

# 矿物掺合料复掺对套筒灌浆料性能的影响\*

覃森<sup>1</sup>, 沙吾列提·拜开依<sup>1,2†</sup>, 汪锋<sup>1</sup>, 李晓敏<sup>1</sup>, 吕胜辉<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆大学 新疆建筑结构与抗震重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 为满足套筒灌浆料基本性能要求, 固定水胶比为0.24, 胶砂比为1:1, 采用单因素试验, 通过改变减水剂与消泡剂掺量, 确定了基准配合比, 并研究了粉煤灰、硅灰、矿粉两两复掺对灌浆料初始流动度、30 min流动度和各龄期抗压强度的影响规律。结果表明: 粉煤灰与矿粉组合对抗压强度影响最小, 对灌浆料流动性最有利; 硅灰与矿粉组合对灌浆料后期抗压强度影响最大, 但硅灰掺量过大会造成流动性下降。当硅灰掺量为7.5%、矿粉掺量为7.5%时, 灌浆料流动性良好, 1 d强度为52.4 MPa, 3 d强度为76.9 MPa, 28 d强度为96.5 MPa。

**关键词:** 套筒灌浆料; 矿物掺合料; 流动性; 抗压强度

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2022.03.22.0001

**中图分类号:** TU528.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2023)01-0122-07

**引文格式:** 覃森, 沙吾列提·拜开依, 汪锋, 李晓敏, 吕胜辉. 矿物掺合料复掺对套筒灌浆料性能的影响[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2023, 40(1): 122-128.

**英文引文格式:** QIN Sen, SHAWULIETI Baikaiyi, WANG Feng, LI Xiaomin, LYU Shenghui. Effect of mineral admixture on properties of sleeve grouting material[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2023, 40(1): 122-128.

## Effect of Mineral Admixture on Properties of Sleeve Grouting Material

QIN Sen<sup>1</sup>, SHAWULIETI Baikaiyi<sup>1,2</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, LI Xiaomin<sup>1</sup>, LYU Shenghui<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. Xinjiang Key Lab of Building Structure and Earthquake Resistance, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

**Abstract:** In order to meet the basic performance requirements of sleeve grouting material, the fixed water binder ratio is 0.24 and the binder sand ratio is 1:1. The benchmark mix proportion is determined by changing the content of water reducer and defoamer. The effects of fly ash, silica fume and mineral powder on the initial fluidity, 30 min fluidity and compressive strength of grouting material at each age are studied. The results show that the combination of fly ash and mineral powder has the least influence on the compressive strength and is the most beneficial to the fluidity of grouting material; The combination of silica fume and mineral powder has the greatest impact on the later compressive strength of grouting material, but the fluidity will decrease when the silica fume content is too large. When the silica fume content is 7.5% and the mineral powder content is 7.5%, the fluidity of the grouting material is good, with the strength of 52.4 MPa in one day, 76.9 MPa in three days and 96.5 MPa in twenty-eight days.

**Key words:** sleeve grouting material; mineral admixture; fluidity; compressive strength

## 0 引言

随着我国经济的快速发展, 产业结构优化转型, 为满足“节能、节地、节水、节材、保护环境”的“四节一环保”要求, 预制装配式混凝土建筑又开始焕发新的生机<sup>[1]</sup>。装配式混凝土建筑是指预制构件在工厂内生产完成, 经过科学养护然后运输到现场, 通过类似“搭积木”的组装方式完成装配的建筑。预制构件

\* 收稿日期: 2022-03-22

基金项目: 国家自然科学基金“新疆沙漠砂混凝土构件力学性能的试验研究”(51668059)。

作者简介: 覃森(1996-), 男, 硕士生, 从事结构工程研究, E-mail: 838481230@qq.com.

† 通讯作者: 沙吾列提·拜开依(1968-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事混凝土结构与砌体结构的研究, E-mail: jgxyswt@xju.edu.cn.

之间的节点连接是装配式混凝土结构理论上的薄弱环节,是影响装配式建筑质量的重中之重.节点连接常采用钢筋套筒灌浆连接,灌浆料通过套筒进浆口灌入套筒内与钢筋粘结在一起.而套筒灌浆料的性能优劣影响拼接缝质量和传力性能,对确保装配式建筑结构的安全性起着至关重要的作用<sup>[2]</sup>.灌浆料技术一直被视为核心专利技术,并且性能要求非常高,高流动性使得灌浆料充满在套筒内,高强度提高结构的稳定性.

目前市场上灌浆料种类繁多,但质量良莠不齐,主要存在流动度损失大、早期抗压强度低等问题,这些因素制约着装配式建筑的发展.本文从满足灌浆料力学性能要求出发,选用沙漠砂替代灌浆料中部分细骨料进行优化,使灌浆料更密实,同时还能很好改善灌浆料的工作性能,通过外加剂与矿物掺合料复掺等配制出符合《钢筋连接用套筒灌浆料》(JG/T 408—2019)<sup>[3]</sup>规定的性能要求.

## 1 试验原材料与方法

### 1.1 原材料

水泥:新疆某水泥厂生产的P.O52.5R普通硅酸盐水泥,物理力学性能见表1.

表1 普通硅酸盐水泥的物理力学性能

比表面积 /m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup>	标准稠度 用水量/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
		初始	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
424	28	158	214	5.9	≥7.0	30.4	≥52.5

石英砂:新疆华凌市场石英砂(10~120目);沙漠砂:新疆托克逊地区沙漠砂,颗粒粒径为0.075~0.125 mm.

聚羧酸减水剂:陕西秦奋建材生产的固体高性能聚羧酸系减水剂,其减水率大于37%,外观呈白色粉状,易溶于水.消泡剂:山东兴隆达生产的DX-03型有机硅消泡剂.

矿物掺合料:粉煤灰:新疆西部建设Ⅱ级粉煤灰,密度为2.33 g·cm<sup>-3</sup>,比表面积为427 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>;硅灰:新疆石河子市某公司生产的92级硅灰,密度为2.22 g·cm<sup>-3</sup>,比表面积为19 800 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>;矿粉:S105级矿粉,密度为2.98 g·cm<sup>-3</sup>,比表面积为652 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>;化学成分见表2.

表2 粉煤灰、硅灰、矿粉的化学成分/%

材料	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	损失
粉煤灰	53.97	31.15	4.16	4.01	1.01	2.53
硅灰	92.20	0.80	1.00	0.80	1.20	3.00
矿粉	34.50	17.70	1.03	34.00	1.01	3.20

### 1.2 试验方案设计

通过前期试验<sup>[4]</sup>,确定水胶比为0.24,胶砂比为1:1,灌浆料骨料由四种粒径(即10~20、20~40、40~80、80~120目)的石英砂和沙漠砂构成,根据Dinger-Funk优化,当 $n=0.37$ 时,骨料堆积体系形成最紧密堆积,级配更加合理,四种粒径的石英砂和沙漠砂的比例为(4.4:2.7:2.5:1:1).采用单因素试验改变减水剂和消泡剂掺量,研究不同掺量下外加剂对灌浆料性能的影响,确定灌浆料基本配合比.由于矿物掺合料早期不参与水泥水化反应,掺量过大时则会影响灌浆料的早期抗压强度<sup>[5-6]</sup>,因此固定矿物掺合料总量为15%.通过粉煤灰、硅灰、矿粉两两复掺进一步优化,以灌浆料的流动性和抗压强度为评价指标,探究矿物掺合料在不同掺量下对灌浆料性能的影响规律.

### 1.3 灌浆料性能测试

主要测试套筒灌浆料的流动度、抗压强度,抗压试验采用40 mm×40 mm×160 mm的棱柱体测量试件强度,试件养护采用标准养护,环境温度为(20±2)℃,湿度为95%,养护至1 d、3 d、28 d后进行抗折强度、抗压强度试验.流动性试验方法严格按照《钢筋连接用套筒灌浆料》(JG/T 408—2019)<sup>[3]</sup>中附录A进行.

## 2 基本配合比试验

### 2.1 聚羧酸减水剂掺量的确定

试验固定套筒灌浆料水胶比为0.24,胶砂比为1:1,消泡剂掺量为0.1%,在原材料基础上掺入0.7%~1.5%的聚羧酸系高效减水剂进行基准配合比设计.试验结果见表3,减水剂对灌浆料流动性、抗压强度的影响见图1.

表 3 减水剂掺量对流动性和抗压强度的影响

减水剂 掺量/%	初始流动 度/mm	30 min流动 度/mm	抗压强度/MPa		
			1 d	3 d	28 d
0.7	310	305	54.2	74.3	83.3
0.9	330	310	50.4	73.3	83.8
1.1	340	316	49.3	73.0	84.2
1.3	345	320	48.8	71.4	83.3
1.5	360	320	48.2	70.4	84.4
标准要求	≥ 300	≥ 260	≥ 35	≥ 60	≥ 85

由图1可知,掺入聚羧酸减水剂可以使灌浆料的流动度大大提高,而且灌浆料的保坍性能也有提升.随着减水剂掺量的增加,灌浆料的初始流动度和30 min流动度呈现逐渐增加的趋势.由于水和水泥发生化学反应,此时水泥分子之间的引力使水泥浆成为絮状结构,从而包裹住大量的水,水泥颗粒之间的摩擦阻力大、流动性小.加入减水剂后,水泥分子间的表面带上电荷,通过吸附、分散、润滑等表面活性作用,使得浆体中的水泥颗粒较为分散<sup>[7-8]</sup>,同时释放出大量的自由水,降低了水泥浆体颗粒之间的摩擦力,从而使得流动性大幅增加,并且有利于灌浆料在较长时间内保持流动性.

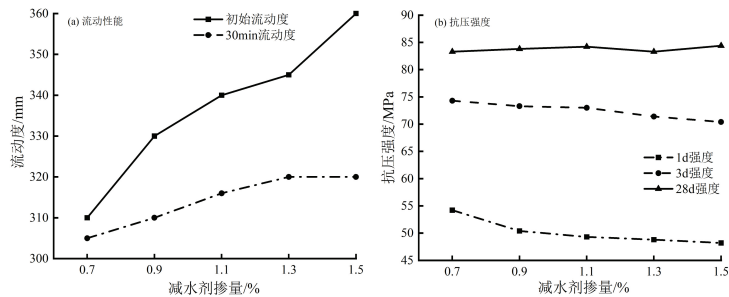


图 1 减水剂掺量对流动性和抗压强度的影响

减水剂掺量对灌浆料的抗压强度有较大影响,随着聚羧酸减水剂掺量的增加,灌浆料的早期抗压强度呈下降趋势.掺量从0.7%增加到1.1%时,灌浆料强度后期逐渐增大.由于减水剂增加了水泥的水化反应面积,使得材料的水化反应更加充分.而当减水剂的掺量超过1.1%时,灌浆料的抗压强度反而下降.一是因为聚羧酸的引气效应,且发气速率快,气泡不均匀,加入减水剂进行搅拌时会夹带空气,浆体硬化成型后其内部形成许多孔隙,内部孔隙的增多使得灌浆料的强度降低;二是因为聚羧酸减水剂延缓三维网状结构的形成<sup>[9]</sup>,过量的减水剂分散性会降低,使得减水剂发生团聚而降低减水效果,导致强度降低.

当减水剂掺量为1.5%时,灌浆料出现泌水、浆体与石英砂分层现象.综合聚羧酸减水剂的掺量变化对灌浆料流动性和抗压强度的影响规律,确定聚羧酸减水剂的最佳掺量为胶凝材料质量的1.1%.

## 2.2 消泡剂掺量的确定

为降低减水剂的引气效应对灌浆料工作性能和力学性能的影响,利用消泡剂降低含气量从而获得较高结构性能<sup>[10-11]</sup>.试验固定水胶比为0.24,胶砂比为1:1,减水剂掺量为1.1%,选用消泡剂掺量为0.05%~0.30%进行灌浆料基准配合比设计.试验结果见表4,消泡剂对灌浆料流动性、抗压强度的影响见图2.

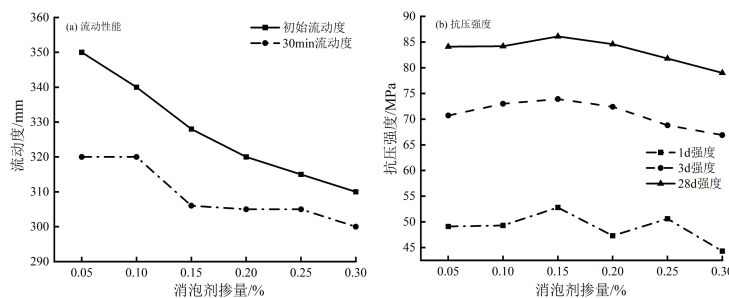


图 2 消泡剂掺量对流动性和抗压强度的影响

由图2可知,当消泡剂掺量从0.05%增加到0.30%时,灌浆料的初始流动度和30 min流动度保留值随着消泡剂掺量的增加而不断减小,消泡剂掺量超过0.10%时,灌浆料的流动度下降明显.由于消泡剂的加入降低了灌浆料中的含气量,过量的消泡剂在消除尺寸较大的劣质气泡的同时也降低了均匀分布的微小气泡含量,而小直径气泡对灌浆料的流动性影响较大,剩余气泡量小,胶凝材料颗粒间空隙无法填充,严重制约了聚羧酸减水剂隔离滚珠效应的发挥<sup>[12]</sup>,从而导致流动度下降.

表4 消泡剂掺量对流动性和抗压强度的影响

消泡剂 掺量/%	初始流动 度/mm	30 min流动 度/mm	抗压强度/MPa		
			1 d	3 d	28 d
0.05	350	320	49.1	70.7	84.1
0.10	340	320	49.3	73.0	84.2
0.15	328	306	52.8	73.9	86.1
0.20	320	305	47.3	72.4	84.6
0.25	315	305	50.6	68.8	81.8
0.30	310	300	44.3	66.9	79.0
标准要求	≥ 300	≥ 260	≥ 35	≥ 60	≥ 85

当消泡剂掺量从0.05%增加到0.30%时,灌浆料各龄期的抗压强度呈先增加后减小的趋势,当消泡剂掺量为0.15%时,灌浆料强度达到最大值.原因为消泡剂有效消除了二元复配体系内部分劣质气泡,对孔径分布也具有优化作用.在“引气-消泡”的共同作用下,显著降低了体系的含气量,明显改善了孔的结构,使灌浆料内部孔隙率显著降低,材料变得更加致密,因此提高了灌浆料的抗压强度<sup>[13]</sup>.但灌浆料强度并未随着消泡剂掺量的增加而提高,灌浆料在成型过程中表面泛油光,对灌浆料的抗压强度造成不利的影晌.

综合有机硅消泡剂的掺量变化对灌浆料流动性和抗压强度的影响规律,确定有机硅消泡剂的最佳掺量为胶凝材料质量的0.10%.

### 3 矿物掺合料复掺对灌浆料的影响

矿物掺合料在灌浆料中可以形成更细颗粒的填充作用,使得复合体系堆积密实度进一步提高.活性矿物掺合料按一定比例等量替代部分水泥成为灌浆材料胶凝材料中的一部分,不仅可以节省水泥、降低原材料的成本,而且可以实现工业废弃材料再利用,有利于环境保护,符合绿色可持续发展的理念.试验所使用的矿物掺合料包括粉煤灰、硅灰、矿粉,设置基本配合比水胶比为0.24、胶砂比为1:1、聚羧酸减水剂掺量为1.1%、有机硅消泡剂掺量为0.1%,探究粉煤灰、硅灰、矿粉两两复掺对灌浆料性能的影响.

#### 3.1 粉煤灰-硅灰复掺研究

在水泥-粉煤灰-硅灰三元复合体系中,由于三者粒径均处于不同的区间范围,因此更加优化了胶凝材料的颗粒级配,提高了堆积密实度,有利于胶凝材料的填充.粉煤灰-硅灰复掺试验结果见表5,对灌浆料流动性、抗压强度的影响见图3.

表5 粉煤灰-硅灰复掺对流动性和抗压强度的影响

粉煤灰 掺量/%	硅灰 掺量/%	初始流动 度/mm	30 min流动 度/mm	抗压强度/MPa		
				1 d	3 d	28 d
0	15	285	278	45.5	64.7	71.8
2.5	12.5	308	307	45.0	55.5	74.8
5	10	315	310	47.8	56.3	82.1
7.5	7.5	321	312	53.9	64.1	84.6
10	5	332	315	54.9	66.1	85.9
12.5	2.5	335	320	53.1	66.2	83.0
15	0	340	322	37.5	64.1	82.0
标准要求		≥ 300	≥ 260	≥ 35	≥ 60	≥ 85

由图3可知,粉煤灰-硅灰复掺试验组随着硅灰占比的不断增大,灌浆料初始流动度和30 min流动度不断的降低.由于硅灰需水量远大于粉煤灰与水泥,且常以成块的形式存在,使新拌浆体毛细孔堵塞,阻断了部分渗透路径,导致灌浆料的流动性下降<sup>[14]</sup>.而随着粉煤灰所占比例的增加,流动性呈增大趋势.粉煤灰中球状玻璃珠颗粒在浆体中滚动减小了集料之间的界面摩擦,释放出水泥颗粒之间的自由水,所以起到增大流动性的作用.

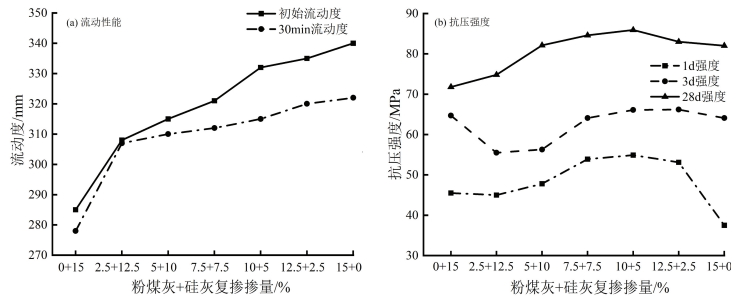


图3 粉煤灰-硅灰复掺对流动性和抗压强度的影响

随着硅灰所占比例的增加,试件各龄期的抗压强度变化规律为先增大后减小,当硅灰掺量超过10%后,灌浆料各龄期抗压强度下降明显.由于硅灰对水的吸附作用,使得水泥的水化作用被抑制,导致强度降低.当硅灰掺量为5%、粉煤灰掺量为10%时,灌浆料的抗压强度达到最大值.在灌浆料中掺入粉煤灰与硅灰后,胶凝体系活性提高,二者优势互补,有效发挥两者的火山灰效应、紧密堆积效应和微集料效应,两者相互补充水泥颗粒之间的空隙,微集料效应复合叠加,使硬化后的浆体内部更加致密,结构内部孔隙尺寸减小,同时降低了孔的数量<sup>[15]</sup>,提升了灌浆料后期抗压强度.

硅灰占比过大会导致灌浆料的流动性和抗压强度下降明显.综合灌浆料流动性和抗压强度,硅灰的最佳掺量为5%、粉煤灰掺量为10%,灌浆料28 d强度达到85.9 MPa.

### 3.2 粉煤灰-矿粉复掺研究

在水泥-粉煤灰-矿粉三元复合体系中,其形态效应得以叠加复合,且复合超细粉的填充效应可减小胶凝体系的孔隙率.粉煤灰-矿粉复掺试验结果见表6,对灌浆料流动性、抗压强度的影响见图4.

表6 粉煤灰-矿粉复掺对流动性和抗压强度的影响

粉煤灰掺量/%	矿粉掺量/%	初始流动度/mm	30 min流动度/mm	抗压强度/MPa		
				1 d	3 d	28 d
0	15	337	325	52.0	69.8	86.6
2.5	12.5	345	322	49.5	71.4	83.8
5	10	347	324	48.9	67.4	82.3
7.5	7.5	353	325	43.9	67.9	83.8
10	5	350	323	42.2	64.6	82.4
12.5	2.5	344	322	41.9	63.8	81.5
15	0	340	322	37.5	64.1	82.0
标准要求		≥ 300	≥ 260	≥ 35	≥ 60	≥ 85

由图4可知,当矿粉所占比例大于粉煤灰时,灌浆料流动度开始降低.矿粉比表面积较大,具有增粘性,增大了胶砂的粘稠度,造成灌浆料流动度降低.当矿粉掺量较少时,粉煤灰和矿粉复合后的颗粒级配得到优化,抵消了“粘稠效应”对灌浆料流动度的影响;其次,粉煤灰与矿粉表面光滑,密度比水泥小,颗粒尺寸较细,水分在其表面吸附作用力小,将填充于水泥颗粒之间的水置换出来,增加了颗粒之间的间隔水层,起到了分散剂的作用,对水泥水化过程中形成的絮状结构有“解絮作用”,在胶凝总量不变的情况下,增加了浆体的含浆量,提高了其流动性.

随着粉煤灰所占比例的不断增大,灌浆料的早期抗压强度呈下降趋势,说明灌浆料早期的水化是由水泥提供,粉煤灰活性远低于矿粉,且水化较慢,导致早期抗压强度不断降低.随着矿粉比例的增加,混合料活性指数也在不断增加<sup>[16]</sup>,早期抗压强度呈上升趋势.由于矿粉的碱含量高于粉煤灰,矿粉水化使得体系内的碱浓度

增加,粉煤灰加速水化使其玻璃相被打破,反应体系碱浓度降低又加快了矿粉水化,产生叠加效应<sup>[17]</sup>,后期抗压强度呈先增大后减小的趋势.当粉煤灰掺量为7.5%、矿粉掺量为7.5%时,活性指数达到最大值,灌浆料抗压强度达到较大值.但双掺粉煤灰与矿粉的灌浆料28 d抗压强度绝大部分低于基准组,不满足规范要求.

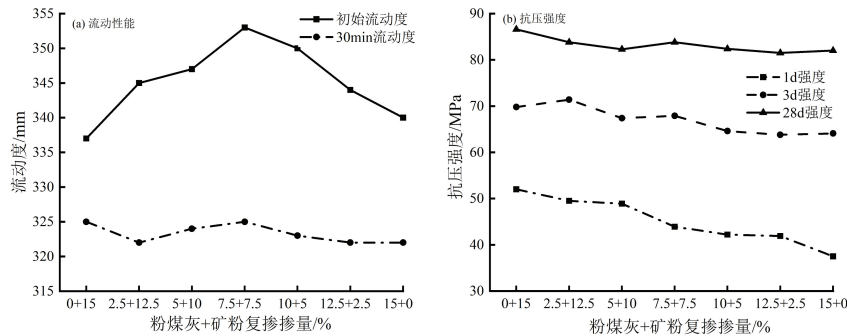


图4 粉煤灰-矿粉复掺对流动性和抗压强度的影响

粉煤灰-矿粉复掺对流动性影响较大,当粉煤灰掺量为7.5%、矿粉掺量为7.5%时,流动度达到最大值.但粉煤灰-矿粉对后期强度增长影响较小,灌浆料28 d强度达到83.8 MPa,比纯水泥组强度有所降低.

### 3.3 硅灰-矿粉复掺研究

在水泥-硅灰-矿粉三元复合体系中,硅灰与矿粉掺入到灌浆料中,使得体系的粒径分布更加合理,而且自由水流动的通道尺寸减少很多,细小的颗粒填充在水泥颗粒之间,堵塞了泌水的流动通道,所以二者复掺有减少离析、泌水的功效.硅灰-矿粉复掺试验结果见表7,硅灰-矿粉复掺对灌浆料流动性、抗压强度的影响见图5.

表7 硅灰-矿粉复掺对流动性和抗压强度的影响

硅灰 掺量/%	矿粉 掺量/%	初始流动 度/mm	30 min流动 度/mm	抗压强度/MPa		
				1 d	3 d	28 d
0	15	337	325	52.0	69.8	86.6
2.5	12.5	337	325	53.0	72.7	92.1
5	10	333	322	52.2	73.7	93.9
7.5	7.5	323	314	52.4	72.9	96.5
10	5	314	310	52.1	69.3	91.5
12.5	2.5	307	295	46.7	63.8	85.6
15	0	285	278	45.5	64.7	71.8
标准要求		≥ 300	≥ 260	≥ 35	≥ 60	≥ 85

由图5可知,当硅灰所占比例超过2.5%后,灌浆料的初始流动度和30 min流动度保留值开始不断降低.由于硅灰粒径极小,比表面积过大,混合料总表面积增加,导致内部自由水减少,流动性降低.当硅灰所占比例超过5%后,浆体开始变得粘稠,流动度明显下降,而矿粉颗粒呈不规则的形状且表面很光滑,具有一定的减水作用,细小的玻璃体嵌入水泥的水化产物中,颗粒间的水分释放出来<sup>[6]</sup>,因此矿粉在一定程度上可以减弱硅灰对流动性带来的负面影响.

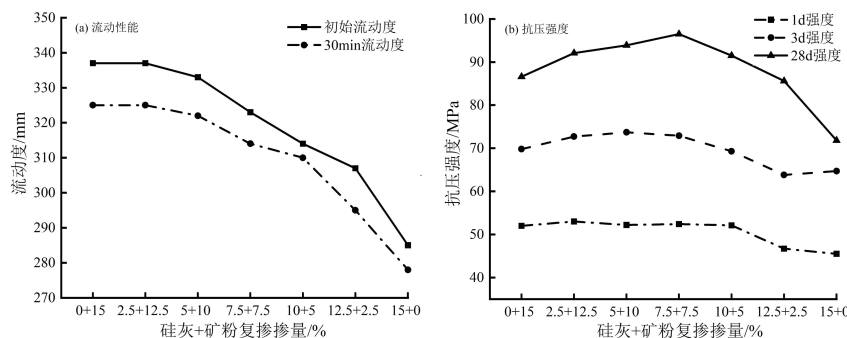


图5 硅灰-矿粉复掺对流动性和抗压强度的影响

随着硅灰所占比例不断增加,灌浆料抗压强度整体呈先增大后减小的趋势.适量的硅灰在灌浆料早期参与一定的反应,对于灌浆料早期抗压强度起增强的效果,但硅灰占比过大则对灌浆料的抗压强度呈负面影响.当硅灰掺量为7.5%、矿粉掺量为7.5%时,硅灰与矿粉均对水泥基提供了不同程度的活性效应,灌浆料抗压强度达到最大值,两者复掺各龄期抗压强度要比单掺硅灰或单掺矿粉高.但硅灰掺量超过7.5%后,对灌浆料整个体系抗压强度产生不利影响,且随着硅灰所占比例增加、矿粉所占比例降低,灌浆料各龄期的抗压强度出现明显的下降.

掺入硅灰与矿粉对后期抗压强度增长影响最大,两者能最大限度发挥火山灰效应.在满足流动性的前提下,当硅灰掺量为7.5%、矿粉掺量为7.5%时,灌浆料28 d抗压强度达到96.5 MPa,相较基准组强度大幅提高.

## 4 结论

确定水胶比为0.24,胶砂比为1:1,改变减水剂和消泡剂的掺量确定基准配合比.固定矿物掺合料复掺总量为15%,通过粉煤灰、硅灰、矿粉两两复掺,研究了矿物掺合料在不同掺量下对灌浆料工作性能和力学性能的影响,得出以下结论:

(1) 利用减水剂与消泡剂复配,降低了引气效应所带来的负面影响,从而显著改善了灌浆料的力学性能和工作性能.确定了灌浆料的基准配合比:水胶比为0.24,胶砂比为1:1,减水剂掺量为1.1%,消泡剂掺量为0.1%,灌浆料28 d抗压强度达到84.2 MPa.

(2) 硅灰掺量过多会导致灌浆料的流动性变差,粉煤灰-矿粉复掺对灌浆料流动性最有利,而粉煤灰-硅灰和硅灰-矿粉复掺在流动性方面没有太大差别.

(3) 粉煤灰-硅灰和粉煤灰-矿粉复掺在早期抗压强度较差,硅灰对于灌浆料的后期抗压强度增强贡献巨大,但掺量过大会影响后期强度的增长.对强度作用最明显的是硅灰与矿粉复掺,而不含硅灰的粉煤灰与矿粉组后期强度值最低;当硅灰掺量为7.5%、矿粉掺量为7.5%时,灌浆料抗压强度可达96.5 MPa,有效发挥了两者的火山灰效应、紧密堆积效应和微集料效应.

## 参考文献:

- [1] 郭章林,梁婷婷.浅谈装配式建筑的发展[J].价值工程,2017,36(2):233-235.
- [2] 汪秀石,杨智良,吴照学.装配式结构用高强套筒灌浆料性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2015,2:65-68.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢筋连接用套筒灌浆料(JG/T 408—2019)[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [4] 覃森,沙吾列提·拜开依,仲源.基于紧密堆积理论水泥基灌浆料配合比研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2022,44(2):70-76.
- [5] 马正先,周传贵,宋沛霖,等.复合矿物掺合料对超早强支座砂浆性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2018,6:1-6.
- [6] 李福海,胡志明,李瑞,等.粉煤灰及矿粉对水泥基灌浆料性能的影响[J].试验室研究与探索,2020,39(1):26-31+41.
- [7] 何财胜,张晖,徐明权,等.减水剂对水泥浆液性能的影响[J].建筑结构,2021,51(S1):1402-1406.
- [8] 温勇,邓雷,韩国旗.粉煤灰对水泥-聚羧酸减水剂体系早期Zeta电位和电导率的影响研究[J].新疆大学学报(自然科学版),2015,32(2):146-150+253.
- [9] LIU F, ZHENG M, YE Y. Formulation and properties of a newly developed powder geopolymer grouting material[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 120304.
- [10] 于超,马海峰,张亚梅.高性能预应力孔道灌浆料的试验研究[J].混凝土与水泥制品,2014,5:1-7.
- [11] JIN S, ZHANG J, HAN S. Fractal analysis of relation between strength and pore structure of hardened mortar[J]. Construction and Building Materials, 2017, 135: 1-7.
- [12] 郑君长,刘化图.消泡剂种类和掺量对混凝土性能的影响研究[J].公路,2018,63(11):265-268.
- [13] 张雄,刘恒,张恒,等.聚羧酸减水剂引气效应复配优化研究[J].建筑材料学报,2019,22(6):957-962.
- [14] 董军军.高性能套筒灌浆料的研制及性能研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.
- [15] 张德娟,徐虎,郭立伟,等.掺加掺合料高强高性能混凝土的材料性能试验研究[J].新疆大学学报(自然科学版),2006,23(2):236-239.
- [16] 尹韶宁,吴小媛,袁鹏,等.粉煤灰-矿粉复合超细粉制备及其在水泥中的应用试验研究[J].水泥,2020,6:1-4.
- [17] 王喆,王栋民.不同复合矿物掺合料对混凝土长期性能的影响差异[J].硅酸盐通报,2015,34(8):2392-2397.