文章编号:1674-2974(2024)09-0177-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024098

基于响应面回归模型的纤维混凝土力学性能分析

邓友生[1,3],孟丽青[1,3†],郑云方[1,3],邹新军[2],姚志刚[1,3],肇慧玲[1,3]
(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院 西安 710054;
2. 湖南大学 土木工程学院 长沙 410082;
3. 西安科技大学 桩承结构研究中心 西安 710054)

摘 要:为研究玄武岩纤维和纤维素纤维掺量对混杂纤维轻骨料高强混凝土抗压强度、抗折强度和劈裂抗拉强度的影响,构建响应面回归模型,对比分析其力学试验实测值和预测值,并结合渴求函数获得混凝土优化配合比.结果表明:此回归模型有效且可信度高,可用于分析试验结果;两种纤维交互作用、水灰比与纤维素纤维交互作用对抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度影响显著;模型预测最优水灰比为0.30,纤维素纤维掺量为0.90 kg/m^3,玄武岩纤维掺量为4.00 kg/m^3,强度预测值与试验值间相对误差绝对值均小于5%,该回归模型可为混杂纤维轻骨料高强混凝土的配合比多目标优化提供参考.

关键词:响应面方法;高强混凝土;混杂纤维;渴求函数;配合比优化
中图分类号:TU528.041 **文献标志码**:A

Mechanical Properties Analysis of Fiber Concrete Based on Response Surface Regression Model

DENG Yousheng[1,3], MENG Liqing[1,3†], ZHENG Yunfang[1,3], ZOU Xinjun[2],
YAO Zhigang[1,3], ZHAO Huiling[1,3]
(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Pile-supported Structures Research & Test Center, Xi' an University of Science and Technology, Xi' an 710054, China)

Abstract: To study the effect of basalt fiber and cellulose fiber content on compressive, flexural, and splitting tensile strength of hybrid fiber lightweight aggregate high-strength concrete, a response surface regression model was constructed to compare and analyze the measured and predicted mechanical test values, and the optimized concrete mix ratio was obtained by combining the demand function. The results show that the regression model is effective and highly reliable, and the model can be used to analyze the test results. The interaction between the two fibers, the water-cement ratio, and the interaction between cellulose fibers have significant effects on compressive strength, flexural strength, and splitting tensile strength. The model predicts that the optimal water-cement ratio is

* **收稿日期**:2023-09-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878554), National Natural Science Foundation of China (51878554);陕西省自然科学基础研究计划重点项目(2018JZ5012), Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (2018JZ5012)
作者简介:邓友生(1969—),男,湖南桂阳人,西安科技大学教授,博士生导师
† 通信联系人,E-mail:18834401719@163.com

0.30, the cellulose fiber content is 0.90 kg/m^3, and the basalt fiber content is 4.00 kg/m^3. The absolute value of relative errors between the predicted and experimental strength values are all less than 5%, which indicates that the proposed model can provide a reference for multi-objective optimization of the mix ratio of hybrid fiber high-strength concrete.

Key words: response surface method; high strength concrete; hybrid fiber; desirability function; ratio optimization

高强混凝土是混凝土发展的一个重要方向,如轻骨料高强混凝土密度较低、强度/质量比较高、耐久性较强、比强度较强,在大跨度桥梁、高层建筑、海上石油平台等实际工程应用前景广阔[1-2].目前,典型高强轻质骨料陶粒的生产工艺已日渐成熟,高炉矿渣、膨胀页岩、膨胀黏土、粉煤灰、煤矸石、浮石等可用于生产陶粒的工业原料储量丰富,为轻骨料高强混凝土的推广应用提供了保障[3-5].但是,轻骨料高强混凝土力学强度提高时,其脆性也更加明显,极易发生断裂,无法应用于一些受拉大和高剪切结构部位.

在混凝土中掺入纤维可有效提高其延性,从而显著提高其抗震耗能能力、抗拉强度和抗弯韧性[6-9].目前,改善纤维轻骨料混凝土韧性基本集中于钢纤维、玄武岩纤维、碳纤维、聚丙烯纤维等单一掺入,如Saradar等[10]发现玄武岩纤维的存在使膨胀黏土轻骨料混凝土坍落度和抗压强度分别降低了37%和13%,其拉伸、弯曲强度和收缩率得到提高.叶艳霞等[11]在轻质高强混凝土中加入超细钢纤维、带端头钩的钢纤维和波纹钢纤维,不同程度上提高了混凝土弹性模量,0.5%~1.0%的超细钢纤维增强增韧效果最好,波纹钢纤维增韧效果不够明显.Zeng等[12]发现玄武岩纤维和聚丙烯纤维均能提高轻质混凝土轴向抗压强度.在相同体积分数下,玄武岩纤维的抗压韧性优于聚丙烯纤维.刘喜等[13]使用钢纤维和碳纤维制备LC60级纤维轻质高强混凝土,其抗压强度、抗折强度和抗拉强度显著提高,两种纤维与水泥浆间均存在良好的附着力,发挥了增强增韧的作用.Wu等[14]发现碳纤维对轻质混凝土抗压强度影响不大,当碳纤维体积分数为0.9%时,其劈裂抗拉强度和抗弯强度显著提高.

单一纤维掺入可能显著提高轻质混凝土某一性能(但相关研究表明同时在混凝土中掺入两种及两种以上不同纤维可能发生协同作用,产生混杂效应),改善多项混凝土性能,提高混凝土整体性能,满足不同结构的材料需求.Sharma等[15]发现因钢纤维的高刚度和聚丙烯纤维的约束作用,两种纤维混杂可显著提高轻质混凝土抗压强度、抗拉强度和抗弯韧性,残余抗弯强度随混杂纤维比例增大而增强.Cui等[16]研究了钢纤维-聚丙烯混杂纤维轻质高强混凝土在不同应力水平下的弯曲疲劳行为,与单纤维轻质高强混凝土相比,混杂纤维轻质高强混凝土裂纹扩展速率更低,疲劳应变稳定发展阶段和疲劳寿命更长.

混杂纤维掺入量、水灰比等多因素对轻骨料高强混凝土性能改善影响很大,但目前有关混杂纤维轻骨料高强混凝土配合比优化设计的研究尚少.学者们大多基于正交试验寻求最优配比,多因素间的交互作用使正交试验工作量极大,且无法在一定范围内获得因素作用的明确影响.响应面法作为一种仅用少量试验数据可建立多个因素与一个或多个响应值之间的数学模型,可用于评估多因素交互作用对响应值的影响,从而确定最优响应值.近年来,具有试验次数少、成本低、精度高等优势的响应面法已被应用于建筑材料领域中混凝土的配合比优化[17-18].同时,越来越多不同高性能纤维的产生对混杂纤维轻骨料高强混凝土的研究发展起到积极促进作用,如高极限强度、高杨氏模量、耐腐蚀的玄武岩纤维,高弹性模量、大比表面积、强黏结力的纤维素纤维等.因此,本试验以玄武岩-纤维素纤维混杂轻骨料高强混凝土为研究对象,利用响应面法,以混杂纤维轻骨料高强混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折

强度为响应值,构建响应面回归模型,分析玄武岩纤维掺量、纤维素纤维掺量、水灰比交互作用对响应值的影响,以期为混杂纤维轻骨料高强混凝土配合比多目标优化提供参考.

1　试验

1.1　材料

选用陕西普通硅酸盐水泥;粗骨料采用湖北生产的800级碎石型页岩陶粒,其基本性能见表1;细骨料(S)采用细度模数2.88的普通中型河砂,表观密度为2 587 kg/m^3;高效减水剂采用陕西生产的聚羧酸高效减水剂;纤维选用常州市生产的纤维素纤维和短切玄武岩纤维,其物理力学参数如表2所示.玄武岩纤维和纤维素纤维具有高抗拉强度、高弹性模量、高长径比.另外,玄武岩纤维生产环境成本低,符合低碳持续发展要求,且在混凝土中易分散,可增强混凝土工作性能和耐久性.纤维素纤维则作为一种新型纤维,其天然亲水性、大比表面积和强大表面附着力有助于混凝土水化和水化产物附着.水为实验室用普通自来水.

表1　800级碎石型陶粒的物理力学参数

Tab.1　Physical and mechanical parameters of 800 grade crushed stone type ceramic particles

堆积密度/(kg·m^{-3})	表观密度/(kg·m^{-3})	筒压强度/MPa	1 h吸水率/%	公称粒径/mm	级配
794	1 540	5.7	3	5~10	良好

表2　纤维物理力学参数

Tab.2　Physical and mechanical parameters of fibers

纤维	直径/μm	长度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	长径比	密度/(g·cm^{-3})
纤维素纤维	18	2~6	600~900	8.50	111~333	1.10
玄武岩纤维	15	18	1 290	65.20	1.2×10^3	2.70

1.2　试件制作及测试

为规范科学设计混凝土配合比,结合《轻骨料混凝土应用技术标准》(JGJ/T 12—2019)和相关文献资料,利用Design-Expert软件开展响应面回归模型统计分析.考虑水灰比(A)、玄武岩纤维掺量(B)和纤维素纤维掺量(C)3个试验因素对混凝土强度的影响,试验因素和水平见表3.水灰比0.30、0.26、0.34分别记为A1、A2、A3,B、C后的数字表示掺量,未掺加则不记.根据表3的试验条件共设计13组不同配合比试件.如A2B2C0.9表示水灰比为0.26,玄武岩纤维掺量为2.0 kg/m^3,纤维素纤维掺量为0.9 kg/m^3.

表3　试验因素与水平

Tab.3　Experimental factors and levels

水平	因素		
	A	B/(kg·m^{-3})	C/(kg·m^{-3})
−1	0.26	2.0	0.6
0	0.30	4.0	0.9
1	0.34	6.0	1.2

考虑振捣过程中可能会发生陶粒上浮现象,提前浸泡陶粒24 h,捞出静置至其呈饱和面干状态方可使用.先将河砂、纤维和陶粒倒入搅拌机中干拌2 min,随后加入水泥继续搅拌2 min,最后加入水和减水剂继续搅拌2 min.拌和均匀后,将拌合物倒入清洁并润滑的模具内,于振动台上振捣密实后,移至阴凉处放置24 h脱模,在温度为(20±1)℃,湿度为98 %的标准养护箱内养护28 d.

采用西安科技大学WHY-2000Z微机控制压力试验机(最大压力为2 000 kN),参照《纤维混凝土应用技术规程》(JGJ/T 221—2010)进行相关力学试验,并采用响应面回归模型对混杂纤维轻骨料高强混凝土试件28 d抗压、抗折和劈裂抗拉强度进行预测,与实测值进行比较分析.抗压和劈裂抗拉试验采用边长为100 mm的立方体试件,加载速率分别为0.5 MPa/s和0.05 MPa/s.抗折试验采用尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试件,以0.05 MPa/s的速率均匀连续加载.

2　结果与分析

2.1　响应面模型建立及方差分析

表4为混杂纤维轻骨料高强混凝土28 d抗压强度、抗折强度和劈裂抗拉强度的试验值与预测值,两者相近.对力学强度试验值与3个自变量因素间的关系进行拟合模型分析,讨论水灰比、玄武岩纤维掺量、纤维素纤维掺量对轻骨料高强混凝土抗压、劈裂抗拉和抗折强度的影响,建立响应面回归方程,并对模型的显著性和可靠性进行评价.

表4 双掺纤维组试件基本力学性能试验值及预测值

Tab.4 Experimental and predicted values of basic mechanical properties of double doped fiber group specimens

序号	组别	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		劈裂抗拉强度/MPa	
		试验值	预测值	试验值	预测值	试验值	预测值
1	*A*1*B*4*C*0.9	44.97	44.89	6.82	6.98	4.43	4.59
2	*A*1*B*2*C*0.6	45.26	45.95	7.23	7.09	5.23	5.23
3	*A*1*B*6*C*1.2	46.51	46.06	6.95	6.88	4.74	4.65
4	*A*1*B*2*C*1.2	48.08	48.53	6.83	6.90	4.67	4.77
5	*A*1*B*6*C*0.6	45.66	45.51	6.61	6.51	4.58	4.43
6	*A*2*B*2*C*0.9	43.13	42.91	7.72	7.83	5.67	5.61
7	*A*2*B*4*C*1.2	44.87	45.19	6.59	6.61	4.66	4.54
8	*A*2*B*4*C*0.6	47.23	48.66	7.56	7.74	5.77	5.76
9	*A*2*B*6*C*0.9	45.77	46.17	6.88	6.63	4.88	4.86
10	*A*3*B*4*C*1.2	43.84	43.82	6.03	6.13	4.43	4.58
11	*A*3*B*2*C*0.9	43.21	43.43	7.91	7.80	5.03	5.09
12	*A*3*B*4*C*0.6	46.49	45.86	6.93	7.01	4.93	4.91
13	*A*3*B*6*C*0.9	48.43	47.74	6.58	6.72	4.98	4.98

使用Design-Expert软件对试验实测值进行多元回归拟合分析,分别建立抗压强度(Y_1)、抗折强度(Y_2)、劈裂抗拉强度(Y_3)和自变量因素A、B、C的二次多项式响应面回归方程:

$$Y_1=48.66-0.488\,8A-0.066\,3B+0.83C-2.06AC-1.05BC-1.85A^2-1.28B^2-1.58C^2 \quad (1)$$

$$Y_2=7.740-0.010A+0.190B+0.463AC-0.293BC-0.097A^2-0.837B^2-0.287C^2 \quad (2)$$

$$Y_3=5.760-0.161A+0.161B-0.101C+0.323AC-0.30BC-0.405A^2-0.627B^2-0.325C^2 \quad (3)$$

对建立的回归模型进行方差及可靠性分析,以评估响应面回归模型的准确性,结果如表5~表8所示.P值表示初始假设为真的概率,F值越大,对应P值越小,说明模型显著性越高.P值>0.05,表示模型显著性低,回归模型不可用;反之,表示回归模型显著性较高,响应值预测可靠性较高.相关系数R^2、调整系数R_a^2、预测系数R_p^2、变异系数和信噪比用于综合评价模型可信度.R^2表示响应值和真实值间的差异度,取值0~1,数值越大表示两值差异越小.若信噪比>4,说明R_a^2和R_p^2间的差异和变异系数越小,回归方程拟合度越高,试验可信度和精度越高.分析表5~表8可知,Y_1、Y_2、Y_3回归模型均具有较高的显著性和可靠性.Y_1中AC、BC的P值<0.05,A、B、C的P值>0.05,说明水灰比和纤维素纤维掺量、玄武岩纤维和纤维素纤维掺量的交互作用对抗压强度的影响显著,而单因素对立方体抗压强度的影响较小.Y_2中B、AC和BC的P值<0.05,A和C的P值>0.05,说明玄武岩纤维、水灰比和纤维素纤维、玄武岩和纤维素纤维掺量交互作用对抗折强度的影响较显著,而A和C单因素对抗折强度的影响较小.Y_3中A、AC和BC的P值<0.05,B和C的P值>0.05,说明水灰比、水灰比和纤维素纤维交互作用、玄武岩与纤维素纤维交互作用对劈裂抗拉强度的影响较显著,且水灰比和纤维素纤维交互作用影响最大,水灰比影响较小,B和C单因素对劈裂抗拉强度的影响则很小.

表5 抗压强度回归模型方差分析

Tab.5 Analysis of variance of regression model for compressive strength

数据源	平方和	自由度	均方	F值	P值	是否显著
Y_1	53.190	8	6.650 0	6.640	0.016 5	是
A	1.910	1	1.910 0	1.910	0.216 5	否
B	0.035	1	0.035 1	0.350	0.857 7	否
C	5.510	1	5.510 0	5.500	0.057 4	否
AC	17.020	1	17.020 0	16.980	0.006 2	是
BC	4.390	1	4.390 0	4.380	0.008 1	是
A^2	12.640	1	12.640 0	12.610	0.012 0	是
B^2	6.100	1	6.100 0	6.090	0.048 7	是
C^2	9.190	1	9.190 0	9.170	0.023 1	是
残差	6.010	6	1.000 0	—	—	—
失拟值	2.190	4	0.546 8	0.286	0.867 6	否
纯误差	3.820	2	1.910 0	—	—	—
总变异	59.200	14	—	—	—	—

表 6　抗折强度回归模型方差分析

Tab.6　Analysis of variance of regression model for flexural strength

数据源	平方和	自由度	均方	*F* 值	*P* 值	是否显著
Y_2	4.260 0	8	0.532 5	12.550	0.003 2	是
A	0.000 8	1	0.000 8	0.018	0.895 3	否
B	0.288 8	1	0.288 8	6.800	0.040 2	是
C	0	1	0	0	1.000 0	否
AC	0.855 6	1	0.855 6	20.160	0.004 1	是
BC	0.342 2	1	0.342 2	8.060	0.029 6	是
A^2	0.034 8	1	0.034 8	0.820	0.400 1	否
B^2	2.590 0	1	2.590 0	60.960	0.000 2	是
C^2	0.304 3	1	0.304 3	7.170	0.036 6	是
残差	0.254 6	6	0.042 4	—	—	—
失拟值	0.181 4	4	0.045 3	1.240	0.492 7	否
纯误差	0.073 3	2	0.036 6	—	—	—
总变异	4.510 0	14	—	—	—	—

表 7　劈裂抗拉强度回归模型方差分析

Tab.7　Analysis of variance of regression model for splitting tensile strength

数据源	平方和	自由度	均方	*F* 值	*P* 值	是否显著
Y_3	3.230 0	8	0.403 8	20.460	0.000 8	是
A	0.208 0	1	0.208 0	10.540	0.017 6	是
B	0.006 0	1	0.006 0	0.306	0.599 9	否
C	0.082 0	1	0.082 0	4.150	0.087 7	否
AC	0.416 0	1	0.416 0	21.070	0.003 7	是
BC	0.360 0	1	0.360 0	18.240	0.005 3	是
A^2	0.604 4	1	0.604 4	30.620	0.001 5	是
B^2	1.450 0	1	1.450 0	73.550	0.000 1	是
C^2	0.389 0	1	0.389 0	19.710	0.004 4	是
残差	0.118 4	6	0.019 7	—	—	—
失拟值	0.111 0	4	0.027 7	7.430	0.122 1	否
纯误差	0.007 5	2	0.003 7	—	—	—
总变异	3.350 0	14	—	—	—	—

表 8　模型可信度检验

Tab.8　Model credibility testing

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	1	46.15	0.898 5	0.763 1	0.353 6	2.17	7.521 2
Y_2	0.206	7.090	0.944	0.868	0.568	2.550	10.622
Y_3	0.140 5	5.03	0.964 6	0.917 5	0.615 4	2.79	12.178 7

2.2　响应面分析

两因素交互作用的3D响应面图及对应等高线图,可用于直观分析两因素交互作用对轻骨料高强混凝土力学性能的影响,如图1~图3所示.响应面等高线形状为椭圆形时,表示两因素交互作用显著;圆形则表示交互作用不显著.等高线与坐标轴交点越密集,说明该因素对响应值影响越大.

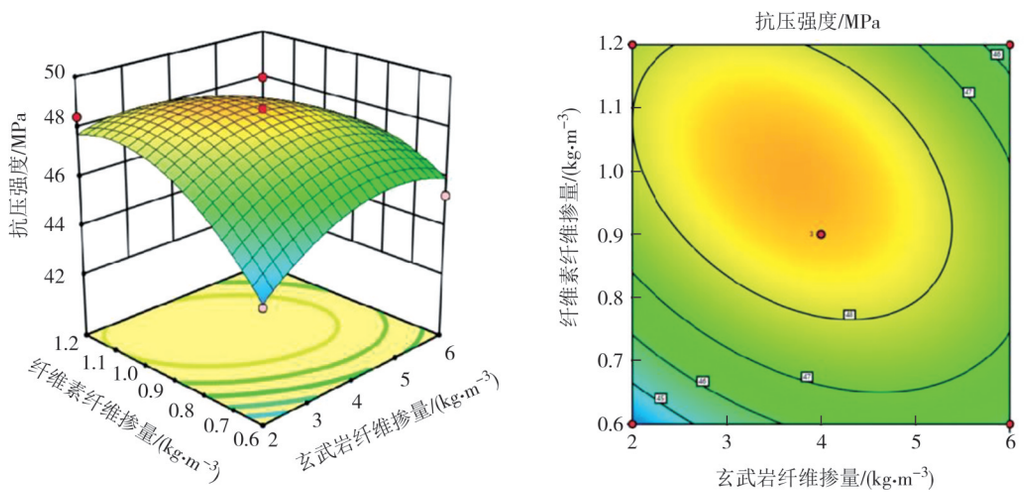
2.2.1　抗压强度

由图1(a)可知,不同掺量的玄武岩纤维和纤维素纤维的交互作用较为显著,且纤维素纤维掺量对抗压强度的影响更大.当水灰比为0.30,玄武岩纤维掺量不超过5.0 kg/m^{3}时,抗压强度随纤维素纤维掺量增大而增强;当玄武岩纤维掺量大于5.0 kg/m^{3}时,抗压强度随纤维素纤维掺量增大无明显变化.抗压强度在合适的玄武岩纤维掺量和纤维素纤维掺量下

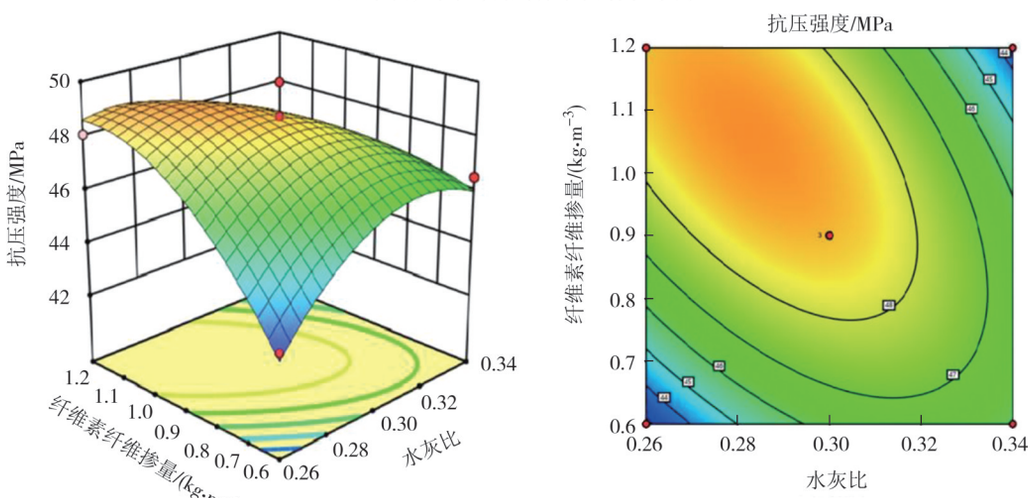
具有极大值,该极大值出现在玄武岩纤维掺量为3.0~5.0 kg/m^3,纤维素纤维掺量为0.8~1.1 kg/m^{3}范围内.

由图1(b)可知,纤维素纤维掺量与水灰比的交互作用显著.水灰比越大,纤维素纤维越少,抗压强度越强;水灰比越小,纤维素纤维越多,抗压强度越强.当玄武岩纤维掺量为4.0 kg/m^3,水灰比≥0.32时,抗压强度随纤维素纤维掺量增大而降低,而当水灰比<0.32时,抗压强度随纤维素纤维掺量增大而提高.纤维素纤维是具有空腔结构的亲水性纤维,早期储水在水化过程中释放,促使水泥水化更彻底,提升混凝土内部结构黏结性进而提高混凝土力学强度.因此,在水灰比较低的条件下,纤维素纤维与胶凝材料黏结较好,可减少混凝土收缩产生的微裂缝,并抑制微裂缝的扩展.但是,高水灰比下,过多纤维素纤维会增大混凝土内部缺陷,导致胶凝材料黏结性降低.纤维素纤维和水灰比对抗压强度的影响程度相近,抗压强度极大值出现在水灰比为0.28~0.32,纤维素纤维掺量为0.8~1.0 kg/m^{3}范围内.

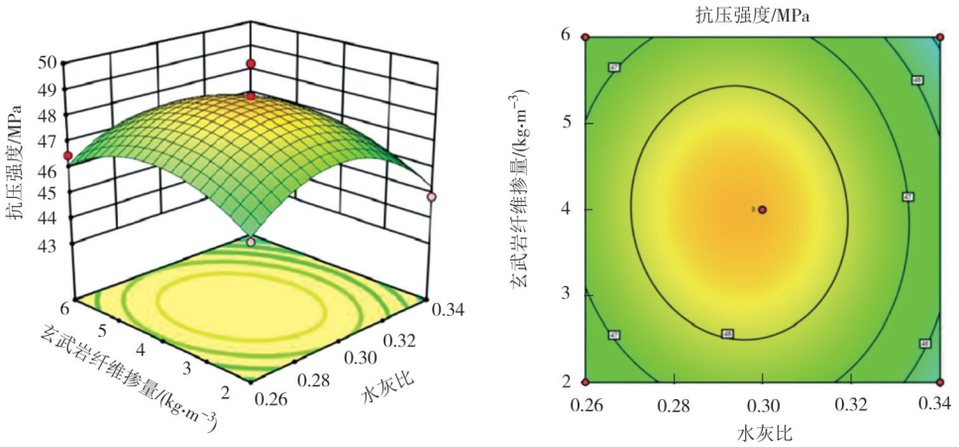
分析图1(c)可知,当纤维素纤维掺量为0.9 kg/m^3,玄武岩纤维掺量与水灰比两者交互作用不显著.混凝土的抗压强度存在极大值,水灰比从0.26提高至0.30时,抗压强度提升,当水灰比继续升高时,抗压强度下降,说明抗压强度的极大值出现在水灰比为0.30条件下.其原因在于玄武岩纤维可减少混凝土水化时的收缩和变形,在混凝土内部分散的纤维相互缠绕形成网络结构,分散混凝土所受外部荷载,使轻骨料高强混凝土抗压强度提高.然而,过量纤维会破坏混凝土密实性,增加薄弱界面数量,导致混凝土内部缺陷增大,抗压强度降低.



(a)纤维素纤维与玄武岩纤维的交互关系



(b)纤维素纤维掺量与水灰比的交互关系



(c)玄武岩纤维掺量与水灰比的交互关系

图 1　抗压强度响应面图及等高线图

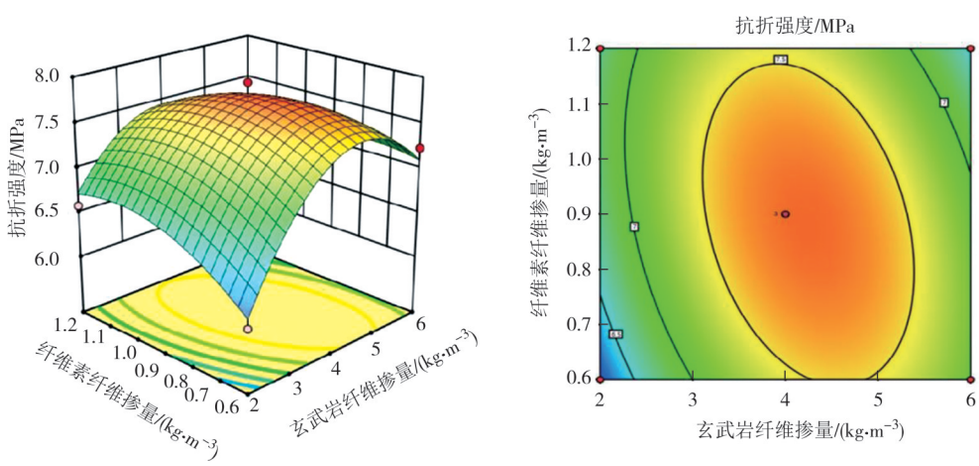
Fig.1　Compressive strength response surface diagram and contour line diagram

2.2.2　抗折强度

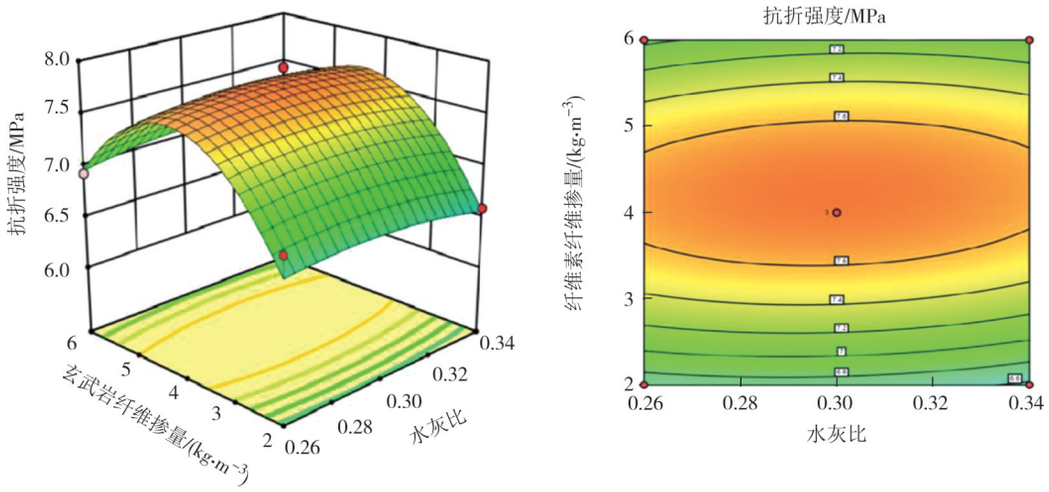
分析图 2(a),响应面曲率较大,表明不同掺量的纤维素纤维和玄武岩纤维交互作用对抗折强度的影响较显著.当水灰比为 0.30 时,玄武岩纤维掺量≤4.0 kg/m^3,抗折强度随纤维素纤维掺量增大而提高;玄武岩纤维掺量>4.0 kg/m^3,抗折强度随纤维素纤维掺量增大而降低.纵轴等高线的密集程度大于横轴,表明玄武岩纤维掺量对抗折强度的影响更大.这是由于玄武岩纤维抗拉强度较纤维素纤维更高,适量纤维可减少混凝土中的孔隙通道,降低混凝土孔隙率,提高混凝土密实性,而过量纤维掺入则在纤维和混凝土间形成一个薄弱环节,增大混凝土内部缺陷.当玄武岩纤维掺量为 3.0~5.0 kg/m^3,纤维素纤维掺量为 0.8~1.0 kg/m^{3}时,轻骨料高强混凝土抗折强度出现极大值,可达到 7.5 MPa.

由图 2(b)可知,玄武岩纤维掺量与水灰比两者交互作用不显著.水灰比约为 0.30,玄武岩纤维掺量约为 4.0 kg/m^3,抗折强度在一定范围内存在极大值.少量玄武岩纤维以单丝形式分散在混凝土中,抑制混凝土初始开裂,纤维本身较强的抗拉强度和与混凝土基体较大的黏结强度,使产生裂缝的混凝土试件仍能承受一定拉力,直到玄武岩纤维被拉出,试件破坏.若能进一步增强玄武岩纤维与混凝土基体黏结作用,其抗折强度可继续提高.

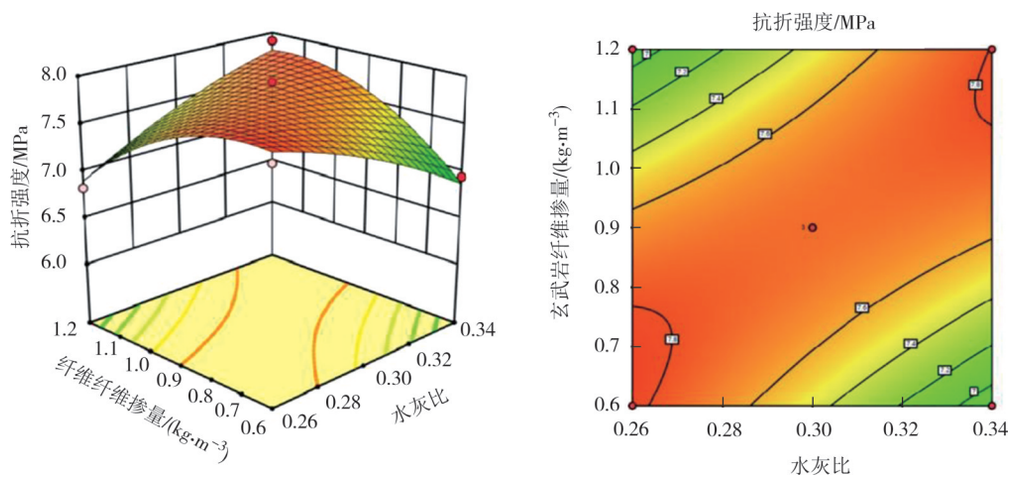
由图 2(c)可知,当玄武岩纤维掺量为 4.0 kg/m^3,水灰比≥0.30 时,抗折强度随纤维素纤维掺量增大而提高;而当水灰比<0.30 时,抗折强度随纤维素纤维掺量的增大而降低.因此,纤维素纤维掺量与水灰比的交互作用显著.抗折强度极大值出现在水灰比为 0.28~0.32,纤维素纤维掺量为 0.8~1.0 kg/m^{3}范围内.水灰比较大时,更多的纤维素纤维在拌和过程中吸收水分,为混凝土后期水化继续提供水分,使胶合物水化更充分,且纤维素纤维均匀分布在混凝土基体中,减少微裂缝应力集中,抑制微裂缝扩展,提高混凝土抗折强度;而水灰比较小时,过多的纤维素纤维会导致混凝土内部结构破坏,抗折强度下降.



(a)纤维素纤维与玄武岩纤维的交互关系



(b)玄武岩纤维掺量与水灰比的交互关系



(c)纤维素纤维掺量与水灰比的交互关系

图 2 抗折强度响应面图及等高线图

Fig.2 Flexural strength response surface diagram and contour line diagram

2.2.3 劈裂抗拉强度

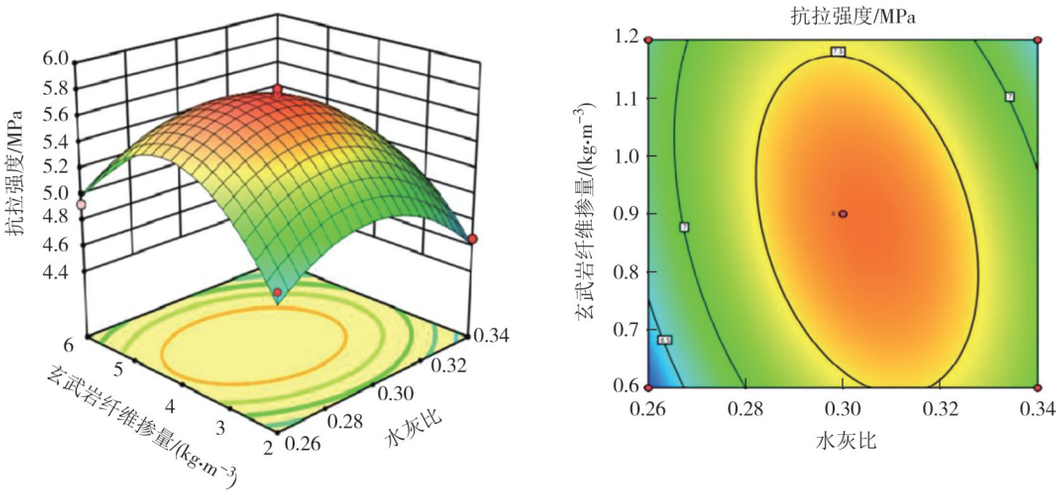
分析图 3(a),当纤维素纤维掺量为 0.9 kg/m³,水灰比为 0.26~0.34 时,劈裂抗拉强度随玄武岩纤维掺量的变化趋势相同,可见玄武岩纤维掺量与水灰比两者交互作用不显著.在水灰比为 0.30,玄武岩纤维掺量为 4.0 kg/m³时,劈裂抗拉强度出现极大值.由图 3(b)可知,不同掺量纤维素纤维和玄武岩纤维对劈裂抗拉强度的影响较显著.当水灰比为 0.30,玄武岩纤维掺量≤4.0 kg/m³时,劈裂抗拉强度随纤维素纤维掺量增大而增大;玄武岩纤维掺量>4.0 kg/m³时,劈裂抗拉强度随纤维素纤维掺量增大而减小.横轴等高线的密集程度大于纵轴,表明玄武岩纤维掺量对劈裂抗拉强度的影响更大,劈裂抗拉强度极大值出现在玄武岩纤维掺量为 3.5~4.5 kg/m³,纤维素纤维掺量为 0.8~1.0 kg/m³范围内.

由图 3(c)可知,当玄武岩纤维掺量为 4.0 kg/m³,水灰比≥0.30 时,劈裂抗拉强度随纤维素纤维掺量增大而增大;而当水灰比<0.30 时,劈裂抗拉强度随纤维素纤维掺量的增大而减小.因此,纤维素纤维掺量与水灰比的交互作用显著,其对劈裂抗拉强度的影响程度相近.劈裂抗拉强度的极大值出现在水灰比为 0.28~0.32,纤维素纤维掺量为 0.8~1.0 kg/m³范围内.

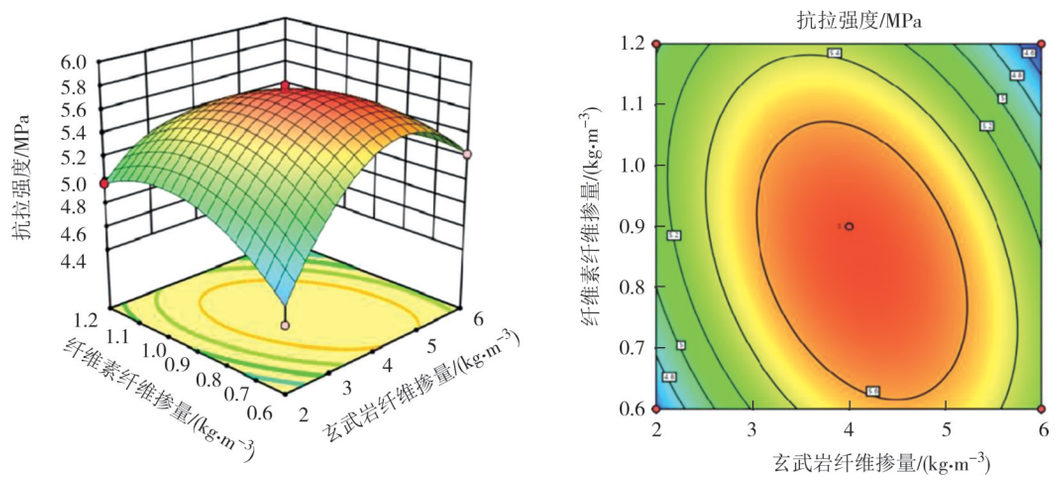
分析可知,增加玄武岩纤维掺量会增大纤维与水泥基体间的接触面积,改善纤维黏结效果,提升混凝土劈裂抗拉强度.对于纤维素纤维而言,其分散在混凝土中的数量巨大且均匀,可更好地抑制混凝土中裂缝扩展,显著提高混凝土的劈裂和拉伸性能.

2.3 模型多目标优化与验证

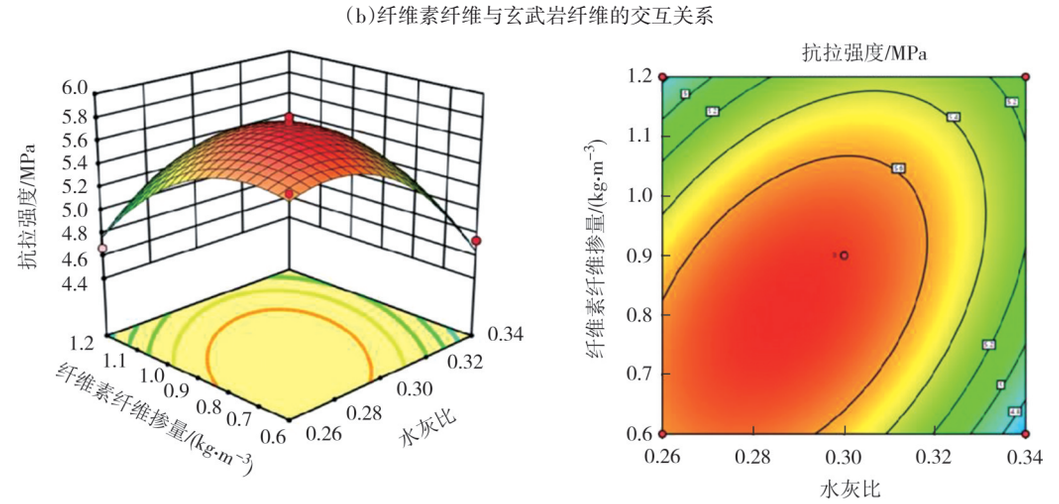
结合响应面回归模型与 Design-Expert 软件中基于渴求函数的数值优化功能对混杂纤维轻骨料高强



(a)玄武岩纤维掺量与水灰比的交互关系



(b)纤维素纤维与玄武岩纤维的交互关系



(c)纤维素纤维掺量与水灰比的交互关系

图 3　劈裂抗拉强度响应面图及等高线图

Fig.3　Splitting tensile strength response surface diagram and contour line diagram

混凝土配合比进行多目标优化,寻求不同因素水平下响应最大值,即在不同水灰比、玄武岩纤维掺量和纤维素纤维掺量情况下,获得混杂纤维轻骨料高强混凝土基本力学性能的最大值.将表 9 中混杂纤维轻骨料高强混凝土配合比优化设计目标与优化参数取值范围输入 Design-Expert 软件,得到最佳配合比例和最大力学强度,即响应面设计的最优设计结果,如表 10 所示.

为检验模型精确度,以试验验证表10中最优配合比结果,对比分析其试验值与模型预测值,利用公式(4)计算其相对误差绝对值.其中,E_1、E_2和E_3分别为抗压强度、抗折强度和劈裂抗拉强度的相对误差绝对值,见表11.由表11可知,在最优配合比下,E_1、E_2、E_3均小于5%,表明所建的抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度回归模型具有较高预测精度.因此,采用响应面回归模型优化混杂纤维轻骨料高强混凝土配合比,可有效提高试验效率,利于制备在一定范围内具有优异力学性能的混杂纤维轻骨料高强混凝土.

$$E = \frac{|V_T - V_P|}{V_T} \times 100\% \tag{4}$$

式中:E为相对误差绝对值;V_T为强度试验值;V_P为强度预测值.

表9 混杂纤维轻骨料高强混凝土优化参数设计

Tab.9 Optimization parameters design for hybrid fiber lightweight high strength concrete

取值	A	B/(kg·m^{-3})	C/(kg·m^{-3})	Y_1/MPa	Y_2/MPa	Y_3/MPa
最大值	0.26	2	0.6	43.13	7.03	4.43
最小值	0.34	6	1.2	55	9	7
目标值	0.26~0.34	2~6	0.6~1.2	最大值	最大值	最大值

表10 响应面设计最优设计参数

Tab.10 Optimal design parameters of response surface design

水灰比	玄武岩纤维掺量/(kg·m^{-3})	纤维素纤维掺量/(kg·m^{-3})	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa	渴求函数值
0.30	4.00	0.90	48.71	7.74	5.77	0.52

表11 最优设计参数验证

Tab.11 Verification of optimal design parameters

Y_1/MPa			Y_2/MPa			Y_3/MPa		
预测值	试验值	E_1/%	预测值	试验值	E_2/%	预测值	试验值	E_3/%
48.71	48.09	1.29	7.74	7.44	3.55	5.77	5.53	4.34

3 结论

1)在轻骨料高强混凝土中掺入玄武岩纤维和纤维素纤维,构建其立方体抗压强度、抗折强度以及劈裂抗拉强度的响应面回归模型,方差分析和检验表明,该模型有效可靠,可信度较高.

2)对于混杂纤维轻骨料高强混凝土的立方体抗压强度、抗折强度以及劈裂抗拉强度,两种纤维掺量的交互作用和水灰比与纤维素纤维掺量的交互作用比较显著,玄武岩纤维掺量对轻骨料高强混凝土抗折和劈拉强度影响更大,而纤维素纤维掺量对轻骨料高强混凝土的抗压强度影响更大.

3)模型预测的最优水灰比为0.30,纤维素纤维掺量为0.90 kg/m^3,玄武岩纤维掺量为4.00 kg/m^3.各强度试验值的相对误差绝对值均小于5%.

参考文献

[1] GAO Y L, ZOU C. Experimental study on segregation resistance of nanoSiO$_2$ fly ash lightweight aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 64-69.

[2] SOHEL K M A, AL-JABRI K, ZHANG M H, et al. Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 90-100.

[3] ASLAM M, SHAFIGH P, JUMAAT M Z. Structural lightweight aggregate concrete by incorporating solid wastes as coarse lightweight aggregate [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 749: 337-342.

[4] PRAKASH R, THENMOZHI R, RAMAN S N, et al. An investigation of key mechanical and durability properties of coconut shell concrete with partial replacement of fly ash [J]. Structural Concrete, 2021, 22(Sup.1): E985-E996.

[5] 邓友生,郑云方,张克钦,等. 轻质高强混凝土研发新进展及应用[J]. 兰州交通大学学报,2023,42(2):137-143.
DENG Y S, ZHENG Y F, ZHANG K Q, et al. New development and application of light-weight and high-strength concrete [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2023, 42(2): 137-143. (in Chinese)

[6] LI J J, WAN C J, NIU J G, et al. Investigation on flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 449-458.

[7] DENG Y S, ZHANG K Q, LI W J, et al. Advances in the

application of crop residues as aggregates and cementing materials in concrete [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2023, 25(2): 785-792.

[8] 邓友生, 陈国军, 李培鹏, 等. 高韧性纤维混凝土特性及工程应用[J]. 混凝土,2023,5:158-174.
DENG Y S, CHEN G J, LI P P, et al. Properties of high tenacity fiber concrete and its engineering application[J]. Concrete, 2023, 5:158-171.(in Chinese)

[9] 杨家盛,邓明科,张晴晴,等. 纤维特征参数对HES-HDC单轴拉伸性能的影响及拉伸韧性评价方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(3):130-140.
YANG J S, DENG M K, ZHANG Q Q, et al. Effect of fiber characteristics parameters on uniaxial tensile properties of HES-HDC and evaluation method of tensile toughness [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(3): 130-140.(in Chinese)

[10] SARADAR A, NEMATI P, PASKIABI A S, et al. Prediction of mechanical properties of lightweight basalt fiber reinforced concrete containing silica fume and fly ash: experimental and numerical assessment[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32:101732.

[11] 叶艳霞,王宗彬,谢夫林,等. 钢纤维增强高强轻骨料混凝土的力学性能[J]. 建筑材料学报,2021,24(1):63-70.
YE Y X, WANG Z B, XIE F L, et al. Mechanical properties of steel fiber reinforced high-strength lightweight aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 63-70.(in Chinese)

[12] ZENG Y S, TANG A P. Comparison of effects of basalt and polyacrylonitrile fibers on toughness behaviors of lightweight aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 282: 122572.

[13] 刘喜, 吴涛, 杨雪, 等. 纤维增韧高强轻骨料混凝土力学性能与微观结构[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5): 700-706.
LIU X, WU T, YANG X, et al. Mechanical properties and microstructure of fiber reinforced high-strength lightweight aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(5): 700-706.(in Chinese)

[14] WU T, YANG X, WEI H, et al. Mechanical properties and microstructure of lightweight aggregate concrete with and without fibers [J]. Construction and Building Materials, 2019, 199: 526-539.

[15] SHARMA R, SENTHIL K. An investigation on mechanical and microstructural properties of hybrid fiber reinforced concrete with manufactured sand and recycled coarse aggregate[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 69: 106236.

[16] CUI T T, NING B K, SHI X X, et al. Flexural fatigue behavior of hybrid steel-polypropylene fiber reinforced high-strength lightweight aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 377: 131079.

[17] 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 W, GUO Y T, GE P, 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.(in Chinese)

[18] 胡静, 张品乐, 吴磊, 等. 基于响应面法的ECC基体力学性能研究与配合比优化[J]. 材料导报, 2022, 36(增刊2): 173-177.
HU J, ZHANG P L, WU L, et al. Study on mechanical properties of cementitious matrix based on response surface method and optimization of the fitting ratio [J]. Materials Reports, 2022, 36(Sup.2): 173-177.(in Chinese)