

基于响应面法的 EGC 力学性能研究与配合比优化

余志辉¹ 周宗伯² 刘文化² 夏涛¹ 张勇¹

1. 纳思同（江苏）高科技发展有限公司，江苏 无锡 214000

2. 江南大学 纤维工程与装备技术学院，江苏 无锡 214000

[摘要] 本论文以赤泥（RM）、高炉矿渣（GGBS）和粉煤灰（FA）为前驱体，采用响应面法中的 Box-Behnken 设计对工程地聚合物复合材料（Engineered Geopolymer Composites, EGC）进行配合比优化。通过建立 RM 与 FA 质量比（A）、NaOH 摩尔浓度（B）、GGBS 在前驱体中的质量分数（C）与 28d 力学性能的全二次项关系方程。研究表明：C 对力学性能影响最显著，其对抗压强度、抗拉强度的影响顺序均为 $C > A > B$ ，对拉伸应变容量为 $C > B > A$ 。优化 EGC 配合比（ $A=0.216$, $B=7.195\text{mol/L}$, $C=0.5$ ）的预测值与实测值误差 $<10\%$ ，证实了响应面法在 EGC 多目标优化中的有效性，为工业固废资源化利用提供了理论依据。

[关键词] 响应面法；工程地聚合物复合材料（EGC）；力学性能；配合比优化

DOI: 10.33142/ect.v3i7.17176

中图分类号: TU52

文献标识码: A

Study on Mechanical Properties and Mixing Proportion Optimization of EGC Based on Response Surface Method

YU Zhihui¹, ZHOU Zongbo², LIU Wenhua², XIA Tao¹, ZHANG Yong¹

1. LEISTUNG (Jiangsu) High-Tech Development Co., Wuxi, Jiangsu, 214000, China

2. School of Fiber Engineering and Equipment Technology, Jiangnan university, Wuxi, Jiangsu, 214000, China

Abstract: In this paper, the Box-Behnken design in response surface methodology was used to optimize the mix ratio of engineered geopolymer composites (EGCs) using red mud (RM), blast furnace slag (GGBS), and fly ash (FA) as precursors. The full quadratic term relationship equations between RM to FA mass ratio (A), NaOH molar concentration (B), GGBS mass fraction in precursor (C) and 28d mechanical properties were established. The study showed that: C had the most significant effect on the mechanical properties, and its effects on compressive and tensile strengths were in the order of $C > A > B$, and on tensile strain capacity was $C > B > A$. The predicted values of the optimized EGC mixing proportion ($A=0.216$, $B=7.195\text{ mol/L}$, and $C=0.5$) had an error of $<10\%$ from the actual values, which confirmed the effectiveness of the response surface method in the multi-objective optimization of EGCs, and provided a good solution for the industrial solid waste resource utilization provides a theoretical basis.

Keywords: response surface method; engineered geopolymer composites (EGC); mechanical properties; mixing proportion optimization

引言

工程地聚合物复合材料（Engineered Geopolymer Composites, EGC）是以地聚合物为基体，加入聚乙烯（Polyethylene, 简称 PE）纤维，通过基体与 PE 纤维的协同作用展现出优异的力学性能和耐久性，在绿色建筑和基础设施以及建筑结构修复等领域具有广阔的应用前景。地聚合物通常以工农业副产品或固废为主要成分，原料来源广泛且成本低廉，不仅能够缓解废弃物堆积对环境的压力，而且可大幅减少 CO_2 的排放，被认为是绿色环保的建筑材料，契合“无废城市”理念，对于实现“双碳”目标和推动建筑行业低碳转型具有重要作用^[1-2]。传统的聚合物的前驱体以高炉矿渣和粉煤灰这两种固废材料为主，然而，随着资源化利用需求的提升，越来越多的废弃物材料，如赤泥^[3]、电石渣^[4]、钢渣^[5]等，也开始被纳入研究视野。其中，赤泥作为铝土矿提取氧化铝过程中的副产品^[6]，具有较高的碱性（pH 值 10~13），并且含有一定的活性硅铝成分，具有制备地聚合物的潜力。目前，全球赤泥资

源储量已达 40 亿 t，每年产生约 1.2 亿 t 赤泥，其资源化利用已成为了一个世界性的难题^[7-8]。

基于前人的研究基础上，本文考虑将赤泥（RM）、高炉矿渣（GGBS）、粉煤灰（FA）作为地聚合物的前驱体，采用响应面法（response surface method, RSM）对 EGC 的基体配合比进行优化设计。RSM 是一种有效的多变量优化技术，通过建立响应面模型，能够分析多个因素对目标性能的影响，并确定最优的因素组合。本文探究了三个自变量对 EGC 性能的影响，分别是 RM 与 FA 质量比、NaOH 摩尔浓度、GGBS 在前驱体中的质量分数，以期确定最优的配合比，为 EGC 基体配合比多目标优化提供参考。

1 实验

1.1 原材料

本文所使用的前驱体材料为 S105 级高炉矿渣（山东康晶）、一级粉煤灰（河南铂润）、拜耳法赤泥（武汉梓绿），三种材料的化学成分如表 1 所示。

表 1 前驱体材料的化学成分

Type	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	etc.
FA	2.93	65.70	20.63	4.65	0.28	2.25	0.33	3.27
GGBS	40.07	32.47	17.29	0.57	3.23	5.28	0.50	0.59
RM	0.36	10.26	17.21	53.73	0.73	0.12	8.01	9.58

本文采用高强度 PE 纤维，纤维长径比为 500、抗拉强度 2800MPa、弹性模量 100~120GPa，在本文的试验中，PE 纤维掺量均为 2% 体积掺量。本文采用的碱性激发剂为 NaOH 和硅酸钠（Na₂SiO₃）溶液，Na₂SiO₃ 溶液为微黄色透明液体，其主要指标见表 2。

表 2 硅酸钠主要指标

指标名称	模数	波美度	Na ₂ O (%)	SiO ₂ (%)	pH 值
参数	3.3	38.5	8.53	26.98	10~13

1.2 配合比设计

基于响应面法，采用 Design Expert 软件中的 Box-Behnken 方法进行试验设计与数据分析。选择了三个自变量因素，分别是：RM 与 FA 质量比、NaOH 摩尔浓度、GGBS 在前驱体材料中的质量分数，分别用 A、B、C 表示；以抗压强度、抗拉强度（均为 28d）作为响应值，分别用 Y1、Y2。试验各因素水平编码见表 3。通过 Box-Behnken 设计，确定了不同因素水平的组合，制备并测试样品。

表 3 自变量因素编码及水平

编码	因素	水平		
		-1	0	1
A	RM/FA	0.1	0.2	0.3
B	NaOH molarity	6	7	8
C	m (GGBS)	0.3	0.4	0.5

1.3 EGC 的制备

制备 EGC 的具体操作步骤如下：(1) 碱激发剂配制：将 NaOH 溶于水，加入硅酸钠溶液混匀后冷却至常温。(2) 混合工艺：前驱体材料低速搅拌 2min，加入碱激发剂低速混合 3min，分次加入 PE 纤维高速混合 3min。(3) 成型养护：装模静置 24h 脱模，标准养护 28d 测试。

抗压试验采用边长为 70.7mm 的立方体，采用 2000kN 的伺服液压试验机进行加载，如图 1 所示，加载方式选择应力控制，速率设定为 0.3MPa/s，每组试验均保证至少有三个有效数据 EGC 的单轴拉伸性能由“狗骨”型试件测得，其横截面尺寸为 20mm×13mm，为了精确获得拉伸过程中发生的变形，在试件中部设置了一个高精度 MTS 引伸计（标距为 50mm），试验中机器的加载方式选择位移控制，加载速率为 0.5mm/min，如图 2 所示。



图 1 抗压试验

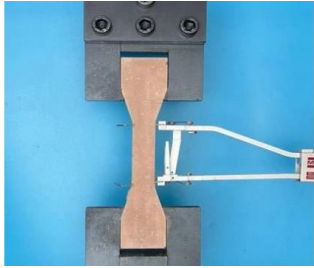


图 2 单轴拉伸试验

2 结果与讨论

2.1 试验结果与模型分析

表 4 数据显示，EGC 各组试件的抗压强度、抗拉强度及拉伸应变容量的预测值与实测值对比表明：虽然存在一定数据波动，但两者差异总体较小（相对误差<8%）。28 天测试结果表明，该模型能有效预测 EGC 力学性能，具有较高可靠性。

表 4 EGC 力学性能的试验值与预测值

序号	因素编码			28d 抗压强度 (MPa)		28d 抗拉强度 (MPa)	
	A	B	C	试验值	预测值	试验值	预测值
A	0.3	8	0.3	32.17	32.57	2.68	2.71
B	0.1	6	0.5	58.00	57.83	3.41	3.35
C	0.3	7	0.4	49.70	47.76	4.15	4.09
D	0.2	7	0.4	50.57	51.02	4.82	5.02
E	0.1	8	0.5	64.30	65.40	3.99	4.01
F	0.3	6	0.3	30.10	29.23	3.64	3.60
G	0.2	7	0.4	49.47	51.02	5.11	5.02
H	0.2	6	0.4	44.70	46.37	4.62	4.75
I	0.2	7	0.4	51.13	51.02	5.33	5.02
J	0.1	7	0.4	59.25	60.24	4.13	4.29
K	0.2	7	0.3	36.10	38.50	4.78	4.92
L	0.3	6	0.5	47.83	48.60	4.68	4.71
M	0.3	8	0.5	57.70	59.34	4.23	4.28
N	0.2	8	0.4	54.43	51.82	4.67	4.64
O	0.2	7	0.5	60.07	56.73	5.26	5.23
P	0.1	6	0.3	49.53	48.13	4.35	4.28
Q	0.1	8	0.3	48.83	48.30	4.54	4.48

基于表 5 数据对比分析，采用全二次多项式模型能有效建立 EGC 力学性能与 A、B、C 的关系。模型评价指标显示：P 值均<0.01 (0.0038/<0.0001)，失拟 P 值均>0.05 (0.0837/0.8832)，且 R² 校正/预测值较高，表明该模型具有显著性和可靠性，适用于 EGC 力学性能分析。

表 5 力学性能数学拟合模型比较

力学性能	模型	P		R ²	
		P 值	失拟 P 值	校正值	预测值
抗压强度	一次线性	0.0301	0.0427	0.8494	0.7613
	缺项二次	0.1106	0.0550	0.8899	0.7577

力学性能	模型	P		R ²	
		P 值	失拟 P 值	校正值	预测值
抗拉强度	全二次	0.0038	0.0837	0.9357	0.7840
	三次	0.0718	0.1950	0.9854	-1.8250
	一次线性	0.8672	0.0984	-0.1663	-0.8633
	缺项二次	0.1583	0.1170	0.0770	-2.3510
	全二次	<0.0001	0.88320	0.9299	0.8825
	三次	0.8603	0.5636	0.8836	-5.6235

2.2 抗压强度响应面模型分析

通过响应面法对 EGC 抗压强度试验数据进行多元回归分析,建立了 EGC 材料 28 天抗压强度 (Y_1) 与 RM 与 FA 质量比 (A)、NaOH 摩尔浓度 (B) 以及 GGBS 在前驱体材料中的质量分数 (C) 之间的二次多项式回归方程 (1):

$$Y_1 = 41.0182 - 6.241 \times A + 2.727 \times B + 9.117 \times C + 0.7925 \times AB + 2.415 \times AC + 1.85 \times BC + 2.9857 \times A^2 - 1.9243 \times B^2 - 3.4043 \times C^2 \quad (1)$$

在建立回归方程后,进行了方差分析,以确保该模型具有较高的准确性。表 6 展示了回归方程的分析结果。根据表 6 可知,回归方程 Y_1 具有高度显著性 ($P < 0.01$, $F = 26.88$),失拟检验合格 ($P = 0.0837$)。单因素影响排序为 $A \approx C > B$;交互作用中仅 AC 显著 (AB、BC 不显著),二次项影响较弱。

表 6 抗压强度回归方程的方差分析结果

数据源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
回归模型	1434.16	9	159.35	26.88	0.0001
A	389.50	1	389.50	65.70	<0.0001
B	74.37	1	74.37	12.54	0.0094
C	831.20	1	831.20	140.21	<0.0001
AB	5.02	1	5.02	0.8476	0.3879
AC	46.66	1	46.66	7.87	0.0263
BC	27.38	1	27.38	4.62	0.0687
A ²	23.88	1	23.88	4.03	0.0847
B ²	9.92	1	9.92	1.67	0.2368
C ²	31.05	1	31.05	5.24	0.0559
残差	41.50	7	5.93		
失拟项	40.07	5	8.01	11.24	0.0837
纯误差	1.43	2	0.7132		

表 7 为模型可信度检验的详细分析结果,回归方程 Y_1 的 R^2 (0.9719) 与校正 R^2 (0.9357) 高度接近,变异系数 6.14% ($< 10\%$),信噪比 19.369 (> 4),表明模型拟合优度高、数据稳定性好,预测结果可靠。

表 7 抗压强度模型可信度检验分析结果

回归模型	变异系数%	R ²	校正 R ²	预测 R ²	信噪比
Y_1	6.14	0.9719	0.9357	0.7840	19.3693

图 3 为两因素交互作用的抗压强度 3D 响应面曲面图

和对应的水平投影图。降低 RM/FA 比值 ($0.3 \rightarrow 0.1$) 和增加碱浓度 ($6 \rightarrow 8 \text{ mol/L}$) 均能提升抗压强度 (图 3(a))。图 3(b) 表示增大高炉矿渣质量分数并降低 RM/FA 可以得到最大的抗压强度,反之抗压强度则最小。图 3(c) 表示增大碱浓度和高炉矿渣质量分数可以获得最大的抗压强度。机理分析表明:碱浓度提高可加速硅铝溶解和 N-A-S-H 凝胶形成,而高炉矿渣增加提供了更多反应物,二者协同增强地聚合物骨架强度。

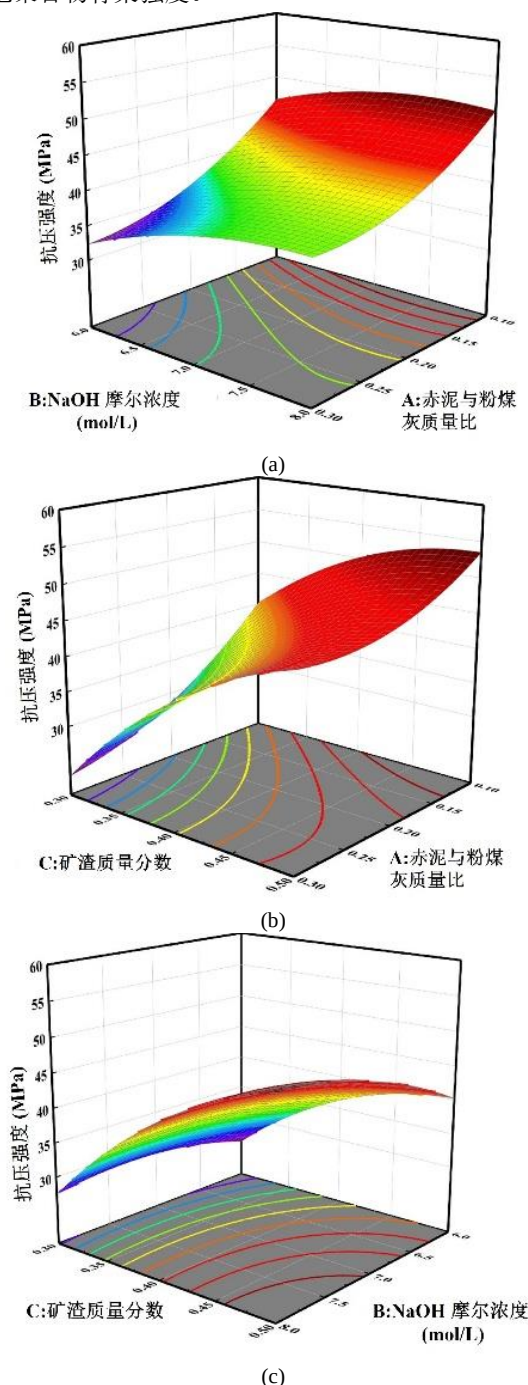


图 3 抗压强度的两因素交互作用响应曲面图: (a) AB 交互作用; (b) AC 交互作用; (c) BC 交互作用

2.3 抗拉强度响应面模型分析

同理，对数据进行多元回归分析后，建立了 EGC 材料 28d 抗拉强度 (Y_2) 与 RM 与 FA 质量比 (A)、NaOH 摩尔浓度 (B) 以及 GGBS 在前驱体材料中的质量分数 (C) 之间的二次多项式回归方程(2):

$$Y_2 = 5.01631 - 0.1029 \times A - 0.0584 \times B + 0.1587 \times C - 0.27275 \times AB + 0.50925 \times AC + 0.1135 \times BC - 0.825542 \times A^2 - 0.322042 \times B^2 + 0.594577 \times C^2 \quad (2)$$

表 8 为抗拉强度回归方程的方差分析结果，方差分析显示：抗拉强度回归模型 Y_2 具有高度显著性 ($P=0.0002$)，失拟检验合格 ($P=0.8832/0.6625$)。单因素影响排序为 $C > A > B$ ；交互作用中 AC、AB 显著 ($AC > AB$)，BC 不显著；二次项中 A^2 影响最大， B^2 次之， C^2 不显著。模型整体拟合优度高。

表 8 抗拉强度回归方程的方差分析结果

数据源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
回归模型	7.25	9	0.8055	24.59	0.0002
A	0.1059	1	0.1059	3.23	0.1153
B	0.0341	1	0.0341	1.04	0.3416
C	0.2519	1	0.2519	7.69	0.0276
AB	0.5951	1	0.5951	18.17	0.0037
AC	2.07	1	2.07	63.32	<0.0001
BC	0.1031	1	0.1031	3.15	0.1194
A^2	1.83	1	1.83	55.73	0.0001
B^2	0.2779	1	0.2779	8.48	0.0226
C^2	0.0095	1	0.0095	0.2891	0.6075
残差	0.2293	7	0.0328		
失拟项	0.0971	5	0.0194	0.2940	0.8832
纯误差	0.1322	2	0.0661		

Y_2 的模型可信度检验结果如表 9 所示，表 9 显示 Y_2 模型可信度良好： $R^2=0.9693$ （接近 1），变异系数 4.14%（<10%），信噪比 18.165（>4）， R^2 与校正 R^2 接近，表明模型拟合优度高、预测可靠。

表 9 抗拉强度模型可信度检验分析结果

回归模型	变异系数%	R^2	校正 R^2	预测 R^2	信噪比
Y_2	4.14	0.9693	0.9299	0.8825	18.1652

图 4 为两因素交互作用的抗拉强度 3D 响应面曲面图。抗拉强度响应面分析表明：RM/FA (A) 在 0.2 时抗拉强度达到峰值，其影响显著大于碱浓度 (B)。碱浓度在 7.0mol/L 时出现最佳值但变化幅度较小。AC 交互作用显示，当 RM/FA=0.2 且矿渣含量=0.5 时强度最大，矿渣增加仅轻微提升强度。BC 交互作用的响应面呈平面状，证实其影响不显著。各因素影响排序为： $A > AC > B > BC$ 。

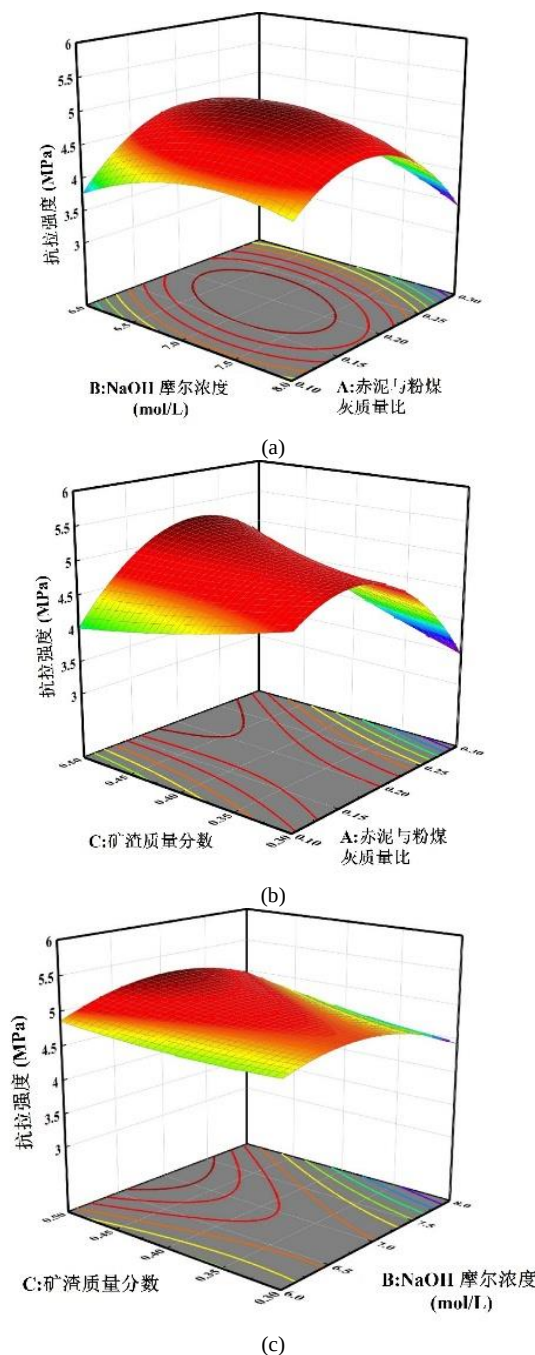


图 4 抗拉强度的两因素交互作用响应曲面图：(a) AB 交互作用；(b) AC 交互作用；(c) BC 交互作用

3 EGC 配合比响应面法优化

多元固废地聚合物的抗压强度、抗拉强度是评估其力学性能的重要标准，选取以上两个指标的最大值作为期望值，通过 Design-Expert 软件优化得到多元固废地聚合物的最佳配比：RM/FA=0.216，NaOH 浓度 7.195mol/L，矿渣占比 0.5。预测 28d 抗压强度 58.116MPa，抗拉强度 5.268MPa。经实验验证，实测抗压强度 60.250MPa（误差 3.67%），抗拉强度 5.747MPa（误差 9.09%），误差均在合

理范围内,证实了响应面优化模型的可靠性。

4 结论

本研究通过响应面法优化多元固废 EGC 材料配比,得出以下结论:

(1) 建立的二次项模型能准确预测材料性能(抗压 $R^2=0.9357$, 抗拉 $R^2=0.9299$, 应变 $R^2=0.8304$),可用于指导实际配比设计;

(2) 对 EGC 力学性能影响因素重要性排序显示:矿渣含量(C)对各项性能影响最大,其次是赤泥/粉煤灰比(A),碱浓度(B)影响最小;

(3) 基于响应面的多目标优化方法,对 A、B、C 三个因素进行了优化,通过预测给出了综合性能最佳的多元固废 EGC 的配合比: $A=0.216$, $B=7.195\text{mol/L}$, $C=0.5$, 预测值与实测值误差均 $<10\%$ (抗压 3.67%,抗拉 9.09%),研究表明响应面法能有效优化 EGC 材料配比。

[参考文献]

- [1] Alharbi Y R, Abadel A A. Engineering properties of high-volume fly ash modified cement incorporated with bottle glass waste nanoparticles [J]. Sustainability,2022,14(19):12459.
- [2] Punurai W, Kroehong W, Saptamongkol A, et al. Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage

of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste [J]. Construction and Building Materials,2018(186):62-70.

[3] 李明登,黄鑫,倪景辉,等.赤泥基地聚物的制备及吸附性能研究[J].非金属矿,2025,48(1):14-16.

[4] 张国芳,崔晨,胡文佩,等.多元固废制备地聚合物的抗压强度和微观结构[J].水泥,2025(2):11-15.

[5] 俞莉,张树祥,朱涛,等.钢渣-矿粉基地聚合物的流变性能及其参数预测[J].建筑材料学报,2025,28(5):465-476.

[6] Uysal M, Kuranlı Ö F, Aygörmüş Y, et al. The effect of various fibers on the red mud additive sustainable geopolymer composites [J]. Construction and Building Materials,2023(363):129864.

[7] Bai B, Wang J, Zhai Z, et al. The penetration processes of red mud filtrate in a porous medium by seepage [J]. Transport in Porous Media,2017(117):207-227.

[8] Yuan S, Liu X, Gao P, et al. A semi-industrial experiment of suspension magnetization roasting technology for separation of iron minerals from red mud [J]. Journal of hazardous materials,2020(394):122579.

作者简介:余志辉(1998—),男,汉族,江西鹰潭人,硕士,助理工程师,主要从事混凝土和固废资源化利用等方向检测和科研工作。