced alkali-activated slag concrete incorporating fly ash[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(10):0002872.
- [24] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete: ACI Committee 318[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2017.
- [25] American Concrete Institute. State of the art report on high-strength concrete: ACI Committee 363[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1992.
- [26] CEB. Evaluation of the time dependent behavior of concrete: CEB-FIP[S]. [S.l.]: CEB Bulletin D'information, 1990.
- [27] ELKHOLY S, EL-HASSAN H. Mechanical and micro-structure characterization of steel fiber-reinforced geopolymer concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(10):04019223
- [28] FERNANDO S, GUNASEKARA C, LAW D W, et al. Life cycle assessment and cost analysis of fly ash-rice husk ash blended alkali-activated concrete [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 295:113140.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for building carbon emission calculation: GB/T 51366—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [30] SHI Y, LONG G C, ZENG X H, et al. Green ultra-high performance concrete with very low cement concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 303:124482.
- [31] DAMRONGWIRRYANUPAP N, SRIKHAMMA T, PLONGKRATHOK C, et al. Assessment of equivalent substrate stiffness and mechanical properties of sustainable alkali-activated concrete containing recycled concrete aggregate[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16:e00982.
- [32] LEE J, LEE T, JEONG J, et al. Mix design optimization and environmental impact assessment of low carbon materials containing alkali-activated slag and high CaO fly ash [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 267:120932.