

# 基于响应面分析的纤维泡沫混凝土多目标优化

王述红, 李皓然, 尹宏, 贡藩

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

**摘要:** 泡沫混凝土可作为初期支护和二次衬砌之间的变形预留层, 抵抗高地应力深埋隧道围岩流变变形. 通过掺入纤维可进一步改善其压缩性能及延性, 并在一定纤维特征条件下解决抗压强度低的问题. 利用正交试验及响应面 Box-Behnken 设计法, 系统探究纤维质量分数、长度、种类等特征因素对泡沫混凝土抗压强度与弹性模量的影响, 并构建特征回归模型对配合比进行优化. 结果表明: 响应面法建立回归模型具有较高的可信度. 在多种纤维特征中, 纤维质量分数对泡沫混凝土的抗压强度和弹性模量影响最大, 同时多特征之间的交互作用对抗压强度影响较大, 而对弹性模量影响较小, 且纤维长度和纤维种类的交互作用对其抗压强度影响最为显著. 此外, 通过最大化抗压强度和最小化弹性模量的目标进行模型配合比优化, 得出最优配合比的相对误差绝对值均小于 5%. 该模型可为此工程背景下不同纤维特征的泡沫混凝土参数优化提供参考.

**关键词:** 隧道预留层; 泡沫混凝土; Box-Behnken 设计; 响应面法; 多目标优化

**中图分类号:** TU 5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)06-0122-09

## Multi-objective Optimization of Fiber Foam Concrete Based on Response Surface Analysis

WANG Shu-hong, LI Hao-ran, YIN Hong, GONG Fan

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, E-mail: shwangneu@126.com)

**Abstract:** Foam concrete serves as a deformation reserve layer between the initial support and the secondary lining, effectively resisting the rheological deformation of the surrounding rock in deeply buried tunnels with high-ground stress. The incorporation of fibers enhances its compressive performance and ductility, addressing the issue of low compressive strength under specific fiber characteristics. Orthogonal test and Box-Behnken design method of response surface were used to systematically investigate the effects of various characteristics such as fiber mass fraction, length, and types, on the compressive strength and elastic modulus of foam concrete. A characteristic regression model was developed to optimize the mix ratio. The results show that the regression model established by the response surface method demonstrates high accuracy and reliability. Among the various fiber characteristics, the fiber mass fraction has the greatest impact on both the compressive strength and elastic modulus of foam concrete. Meanwhile, the interaction among multiple characteristics significantly influences compressive strength while slightly impacts elastic modulus. Particularly, the interaction between fiber length and fiber type has the most obvious impact on compressive strength. Furthermore, by maximizing the compressive strength and minimizing the elastic modulus, the optimized mix ratio result derived from the model shows that the absolute values of the relative errors are less than 5%. The small relative errors indicate that the proposed model can provide support for the multi-objective optimization of foam concrete with different fiber characteristics in the project application.

**Key words:** tunnel reserve layer; foam concrete; Box-Behnken design(BBD); response surface method; multi-objective optimization

收稿日期: 2023-12-22

基金项目: 中国-中东欧国家高校联合教育项目(20211111); 国家自然科学基金资助项目(U1602232, 52374157); 辽宁省重点科技计划项目(2019JH2-10100035).

作者简介: 王述红(1969—), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授, 博士生导师.

随着我国铁路、公路建设的不断发展,穿越高地应力地区且工程地质环境恶劣的深埋隧道不断涌现,传统的刚性支护方式并不能满足隧道工程稳定性和安全性的要求.在初衬和二衬之间设置变形预留层用于吸收围岩流变变形,改善二次衬砌上的变形压力,保证隧道的长期稳定<sup>[1]</sup>.

泡沫混凝土作为一种无机多孔材料,具有轻质、变形能力强的优点,是一种良好的隧道支护变形预留层填充材料<sup>[2]</sup>.目前,国内外多项研究表明将泡沫混凝土作为隧道支护变形预留层填充材料的研究意义重大<sup>[3]</sup>.尽管泡沫混凝土相关特性使其在工程应用中表现出独特的优势,但不可否认其具有脆性特征显著、抗压强度低等缺陷,且需要其具备更高的压缩性和更良好的延性.因此,为确保工程的安全性和可靠性,需要深入研究和改进.国内外学者研究发现,通过引入纤维成分可以有效地提高泡沫混凝土的延性和弹性模量,并在特定特征范围内可以有效提升其抗压强度.在泡沫混凝土的制备过程中,掺入纤维的种类、长度和质量分数等因素被广泛研究,并取得了显著的成果<sup>[4-6]</sup>.

Gencel等<sup>[7]</sup>研究表明,麻类植物纤维能够大大提高泡沫混凝土的抗压、抗弯强度.Castillo-Lara等<sup>[8]</sup>研究证实,掺入碱化处理过的龙舌兰纤维能够明显提高泡沫混凝土的拉伸强度,提升了98%.Madhwani等<sup>[9]</sup>报道了当添加质量分数为1%的甘蔗渣纤维后,泡沫混凝土的抗压强度增加了约38%.然而,天然纤维在面对水泥浆的碱性环境时易降解,且具有较差的耐久性,因此合成纤维逐渐成为研究的焦点.针对合成纤维,研究发现玄武岩纤维、聚乙烯醇纤维等对泡沫混凝土的抗弯强度、抗压强度、干缩率、导热系数等性能改善具有积极作用.此外,这些研究表明,纤维的质量分数、种类以及长度等参数都对泡沫混凝土的力学性能产生显著影响.但当泡沫混凝土作为隧道支护变形预留层填充材料时,对抗压性能、弹性模量等影响的研究较少,各种纤维特征影响的交互作用也需精细的数学模型进行参数优化.综上,在本文工程背景下,泡沫混凝土在多种纤维特征之间的交互作用参数优化已经成为亟需解决的问题<sup>[9-10]</sup>.

目前已有一些研究采用正交试验寻求最佳配比,但这种方法存在局限性.正交试验无法建立明确的函数关系来描述因素与响应值之间的关系,同时它也无法充分考虑因素之间的相互作

用.响应面法(response surface method, RSM)是一种数学和统计学结合的方法,它可以建立多因素与响应变量的数学模型,评估各因素交互作用影响,寻找最优响应值<sup>[11]</sup>.RSM具有低实验次数、低成本、高精度的优势.近年来,它不仅在化学、生物和食品领域应用广泛,也开始为砂浆及混凝土的配合比优化提供新的研究思路.吕官记等<sup>[12]</sup>采用RSM,选取黏结强度的最大值、抗折强度和抗压强度的最小值作为目标优化,得到三元聚合物砂浆的最优配比,并进行了宏观性能与微观形貌的机理分析.黄炜等<sup>[13]</sup>采用RSM中的BBD(Box-Behnken design)方法研究了水灰质量比等因素对再生混凝土力学性能的影响,并进行了多目标参数优化.Zhang等<sup>[14]</sup>通过RSM研究了外加剂和骨料级配对再生混凝土强度的影响.上述研究表明,在建筑材料配合比优化时,应用RSM具有明显的优势.但目前建筑材料领域中,特别是泡沫混凝土的力学性能研究中,其应用仍然相对有限.

综上,本文通过开展以纤维质量分数、种类和长度为因素的正交试验,获取不同因素对泡沫混凝土的宏观性能影响规律.引入RSM,结合初期支护和二次衬砌之间的变形预留层的工程背景,以优化其压缩性能及延性为目标,将抗压强度和弹性模量作为响应值,以正交试验为基础建立响应面模型,分析各因素对泡沫混凝土性能的影响.为完善在多种纤维特征的影响作用下泡沫混凝土的配合比多目标优化提供新的参考.

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

本文采用42.5级普通硅酸盐水泥,采用动物蛋白和生物物质复合的有机发泡剂.其制备泡沫的一般实测密度为50 kg/m<sup>3</sup>,且稳定性好、闭孔率高,常用于制备低密度泡沫混凝土材料,见表1.

表1 发泡剂性质  
Table 1 Foaming agent properties

性质参数	说明
外观	黑色液体
稀释倍数	40
使用温度/°C	5~60
溶解性	用水稀释为均匀液体,静置24 h不分层、不沉底

试验选用现有制备泡沫混凝土研究中常用 (PVA)和聚丙烯纤维(PP),相关性能详见表2. 的3种纤维,即玄武岩纤维(BF)、聚乙烯醇纤维

表2 纤维的力学性能  
Table 2 Mechanical properties of fiber

纤维种类	密度	单丝直径	弹性模量	抗拉强度
	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\mu\text{m}$	GPa	MPa
BF	2.63~2.65	7~15	91.0~110.0	3 000~4 800
PVA	1.29	15.09	40.0	1 830
PP	0.91	32.70	4.2	469

泡沫混凝土试件制备过程中,通常会在体系中添加羟丙基甲基纤维素醚(HPMC)作为稳泡剂以增强泡沫稳定性<sup>[10]</sup>.研究表明,HPMC能够快速在水泥浆体-泡沫界面形成兼具弹性和润滑特性的薄膜.相较于普通水膜形成的泡沫,加入稳泡剂后可显著提升泡沫的可压缩性,从而增强新拌浆体的稳定性.

### 1.2 试验方案

本试验以  $700 \text{ kg/m}^3$  的泡沫混凝土为研究对象,试件水胶质量比为 0.4. 为提升试验效率,并同

时全面考察 3 个因素,试验采用三因素三水平的正交试验设计,见表 3,试验条件及配比见表 4.

表3 正交试验设计  
Table 3 Orthogonal test design

水平	因素		
	纤维种类	纤维长度	纤维质量分数
		mm	%
1	BF	3	0.1
2	PVA	6	0.2
3	PP	9	0.3

表4 试验条件及配比  
Table 4 Test conditions and ratios

编号	纤维种类	纤维长度	纤维质量分数	$\text{m/kg}$				泡沫体积
		mm	%	水泥	水	稳泡剂	纤维	$\text{m}^3$
1	BF	3	0.1	581.94	232.78	3.5	2.64	0.64
2	BF	6	0.2	580.56	232.22	3.5	5.28	0.64
3	BF	9	0.3	579.17	231.67	3.5	7.92	0.64
4	PVA	6	0.1	581.94	232.78	3.5	1.29	0.64
5	PVA	9	0.2	580.56	232.22	3.5	2.58	0.64
6	PVA	3	0.3	579.17	231.67	3.5	3.87	0.64
7	PP	9	0.1	581.94	232.78	3.5	0.91	0.64
8	PP	3	0.2	580.56	232.22	3.5	1.82	0.64
9	PP	6	0.3	579.17	231.67	3.5	2.73	0.64

### 1.3 试件制备

试件制备时,需先将水泥与 HPMC 干拌 1 min 后,分 2 次加水搅拌成均质浆体.掺入捻散的聚酯纤维后继续搅拌 5 min.试验采用发泡机物理制泡法制备泡沫( $50\pm 5$ )  $\text{kg/m}^3$ ,按设计体积比混入浆体搅拌均匀<sup>[5]</sup>.试件静置 48 h 后脱模,再放入环境温度为  $20^\circ\text{C}$  左右、相对湿度标准为 95% 以上的养护室内,养护 28 d.制备完成的纤维泡沫混凝土试件如图 1 所示.

试验抗压强度测试依照标准《泡沫混凝土:JG/T 266—2011》进行<sup>[15]</sup>.试验采用万能液压试验机进行测试,应用位移控制法以  $0.1 \text{ mm/min}$  进行加载,

加载速率设定为  $1.5 \text{ kN/s}$ .施加压力时,保持均匀加载至试块破裂,并记录最大压力以计算抗压强度.每组测试使用 3 个试块,确保试验结果可靠.

### 1.4 响应面法

常见的响应面法包括全因子设计(FFD)、Box-Behnken 设计(BBD)和中心组合设计(CCD).FFD 需要大量数据,且其模型精度较低.CCD 和 BBD 在评估三因素试验设计方面更加广泛,具有更高的准确性.与 CCD 相比,BBD 无需进行多次连续试验,所需试验次数较少,并可以限制因素-水平的变化范围<sup>[11, 16-17]</sup>.综合考虑试验工程背景,本研究采用 BBD 建立响应面模型.



图 1 制备完成的纤维泡沫混凝土试件

Fig. 1 The prepared fiber foam concrete specimens

如图 2 所示, RSM 主要建立因素与响应值之间的函数模型, 包括数据收集、模型建立、模型检验、最佳参数优化、最佳参数验证 5 个步骤. 多项式响应值  $Y$  的数学表达式<sup>[13]</sup>为

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n (\beta_i x_i) + \sum_{i=1}^n (\beta_{ii} x_i^2) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\beta_{ij} x_i x_j) + \varepsilon \quad (1)$$

式中:  $Y$  为响应值;  $\beta_0$  为常数项;  $x_i$  和  $x_j$  为独立变量;  $\beta_i, \beta_{ii}$  为多次项系数;  $\beta_{ij}$  为交互项系数;  $\varepsilon$  为误差;  $n$  为变量数.

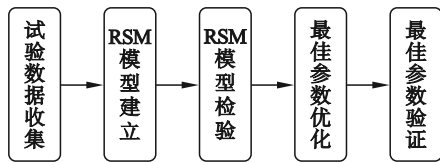


图 2 响应面法模型建立及分析流程

Fig. 2 RSM model establishment and analysis process

RSM 中的方差分析可以确定模型的交互作用影响、回归系数, 以及评估模型的显著性和可靠性<sup>[18]</sup>. 相关系数  $R^2$  和调整系数  $R_a^2$  的数学表达式见式(2)和式(3)<sup>[13]</sup>.

$$R^2 = 1 - \frac{S_r}{S_m + S_r} \quad (2)$$

$$R_a^2 = \frac{S_r / D_r}{(S_m + S_r) / (D_m + D_r)} \quad (3)$$

式中:  $S_r$  为残差平方和;  $S_m$  为回归平方和;  $D_r$  为残差自由度;  $D_m$  为回归自由度.

单个响应的渴求值  $d_i$  和渴求函数  $D$  的数学表达式见式(4)和式(5)<sup>[13]</sup>. 渴求函数  $D$  越接近于 1 时, 优化结果可靠性越高.

$$d_i = \begin{cases} 0, & Y_i \leq L; \\ \left[ \frac{Y_i - L}{U - L} \right]^{w_i}, & L < Y_i < U; \\ 1, & Y_i \geq U. \end{cases} \quad (4)$$

$$D = d_1^{w_1} d_2^{w_2} \quad (5)$$

式中:  $Y_i$  为第  $i$  个响应拟合值;  $L$  为第  $i$  个响应下限值;  $U$  为响应上限值;  $w_i$  为第  $i$  个响应权重.

### 1.5 静态压缩耗能

泡沫混凝土作为一种工程用隧道支护变形预留层填充材料, 静态压缩能耗是评估其工程应用性能的关键指标, 其主要和最大承受荷载与变形能力有关. 试样能耗可通过荷载-位移曲线围成的阴影部分面积来衡量, 其具体计算式见式(6), 一般选取试样 4 mm 变形处为能耗计算终点, 计算示意图如图 3 所示.

$$S = \int_0^d F(x) dx \quad (6)$$

式中:  $F(x)$  为荷载, kN;  $S$  表示能耗, J;  $x$  表示位移, mm.

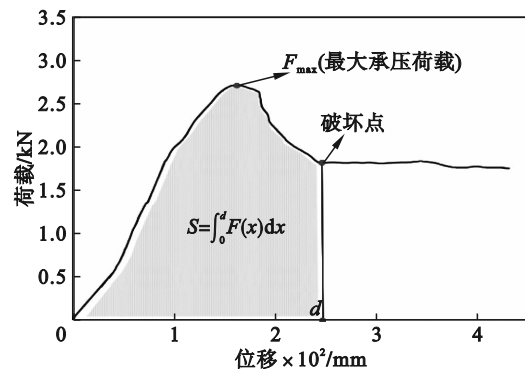


图 3 静态压缩能耗计算示意图

Fig. 3 Diagram of energy consumption calculation for static compression

## 2 结果与分析

### 2.1 试验结果与模型分析

试验设置 4 组中间因素-水平对照组用于响应面分析, 得出包括正交试验在内 13 组试件的试验结果, 见表 5.

利用 Design-Expert 软件对表 5 数据进行拟合分析, 得到抗压强度和弹性模量的响应面回归模型  $Y_1$  和  $Y_2$ .

$$Y_1 = 4.95 - 0.6971A - 0.0696B + 0.2279C + 0.3325AB - 0.1592AC + 0.4625BC - 0.5296A^2 - 0.2429B^2 - 0.5646C^2,$$

$$Y_2 = 435.47 - 62.65A - 15.88B + 14.63C.$$

其中:  $A$  为纤维种类;  $B$  为纤维长度;  $C$  为纤维质量分数.

表 6~表 7 显示了抗压强度、弹性模量回归模型计算结果. 由表 6 和表 8 可以得出:  $Y_1$  的  $P$  值为 0.0019,  $F$  值为 85.05, 表明回归模型在统计学上

具有极高显著性,其可信度非常高.这表明模型的系数不是由随机误差引起的,而是具有明显的统计学意义.相关系数 $R^2$ 为 0.996 1,调整系数 $R_a^2$ 与预测系数 $R_p^2$ 之间的差异较小( $R_a^2-R_p^2<0.2$ ),即试验值与预测值有良好的相关性.其次,变异系数为 2.37,表明抗压强度数据的变异性相对较小,这意味着试验结果之间的一致性较高,从而增强了模型的可靠性.而且,信噪比为 24.407 6,远远大于 4,进一步说明了模型的稳定性和精

确度.

综上,纤维质量分数和种类均对纤维泡沫混凝土的抗压强度具有显著影响,且各元素之间存在一定的交互作用,对抗压强度也具有一定的影响,其中纤维长度和种类的交互作用对抗压强度的影响较为显著.这些结果为进一步优化纤维泡沫混凝土的配方和制备工艺提供了重要的科学依据,有助于提高该材料的性能和应用范围.

表 5 正交试验结果  
Table 5 Results of orthogonal test

序号	因素			试验结果		
	纤维种类	纤维长度	纤维质量分数	抗压强度	弹性模量	静态压缩能耗
		mm	%	MPa	MPa	J
1	BF	3	0.1	4.79	499.98	40.2
2	BF	6	0.2	4.16	401.38	78.5
3	BF	9	0.3	2.65	343.46	113.8
4	PVA	6	0.1	5.12	502.00	38.0
5	PVA	9	0.2	4.64	418.26	71.9
6	PVA	3	0.3	3.22	387.00	116.4
7	PP	9	0.1	4.76	489.00	40.0
8	PP	3	0.2	3.98	459.00	66.7
9	PP	6	0.3	3.23	384.62	87.6
10	PVA	6	0.2	4.89	434.54	69.8
11	PVA	6	0.2	4.97	432.95	68.6
12	PVA	6	0.2	4.86	467.84	63.7
13	PVA	6	0.2	5.09	441.05	70.1

由表 7 和表 8 可以得出: $Y_2$ 的 $P$ 值小于 0.000 1, $F$ 值为 49.25,回归模型具有明显的显著性,可信度非常高;同时,相关系数 $R^2$ 为 0.942 6,调整系数 $R_a^2$ 与预测系数 $R_p^2$ 比较接近( $R_a^2-R_p^2<0.2$ ),即试验值与预测值有很好的相关性;变异系数为 3.07,信噪比为 21.202 2,远远大于 4,进一步说明了模型的可靠性和精确度.纤维质量分数对纤维泡沫混凝土的弹性模量有着非常显著的影响,纤维长度和种类均对弹性模量具有显著影响.各元素之间的交互作用对纤维泡沫混凝土的弹性模量不存在明显影响.

## 2.2 响应面分析

对比分析各组试件的静态压缩能耗,考虑实际工程应用,制备既能承受更大变形又具备一定抗压强度的变形预留层材料.试验选取抗压强度和弹性模量作为目标响应值,结合现有的线性回归模型绘制相应的 3D 响应面图,分析两因素相互作用对纤维泡沫混凝土抗压强度和弹性模量

的影响,结果如图 4 和图 5 所示.

由图 4a 可知,采用 PVA 进行试验时,当纤维长度小于 6 mm 时,纤维长度对材料的抗压强度无明显影响,而纤维质量分数对抗压强度的影响较为剧烈.随着纤维质量分数的增加,抗压强度迅速降低.然而,当纤维长度大于 6 mm 时,其对材料抗压强度产生轻微影响,抗压强度随纤维长度的增加略微降低,纤维质量分数对抗压强度影响较大,抗压强度随纤维质量分数的增加而逐渐降低.在图 4b 中,当纤维长度和纤维质量分数一定时,PVA 的抗压强度略高于 PP,而 PP 的抗压强度高于 BF.然而,当纤维长度和纤维种类一定时,抗压强度随着纤维质量分数的增加而降低.在图 4c 中,当纤维质量分数一定时,随着纤维长度的增加,PVA 的抗压强度始终较高,无明显变化.PP 的抗压强度随着纤维长度增加而逐渐升高,而 BF 的抗压强度则随之降低,其抗压强度较低.

表6 抗压强度模型方差分析  
Table 6 Variance analysis of compressive strength model

项目	平方和	自由度	平方差	F值	P值	是否显著
回归模型 $Y_1$	8.080 0	9	0.898 0	85.05	0.001 9	显著
A(纤维种类)	1.010 0	1	1.010 0	96.05	0.002 3	显著
B(纤维长度)	0.010 1	1	0.010 1	0.96	0.400 1	不显著
C(纤维质量分数)	0.108 4	1	0.108 4	10.27	0.049 2	显著
AB	0.088 4	1	0.088 4	8.38	0.062 8	不显著
AC	0.020 3	1	0.020 3	1.92	0.259 9	不显著
BC	0.171 1	1	0.171 1	16.21	0.027 5	显著
$A^2$	0.585 3	1	0.585 3	55.44	0.005 0	显著
$B^2$	0.123 1	1	0.123 1	11.66	0.042 0	显著
$C^2$	0.665 2	1	0.665 2	63.00	0.004 2	显著
绝对误差	0.031 7	3	0.000 0	—	—	—
总离差	8.110 0	12	—	—	—	—

表7 弹性模量模型方差分析  
Table 7 Variance analysis of elastic modulus model

项目	平方和	自由度	平方差	F值	P值	是否显著
回归模型 $Y_2$	26 347.35	3	8 782.45	49.25	<0.000 1	显著
A(纤维种类)	23 550.14	1	23 550.14	132.06	<0.000 1	显著
B(纤维长度)	1 512.41	1	1 512.41	8.48	0.017 2	显著
C(纤维质量分数)	1 284.81	1	1 284.81	7.20	0.025 0	显著
残差	1 604.93	9	178.33	—	—	—
失拟项	816.33	6	136.05	0.52	—	不显著
绝对误差	788.16	3	262.87	—	—	—
总离差	27 952.29	12	—	—	—	—

表8 可信度分析结果  
Table 8 Reliability analysis results

回归模型	标准差	均值	相关系数 $R^2$	调整系数 $R_a^2$	预测系数 $R_p^2$	变异系数	信噪比
$Y_1$	0.102 8	4.34	0.996 1	0.984 4	趋近1	2.37	24.407 6
$Y_2$	13.350 0	435.47	0.942 6	0.923 4	0.910 8	3.07	21.202 2

由图5a可知,当纤维长度一定时,纤维种类对弹性模量的影响较小,弹性模量随着纤维质量分数的增加而逐渐降低.由图5b可知,当纤维种类一定时,纤维长度对弹性模量的影响较小,弹性模量随着纤维质量分数的增加而逐渐降低.由图5c可知,当纤维质量分数和种类一定时,纤维长度的增加使弹性模量稍稍提升,但影响有限.当纤维质量分数和长度一定时,BF的弹性模量略低于PVA,PVA的弹性模量略低于PP.

### 2.3 模型的多目标优化及验证

应用Design-Expert软件进行配合比优化设计,优化时将抗压强度最大值和弹性模量最小值作为目标优化值,将Categorical类型因子用Design-Expert软件定义目标,得出纤维种类分别为BF,PVA,PP时的最优配比,并对3组配合比进

行试验验证,结果表明3组试验渴求函数值均大于0.7,目标优化效果良好.

为进一步验证模型精确性,使用相对误差绝对值进行验证,计算式见式(7)<sup>[13]</sup>,结果如表9所示.

$$E = \frac{|V_T - V_P|}{V_T} \times 100\%. \quad (7)$$

式中: $E$ 为相对误差绝对值; $V_T$ 为实测值; $V_P$ 为预测值.

### 2.4 微观机理分析

针对响应面模型的目标优化结果,从泡沫混凝土的微观角度分析,其多种纤维特征对抗压强度与弹性模量的影响与其微观孔结构联系密切.以正交试验的1,2,3组为例,将制备的泡沫混凝土切片后,利用MATLAB中的DIP工具箱函数

im2bw, 通过阈值变换法得到其二值图像及 3 组 试件的孔隙率及圆度值如图 6 所示.

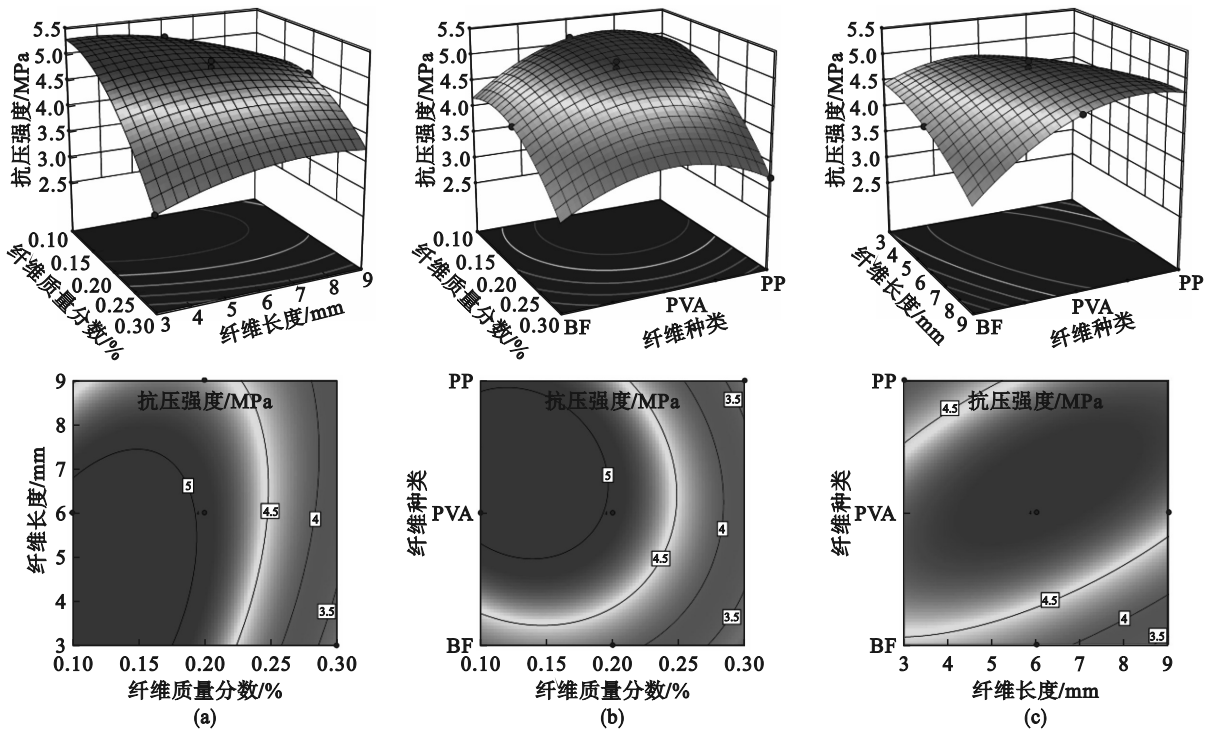


图 4 抗压强度交互作用影响规律响应面图

Fig. 4 Response surface diagram of interaction law of compressive strength

(a)—PVA; (b)—纤维长度为 6 mm; (c)—纤维质量分数为 0.2%.

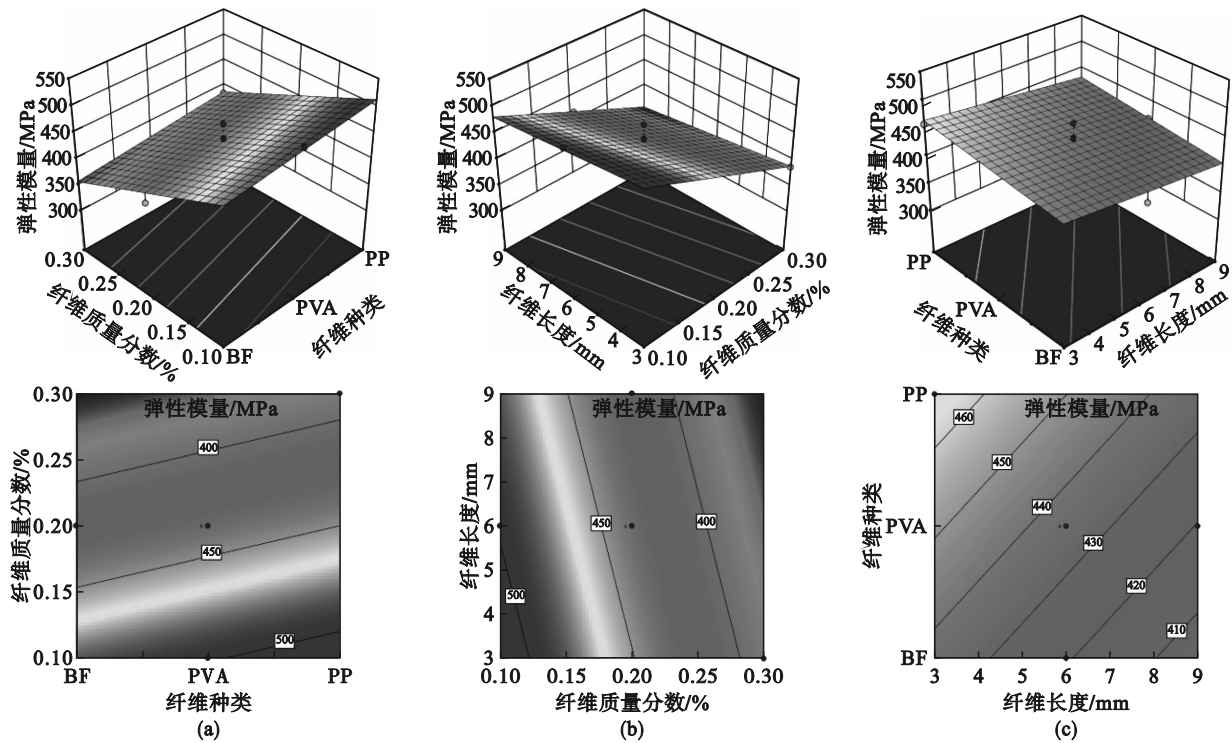


图 5 弹性模量交互作用影响规律响应面图

Fig. 5 Response surface diagram of interaction law of elastic modulus

(a)—纤维长度为 6 mm; (b)—PVA; (c)—纤维质量分数为 0.2%.

观察 3 组试件微观结构及宏观测试数据可以发现, 抗压强度和弹性模量随孔隙率降低而减小, 纤维质量分数对泡沫混凝土的抗压强度和弹

性模量影响较种类和长度更加明显. 这是因为在一定的纤维质量分数范围内, 随着纤维质量分数的增加, 消泡现象会变得更加明显, 导致孔隙率

减少.此外,纤维质量分数的增加会使紧挨着的小气孔联通融合为大气孔,导致气泡非均质性分布增加,孔结构形貌变得不稳定,从而降低了泡沫混凝土的抗压强度<sup>[18]</sup>.

表 9 响应面最优设计结果验证  
Table 9 Optimal design results verification of response surface

编号	纤维种类	纤维质量分数/%	纤维长度/mm	抗压强度			弹性模量		
				预测值/MPa	实测值/MPa	$E_1$ /%	预测值/MPa	实测值/MPa	$E_2$ /%
I	BF	23	5	4.09	3.98	2.8	409.05	416.8	1.9
II	PVA	25	8	4.40	4.27	3.0	391.95	407.6	3.8
III	PP	25	9	4.36	4.24	2.8	401.93	387.1	3.8

注: $E_1$ 为抗压强度的相对误差绝对值; $E_2$ 为弹性模量的相对误差绝对值.

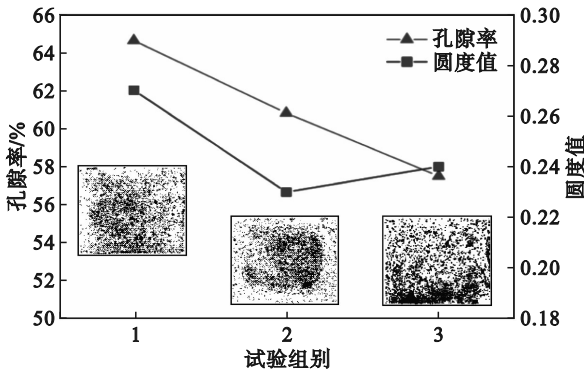


图 6 正交试验 1, 2, 3 组孔隙率、圆度值及二值化切面图像

Fig. 6 Porosity, roundness values, and binary value section images of groups 1,2 and 3 in orthogonal test

以正交试验的 1, 4, 7 组为例,将 3 组试样在静态压缩试验试件破坏后的碎块切成小于 1 cm

的试样,然后将其放置在电热鼓风干燥箱烘干,通过 SEM 观察其微观结构,如图 7 所示.

由图 7 可看出,纤维均嵌入混凝土基体中.当界面受损并开始出现裂缝时,锚定在基体中的纤维出现轻微滑动,产生摩擦阻力,起到协调变形的作用,从而提高泡沫混凝土的延性<sup>[19-20]</sup>.同时,观察发现纤维表面覆盖着一层非常厚的水化产物,这可以增强纤维与混凝土基体之间界面的结合能力.然而,随着纤维含量的增加,泡沫混凝土与纤维的黏结界面缝隙也会增大,从而导致黏结性能下降<sup>[21]</sup>.此过程中,由于不同种类纤维密度、硬度、直径等性质的不同,因此纤维在泡沫混凝土内部的协调变形能力及界面结合能力均会有一些影响.此外,纤维的长度差异也会影响其自身性质,特别是在纤维种类和长度之间存在交互作用的情况下,其对抗压强度的影响更加显著.

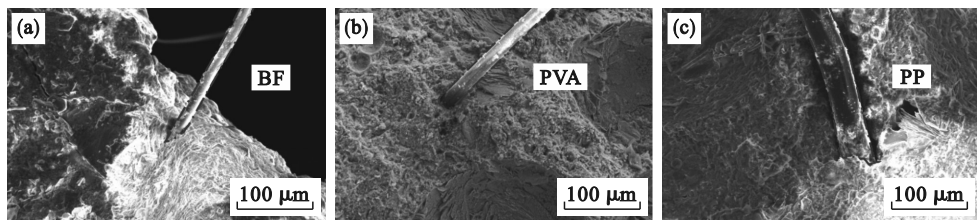


图 7 泡沫混凝土微观形貌图

Fig. 7 Micromorphology of foamed concrete

(a)—1 组; (b)—4 组; (c)—7 组.

### 3 结 论

1) 结合本研究隧道变形预留层的工程背景,应用响应面法中的 BBD 方法,建立纤维质量分数、种类和长度对泡沫混凝土抗压强度和弹性模量影响的回归模型.模型具有较高精度及可信度,能够科学准确地模拟和分析试验结果.

2) 在多种纤维特征对泡沫混凝土的影响中,纤维质量分数被证明是最显著的影响因素.其

中,对抗压强度的影响强弱顺序依次为:纤维质量分数>纤维种类>纤维长度;对弹性模量的影响强弱顺序依次为:纤维质量分数>纤维长度>纤维种类.

3) 多纤维特征之间的交互作用,对抗压强度影响较大,而对弹性模量的影响较小.其中纤维长度和纤维种类的交互作用对抗压强度的影响显著,二者在影响泡沫混凝土抗压强度时具有协同作用.

4) 以抗压强度最大值和弹性模量最小值为

目标优化因子,得出掺入纤维种类分别为 BF, PVA, PP 时泡沫混凝土的最优配合比(纤维长度介于 3~9 mm,纤维质量分数介于 0.1%~0.3%)。与实测值相比,模型预测值的相对误差绝对值均小于 5%,说明该模型可为此工程应用背景下不同纤维特征的泡沫混凝土的多目标优化提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 田洪铭,陈卫忠,谭贤君,等.高地应力软岩隧道合理支护方案研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(11):2285-2292.  
(Tian Hong-ming, Chen Wei-zhong, Tan Xian-jun, et al. Study of reasonable support scheme for soft rock tunnel in high geostress zone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(11): 2285-2292.)
- [2] 宋强,张鹏,鲍玖文,等.泡沫混凝土的研究进展与应用[J].硅酸盐学报,2021,49(2):398-410.  
(Song Qiang, Zhang Peng, Bao Jiu-wen, et al. Research progress and application of foam concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(2): 398-410.)
- [3] Wu G J, Chen W Z, Tan X J, et al. Performance of new type of foamed concrete in supporting tunnel in squeezing rock[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(2): 04019173.
- [4] Calis G, Yildizel S A, Erzin S, et al. Evaluation and optimization of foam concrete containing ground calcium carbonate and glass fibre (experimental and modelling study) [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 15: e00625.
- [5] Yavuz B O, Kaplan G, Gencil O, et al. Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 288: 123-128.
- [6] Sayadi A A, Tapia J V, Neitzert T R, et al. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 112: 716-724.
- [7] Gencil O, Yavuz B O, Kaplan G, et al. Characteristics of hemp fibre reinforced foam concretes with fly ash and Taguchi optimization [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 294: 123607.
- [8] Castillo-Lara J F, Flores-Johnson E A, Valadez-Gonzalez A, et al. Mechanical properties of natural fiber reinforced foamed concrete [J]. *Materials*, 2020, 13(14): 3060.
- [9] Madhwani H, Sathyan D, Mini K M. Study on durability and hardened state properties of sugarcane bagasse fiber reinforced foam concrete [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 4782-4787.
- [10] Hou L, Li J, Lu Z Y, et al. Influence of foaming agent on cement and foam concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 280: 122399.
- [11] Alyamac K E, Ghagari E, Ince R. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 144: 192-202.
- [12] 吕官记,季韬.基于响应面法的三元聚合物砂浆力学性能[J].建筑材料学报,2021,24(5):970-976.  
(Lyu Guan-ji, Ji Tao. Mechanical properties of ternary polymer mortar based on response surface method [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(5): 970-976.)
- [13] 黄炜,郭余婷,葛培,等.基于响应面法的聚丙烯纤维再生砖骨料混凝土配合比优化[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2709-2718.  
(Huang Wei, Guo Yu-ting, Ge Pei, et al. Mixture ratio optimization of polypropylene fiber recycled brick aggregate concrete based on response surface methodology [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(7): 2709-2718.)
- [14] Zhang Q Y, Feng X J, Chen X D, et al. Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on response surface methodology [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 259: 119776.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.泡沫混凝土:JG/T 266—2011[S].北京:中国标准出版社,2011.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Foamed concrete: JG/T 266—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.)
- [16] 王静文,王伟.玄武岩纤维增强泡沫混凝土响应面多目标优化[J].材料导报,2019,33(24):4092-4097.  
(Wang Jing-wen, Wang Wei. Response surface based multi-objective optimization of basalt fiber reinforced foamed concrete [J]. *Materials Reports*, 2019, 33(24): 4092-4097.)
- [17] Cho T. Prediction of cyclic freeze-thaw damage in concrete structures based on response surface method [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(12): 2031-2040.
- [18] Bayramov F, Tasdemir C, Tasdemir M A. Optimization of steel fiber reinforced concretes by means of statistical response surface method [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26(6): 665-675.
- [19] Tang R, Wei Q S, Zhang K, et al. Preparation and performance analysis of recycled PET fiber reinforced recycled foamed concrete [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 57: 104948.
- [20] 陈峰宾,许斌焦,华喆,等.玄武岩纤维混凝土纤维分布及孔隙结构表征[J].中国矿业大学学报,2021,50(2):273-280.  
(Chen Feng-bin, Xu Bin-jiao, Hua Zhe, et al. Fiber distribution and pore structure characterization of basalt fiber reinforced concrete [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2021, 50(2): 273-280.)
- [21] Shang X Y, Yang J W, Wang S M, et al. Fractal analysis of 2D and 3D mesocracks in recycled aggregate concrete using X-ray computed tomography images [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 304: 127083.