

文章编号:1007-9629(2024)06-0543-08

响应面法优化 3D 打印砂浆的性能

王开强, 零朝维*, 李迪, 池胜锋, 胡春友

(中建三局集团有限公司 中国建筑先进技术研究院, 湖北 武汉 430070)

摘要:用响应面法分析了调凝组分与调黏组分对 3D 打印砂浆建造性和凝结时间的影响规律。结果表明:快硬硫铝酸盐水泥作为调凝组分能有效缩短砂浆的凝结时间;羟丙基甲基纤维素增稠剂与硅酸镁铝作为调黏组分可以提高砂浆的触变性,但会延缓砂浆的凝结;基于响应面法采用线性模型和二次模型拟合砂浆建造性、开放时间和凝结时间,模型具有显著性;经过响应面优化,可配制出凝结时间可调、建造性良好且开放时间合适的 3D 打印水泥基材料。

关键词:3D 打印;水泥基材料;建造性;开放时间;凝结时间;响应面法

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.06.009

Optimizing Properties of 3D Printing Mortar Using Response Surface Methodology

WANG Kaiqiang, LING Chaowei*, LI Di, CHI Shengfeng, HU Chunyou

(China Construction Institute of Advanced Technology, China Construction Third Bureau Group Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: Response surface methodology (RSM) was used to analyze the influence of the setting regulating component and viscosity regulating components on the buildability and setting time of 3D printing cementitious materials. The results show that sulphoaluminate cement can effectively shorten the setting time of mortar as a setting regulating component. Hydroxy propyl methyl cellulose thickener and magnesium aluminum silicate as viscosity regulating components can improve the thixotropy of mortar, but it will delay the setting of mortar. Using response surface analysis method, linear model and quadratic model can be used to fit the buildability, open time and setting time of mortar, respectively, and the model shows significant differences. After optimization through RSM, 3D printing cementitious materials with adjustable setting time, good buildability and appropriate open time can be prepared.

Key words: 3D printing; cementitious material; buildability; open time; setting time; response surface methodology

目前,国家正在大力推动智能建造,混凝土 3D 打印是典型的智能建造工艺,在特定场景有显著的优势,如免模板施工,自动化程度高,施工周期短,可应用于作业环境恶劣的区域等^[1-2]。建造性和凝结时间是 3D 打印水泥基材料的关键性能。在满足建造性和凝结时间的前提下,3D 打印水泥基材料需要具有足够长的可操作时间,即开放时间。建造性衡量打印体的可堆叠性,通常采用实际

打印体稳定性、湿胚强度或圆筒塌落度表示。良好的建造性需要砂浆具有较快的凝结硬化速率,以支撑不断增加的打印高度;与此相反,在砂浆挤出打印头之前,砂浆需要有较长的凝结时间,保证足够的开放时间,防止其在打印系统内部硬化。目前对 3D 打印水泥基材料的研究多聚焦在短时间低层数的小构件打印^[3-4],对材料配合比的研究主要关注流变性和建造性^[5-7],或仅单独考虑凝结时

收稿日期:2023-07-31; 修订日期:2023-11-13

第一作者:王开强(1979—),男,甘肃兰州人,中建三局集团有限公司正高级工程师,博士。E-mail: 2224516921@qq.com

通讯作者:零朝维(1993—),男,广西南宁人,中建三局集团有限公司工程师,硕士。E-mail: lveirs@qq.com

间,较少综合考虑流动性、建造性、凝结时间和开放时间.在打印大尺寸尤其是高度较高的大型构件时,需要连续长时间打印,此时配合比需要进行多指标同步优化.

本文首先分析了外加剂对净浆凝结时间的影响,然后运用响应面法分析了硫铝酸盐水泥、硅灰、羟丙基甲基纤维素增稠剂、硅酸镁铝触变剂复合作用下对砂浆建造性、开放时间和凝结时间的影响规律,再分别采用湿胚强度法和贯入阻力法测试砂浆的建造性、开放时间和凝结时间,最后通过响应面法优化得到砂浆的最佳配合比,为3D打印水泥基材料配合比设计及优化提供指引.

1 试验

1.1 原材料

胶凝材料包括华新水泥股份有限公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥(OPC)、湖北宜城安达特种水泥有限公司生产的R·SAC 42.5快硬硫铝酸盐水泥(SAC),水泥的性能指标见表1.武汉纽瑞琪新

材料有限公司生产的超细硅灰(SF),其性能指标见表2.外加剂包括上海臣启化工科技有限公司提供的黏度为20万的羟丙基甲基纤维素增稠剂(HPMC)、湖南朋泰高新材料有限公司提供的硅酸镁铝触变剂(MAS)、西卡(中国)有限公司生产的减水率(质量分数,文中涉及的含量、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比)大于30%的325C聚羧酸高性能减水剂(WR);砂子为武汉产细度模数2.6的纯河砂(S);水为市政自来水(W).

1.2 试验方法

1.2.1 净浆凝结时间测试

胶凝材料总质量为500 g,制备了不同外加剂SAC、HPMC和MAS掺量 w_{SAC} 、 w_{HPMC} 、 w_{MAS} (SAC为内掺,其他为外掺)的复合净浆,并按其外加剂种类分别记为OPC净浆(外加剂掺量 $w=0\%$)以及SAC、HPMC和MAS复合净浆,其配合比见表3(表中水的用量为标准稠度用水量).参考GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》测试了复合净浆的凝结时间.

表1 水泥的性能指标

Table 1 Performance indicators of cement

Cement	Normal consistency (by mass)/%	Specific surface area/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	Setting time/min		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
			Initial	Final	1 d	3 d	1 d	3 d
OPC	28.0	354	230	314		30.6		5.4
SAC	23.8	432	17	25	37.1	45.0	6.5	6.9

表2 硅灰的性能指标

Table 2 Performance indicators of SF

Silica content(by mass)/%	Water content(by mass)/%	IL(by mass)/%	7 d activity index/%	Specific surface area/($m^2 \cdot kg^{-1}$)
95.5	0.1	2.17%	124	20 000

表3 复合净浆的配合比

Table 3 Mix proportions of composite pastes

Group	$w/\%$	Mix proportion/g			Group	$w/\%$	Mix proportion/g		
		OPC	Admixture	W			OPC	Admixture	W
SAC composite paste	5.00	475.00	25.00	140.00	OPC paste	0	500.00	0	140.00
	10.00	450.00	50.00	138.00	HPMC composite paste	0.05	500.00	0.25	140.00
	15.00	425.00	75.00	136.00		0.10	500.00	0.50	145.00
	20.00	400.00	100.00	135.00		0.20	500.00	1.00	148.00
	25.00	375.00	125.00	135.00	MAS composite paste	0.30	500.00	1.50	145.00
	30.00	350.00	150.00	137.00		0.60	500.00	3.00	150.00
	100.00	0	500.00	120.00		1.00	500.00	5.00	153.00

1.2.2 响应面设计

采用响应面法的中心复合设计(CCD)探究砂浆调凝组分和调黏组分对砂浆凝结时间和建造性的影响.研究因素A、B、C、D分别为调凝组分SAC的掺

量 $w_{SAC}(A)$ 、调黏组分SF、HPMC和MAS的掺量 $w_{SF}(B)$ 、 $w_{HPMC}(C)$ 、 $w_{MAS}(D)$,考察指标为砂浆的开放时间、凝结时间及建造性,因素水平设计见表4(表中 α 为轴向点至中心点距离折算成的因素值^[8]).设置砂

表4 响应面分析因素水平设计表
Table 4 RSM factor level design table

Level	$w_{SAC}/\%$	$w_{SF}/\%$	$w_{HPMC}/\%$	$w_{MAS}/\%$
Low	6.25	5.00	0.05	0.25
High	18.75	15.00	0.15	0.75
$-\alpha$	0	0	0	0
$+\alpha$	25.00	20.00	0.20	1.00

浆水胶比为0.33,胶骨比为1:1,动态调整减水剂掺量使砂浆流动度在155~175 mm,确保砂浆具有良好的流动性和可挤出性.

1.2.3 砂浆流动度测试

不同研究人员对3D打印砂浆分别给出了建议的流动度范围^[5,9-10],总体来说,适合3D打印的砂浆具有相近的流动度,一般在155~175 mm.参考GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》测定砂浆流动度.

1.2.4 砂浆建造性测试

采用湿胚强度法表征砂浆建造性,所用仪器由符合JGJ 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法》要求的数显型砂浆凝结时间测定仪改造而成,改造方法为将试针改成加载钢板.参照TCCPA 34—2022《3D打印混凝土拌合物性能试验方法》进行试验,记录拌和物加水时间,制作2个待测试件,分别测试其加水后20、30 min的湿胚强度,计算2次测试之间的湿胚强度增长率.

1.2.5 砂浆开放时间及凝结时间测试

参考JGJ 70—2009测试砂浆的凝结时间 R_{ST} ,贯入阻力达到0.5 MPa时对应的时间为砂浆的凝结时间.将砂浆静置后经过机器搅拌能够重新获得可打印流动性的最大时间为砂浆的开放时间 R_{OT} .将该时间与砂浆贯入阻力相关联,发现在砂浆贯入阻力达到0.3 MPa前,经过机器搅拌后仍可获得打印流动性,因此将砂浆贯入阻力达到0.3 MPa时对应的时间记为砂浆的开放时间.有研究将此时间作为砂浆的初凝时间^[11],初凝前砂浆流动度损失小,与本文所述的开放时间具有相通性.

2 结果与讨论

2.1 净浆凝结时间

2.1.1 SAC复合净浆的凝结时间

SAC复合净浆的凝结时间见图1.由图1可见:随着SAC掺量的增加,复合净浆的凝结时间显著缩短;当 $w_{SAC}=10.00\%$ 时,复合净浆的凝结时间急剧下降,其初凝时间为75 min,相比对照组OPC降低了67.4%;当 $w_{SAC}=20.00\%$ 时,复合净浆的凝结时间变

化趋于平缓;复合净浆的初凝-终凝时间间隔也随着SAC掺量的增加而降低,且在 $w_{SAC}=15.00\%$ 时显著降低,仅为9 min,比对照组降低了89.3%,此后继续增加SAC的掺量,初凝-终凝时间间隔降低不明显.

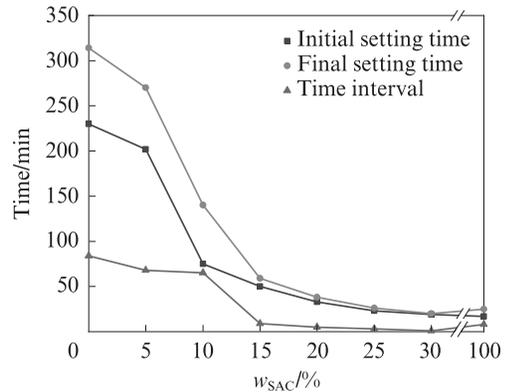


图1 SAC复合净浆凝结时间

Fig. 1 Setting time of SAC composite pastes

需要指出的是, $w_{SAC}=30.00\%$ 复合净浆的终凝时间和初凝-终凝时间间隔比纯SAC净浆短,这是因为纯SAC水化有1个短暂的诱导期,而SAC复合净浆中OPC和SAC会互相促进彼此的水化进程.SAC碱度低,OPC中硅酸三钙(C_3S)的水化产物氢氧化钙(CH)使体系碱度增加,增加了无水硫铝酸钙($C_4A_3\bar{S}$)的水化速率,导致体系的钙矾石(Aft)和氢氧化铝(AH_3)凝胶增多,加快了净浆的凝结. C_3S 的水化产物CH又与SAC的水化产物 AH_3 在石膏存在条件下继续发生反应生成Aft,而CH的消耗又促进 C_3S 和硅酸二钙(C_2S)的水化,因此SAC复合净浆体系的2种水泥组分会互相促进水化.在 $w_{SAC}=30.00\%$ 时更明显,SAC复合净浆的凝结时间比纯SAC净浆的终凝时间短.陈娟等^[12]、丁向群等^[13]也观察到了类似现象.

2.1.2 HPMC和MAS复合净浆的凝结时间

HPMC和MAS复合净浆的凝结时间见图2.由图2可见,HPMC和MAS对OPC均有一定的缓凝作用. HP MC的缓凝作用非常明显: $w_{HPMC}=0.10\%$ 复合净浆的初凝时间比纯OPC净浆高32.6%,已接近纯OPC净浆的终凝时间;与对照组OPC相比, $w_{HPMC}=0.20\%$ 复合净浆的初凝时间和终凝时间分别增长了45.6%、48.1%.有研究认为HPMC的缓凝作用是因为纤维素醚使孔溶液黏度增加,降低了孔溶液中离子的活动性,延迟了Aft的生成^[14];也有研究者指出纤维素醚的降解产物延迟了水泥水化产物CH的析晶沉淀^[15].MAS对水泥凝结时间有微弱的缓凝作用,与对照组OPC相比, $w_{MAS}=1.00\%$ 复合净浆的初凝

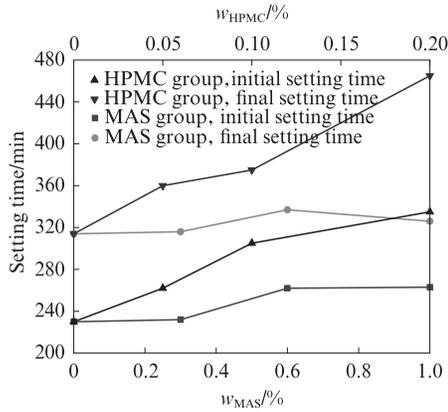


图2 HPMC和MAS复合净浆凝结时间

Fig. 2 Setting time of HPMC and MAS composite pastes

时间增长14.3%，终凝时间几乎没有变化。MAS是一种天然无机增稠剂和触变剂，具有耐酸碱性，不参与

体系化学反应，达到相同标准稠度时的用水量显著增加(见表3)，增加了体系的黏度，且限制了水分的自由扩散，导致的水泥水化受到微弱的延迟作用。郭晓潞等^[16]研究发现MAS掺量增加对砂浆凝结时间没有影响，结果的差异可能是因为胶凝材料体系以及净浆、砂浆测试方法不同导致的。

2.2 响应面分析

响应面分析结果见表5。

2.2.1 建造性分析

采用线性模型分析4个因素对砂浆建造性的影响，砂浆湿胚强度增长率 R_c 线性模型方差分析结果见表6。由表6可见：模型的 p 值满足 $p < 0.0001$ ，具有显著性；失拟项 F 值为1.500，此时 p 值为0.3465，大于0.050，意味着失拟项不具有显著性，模型具有统计学

表5 响应面分析结果

Table 5 Results of RSM

Run No.	$w_{SAC}/\%$	$w_{SF}/\%$	$w_{HPMC}/\%$	$w_{MAS}/\%$	$R_c/\%$	R_{OT}/min	R_{ST}/min
1	6.25	15.00	0.05	0.25	52.9	84	115
2	12.50	10.00	0.10	0.50	56.3	85	103
3	18.75	15.00	0.05	0.75	238.5	55	63
4	12.50	10.00	0.10	0.50	81.0	71	84
5	12.50	20.00	0.10	0.50	128.6	59	69
6	6.25	5.00	0.15	0.25	71.4	135	189
7	6.25	5.00	0.05	0.75	61.1	83	110
8	18.75	5.00	0.05	0.25	67.4	42	50
9	6.25	5.00	0.15	0.75	38.5	131	178
10	12.50	10.00	0.20	0.50	78.7	72	87
11	18.75	15.00	0.15	0.25	197.3	42	48
12	12.50	10.00	0.10	0.00	100.0	79	99
13	25.00	10.00	0.10	0.50	191.7	32	36
14	12.50	10.00	0	0.50	106.7	42	50
15	6.25	15.00	0.15	0.25	86.7	110	144
16	18.75	15.00	0.05	0.25	263.3	28	32
17	12.50	10.00	0.10	1.00	118.2	60	72
18	12.50	10.00	0.10	0.50	104.2	56	67
19	12.50	10.00	0.10	0.50	100.0	52	63
20	6.25	5.00	0.05	0.25	59.3	73	101
21	18.75	5.00	0.05	0.75	126.2	40	47
22	18.75	5.00	0.15	0.25	124.2	44	50
23	12.50	10.00	0.10	0.50	114.3	60	72
24	12.50	0	0.10	0.50	79.6	46	57
25	18.75	5.00	0.15	0.75	112.1	46	50
26	18.75	15.00	0.15	0.75	292.0	38	40
27	12.50	10.00	0.10	0.50	155.6	53	60
28	6.25	15.00	0.15	0.75	120.7	102	133
29	6.25	15.00	0.05	0.75	52.0	89	125
30	0	10.00	0.10	0.50	37.4	271	313

表6 砂浆湿胚强度增长率线性模型方差分析结果
Table 6 Analysis of variance results of linear model for R_c of mortars

Source	F-value	p-value
Model	13.270	<0.000 1
A	37.650	<0.000 1
B	14.680	0.000 8
C	0.120	0.734 2
D	0.640	0.431 2
Lack of fit	1.500	0.346 5

意义的准确性.

将各个因素的水平值进行标准化转码,并对试验结果进行回归拟合,得到各因素对响应值 R_c 的影响回归方程为:

$$R_c = 113.86 + 49.45A + 30.88B + 2.77C + 6.45D \quad (1)$$

标准化转码后,可以根据各因素的系数大小来识别其对响应值的相对影响.很明显,SAC和SF掺量(A和B)的系数比HPMC和MAS掺量(C和D)的系数大得多,说明SAC和SF掺量这2个因素对湿胚强度增长率的影响更明显.HPMC和MAS均有增稠触变的作用,可以提高湿胚强度,但因为其本身几乎不参与水泥水化反应,甚至有缓凝作用,所以在与SAC复合使用时对湿胚强度增长率的影响不明显.

固定HPMC和MAS掺量,以因素SAC和SF掺量为变量,作等值线图,结果见图3.由图3可见:随着SAC和SF掺量的增加,砂浆在10 min内的湿胚强度增长率增大;当SAC掺量为16.00%,SF掺量为11.00%时,湿胚强度增长率可达150.0%.

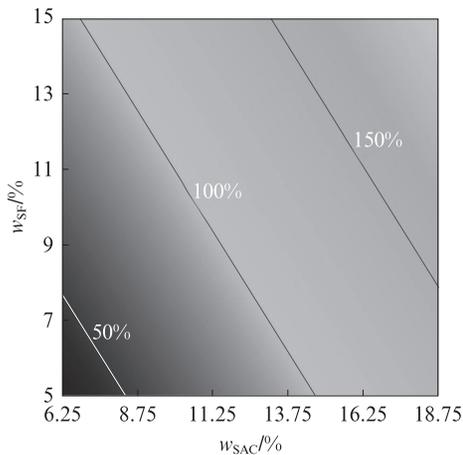


图3 砂浆湿胚强度增长率等值线图
Fig. 3 Contour map of R_c of mortar

由湿胚强度增长率的结果来看,对3D打印砂浆的建造性,仅靠调黏组分来提高砂浆的触变性是不够的,还需要SAC等调凝组分来加快砂浆的凝结速

率,才能保证砂浆挤出后,短期内通过调黏组分提供的高触变性来保持形状稳定性和低层数可堆叠性,而长时间高层数的持续打印则通过调凝组分提供水泥快速不可逆水化反应产生的硬化强度来保证.

2.2.2 开放时间与凝结时间分析

采用二次模型分析4个因素对砂浆开放时间和凝结时间的影响,结果见表7.由表7可见:二次模型2个响应值的 $p < 0.000 1$,均具有显著性;失拟项的F值分别为0.860和1.920, p 值分别为0.606 8和0.244 5,均大于0.050,表明失拟项均不具有显著性,模型具有统计学意义的准确性.

表7 砂浆开放时间及凝结时间二次模型方差分析结果
Table 7 Analysis of variance results of the quadratic model for R_{OT} and R_{ST} of martar

Source	R_{OT}		R_{ST}	
	F-value	p-value	F-value	p-value
Model	13.130	<0.000 1	15.410	<0.000 1
A	154.940	<0.000 1	157.210	<0.000 1
B	0.005	0.944 6	0.260	0.615 2
C	9.560	0.007 4	6.700	0.020 6
D	0	0.957 3	0.140	0.709 4
AB	0.010	0.906 0	0.320	0.582 1
AC	2.960	0.106 1	5.690	0.030 7
AD	0.370	0.554 5	0.070	0.793 9
BC	1.210	0.289 2	2.380	0.143 6
BD	0.330	0.573 1	0.110	0.746 6
CD	1.740	0.206 3	0.890	0.361 1
A^2	7.800	0.013 6	36.770	<0.000 1
B^2	1.820	0.197 8	0.980	0.338 5
C^2	0.890	0.360 4	0.420	0.528 5
D^2	0.490	0.495 4	0.180	0.680 0
Lack of fit	0.860	0.606 8	1.920	0.244 5

将各个因素的水平值进行标准化转码,分别对 R_{OT} 和 R_{ST} 这2个响应值的试验结果进行回归拟合,得到各因素对响应值 R_{OT} 、 R_{ST} 的影响回归方程为:

$$R_{OT} = 1000 \times (1790 - 203.2A - 1.2B + 50.5C + 0.9D - 2.4AB - 34.4AC + 12.1AD - 22BC + 11.5BD - 26.4CD + 42.7A^2 - 20.6B^2 - 14.4C^2 + 10.7D^2) \quad (2)$$

$$R_{ST} = 74.92 - 52.95A - 2.17B + 10.93C - 1.6D + 2.91AB - 12.34AC + 1.38AD - 7.98BC + 1.7BD - 4.87CD + 23.95A^2 - 3.91B^2 - 2.55C^2 + 1.66D^2 \quad (3)$$

由表7还可见,对于开放时间和凝结时间而言,关键影响因素是SAC和HPMC的掺量(A和C).固定SF和MAS的掺量,以SAC和HPMC的掺量为变量,作等值线图和3D响应曲面图,结果见图4.由图4

可见:随着SAC掺量的增加,砂浆的开放时间缩短,凝结速率加快;随着HPMC掺量的增加,砂浆的开放时间延长,凝结速率减慢;从3D响应曲面图可知,SAC在掺量较低的情况下即可明显缩短砂浆的凝结时间,随着SAC掺量的增加,砂浆的开放时间和凝结时间缩短,但掺量达到15.00%以后其促凝作用增长

减慢,这与净浆试验结果吻合.结合净浆凝结试验结果可知:HPMC从降低活性的角度延缓了浆体凝结,常用来延长商品砂浆的开放时间,砂浆状态具有可逆性;而SAC则从化学反应的角度加快浆体黏结硬化,具有不可逆性.合理配合二者掺量可使砂浆具有较长的开放时间,并在开放时间后迅速凝结硬化.

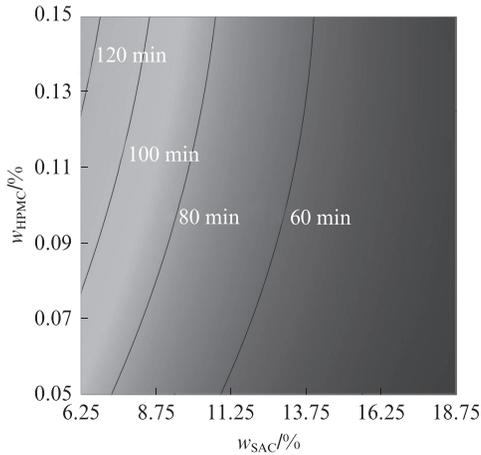
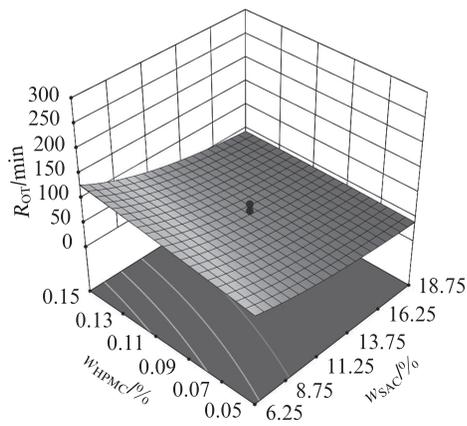
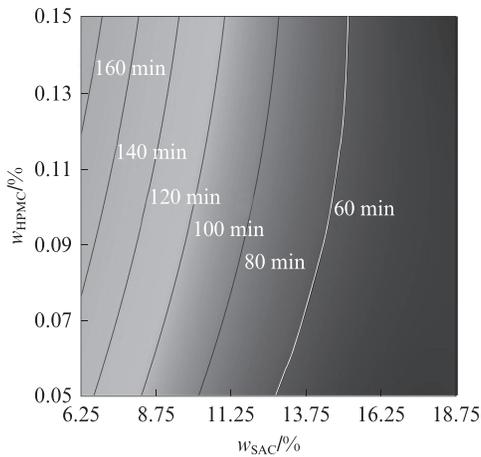
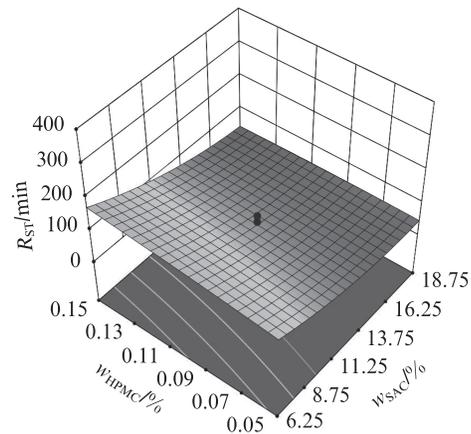
(a) Contour map of R_{OT} (b) 3D response surface map of R_{OT} (c) Contour map of R_{ST} (d) 3D response surface map of R_{ST}

图4 砂浆开放时间和凝结时间等值线图及3D响应曲面图

Fig. 4 Contour maps and 3D response surface maps of R_{OT} and R_{ST} of mortar

2.3 响应面结果优化

采用响应面分析优化法,综合考虑砂浆建造性、开放时间及凝结时间等多个指标,优化砂浆配合比.各响应值限制性准则为:(1)建造性采用取极大值准则;(2)砂浆凝结时间为根据实际情况灵活调整的参数,采用取目标值的限制准则,目标值暂定为60 min,实际可根据具体情况调整;(3)在砂浆凝结时间确定后,砂浆开放时间采用取极大值准则,尽可能延长砂浆的可操作时间.

将2.2中提出的建造性、开放时间及凝结时间3个模型综合平衡后,得到其多响应值叠加图,结果见

图5.阴影部分为同时满足3个响应值限制准则的范围,对应有多个因素取值方案,方案的优劣由合意性指数来评价.最优解决方案见表8,其合意性指数为0.898.

使用3D打印机将该最优解决方案上机验证,结果见图6.由图6可见,最优解决方案配合比具有良好的可打印性,挤出条带光滑饱满,即使在大层高的情况下,底层也不会有可见变形;由于SAC的掺入加快了砂浆的凝结速率,底部砂浆强度发展较快,可以满足建造性的要求;最优解决方案配合比实测抗压强度可达55 MPa.

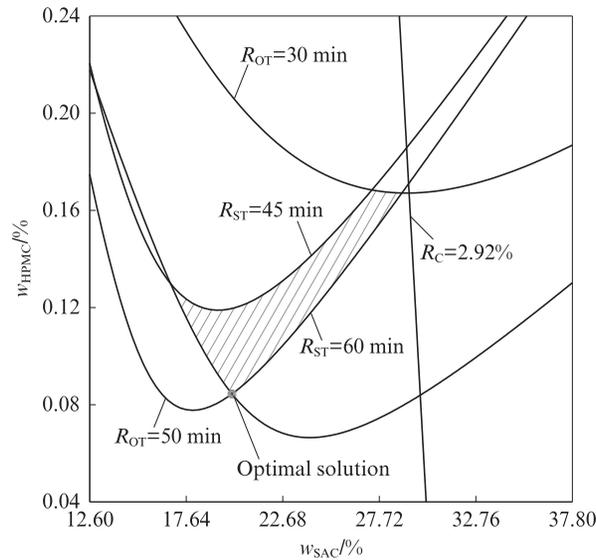


图5 砂浆建造性、开放时间以及凝结时间的多响应值叠加图

Fig. 5 Multiple response values overlay of buildability, open time and setting time

表8 响应面优化后的最优解决方案

Table 8 Optimal solution after response surface optimization

$w_{SAC}/\%$	$w_{SF}/\%$	$w_{HPMC}/\%$	$w_{MAS}/\%$	R_{ST}/min	$R_C/\%$	R_{OT}/min	Desirability
20.00	15.00	0.08	1.00	60	214	51	0.898



图6 最优解决方案配合比打印验证

Fig. 6 Printing verification of optimal solution

3 结论

(1) SAC可有效缩短 OPC 的凝结时间和初凝-终凝时间间隔,且随着 SAC 掺量的增加而降低; HPMC 和 MAS 对 OPC 均有一定的缓凝作用,且 HPMC 的缓凝作用比 MAS 强.

(2) 可采用线性模型拟合砂浆建造性, SAC 和 SF 掺量对湿胚强度增长率的影响更显著,砂浆的建造性随着 SAC 和 SF 掺量的增加而增加.

(3) 采用二次模型拟合砂浆的开放时间和凝结时间, SAC 和 HPMC 掺量对开放时间和凝结时间的影响更显著, SAC 在掺量较低的情况下即可明显缩短砂浆的凝结时间;随着 SAC 掺量的增加,砂浆的开放时间和凝结时间缩短.

(4) 可根据实际情况进行响应面优化配合比,最优解决方案合意性指数可达 0.898.

参考文献:

- [1] 张翼,朱艳梅,任强,等. 3D打印建筑技术及其水泥基材料研究进展评述[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(6):1796-1807.
ZHANG Yi, ZHU Yanmei, REN Qiang, et al. Progress on 3D printing construction technology and its cement-based materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(6): 1796-1807. (in Chinese)
- [2] 杨钱荣,邢昌祥,赵宗志,等. 聚合物对水下3D打印建筑砂浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(6):678-686, 696.
YANG Qianrong, XING Changxiang, ZHAO Zongzhi, et al. The effect of polymer on the properties of underwater 3D printing building mortar[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6): 678-686, 696. (in Chinese)
- [3] 朱彬荣,潘金龙,周震鑫,等. 3D打印高延性水泥基复合材料的单轴受拉和受压行为[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(5):844-854.
ZHU Binrong, PAN Jinlong, ZHOU Zhenxin, et al. Uniaxial tensile and compressive stress-strain behavior of 3D printed engineered cementitious composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(5):844-854. (in Chinese)
- [4] 刘致远. 3D打印水泥基材料流变性能调控及力学性能表征[D]. 北京:中国建筑材料科学研究总院, 2019.
LIU Zhiyuan. Control of rheological properties and characterization of mechanical properties of 3D printed cement-based materials[D]. Beijing: China Academy of Building Materials Science, 2019. (in Chinese)
- [5] 朱艳梅,张翼,蒋正武. 羟丙基甲基纤维素对3D打印砂浆性能影响研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1123-1130.
ZHU Yanmei, ZHANG Yi, JIANG Zhengwu. Study on the

- effect of hydroxypropyl methyl cellulose on the properties of 3D printing mortar[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6): 1123-1130. (in Chinese)
- [6] 王亚坤, 杨钱荣. 添加剂对3D打印轻骨料混凝土流变性和可打印性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(4):749-757.
WANG Yakun, YANG Qianrong. Effects of additives on the rheology and printability of 3D printed lightweight aggregate concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(4): 749-757. (in Chinese)
- [7] 刘巧玲, 杨钱荣. 聚合物对3D打印建筑砂浆流变性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(5):1206-1211.
LIU Qiaoling, YANG Qianrong. Effect of polymer on rheological properties of 3D printing building mortar[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(5):1206-1211. (in Chinese)
- [8] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. *实验室研究与探索*, 2015, 34(8):41-45.
LI Li, ZHANG Sai, HE Qiang, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization[J]. *Laboratory Research and Exploration*, 2015, 34(8):41-45. (in Chinese)
- [9] TAY Y W D, QIAN Y, TAN M J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 174:106968.
- [10] ZHANG C, HOU Z Y, CHEN C, et al. Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 104:103406.
- [11] 王栋民, 李小龙, 刘泽. 粉煤灰/磷渣微粉改性水泥基3D打印材料的制备与工作性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(8): 2372-2378.
WANG Dongmin, LI Xiaolong, LIU Ze. Preparation and working performance of fly ash/phosphorus slag powder modified cement-based 3D printing materials[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(8):2372-2378. (in Chinese)
- [12] 陈娟, 李北星, 卢亦焱. 硅酸盐-硫铝酸盐水泥混合体系的试验研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2007, 29(4):121-124.
CHEN Juan, LI Beixing, LU Yiyen. Experimental study on silicate-sulphoaluminate cement mixed system [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2007, 29(4): 121-124. (in Chinese)
- [13] 丁向群, 徐晓婉. 矿物掺合料对硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系凝结时间及强度的影响[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(3):498-504.
DING Xiangqun, XU Xiaowan. Effects of mineral admixtures on setting time and strength of Portland cement-sulphoaluminate cement composite system [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2018, 34(3):498-504. (in Chinese)
- [14] 张国防, 王培铭. 羟乙基甲基纤维素对水泥水化产物形成的影响[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(5):573-577.
ZHANG Guofang, WANG Peiming. The effect of hydroxyethyl methyl cellulose on the formation of cement hydration products [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(5):573-577. (in Chinese)
- [15] POURCHEZ J, PESCHARD A, GROSSEAU P, et al. HPMC and HEMC influence on cement hydration [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(2):288-294.
- [16] 郭晓璐, 杨君奕, 熊归砚. 硅酸镁铝及静置时间对3D打印地聚合物砂浆流变性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(1):89-96.
GUO Xiaolu, YANG Junyi, XIONG Guiyan. Effects of magnesium aluminum silicate and standing time on the rheological properties of 3D printing geopolymer mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(1):89-96. (in Chinese)