

旧水泥混凝土路面超薄水泥基加铺材料配合比优化

马士宾, 侯立成, 刘月钊, 张俊飞

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300400)

摘要: 旧水泥路面快速维修是公路养护人员面临的技术难题, 而超薄加铺是一种低成本、高效率的维修方案。为了得到超薄水泥基加铺材料的最优配合比, 通过对水泥基胶凝材料体系的强度发展规律和早期水化机制进行分析, 确定基准配合比。以水胶质量比、辅助胶凝材料替代率和胶砂质量比为自变量, 采用三因素 11 组试验的 A 最优混合设计法(311-A 最优混合设计法)对配合比进行优化设计, 分析自变量对设计指标抗折强度、抗压强度以及流动度的影响。通过模拟计算得到 3 种配合比组合, 对 3 种组合从经济性、技术性和工作性进行综合分析。结果表明: 基于 311-A 最优混合设计法得到的材料最优配合比的水胶质量比为 0.32, 辅助胶凝材料替代率为 15%, 胶砂质量比为 1.0, 力学强度和流动度的预测值与基于室内试验的实测值误差在 5% 以内。

关键词: 水泥基材料; 超薄加铺; 配合比; 最优混合设计; 水化机制

中图分类号: U414

文献标志码: A

引用格式:

马士宾, 侯立成, 刘月钊, 等. 旧水泥混凝土路面超薄水泥基加铺材料配合比优化[J]. 中国粉体技术, 2023, 29(6): 27-38.

MA S B, HOU L C, LIU Y Z, et al. Mix proportion optimization of ultra-thin cement-based paving materials for old cement concrete pavement[J]. China Powder Science and Technology, 2023, 29(6): 27-38.

Mix proportion optimization of ultra-thin cement-based paving materials for old cement concrete pavement

MA Shibin, HOU Licheng, LIU Yuezhao, ZHANG Junfei

(School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300400, China)

Abstract: Rapid repair of old cement pavement was a technical problem faced by highway maintenance personnel, and ultra-thin paving was a low-cost and high-efficiency maintenance solution. In order to obtain the optimal mix proportion for ultra-thin cement-based paving materials, based on the analysis of the strength development law and early hydration mechanism of cement-based cementitious material system, the reference mix proportion was determined. Then, the water-binder proportion, auxiliary cementitious material replacement rate and cement-sand proportion were taken as independent variables, and A-optimal mixed design method of three factors and eleven groups of experiments(311-A optimal mixed design method) was used to optimize the mix design. The influence of independent variables on flexural strength, compressive strength and fluidity of design indexes were systematically analyzed. Three mix proportion combinations were obtained through simulation calculation, and a comprehensive analysis was conducted on the economic, technical, and workability aspects. The results show that the optimal mix proportion of material mass percentage obtained by 311-A optimal mixed design method is water-binder proportion of 0.32, auxiliary cementitious material replacement rate of 15% and cement-sand proportion of 1.0. The error of mechanical strength and fluidity between the predicted value and the measured value based on the indoor verification test is within 5%.

Keywords: cement-based material; ultra-thin paving; mix proportion optimization; optimal mixed design; hydration mechanism

收稿日期: 2023-05-17, 修回日期: 2023-06-14。

基金项目: 国家自然科学基金项目 编号: 52208240; 天津市交通运输科技发展项目计划 编号: 2022-01。

第一作者简介: 马士宾(1973—) 男, 教授, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为路基路面材料以及桥梁施工。

E-mail: marotolo@hebut.edu.cn。

对旧水泥路面及时采取科学的养护措施可以有效延长路面的使用寿命,在旧水泥路面上直接进行超薄加铺是一种成本花费低、施工速度快的养护方案。水泥混凝土超薄加铺需要满足路面板薄和早期开放交通的技术要求,这对超薄加铺混凝土的早期强度要求较高。混凝土早期强度很大程度受水泥基胶凝材料影响,因此对水泥基胶凝材料的研究至关重要。已有的研究^[1-3]表明,早强型水泥基胶凝材料的早期强度基本可以满足预期目标,为了充分发挥利用早强型水泥基胶凝材料的性能,对水泥基胶凝材料体系的配比进行优化设计是很有必要的。

目前用于材料配合比设计的主要方法有基于强度的试算设计、利用数学工具的预测设计以及运用新算法的训练设计等。例如 Tian 等^[4]提出了一种基于抗压强度的高性能地质聚合物砂浆配合比设计方法;王巍等^[5]在正交试验的基础上,采用最优化理论对半柔性路面用灌注式水泥胶浆进行了配合比优化;姚仲泳^[6]结合控制变量法和正交试验设计对工程水泥基复合材料配合比进行研究;Merendas 等^[7]和张兰芳等^[8]采用了响应面法对碱激发水泥砂浆的配合比进行优化;马士宾等^[9]分别采用了响应面法和反向传播神经网络结合遗传算法对磷酸镁水泥砂浆的配合比进行研究。其中,基于强度的配比设计简单高效,配合比调整起来比较方便,但是无法考虑多个变量的影响,并且配比的调整需要依据主观经验。正交设计法是一种有效的组合设计方法,操作简便,试验数量少,数据方便处理,比较适合因素水平变化范围小,考虑因素相对较少的情况^[10]。响应面法则需要大量的试验数据做支撑。神经网络、遗传算法等前沿算法确实可以充分运用计算机的分析计算能力^[11],但是算法的精度和可行性都需要反复论证^[12]。

最优混合设计是一种新的试验设计方法,优点是参数估计精度高,参数变化区间范围广,数据处理方便,在工业及建筑业方面处理多因素影响设计具有较好的效果^[13]。本文综合考虑水泥基胶凝材料体系的工作性和强度性能,采用三因素 11 组试验的 A 最优混合设计法(311-A 最优混合设计法)进行配合比优化,研究水胶比、辅助胶凝材料替代率、胶砂比三因素对水泥基胶凝材料体系性能的影响。

1 试验

1.1 原材料与仪器设备

普通硅酸盐水泥的标号为 P·O 42.5,细度(80 μm 筛余质量分数)为 2.1%。42.5 级快硬硫铝酸盐水泥(R·SAC,山东潍坊九七建材有限公司)的技术指标如表 1 所示。硅灰选用高活性微硅粉(河南郑州恒诺滤材有限公司),技术指标如表 2 所示,化学成分如表 3 所示。矿渣选用 S95 级粒化高炉矿渣粉,技术指标如表 4 所示,化学成分如表 5 所示。减水剂选用减水率为 20%的聚羧酸高效减水剂(上海臣启化工科技有限公司)。细集料为中砂(天津中兴裕隆建材销售有限公司),细度模数为 2.72。

仪器设备: NLD-3 型水泥胶砂流动度测定仪(世佳试验仪器厂); NLY-2000D 型万能试验机(上海三思纵横机械有限公司); Smart Lab SE 型 X 射线衍射仪(日本理学株式会社)。试验仪器设备如图 1 所示。

表 1 42.5 级快硬硫铝酸盐水泥技术指标
Tab.1 Chemical composition of 42.5 rapid-hardening-sulphoaluminate cement

检测项目	安定性	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)
		初凝	终凝	1 d	3 d	1 d	3 d	
规范要求	合格	≥25	≤180	≥30.0	≥42.5	≥6.0	≥6.5	≥350
检测结果	合格	45	150	37.2	45.1	6.0	6.7	410

表 2 42.5 级快硬硫铝酸盐水泥化学成分质量分数
Tab.2 Technical indexes of 42.5 rapid-hardening-sulphoaluminate cement mass fraction %

CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
45.30	18.60	12.50	7.23	4.30

表 3 硅灰技术指标
Tab.3 Technical indexes of silica fume

SiO ₂ 质量分数 / %	烧失量 / %	平均粒径 / μm	比表面积 / (m ² ·g ⁻¹)	密度 / (g·cm ⁻³)
96.65	2.10	0.1	20	1.8

表 4 S95 级矿渣粉技术指标
Tab.4 Technical indexes of S95 slag

密度 / (g·cm ⁻³)	流动度比 / %	烧失量 / %	氯离子质量分数 / %	比表面积 / (m ² ·kg ⁻¹)
2.84	96	0.4	0.02	472

表 5 S95 级矿渣粉化学成分质量分数
Tab.5 Technical indexes mass fractio of S95 slag %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
34.11	15.31	37.25	8.49	0.73	1.94



图 1 试验用主要仪器设备
Fig.1 Main instruments and equipment for testing

1.2 试件制备、养护及性能测试

本试验中胶砂试件制备采用长度、宽度、高度分别为 40 mm、40 mm、160 mm 的三联模，试件置于温度为(20±2) ℃、相对湿度为 95% 以上的标准养护室进行养护。需水量试验按规范《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011) 测试。流动度采用跳桌测定，砂浆自由流动时间为(30±1) s。抗折强度和抗压强度采用万能试验机测定，抗压强度试验机加载速率为 2 400 N/s，抗折强度试验机加载速率为 50 N/s。X 射线衍射测试(XRD) 将胶砂试件劈裂取样，剔除砂子并采用无水乙醇浸泡，浸泡后研磨成粉进行分析。

1.3 配合比设计方案

1.3.1 超薄水泥基加铺材料基准配合比设计方案

基于早强混凝土的特点，为了探讨复掺多辅助胶凝复合材料下的超薄水泥基加铺材料配合比设计，确定基准配合比，为进一步配合比优化设计做铺垫。本试验参照《公路水泥混凝土路面施工技术细则》(JTG/T F30—2014) 采用水灰质量比为 0.32，用水量为 149 kg/m³，水泥用量为 466 kg/m³，减水剂用量为胶凝材料总量的 0.7%，以实际情况用量微调整。

试验采用等质量替代法，以质量分数为 5%、7%、10% 的 R·SAC 等质量替代 P·O42.5 水泥进行强度对比试验和 XRD 分析，在确定 R·SAC 的掺量基础上，分别在矿渣与硅灰质量比(简称矿硅比) 为 0%、25%、50%、75%、100% 条件下以矿渣加硅灰等质量替代质量分数为 10% 的 P·O42.5 水泥，进行强度对比试验和标准稠度用水量试验，结合 XRD 分析确定基准配合比。

1.3.2 基于最优混合设计的配合比优化设计方案

在基准配合比的基础上,本试验采用 311-A 最优混合设计进行配合比优化,选取水胶质量比(X_1)、辅助胶凝材料替代率(X_2)、胶砂质量比(X_3)为 3 个变量,以三因素七水平进行试验设计,以 3 d 龄期抗折强度作为主要设计指标,同时考虑对抗压强度和流动度的影响。各因素上下水平编码及变化间距如表 6 所示。根据 311-A 最优混合设计的要求,拟定出 11 个试验处理组合见表 7。

表 6 各因素上下水平编码及变化间距
Tab.6 Horizontal and varying spacing of each factor

因素	变化间距	水平						
		-2	-1.414	-1	0	1	1.414	2
水胶质量比(X_1)	0.02	0.28	0.29	0.30	0.32	0.34	0.35	0.36
辅助胶凝材料替代率(X_2)/%	5	0	3	5	10	15	17	20
胶砂质量比(X_3)	0.20	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.10	1.20

表 7 矿物掺和料配合比试验设计方案
Tab.7 Design Scheme for Mix Proportion Test of Mineral Admixture

处 理 号	编码值(采用值)			质量/kg					
	X_1 (水胶质量比)	X_2 (辅助胶凝材料替代率)	X_3 (胶砂质量比)	普通硅酸盐水泥	快硬硫铝酸盐水泥	矿渣	水	砂子	减水剂
1	0(0.32)	0(10)	2(1.2)	386	33	47	149	388	3.26
2	0(0.32)	0(10)	-2(0.4)	386	33	47	149	1 164	3.26
3	-1.414(0.29)	-1.414(3)	1(1.0)	471	37	16	152	524	3.67
4	1.414(0.35)	-1.414(3)	1(1.0)	377	29	13	147	419	2.93
5	-1.414(0.29)	1.414(17)	1(1.0)	398	37	89	152	524	3.67
6	1.414(0.35)	1.414(17)	1(1.0)	318	29	71	147	419	2.93
7	2(0.36)	0(10)	-1(0.6)	336	28	41	146	675	2.84
8	-2(0.28)	0(10)	-1(0.6)	454	38	55	153	911	3.82
9	0(0.32)	2(20)	-1(0.6)	340	33	93	149	776	3.26
10	0(0.32)	-2(0)	-1(0.6)	433	33	0	149	776	3.26
11	0(0.32)	0(10)	0(0.8)	386	33	47	149	582	3.26

2 结果与分析

2.1 超薄水泥基加铺材料基准配合比设计结果分析

2.1.1 R•SAC 掺量的确定

硫铝酸盐水泥具有水化反应快、早期强度高、微膨胀的特性^[14],水化产物钙矾石(Aft)是早期强度的主要来源。图 2 为不同 R•SAC 掺量下胶砂各龄期强度对比图。通过图 2 可以看出,随着 R•SAC 质量分数的增加,各龄期强度基本都有所提高,且均高于 100% P•O42.5 水泥胶砂试件。通过曲线斜率发现,R•SAC 的质量分数在 7%~10%之间对应的强度增长效果不及 5%~7%质量分数,且 R•SAC 质量分数为 7%和 10%对应的 28 d 龄期强度相差不多。

图 3 为不同 R•SAC 质量分数下 3 d 龄期的 XRD 分析图谱。通过对图 3 分析可知,主要特征峰没有明显变化且衍射图谱变化基本保持一致,主要水化产物为水化硅酸钙(C-S-H)和氢氧化钙(Ca(OH)₂,CH)。3 d 龄期时衍射图谱中显示有未水化完全的硅酸三钙(C₃S),同时存在部分碳化成分 CaCO₃,这

是由于空气中的 CO_2 渗透到内部的毛细管中并溶于液相, 与水泥水化过程中水化产物相互作用而形成。掺加 R·SAC 后的水化产物主要有 AFt、低硫型水化硫铝酸钙 (AFm) 及铝胶 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)。首先熟料中的铝酸三钙 (C_3A) 与石膏发生水化反应生成 AFt, 随着石膏和水含量的消耗, 水泥中未水化的 C_3A 继续与 AFt 或铁铝酸四钙 (C_4AF) 反应生成 AFm 和 CH, 后期 AFt 逐渐脱硫转为更稳定的单硫型 AFt, 释放出 CaSO_4 和水, 以保证一定量的液相, 供硅酸二钙 (C_2S)、铝相和铁相的水化^[15]。当 R·SAC 质量分数为 0 时, 衍射图谱上出现了 AFt 的特征峰, 含量相对较低, 普通硅酸盐水泥熟料为 C_3A 提供足够的石膏, 随着 R·SAC 掺量的增加, 游离的 SO_4^{2-} 减少, AFt 的含量增加, 同时伴随着铝硅酸盐矿物的出现并不断增长, 因此考虑到强度提高的稳定性和掺量经济性的原则, 选取 R·SAC 的质量分数为 7%。

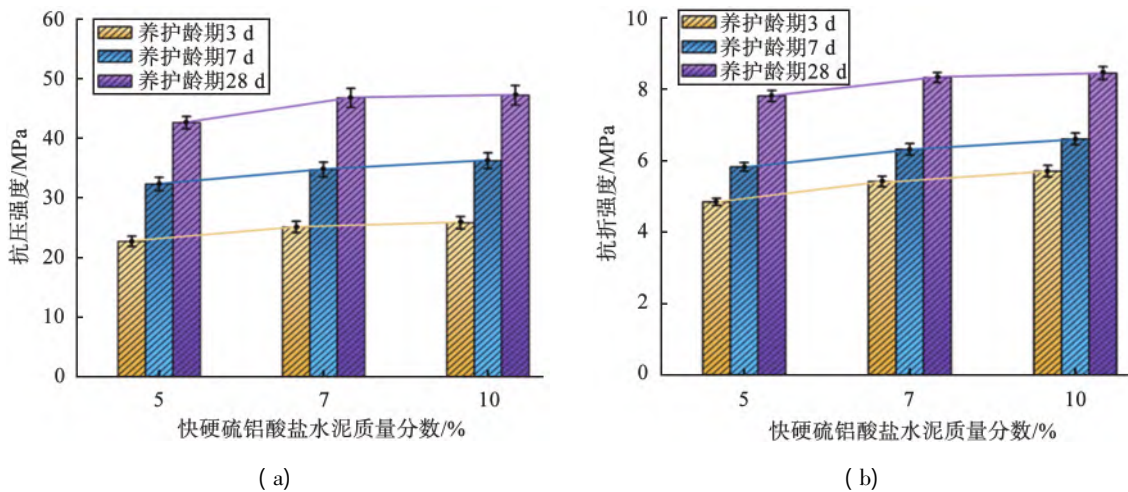


图2 不同硫铝酸盐水泥质量分数的胶砂强度

Fig.2 Strength of mortar with different R·SAC cement content

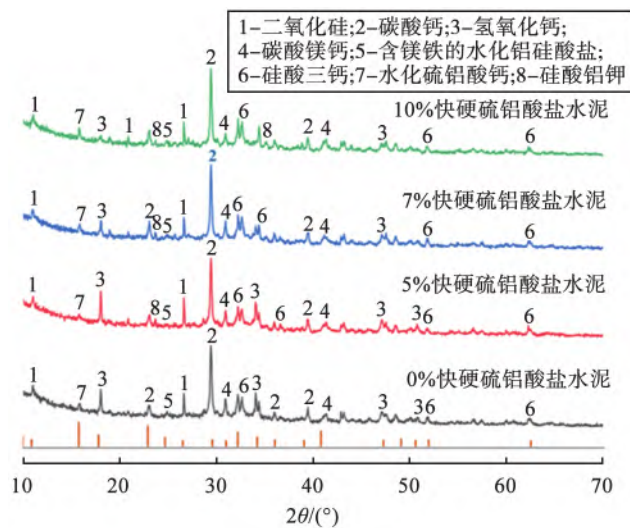


图3 不同硫铝酸盐水泥质量分数下养护3 d龄期的胶砂XRD图谱

Fig.3 XRD spectrum of maintaining 3 d age with different R·SAC cement content

2.1.2 辅助胶凝材料掺量的确定

掺加 R·SAC 使得胶砂早期强度得到有效提高, 而合理掺加矿物掺和料不仅改善砂浆的性能, 还可以节约水泥用量, 填充胶凝孔隙, 减少收缩, 提高密实性。图4为不同矿硅比时胶砂龄期强度和标准稠度用水量图。通过图4可以看出, 胶砂早龄期抗压强度随着矿硅比的增加有增长趋势, 但强度值相差不多, 各龄期抗折强度随着矿硅比的增加先增长后降低, 在矿硅比为75%附近取得极值。通过标准稠度用水量试验表明, 随着矿硅比增加需水量呈减小趋势, 这与硅灰较大的比表面积有关。

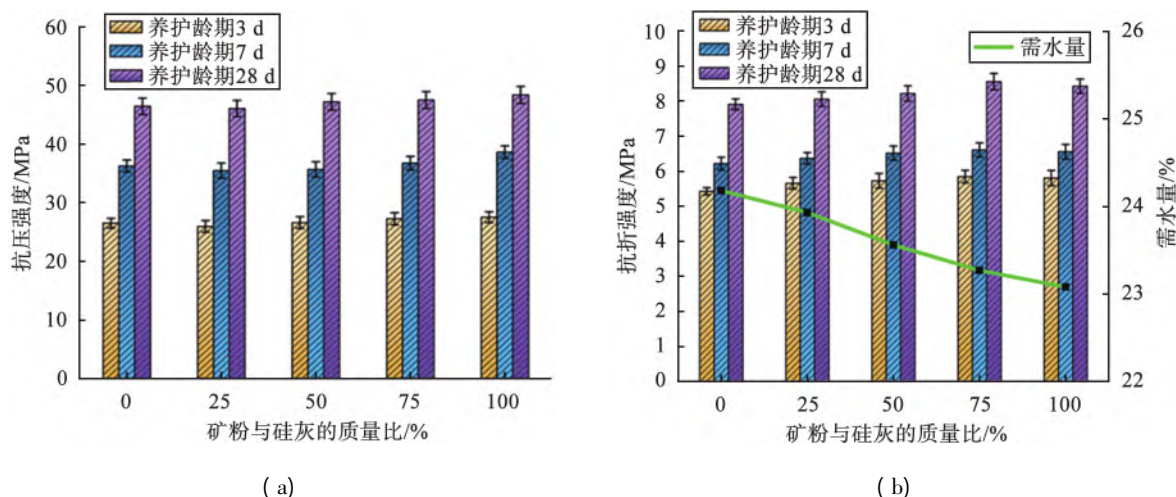


图 4 不同矿硅比下胶砂龄期强度和标准稠度用水量

Fig.4 Strength of mortar under different mass ratio of mineral powder to silica fume and requirement of normal consistency

图 5 为不同矿硅比下养护 3 d 龄期的 XRD 图谱。通过图 5 发现,随着矿渣掺量增加,铝酸盐产物增加,原因是 CH 对矿渣中的 Al_2O_3 产生了激发作用,生成了 AFt, 所以导致 CH 的衍射峰强度减弱, AFm 含量增加, CH 的减少又促进 C_3S 的水化,使水化产物增多,因此考虑到需水量要求和减少掺加胶凝材料的种类和工序,选用胶凝材料总体质量分数为 10% 的矿渣作为唯一辅助胶凝材料。

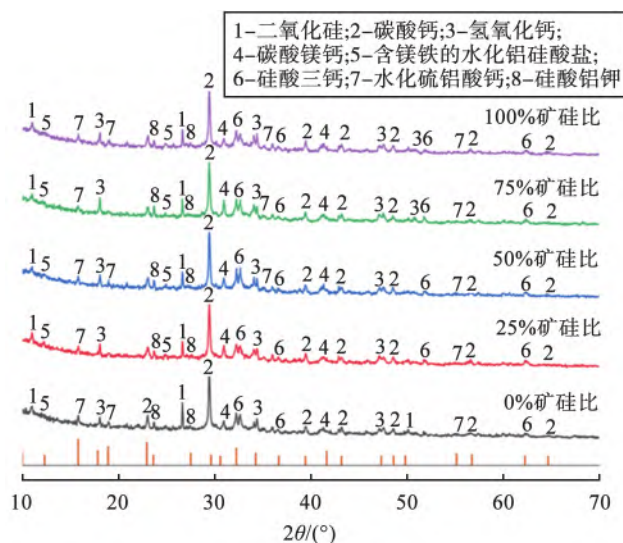


图 5 不同矿硅质量比下养护 3 d 龄期的 XRD 图谱

Fig.5 XRD spectrum of mortar with different mass ratio of mineral powder to silica fume at 3 d age

2.1.3 物相定量分析

图 6 为 2 种胶凝体系的 XRD 物相定量分析图。从图 6 可以看出,普通硅酸盐水泥水化产物中未水化完全的硅酸钙质量分数较高,为 28.5%。R•SAC-OPC 水泥水化产物中出现了新物质绿泥石,是一种层状铝硅酸盐矿,含 Mg、Fe、Al 等矿物,这可能与矿渣的掺加有关,并且硅酸钙的含量减少,AFt 的含量增加,相应产生的 C-S-H 凝胶将会填充空隙,有利于水泥基胶凝材料体系早期强度的提高。相比于 R•SAC-OPC 水泥水化产物,普通硅酸盐水泥水化产物中 CH 的含量较高,这是因为矿渣及 R•SAC 熟料都会加快对 CH 的消耗,促进 AFt 的形成,因此 R•SAC-OPC 水泥复合胶凝体系可以实现早期强度的提升,又利于混凝土缓凝施工。最终确定超薄水泥基加铺材料基准配合比如表 8 所示。

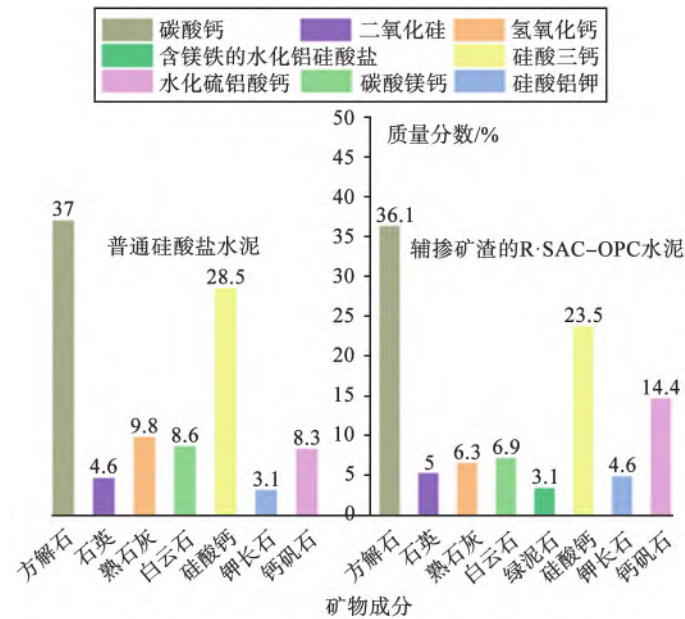


图 6 XRD 物相定量分析

Fig.6 Quantitative analysis of XRD phase

表 8 每立方砂浆基准配合比

Tab.8 Reference mix proportion

kg

胶凝材料总量	普通硅酸盐水泥	水	快硬硫铝酸盐水泥	矿渣	细集料	减水剂
466	386	149	33	47	625	3.26

2.2 基于最优混合设计的基准配合比优化

2.2.1 试验结果

基于 311-A 最优混合设计法的试验方案,对不同配合比下改性水泥砂浆的 3 d 抗折强度及抗压强度、流动度进行测试,试验共成型胶砂试件 11 组,共计 66 个,结果如表 9 所示。

表 9 基于 311-A 最优混合设计法的试验结果

Tab.9 Test Results based on 311-A optimal mixed design method

编号	3 d 抗压强度 /MPa					变异 系数 /%	3 d 抗折强度 /MPa				变异 系数 /%	流动度 / mm
	重复				重复							
	I	II	III	平均值	I		II	III	平均值			
1	27.4	27.5	29.7	28.2	4.59	5.65	5.66	5.74	5.68	1.00	161	
2	25.5	26.1	27.0	26.2	2.85	5.42	5.34	5.50	5.42	1.48	154	
3	28.1	29.8	31.7	29.9	6.09	5.54	5.65	5.81	5.67	2.40	151	
4	24.3	27.7	26.9	26.3	6.80	5.01	5.71	5.33	5.35	6.55	166	
5	30.1	30.2	28.8	29.7	2.62	5.56	5.60	5.69	5.62	1.19	158	
6	24.1	28.5	28.6	27.0	9.51	5.63	5.40	5.12	5.38	4.74	172	
7	24.0	24.5	23.4	24.0	2.24	4.82	4.80	4.78	4.80	0.42	167	
8	32.9	31.9	32.5	32.4	1.61	5.71	6.70	6.34	6.25	8.02	148	
9	24.8	26.1	27.7	26.2	5.58	5.20	5.20	5.10	5.17	1.12	165	
10	26.4	26.5	26.0	26.3	0.99	5.18	5.62	5.15	5.32	4.95	153	
11	26.8	28.4	29.2	28.1	4.44	5.57	5.78	5.80	5.72	2.23	160	

2.2.2 建立多元回归方程

根据表7水泥砂浆流动度和3d力学性能强度实测结果,以编码值 X_1 (水胶比)、 X_2 (辅助胶凝材料替代率)、 X_3 (胶砂比)为决策变量,以砂浆试件抗折强度(Y_1)、抗压强度(Y_2)和流动度(Y_3)为目标函数,建立三元二次回归方程,其回归模型通式为

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (1)$$

根据试验结果,利用MATLAB软件将多元多项式化为多元线性回归方程,建立自变量编码值与目标函数的regress函数方程:

$$Y_1 = 5.720 - 0.231X_1 - 0.021X_2 + 0.063X_3 + 0.01X_1X_2 + 0.132X_1X_3 + 0.017X_2X_3 - 0.023X_1^2 - 0.093X_2^2 - 0.043X_3^2,$$

$$Y_2 = 28.100 - 1.607X_1 + 0.032X_2 + 0.500X_3 + 0.113X_1X_2 + 0.493X_1X_3 + 0.057X_2X_3 + 0.206X_1^2 - 0.281X_2^2 - 0.225X_3^2,$$

$$Y_3 = 160.000 + 4.939X_1 + 2.649X_2 + 1.750X_3 - 0.125X_1X_2 + 0.189X_1X_3 - 0.351X_2X_3 - 0.031X_1^2 + 0.344X_2^2 - 0.625X_3^2.$$

回归参数统计分析可以发现水泥砂浆强度值和流动度值具有较好的回归效果,强度和流动度拟合的 P 值最大为0.0201,小于0.05,说明回归方程总模型达到了显著水平。其中砂浆抗折强度的 P 值最大,方程拟合效果相对较差,统计参数值表现不理想,但仍能达到显著水平。从残差和方差估计来看,流动度和抗压强度数值较小,抗折强度的数值较大,说明流动度和抗压强度拟合后的数据稳定性好。

2.2.3 水泥砂浆强度的效应分析

对方程中 X_1 、 X_3 进行互作效应分析,采用降维法(即固定 X_2 取零水平)导出它们的效应方程为

$$Y_1 = 5.720 - 0.231X_1 + 0.063X_3 + 0.132X_1X_3 - 0.023X_1^2 - 0.043X_3^2,$$

$$Y_2 = 28.100 - 1.607X_1 + 0.500X_3 + 0.493X_1X_3 + 0.206X_1^2 - 0.225X_3^2.$$

在编码区间内绘制抗折强度(Y_1)和抗压强度(Y_2)的交互效应曲线,如图7、8所示。多因素交互曲线可以更加直观地反映两因素对强度值的影响趋势,并能够观察在固定某一因素下对比另一因素的表现效果,图中可以看出,当水胶比编码值为-2附近时,交互效应曲面多赋为蓝色区域,即具有较高的强度值。

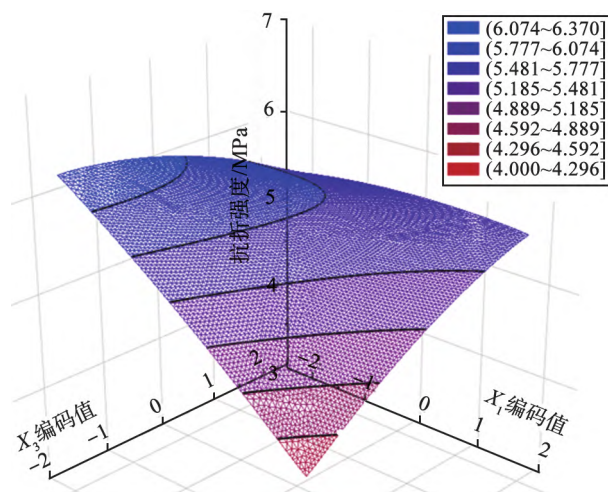


图7 抗折强度交互效应曲线

Fig.7 Flexural strength interaction curve

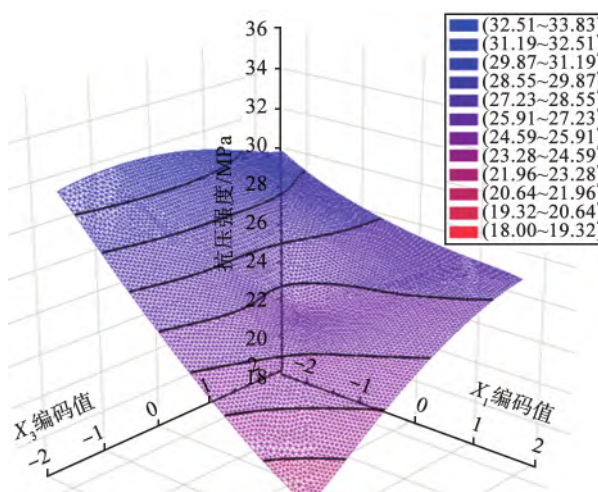


图8 抗压强度交互效应曲线

Fig.8 Compressive strength interaction curve

通过编码值的大小可以发现当水胶质量比较大、胶砂质量比较小时,其抗压强度和抗折强度都集中表现为较小值,交互曲面表现为红色区域。将交互曲面向 X_1 方向作投影可以发现水胶质量比对抗

压、抗折强度的影响表现为截然不同的抛物线趋势。抗压强度交互曲面中部出现一定程度的凹陷,说明在各自为编码值 0 附近组合掺配比下强度减小,导致等高线出现向上偏移的现象。同理采用降维法固定 X_3 (X_1) 取零水平也可以对 X_1 、 X_2 (X_2 、 X_3) 进行互作效应分析。

2.2.4 最佳配合比组合

为求得抗折强度极值点,对 Y_1 回归方程求偏导数,建立如下方程:

$$Y_1'(X) = \begin{bmatrix} -0.231 & -0.046 & 0.010 & 0.131 \\ -0.021 & 0.010 & -0.186 & 0.017 \\ 0.063 & 0.132 & 0.017 & -0.086 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = 0 ,$$

式中: C 为常数项 = 1,依次对 $\partial(Y)/\partial(X_n)$ 求偏导,解得编码值为 $X_1 = -5.022$, $X_2 = -0.113$, $X_3 = 0.733$,对 Y_1 回归方程二次求偏导,发现导数恒小于 0,故该极值点为最大值点,又因为编码值定义域为 $[-2, 2]$,故最终编码值取为 $X_1 = -2$, $X_2 = -0.113$, $X_3 = 0.733$ 将编码值插值换算,可以得到抗折强度高的配合比方案 1: 水胶质量比为 0.28,辅助胶凝材料替代率为 9.44%,胶砂质量比为 0.95。

同理,对 Y_2 回归方程求偏导数,建立如下方程

$$Y_2'(X) = \begin{bmatrix} -1.607 & 0.412 & 0.113 & 0.493 \\ 0.032 & 0.113 & -0.562 & 0.057 \\ 0.500 & 0.493 & 0.057 & 0.450 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = 0 .$$

经修正编码值为 $X_1 = -2$, $X_2 = 0.06$, $X_3 = 1.11$ 可以得到抗压强度高的配合比方案 2: 水胶质量比为 0.28,辅助胶凝材料替代率为 10.30%,胶砂质量比为 1.0。

为了寻求符合设计强度的最佳配合比,采用最优化方法,在编码区间 $[-2, 2]$ 内,取各因素步长为 1,共有组合 125 组。参考方案等^[16]基于全级配三维细观混凝土随机模型的分析方法,提出了混凝土宏观强度与砂浆强度间的修正关系,得出修正系数的规律公式为

$$Y = 0.71\varphi + 1 , \quad (2)$$

式中: Y 为砂浆强度; φ 为粗骨料体积分数。

根据前文超薄加铺工程技术期望,3 d 龄期最低配置砂浆强度应该满足

$$Y_1 \geq Y \times f_{r,3d}, Y_2 \geq Y \times f_{c,3d} , \quad (3)$$

式中: φ 取为 48%; $f_{r,3d}$ 为混凝土 3 d 龄期抗折强度,取 4 MPa; $f_{c,3d}$ 为混凝土 3 d 龄期抗压强度,取 20 MPa。可得, $Y_1 \geq 5.36$ MPa, $Y_2 \geq 26.6$ MPa。

基于流变理论的砂浆流动度和混凝土工作性能相关性已经进行了大量研究^[17-18],砂浆膜厚、砂浆性质和骨料体积分数能较为准确地反映混凝土流变相关性的影响规律,但一般认为在缺少试验数据的情况下,砂浆流动度小于 160 mm 时,将明显影响到混凝土工作性能。早强砂浆流动度难以达到普通砂浆的流动度要求,以 160 mm 砂浆流动度为阈值,但遵循择优原则,在满足强度要求上选择流动度最大的方案,最终确定三因素后通过调整骨料体积分数可实现施工和易性要求。

取约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} Y_1 \geq 5.36 \text{ MPa} \\ Y_2 \geq 26.6 \text{ MPa} \\ Y_3 \geq 160 \text{ mm} \end{cases} \\ X_{1,2,3} = [-2, -1, 0, 1, 2] \end{cases} .$$

经过计算机进行计算,满足砂浆强度及工作性的配比共有 23 组,将该 23 组代入回归方程中并进行筛选排序,满足强度要求的砂浆流动性最高可达 164 mm,若考虑路面施工中可能存在的误差具有 1.05 保证率并满足上述条件的求得编码值方案为 $X_1=0, X_2=1, X_3=1$,根据此约束条件换算的最终配比方案 3 为水胶质量比为 0.32,辅助胶凝材料替代率为 15%,胶砂质量比为 1.0。3 种方案的指标预测值如表 10 和图 9 所示。

表 10 3 种最佳组合方案的结果预测值
Tab.10 Predicted value of three best combination schemes

方案	编码值			换算值			预测值		
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa	流动度/mm
1	-2	-0.113	0.733	0.28	9.44%	0.95	5.92	29.7	150
2	-2	0.060	1.110	0.28	10.30%	1.00	5.81	31.3	151
3	0	1.000	1.000	0.32	15.00%	1.00	5.64	28.2	164

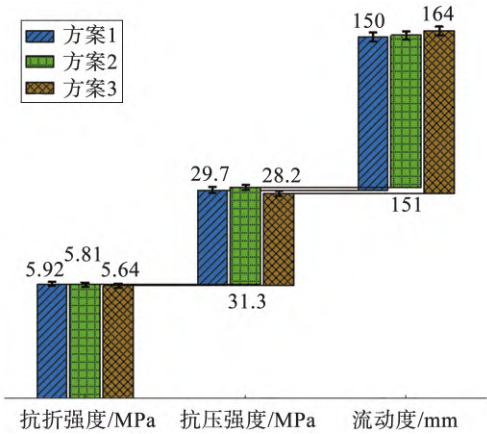


图 9 不同方案回归预测值
Fig.9 Regression prediction values of different schemes

基于上述 3 种配比方案,通过室内试验进行验证,结果如表 11 所示。其中,方案 3 在满足强度要求的基础上工作性能较好,剩余强度值较小降低了生产成本,设计值与实际值的误差控制在 5% 以内,符合要求。最终得出砂浆调整配合比如表 12 所示。

表 11 3 种最佳组合方案结果验证
Tab.11 Verification of three best combination schemes

方案	抗折强度/MPa			抗压强度/MPa			流动度/mm		
	预测值	实测值	误差/%	预测值	实测值	误差/%	预测值	实测值	误差/%
1	5.92	5.78	2.42	29.7	28.9	2.77	150	151	0.66
2	5.81	5.71	1.75	31.3	32.0	2.19	151	157	3.82
3	5.64	5.42	4.06	28.2	27.7	1.81	164	167	1.80

表 12 每立方米砂浆最终配合比
Tab.12 Final mix proportion per cubic meter of mortar kg

胶凝材料总量	P·O 42.5 水泥	水	R·SAC	矿渣	细集料	减水剂
466	363	149	33	70	466	3.26

注: R·SAC 为快硬硫铝酸盐水泥。

3 结论

1) 通过对水泥基胶凝材料体系的强度发展规律和水化机理分析确定了基准配合比, 其中 R•SAC 的质量分数为 7%, 以矿渣作为唯一辅助胶凝材料, 质量分数为 10%。

2) 以水胶比、辅助胶凝材料替代率和胶砂比为自变量, 以 3 d 抗折强度作为主要设计指标, 同时考虑对抗压强度和流动度的影响, 采用三因素七水平的 311-A 最优混合设计法对水泥砂浆配合比进行优化设计, 为砂浆体系配合比优化设计提供了一种新的科学方法。

3) 最优混合设计采用编码赋值的方式进行多因回归, 回归模型可信度高, 对因变量预测精度好, 配合比设计值与实际值的误差在 5% 以内, 证明最优混合设计法用于优化水泥基胶凝材料体系的配合比具有准确性和科学性。综合考虑经济性、技术性和工作性的需求, 最终得到适配超薄水泥基加铺材料水胶质量比为 0.32, 辅助胶凝材料替代率为 15%, 胶砂质量比为 1.0, 水胶比的减小会使最佳砂用量增加。

参考文献(References):

- [1] ROY M, RAY I, DAVALOS J F. High-performance fiber-reinforced concrete: development and evaluation as a repairing material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(10): 04014074.
- [2] GEORGIU A V, PANTAZOPOULOU S J. Behavior of strain hardening cementitious composites in flexure/shear[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(10): 04017192.
- [3] 陆宸宇, 姚淇耀, 彭林欣, 等. 新型早强高延性水泥基复合材料的超短龄期力学性能研究[J]. 混凝土, 2022(10): 95-100.
LU C Y, YAO Q Y, PENG L X, et al. Mechanical properties of a novel type of early-strength and high-ductility cementitious composites in ultra-short age[J]. Concrete, 2022(10): 95-100.
- [4] TIAN S N, STEPHEN J F. Development of a mix design methodology for high-performance geopolymers mortars[J]. Structural Concrete, 2013, 14(2): 148-156.
- [5] 王巍, 黄会明, 魏如喜, 等. 半柔性路面用灌注式水泥胶浆的配比优化设计原则[J]. 公路交通科技, 2017, 34(5): 35-41.
WANG W, HUANG H M, WEI R X, et al. Optimization design principle of poured cement slurry ratio for semi-flexible pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(5): 35-41.
- [6] 姚仲泳. 低干燥收缩性能的工程水泥基复合材料配合比研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(3): 171-176.
YAO Z Y. Research on mix proportion of ECC with low drying shrinkage[J]. Industrial Construction, 2022, 52(3): 171-176.
- [7] MERMERDAS K, ALGN Z, EKMEN S. Experimental assessment and optimization of mix parameters of fly ash-based lightweight geopolymer mortar with respect to shrinkage and strength[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 31(C): 101351.
- [8] 张兰芳, 翟建锦. 基于响应面法的碱激发水泥砂浆配合比优化[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(11): 3619-3624.
ZHANG L F, ZHAI J J. Mixture ratio optimization of alkali-activated cement mortar based on response surface method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(11): 3619-3624.
- [9] 马士宾, 李盈霞, 闫伟阳. 基于两种方法优化磷酸镁水泥砂浆配合比研究[J]. 混凝土, 2023(1): 140-145.
MA S B, LI Y X, YAN W Y. Optimization of magnesium phosphate cement mortar mixture ratio based on two methods[J]. Concrete, 2023(1): 140-145.
- [10] 邢志娜, 王菊香, 刘洁, 等. 正交试验设计在近红外光谱建模参数优化选择中的应用[J]. 理化检验(化学分册), 2018, 54(4): 419-422.
XING Z N, WANG J X, LIU J, et al. Application of orthogonal experimental design to optimized selection of modeling factors in nir spectral analysis[J]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part B: Chemical Analysis), 2018, 54(4): 419-422.
- [11] 张峻铭, 杨伟东, 李岩. 人工智能在复合材料研究中的应用[J]. 力学进展, 2021, 51(4): 865-900.
ZHANG J M, YANG W D, LI Y. Application of artificial intelligence in composite materials[J]. 2021, 51(4): 865-900.
- [12] 周昊. 大数据驱动的混凝土配合比智能优化研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.

- ZHOU H. Research on intelligent optimization of concrete mixture driven by big data [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.
- [13] 马士宾, 庞京杰, 任俊财, 等. 基于最优混合设计法的路用混凝土配合比优化 [J]. 中国科技论文, 2022, 17(4): 394-399.
- MA S B, PANG J J, REN J C, et al. Proportion optimization of road concrete based on optimal mixed design method [J]. China Science Paper, 2022, 17(4): 394-399.
- [14] 张海波, 狄红丰, 刘庆波, 等. 微纳米无机注浆材料研发与应用 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 949-955.
- ZHANG H B, DI H F, LIU Q B, et al. Research and application of micro-nano inorganic grouting materials [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 949-955.
- [15] 黄士元, 邬长森, 杨荣俊. 混凝土外加剂对硫铝酸盐水泥水化历程的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2011, 177(1): 7-12.
- HUANG S Y, WU C S, YANG R J. Effects of concrete additives on the hydration process of sulphoaluminate cement [J]. China Concrete and Cement Products, 2011, 177(1): 7-12.
- [16] 方秦, 张锦华, 还毅, 等. 全级配混凝土三维细观模型的建模方法研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(1): 14-21.
- FANG Q, ZHANG J H, HUAN Y, et al. The investigation into three-dimensional mesoscale modelling of fully-graded concrete [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 14-21.
- [17] 何小兵, 沈武福, 贾秋炳, 等. 砂浆流变特性及其膜厚对自密实混凝土性能的影响 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 463-470.
- HE X B, SHEN W F, JIA Q B, et al. Effects of mortar rheological characteristics and film thickness on self-compacting concrete [J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2020, 50(3): 463-470.
- [18] 南雪丽, 李荣洋, 姬建瑞, 等. 中流动性混凝土工作性与砂浆流变特性相关性研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 81-86.
- NAN X L, LI R Y, JI J R, et al. Correlation between medium fluidity concrete workability and mortar rheological properties [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2022, 41(4): 81-86.

(责任编辑: 武秀娟)