

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.058

矿物掺合料对水泥砂浆性能的影响

谢群¹, 李海波², 王火明^{2,3}

(1. 江西省赣北公路勘察设计院, 江西 九江 332000; 2. 重庆交通大学 土木工程学院;
3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司)

摘要:为了提高水泥混凝土中矿物掺合料的利用效率,推动绿色混凝土的发展,该文研究了常见的几种矿物掺合料对水泥砂浆性能的影响规律。该文主要通过正交试验法,系统分析了不同掺量的硅灰、粉煤灰、S95级矿粉和微珠超细粉对水泥砂浆流动性、强度和收缩性能的影响。试验结果表明:粉煤灰、矿粉和微珠均能提高水泥砂浆的流动度,其中,微珠对水泥砂浆流动度的影响程度最大;粉煤灰、微珠和矿粉均能够降低水泥砂浆的早期收缩量,但硅灰不利于无粗骨料混凝土的早期收缩控制。粉煤灰不利于水泥砂浆强度的提高,硅灰和矿粉不利于水泥砂浆7d强度的提高,但在一定程度上,却能提高水泥砂浆28d强度,而适量的微珠则能够提高水泥砂浆7d和28d强度。

关键词:正交试验; 水泥砂浆; 强度; 流动度; 收缩

在基础建设领域,水泥混凝土是用量最大、用途最广泛、对生态环境影响最大的产品之一。早在1998年,吴中伟在回顾了水泥混凝土发展历程之后,便富有创造性地提出了绿色混凝土的概念,并认为绿色混凝土也属于高性能混凝土,进一步提出发展绿色高性能混凝土(GHPC)的倡议。吴中伟指出绿色高性能混凝土应该具有以下特征:①更多地节约熟料水泥,降低能耗和环境污染;②更多地掺加以工业废料为主的细掺料;③更大地发挥高性能混凝土的优势,减少水泥和混凝土的用量。因此,探究矿物掺合料对水泥砂浆的工作性能和力学性能的影响,有助于矿物掺合料的合理利用,推动绿色高性能混凝土的发展。目前,采用矿物掺合料配制的无粗骨料混凝土也相对较多,比如:活性粉末混凝土(RPC)、无宏观缺陷水泥基复合材料(MDF)、高延性水泥基复合材料(ECC)和地质聚合物混凝土。

矿物掺合料的种类很多,常见的矿物掺合料主要有粉煤灰、矿粉、硅灰、微珠等。在水泥砂浆或水泥混凝土中加入矿物掺合料有以下几个主要目的:①合理利用废弃材料,变废为宝,提高资源利用率,保护生态环境;②提高水硬性材料的工作性能,以满足特定的施工环境;③降低水泥水化热反应,提高水硬性材料的界面强度,从而提高水硬性材料的力学性能;④提

高水硬性材料的耐久性。

该文主要采用正交试验法研究不同掺量的S95级矿粉(PS)、粉煤灰(FA)、微珠超细粉(MB)、硅灰(SF)在复掺情况下对水泥砂浆流动性、强度以及收缩性能的影响,确定矿物掺合料最佳组合与掺量,有效提高矿物掺合料的利用率。

1 试验

1.1 原材料

(1) 水泥采用P. O. 52.5级水泥,3d实测抗压强度为25.6 MPa,28d实测抗压强度为58.6 MPa。

(2) 矿物掺合料。I级粉煤灰、S95级矿粉、微珠超细粉、超细硅灰。微珠是一种全球状、连续粒径分布、超细、实心、硅铝酸盐精细沉珠,国外也称为改性粉煤灰,其粒径分布于粉煤灰与硅灰之间。

(3) 减水剂。WR-4聚羧酸早强减水剂,减水率为25%以上。

(4) 石英砂、自来水。

矿物掺合料的化学组成及物理性质见表1。

1.2 试验方法

无粗骨料混凝土的流动度试验参照JC/T 985—2005《地面用水泥基自流平砂浆》的方法,试验仪器为

收稿日期:2020-11-12(修改稿)

基金项目:重庆市科委基金项目(编号:cstc2015shmszx30030)

作者简介:谢群,男,高级工程师。E-mail:42365485@qq.com

表 1 矿物掺合料的化学组成及物理性质

材料	化学组成/%								密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	损失率/ %
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	NaO	K ₂ O			
SF	89.23	0.33	0.35	0.24	1.65	1.03	0.22	0.76	2 260	21 054	2.8
FA	51.61	28.36	6.14	2.93	1.23	0.22	1.35	0.43	2 610	540	2.4
PS	32.51	14.83	2.56	33.43	10.61	0.25	0.57	0.63	2 920	560	0.4
MB	53.54	23.58	3.57	8.77	1.48	0.55	1.57	1.18	2 580	3 300	2.0

内径(30±0.1) mm、高(50±0.1) mm 的金属空心圆柱体和面积大于 300 mm×300 mm 的平板玻璃。无粗骨料混凝土的成型、养护、抗压和抗折强度试验参照 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》，采用 40 mm×40 mm×160 mm 的三联模成型试件。

无粗骨料混凝土的收缩试验参照 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》，成型标养 48 h 后，采用收缩仪和千分表测定无粗骨料混凝土的收缩值。

1.3 试验设计

试验设定的 4 因素分别为：因素 A(硅粉)、因素 B(粉煤灰)、因素 C(矿粉)、因素 D(微珠)，每个因素按照水泥质量比例(以外掺法掺入水泥用量的 3%、6%、9%)设定了 3 个水平。正交试验水平表见表 2。每组试验的砂子用量为 1 350 g，水泥用量为 528.5 g，矿物掺合料按照水泥质量的比例进行调整，水胶比采用 0.24，高效减水剂为胶凝材料的 1%。

表 2 正交试验表

试验编号	影响因素			
	A	B	C	D
1	1(3%)	1(3%)	1(3%)	1(3%)
2	1(3%)	2(6%)	2(6%)	2(6%)
3	1(3%)	3(9%)	3(9%)	3(9%)
4	2(6%)	1(3%)	2(6%)	3(9%)
5	2(6%)	2(6%)	3(9%)	1(3%)
6	2(6%)	3(9%)	1(3%)	2(6%)
7	3(9%)	1(3%)	3(9%)	2(6%)
8	3(9%)	2(6%)	1(3%)	3(9%)
9	3(9%)	3(9%)	2(6%)	1(3%)

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

无粗骨料混凝土流动度、抗压抗折强度及收缩值

的试验结果如表 3 所示。

表 3 正交试验结果

试验 编号	流动 度/mm	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		7 d 收缩量/ ($\times 10^{-4}$)
		7 d	28 d	7 d	28 d	
1	240	102.4	123.5	14.1	15.1	5.84
2	280	100.7	128.5	12.7	16.5	4.31
3	300	94.7	126.9	11.3	16.6	3.23
4	270	98.6	135.1	12.6	17.3	4.82
5	255	95.9	131.9	12.2	17.1	4.58
6	260	98.5	129.3	12.8	16.6	4.27
7	260	99.6	136.6	11.9	18.3	5.87
8	260	94.6	131.5	11.8	16.9	4.96
9	260	94.9	129.2	10.6	17.0	5.54

2.2 极差分析

对表 3 的正交试验结果进行处理后，得到了表 4 的水平均值与极差表。表 4 中：R 值大小反映了矿物掺合料对无粗骨料混凝土各项性能的影响程度。例如，将矿物掺合料按对流动度的影响程度大小排序依次为：微珠、粉煤灰、矿粉、硅灰，最佳组合为 D₃B₃C₃A₁。同理，可从表 4 中得到矿物掺合料对其他性能的影响程度排序以及最优组合方式。

2.2.1 流动度影响分析

由表 4 可知：在该文试验的 3 个水平掺量下，水泥砂浆流动度随矿物掺合料的掺量单调递增，并在微珠处于水平 3 掺量时取得最大值。

究其原因：① 粉煤灰、矿粉和微珠的颗粒形状几乎都为球状体，减少了颗粒之间的摩擦阻力，从而提高了水泥砂浆的流动性；② 单一的水泥颗粒，遇水之后，存在团聚现象。在水泥中加入矿物掺合料，能够降低水分子的表面能，从而提高水泥颗粒的分散效果。此外，相比于水泥颗粒的粒径，矿物掺合料的粒径相对较小，加入一定量的矿物掺合料，能够优化水泥的颗粒级配，从而提高水泥浆体的流动性。

表4 水平均值和极差

影响因素	流动度/mm				7 d 抗压强度/MPa				7 d 抗折强度/MPa			
	A(SF)	B(FA)	C(PS)	D(MB)	A(SF)	B(FA)	C(PS)	D(MB)	A(SF)	B(FA)	C(PS)	D(MB)
K1	273	257	253	252	99.3	100.2	98.5	97.7	12.7	12.9	12.9	12.3
K2	262	265	270	267	97.7	97.1	98.1	99.6	12.5	12.2	12.0	12.5
K3	260	273	272	277	96.4	96.0	96.7	96.0	11.4	11.6	11.8	11.9
R	13	17	18	25	2.9	4.2	1.8	3.6	1.3	1.3	1.1	0.6
最优水平	D ₃ B ₃ C ₃ A ₁				B ₁ D ₂ A ₁ C ₁				A ₁ B ₁ C ₁ D ₂			
影响因素	28 d 抗压强度/MPa				28 d 抗折强度/MPa				7 d 收缩应变/($\times 10^{-4}$)			
	A(SF)	B(FA)	C(PS)	D(MB)	A(SF)	B(FA)	C(PS)	D(MB)	A(SF)	B(FA)	C(PS)	D(MB)
K1	126.3	131.7	128.1	128.2	16.1	16.9	16.2	16.4	4.46	5.51	5.02	5.32
K2	132.1	130.6	130.9	131.5	17.0	16.8	16.9	17.1	4.56	4.62	4.89	4.82
K3	132.4	128.5	131.8	131.2	17.4	16.7	17.3	16.9	5.46	4.35	4.56	4.34
R	6.1	3.2	3.7	3.3	1.3	0.2	1.1	0.7	1	1.16	0.46	0.98
最优水平	A ₃ C ₃ D ₂ B ₁				A ₃ C ₃ D ₂ B ₁				B ₃ A ₁ D ₃ C ₃			

与此同时,一般认为比表面积越大,需水量也较大,从表1可以看出,相比于其他3种矿物掺合料,硅灰的比表面积高出了一个数量级,因此,随着硅灰掺量的增加,水泥浆体流动度下降。

2.2.2 强度影响分析

由表4可知:①混凝土的7 d抗压强度会随硅灰、粉煤灰、矿粉的掺量增大而单调递减。但微珠掺量增大时,混凝土7 d抗压强度先增大,后减小,说明适量的微珠能够提高无粗骨料混凝土的7 d抗压强度;②7 d抗折强度折线的变化趋势与7 d抗压强度基本一致,同样只有适量的微珠能够提高无粗骨料混凝土的7 d抗折强度;③适量硅灰、矿粉和微珠均能提高无粗骨料混凝土的28 d抗压强度。其中,28 d抗压强度随硅灰、矿粉掺量增大而单调递增,但后期增幅较小,随微珠掺量增大先增大后减小。但同时,粉煤灰掺量的不断增大,使得混凝土28 d抗压强度逐渐减小;④各28 d抗折强度折线的变化趋势与28 d抗压强度基本一致,主要差别在于变化幅度。

根据中心质效应假说,水泥砂浆中的细集料是第一层次的中心质,水泥净浆是第一层次的介质,在水泥净浆和细集料之间存在着第一层次的界面过渡层,未掺加矿物掺合料的水泥砂浆只存在第一个层次的强度叠加效应。矿物掺合料的粒径相对较小,能够填充水泥净浆中的微小空隙,可以构成以水泥颗粒为第二层次中心质、以矿物掺合料为第二层次介质的密实填充结构模型,掺加矿物掺合料的水泥砂浆存在两个层次

的强度叠加效应。因此,掺加矿物掺合料的力学强度相对较高。

硅灰、粉煤灰、矿粉和微珠化学组成成分中含有大量的SiO₂和Al₂O₃,在这些矿物掺合料中,SiO₂和Al₂O₃都具有一定的活性,可以和水泥水化反应的产物(氢氧化钙和高碱度的水化硅酸钙)发生二次反应,生成强度更高、稳定性更优的低碱度水化硅酸钙,从而改善水泥石的界面强度和水泥浆体的强度,提高水泥砂浆的整体强度。矿物掺合料的活性作用处于水泥砂浆的二次反应阶段,发挥矿物掺合料的活性作用需要一定的时间,因此,随着硅灰、粉煤灰和矿粉体积掺量的增加,水泥砂浆的7 d力学强度逐渐下降。

硅灰比表面积很大,二氧化硅含量较高,硅灰的活性作用在28 d的时间内能显现出来,因此,随着硅灰掺量的增加,水泥砂浆的28 d强度逐渐升高。

矿粉的比表面积虽然较小,却是一种非结晶细颗粒状玻璃态的粉末材料,且经历了水淬、干燥、粉磨的过程,化学性质极不稳定,其活性作用在28 d的时间内能显现出来,因此,随着矿粉掺量的增加,水泥砂浆的28 d强度逐渐升高。

粉煤灰是燃煤电厂收集的烟道灰,化学性质较为稳定,比表面积相对较小,其活性作用在28 d的时间内不能显现出来,因此,随着粉煤灰掺量的增加,水泥砂浆的28 d强度逐渐下降。

微珠的比表面积相对较大,粒径较细,颗粒中球体比例相对较大,能够抑制水泥砂浆的收缩性能,相比于

粉煤灰,其成分中的二氧化硅含量相对较高,因此,在合适的掺量条件下,能够提高水泥砂浆的 7、28 d 强度。

此外,由于硅灰中的二氧化硅含量最高,因此,硅灰对水泥砂浆强度的影响最为显著。

2.2.3 收缩性能影响分析

由表 4 可知:随着粉煤灰掺量、矿粉掺量和微珠掺量的增加,无粗骨料混凝土的早期收缩量逐渐降低,而随着硅灰掺量的增加,无粗骨料混凝土的 7 d 收缩量逐渐增大。

这主要是由于水泥砂浆在终凝后,未充分水化的水泥颗粒在渗水压力的作用下,在接触水分子之后,会继续发生水化反应,消耗水分子,从而引起水分子迁移,造成毛细孔负压的产生,引起混凝土的塑性收缩。相比于水泥粒径,粉煤灰、矿粉和微珠的粒径相对较小,其能够在水分子迁移过程中,阻碍水分子的迁移速度,降低毛细孔负压,降低水泥石的塑性收缩。因此,随着粉煤灰、矿粉和微珠掺量的增加,水泥砂浆的 7 d 收缩量逐渐降低。而粉煤灰的活性效应需要较长时间才能充分发挥出来,在水泥砂浆体积稳定后,粉煤灰的活性效应能够消耗水泥石中的自由水和弱结合水,从而转化为体积稍大、状态更加稳定的晶体结构,填充水分子毛细孔,降低水泥砂浆的干燥收缩。因此,粉煤灰对水泥砂浆收缩性能的影响较为显著。硅灰由于比表面积较大,需水量也较大,从松散的粉末状态到密实型的固体状态,引起的体积变化也相对较大,不利于水泥砂浆收缩的控制。因此,随着硅灰掺量的增加,水泥砂浆的 7 d 收缩量逐渐升高。

3 结论

该文主要采用四因素三水平的正交试验方法,通过流动度试验、抗压强度试验、抗折强度试验和收缩性试验,探究了 4 种矿物掺合料(硅灰、粉煤灰、矿粉和微珠)对水泥砂浆工作性能、力学强度和收缩性能的影响,得出以下结论:

(1) 粉煤灰、矿粉和微珠均能提高水泥砂浆的流

动度。其中,粉煤灰、矿粉最终提升效果近似,但综合以微珠的提升效果最为明显,而硅灰会减小砂浆流动度。

(2) 硅灰、矿粉会使无粗骨料混凝土的 7 d 抗压、抗折强度降低,但会增强其 28 d 的抗压、抗折强度;适量微珠可以提升无粗骨料混凝土的抗压、抗折强度,该文中最大值一般在试验水平 2 处取得,粉煤灰的掺入不利于无粗骨料混凝土的强度增长。

(3) 粉煤灰、微珠和矿粉均能够降低水泥砂浆的 7 d 收缩量,但硅灰不利于控制其 7 d 收缩量。

参考文献:

- [1] 潘俊明,孙晋超,阮波.矿物掺合料对蒸养水泥砂浆强度和干缩性能的影响[J].中外公路,2020(5).
- [2] 马俊.钢渣-低品质粉煤灰复合微粉对混凝土长期性能的影响[J].中外公路,2018(3).
- [3] P. Richard, M. Cheyrezy. Compisition of Reactive Powder Concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1 501-1 511.
- [4] LI V C. ECC—Tailored Composites through Micro Mechanical Modeling[A]. Bantian, Proceeding Fiber Reinforced Concrete:Present and the Future Conference[C]. Montreal: CSCE, 1998;64-97.
- [5] LI V C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展与应用[J].硅酸盐学报,2007(4).
- [6] 冯乃谦.高性能与超高性能混凝土技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [7] 冯乃谦,李浩.纳米微珠的特性与应用[J].混凝土与水泥制品,2010(5).
- [8] 陈益民,贺行洋,李永鑫,等.矿物掺合料研究进展及存在的问题[J].材料导报,2006(8).
- [9] 沈旦申,张荫济.粉煤灰效应的探讨[J].硅酸盐学报,1981(1).
- [10] 吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.
- [11] 邹桂莲,刘新海,周浩浩.水泥粉煤灰稳定再生集料的路用性能研究[J].中外公路,2018(3).
- [12] 马俊.钢渣-低品质粉煤灰复合微粉对混凝土长期性能的影响[J].中外公路,2018(3).