

纤维增强电石渣 - 粉煤灰改良黄土的力学特性

汪佳欣, 苗志琪

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年5月26日; 录用日期: 2025年6月18日; 发布日期: 2025年6月27日

摘要

针对黄土湿陷性强、强度低及透水性大等工程缺陷, 本研究采用电石渣、粉煤灰与玄武岩纤维协同改良黄土, 以提升其力学性能。通过单因素试验确定关键参数取值范围: 电石渣置换率(30%~50%)、玄武岩纤维含量(0.3%~0.5%)及纤维长度(9~15 mm)。基于响应面法建立7 d无侧限抗压强度预测模型, 验证结果表明模型可靠性显著。因素影响分析显示, 电石渣置换率对强度影响最为显著, 其次为纤维含量与纤维长度。最终优化得到最佳配比为电石渣置换率36.24%、纤维含量0.38%、纤维长度11.6 mm, 为黄土改良工程提供了科学依据与实用参考。

关键词

电石渣, 粉煤灰, 玄武岩纤维, 黄土

Fiber-Reinforced Calcium Carbide Slag-Fly Ash Improves the Mechanical Properties of Loess

Jiaxin Wang, Zhiqi Miao

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: May 26th, 2025; accepted: Jun. 18th, 2025; published: Jun. 27th, 2025

Abstract

In view of the engineering defects such as strong collapsibility, low strength and high permeability of loess, in this study, calcium carbide slag, fly ash and basalt fiber were used to collaboratively improve loess to enhance its mechanical properties. The range of key parameter values was determined through single-factor experiments: calcium carbide slag replacement rate (30%~50%), basalt fiber content (0.3%~0.5%), and fiber length (9~15 mm). A 7-day unconfined compressive

strength prediction model was established based on the response surface method. The verification results show that the reliability of the model is significant. Factor influence analysis shows that the replacement rate of calcium carbide slag has the most significant impact on strength, followed by fiber content and fiber length. Finally, the optimal ratio obtained through optimization was a calcium carbide slag replacement rate of 36.24%, a fiber content of 0.38%, and a fiber length of 11.6 mm, providing a scientific basis and practical reference for the loess improvement project.

Keywords

Calcium Carbide Slag, Fly Ash, Basalt Fiber, Loess

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

黄土在我国分布广泛, 具有湿陷性大、透水性强、高压缩性、强度低等不良性质。对工程的应用有极大的限制性, 需要对黄土进行改良。目前, 采用水泥进行黄土加固比较常见, 大量的水泥生产也导致了二氧化碳排放量增加。中国水泥生产的碳排放已达到 3887 万吨, 为了实现“双碳”目标, 亟需寻找绿色环保的加固材料[1]。

据统计, 我国工业固废材料如矿渣、粉煤灰、炉渣、电石渣、赤泥等固废材料产量逐年增加, 我国工业固废累计量已超过 600 亿吨, 占用土地资源超过 200 万公顷[2] [3]。截止 2023 年我国工业固体废物的利用率已成功提升至 60.05%, 但离“十三五”国家《生态环境保护规划》中所设定的到 2020 年达到 73% 的目标仍有一定距离[4]。这也恰恰反映出我国在工业固体废物的综合利用领域, 仍然存在着巨大的发展潜力和提升空间, 有待于进一步挖掘和拓展。当前, 国内外有很多研究者将固废材料进行对土壤的加固, 取得了一定的成果。徐日庆[5]采用 3 种常用的工业废料作为固化剂对淤泥质土进行加固, 得到了最佳配比粉煤灰: 磷石膏: 电石渣 = 21.6:26.8:51.6。作用机理是由于电石渣遇水呈碱性, 在碱性下粉煤灰中的二氧化硅和三氧化二铝被激发出来, 形成胶凝材料将土颗粒联结在一起, 使得土壤强度增加。磷石膏的二水硫酸钙发生火山灰反应形成钙矾石, 填充孔隙, 进一步增强土壤强度。全佳[6]采用粉煤灰、电石渣对黄土进行加固, 90 d 的无侧限抗压强度可达到 5.67 MPa, 满足道路工程要求。闫炜炀[7]采用赤泥、粉煤灰、电石渣对土壤加固, 得到了最佳配比为赤泥: 电石渣: 粉煤灰 = 40:30:30, 此时为最大无侧限抗压强度, 28 d 的养护龄期后可达到 3.76 MPa。以上研究说明固废材料可作为固化剂, 有效改善土壤的强度。

通过固废材料加固土壤, 具有较好的抗压性, 对环境友好。但和水泥类似, 不具备较好的抗拉能力、变形能力且脆性破坏明显[8]。因此可适当的加入纤维, 改善抗拉强度。玄武岩纤维是一种由玄武岩所制成的生物基纤维, 与其他纤维相比, 玄武岩纤维有高弹性模量, 高抗拉强度、耐腐蚀性好。肖盼[9]等人发现加入玄武岩纤维后, 脆性指数降低, 剪胀角减小。其原因是纤维在土体中网架结构, 在受力过程中, 纤维相互制约, 限制土壤颗粒的移动, 从而提高变形能力。Hong [10]发现玄武岩纤维的掺量和长度对无侧限抗压强度有显著影响, 且随含量和长度的增加, 强度呈先上升后下降的趋势。张天佑[11]将聚丙烯纤维对土壤加固, 发现随着纤维含量的增加。抗剪强度也有所增加; 纤维长度超过最佳值后对抗剪强起反作用。可以看出纤维含量、纤维长度对土壤加固都有影响。

因此, 本文采用粉煤灰、电石渣、玄武岩纤维对黄土进行加固, 研究电石渣置换率、纤维含量、纤维长度对无侧限抗压强度的影响。为了确定三个影响因素的最佳参数, 首先进行单因素试验, 确定影响因

素的范围。然后通过响应面法得到固化剂改良黄土的最佳配比, 为后续粉煤灰、电石渣、玄武岩纤维加固黄土中的应用提供理论基础。

2. 试验材料和方法

2.1. 试验材料

本次试验黄土来自陕西省西安市长安区某工地, 在 2~2.5 米处位置进行取样。土体颜色呈黄褐色, 质地均匀。将取样的土碾碎、风干, 过 2 mm 筛子, 然后进行一系列物理特性试验, 根据《公路土工试验规程(JTG 3430-2020)》进行试验, 可得到黄土基本物理指标如表 1 所示。干式电石渣样品来自一家山东淄博技术服务有限公司, 呈灰白色。本实验的电石渣是通过电石水解制备乙炔所产的废渣, 用于作为碱性活化剂。本研究中所使用的粉煤灰来源于山东烟台环保科技有限公司, 其形态为粉末状。粉煤灰和电石渣的化学成分如表 2、表 3 所示。玄武岩纤维是一种由玄武岩所制成的生物基纤维, 本研究中玄武岩纤维来自中国江苏省盐城市安捷材料公司, 材料特性如表 4。Zhao [12]将玄武岩纤维和聚丙烯纤维进行对比, 在加固效果上玄武岩纤维表现更好, 因为玄武岩纤维的自身伸长韧性好, 即抗拉强度高。与其他传统纤维相比, 还具耐碱性, 能确保在电石渣与水反应形成的碱环境中保持一定的稳定性。表 4 可看出玄武岩纤维具有高弹性模量、耐高温等优点。同时制备了不同长度的玄武岩纤维, 即 3 mm、6 mm、9 mm、12 mm 以及 18mm。

Table 1. Basic physical indicators of loess soil

表 1. 黄土基本物理指标

比重 G_s	天然含水量 $w/\%$	天然干密度 $\rho/(g/cm^3)$	塑限 $W_P/\%$	液限 $W_L/\%$	塑性指数 I_P	孔隙比 e
2.7	18%	1.43	1839	33.46	15.07	0.63

Table 2. Chemical constituent of FA

表 2. 粉煤灰化学成分

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MgO	其他	烧失量
含量	48.85	35.72	4.28	4.33	0.7	0.33	1.37	0.34	0.86	0.26	3.02

Table 3. Chemical constituent of CCR

表 3. 电石渣化学成分

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	其他	烧失量
含量	2.41	0.54	71.12	0.22	0.4	0.12	0.11	1.24	0.11	23.73

Table 4. Performance parameterst of BF

表 4. 玄武岩纤维性能参数

物理特性	数值
单丝直径 $r/(\mu m)$	7~15
长度/(mm)	12
密度/(g/cm ³)	2.63~2.65
抗拉强度/(MPa)	3000~4800
弹性模量/(GPa)	91~110
极限伸长率/(%)	2.9

续表

热处理下拉伸长度/% (20℃)	100
热处理下拉伸长度/% (200℃)	95
热处理下拉伸长度/% (400℃)	82
热性能	数值
耐热温度/(℃)	-296~650
热导率/(W/mk)	0.03~0.038
粘合温度/(℃)	1050
电性能	Value
比容量电阻/(Ω·M)	1012
电容率/(F/M)	2.2

2.2. 试样制备与测试方法

2.2.1. 试样制备

固化样品的具体制备过程如下: 1) 将用于制备干式电石渣和粉煤灰充分混合, 形成干混材料。2) 为了使玄武岩纤维更好地均匀分散在黄土中, 将纤维进行分散从而防止纤维絮凝。然后人工将干黄土与玄武岩纤维充分混合。3) 在固化样品材料中, 多次分批加水, 边加水边搅拌 3 分钟。注意这里的水指的是黄土所需最佳含水率。混合材料准备就绪后, 放入塑料容器 24 小时后, 在进行压实。然后将试样置于实验室内, 保持 95%的湿度和(23℃ ± 2℃)的温度条件下, 持续固化 7 天。

2.2.2. 测试方法

无侧限抗压强度是评价力学性能最重要的参考指标。在 UCS 试验过程中, 使用南京土壤仪器公司生产的 YYW-2 无限制压缩装置。当测力计的读数达到其峰值、变形趋于稳定或试样出现破坏时, 应终止试验。试件的无侧限抗压强度可以通过以下公式进行计算:

$$q_u = P/A$$

其中, P 为试验期间的最大压力, A 为模具中间的横截面积。

2.3. 试验设计

2.3.1. 单因素试验设计

本试验采用电石渣、粉煤灰、纤维对黄土进行固化, 初步设计考虑了电石渣置换率(电石渣占电石渣和粉煤灰之和)、玄武岩纤维含量(体积含量)、玄武岩纤维的长度三个因素。其中固化剂的掺量固定不变(电石渣、粉煤灰、玄武岩纤维之和), 为干土质量的 15%。通过单因素分析, 得到影响因素的范围, 具体设计范围如表 5。

Table 5. Single factor experimental design
表 5. 单因素试验设计

试验	电石渣置换率/%	纤维含量/%	纤维长度/mm
电石渣置换率	20、30、40、50、60	0.2、0.3、0.4、0.5、0.6	12
纤维含量	40	0.4	12
纤维长度	40	0.4	6、9、12、15、18

2.3.2. 响应面试验设计

得到单因素的试验范围后, 将采用响应面法 Central Composite Design, 即中心复合设计进行三因素五水平的正交试验, 以 7 天的抗压强度值为响应值。具体试验自变量编码和水平如表 6, 通过对试验数据的分析, 建立响应面模型, 分析各因素及其交互作用对 7 天抗压强度的影响, 确定最优的因素水平组合。其中因素 A、B、C 分别为电石渣置换率、玄武岩纤维含量(纤维体积含量)、玄武岩纤维的长度, α 为 1.68179。

Table 6. Coding and levels of independent variables in tests

表 6. 自变量因素编码及水平

因素	编码	水平				
		$-\alpha$	-1	0	1	α
A	X_1	23.18	30	40	50	56.82
B	X_2	0.23	0.3	0.4	0.5	0.57
C	X_3	6.95	9	12	15	17.04

3. 结果与讨论

3.1. 单因素试验分析

响应面优化分析的第一步是输入影响变量和范围, 所以需要进行单因素试验确定响应面中心, 得到各影响因素的取值范围, 从而确保输入变量的有效性。结合相关文献经验[13]-[15], 选择各影响因素范围: CCR 替换比 0.2~0.6、BF 含量 0.2%~0.6%、BF 长度为 6~18 mm。

由图 1 可知, 试样的抗压强度与电石渣置换率之间存在特定关系。起初, 试样的抗压强度随着电石渣含量的增加而上升, 但随后又降低。其中, 在电石渣含量为 40%且粉煤灰含量为 60%的情况下, 试样的抗压强度达到最高值(632 kPa)。可靠的原因是水作为介质的情况下, 随着 CCS 的增加, 液相碱环境不断上升, 促使 FA 中 Si、Al 离子溶解发生水化反应, 生成了更多的水化硅酸钙(C-S-H)和水化硅酸铝酸盐(C-A-H)。这些水化产物的增多有助于改善 FA 的孔隙结构, 使其更加致密, 因此抗压强度增加。但随着 CCS 含量的过高时, 存在过多未发生反应的物质如 CaCO_3 , 以及 FA 火山灰材料降低, 共同导致抗压强度降低[16]。

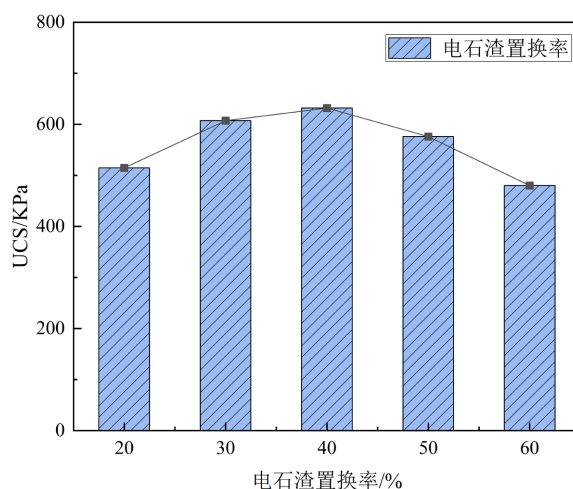


Figure 1. The influence of calcium carbide slag replacement rate on unconfined compressive strength

图 1. 电石渣置换率对无侧限抗压强度的影响

图 2 显示了在电石渣置换为 40%，纤维长度为 12 mm 时，不同纤维含量对 UCS 的影响。可以看出，随着纤维的含量增加，黄土的 UCS 值先增大后减小。当纤维含量为 0.4% 时，达到最大 UCS。这种结果是由于：黄土中的纤维可以承受一部分的拉应力，从而提高土体抵抗变形的能力，使土体发生破坏时是延性破坏。但纤维含量较低时，纤维在土体中难以形成较好的空间网状结构，难以发挥对黄土的显著增强作用。当纤维含量达到一定值时，纤维在土体中的作用力会由一维拉筋转变为三维纤维网，从而增加土体内部摩擦力和整体强度。然而，纤维含量并非越多越好，当纤维含量超过某一临界值后，纤维的增强效应减弱。在制样过程中，能明显发现纤维含量过多容易发生团聚现象，干扰土颗粒之间的正常连接有分层开裂的趋势，这不利于土体的整体结构强度，从而减弱了土体的整体结构强度。因此，纤维含量应在有限范围内，根据图 3 所示的实验结果，纤维混合到黄土中的选择性含量选择范围为 0.3%~0.5%。

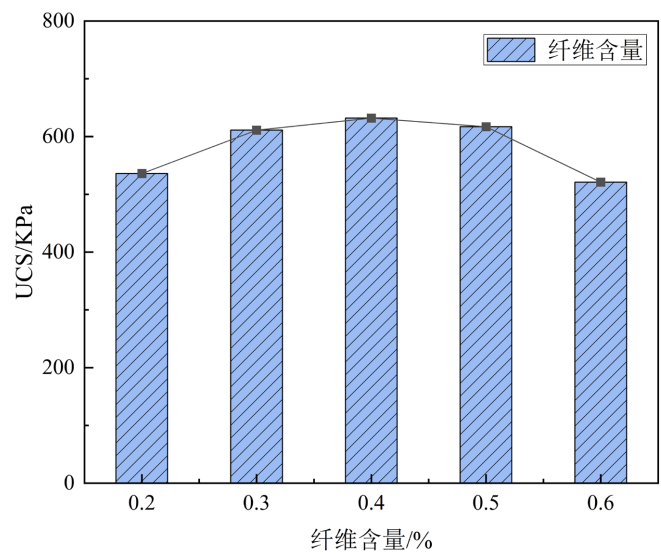


Figure 2. The influence of fiber content on unconfined compressive strength
图 2. 纤维含量对无侧限抗压强度的影响

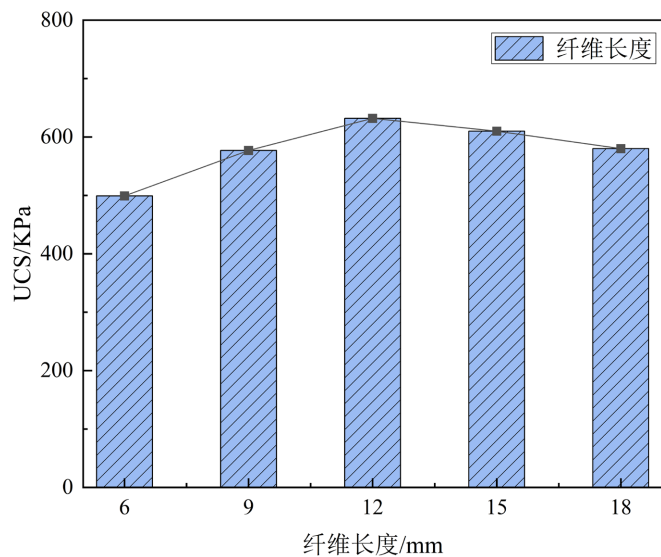


Figure 3. The influence of fiber length on unconfined compressive strength
图 3. 纤维长度对无侧限抗压强度的影响

图 3 显示了随着纤维长度的增加无侧限抗压强度先增加后减小。当纤维较短时, 虽然可以改善土体的韧性和抗裂性能, 但由于纤维长度较短, 纤维与土体之间的粘结面积和界面作用力有限, 纤维无法有效承受和传递外部应力。因此, 不能明显地改善土壤的强度性能。当纤维过长时, 纤维在土体中容易产生纤维的缠绕、团聚、不均的现象。这会导致局部应力集中, 反而削弱了土体的力学性能。此外, 过长的纤维在应力作用下容易发生拔出或折断, 这会使纤维不能有效传递应力, 从而削弱增强效果, 导致无侧限抗压强度的下降。适中的纤维长度提供了最佳的增强效果, 使无侧限抗压强度最大。因此, 将玄武岩纤维的长度范围定在 9~15 mm。

3.2. 响应面法优化试验分析

本次试验的响应变量个数 $k=3$, 轴点坐标值 $\alpha=1.682$ 。根据单一变量实验的结果, 确定了三个参数的取值范围, 并将电石渣置换率 40% (响应因子 A)、纤维掺量 0.4% (响应因子 B) 和纤维长度 12 mm (响应因子 C) 作为响应面分析的中心点。具体数据点赋值情况如图 4。如表 7 设计了 20 组实验, 以 7 d 的无侧限抗压强度作为响应值。其中包括 5 组在中心点进行重复实验, 有助于评估实验误差。其他组实验则用于分析各个因素对响应值的影响。可以看出真实值和实验值的误差都小于 5%, 可见模型预测能力好。

Table 7. Experimental result

表 7. 试验结果

序号	X_1	X_2	X_3	7 d UCS 真实值/kPa	7 d UCS 预测值/kPa	误差率
1	-1	-1	-1	586	578.55	-1.27%
2	1	-1	-1	519	516.62	-0.46%
3	-1	1	-1	543	536.43	-1.21%
4	1	1	-1	511	512.00	0.20%
5	-1	-1	1	564	558.33	-1.01%
6	1	-1	1	494	496.39	0.48%
7	-1	1	1	520	516.21	-0.73%
8	1	1	1	490	491.78	0.36%
9	-1.68179	0	0	567	578.47	2.02%
10	1.68179	0	0	510	505.84	-0.81%
11	0	-1.68179	0	550	555.30	0.96%
12	0	1.68179	0	514	516.01	0.39%
13	0	0	-1.68179	528	534.66	1.26%
14	0	0	1.68179	500	500.65	0.13%
15	0	0	0	635	631.28	-0.59%
16	0	0	0	639	631.28	-1.21%
17	0	0	0	607	631.28	4.00%
18	0	0	0	637	631.28	-0.90%
19	0	0	0	634	631.28	-0.43%
20	0	0	0	634	631.28	-0.43%

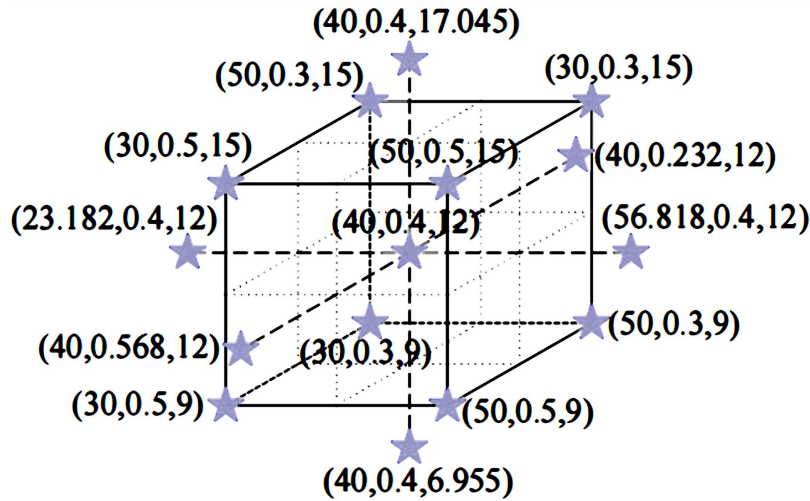


Figure 4. Central composite design
图 4. 中心复合设计

根据 7 d 无侧限抗压强度的实验结果, 表 8 开展多种拟合方程的模型评估。p 值是判断统计结果是否具有显著性的重要指标之一(p 值小于 0.01 非常显著, 0.05 模型显著, 大于 0.05 模型不显著)。因此, 提出了 p 值最小的二次模型作为最适合该系统的模型。

Table 8. Model evaluation of multiple fitting equations
表 8. 多种拟合方程的模型评估

模型	p 值	失拟 p 值	校正 R ² 值	预测 R ² 值	评估
一次线性	0.3813	0.0008	0.0142	-0.1157	
二次	0.977	0.0004	-0.1951	-0.9171	
全二次	<0.0001	0.7409	0.9632	0.9303	建议
三次	0.7724	0.3763	0.9528	0.461	

通过方差分析, 研究独立因素及因素之间交互作用对响应变量(UCS)产生的影响。运用逆向分析, 构建一个只包含具有统计学意义的项($p \leq 0.05$)的公式, 该公式最能代表输入变量和响应变量之间的关系。表 9 为二次模型的方差分析, 从表 9 中可以看出, 各主要项目的 p 值中的 X_1 、 X_2 、 X_3 、次项 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 均小于 0.01, 说明它们对抗压强度的影响非常显著。交互项 X_1X_2 的 p 值小于 0.05, 表明电石渣置换率和纤维含量其对抗压强度影响显著。通过 p 值很容易发现, 影响 7 d 抗压强度的因素顺序为 $X_1 > X_2 > X_3$, 即电石渣置换率 > 纤维含量 > 纤维长度。通过 F 值可以看出, 该模型 F 值为 56.33, X_1 、 X_2 、 X_3 的 F 值分别为 58.07、17、12.74。F 值越大越说明该因素变量影响显著, 由此得知, 显著性影响 $X_1 > X_2 > X_3$, 即电石渣置换率 > 纤维含量 > 纤维长度。

Table 9. Analysis of variance
表 9. 方差分析

来源	均方	F 值	p 值
模型	6175.04	56.33	<0.0001

续表

X_1	6366.31	58.07	<0.0001
X_2	1863.86	17	0.0021
X_3	1396.29	12.74	0.0051
X_1X_2	703.13	6.41	0.0297
X_1X_3	0.125	0.0011	0.9737
X_2X_3	1.13	0.0103	0.9213
X_1^2	14308.74	130.52	<0.0001
X_2^2	16471.99	150.25	<0.0001
X_3^2	23256.93	212.14	<0.0001
失拟	77.1	0.5423	0.7409
误差	142.16		

分析二次模型可靠性, 结果如表 10 所示, 变异系数能体现数据的离散性以及表示结果的精确性和可靠性, 7 d 无侧限抗压强度的变异系数为 1.87% (<10%), 表明表示模型具有较高的可靠性和可重复性。Adjusted R^2 和 Predicted R^2 均接近 1 且数值较为接近(Adjusted R^2 -Predicted R^2 < 0.2), 表明回归方程的拟合度好, 相关性高。进一步说明优化粉煤灰电石渣稳定纤维黄土是可行的。同时, 成 7 d 无侧限抗压强度的信噪比为 18.81 大于 4, 说明模型具有足够高的精确度, 能准确地反映实验结果。综上所述, 本试验创建的二次回归模型合理可靠、成效显著, 能够用于对试验结果进行深入分析。因此, 通过剔除不显著因素, 将选定的系数插入 7 d 抗压强度的完全二次多项式方程中, 得到以下方程:

$$Y_{7d} = -733.02723 + 19.29897X_1 + 2212.82924X_2 + 103.755196X_3 + 9.375X_1X_2 - 0.315101X_1^2 - 3380.81628X_2^2 - 4.46357X_3^2$$

Table 10. Model reliability analysis

表 10. 模型可靠性分析

模型	R^2	校正 R^2 (adjusted R^2)	预测 R^2 (predicted R^2)	变异系数 (C. V %)	信噪比
7 d	0.9807	0.9632	0.9303	1.87	18.81

另外可以通过图 5 残差正态图, 可以看出所有的点大致在一条线上, 初步判断满足正态分布。预测值与实际值关系比较图 6 可以看出, 回归方程的模型是有效的。

如图 7~9 中, 可得到电石渣置换率、纤维含量、纤维长度两两交互作用下对无侧限抗压强度的影响, 通过构建相应的曲面来呈现双因素交互作用的显著性。在图 7 中, 显示了在固定的纤维长度(12 mm)下, 电石渣的置换率和纤维含量的交互作用。从整体上来看, 纤维复合固化土随着电石渣的替换量和纤维含量的增加, 无侧限抗压强度呈先上升后降低的趋势, 说明响应面的最高点在中间位置。同时, 通过等值线可以看出越靠近内部椭圆的等高线数值越高, 且越靠近中心区域颜色越深, 说明内部对应的抗压强度最高。所对应的电石渣置换率为 40%, 纤维含量为 0.4%, 二者在次交互作用下显著, 强度提升效果好。

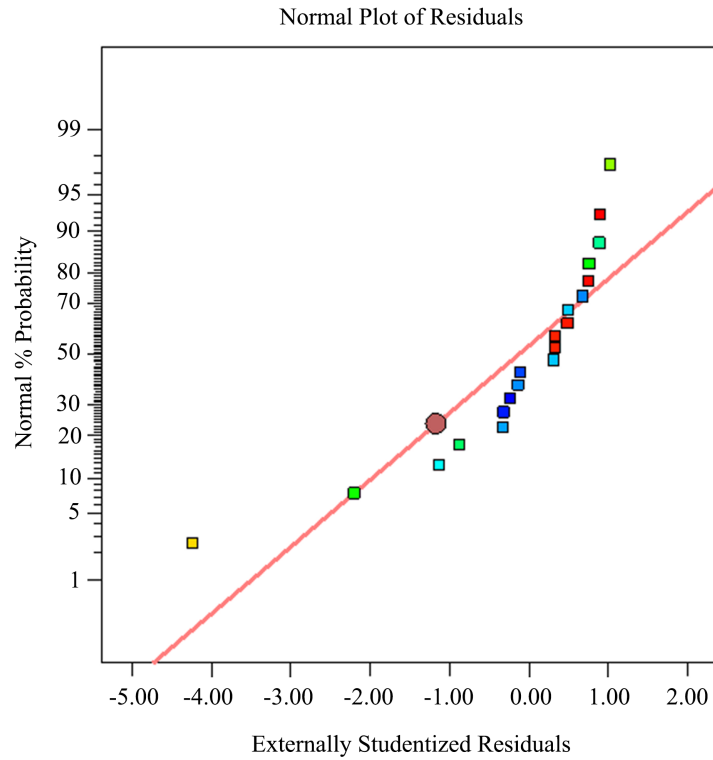


Figure 5. The normal graph of the student residual of the 7 day compressive strength
图 5. 7 d 抗压强度学生化残差的正态图

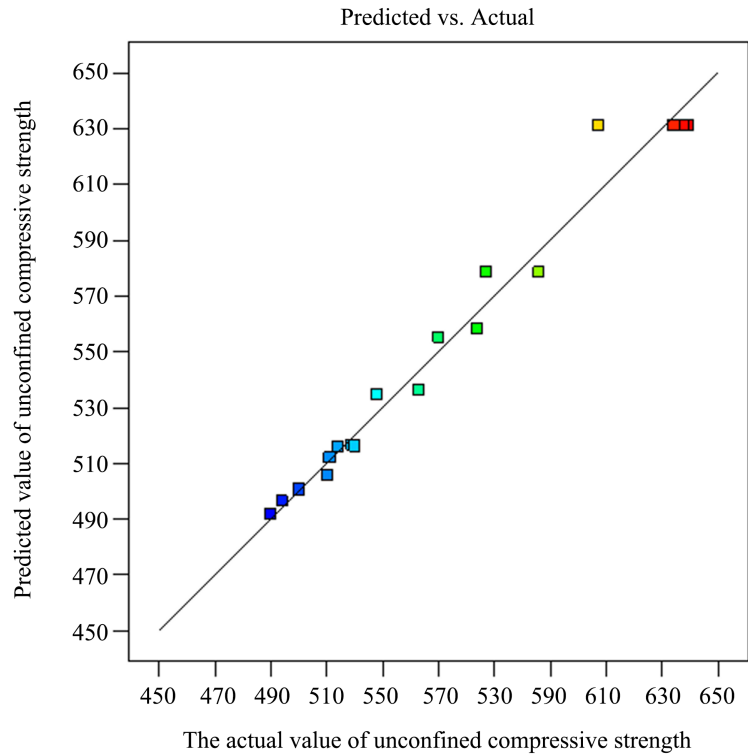
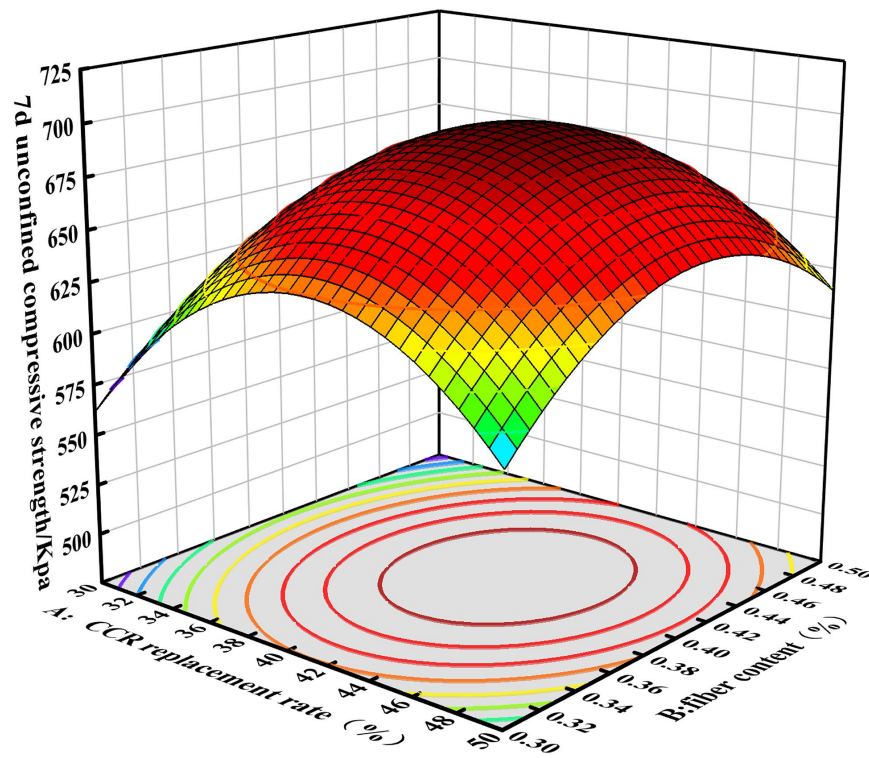
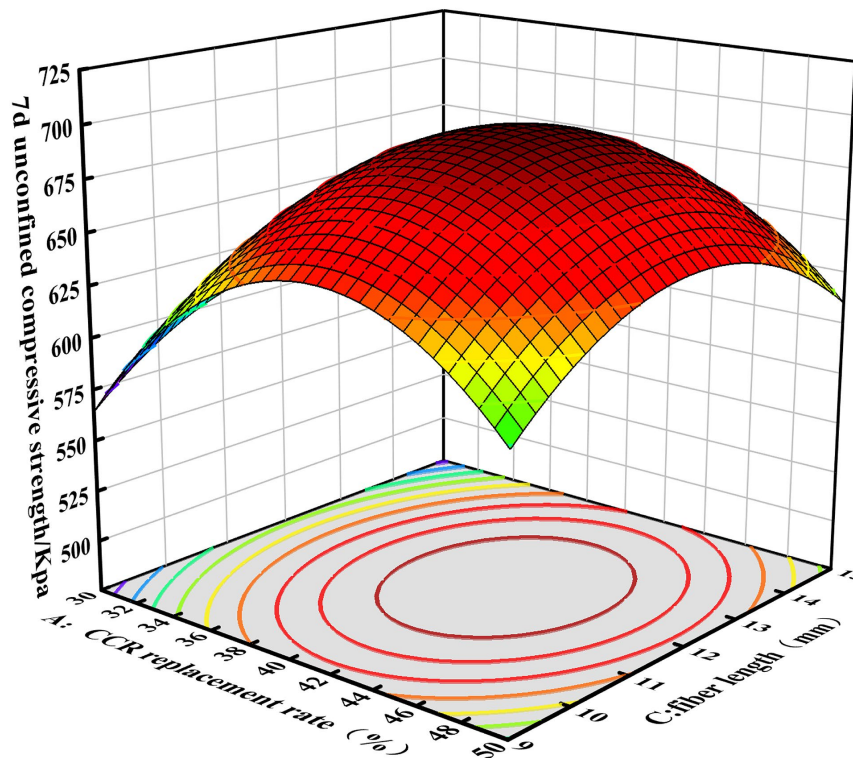


Figure 6. The relationship between the actual value and the predicted value of 7 day compressive strength
图 6. 7 d 抗压强度实际值和预测值的关系

Figure 7. X_1X_2 interaction surface图 7. X_1X_2 相互作用面Figure 8. X_1X_3 interaction surface图 8. X_1X_3 相互作用面

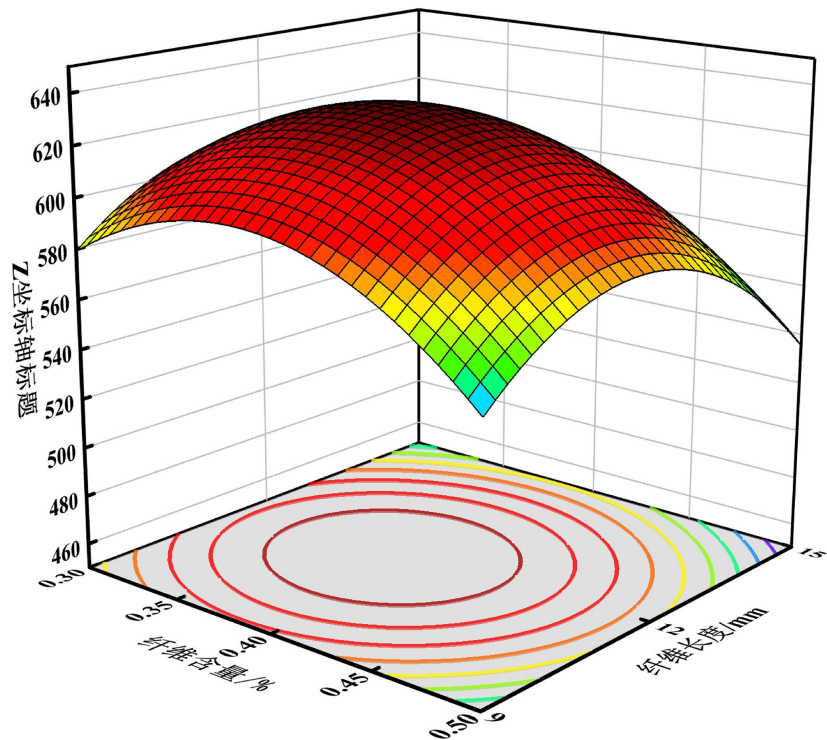


Figure 9. X_2X_3 interaction surface
图 9. X_2X_3 相互作用面

在图 8 中可以看出, 当玄武岩纤维为 12 mm 时, 随着电石渣置换率的增加, 无侧限抗压强度先上升后下降。原因是前期粉煤灰的活性未被电石渣完全充分激发, 以至于无侧限抗压强度随电石渣的置换率增加处于上升阶段。当达到 40% 时, 电石渣在水的作用下电离出 OH^- 和 Ca^{2+} , 加快了粉煤灰中的 Si 和 Al 键的断裂, 水化反应已经充分反应。电石渣进一步增多, 高碱环境下使得快速生成的凝胶包裹住粉煤灰原料, 水分难以进入发生反应。同时电石渣的增加, 粉煤灰的减少, 没有过多原料可以及时反应, 共同导致整体强度下降。当电石渣置换率为 40%, 随着纤维长度增加, 强度并不是一直上升。其原因是, 纤维长度过长, 在土体中分布不均匀, 导致纤维在土体中发生团聚作用, 使得土体出现分层现象, 有开裂的趋势, 破坏了土体的整体性, 导致土体的强度降低。当纤维长度适中时, 它们能够较好地分散在基体中, 并与基体形成较强的界面粘结。此时, 纤维的长度足够长, 可以在裂纹扩展时有效桥接裂缝, 并分散应力。

如图 9 所示, 在玄武岩纤维的含量和长度相互作用中, 当纤维含量为 0.5%。纤维长度为 9 mm, 三维图形下垂最低点, 说明二者在此位置下, 对无侧限抗压强度的影响提升较低。纤维长度一定时(12 mm), 纤维的掺入发挥了裂损防控以及桥连作用, 以及纤维自身亲水性好, 使纤维与固化基体更加稳定粘合在一起。随着掺量的增多, 逐渐形成相互交错的“纤维网”, 在外力的作用下, 纤维网在土体中形成的支撑力可以抵消集中应力, 防止脆性破坏。但掺量超过 0.4% 时, 过多纤维导致团聚, 使得基体无法很好的黏聚在一起, 内部不致密, 甚至会出现分层断裂。因此, UCS 的整体强度增强效果降低。

借助软件, 将 7 d 的无侧限抗压强度最大值作为优化目标。经过优化可得到最佳值为: 电石渣置换率: 36.24%, 纤维含量 = 0.378%, 纤维长度 11.62 mm, 为了验证配合比的最佳效果是否一致, 将实验值和预测值进行比较, 发现实验值为 649.5 kPa, 预测值为 637.3 kPa, 两者误差为 1.88%。为了方便计算, 因此确定最佳效果为电石渣置换率 36.24%, 纤维含量 0.38%, 纤维长度 11.6 mm。

4. 结论

1) 通过单因素法, 确定了三个因素的范围值。电石渣置换率为 30%~50%, 玄武岩纤维含量为 0.3%~0.5%, 玄武岩纤维长度为 9~15 mm。

2) 基于响应面法建立了 7 d 无侧限抗压强度的预测回归模型, 并验证了模型具有可靠性。对 7 d 无侧限抗压强度的影响因素大小是电石渣置换率 > 纤维含量 > 纤维长度。并得到了最优配比, 分别为电石渣置换率 36.24%, 纤维含量 0.38%, 纤维长度 11.6 mm。

参考文献

- [1] 白玫. 中国水泥工业碳达峰、碳中和实现路径研究[J]. 价格理论与实践, 2021(4): 4-11+53.
- [2] 吴岳伟, 张露, 王克, 等. 浅析我国工业固废资源化及磷石膏利用政策[J]. 化工管理, 2025(13): 53-55.
- [3] 翟大伟. 我国固体废物综合利用产业发展: 政策演进与模式创新[J]. 价格理论与实践, 2024(6): 95-101.
- [4] 杜祥琬. 固废资源化利用是高质量发展的要素[J]. 人民论坛, 2022(9): 6-8.
- [5] 徐日庆, 文嘉毅, 董梅. 工业废料固化浅层淤泥质土研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(5): 85-91.
- [6] 全佳, 郭培荣, 方斌, 等. 粉煤灰和电石渣稳定黄土的路用性能研究[J]. 散装水泥, 2023(4): 174-176.
- [7] 闫炜炀. 赤泥、电石渣与粉煤灰混合料的强度与渗透特性研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [8] 杨世玉, 赵人达, 曾宪帅, 等. 用自然纤维增强地聚物材料: 综述[J]. 材料导报, 2021, 35(7): 7107-7113.
- [9] 肖盼, 蔺鹏杰, 陈楠, 等. 石灰-玄武岩纤维改良红层泥岩填料力学性能试验研究[J/OL]. 工程科学与技术, 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20250314.1704.011.html>, 2025-05-04.
- [10] Hong, Y., Wu, X. and Zhang, P. (2017) Construction Technology and Mechanical Properties of a Cement-Soil Mixing Pile Reinforced by Basalt Fibre. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2017**, Article 9736465. <https://doi.org/10.1155/2017/9736465>
- [11] 张天佑. 纤维加筋土的强度特性及增强机制研究[J]. 工程与建设, 2020, 34(2): 330-331+334.
- [12] Zhao, N., Wu, H. and Huang, Z. (2021) Strength Behavior of Red Clay Reinforced by Basalt Chopped Fiber. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, Article No. 15. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06275-w>
- [13] Hong, Y., Wu, X. and Zhang, P. (2017) Construction Technology and Mechanical Properties of a Cement-Soil Mixing Pile Reinforced by Basalt Fibre. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2017**, Article 9736465. <https://doi.org/10.1155/2017/9736465>
- [14] Ghasem Ghanbari, P., Momeni, M., Mousivand, M., et al. (2022) Unconfined Compressive Strength Characteristics of Treated Peat Soil with Cement and Basalt Fibre. *International Journal of Engineering*, **35**, 1089-1095. <https://doi.org/10.5829/IJE.2022.35.05B.24>
- [15] Cai, Y., Zang, Z., Zuo, X., Liu, F., Li, L., Lu, K., et al. (2023) Research on the Performance of Calcium Carbide Slag-Fly Ash Stabilized Soil. *Advances in Civil Engineering*, **2023**, Article 4571162. <https://doi.org/10.1155/2023/4571162>
- [16] Suttiwapa, P., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., Rattanasak, U. and Jitsangiam, P. (2021) Strength Behavior and Autogenous Shrinkage of Alkali-Activated Mortar Made from Low-Calcium Fly Ash and Calcium Carbide Residue Mixture. *Construction and Building Materials*, **312**, Article 125438. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125438>