

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.11.021

矿物掺合料对水下不分散灌浆料的影响及优化

刘祥胜¹, 纪厚祥¹, 刘锦程², 詹炳根^{2,3,4}, 余其俊^{2,3,4}, 李占甫⁵

(1. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 水泥基材料低碳技术与装备教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009; 4. 安徽省水泥基材料低碳技术工程研究中心, 安徽 合肥 230009; 5. 中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要:文章针对某新型大直径混凝土管桩基础最外层的护壁材料,设计水下不分散砂浆试验,该材料对于流动性、抗分散性均有较高的要求,且没有相关公式供参考;采用矿物掺合料单掺试验,同时设计全因子实验,测试灌浆料的流动度、扩展度、pH值和浊度,研究矿物掺合料对灌浆料流动性和抗分散性的影响以及各掺合料之间的交互效应;采用Minitab软件进行数据分析与拟合,基于双响应预测结果,获得水下不分散灌浆料的最佳掺量分别为粉煤灰掺量5%、矿粉掺量15%、偏高岭土掺量15%,并给出浊度与流动性相应的拟合公式。该研究为矿物掺合料复掺调节灌浆料的流动性与抗分散性提供了参考。

关键词:抗分散性;流动性;水下不分散灌浆料;矿渣;粉煤灰;偏高岭土;硅灰

中图分类号:TQ177.62 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)11-1579-06

Effect and optimization of mineral admixtures on underwater non-dispersible grouts

LIU Xiangsheng¹, JI Houxiang¹, LIU Jincheng², ZHAN Binggen^{2,3,4}, YU Qijun^{2,3,4}, LI Zhanfu⁵

(1. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Engineering Research Center of Low-carbon Technology and Equipment for Cement-based Materials of Ministry of Education, Hefei 230009, China; 4. Anhui Province Engineering Research Center of Low-carbon Technology for Cement-based Materials, Hefei 230009, China; 5. The Fourth Engineering Co., Ltd., CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: Aiming at the outermost wall material of a new large-diameter concrete pipe pile foundation, an underwater non-dispersible mortar test was designed. The material has high requirements for fluidity and dispersion resistance, and there is no relevant formula for reference. In this paper, the single admixture test of mineral admixtures and the full factorial experiment were designed to test the fluidity, expansion, pH value and turbidity of grouts, and the influence of mineral admixtures on the fluidity and dispersion resistance of grouts and the interaction effect between each admixture were studied. Minitab software was used for data analysis and fitting, and based on the prediction results of double response, the optimal content of underwater non-dispersible grouts was determined as 5% fly ash, 15% mineral powder and 15% metakaolin, and the fitting formula corresponding to turbidity and fluidity was given. The study provides a reference for adjusting the fluidity and dispersion resistance of grouts using compound mineral admixtures.

Key words: dispersion resistance; fluidity; underwater non-dispersible grouts; slag; fly ash; metakaolin; silica fume

收稿日期:2023-06-09;修回日期:2023-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51972115)

作者简介:刘祥胜(1971—),男,安徽铜陵人,安徽省交通控股集团有限公司工程师;

詹炳根(1964—),男,安徽庐江人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail: bgzhan@hfut.edu.cn;

余其俊(1962—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

大直径实心桩因其具有承载力大、抗变形能力强等优点,已逐步应用到高层建筑、大型桥梁等基础设施的建设中。然而大直径实心桩的材料用量大、经济性差,单位体积桩的承载性能没有得到充分利用,不满足国家环保建造和资源节约的政策要求。与大直径实心桩相比,大直径空心桩在施工中对桩端和桩侧均采用了压浆技术,在桩侧和桩端形成了一层硬壳层,强化了桩侧和桩端土的强度特性,相当于增加了有效桩径,提高了桩的总侧阻力,节省了用料^[1]。因此,有必要开展大直径空心桩基础技术研究,减少材料用量。

在大直径空心桩基础中,需要在桩基础最外层设计护壁层,用于防止水渗透,保证主混凝土在浇筑时不受水冲洗作用而分散,其在前期还承受一定侧向水压力,防止侧漏。水泥基灌浆料是理想的护壁材料,其需要良好的流动性,用于防止灌浆料浇注导管的堵塞,同时需要良好的水下不分散能力,用于水下环境施工。制备高流动性和高抗分散能力的灌浆料是大直径空心桩基础技术的关键点之一。

关于水下不分散灌浆料的研究较少,其组成设计与优化可以参考水下不分散混凝土的制备研究。与常规水泥基材料相比,水下不分散混凝土组分复杂,尤其是对抗分散剂、矿物掺合料等要求较高,其组成优化设计是目前研究的热点。文献[2]在水下自密实混凝土中掺入矿物掺合料,研究粉煤灰和硅粉对自密实混凝土性能的影响,但大多集中于流动性,制备的自密实混凝土流动性超 600 mm,但是没有关注抗分散性能;文献[3]研究抗分散剂、水胶比、粉煤灰对水下不分散混凝土抗分散性、流动性、抗压强度的影响,研究表明 UWB-II 型抗分散剂掺量为 2.5% 时效果最佳;文献[4]研究不同品种抗分散剂对水下不分散混凝土性能的影响,UWB-II 型絮凝剂的流失率最小为 0.5%,且易于调整水下抗压强度,其最适掺量为 3.0%;文献[5]针对调水工程输水工况下输水渠道衬砌板破损修复难题,制备适用于倾倒法水下施工用的混凝土,在粉煤灰掺量 25%、硅粉掺量 15%、水粉比 1.0、砂率 42% 的水下不分散混凝土流动性能较优秀,可以达到 500 mm;文献[6]研究减水剂和絮凝剂对水下不分散混凝土性能的影响,当丙烯酰胺分子量为 $1\ 600 \times 10^4$ 、聚丙烯酰胺和聚羧酸减水剂掺量分别为水泥质量的 0.3% 和 2.0%、粉煤灰的掺量为 17% 时,水下不分散混凝土性能较优;文献[7]研究粉煤灰对水下

不分散混凝土性能影响,认为粉煤灰掺量为 30% 时最佳,混凝土的 pH 值达到 8.75,浊度下降到 18.5,抗分散性良好;文献[8]指出单掺粉煤灰会导致水下不分散混凝土的抗分散性能降低,且粉煤灰掺量应小于 30%,仅单掺微硅粉无法满足水下不分散混凝土流动性能要求;文献[9]研究表明水胶比 0.30 且水下不分散剂掺量 1.0% 和水胶比 0.38 且水下不分散剂掺量 1.8% 时,水下不分散砂浆 pH 值较小,达到 7.5,浊度小于 90 NTU;文献[10]研究表明抗分散剂掺入后导致水泥浆体的凝结时间延迟、渗水高度略高、保水性较好、干缩值大、抗冻性提高;文献[11]通过对聚糖类絮凝剂的研究,研制出新型的聚糖类絮凝剂,掺入后聚糖类水下不分散混凝土克服了聚羧基类水下不分散混凝土的性能缺点,能广泛应用于不同工程。

上述研究多关注絮凝剂(抗分散剂)的选择,虽然初步探讨粉煤灰、矿粉、硅灰等掺合料对水下不分散水泥基材料的影响,但没有系统建立矿物掺合料的优化方法,且关于最佳配合比的结论不一致。本文研究矿渣、粉煤灰、偏高岭土和硅灰 4 种常见的矿物掺合料对水下不分散灌浆料抗分散性、流动性的影响,为得到最佳掺量,采用全因子试验分析矿渣、粉煤灰、偏高岭土和硅灰的交互作用,有利于水下不分散灌浆料组成的优化设计。

1 原材料及实验方法

1.1 原材料

水泥为海螺 P·O 42.5R,其主要化学成分见表 1 所列。矿粉为马鞍山钢铁厂所产高炉矿渣粉磨后产品,主要化学成分见表 2 所列。

表 1 水泥主要化学成分 %

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
质量分数	50.11	16.31	6.86	22.95	2.74	1.23	0.83

表 2 矿粉主要化学成分 %

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	TiO ₂	MnO
质量分数	46.08	23.69	10.50	3.55	3.03	2.30	0.56

粉煤灰为马鞍山正圆实业有限公司生产的 II 级粉煤灰,主要化学成分见表 3 所列。

表 3 粉煤灰主要化学成分 %

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂
质量分数	3.51	37.06	27.00	5.20	1.29	1.22	1.81

偏高岭土为辰义耐材磨料公司产品,主要化学成分见表 4 所列。

表 4 偏高岭土主要化学成分 %

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	ZrO ₂
质量分数	0.87	48.00	38.45	4.20	2.95	0.63	0.29

减水剂为湖南中岩建材科技有限公司生产的 HL-900 聚羧酸减水剂,基本性质见表 5 所列。

表 5 减水剂的基本性质

项目	技术指标
外观	无色或淡黄色透明液体
密度/(g/cm ³)	1.09±0.02
pH 值	5±1
ω(Cl ⁻)/%	≤0.02
ω(总碱)/%	≤1
ω(甲醛)/%	≤0.01

絮凝剂为富强精细化工有限公司生产的羟丙基甲基纤维素(HPMC)。消泡剂为广东百年宏图化工科技有限公司生产的 DQ-6016 消泡剂。

1.2 实验方法

灌浆料的制备过程:首先将砂、水泥、矿物掺合料等材料加入搅拌机中搅拌 1 min;然后将水、外加剂加入搅拌机内搅拌 5 min。砂浆单掺配合比见表 6 所列。

表 6 砂浆单掺配合比 单位:g

胶凝材料	水	砂子	减水剂	HPMC
700	350	1 400	8	3.5

本文采用水下不分散砂浆扩展度、流动性、pH 值、浊度表征该大直径桩护壁材料的流动性、抗分散性。

1) 扩展度测定。将拌好的砂浆迅速注入模具中,向中心按顺时针方向均匀插捣 15 次,各次插捣应在截面上均匀分布。插捣筒边砂浆时,捣棒应插透本层至下一层的表面。插捣完毕后,砂浆表面应用刮刀刮平,将筒缓慢匀速垂直提起,10 s 后用钢直尺量取相互垂直的 2 个方向的最大直径,并取其平均值为砂浆扩展度。

2) 流动性测定。在测定前放置于振动台上振动 25 次,其他步骤与扩展度测定相同。

3) pH 值及浊度测定。在 1 000 mL 烧杯中加入 800 mL 水,然后将浆体分为 3~5 份,用手铲将每份浆体从水面缓慢地自由落下,使液面上

升至 1 000 mL 刻度处,10~20 s 完成操作,静置烧杯 3 min,用吸管在 1 min 内轻轻吸取 600 mL 上层液体,并采用 pH 计和浊度仪测试。

2 结果与讨论

2.1 对水下不分散灌浆料抗分散性的影响

pH 值和浊度是评价水下不分散灌浆料抗分散性的重要指标,矿物掺合料种类和掺量(指占胶凝材料质量分数)对灌浆料抗分散性的影响试验结果如图 1、图 2 所示。

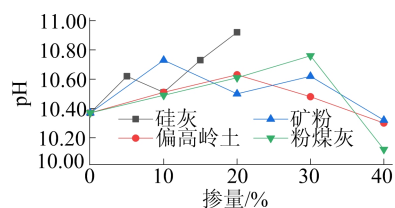


图 1 掺合料对 pH 值的影响

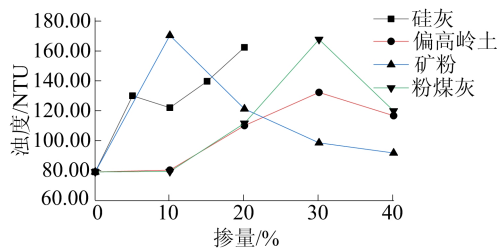


图 2 掺合料对浊度的影响

一般而言,水泥基材料孔溶液呈碱性,主要来源于水泥熟料中碱金属 Na₂O 和 K₂O 等的溶出。而矿物掺合料通常也含有部分 Na₂O 和 K₂O,这些碱金属溶出同样会影响孔溶液 pH 值。由图 1 可知,灌浆料的 pH 值在 10.00~11.00 之间,且不同种类掺合料的 pH 值差距较小。当粉煤灰掺入砂浆后,浆体的 pH 值呈先上升后下降趋势;当粉煤灰掺量为 30% 时,pH 值达最大值为 10.81,较空白组上升了 3.9%;其中,40% 粉煤灰掺量浆体的 pH 值最小,较空白组下降了 2.5%。

掺入矿粉后,pH 值呈波浪形变化趋势,在矿粉掺量为 10% 时取得,最小值在矿粉掺量为 40% 时取得,较空白组分别上升 3.2%、下降 1.2%。

对于偏高岭土体系,灌浆料的 pH 值变化趋势为先上升后下降,在偏高岭土掺量为 20% 时达到最大值 10.61,在掺量为 40% 时取得最小值 10.27,较空白组分别上升了 2.0% 和下降了 1.2%。而对于硅灰来说,其掺入灌浆料后,最大 pH 值在 20% 时取得,为 10.78,此时较空白组上升了 3.6%。

综上所述,矿物掺合料的掺入对灌浆料的 pH 值影响不大,主要原因有:① 由于 pH 值越大,则在水中分散的颗粒数目需呈指数级增长;② 在水泥中加入掺合料以后,在水中分散的颗粒同时包含水泥与掺合料,而掺合料对于 pH 值的影响相对较小。从图 2 可以看出,掺入不同种类的掺合料后,浆体的浑浊度会不同程度地增加,这表明掺合料的掺入会降低砂浆的抗分散性能。对于粉煤灰体系,浆体的浊度大致呈先上升后下降趋势,在 10% 时浊度达到最大值 166.54 NTU,相较于空白组上升了 112%;但粉煤灰掺量为 10% 时,其浊度较空白组反而下降了 3.8%。

对于矿粉体系,浆体浊度先上升后下降,当矿粉掺量为 10% 时,取得最大值 172.00 NTU,相较于空白组上升了 120.5%。对于偏高岭土,其浊度变化也呈现先上升后下降趋势,当其掺量为 30% 时,浊度达到最大值 128.44 NTU,较空白组上升了 64%,但是当其掺量为 10% 时,浊度增多较少,仅上升了 1.1%。对于硅灰来说,掺量为 20% 时其浆体浊度达到最大值,为 161.28 NTU,而其最小值为 119.73 NTU,此时仍然较空白组上升了 52.6%。

上述结果表明低掺量粉煤灰、偏高岭土以及大掺量矿粉对灌浆料的抗分散能力减小作用相对较弱。

2.2 对水下不分散灌浆料流动性能的影响

不同种类、掺量的矿物掺合料制备的灌浆料的扩展度和流动度试验结果如图 3、图 4 所示。

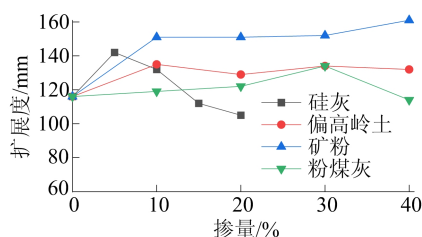


图 3 掺合料对扩展度的影响

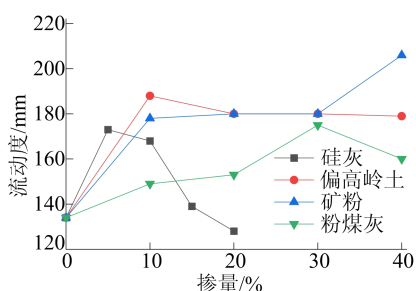


图 4 掺合料对流动度的影响

从图 3、图 4 可以看出:随着粉煤灰掺量增加至 30%,灌浆料的扩展度和流动度分别从 118、134 mm 增加至 129、179 mm,分别上升了 9.3%、33.5%,主要是粉煤灰的微集料效应所致;而当粉煤灰掺量提升至 40%,灌浆料的扩展度和流动度分别降至 119、150 mm,较最大值分别下降了 7.8%、16.2%,这可能是由于等量取代粉煤灰的体积增大,使得粉煤灰的吸附效应作用占主导,增加浆体稠度,降低扩展度和流动度,这与文献[12]的结果一致。

在一般情况下,矿粉本身对流动性的影响不大。然而在本试验中,矿粉掺入水下不分散灌浆料后,能显著提高抗分散灌浆料的流动度,且随着矿粉掺量的增加,砂浆的流动度不断增大,在掺量为 40% 时,灌浆料的扩展度和流动度分别达到 160、201 mm,相较于空白组分别上升了 16.9%、33.3%。相关研究表明,矿粉的表面结构比水泥更光滑,能减小新拌浆体的屈服应力^[13]。对掺絮凝剂的灌浆料来说,其本身的黏度和屈服应力都非常大,因此减小屈服应力对于抗分散灌浆料流动性的改善至关重要。

掺有偏高岭土的水下不分散灌浆料的流动度和扩展均是先有所提升,之后基本保持不变,在掺入 10% 偏高岭土时,灌浆料的扩展度和流动度分别达到 138、190 mm,较空白组分别上升 16.9%、41.7%;但随着偏高岭土掺量的继续增加,灌浆料的扩展度和流动度变化不大,当掺量达到 40% 时,扩展度和流动度分别为 124、177 mm,较掺量为 10% 时,扩展度和流动度均略有下降。偏高岭土会提升砂浆和混凝土的稠度和需水量,需要更多的减水剂来保持浆料的流动性^[14],但本试验中偏高岭土的掺入能显著提高水下抗分散砂浆的流动性。

硅灰掺入水下不分散灌浆料时,浆体的流动度呈先上升后下降趋势,当硅灰的掺量小于 10% 时,对流动度的提升有一定的作用,掺量为 10% 时扩展度和流动度分别达到 143、174 mm,较空白组提升了 20.2%、28.9%。但随着掺量增加,浆体将迅速丧失流动性,掺量为 20% 时,灌浆料的扩展度和流动度分别达到 127、103 mm,较空白组下降了 6.2%、13.4%。这主要是由于硅灰的致密性和火山灰性使其具有高度反应性,增加了颗粒间的摩擦^[15],导致加入过多的硅灰对流动性不利。

3 全因子实验

3.1 全因子实验设计与实验结果

本节拟设计三因子二水平的全因子实验。对于水下超薄环形护壁材料来说,良好的抗分散性和流动性是最为重要的指标,而对强度的要求相对较低,因此进行全因子实验的主要目的在于研究复掺掺合料对材料各性能的影响,并选出流动性和抗分散较好的配比。综合考虑单掺实验的结果,设定了 3 个因子:因子 A 为粉煤灰(fly ash, FA)掺量、因子 B 为矿粉(granulated blast furnace slag, BS)掺量、因子 C 为偏高岭土(metakaolin, MK)掺量,低水平掺量为 5%,高水平掺量为 15%,使用 Minitab 软件进行全因子实验设计,基准砂浆的配合比见表 7 所列,实验设计及其结果见表 8、表 9 所列。

表 7 基准砂浆配合比 单位:g

材料名称	胶凝材料	水	砂子	聚羧酸减水剂	HPMC-15W	消泡剂
质量	700	350	1 400	7	3.15	3.5

表 8 全因子实验计划表

标准序	运行序	中心点	A/%	B/%	C/%
1	10	1	5	5	5
2	1	1	15	5	5
3	9	1	5	15	5
4	2	1	15	15	5
5	7	1	5	5	15
6	4	1	15	5	15
7	5	1	5	15	15
8	6	1	15	15	15
9	8	0	10	10	10
10	3	0	10	10	10
11	11	0	10	10	10

表 9 全因子实验测试结果

标准序	运行序	pH	浊度/NTU	扩展度/mm
1	10	11.10	162.1	147
2	1	10.52	67.7	140
3	9	10.70	152.1	153
4	2	10.85	112.4	145
5	7	10.82	104.5	151
6	4	10.83	77.6	142
7	5	10.63	109.6	164
8	6	10.25	109.0	157
9	8	10.90	117.0	151
10	3	10.50	122.0	147
11	11	10.70	120.0	150

对于水下超薄环形护壁材料来说,良好的抗分散性和流动性是最为重要的指标,而对强度的要求相对较低,因此进行全因子实验的主要目的

在于研究复掺掺合料对材料各性能的影响,并选出流动性和抗分散较好的配比。

3.2 效应分析

为更好地评价砂浆的抗分散性,在分析过程中以灵敏度更好的浑浊度作为主要评价指标,由于掺合料的加入对 pH 值的影响较小,pH 值指标仅作为参考。针对浑浊度指标建立模型,得到帕累托效应图如图 5 所示。

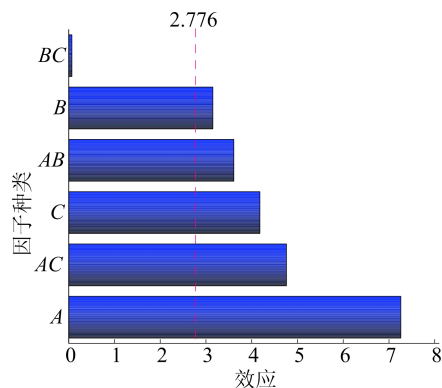


图 5 浊度标准化效应的帕累托图

从图 5 可以看出,在显著水平 $\alpha=0.05$ 的情况下,A、B、C、AB 和 AC 是显著因子。

从方差分析中的主效应(线性项)及因子交互效应项的 P 值分别为 0.001 和 0.003,可以判断简化后的模型总体上是有效的。在简化后的模型中的 R^2 为 96.71%, R^2 调整值为 93.41%,二者较为接近,最后进行残差诊断,主要目的是基于残差的状况诊断模型是否合适,正态性检验的 P 值为 0.074,可认为残差是正态的。

基于上述方差分析, R^2 、 R^2 调整值及残差诊断可以选定最终模型,M 表示浊度,原始数据的回归方程为:

$$M = 253.8 - 13.42A - 2.27B - 7.67C + 0.405AB + 0.533AC \quad (1)$$

对于流动性,考虑到水下材料的流动性更侧重材料的自密实性能,而非其在振动状态下的流动性,故选取扩展度为流动性效应分析的响应指标。针对扩展度指标建立模型,得到帕累托效应图如图 6 所示。从图 6 可以看出,在显著水平 $\alpha=0.05$ 的情况下,A、B、C、AB 和 BC 是显著因子。

从方差分析中的主效应(线性项)及而因子交互效应项的 P 值分别为 0.001 和 0.003,可以判断简化后的模型总体上是有效的。方差分析中主效应(线性项)及而因子交互效应项的 P 值分别为 0 和 0.004,可判定简化后的模型有效。简化

后模型的 R^2 为 97.69%, R^2 调整值为 96.15%, 二者接近, 最后进行残差诊断, 主要目的是基于残差的情况诊断模型是否合适, 正态性检验的 P 值为 0.025, 可认为残差是正态的。

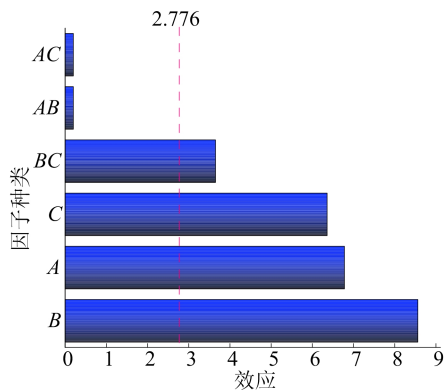


图 6 扩展度标准化效应的帕累托图

基于上述方差分析, R^2 、 R^2 调整值及残差诊断可以选定最终模型, N 表示扩展度, 原始数据的回归方程为:

$$N = 148.98 - 0.775A + 0.125B - 0.125C + 0.085BC \quad (2)$$

3.3 基于拟合模型的双响应目标优化

对于所研究的护壁材料, 抗分散性和流动性都是最为关键的性能指标, 此处以上述 2 个基本性能为响应目标。基于简化后的拟合模型, 采用 Minitab 的响应优化器, 在 Minitab 操作界面打开响应优化器, 打开设置响应设置界面, 选择浊度为望小特性, 并选择扩展度为望大特性。Minitab 输出的相应的优化结果显示, 在 A 取 5%、 B 取 15%、 C 取 15% 时, 对应的理论最优值为扩展度为 164.23 mm, 浊度为 107.95 NTU。依据实验结果可知, 该配比下浆体的扩展度为 164 mm, 浊度为 109.60 NTU, 与预测值相差不大, 也进一步验证了模型的准确性。

4 结 论

本文通过单掺与复掺不同种类的矿物掺合料对其性能进行研究, 得出以下主要结论:

1) 掺合料的加入对灌浆料的抗分散性产生不同程度的不利影响。当掺量超过 30% 时, 不利影响会降低; 当掺量小于 30% 时, 除矿粉外, 掺合料的掺量越大, 抗分散性越差。矿粉的掺量较小时, 对抗分散性能较为不利。

2) 粉煤灰可以显著改善流动性, 但当粉煤灰

掺量大于 30% 时, 反而导致流动度下降。矿粉和偏高岭土也可提高水下抗分散砂浆流动性, 矿粉掺量越大, 流动性越好。硅灰的掺量小于 10% 时可改善流动性掺量。

3) 根据全因子实验的结果, 对不同性能的显著因子不同对浊度来说, 分别是 A 、 B 、 C 、 AB 和 AC 。对流动性来说, 显著的影响因子包括 A 、 B 、 C 和 BC , 并得到了相关公式。

4) 优化后的配合比为 5% 粉煤灰, 15% 矿粉, 15% 偏高岭土。其相关性能指标扩展度可达到 164 mm, 浊度为 109.60 NTU。

[参 考 文 献]

- [1] 冯忠居. 大直径钻埋预应力混凝土空心桩承载性能的研究[D]. 西安: 长安大学, 2003.
- [2] 张艺清, 董芸. 粉煤灰和硅粉对水下自密实混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2021(10): 133-137.
- [3] 张鸣, 周思通, 王付鸣, 等. 水下不分散混凝土主要参数对性能的影响研究[J]. 混凝土, 2017(8): 140-144, 155.
- [4] 刘明乐, 杜保立, 何德灵, 等. 不同絮凝剂对水下不分散混凝土的影响[J]. 广东建材, 2017, 33(4): 48-50.
- [5] 董芸, 张艺清. 渠道衬砌板水下不分散混凝土的配合比设计与性能研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(6): 147-156.
- [6] 陈卫涛. 深水区水下不分散混凝土抗分散剂的配制研究[J]. 国防交通工程与技术, 2020, 18(4): 43-46.
- [7] 牛季收, 朱凯. 粉煤灰对水下不分散混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2008, 27(4): 875-880, 887.
- [8] 吴婷婷. 矿物掺合料对水下不分散混凝土性能的影响[J]. 福建建材, 2023(2): 26-28.
- [9] 高礼雄, 崔皓. 铝酸盐水泥基砂浆水下不分散性研究[J]. 混凝土, 2020(11): 105-107, 111.
- [10] 仲伟秋, 张志伟. 水下不分散混凝土的性能及其影响因素[J]. 中国水运(下半月), 2009, 9(7): 263-264.
- [11] 周伟, 林鲜, 张长民, 等. 新型水下不分散混凝土的性能研究[J]. 大坝与安全, 2005(6): 39-43.
- [12] 黄维蓉, 郭桂香. 粉煤灰掺量对 C30 自密实混凝土的影响[J]. 混凝土, 2015(4): 119-122.
- [13] 王坤云, 胡迪勇, 杨竹. 矿物掺合料对自密实混凝土工作性能影响研究综述[J]. 人民珠江, 2021, 42(8): 46-54.
- [14] 杨凤玲, 嵇银行, 李玉寿. 偏高岭土对混凝土性能影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2011(5): 4-8.
- [15] BENAICHA M, ROGUIEZ X, JALBAUD O, et al. Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self compacting concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84: 103-110.

(责任编辑 吴 亮)