基于响应面法的黏土改良石墨尾砂性能分析*

蒋睿新[1,2]，王正君[1,2]，温雅晶[1,2]，杜英欣[1,3]，王丹[1,4]

（1.黑龙江大学 水利电力学院， 黑龙江 哈尔滨 150006；
2.黑龙江大学 寒区水利工程重点实验室， 黑龙江 哈尔滨 150006；
3.黑龙江黑大水利工程质量检测有限公司， 黑龙江 哈尔滨 150078；
4.黑龙江农垦科信工程质量检测有限公司， 黑龙江 佳木斯市 154002）

摘要：为了增强石墨尾砂的抗剪性能，在室内直剪试验的基础上，通过单因素试验确定黏土掺量、含水率、生石灰掺量和聚丙烯纤维掺量对石墨尾砂抗剪强度的影响。采用响应面法（RSM）得到了黏土、水、生石灰的最佳配合比，并对最优配比方案进行验证。利用扫描电镜试验分析试样的微观特性。结果表明：随着黏土、水、生石灰和聚丙烯纤维的掺入，石墨尾砂固化物的抗剪强度和黏聚力均先升高后降低，内摩擦角趋于稳定；当黏土掺量为29.38%，含水率为15.82%，生石灰掺量为3.59%时，石墨尾砂固化物黏聚力最优，为9.417 3 kPa，试验得到的黏聚力平均值为9.487 kPa，预测值与试验值之间的相对误差为0.7%，小于5%，验证了该响应面设计模型的可行性。SEM结果表明，改良后石墨尾砂颗粒与黏土之间聚合形成团聚结构，提高了固化物的抗剪强度。研究成果对石墨尾矿库边坡的加固和防护具有重要意义。

关键词：石墨尾砂；黏土改良；抗剪强度；黏聚力；响应面法

中图分类号：TD926.4；TU521.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)04-0172-09

Performance Analysis of Graphite Tailings Improved by Clay Based on Response Surface Methodology

JIANG Ruixin[1,2], *WANG Zhengjun*[1,2], *WEN Yajing*[1,2], *DU Yingxin*[1,3], *WANG Dan*[1,4]

(1.School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150006, China;
2.Key Laboratory of Cold Zone Water Conservancy Engineering, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150006, China;
3.Heilongjiang Heida Water Conservancy Project Quality Inspection Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang 150078, China;
4.Heilongjiang Agricultural Reclamation Kexin Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Jiamusi, Heilongjiang 154002, China)

Abstract: In order to enhance the shear performance of graphite tailings, based on the indoor direct shear test, the effects of clay content, water content, quicklime content and polypropylene fiber content on the shear strength of graphite tailings were determined by single factor test. The optimum mix ratio of clay, water and quicklime was obtained by response surface method (RSM), and the optimum mix ratio scheme was verified. The microscopic characteristics of the samples were analyzed by scanning electron microscopy. The results show that with the addition of clay, water, quicklime and polypropylene fiber, the shear strength and cohesion of the solidified graphite tailings increase first and then decrease, and the internal friction angle tends to be stable. When the clay content is 29.38%, the water content is 15.82%, and the quicklime content is 3.59%, the cohesion of the solidified graphite tailings reaches the best, which is 9.417 3 kPa. The average cohesion obtained by the test is 9.487 kPa. The relative error between the predicted value and the test value is 0.7%, less than 5%, which verifies the feasibility of the response surface design model. The SEM results show that the agglomeration structure is formed between the modified graphite tailings particles and the clay, which improves the shear strength of the solidified material. The research results are of great significance to the reinforcement and protection of graphite tailings reservoir slope.

Key words: Graphite tailings, Clay improvement, Shear strength, Cohesive, Response surface method

---

* **收稿日期**：2024-06-25
基金项目：黑龙江省生态环境厅科研项目（HST2022GF004）；黑龙江省重点研发计划指导类科研项目（GZ20220138）
作者简介：蒋睿新（2000—），男，黑龙江哈尔滨人，硕士研究生，主要从事尾矿综合利用研究。E-mail：jrxsir@163.com
通信作者：王丹（1986—），女，河北昌黎人，高级工程师，主要从事水工结构工程研究。E-mail：412435874@qq.com

0 引言

石墨是当今高科技军事和现代工业发展不可或缺的非金属材料[1],主要产于中国、印度和巴西[2]。然而,每生产 1 t 石墨会产生 10～15 t 石墨尾砂,目前处理石墨尾砂的方法是直接填埋,会对环境造成较为严重的污染[3]。大量堆放的石墨尾砂不仅浪费了土地资源,更会污染矿区环境和造成安全隐患,如空气和地下水污染、溃坝等[4-5]。由于石墨尾砂具有渗透性强、结构松散、黏聚性弱等特点,使得一半以上的尾矿库在降雨渗透、径流侵蚀等作用下发生溃坝事故[6]。因此,增加石墨尾砂的密实度与整体稳定性在保障工程质量方面显得尤为重要。

用水泥和石灰作为胶凝材料固化石墨尾砂是目前最有效的方法[7-8],而水泥对环境影响较大。对此,任园等[9]以黏土作为磷尾矿砂的胶凝辅助材料,分析不同黏土掺量下改良尾矿砂的力学性能变化规律,得出黏土掺量为 50%可满足路基填料性能要求。李世敏等[10]分析了交通荷载作用下黏土改良尾矿砂动力特性,结果表明黏土最佳掺量为 30%,此时对尾矿砂改良效果显著。JIANG 等[11]基于能量耗散理论计算,在铁尾砂中加入不同含量的聚丙烯纤维并进行直剪试验,结果表明,聚丙烯纤维可以改善铁尾矿砂剪切性能,但由于复合胶凝材料之间存在相对复杂的交互作用,有必要对其进行多目标优化,以此来确定最佳配合比掺量。

本文基于单因素试验(黏土掺量、含水率、生石灰掺量、聚丙烯纤维掺量)确定影响因素范围取值,得到 3 因素 3 水平共 17 组试验方案,利用 Design Expert 13 中的 Box-Behnken 试验设计(BBD)构建黏土改良石墨尾砂黏聚力试验模型,通过响应面法研究 3 种因素(黏土掺量,含水率,生石灰掺量)对石墨尾砂黏聚力补强效果的影响规律。

1 试验

1.1 试验材料

石墨尾砂取自黑龙江省鹤岗市萝北县基坑,呈灰白色颗粒状,石墨尾砂的基本物理参数见表 1。

试验黏土取自鹤岗市萝北县基坑,取过 0.5 mm 筛子筛分的土样,在 105 ℃烘箱中烘干后呈黄褐色,经液限塑限试验验证为粉质黏土,其基本物理性质指标见表 2。

表 1 石墨尾砂基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of graphite tailings

含水率/%	表观密度/(kg·m^{-3})	堆积密度/(kg·m^{-3})	孔隙率/%
5.18	2 857	1 450	49.2

表 2 试验黏土的基本物理性质指标

Table 2 Basic physical property indexes of test clay %

液限	塑限	塑性指数
41.983	26.50	15.483

聚丙烯纤维长度为 6 mm,其主要性能指标见表 3。

表 3 聚丙烯纤维主要性能指标

Table 3 Main performance indexes of polypropylene fibers

抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/MPa	密度/(g/cm^3)	直径/μm	熔点/℃
469	28.4	4 236	0.91	32.7	169

石墨尾砂和黏土的 XRD 衍射图谱如图 1 所示,化学成分含量见表 4 和表 5。可以看出,石墨尾砂和黏土主要化学成分均为 SiO_2 和 Al_2O_3。石墨尾砂、黏土和生石灰粒径分布曲线如图 2 所示。由图 2 可知,石墨尾砂颗粒较大,粒径多集中在120～500 μm,累计含量达到了 58.4%,塑性较差,颗粒之间基本没有黏聚力,胶结作用弱,整体性较差。黏土粒径较小,由于黏土颗粒之间存在毛细作用和吸附作用,对石墨尾砂有一定的黏聚性[12],因此,可以考虑采用黏土对石墨尾砂进行改良,增加石墨尾砂的黏结性和塑性。

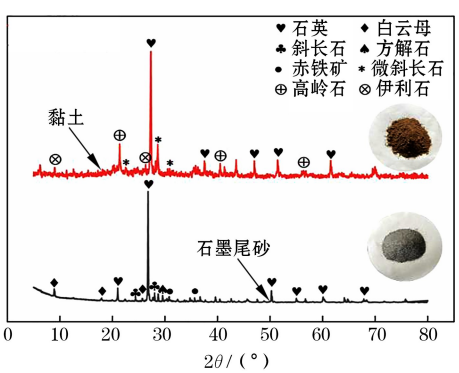


图 1 黏土和石墨尾砂的 XRD 衍射图谱

Fig.1 XRD diffraction patterns of clay and graphite tailings

表 4 石墨尾砂化学成分

Table 4 Chemical components of graphite tailings %

SiO_2	SO_3	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	TiO_2	V_2O_5	其他
48.01	15.41	10.44	9.86	8.10	4.02	2.49	0.72	0.10	0.85

表 5 黏土化学成分

Table 5 Chemical components of clay %

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	MgO	TiO_2	SO_3	MnO	P_2O_5	其他
63.50	17.78	9.24	3.33	2.30	1.72	1.33	0.21	0.20	0.16	0.23

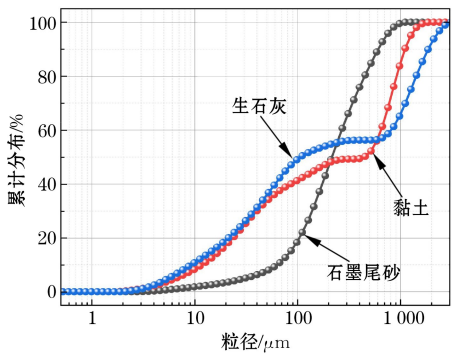


图 2 石墨尾砂、黏土和生石灰粒径分布曲线

Fig.2 Particle size distribution curves of graphite tailings, clay and quicklime

1.2 试样制备

试验前将石墨尾砂放入 105 ℃烘箱中烘干至恒量,再过孔径为 1 mm 的筛子。在样品制备过程中,首先,向石墨尾砂粉末中加入水并搅拌 3 min,其中水占固体质量分数的 15%,然后,将掺入料混入石墨尾砂粉末中并搅拌 3 min,最后,将混合物放入直径为 61.8 mm、高度为 20 mm 的环形切割器中,放入混合物之前在环形切割器内部涂抹一层凡士林。通过压实形成上表面和下表面均平滑的样品,将样品包装在保鲜膜中并放置在自然环境中 24 h 后,进行直接剪切试验。由于尾砂的颗粒较粗,渗透系数较大,采用快剪方式,将试样推进直剪仪剪切盒内,施加 50 kPa 的垂直荷载,剪切速率为 0.8 mm/min,直至试样剪切破坏,记录破坏时测力计读数。垂直荷载依次递加至 100 kPa、150 kPa、200 kPa,重复上述剪切步骤。

1.3 单因素试验方案设计

试验选择黏土固化石墨尾砂,对不同含水率条件下固化物的抗剪强度进行比较,分别外掺生石灰和聚丙烯纤维,并开展不同掺量条件下固化物的抗剪强度试验。黏土掺量分别为 10%、20%、30%、40%、50%,含水率分别为 15%、16%、17%、18%、19%、20%,生石灰掺量分别为 1%、3%、5%、7%、9%,聚丙烯纤维掺量分别为 0.25%、0.5%、0.75%、1%。材料配比见表 6。

表 6 材料配比

Table 6 Material ratios

方案	黏土掺量/%	含水率/%	生石灰掺量/%	聚丙烯纤维掺量/%
1	10	16	0	0.00
2	20	16	0	0.00
3	30	16	0	0.00
4	40	16	0	0.00
5	50	16	0	0.00
6	20	15	0	0.00
7	20	17	0	0.00
8	20	18	0	0.00
9	20	19	0	0.00
10	20	20	0	0.00
11	20	16	1	0.00
12	20	16	3	0.00
13	20	16	5	0.00
14	20	16	7	0.00
15	20	16	9	0.00
16	20	16	0	0.25
17	20	16	0	0.50
18	20	16	0	0.75
19	20	16	0	1.00

1.4 响应面分析试验方案设计

根据前期的单因素试验,得到 3 因素 3 水平共计 17 组试验方案,即黏土掺量 3 个水平分别为 20%、30%、40%;含水率 3 个水平分别为 15%、16%、17%;生石灰掺量 3 个水平分别为 1%、3%、5%,分析不同掺量水平对石墨尾砂固化物黏聚力的影响。

1.5 SEM 微观试验方案设计

采用 Sigma300 扫描电子显微镜进行试样微观结构研究。选取最优方案的典型试样,放入无水乙醇中浸泡 24 h,切割成长×宽×高为 2 mm×2 mm×1 mm 的立方体,对其进行烘箱干燥,去除水分。为了提高试样表面的导电性,对试样表面进行镀金处理,利用扫描电子显微镜观察试样的微观特征。

2 试验结果及分析

根据规范《土工试验标准方法》(GB/T 50123—2019)[13],将剪应力-剪切位移曲线中稳定峰值的剪应力作为试样抗剪强度,得到不同掺量下黏土-石墨尾砂固化物的抗剪强度。抗剪强度的大小是评价

固化物稳定性的重要指标,黏聚力是表示同种物质内部相邻各部分之间的相互吸引力。

2.1 单因素试验结果及分析

不同黏土掺量、含水率、生石灰掺量、聚丙烯纤维掺量条件下,固化物抗剪强度变化曲线如图 3 所示,固化物黏聚力和内摩擦角的变化如图 4 所示。

2.1.1 不同黏土掺量对固化物的影响

黏土颗粒包裹石墨尾砂形成团聚,发生胶结作用。由图 3(a)可知,随着黏土掺量的增多,固化物抗剪强度呈现先升高再降低的趋势,存在明显的峰值。分析认为,随着黏土的增加,石墨尾砂颗粒之间的孔隙逐渐被黏土颗粒填充,部分细颗粒开始参与混合固化物骨架的构成,即混合固化物的骨架逐渐由以尾矿砂颗粒为主导转变为由尾矿砂颗粒和黏土颗粒共同承担,使骨架抵抗变形的能力和承载能力得到提升[10]。当黏土掺量为 30%时,固化物抗剪强度最大。通过比较图 4(a)内摩擦角和黏聚力可知,黏土掺量为 20%时,内摩擦角最大,根据经济效益,选择后续试验黏土掺量为 20%。

2.1.2 不同含水率对固化物的影响

由图 3(b)和图 4(b)可知,随着含水率增加,固化物抗剪强度、黏聚力和内摩擦角均先升高后降低。申春妮等[14]、吴琪等[15]研究表明土壤黏聚力的大小受到水膜影响,而水膜的黏聚力又关系到土壤颗粒之间的黏聚力,进而影响到土壤的力学性质。从图中可以看出,固化物含水率为 16%时处于最佳饱和状态,土体表面的弱结合水形成公共水化膜,与尾砂之间形成较好的连接,抗剪强度、黏聚力和内摩擦角均为最高值。但随着含水率继续增加,颗粒之间开始存在大量的自由水,颗粒之间的吸引力逐渐减弱,固化物抗剪强度逐渐降低。

2.1.3 不同生石灰掺量对固化物的影响

由图 3(c)和图 4(c)可知,CaO 与水反应生成 $Ca(OH)_2$ 时黏结石墨尾砂,填充石墨尾砂与黏土之间的孔隙,从而促进颗粒生长和致密化,同时改变了颗粒之间的连接方式,石墨尾砂与黏土颗粒形成的骨架之间及其表面附着的结晶胶结产物逐渐增多,形成一个整体,从而使得固化物的抗剪强度增强。但过多的生石灰会导致固化物所需的含水量减少,导致石墨尾砂与黏土并不能黏结起来[16]。因此,在生石灰掺量为 3%时为一个峰值,随后抗剪强度、黏聚力和内摩擦角均随着生石灰掺量的增加而降低。

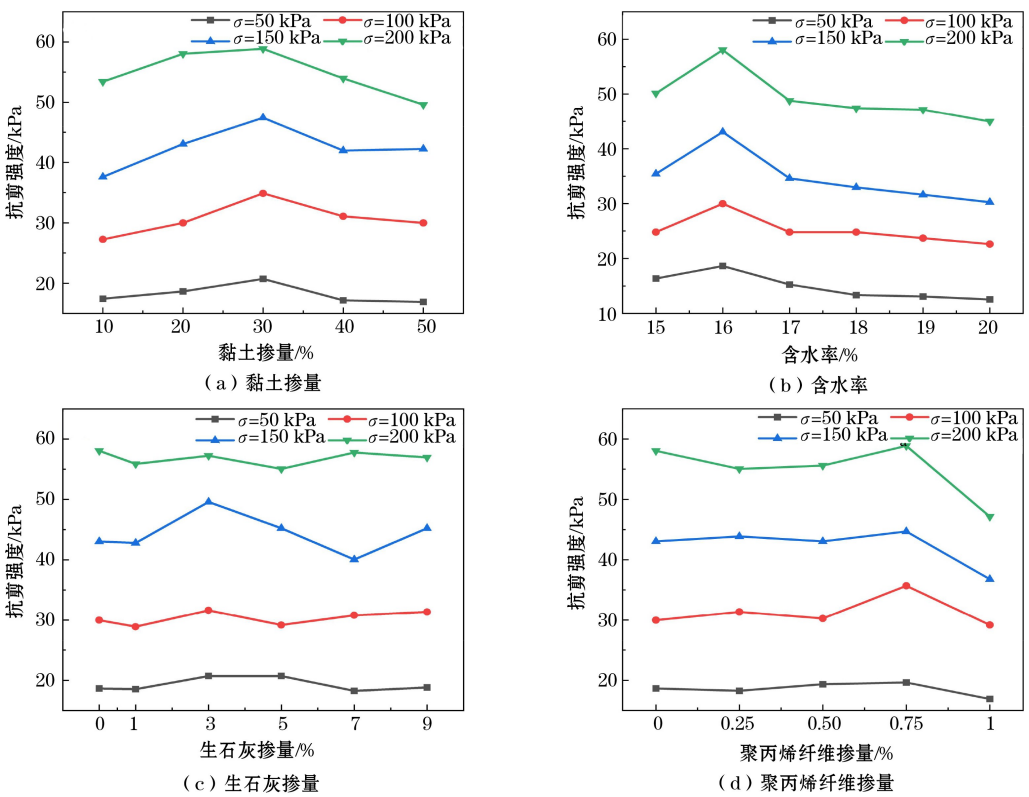


图 3 不同因素掺量下固化物抗剪强度变化曲线

Fig.3 The shear strength change curves of the solidified material under dosoge of different factors

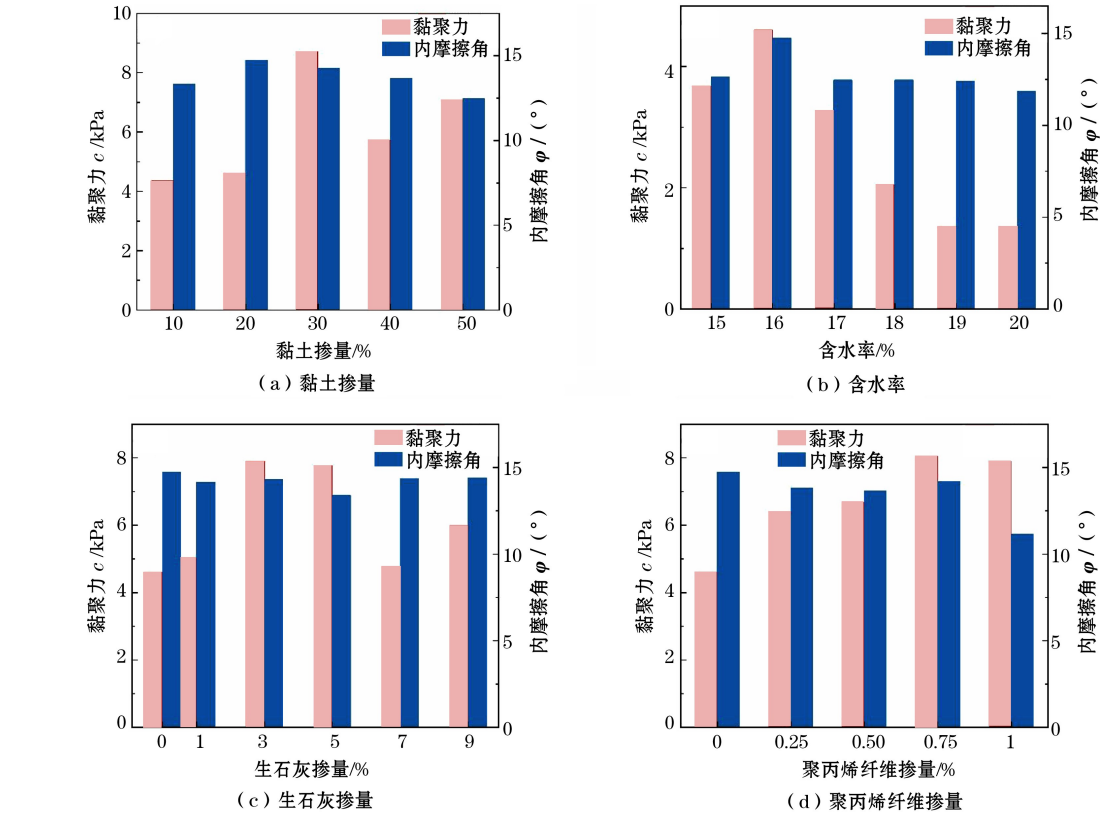


图 4 不同因素掺量下固化物黏聚力及内摩擦角变化情况

Fig.4 The change of cohesion and internal friction angle of solidified material under dosage of different factors

2.1.4 不同聚丙烯纤维掺量对固化物的影响

由图 3(d)和图 4(d)可知,聚丙烯纤维掺量存在一个峰值,为 0.75%,当聚丙烯纤维掺量从 0 增加到 0.75%时,少量纤维填充在石墨尾砂与黏土之间的孔隙中,利用空间约束效应增加了纤维增强固化物的黏聚力,内摩擦角与黏聚力随摩擦效应的加强而增大。继续掺入纤维后,纤维在石墨尾砂中聚集成团状,导致其与颗粒间的接触效应明显降低,部分区域纤维出现交织穿插现象,相互桥搭,借助石墨尾砂形成网状结构,限制结构内部颗粒的变形,纤维良好的延展性使得网状结构稳定性较好,有效增强固化物的抗变形能力,最终致使固化物黏聚力和内摩擦角减小,抗剪强度随之降低[17]。

2.2 黏聚力响应面分析试验

2.2.1 黏聚力响应面分析试验结果

本研究借助 Design Expert 13 软件的 Box-Behnken 进行试验方案设计,通过回归和方差分析对结果进行相应处理,以此来确定响应因子的主效应和交互效应,求得黏聚力达到最大值下的配比组合。试验设计方案如下:将黏土掺量(*A*)、含水率(*B*)和生石灰掺量(*C*)作为响应因子,进行响应面分析设计。共设计了 17 组试验,其选择原则如图 5 所示,黏聚力响应面设计配比方案及黏聚力试验结果见表 7。其中方案 1~12 为析因试验,试验点位于图 5 立方体每条棱的中点;方案 13~17 用来估计试验误差,位于设计区域的中心,是基于单因素试验中获得的最佳值。

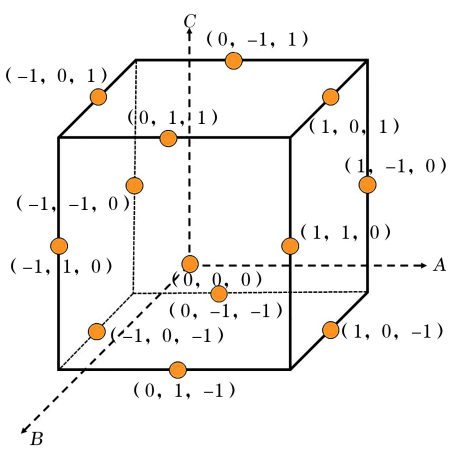


图 5 响应面选择原理

Fig.5 Box-design selection principle

表 7 设计方案与结果

Table 7 Design schemes and results

方案	黏土掺量 A/%	含水率 B/%	生石灰掺量 C/%	黏聚力 c/kPa
1	20	15	3	7.358
2	40	15	3	6.674
3	20	17	3	6.949
4	40	17	3	6.630
5	20	16	1	7.085
6	40	16	1	6.633
7	20	16	5	7.494
8	40	16	5	7.129
9	30	15	1	8.221
10	30	17	1	8.494
11	30	15	5	8.946
12	30	17	5	8.221
13	30	16	3	9.423
14	30	16	3	9.268
15	30	16	3	9.468
16	30	16	3	9.404
17	30	16	3	9.314

2.2.2 响应面试验设计分析与最优化预测

对黏聚力 c 作方差分析,结果见表 8。

表 8 黏聚力 c 方差分析结果

Table 8 Results of variance analysis of cohesion

来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值($F>F_\alpha$)
模型	19.510 0	9	2.170 0	266.48	<0.000 1
A	0.414 0	1	0.414 0	50.90	0.000 2
B	0.102 4	1	0.102 4	12.59	0.009 4
C	0.230 2	1	0.230 2	28.30	0.001 1
AB	0.033 3	1	0.033 3	4.09	0.082 7
AC	0.001 9	1	0.001 9	0.23	0.644 3
BC	0.249 0	1	0.249 0	30.61	0.000 9
A^2	15.670 0	1	15.670 0	1 926.05	<0.000 1
B^2	1.240 0	1	1.240 0	153.02	<0.000 1
C^2	0.549 3	1	0.549 3	67.53	<0.000 1
残差	0.056 9	7	0.008 1	—	—
失拟项	0.030 0	3	0.010 0	1.48	0.346 7
绝对误差	0.027 0	4	0.006 7	—	—
总离差	19.570 0	16	—	—	—

注:1.概率 $P<0.01$ 代表影响极为显著,$P<0.05$ 代表影响显著,$P<0.1$ 代表影响相对显著;2.$R^2=0.997\ 1$,修正后 $R^2=0.973\ 3$,$CV=1.12\%$。

由表 8 可以看出,模型 $P<0.01$,表明此模型极为显著;失拟项 $P=0.346\ 7>0.1$,表明此模型失拟项差异不显著,即与试验数据进行拟合过程中非正常误差所占比例小,模型可信。黏聚力 c 的变异系数 $CV=1.12\%$,说明试验结果可信度较高[18]。黏聚力预测值与实际值对比如图 6 所示,由图 6 可知,复相关系数 $R^2=0.997\ 1$,表明实际值与预测值黏聚力拟合良好,相关程度较高。

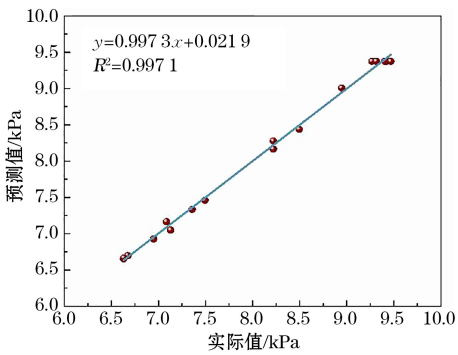
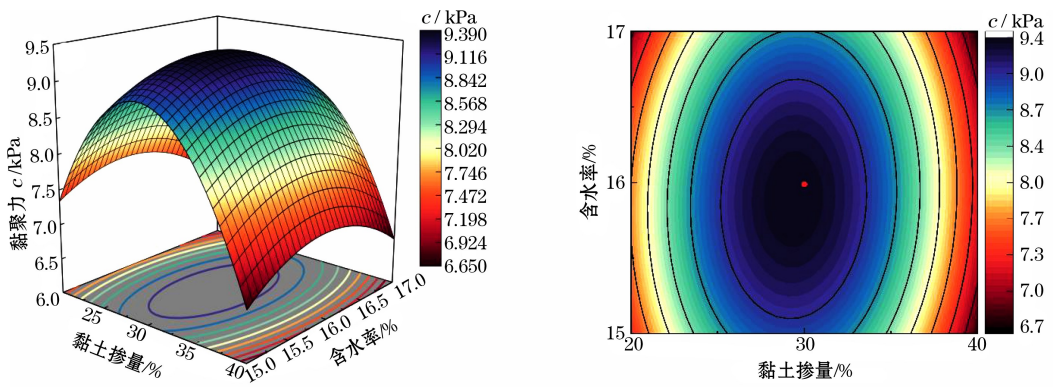


图 6 黏聚力预测值与实际值对比

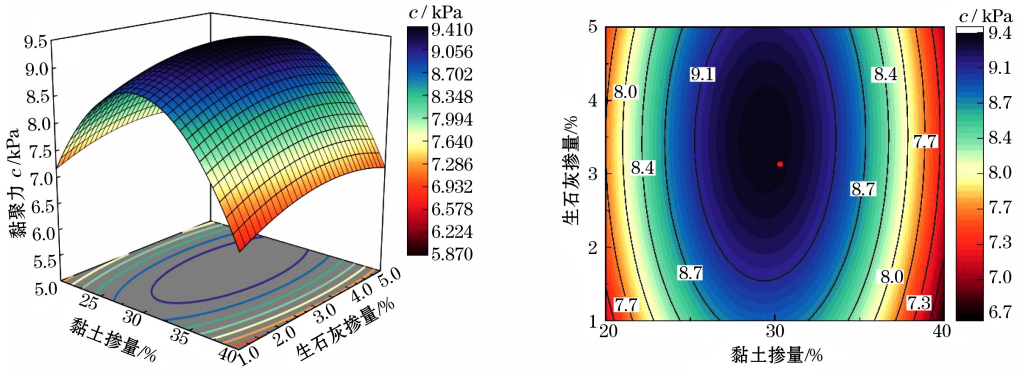
Fig.6 Comparison between predicted values and actual values of cohesion

回归方程的一次项中,因素 A,B,C 的 P 值均小于 0.01,且 $P(A)<P(C)<P(B)$,说明在影响石墨尾砂固化物黏聚力的因素中,黏土掺量的影响最显著,其次是生石灰掺量,最后是含水率,可能是由于黏土掺量相较其他两种因素变化较大,且是构成固化物内部骨架导致。二次项中 A^2,B^2,C^2 对黏聚力的影响均极为显著,交互项 AB,BC 的 P 值均小于 0.1,AC 大于 0.1,且 $P(BC)<0.01<P(AB)<0.1$,说明含水率和生石灰掺量的交互作用极为明显,黏土掺量和含水率的交互作用相对显著。

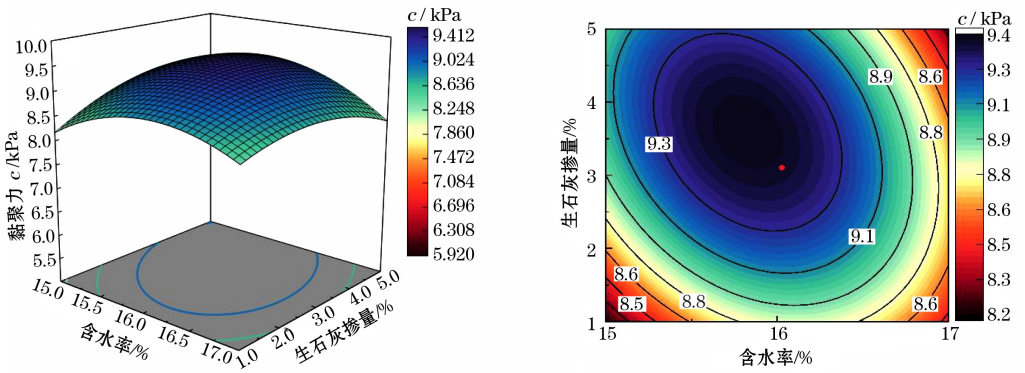
绘制各响应因子构成的响应曲面图,如图 7 所示。



(a) 黏土掺量与含水率交互作用



(b) 黏土掺量与生石灰掺量交互作用



(c) 含水率与生石灰掺量交互作用

图 7 黏土掺量、含水率、生石灰掺量之间的交互作用对黏聚力的影响

Fig.7 The influence of the interaction between clay content, moisture content and quicklime content on cohesion

由图 7 可知,各响应因子交互作用下,黏聚力响应面均向上凸起,随着各单因素掺量的增加,黏聚力均呈现出先升高后降低的趋势,响应面最高点即为黏聚力最大值,其中 $c(BC)<c(AB)$。分析认为,黏土颗粒遇水膨胀,填充石墨尾砂内部孔隙,但过多的水分子与黏土结合时,土颗粒周围吸附的水膜变厚,黏土的黏结作用降低[19]。生石灰属于无机性胶凝材料,与水发生化学反应生成氢氧化钙,对石墨尾砂固化物起到骨架作用,提高抗剪强度,相较于黏土,生石灰遇水膨胀效果明显[20]。综上得到石墨尾砂固化物最佳黏聚力配比方案,见表 9,最佳预测黏聚力为 9.417 3 kPa,满意度为 0.982。

表 9 石墨尾矿固化物最佳黏聚力配比方案

Table 9 The best cohesion ratio scheme of graphite tailings solidified material

黏土掺量 A/%	含水率 B/%	生石灰掺量 C/%	黏聚力 c/kPa	满意度
29.38	15.82	3.59	9.417 3	0.982

2.3 最佳配比方案验证

最佳配比方案验证结果见表 10。由表 10 可知,3 组平行试验下黏聚力平均值为 9.487 kPa,与理论预测值的偏差为 0.7%,表明响应面优化设计试验合理,试验结果可为相关试验提供理论依据。

表 10 最佳配比方案验证结果

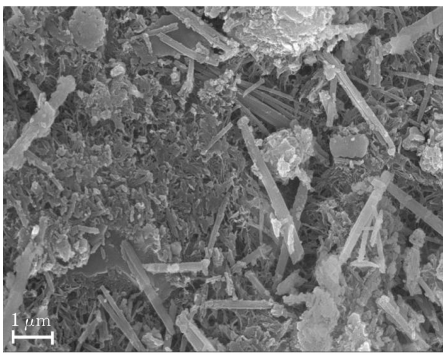
Table 10 Validation results of the best ratio scheme

序号	黏土掺量/%	含水率/%	生石灰掺量/%	黏聚力 c/kPa
1	29.38	15.82	3.59	9.56
2	29.38	15.82	3.59	9.48
3	29.38	15.82	3.59	9.42
平均值	—	—	—	9.487

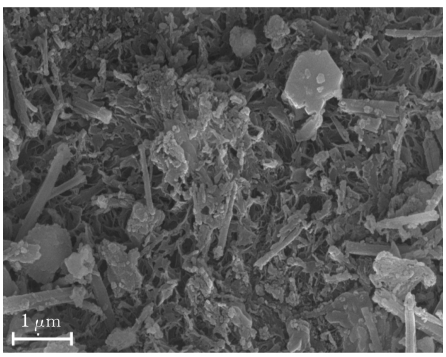
2.4 微观形貌分析

利用 SEM 对最优掺量下固化物的微观形貌进行扫描分析,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,石墨尾砂的形状大多呈现片状和方块状。最优掺量下固化物微观形态如图 9 所示,石墨尾砂表面附着黏土颗粒,生石灰与游离的自由水生成氢氧化钙,填充孔隙,形成聚合物,石墨尾砂颗粒之间没有明显的边界,呈现出一个整体结构,使其孔隙变小,颗粒间的黏结力得到增强,这是石墨尾砂固化物抗剪强度增加的主要原因[21-24]。生石灰中的 CaO 进一步与水结合,生成 $Ca(OH)_2$,使结构更加致密[22],很好地分散在石墨尾砂和黏土之间,显著提高了尾砂颗粒

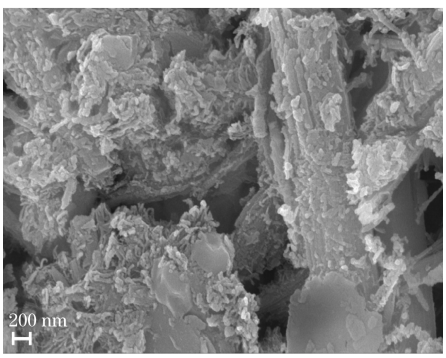
之间的摩擦力,分散固化物形成裂隙时产生的张拉应力,一定程度上限制了裂隙发展。



(a) 放大10 000 倍



(b) 放大15 000 倍



(c) 放大20 000 倍

图 8 最优掺量下固化物微观形貌

Fig.8 Microscopic morphology of the solidified material under the optimal dosage

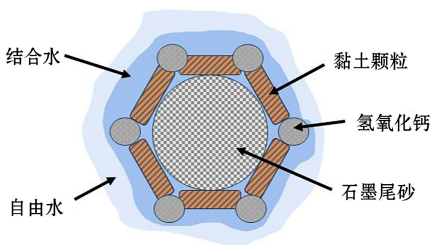


图 9 最优掺量下固化物微观形态

Fig.9 The microstructure of solidified material under the optimal dosage

3 结论

(1) 单因素试验表明,黏土掺量、含水率、生石灰掺量、聚丙烯纤维掺量对石墨尾砂抗剪强度的影响均先升高再降低。单因素试验所得最佳掺量组合为黏土掺量为 30%,含水率为 16%,生石灰掺量为 3%,聚丙烯纤维掺量为 0.75%。

(2) 在响应面设计下的 3 种主要因素中,影响效果从大到小依次为黏土掺量、生石灰掺量和含水率。含水率和生石灰交互作用(BC)与黏土和含水率(AB)交互作用对石墨尾砂黏聚力的影响明显,且 $c(BC)<c(AB)$。

(3) 根据预测模型可知,当黏土掺量为 29.38%、含水率为 15.82%、生石灰掺量为 3.59%时,黏聚力预测值为 9.417 3 kPa,试验验证得到的黏聚力平均值为 9.487 kPa,预测值与试验值之间的相对误差为 0.7%,小于 5%,验证了该响应面设计模型的可行性。

参考文献(References):

[1] ANDROULIDAKIS C, KOUKARAS E N, HADJINICOLAOU M, et al. Non-Eulerian behavior of graphitic materials under compression[J]. Carbon,2018,138:227-233.

[2] 高照国,刘红召,杨卉芃,等.世界石墨资源分布概况及供求变化趋势[J].矿产综合利用,2018(3):26-29.
GAO Zhaoguo, LIU Hongzhao, YANG Huipeng, et al. General distribution and demand-supply tendency for worldwide graphite resources[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2018(3):26-29.

[3] CUI N, SUN L, BAGAS L, et al. Geological characteristics and analysis of known and undiscovered graphite resources of China[J]. Ore Geology Reviews,2017,91:1119-1129.

[4] 邓金鹏,宋英华,胡少华,等.尾矿库溃坝对下游高速公路桥梁的损伤和滑动破坏评估[J].金属矿山,2023(12):220-226.
DENG Jinpeng, SONG Yinghua, HU Shaohua, et al. Damage and sliding failure assessment of downstream expressway bridges caused by tailings pond dam break[J]. Metal Mine,2023(12):220-226.

[5] GOU M F, ZHOU L F, THEN N W Y. Utilization of tailings in cement and concrete: a review[J]. Science and Engineering of Composite Materials,2019,26(1):449-464.

[6] 刘红岩,刘康琦,周月智,等.尾矿库渗流场及坝体稳定性的三维数值分析[J].矿业研究与开发,2023,43(11):129-136.
LIU Hongyan, LIU Kangqi, ZHOU Yuezhi, et al. Three-dimensional numerical analysis of the seepage field of the tailings reservoir and stability of the tailings dam[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):129-136.

[7] 李军卫,刘长明,单雪峰.水泥改良铁尾矿砂路基填料的力学特性[J].矿产综合利用,2021(3):193-199.
LI Junwei, LIU Changming, SHAN Xuefeng. Research on mechanical properties of cement-improved iron tailings sand roadbed filler[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2021(3):193-199.

[8] 吕绍伟,姜屏,钱彪,等.铁尾矿砂力学特性及再生利用研究进展[J].硅酸盐通报,2020,39(2):466-470+512.
LYU Shaowei, JIANG Ping, QIAN Biao, et al. Research progress on mechanical properties and recycling of iron tailings sand[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020,39(2):466-470+512.

[9] 任园,邵静.黏土改良磷尾矿砂用作路基填料的研究与应用[J].公路,2018,63(11):46-49.
REN Yuan, SHAO Jing. Study and application of clay modified phosphorus tailings used as embankment filler[J]. Highway,2018,63(11):46-49.

[10] 李世敏,汤劲松,孙家豪,等.交通荷载下黏土改良尾矿砂动力非线性特性试验研究[J].中国科技论文,2023,18(12):1353-1362.
LI Shimin, TANG Jinsong, SUN Jiahao, et al. Experimental study on dynamic nonlinear characteristics of tailings sand improved by clay under traffic loading [J]. China Sciencepaper,2023,18(12):1353-1362.

[11] JIANG P, LYU S W, WANG Y, et al. Investigation on direct shear and energy dissipation characteristics of iron tailings powder reinforced by polypropylene fiber [J]. Applied Sciences,2019,9(23):5098.

[12] 邓云鹏,彭镝,董梅,等.考虑毛细与吸附作用的黏土干缩开裂过程离散元模拟[J/OL].岩土工程学报:1-10[2024-05-07]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20231215.1016.002.html.
DENG Yunpeng, PENG Di, DONG Mei, et al. DEM simulation of desiccation cracking in clay considering capillarity and adsorption [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering: 1-10 [2024-05-07]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20231215.1016.002.html.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for geotechnical testing methods: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press,2019.

[14] 申春妮,方祥位,王和文,等.吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J].岩土力学,2009,30(5):1347-1351.
SHEN Chunni, FANG Xiangwei, WANG Hewen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(5):1347-1351.

[15] 吴琪,吉东伟,肖兴,等.海洋软黏土不排水循环强度的触变性试验研究[J/OL].岩土工程学报:1-8[2024-05-07]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20240209.1250.018.html.
WU Qi, JI Dongwei, XIAO Xing, et al. Experimental study on undrained thixotropic cyclic resistance characteristics of the marine soft clay[J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering: 1-8 [2024-05-07]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20240209.1250.018.html.

[16] 谢潇,王璐瑶,邓乐娟,等.生石灰改良黄土的微观机制试验研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(6):193-199.
XIE Xiao, WANG Luyao, DENG Lejuan, et al. Study on the microscopic mechanism of the loess improved by quicklime[J]. Coal Geology & Exploration,2021,49(6):193-199.

[17] 白琨,李光元,许巍,等.纤维加筋固化土抗拉强度试验研究[J].公路交通科技,2023,40(7):28-35.
BAI Kun, LI Guangyuan, XU Wei, et al. Experimental study on tensile strength of fiber-reinforced solidified soil[J]. Highway Transportation Technology,2023,40(7):28-35.

[18] 袁晓铭,卢坤玉,李兆焱,等.区域土特征函数:收敛性[J].岩土工程学报,2024,46(1):26-34.
YUAN Xiaoming, LU Kunyu, LI Zhaoyan, et al. Characteristic functions of regional soils: convergence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(1):26-34.

[19] 白帅鑫,尹超,孟维庆,等.重塑黏土抗拉强度试验研究与验证[J/OL].水文地质工程地质:1-10[2024-05-07].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2202.P.20240226.1745.002.html.
BAI Shuaixin, YIN Chao, MENG Weiqing, et al. Experimental study and verification on tensile strength of remolded clay [J/OL]. Hydrogeology & Engineering Geology: 1-10 [2024-05-07]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2202.P.20240226.1745.002.html.

[20] 王羿凯,司慧,张建中.生石灰改性膨润土有机覆盖垫制备工艺[J].东北林业大学学报,2022,50(1):131-134+139.
WANG Yikai, SI Hui, ZHANG Jianzhong. Preparation process of organic covering pad of bentonite modified by quicklime[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022,50(1):131-134+139.

[21] 金胜赫,王修山,吴越鹏.矿渣-脱硫石膏-电石渣固化剂固化黏土的研究[J].工程地质学报,2023,31(2):397-408.
JIN Shenghe, WANG Xiushan, WU Yuepeng. Study on modification of marine clay treated with new gdc soil stabilizer[J]. Journal of Engineering Geology,2023,31(2):397-408.

[22] 陈康亮,刘长武,杨伟峰,等.基于生石灰和粉煤灰改良硫酸盐渍土的强度特性[J].科学技术与工程,2020,20(26):10888-10893.
CHEN Kangliang, LIU Changwu, YANG Weifeng, et al. Strength characteristics of sulphate saline soil modified by lime and fly ash[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(26):10888-10893.

[23] 王欣,柳元浩,高永超,等.混杂纤维改良活性粉末混凝土不同方式加固剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构,2023,53(19):47-54.
WANG Xin, LIU Yuanhao, GAO Yongchao, et al. Experimental study on seismic performance of hybrid fibers modified reactive powder concrete shear wall in different strengthening ways[J]. Building Structure,2023,53(19):47-54.

[24] 苏玲霞,雷云,刘旭,等.干湿循环下纤维改良膨胀土裂隙特性研究[J].非金属矿,2023,46(6):32-35.
SU Lingxia, LEI Yun, LIU Xu, et al. Study on the fracture characteristics of fiber-amended swelling soil under dry and wet cycles[J]. Non-Metallic Mines,2023,46(6):32-35.