

文章编号:1673-9469(2026)03-0065-12

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.03.008

基于响应曲面法制备高性能建筑石膏

薛凯喜^{1,2},李世权^{1,2*},储怡鑫^{1,2},司鹏超^{1,2},周子勤^{1,2},胡艳香^{1,2}

(1. 东华理工大学 土木建筑工程学院,江西 南昌 330013;

2. 东华理工大学 江西省地质环境与地下空间工程研究中心,江西 南昌 330013)

摘要: 为了对改性后高性能建筑石膏的各项性能进行优化分析,采用0.20%的植物蛋白缓凝剂对建筑石膏进行缓凝。通过响应曲面法设计聚醚改性有机硅消泡剂、可再分散性乳胶粉和羟丙基甲基纤维素3种外加剂的复掺试验,对试验响应指标进行分析。采用Design-Expert 12软件对响应指标设置优化条件,基于Optimization功能生成各外加剂掺量的优化参数,并对优化结果进行可取性分析验证。结果表明,建筑石膏各外加剂的最佳掺量为聚醚改性有机硅消泡剂1.051%、可再分散性乳胶粉0.827%、羟丙基甲基纤维素0.141%。将试验结果与未改性建筑石膏进行对比,发现改性后高性能建筑石膏的绝干抗折强度、绝干抗压强度、拉伸黏结强度、保水率、软化系数和孔隙率6项性能大幅优化。

关键词: 高性能建筑石膏;建筑石膏外加剂;响应曲面法;绝干抗折强度;绝干抗压强度;孔隙率
中图分类号: TQ177.3 **文献标识码:** A

Preparation of High-Performance Building Gypsum Based on Response Surface Methodology

XUE Kaixi^{1,2}, LI Shiquan^{1,2*}, CHU Yixin^{1,2}, SI Pengchao^{1,2}, ZHOU Ziqin^{1,2}, HU Yanxiang^{1,2}

(1. School of Civil and Architecture Engineering, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China;

2. Engineering Research Center for Geological Environment and Underground Space of Jiangxi Province, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: In order to optimize the performance of modified high-performance building gypsum, a 0.20% vegetable protein retarder was used to delay the setting time of the building gypsum. The response surface methodology was employed to design a series of experiments involving the combined use of three admixtures: polyether modified silicone defoamer, redispersible latex powder, and hydroxypropyl methylcellulose. The experimental response indicators were analyzed, and the Design-Expert 12 software was used to set optimization conditions for these response indicators. Based on the Optimization function, optimal parameters for the dosage of each admixture were generated, and the feasibility of the optimization results was verified. The results indicated that the optimal admixture dosages for the high-performance building gypsum were 1.051% polyether modified silicone defoamer, 0.827% redispersible latex powder, and 0.141% hydroxypropyl methylcellulose. When comparing the modified high-performance building gypsum with the unmodified version, significant improvements were observed in six performance metrics: absolute dry flexural strength, absolute dry compressive strength, tensile bond strength, water retention rate, softening coefficient, and porosity.

Key words: high-performance building gypsum; building gypsum admixture; response surface methodology; absolute dry flexural strength; absolute dry compressive strength; porosity

收稿日期:2024-09-11 修回日期:2024-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42167024)

第一作者:薛凯喜(1981—),男,山东沂水人,博士,教授,从事岩土工程与新型建筑材料相关领域的研究。

* 通信作者:李世权(2001—),男,广西北流人,硕士研究生,从事资源利用与新型建筑材料方面的研究。

中国磷化工行业产生的过量磷石膏造成了严重的磷污染^[1-3]。磷石膏的资源化利用主要集中在建材、化工、农业、矿山回填等领域,尤其是磷石膏制成的建筑石膏经过外加剂改性后应用前景广阔,可降低磷石膏对环境造成的污染^[4-5]。建筑石膏在室温下性能稳定,并具有吸水性强、自重小和强度低等特点,虽无法作为承受大荷载的建筑材料,但可经外加剂改性后制备高性能建筑石膏。Zhang等^[6]通过X射线光电子能谱仪等仪器研究了8种缓凝剂的缓凝机理,发现复合缓凝剂兼具缓凝和减轻强度折损的作用。Zhang等^[7]将不同量的磨碎粒状高炉矿渣(5%~25%)、波特兰水泥(15%)和建筑石膏混合,使建筑石膏基复合材料具有更高的抗压强度。Doleželová等^[8]采用建筑石膏和4种细填料作为原料制备建筑石膏复合砂浆,试验结果表明建筑石膏复合砂浆7d强度降低,但导热系数增加。吴超等^[9]采用柠檬酸钠、甲基纤维素、玻化微珠和建筑石膏制备出了轻质抹灰石膏,并研究了3种外加剂对石膏砂浆的影响机制。易芸等^[10]分别将粉煤灰、石灰和发泡剂以一定比例加入建筑石膏中,制备出了轻质石膏实心砌块。储怡鑫^[11]分别讨论了缓凝剂、增白填料、消泡剂、黏结剂和保水剂对建筑石膏性能的影响。由上述研究可知,多种外加剂改性建筑石膏在凝结时间、黏结性能和保水率方面表现良好,具有更稳定的结构和更高的强度。然而,现有关于建筑石膏的研究往往仅针对石膏的某个或某几个因素进行单独研究,对研究过程中多因素之间的交互作用缺乏考虑。而实际上,建筑石膏的改性过程中多种外加剂会产生交互作用。

响应曲面法(Response Surface Methodology, RSM)可用于评估两个或多个变量对一个响应变量行为的影响,该方法可将体系内的响应作为一个或多个因子的函数,找出各因子水平的最佳组合^[12-14]。Guo等^[15]研究了甲酸钙和消泡剂对不同龄期低水胶比水泥基灌浆材料抗压强度的影响及作用机理,采用RSM建立二次多项式回归模型并对配合比进行优化,从宏观力学性能和微观组织方面分析了外加剂的作用机理。结果表明,RSM在优化水泥基灌浆材料配合比方面是科学的。

本文利用Design-Expert 12软件中的RSM方法,设计在建筑石膏中掺入聚醚改性有机硅消泡剂(Polyether Modified Silicone Defoamer, PMSD)、可再分散性乳胶粉(Redisispersible Latex Powder, RDP)和羟丙基甲基纤维素(Hydroxypropyl Methylcellulose, HPMC)3种外加剂的复掺试验,对试验响应指标进行分析并利用该软件对响应指标设置优化条件,为制备高性能建筑石膏提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料选择

试验采用江西银泰建材有限公司生产的灰白色粉末状固体磷石膏,其化学成分见表1。经试验研究,采用煅烧陈化法处理磷石膏来制备建筑石膏,在煅烧温度160℃、煅烧时间4.5h、陈化时间1d和颗粒粒径 $D_{50}=46\mu\text{m}$ 的条件下制备出3.0级建筑石膏。

缓凝剂主要采用植物蛋白缓凝剂,经过预实验确定采用0.20%的植物蛋白缓凝剂对建筑石膏进行缓凝,之后对缓凝后的建筑石膏使用PMSD、RDP和HPMC进行改性,进而制备高性能建筑石膏^[16-18]。

1.2 试验方案设计与试验结果

为了考虑多因子间的交互作用,试验采用响应曲面方案设计。响应曲面设计主要包括中心复合设计和Box-Behnken设计两种类型,其中因为Box-Behnken设计可以高效估计一阶和二阶系数而被许多研究人员青睐。本试验采用Box-Behnken设计,建立3种外加剂与建筑石膏的回归模型,进行显著性检验和响应曲面分析^[19-21]。试验由三因子水平组成,选取PMSD掺量(A)、RDP掺量(B)和HPMC掺量(C)3个因子,以绝干抗折强度(Y_1)、绝干抗压强度(Y_2)、拉伸黏结强度(Y_3)、保水率(Y_4)、软化系数(Y_5)和孔隙率(Y_6)作为响应指标,设计了29个试验点。Box-Behnken设计要求试验因子的最佳水平处于所选取的试验因子水平内,因此需要先进行单因子试验,以确定各试验因子的最佳水平。对A、B、C每个因子取7个水平进行试验,试验结果见图1。

表1 磷石膏各化学成分的质量分数

(单位:%)

Tab. 1 Mass fractions of chemical compositions in phosphogypsum

(unit: %)

SO ₃	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	F	K ₂ O	BaO
50.748	39.764	6.408	0.780	0.650	0.629	0.342	0.179	0.140

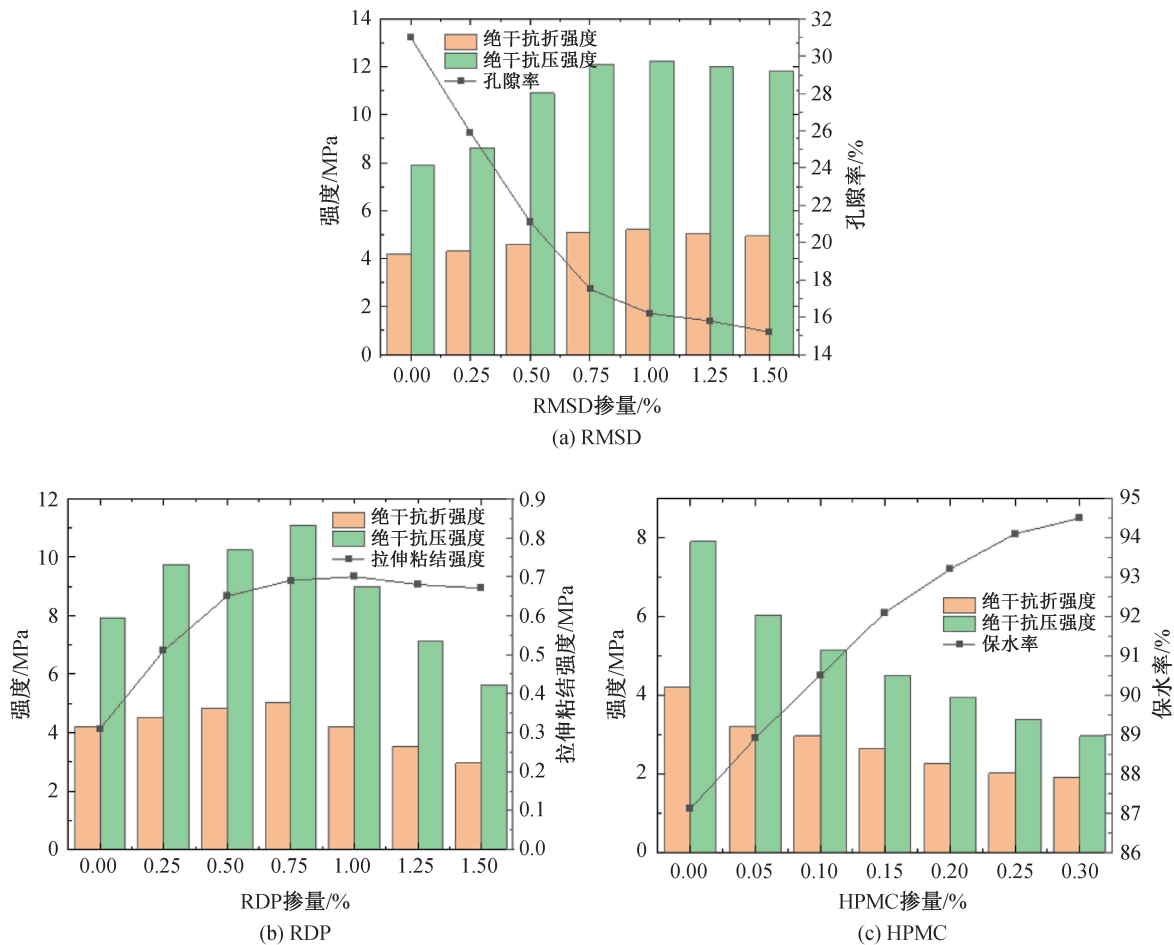


图 1 3 种外加剂对建筑石膏主要性能的影响

Fig. 1 Effects of three admixtures on main properties of building gypsum

根据图 1,对各外加剂的试验结果进行综合考虑,所得因子水平编码见表 2。根据表 2 开展响应曲面试验,试验结果见表 3。

表 2 试验因子及其水平

Tab. 2 Test factors and their levels

因子	代码	水平		
		-1	0	1
PMSD 掺量/%	A	0.75	1.00	1.25
RDP 掺量/%	B	0.50	0.75	1.00
HPMC 掺量/%	C	0.10	0.15	0.20

2 结果与讨论

利用 Design-Expert 12 软件中的 Quadratic 函数建立 Y_1 — Y_6 的回归模型,分别见式 (1) 至式 (6),并对模型进行方差分析,结果见表 4 至表 9。由表 4 至表 9 可知,模型的失拟项均不显著,说明模型拟合效果较好。基于模型,对 6 项指标的试验数据进行响应曲面拟合,绘制双因子响应曲面图和等值线平面图,结果见图 2 至图 7。试验结果需符合以下条件,其回归模型才被认为可靠:响应指

标的回归模型满足 $p < 0.01$ 、调整 R 方 (Adjusted R -Squared, $Adj R^2$) > 0.9 和变异系数 (Coefficient of Variation, CV) $< 10\%$,全部响应指标的一次项满足 $p < 0.05$,响应指标的交互项至少有一项满足 $p < 0.05$,响应指标的失拟项满足 $p > 0.05$ 。

$$Y_1 = 3.89 + 0.11A + 0.2B - 0.2C - 0.08AB - 0.14AC + 0.05BC - 0.58A^2 - 0.52B^2 - 0.22C^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 6.75 + 0.19A + 0.44B - 0.37C - 0.11AB - 0.18AC + 0.1BC - 1.18A^2 - 0.95B^2 - 0.55C^2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 0.61 + 0.04A + 0.15B - 0.09C + 0.01AB + 0.01AC + 0.03BC - 0.01A^2 - 0.1B^2 - 0.06C^2 \quad (3)$$

$$Y_4 = 91.1 + 0.06A - 0.43B + 0.81C + 0.08AB - 0.3AC - 0.58BC + 0.48A^2 - 0.1B^2 - 0.58C^2 \quad (4)$$

$$Y_5 = 17.33 - 1.05A + 0.68B + 0.85C - 0.73AB - 0.38AC + 0.13BC + 2.17A^2 - 0.53B^2 + 0.37C^2 \quad (5)$$

表3 试验结果

Tab.3 Test results

序号	PMSD 掺量 A/%	RDP 掺量 B/%	HPMC 掺量 C/%	绝干抗折 强度 Y_1 /MPa	绝干抗压 强度 Y_2 /MPa	拉伸黏结 强度 Y_3 /MPa	保水率 Y_4 /%	软化系数 Y_5	孔隙率 Y_6 /%
1	1.25	0.75	0.10	3.45	5.71	0.51	90.5	0.65	18.0
2	0.75	0.50	0.15	2.43	3.90	0.33	91.6	0.58	18.5
3	0.75	0.75	0.20	3.00	4.68	0.55	92.1	0.56	22.5
4	0.75	0.75	0.10	3.00	4.99	0.43	89.9	0.65	19.5
5	1.25	1.00	0.15	3.00	5.11	0.67	91.5	0.67	18.0
6	1.00	0.75	0.15	3.84	6.70	0.61	90.9	0.72	17.3
7	1.25	0.75	0.20	2.90	4.70	0.66	91.5	0.60	19.5
8	0.75	1.00	0.15	2.91	4.94	0.58	91.1	0.67	21.4
9	1.00	1.00	0.20	3.20	5.40	0.75	90.0	0.67	18.5
10	1.00	1.00	0.10	3.60	6.04	0.48	89.5	0.67	17.1
11	1.00	0.75	0.15	3.90	6.72	0.63	91.5	0.71	17.5
12	1.00	0.75	0.15	3.93	6.83	0.58	90.9	0.72	17.2
13	1.00	0.50	0.20	2.60	4.26	0.35	92.5	0.60	17.0
14	1.00	0.50	0.10	3.21	5.28	0.20	89.7	0.64	16.1
15	1.25	0.50	0.15	2.84	4.53	0.40	91.7	0.58	18.0

$$Y_6 = 0.72 + 0.01A + 0.04B - 0.02C + 0.01AC + 0.01BC - 0.06A^2 - 0.03B^2 - 0.04C^2 \quad (6)$$

2.1 A、B、C三种外加剂掺量对绝干抗折强度的影响

表4为绝干抗折强度的方差分析。由表中的 p 值可知,绝干抗折强度的回归模型呈高度显著,模型的Adj $R^2=0.9549$, $CV=3.10\%$,一次项A、B和C对绝干抗折强度影响显著,交互项AC和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对绝干抗折强度均影响显著。模型拟合程度高,结果可靠。由 F 值可知,对绝干抗折强

度的影响程度为 $B>C>A$ 。

对比图2(a)(d)和(c)(f)可知,B对应的曲面较陡,可见B相比A和C对绝干抗折强度的影响显著;同理,由图(b)(e)可知,A相比C对绝干抗折强度的影响显著。交互项AC对绝干抗折强度影响显著,推测原因是PMSD会消除HPMC引入建筑石膏浆体中的夹带小气泡,进而提高建筑石膏硬化体的绝干抗折强度。由于响应曲面研究与方差分析存在维度差异,其分析结果和方差分析中由 F 值得出的结论有出入系正常现象。

表4 绝干抗折强度的方差分析

Tab.4 Variance analysis of absolute dry flexural strength

方差来源	平方和	自由度	均方值	F	p	p 值推论
模型	2.9800	9	0.3312	33.95	0.0006	高度显著
A	0.0903	1	0.0903	9.26	0.0287	显著
B	0.3321	1	0.3321	34.05	0.0021	高度显著
C	0.3042	1	0.3042	31.18	0.0025	高度显著
AB	0.0256	1	0.0256	2.62	0.1662	不显著
AC	0.0756	1	0.0756	7.75	0.0387	显著
BC	0.0110	1	0.0110	1.13	0.3364	不显著
A^2	1.2400	1	1.2400	127.33	<0.0001	高度显著
B^2	0.9793	1	0.9793	100.39	0.0002	高度显著
C^2	0.1828	1	0.1828	18.74	0.0075	高度显著
残差	0.0488	5	0.0098	—	—	—
失拟项	0.0446	3	0.0149	7.08	0.1263	不显著
纯误差	0.0042	2	0.0021	—	—	—
总误差	3.0300	14	—	—	—	—

$$R^2=0.9839; \text{Adj } R^2=0.9549; \text{预测 } R^2 \text{ (Predicted } R\text{-Squared, Pre } R^2) = 0.7614; CV=3.10\%$$

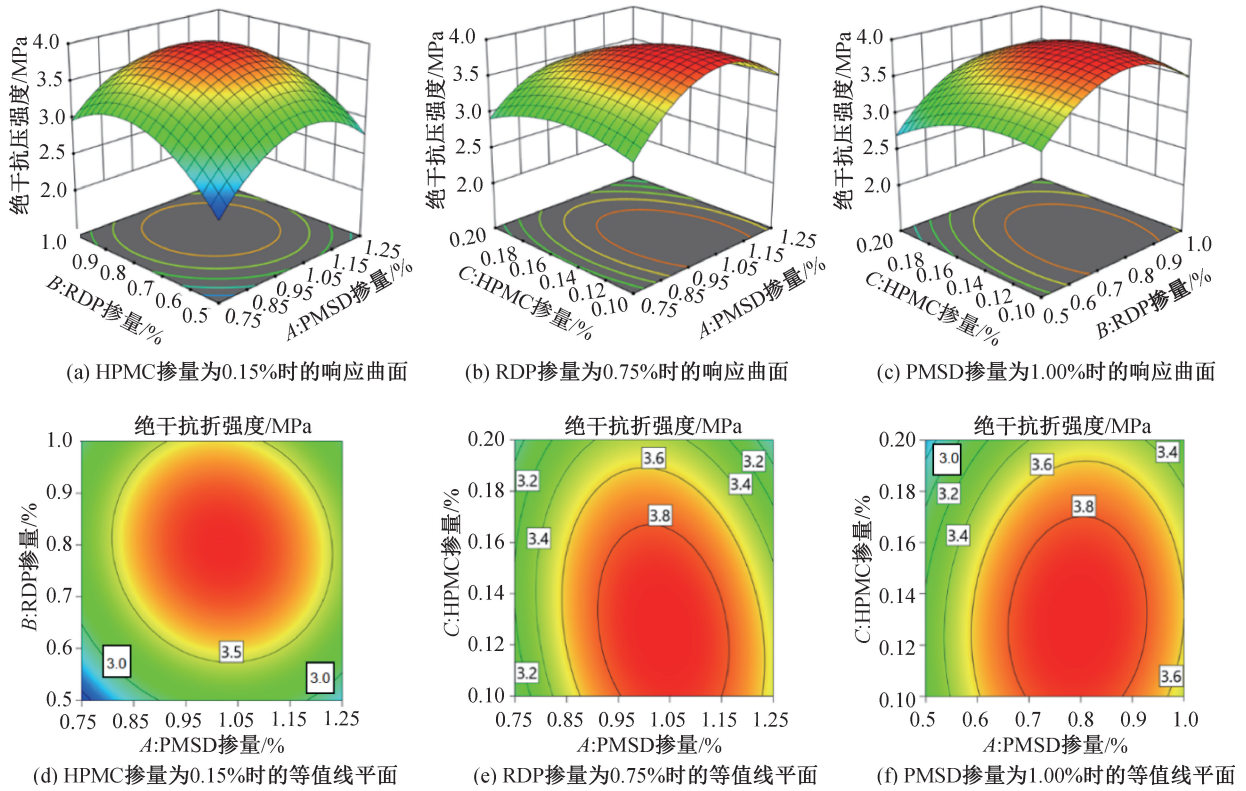


图 2 绝干抗折强度的响应曲面和等值线平面

Fig. 2 Response surface and contour plane of absolute dry flexural strength

2.2 A、B、C 三种外加剂掺量对绝干抗压强度的影响

表 5 为绝干抗压强度的方差分析。由表中的 p 值可知,绝干抗压强度的回归模型呈高度显著,模型的 $Adj R^2 = 0.9913$, $CV = 1.60\%$,一次项 A 、 B 和 C 对绝干抗压强度影响高度显著,交互项 AC 、 AB 和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对绝干抗压强度均影响显

著。模型拟合程度高,结果可靠。由 F 值可知,对绝干抗压强度的影响程度为 $B > C > A$ 。

对比图 3(a)(d) 和 (c)(f) 可知, B 对应的曲面较陡,可见 B 相比 A 和 C 对绝干抗压强度的影响显著;同理,由图 3(b)(e) 可知, A 相比 C 对绝干抗压强度的影响显著。交互项 AB 对绝干抗压强度影响显著,推测原因是 RDP 提高了建筑石膏浆

表 5 绝干抗压强度的方差分析

Tab. 5 Variance analysis of absolute dry compressive strength

方差来源	平方和	自由度	均方值	F	p	p 值推论
模型	11.620 0	9	1.290 0	177.97	<0.000 1	高度显著
A	0.294 5	1	0.294 5	40.59	0.001 4	高度显著
B	1.540 0	1	1.540 0	212.47	<0.000 1	高度显著
C	1.120 0	1	1.120 0	153.70	<0.000 1	高度显著
AB	0.051 1	1	0.051 1	7.04	0.045 3	显著
AC	0.122 2	1	0.122 2	16.83	0.009 3	高度显著
BC	0.035 7	1	0.035 7	4.92	0.077 3	不显著
A^2	5.120 0	1	5.120 0	705.55	<0.000 1	高度显著
B^2	3.330 0	1	3.330 0	459.02	<0.000 1	高度显著
C^2	1.130 0	1	1.130 0	155.63	<0.000 1	高度显著
残差	0.036 3	5	0.007 3	—	—	—
失拟项	0.026 8	3	0.008 9	1.89	0.363 8	不显著
纯误差	0.009 4	2	0.004 7	—	—	—
总误差	11.660 0	14	—	—	—	—

$R^2 = 0.9969$; $Adj R^2 = 0.9913$; $Pre R^2 = 0.9613$; $CV = 1.60\%$

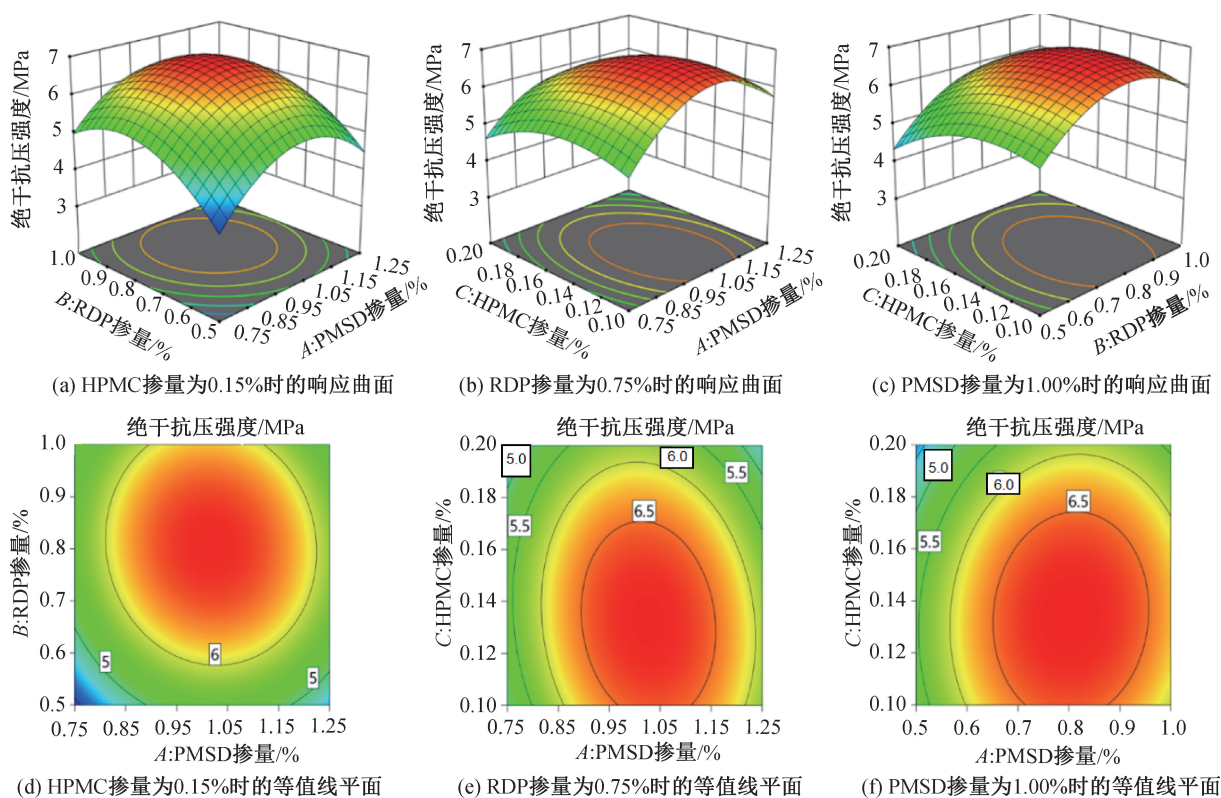


图3 绝干抗压强度的响应曲面和等值线平面

Fig. 3 Response surface and contour plane of absolute dry compressive strength

体的黏结性能,影响了消泡剂的破泡效率,使浆体中部分孔隙留存,降低了硬化体的绝干抗压强度。交互项 AC 对绝干抗压强度影响高度显著,这和对绝干抗折强度影响显著的原因一致。

2.3 A、B、C三种外加剂掺量对拉伸黏结强度的影响

表6为拉伸黏结强度的方差分析。由表中的

p 值可知,拉伸黏结强度的回归模型呈高度显著,模型的 $Adj R^2 = 0.934 2$, $CV = 7.46\%$,一次项 A 、 B 和 C 和二次项 B^2 、 C^2 对拉伸黏结强度均影响显著,但无显著的交互项,可见拉伸黏结强度的回归模型拟合程度一般。由 F 值可知,对拉伸黏结强度的影响程度为 $B > C > A$ 。

对比图4(a)(d)和(c)(f)可知, B 对应的曲面较陡,可见 B 相比 A 和 C 对拉伸黏结强度的影

表6 拉伸黏结强度的方差分析

Tab. 6 Variance analysis of tensile bond strength

方差来源	平方和	自由度	均方值	F	p	p 值推论
模型	0.307 2	9	0.034 1	23.090 0	0.001 5	高度显著
A	0.015 3	1	0.015 3	10.360 0	0.023 5	显著
B	0.180 0	1	0.180 0	121.760 0	0.000 1	高度显著
C	0.059 5	1	0.059 5	40.260 0	0.001 4	高度显著
AB	0.000 1	1	0.000 1	0.067 6	0.805 2	不显著
AC	0.000 2	1	0.000 2	0.152 2	0.712 5	不显著
BC	0.003 6	1	0.003 6	2.440 0	0.179 4	不显著
A^2	0.000 3	1	0.000 3	0.229 4	0.652 2	不显著
B^2	0.038 5	1	0.038 5	26.030 0	0.003 8	高度显著
C^2	0.013 1	1	0.013 1	8.870 0	0.030 9	显著
残差	0.007 4	5	0.001 5	—	—	—
失拟项	0.006 1	3	0.002 0	3.220 0	0.245 7	不显著
纯误差	0.001 3	2	0.000 6	—	—	—
总误差	0.314 6	14	—	—	—	—

$$R^2 = 0.976 5; Adj R^2 = 0.934 2; Pre R^2 = 0.679 4; CV = 7.46\%$$

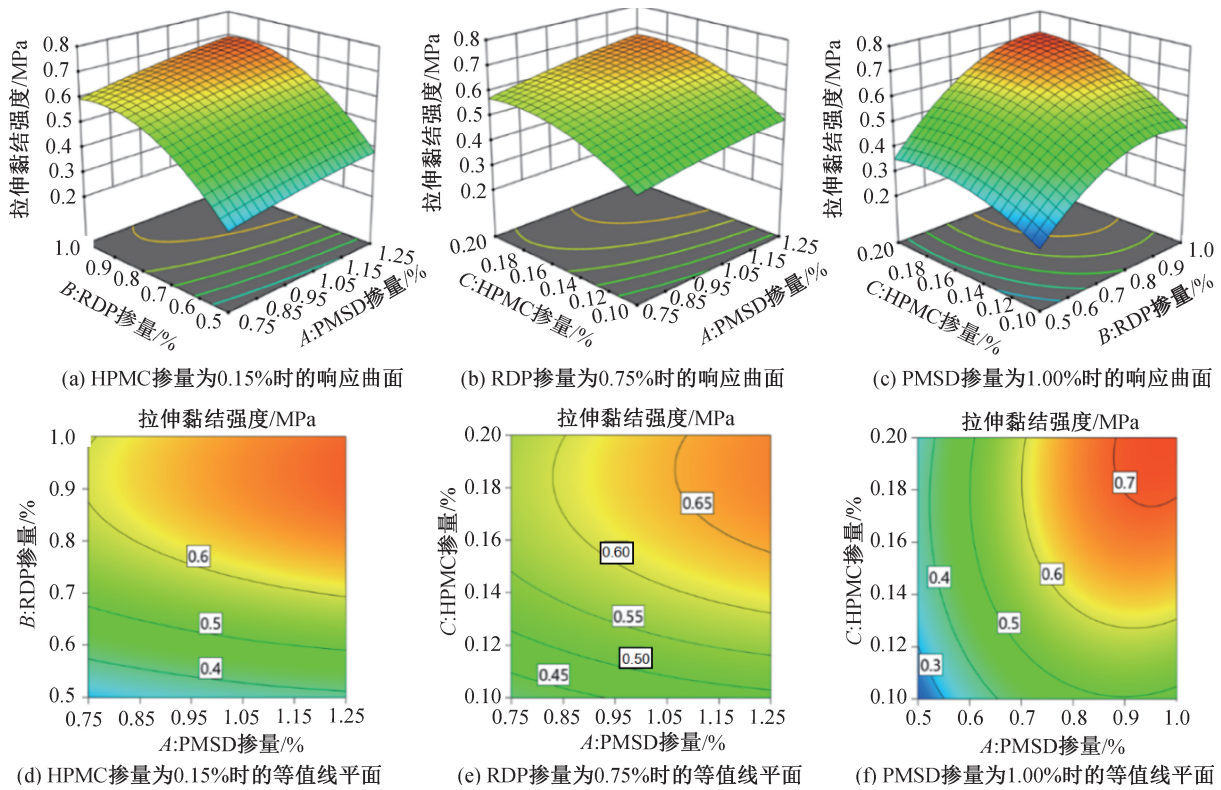


图 4 拉伸黏结强度的响应曲面和等值线平面

Fig. 4 Response surface and contour plane of tensile bond strength

响显著;同理,由图 4(b)(e)可知, *C* 相比 *A* 对拉伸黏结强度的影响显著。考虑到回归模型的拟合程度一般,故结论可靠度有限。

2.4 *A*、*B*、*C* 三种外加剂掺量对保水率的影响

表 7 为保水率的方差分析。由表中的 *p* 值可知,保水率的回归模型显著,模型的 $Adj R^2 = 0.8117 <$

0.9 , $CV = 0.432\%$, 一次项 *B* 和 *C* 对保水率影响显著,交互项 *BC* 和二次项 C^2 对保水率均影响显著,说明模型拟合程度一般。由表中的 *F* 值可知,对保水率的影响程度为 $C > B > A$ 。

对比图 5(b)(e)和(c)(f)可知, *C* 对应的曲面较陡,可见 *C* 相比 *A* 和 *B* 对保水率的影响显著;同理,由图 5(a)(d)可知, *B* 相比 *A* 对保水率的影

表 7 保水率的方差分析

Tab. 7 Variance analysis of water retention rate

方差来源	平方和	自由度	均方值	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>p</i> 值推论
模型	10.720 0	9	1.190 0	7.710 0	0.018 4	显著
<i>A</i>	0.031 2	1	0.031 2	0.202 3	0.671 7	不显著
<i>B</i>	1.450 0	1	1.450 0	9.350 0	0.028 2	显著
<i>C</i>	5.280 0	1	5.280 0	34.180 0	0.002 1	高度显著
<i>AB</i>	0.022 5	1	0.022 5	0.145 6	0.718 4	不显著
<i>AC</i>	0.360 0	1	0.360 0	2.330 0	0.187 4	不显著
<i>BC</i>	1.320 0	1	1.320 0	8.560 0	0.032 8	显著
A^2	0.833 1	1	0.833 1	5.390 0	0.067 9	不显著
B^2	0.036 9	1	0.036 9	0.239 0	0.645 6	不显著
C^2	1.220 0	1	1.220 0	7.900 0	0.037 5	显著
残差	0.772 5	5	0.154 5	—	—	—
失拟项	0.532 5	3	0.177 5	1.480 0	0.427 7	不显著
纯误差	0.240 0	2	0.120 0	—	—	—
总误差	11.490 0	14	—	—	—	—

$R^2 = 0.9328$; $Adj R^2 = 0.8117$; $Pre R^2 = 0.2114$; $CV = 0.432\%$

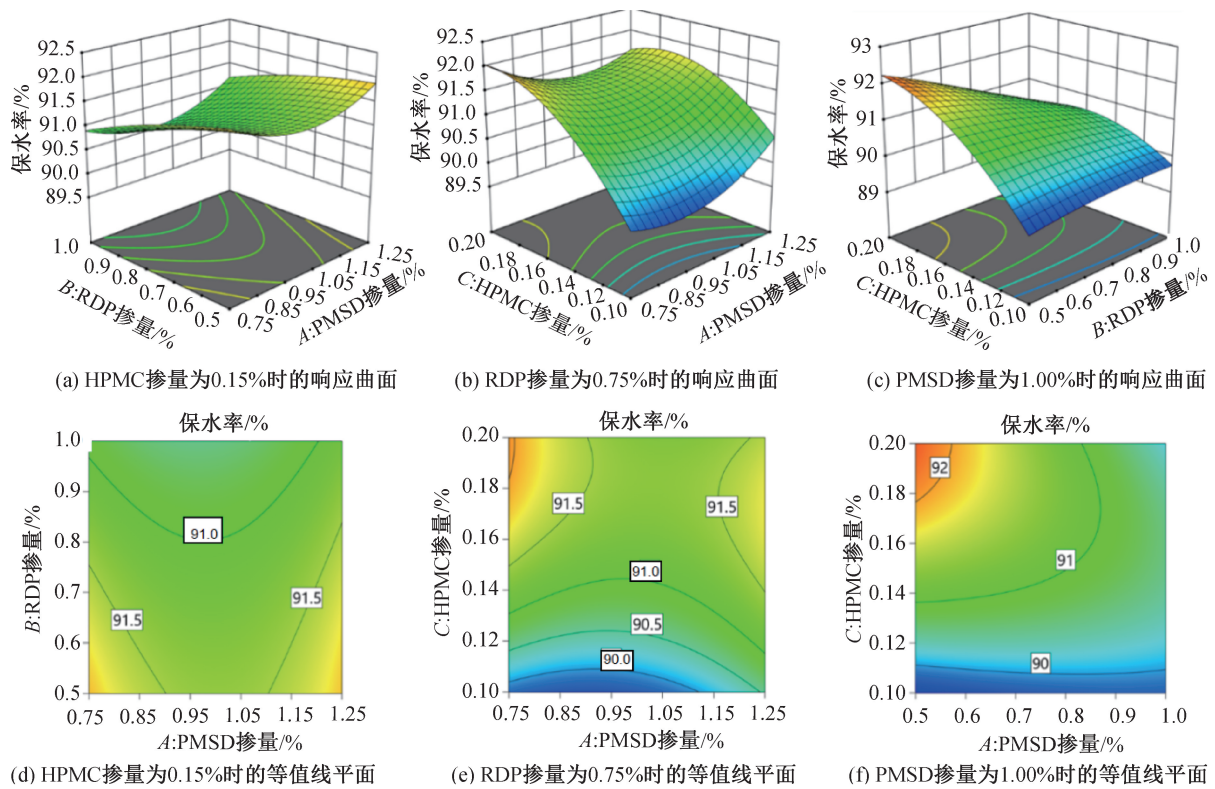


图5 保水率的响应曲面和等值线平面

Fig. 5 Response surface and contour plane of water retention rate

响显著。交互项 BC 对保水率影响显著,推测原因是 RDP 和 HPMC 生成氢键均需要浆体中的自由水,两者对自由水的竞争效应影响了建筑石膏浆体的保水率。考虑到回归模型的拟合程度一般,故结论可靠度有限。

2.5 A、B、C 三种外加剂掺量对孔隙率的影响

表 8 为孔隙率的方差分析。由表中的 p 值可

知,孔隙率的回归模型呈高度显著,模型的 $Adj R^2 = 0.9512, CV = 2.06\%$,一次项 $A、B$ 和 C 对孔隙率影响高度显著,交互项 AB 和二次项 $A^2、B^2$ 对孔隙率均影响显著。模型拟合程度高,结果可靠。由 F 值可知,对孔隙率的影响程度为 $A > C > B$ 。

对比图 6(a)(d) 和 (b)(e) 可知, A 对应的曲面较陡,可见 A 相比 C 和 B 对孔隙率的影响显

表 8 孔隙率的方差分析

Tab. 8 Variance analysis of porosity

方差来源	平方和	自由度	均方值	F	p	p 值推论
模型	40.410 0	9	4.490 0	31.330 0	0.000 7	高度显著
A	8.820 0	1	8.820 0	61.530 0	0.000 5	高度显著
B	3.640 0	1	3.640 0	25.430 0	0.004 0	高度显著
C	5.780 0	1	5.780 0	40.330 0	0.001 4	高度显著
AB	2.100 0	1	2.100 0	14.670 0	0.012 2	显著
AC	0.562 5	1	0.562 5	3.920 0	0.104 4	不显著
BC	0.062 5	1	0.062 5	0.436 0	0.538 2	不显著
A^2	17.400 0	1	17.400 0	121.400 0	0.000 1	高度显著
B^2	1.030 0	1	1.030 0	7.210 0	0.043 5	显著
C^2	0.507 8	1	0.507 8	3.540 0	0.118 5	不显著
残差	0.716 7	5	0.143 3	—	—	—
失拟项	0.670 0	3	0.223 3	9.570 0	0.096 1	不显著
纯误差	0.046 7	2	0.023 3	—	—	—
总误差	41.130 0	14	—	—	—	—

$R^2 = 0.9826; Adj R^2 = 0.9512; Pre R^2 = 0.7368; CV = 2.06\%$

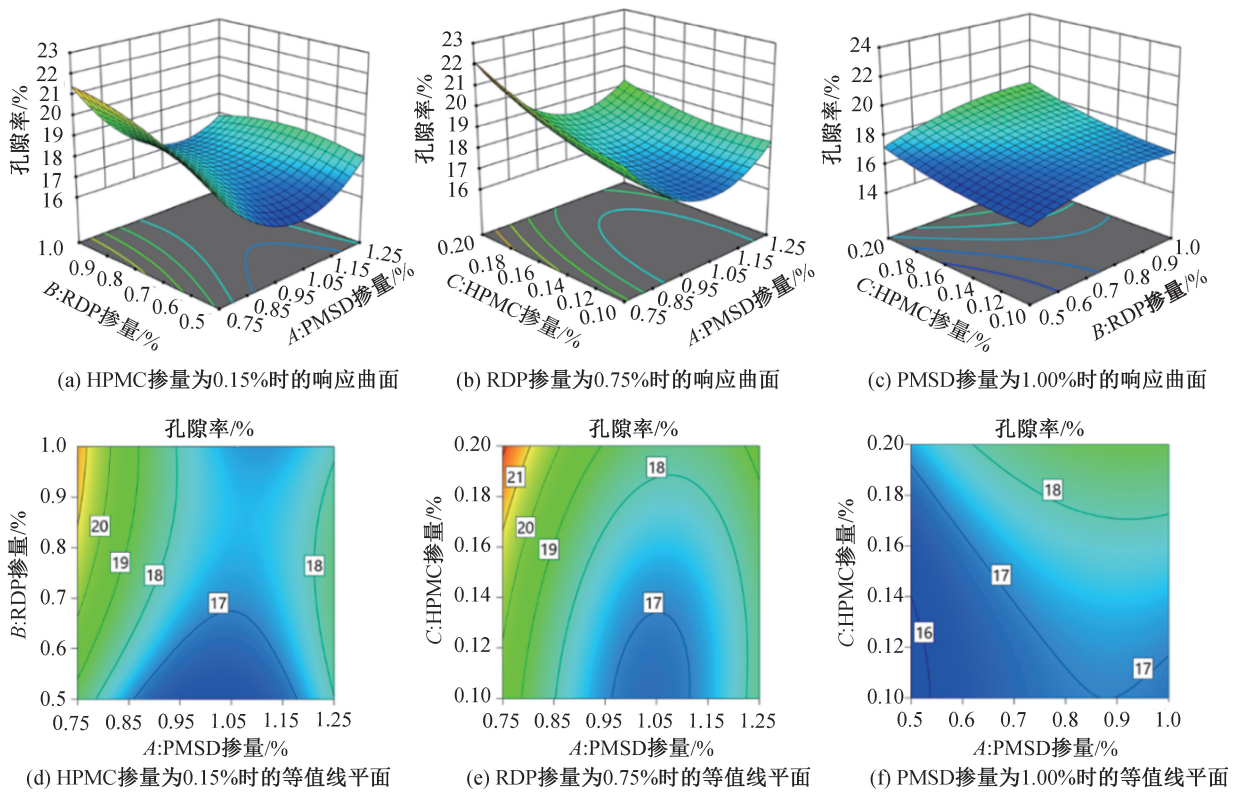


图 6 孔隙率的响应曲面和等值线平面

Fig. 6 Response surface and contour plane of porosity

著;同理,由图 6(c)(f)可知,C 相比 B 对孔隙率的影响显著。交互项 AB 对孔隙率影响显著,其原因在分析交互项 AB 对绝干抗压强度的影响时已说明,不再赘述。

2.6 A、B、C 三种外加剂掺量对软化系数的影响

表 9 为软化系数的方差分析。由表中的 p 值

可知,软化系数的回归模型呈显著,模型的 $Adj R^2 = 0.8465 < 0.9$, $CV = 3.19\%$,一次项 B 和 C 对软化系数影响显著,二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对软化系数均影响显著,无显著的交互项,可见模型拟合程度一般。由 F 值可知,对软化系数的影响程度为 $B > C > A$ 。

对比图 7(a)(d)和(c)(f)可知,B 对应的曲面较陡,可见 B 相比 A 和 C 对软化系数的影响

表 9 软化系数的方差分析

Tab. 9 Variance analysis of softening coefficient

方差来源	平方和	自由度	均方值	F	p	p 值推论
模型	3.660×10^{-2}	9	0.410×10^{-2}	9.580	0.011 4	显著
A	0.020×10^{-2}	1	0.020×10^{-2}	0.548	0.492 6	不显著
B	1.000×10^{-2}	1	1.000×10^{-2}	23.550	0.004 7	高度显著
C	0.440×10^{-2}	1	0.440×10^{-2}	10.440	0.023 2	显著
AB	2.789×10^{-9}	1	2.789×10^{-9}	0.000 *	0.998 1	不显著
AC	0.040×10^{-2}	1	0.040×10^{-2}	0.917	0.382 2	不显著
BC	0.030×10^{-2}	1	0.030×10^{-2}	0.695	0.442 3	不显著
A^2	1.410×10^{-2}	1	1.410×10^{-2}	33.280	0.002 2	高度显著
B^2	0.330×10^{-2}	1	0.330×10^{-2}	7.710	0.039 0	显著
C^2	0.660×10^{-2}	1	0.660×10^{-2}	15.630	0.010 8	显著
残差	0.210×10^{-2}	5	0.040×10^{-2}	—	—	—
失拟项	0.200×10^{-2}	3	0.070×10^{-2}	11.610	0.080 3	不显著
纯误差	0.010×10^{-2}	2	0.010×10^{-2}	—	—	—
总误差	3.880×10^{-2}	14	—	—	—	—

$R^2 = 0.9452$; $Adj R^2 = 0.8465$; $Pre R^2 = 0.1638$; $CV = 3.19\%$

注:标*的数据实际值为 0.000 006 561。

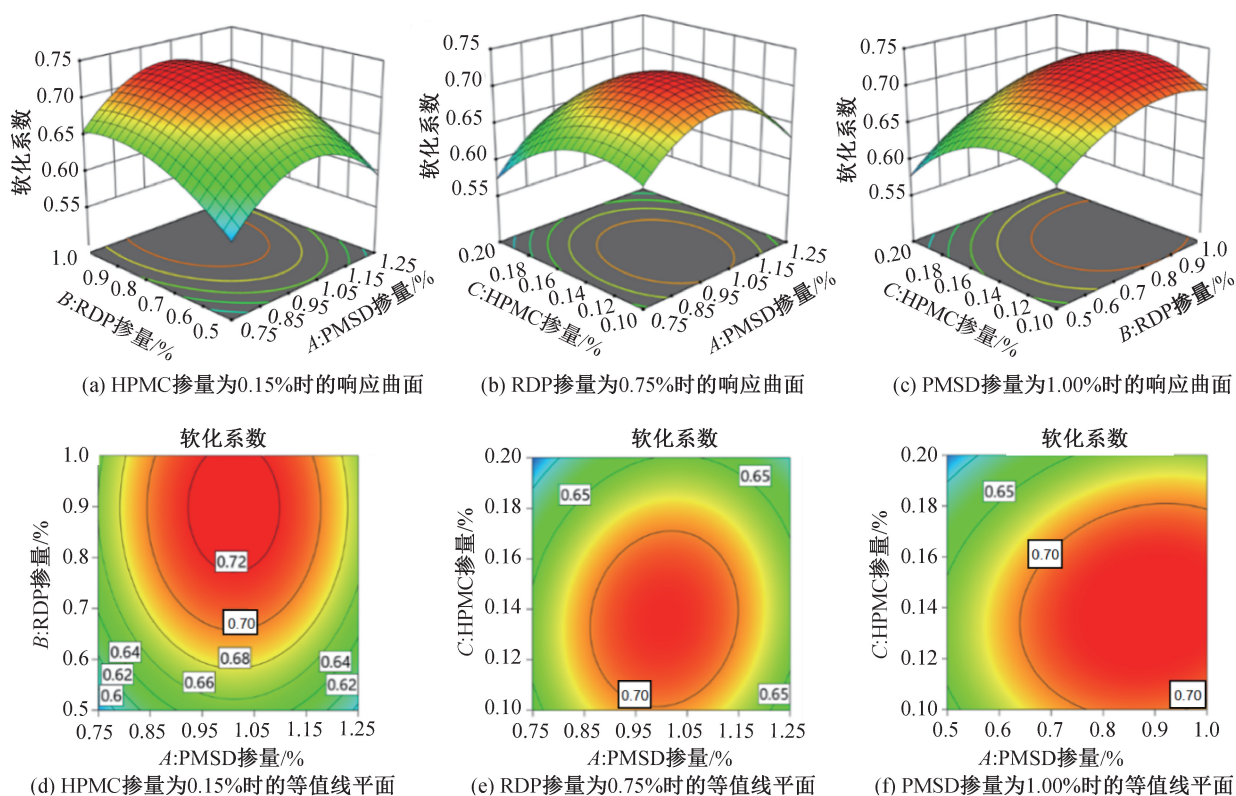


图7 软化系数的响应曲面和等值线平面

Fig. 7 Response surface and contour plane of softening coefficient

显著;同理,由图7(b)(e)可知,A相比C对软化系数的影响显著。考虑到回归模型的拟合程度一般,故结论可靠度有限。

2.7 优化结果分析

采用 Design-Expert 12 软件对响应指标设置优化条件,将绝干抗折、绝干抗压和拉伸黏结强度以及软化系数的优化条件设为 Maximize,保水率优化条件设为 90.5%~92.5%,孔隙率优化条件则设为 Minimize。同时,基于 Optimization 功能生成各因子的优化参数,得到 A、B、C 的优化参数分别为 1.051%、0.827%、0.141%。对优化结果的可取性进行分析,可取性的响应曲面和等值线平面见图8。由图可知,深红色部分所对应的纵横坐标为可取性大于0.8时PMSD、RDP和HPMC的最佳掺量范围,优化参数的可取性(0.918)接近1,可取性极高。

采用 Design-Expert 12 软件模拟优化参数的指标结果,并基于优化参数进行验证。将结果和仅采用0.20%植物蛋白缓凝剂缓凝后未改性的建筑石膏进行对比,结果见表10。由表可知,试验组和模拟组的结果基本一致,经1.051%PMSD、0.827%RDP和0.141%HPMC改性的建筑石膏的6项指

标均大幅优化。结合《抹灰石膏》(GB/T 28627—2023)^[22]中对不同类型抹灰石膏的标准可知,改性后建筑石膏(试验组)已达到面层抹灰石膏和底层抹灰石膏的规范要求。因此,经1.051%PMSD、0.827%RDP和0.141%HPMC改性后,可得到一种符合面层抹灰石膏和底层抹灰石膏标准的高性能建筑石膏。

3 结论

1) 3种外加剂对改性后高性能建筑石膏的绝干抗折、绝干抗压和拉伸黏结强度以及软化系数的影响程度表现出一致性,影响程度由大到小依次为RDP、HPMC、PMSD;对保水率的影响程度由大到小依次为HPMC、RDP、PMSD;对孔隙率的影响程度由大到小依次为PMSD、HPMC、RDP。

2) 通过 Design-Expert 软件的 Optimization 功能优化分析,确定了可取性极高(0.918)的PMSD、RDP和HPMC最佳掺量,分别为1.051%、0.827%和0.141%。改性后建筑石膏的强度、软化系数、保水率和孔隙率等性能显著提高,同时还满足了面层抹灰石膏和底层抹灰石膏的标准要求。

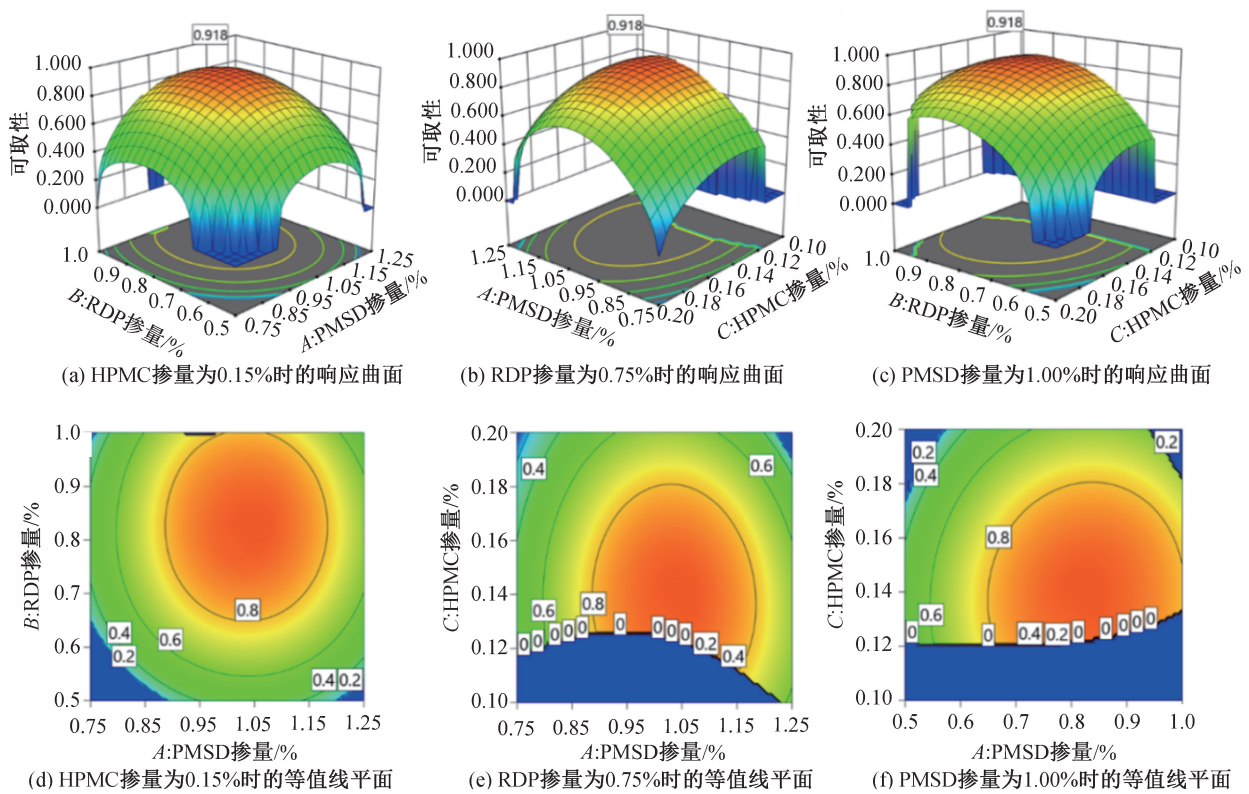


图8 可取性的响应曲面和等值线平面

Fig. 8 Response surface and contour plane of feasibility

表10 优化参数的模拟结果和试验结果

Tab. 10 Simulation results and experimental results of optimized parameters

项目	凝结时间/min		强度/MPa			软化系数	保水率/%	孔隙率/%	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
	初凝	终凝	绝干抗折	绝干抗压	拉伸黏结				
模拟组	—	—	3.93	6.83	0.63	0.73	90.9	17.2	—
试验组	78	241	3.97	6.90	0.65	0.72	91.2	16.9	0.597
未改性组	80	250	4.20	7.90	0.29	0.54	87.1	31.0	0.407

参考文献:

[1] QIAN W M, NING P, ZHU H D, et al. Two-step thermal decomposition mechanism of phosphogypsum for resource utilization [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2023, 101(1): 328-336.

[2] YANG J, LIU S Y, WANG Y F, et al. Phosphogypsum resource utilization based on thermodynamic analysis[J]. Chemical Engineering & Technology, 2022, 45(5): 776-790.

[3] WU F H, REN Y C, QU G F, et al. Utilization path of bulk industrial solid waste: a review on the multi-directional resource utilization path of phosphogypsum [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 313: 114957.

[4] SILVA L F O, PINTO D, OLIVEIRA M L S, et al. Dispersion of hazardous nanoparticles on beaches around phosphogypsum factories[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 169: 112493.

[5] CHERNYSH Y, YAKHNENKO O, CHUBUR V, et al. Phosphogypsum recycling: a review of environmental issues, current trends, and prospects [J]. Applied Sciences, 2021, 11(4): 1575.

[6] ZHANG Y Y, YANG J S, CAO X Y. Effects of several retarders on setting time and strength of building gypsum [J]. Construction and Building Materials, 2020, 240: 117927.

[7] ZHANG L J, MO K H, YAP S P, et al. Mechanical strength, water resistance and drying shrinkage of lightweight hemihydrate phosphogypsum-cement composite with ground granulated blast furnace slag and recycled waste glass [J]. Construction and Building Materials, 2022, 345: 128232.

[8] DOLEŽELOVÁ M, SCHEINHERROVÁ L, KREJSOVÁ J, et al. Investigation of gypsum composites with different lightweight fillers[J]. Construction and Building Materials,

- 2021,297:123791.
- [9] 吴超,杨林,李玮,等. 轻质抹灰磷建筑石膏性能影响机制研究[J]. 硅酸盐通报,2021,40(2):565-572.
WU C, YANG L, LI W, et al. Performance influence mechanism of lightweight plastering phosphorus building gypsum [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021,40(2):565-572.
- [10] 易芸,董永刚,杨林,等. 轻质磷建筑石膏实心砌块的制备研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(6):1848-1853.
YI Y, DONG Y G, YANG L, et al. Research on preparation of lightweight building phosphogypsum solid blocks [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020,39(6):1848-1853.
- [11] 储怡鑫. 磷石膏材料改性及高性能建筑石膏制备应用研究[D]. 抚州:东华理工大学,2023.
CHU Y X. Study on modification of phosphogypsum material and preparation and application of high performance building gypsum [D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2023.
- [12] OJEDA-LÓPEZ R, AGUILAR-HUERTA E, MAIA D A S, et al. Tailoring synthesis conditions of carbon microfibers to enhance the microporosity, CO₂ and CH₄ adsorption by using the response surface methodology [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2020,305:110333.
- [13] FREYA R, SENTHIL R. Optimal evaluation of the rheological parameters for STF dampers in semi-rigid joints of steel structures using response surface method [J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022(1):1769739.
- [14] NIE Q, LI M Q, ZHOU S Z. Structural parameter optimization of the helical blade of the variable-pitch, downhole, cyclone separator based on the response surface method [J]. Energies, 2022,15(18):6839.
- [15] GUO J X, HU S W, ZHAO X, et al. Compressive strength performance of additives for cement-based grouting material with low water-binder ratio by response surface methodology [C]//Proceedings of the 8th International Conference on Civil Engineering. Singapore: Springer, 2022:368-379.
- [16] 黎方潜. 聚醚改性有机硅消泡剂的制备及性能评价 [D]. 北京:华北电力大学,2017.
LI F Q. Preparation and evaluation of polyether modified polysiloxane defoamer [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [17] 黄滔,彭小芹,王淑萍,等. 蛋白类缓凝剂对建筑石膏的适应性[J]. 建筑材料学报,2018,21(4):608-613.
HUANG T, PENG X Q, WANG S P, et al. Adaptability of protein retarder for calcined gypsum [J]. Journal of Building Materials, 2018,21(4):608-613.
- [18] 李晶辉,赵文杰. 可再分散乳胶粉的研究进展[J]. 硅酸盐通报,2016,35(12):4038-4043.
LI J H, ZHAO W J. Research development of dispersible latex powder [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016,35(12):4038-4043.
- [19] 江浩,易进翔,谢胜军,等. 基于响应面法的片麻岩尾矿烧结砖优化工艺研究[J]. 科学技术与工程,2023,23(20):8795-8803.
JIANG H, YI J X, XIE S J, et al. Process optimization of gneiss tailings sintered brick based on response surface method [J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(20):8795-8803.
- [20] 李少秋,陈伟,张云英,等. 基于响应曲面法的聚合氯化铝对矿井废水中氟离子混凝去除工艺优化[J]. 环境工程学报,2023,17(5):1514-1522+1394.
LI S Q, CHEN W, ZHANG Y Y, et al. Optimization of coagulation removal of fluoride ions from mine wastewater by polyaluminum chloride based on response surface methodology [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023,17(5):1514-1522+1394.
- [21] 熊孟雪,杨敏,陈前林. 基于 Box-Behnken 响应面法的钠离子吸附剂的制备工艺条件优化[J]. 硅酸盐通报,2022,41(7):2360-2367.
XIONG M X, YANG M, CHEN Q L. Optimization of preparation process conditions for sodium ion adsorbent based on box-behnken response surface methodology [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022,41(7):2360-2367.
- [22] 国家市场监督管理总局,国家标准化委员会. 抹灰石膏:GB/T 28627—2023[S]. 北京:中国标准出版社,2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Gypsum plaster: GB/T 28627—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.

(责任编辑 唐彦彦)