文章编号:1007-9629(2021)05-0970-07

基于响应面法的三元聚合物砂浆力学性能

吕官记[1], 季 韬[2]
(1.福建商学院 管理工程系,福建 福州 350012;2.福州大学 土木工程学院,福建 福州 350116)

摘要:通过响应面法的 Box-behnken 试验设计方法构建二次多项式回归方程,对氯乙烯、乙烯和乙烯醚三元聚合物砂浆配合比进行优化,并结合宏观性能与微观形貌进行机理分析.结果表明:所建模型在试验范围内能较准确地预测结果,响应面法用于三元聚合物砂浆配合比优化具有准确性与科学性;对 28 d 抗压强度影响强弱顺序依次为水灰比、减水剂掺量、聚合物掺量;对 28 d 抗折强度和黏结强度影响强弱顺序为聚合物掺量、水灰比、减水剂掺量;将 28 d 黏结强度最大值、抗折强度最大值和抗压强度最小值(折压比最大)作为目标优化值,得出三元聚合物砂浆的最优配合比为:聚合物掺量为 12%,水灰比为 0.42,减水剂掺量为 1.12%.

关键词:响应面法;力学性能;三元聚合物;优化
中图分类号:TU528.41　　**文献标志码**:A　　**doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.010

Mechanical Properties of Ternary Polymer Mortar Based on Response Surface Method

LÜ Guanji[1], *JI Tao*[2]
(1. Depontment of Management Engineering, Fujian Business University, Fuzhou 350012, China;
2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: A quadratic polynomial regression equation was established by response surface method to optimize the mix proportion of vinyl chloride, ethylene and ethylene ether ternary polymer mortar. The mechanism was analyzed by combining the macroscopic property and microscopic morphology. The results show that the model can accurately predict the results within the test range, and the response surface method is accurate and scientific in the mix proportion optimization of ternary polymer mortar. The order of influence factors on the 28 d compressive strength is water to cement ratio, water reducer content, polymer content. While that on 28 d flexural strength and bonding strength is polymer content, water to cement ratio and water reducer content. Taking the maximum bonding strength, the maximum flexural strength and the minimum compressive strength (the maximum flexural-compressive strength ratio) as the target optimization values, it is concluded that the optimal mix proportion of ternary polymer mortar is: polymer content is 12%, water to cement ratio is 0.42 and water reducer content is 1.12%.

Key words: response surface method; mechanical property; ternary polymer; optimization

在 19 世纪 50 年代,聚合物开始被应用于土木工程行业中,如改性水泥砂浆、混凝土等.采用丁苯乳液(SBR)、苯丙乳液(SAE)、不饱和聚酯树脂及乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)等改性混凝土后能提高混凝土黏结性与耐久性等性能[1-3];采用丁苯乳液、聚偏氟乙烯乳液及水性环氧树脂等聚合物改性水泥砂浆,均会对水泥砂浆工作性能及其力学性能产生影响[4-7].但上述改性采用的聚合物多为一元或二元聚合物,改性后

收稿日期:2020-12-14; 修订日期:2021-02-20
基金项目:福建省科技计划项目(2020J01325)
第一作者:吕官记(1984—),男,河南信阳人,福建商学院讲师,硕士.E-mail:lvguan@fjbu.edu.cn

的砂浆力学性能仍然不能满足实际应用需求．三元聚合物砂浆具有优异的防水性、防腐性、黏结性，在加气混凝土砌块界面剂、保温工程黏结砂浆和抹面砂浆、植筋混凝土等方面均有应用，且在与一元及二元聚合物改性砂浆对比试验中具有优势[8-10]．

响应面法是应用极为广泛且在全球认可度较高的一种试验设计方法，已在粮油食品、化学化工、生物工程等方面的工艺配方设计中广泛应用．它可以解决非线性数据处理的相关问题，不但能建立影响因素与响应值之间的函数关系，还可以通过回归方程的拟合和响应曲面、等高线的绘制来求出相应于各因素水平的响应值；同时，在各因素水平的响应值基础上，找出预测的最优值[11]．目前，土木工程行业中也引入此设计软件，其在设计和优化水泥砂浆、混凝土配合比中也有少量应用[12-17]．

目前采用三元聚合物改性砂浆的研究较少，基于响应面法分析双因素交互作用对三元聚合物砂浆力学性能的影响以及优化三元聚合物砂浆配合比的研究尚未见报道．本文引入氯乙烯、乙烯和乙烯醚三元聚合物，研究配合比（聚合物掺量、水灰比和减水剂掺量）对三元聚合物砂浆力学性能的影响，建立函数关系式，依据函数目标值对配合比进行优化，并结合宏观性能和微观形貌进行机理分析．

1　试验

1.1　原材料

COMPAKTUNA® PRO是由氯乙烯、乙烯、乙烯醚组成的三元聚合物，生产厂家为比利时王国精细化工工业（控股）有限公司，其技术参数见表1．

表1　三元聚合物技术参数

Table 1　Technical parameters of ternary polymer

Appearance	Solid content (by mass)/%	Viscosity/(mPa·s)	Vitrification temperature/℃	pH value	Minimum film forming temperature(MFT)/℃
Milky white	52±1	80±20	7	7-9	7

水泥为P·O 42.5水泥，生产厂家为福建炼石水泥有限公司，比表面积为361.5 m^2/kg，标准稠度用水量1)为26.8%．砂为河砂，密度为2 610 kg/m^3，堆积密度为1 450 kg/m^3，含泥量为1.0%．采用萘系高效减水剂萘磺酸盐甲醛缩合物，生产厂家为福州四方化工有限公司．

1.2　试验设计

采用响应面法中Box-behnken法进行试验设计与数据分析．试验的自变量因素编码及水平见表2．在初步试验的基础上，选取聚合物掺量w_P、水灰比m_W/m_C和减水剂掺量w_{WR}作为自变量因素，分别用A、B、C表示，高、中、低水平编码值分别用1、0和−1表示，编码为0的是中心试验，系统用来估计误差．试验中砂与水泥质量比为2∶1．

表2　试验自变量因素编码及水平

Table 2　Coding and level of independent variables

Code	Factor	Level		
		−1	0	1
A	w_P/%	8	10	12
B	m_W/m_C	0.35	0.40	0.45
C	w_{WR}/%	0.80	1.30	1.80

1.3　试件制备及试验方法

依据JGJ/T70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行试验．根据表2中的因素水平进行试验，首先将砂、水泥倒入搅拌桶内，然后将三元聚合物、水、减水剂倒入搅拌桶内搅拌均匀，装入试模，放到振动台振捣不少于2 min．将试件放入标准养护箱养护1 d后脱模，然后放入（20±2）℃水中养护．

抗压强度和抗折强度试件尺寸分别为100 mm×100 mm×100 mm、40 mm×40 mm×160 mm，采用济南试金集团有限公司生产的WE-100型液压式万能试验机；黏结强度试验的试件为“8”字型，尺寸为78.0 mm×22.5 mm×22.2 mm，采用上海和晟仪器科技有限公司生产的HS-3001B-S电子精密伺服拉力试验机．同时，采用响应面法中Box-behnken试验设计方法对试件抗压强度、抗折强度和黏结强度进行预测．三元聚合物砂浆形貌采用荷兰FEI公司生产的XL30型环境扫描电子显微镜（ESEM）进行观测．

2　结果与分析

2.1　试验结果与模型分析

表3是根据表2中的各试验设计条件得到的三元聚合物砂浆试件抗压强度、抗折强度和黏结强度的实测值以及预测值．由表3可见：试件力学性能实测值与预测值接近．

1)文中涉及的含量、掺量和比值等均为质量分数或质量比．

表3 三元聚合物砂浆试件力学性能的实测值及预测值

Table 3 Test values and predicted values of mechanical properties of ternary polymer mortar specimens

Specimen	Factor			Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa		Bonding strength/MPa	
	w_P/%	m_W/m_C	w_{WR}/%	Test	Predicted	Test	Predicted	Test	Predicted
1	12	0.40	1.80	35.88	36.05	10.43	10.77	2.72	2.71
2	10	0.40	1.30	37.86	34.96	12.33	12.75	2.80	2.45
3	12	0.40	0.80	34.56	34.56	11.26	11.26	2.68	2.62
4	10	0.40	1.30	37.86	37.53	12.66	12.75	2.77	2.45
5	10	0.45	1.80	35.54	35.74	11.70	11.38	1.86	1.77
6	10	0.35	0.80	36.14	37.66	10.98	11.30	1.57	1.66
7	8	0.35	1.30	35.21	35.57	10.35	10.37	1.62	1.52
8	10	0.40	1.30	37.86	37.53	13.33	12.75	2.19	2.45
9	10	0.40	1.30	37.86	37.53	12.65	12.75	2.18	2.45
10	12	0.35	1.30	34.76	34.96	12.01	11.69	2.59	2.57
11	10	0.35	1.80	36.28	36.91	11.22	11.20	1.68	1.71
12	8	0.45	1.30	33.96	33.76	10.42	10.74	1.76	1.78
13	10	0.40	1.30	37.86	37.53	12.77	12.75	2.29	2.45
14	8	0.40	0.80	35.43	35.26	10.09	9.75	1.80	1.81
15	8	0.40	1.80	34.86	34.86	9.86	9.86	1.65	1.71
16	12	0.45	1.30	35.23	34.86	11.88	11.86	2.45	2.55
17	10	0.45	0.80	34.79	35.16	11.65	11.67	1.87	1.84

利用Design-Expert软件对抗压强度试验值和3个自变量因素之间的关系进行多种拟合模型的综合分析，如线性(linear)模型、双因素(2FI)模型、二次多项式(quadratic)模型和三次多项式(cubic)模型.然后输出各模型的概率(P)值、失拟P值、相关系数(R^2)校正值和R^2预测值，其分析结果如表4所示.在统计分析中，假设检验(sequential)分析、失拟检验(lack of fit)分析的显著性用P表示.一般认为，$P<0.01$为非常显著，$0.01\leqslant P\leqslant 0.05$为显著，$P>0.05$为不显著.由表4可知：抗压强度模型中二次多项式模型P值最小且为非常显著，其失拟检验分析的P值最大，R^2校正值和R^2预测值都较大.

采用同样的方法对抗折强度和黏结强度进行多种模型综合分析，发现：抗折强度采用二次多项式模型时$P=0.000\,4$，为非常显著；黏结强度采用二次多项式模型时$P=0.024\,1$，为显著，失拟P值、R^2校正值和R^2预测值都最大.因此建议采用二次多项式模型来分析三元聚合物砂浆的抗压强度、抗折强度和黏结强度.

表4 抗压强度多种模型综合分析结果

Table 4 Comprehensive analysis results of compressive strength by various models

Model	P value		R^2	
	Sequential	Lack of fit	Adjusted	Predicted
Linear	0.791 6	0.078 4	−0.139 4	−0.371 6
2FI	0.892 9	0.046 4	−0.396 8	−1.131 1
Quadratic	0.001 3	0.787 9	0.762 7	0.521 0
Cubic	0.787 9		0.672 4	

2.2 回归方程的建立与寻优检验

利用响应面法对表3中的试验数据进行多元回归拟合，得到抗压强度(Y_1)、抗折强度(Y_2)和黏结强度(Y_3)的二次多项式回归方程：

$$Y_1=37.86+0.12A-0.48B+0.27C+0.43AB+0.47AC+0.20BC-1.81A^2-1.26B^2-0.87C^2 \quad (1)$$

$$Y_2=12.75+0.61A+0.14B-0.096C-0.05AB-0.15AC-0.048BC-1.28A^2-0.3B^2-1.06C^2 \quad (2)$$

$$Y_3=2.45+0.45A+0.060B-1.25\times10^{-4}C-0.070AB+0.048AC-0.03BC+0.063A^2-0.4B^2-0.3C^2 \quad (3)$$

表5为回归方程的方差分析结果.其中F为显著性检验指标，DF为自由度.F值越大、P值越小表示模型原假设不成立的概率越小，模型显著性越强，模拟精度越高；失拟项P值反映的是试验数据与模型不相关的显著程度，当其值小于0.05时表明显著程度较高，反之则较低.由表5可知：抗压强度、抗折强度和黏结强度的二次多项式回归方程的P值分别为0.010 0、0.002 5和0.022 6，F值分别为6.710、10.760和5.010，均为显著，其中抗折强度显著性非常高；在

A、B、C这3个单因素中,对于抗压强度模型,3个因素均不显著,但B因素(水灰比)较其他2个因素显著,对抗压强度的影响因素排序为$B>C>A$;抗折强度和黏结强度模型中,A因素(聚合物掺量)影响为非常显著,排序为$A>B>C$.表5中还列出了的AB、AC、BC、A^2、B^2和C^2的F值、P值等,显示出方程式中各二次项的影响程度.失拟项的P值分别为0.787 9、0.317 0和0.922 6,均大于0.05,可知模型的失拟度不显著,且误差较小,说明此回归方程与实际契合度较高.

表5　回归方程的方差分析结果

Table 5　Analysis results of variance of simulation equation

Source	DF	Mean square			F value			P value		
		Y_1	Y_2	Y_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_1	Y_2	Y_3
Model	9	3.390	1.810	0.310	6.710	10.760	5.010	0.010 0	0.002 5	0.022 6
A	1	0.120	2.950	1.630	0.230	17.510	26.170	0.644 0	0.004 1	0.001 4
B	1	1.810	0.150	0.029	3.590	0.880	0.460	0.099 8	0.379 2	0.518 2
C	1	0.590	0.074	1.250×10^{-5}	1.180	0.440	2.008×10^{-4}	0.314 0	0.528 5	0.989 1
AB	1	0.740	0.010	0.020	1.470	0.059	0.310	0.265 4	0.814 6	0.592 2
AC	1	0.890	0.090	9.025×10^{-3}	1.770	0.530	0.140	0.225 2	0.488 7	0.714 7
BC	1	0.160	9.025×10^{-3}	3.600×10^{-3}	0.320	0.054	0.058	0.586 5	0.823 6	0.816 8
A^2	1	13.860	6.900	0.017	27.460	40.930	0.270	0.001 2	0.000 4	0.619 0
B^2	1	6.680	0.390	0.690	13.230	2.290	11.050	0.008 3	0.174 0	0.012 7
C^2	1	3.170	4.710	0.370	6.270	27.940	5.960	0.040 8	0.001 1	0.044 7
Residual	7	0.500	0.170	0.062						
Lack of fit	3	0.250	0.220	0.015	0.360	1.630	0.150	0.787 9	0.317 0	0.922 6
Pure error	4	0.700	0.130	0.098		10.760	5.010			

表6为模型可信度检验分析结果.R^2和R^2校正值的接近程度可以用来验证回归方程的拟合程度;同时变异系数(C.V.)越小,信噪比(adeq precision)大于4,表明试验可信度和精确度越高;std.dev.为标准偏差;press为预测残差平方和.由表6可知,预测值与实测值之间的相关系数R^2分别为0.896 2、0.932 6、0.865 7,R^2校正值分别为0.762 7、0.845 9、0.692 9,变异系数分别为1.97%、3.57%、1.45%,信噪比分别为7.527、9.524、6.199,表明式(1)~(3)回归方程可信度和精确度较高,能够满足对实际情况的拟合,可靠性较强.

表6　模型可信度检验分析结果

Table 6　Model reliability test analysis results

Model	Std. dev. /MPa	Mean/MPa	R^2	Adjusted R^2	Predicted R^2	Press	C. V. /%	Adeq precision
Y_1	0.71	36.01	0.896 2	0.762 7	0.521 0	16.30	1.97	7.527
Y_2	0.41	11.51	0.932 6	0.845 9	0.359 4	11.21	3.57	9.524
Y_3	0.25	2.15	0.865 7	0.692 9	0.590 6	1.33	1.45	6.199

2.3　响应面相互作用分析

图1为两因素交互作用对力学性能影响的响应曲面和等高线图,此时第3个因素处于中水平(编码为0).图1(a)反映了水灰比在中水平(0.40)时,聚合物掺量和减水剂掺量两因素的交互作用及对抗压强度的影响规律.由图1(a)可见:当减水剂掺量保持在中水平(1.3%)时,抗压强度随聚合物掺量增大而呈现抛物线的趋势,即先增大后减小,且当聚合物掺量约为10%时,抗压强度最大;当聚合物掺量为中水平(10%)时,抗压强度也随减水剂掺量增大而呈现抛物线的趋势,且当减水剂掺量为1.3%时,抗压强度最大.同理,由图1(b)和(c)可知AB、BC两因素交互作用对抗压强度的影响规律.但由表5可知交互项AB对抗压强度的P值为0.265 4,大于0.05,说明聚合物掺量和水灰比的交互作用对抗压强度贡献度较低,并不显著.同理,结合图(d)~(f)和(g)~(i)和表5可知,两因素交互作用对抗折强度和黏结强度的影响规律.

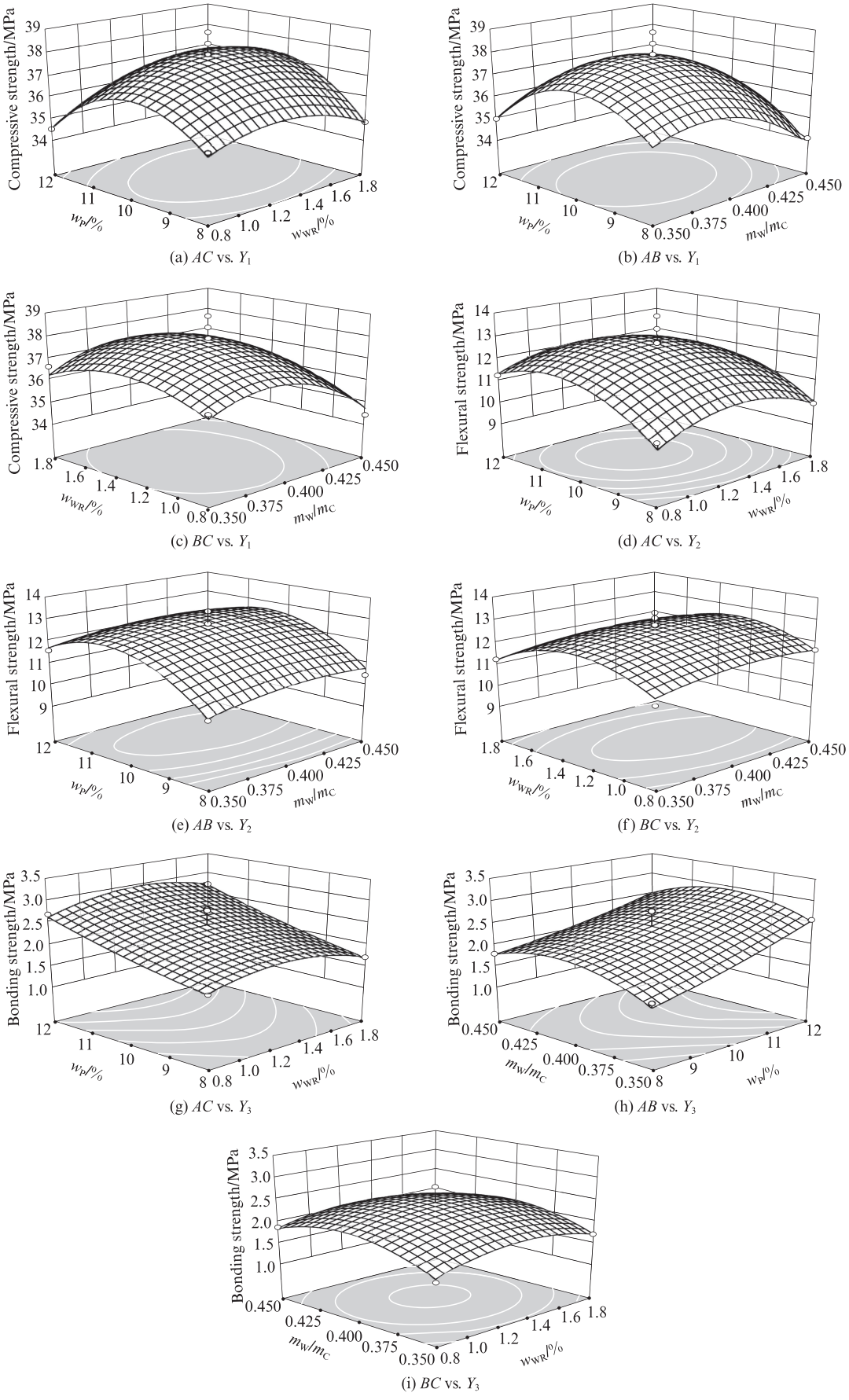


图1 两因素交互作用对力学性能影响的响应曲面和等高线图

Fig. 1 Response surface and contour map for effect of two-factor interaction on mechanical properties

2.4　参数优化及验证

采用Design-Expert软件进行三元聚合物砂浆配合比的优化，优化时将黏结强度最大值、抗折强度最大值和抗压强度最小值（即折压比最大）作为目标优化值，对聚合物掺量、水灰比、减水剂掺量进行优化，得出三元聚合物砂浆最优配合比为：聚合物掺量为12%，水灰比为0.42，减水剂掺量为1.12%．表7为参数优化后预测值与实测值的对比，其中D为预测值与实测值的相对误差绝对值，D的计算式见式(4)[18]．由表7可见，实测值与预测值之间的相对误差绝对值均小于5%，说明所建立的预测模型具有参考性．

表7　参数优化后预测值与实测值对比

Table 7　Comparison of predicted values and test values after parameter optimization

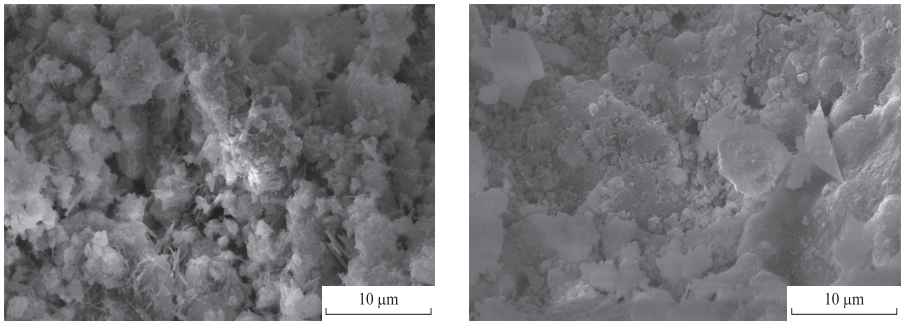
w_P/%	m_W/m_C	w_{WR}/%	Compressive strength			Flexural strength			Bond strength		
			Predicted/MPa	Test/MPa	D/%	Predicted/MPa	Test/MPa	D/%	Predicted/MPa	Test/MPa	D/%
12	0.42	1.12	35.49	34.25	3.62	12.01	12.15	1.20	2.83	2.72	4.04

$$D=\frac{\left|Y_T-Y_P\right|}{Y_T}\times 100\% \tag{4}$$

式中：Y_T为实测值；Y_P为预测值．

3　机理分析

三元聚合物不仅具有其各均聚物的优点，而且聚合后具有较低的成膜温度，形成的膜具有优良的力学性能、耐候性、耐磨性、阻燃性，与多种材料（如纤维、木材、塑料、水泥、砖石等）有良好的黏结性．图2给出了最优配合比下的3、28 d三元聚合物砂浆微观形貌图．由图2可见，最优配合比下的三元聚合物砂浆养护3 d时，水化产物被三元聚合物包裹，形成较多微孔，水泥基体（水化产物）和三元聚合物共同连接水化产物和未水化水泥颗粒，形成不完全连续的空间骨架-基体网状结构体系；三元聚合物砂浆养护28 d后，形成了致密的网状结构．这种网状结构的弹性模量远低于水泥石的弹性模量，且键能大、延性好，因此其抗折强度较高，同时掺入适量的三元聚合物不会大幅降低砂浆抗压强度．由图1(a)可知，聚合物掺量约在10%时三元聚合物砂浆的抗压强度达到最大值．当聚合物掺量小于10%时，随聚合物掺量增加，三元聚合物砂浆抗压强度增大，主要原因是三元聚合物乳液起到填充、连结和最终形成交织复杂的空间网络膜结构的作用[19]；但当聚合物掺量大于10%后，三元聚合物乳液会作为砂浆的组分承担外界荷载，然而三元聚合物乳液本身弹性模量较低，几乎不具有强度，且破坏了水泥砂浆中原有的分子结构，新形成的化学键能不足以弥补损失的化学键能，导致三元聚合物砂浆抗压强度降低．由图2和图1(g)知，砂浆黏结强度基本随聚合物掺量增加呈直线增大，主要是因为水化产物被三元聚合物包裹，与其他物质黏附的不是普通水泥砂浆的水化产物，而主要是三元聚合物，三元聚合物使砂浆硬化后结构致密且增大了黏附面积，因此三元聚合物砂浆具有更高的黏结强度．



(a) 3 d　　(b) 28 d

图2　3、28 d三元聚合物砂浆微观形貌图

Fig.2　3、28 d microstructure of ternary polymer mortar

4　结论

(1)采用响应面法中的Box-behnken试验设计方法进行氯乙烯、乙烯、乙烯醚三元聚合物改性砂浆试验，建立聚合物掺量、水灰比、减水剂掺量3个因素和28 d抗压强度、抗折强度、黏结强度3个响应值之间的回归模型，所建模型在试验范围内能较准确地预测结果，预测值与试验值误差较小，证明了响应面法用于三元聚合物砂浆配合比优化的准确性与科学性．

(2)在影响三元聚合物砂浆的3个因素中，对28 d

抗压强度影响强弱顺序依次为水灰比、减水剂掺量、聚合物掺量;对28 d抗折强度和黏结强度影响强弱顺序依次为聚合物掺量、水灰比、减水剂掺量.

(3)将28 d黏结强度最大值、抗折强度最大值和抗压强度最小值(即折压比最大)作为目标优化值,得出三元聚合物砂浆的最优配合比:聚合物掺量为12%,水灰比为0.42,减水剂掺量为1.12%.

参考文献:

[1] SHAKER F A, EI-DIEB A S, REDA M M. Durability of styrene-butadiene latex modified concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(5): 711-720.

[2] VINCKEA E, WANSEELE E V, MONTENY J, et al. Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2002, 49(4): 283-292.

[3] GORNINSKI J P, DAL MOLIN D C, KAZMIERCZAK C S. Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and Portland cement concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(11): 2091-2095.

[4] 郑大锋,陈然,李小康.木质素基两亲聚合物GCL1-J对砂浆结构和性能的影响[J].高校化学工程学报,2016,30(2):484-490.
ZHENG Dafeng, CHEN Ran, LI Xiaokang. Effect of lignin based amphiphilic polymer GCL1-J on structure and properties of mortar[J]. Journal of Chemical Engineering, 2016, 30(2): 484-490. (in Chinese)

[5] 陈维灯,韩冬冬,钟世云.丁苯乳液和超高分子质量聚乙烯纤维对砂浆抗弯性能的影响[J].新型建筑材料,2017(2):94-98.
CHEN Weideng, HAN Dongdong, ZHONG Shiyun. Effect of styrene butadiene emulsion and UHMWPE fiber on the flexural properties of mortar[J]. New Building Materials, 2017(2):94-98.(in Chinese)

[6] 陈凌燕,韩芳芳,周丽娜,等.聚偏氟乙烯乳液改性砂浆的性能研究[J]. 新型建筑材料,2017(8): 50-53.
CHEN Lingyan, HAN Fangfang, ZHOU Lina, et al. Study on properties of modified PVDF mortar[J]. New Building Materials, 2017(8): 50-53. (in Chinese)

[7] 黄展魏,陈伟,李秋,等.水性环氧树脂改性水泥砂浆力学性能及微观结构[J].硅酸盐通报,2017,36(8):2530-2535.
HUANG Zhanwei, CHEN Wei, LI Qiu, et al. Mechanical properties and microstructure of cement mortar modified by waterborne epoxy resin[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(8): 2530-2535. (in Chinese)

[8] 吕官记.防水透气型加气混凝土砌块界面剂的研究[D].福州:福州大学,2010.
LÜ Guanji. Research on interfacial agent of waterproof and breathable aerated concrete block[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2010. (in Chinese)

[9] 季韬.PTB乳液特性及其在保温工程中的应用[J].墙材革新与建筑节能,2008(1): 53-56.
JI Tao. Properties of PTB emulsion and its application in thermal insulation engineering[J]. Wall Materials Innovation and Energy Saving in Buildings, 2008(1): 53-56.(in Chinese)

[10] 鄢飞.PTB乳液特性及其在无机植筋胶中的应用[J].福建建筑,2008(3): 23-25.
YAN Fei. Characteristics of PTB emulsion and its application in inorganic reinforcement adhesive[J]. Fujian Architecture and Construction, 2008(3): 23-25.(in Chinese)

[11] 徐向宏,何明珠. 试验设计与Design-Expert、SPSS应用[M]. 北京:科学出版社,2010:31-35.
XU Xianghong, HE Mingzhu. Experimental design and application of Design-Expert and SPSS[M]. Beijing: Science Press, 2010:31-35. (in Chinese)

[12] AYDIN S. A ternary optimisation of mineral additives of alkali activated cement mortars[J]. Construction and Building Materials, 2013, 43: 131-138.

[13] BAYRAMOV F, TAŞDEMIR C, TAŞDEMIR 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.

[14] 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.

[15] 张兰芳,刘丽娜,曹胜.响应面方法优化碱激发矿渣-石粉水泥砂浆的研究[J].材料导报,2017,31(24):15-19.
ZHANG Lanfang, LIU Lina, CAO Sheng. Optimization of alkali activated slag stone powder cement mortar by response surface methodology[J]. Materials Review, 2017, 31(24): 15-19. (in Chinese)

[16] 杨鑫玮.聚丙烯纤维高性能混凝土路用性能及路面结构研究[D].保定:河北工业大学,2016.
YANG Xinwei. Study on pavement performance and pavement structure of polypropylene fiber high performance concrete[D]. Baoding: Hebei University of Technology, 2016.(in Chinese)

[17] 贺雄飞,黄伟,张浩,等.基于响应面法的综合抗渗自愈性能水泥基渗透结晶防水材料制备方案优化[J].化工矿物与加工,2021,50(3):31-35.
HE Xiongfei, HUANG Wei, ZHANG Hao, et al. Optimization of preparation scheme of cement-based permeable crystalline waterproof material with comprehensive impermeability and self-healing performance based on response surface methodology[J]. Chemical Mineral and Processing, 2021, 50(3): 31-35. (in Chinese)

[18] 陈冬冬,王鑫鹏,侯东帅,等.基于响应面法的快速修补材料的设计和研究[J].青岛理工大学学报,2020,41(5):96-103.
CHEN Dongdong, WANG Xinpeng, HOU Dongshuai, et al. Design and research of rapid repair material based on response surface method[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2020, 41(5): 96-103. (in Chinese)

[19] 谢雷.氯乙烯/丙烯酸酯二元及多元共聚物的研究进展[J].聚氯乙烯,2008,36(9):1-6.
XIE Lei. Research progress of vinyl chloride/acrylate binary and multicomponent copolymers[J]. Polyvinyl Chloride, 2008, 36(9): 1-6. (in Chinese)