

文章编号:1673-9469(2024)04-0028-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.04.004

矿物掺合料对全机制砂灌浆料的影响研究

单俊鸿¹,胡恒诚^{1*},王荣荣²,李 春²,肖伟朋¹

(1. 河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2. 武汉德毅环保新材料有限公司,湖北 武汉 430200)

摘要: 试验采用普通硅酸盐水泥与快硬硫铝酸盐水泥的复合胶凝体系,选用石灰石机制砂作为细集料,制备全机制砂灌浆料。选用硅灰、粉煤灰与石粉作为矿物掺合料,研究矿物掺合料对全机制砂灌浆料流动度、抗压强度与竖向膨胀率的影响,并利用 SEM 电镜对全机制砂灌浆料进行微观机理分析。研究结果表明:矿物掺合料复掺有利于提高灌浆料的流动性能与力学性能,改善灌浆料的界面过渡区,通过正交试验优化机制砂灌浆料配方,得到的最优矿物掺合料掺量为硅灰 5%、粉煤灰 6%、矿粉 8%。

关键词: 机制砂;灌浆料;矿物掺合料;正交试验

中图分类号: TU525

文献标识码: A

Study on the Effect of Mineral Admixture on Full-mechanism Sand Grouting Material

SHAN Junhong¹, HU Hengcheng^{1*}, WANG Rongrong², LI Chun², XIAO Weipeng¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. Wuhan Deyi Environmental Protection New Material Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430200, China)

Abstract: The experiment utilized a composite cementitious system comprising ordinary Portland cement and fast-hardening sulfoaluminate cement, with crushed limestone serving as the fine aggregate. A full machine-made sand grout was prepared using this system. Silica fume, fly ash, and stone powder were employed as mineral admixtures to investigate their impact on the flowability, compressive strength, and vertical expansion rate of the full machine-made sand grout. Additionally, SEM electron microscopy was used to analyze the microscopic mechanisms of the full machine-made sand grout. Research findings indicate that the concurrent use of mineral admixtures is advantageous in enhancing both the flowability and mechanical properties of the grout while also improving the transition zone between the grout and aggregate. The optimal dosage of mineral admixtures obtained through orthogonal experimentation is 5% silica fume, 6% fly ash, and 8% slag.

Key words: machine-made sand; grouting material; mineral admixture; orthogonal test

水泥基灌浆料一般由胶凝材料、矿物掺合料、集料和功能性外加剂等原材料构成,经过合理配比,加水搅拌后具有高流态、高强度、微膨胀、不离析等优异性能,可以很好地应用于支座灌浆、钢筋套筒灌浆、二次灌浆与混凝土加固等工序中^[1-3]。近年来,由于国家对天然砂严格限挖限采,故采用机制砂取代天然砂来制备高性能灌浆料是必然趋

势,相比于天然砂,机制砂拥有级配可控、石粉含量适当等特点^[4-6],而且在干混砂浆领域也已被广泛应用^[7-9]。

矿物掺合料大多数都属于工业固废产物,等量取代部分水泥可以减少水泥用量,改善砂浆的工作性能与力学性能^[10-12];李天水^[13]研究发现,在水泥基灌浆料中掺入偏高岭土、增密微硅灰对

收稿日期:2022-08-16

基金项目:中央引导地方科技发展专项资金资助项目(YDZX20181400002774)

作者简介:单俊鸿(1964-),男,江苏镇江人,博士,教授,从事建筑材料方面的教学与研究工作。

* 通信作者:胡恒诚(1996-),男,广东茂名,硕士研究生,研究方向为新型土木工程材料。

流动度及强度较为不利,而掺入磨细矿粉能够有效提高灌浆料流动性能,掺入原态微硅灰则能明显提高灌浆料的力学性能;董军军^[14]通过研究硅灰、粉煤灰、矿粉单掺及两两复掺对套筒灌浆料流动性能与力学性能的影响发现,硅灰对初始流动度影响最大,而矿粉对 30 min 后流动度保留值最明显,其次硅灰能够保证灌浆料的前期强度,硅灰与矿粉复掺能有效提高灌浆料的后期强度。

在全机制砂灌浆料中掺入矿物掺合料来改善砂浆性能的研究相对较少^[15],故本文利用石灰石机制砂全部替代天然砂,选用硅灰、粉煤灰与矿粉作为矿物掺合料来制备高性能灌浆料,并进行微观机理分析。

1 试验原材料

1.1 胶凝材料

葛洲坝嘉鱼水泥有限公司生产的 P. O 42.5 水泥,细度(45 μm 筛余)0.9%;郑州建文特材料有限公司生产的 42.5 级快硬硫铝水泥,主要性能指标见表 1。

1.2 矿物掺合料

湖北丹江口市晶诺硅业有限公司生产的原态微硅灰;湖北青山热电厂粉煤灰制品厂生产的Ⅱ级粉煤灰;湖北鄂钢嘉华新型建材有限公司生产的 S95 级粒化高炉矿渣粉,其主要化学成分见表 2。

1.3 细集料

武汉地区的天然黄砂(HS)与武汉德毅环保新材料有限公司自产的石灰石机制砂(JZS),均满足 GB/T 14684—2022《建筑用砂》中 2 区级配要求,颗粒级配及主要性能指标见表 3。

1.4 外加剂

弗克 C1029 型聚羧酸减水剂;龙湖科技 EA 型塑性膨胀剂;AGITANR P803 型有机硅粉末消泡剂;DENKA 高性能膨胀剂(HP-CSA);山东西王葡萄糖酸钠缓凝剂。

2 试验方法及方案

2.1 试验配合比

机制砂水泥基灌浆料基准配合比为固定胶砂

表 1 水泥主要性能指标

Tab. 1 Main performance indexes of cement

水泥类型	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	抗折强度/MPa			抗压强度/MPa			凝结时间/min	
		1 d	3 d	28 d	1 d	3 d	28 d	初凝	终凝
P. O 42.5	365	—	5.9	7.8	—	31.3	50.9	195	270
R. SAC 42.5	435	6.3	7.1	7.4	34.3	42.4	47.8	25	45

表 2 矿物掺合料的主要化学成分 (单位:%)

Tab. 2 Main chemical composition of mineral admixtures (unit:%)

项目	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	烧矢量
粉煤灰	54.30	5.32	1.40	6.50	27.22	0.27	5.68
硅灰	95.63	0.13	0.15	0.02	0.07	0.49	3.84
矿粉	24.78	41.80	5.76	2.47	11.44	2.37	0.04

表 3 集料颗粒级配及性能指标

Tab. 3 Aggregate particle gradation and performance index

颗粒级配			性能指标		
筛网尺寸/mm	累计筛余/%		项目	检测结果	
	天然砂	机制砂		天然砂	机制砂
4.75	5	0	表观密度/(kg·m ⁻³)	2 620	2 670
2.36	22	8	松堆密度/(kg·m ⁻³)	1 503	1 602
1.18	37	30	空隙率/%	43	40
0.6	56	60	细度模数	2.82	2.64
0.3	82	78	亚甲蓝值	—	0.8
0.15	96	88	含泥量/%	0.6	—
筛底	100	100	石粉含量/%	—	6.3

比 1.0,硫铝酸盐水泥 8%、HP-CSA 膨胀剂 3.0%、聚羧酸减水剂 0.18%、葡钠 0.03%、消泡剂 0.03%、塑性膨胀剂 0.01%,水胶比为 0.26。

2.2 试验方法

(1)灌浆料流动度及强度检测:根据《水泥基灌浆材料应用技术规范》(GB/T 50448—2015)规定进行,测定其初始流动度、30 min 流动度及 1、3、28 d 的抗压强度。

(2)灌浆料竖向膨胀率检测:按《混凝土外加剂应用技术规范》(GB/T 50119—2013)附录 C 进行,测定 3、24 h 竖向膨胀率及其膨胀率差值。

2.3 试验方案

(1)探究机制砂全部替换天然黄砂后对灌浆料流动度及强度的影响。

(2)探究不同掺量下的矿粉、粉煤灰与硅灰对灌浆料流动度及强度的影响,各组分掺量试验安排见表 4;然后利用 $L_9(3^4)$ (三因素三水平)正交试验设计优化硅灰、粉煤灰与矿粉的配合比,经过调整后矿物掺合料掺量的正交因素水平表与试验方案表见表 5、表 6。

表 4 矿物掺合料试验安排

Tab. 4 Test arrangement of mineral admixtures							
类型	编号	掺量/%					
粉煤灰	FA	0	2	4	6	8	10
硅灰	SF	0	3	5	7	9	11
矿粉	K	0	4	6	8	10	12

表 5 正交因素水平表

Tab. 5 Orthogonal factor level table			
水平	因素		
	A 硅灰掺量/%	B 粉煤灰掺量/%	C 矿粉掺量/%
水平 1	3	4	8
水平 2	5	6	10
水平 3	7	8	12

表 6 正交试验安排

Tab. 6 Orthogonal test arrangement			
试验号	因素水平		
	A(硅灰)	B(粉煤灰)	C(矿粉)
CGM-1	1	1	1
CGM-2	1	2	2
CGM-3	1	3	3
CGM-4	2	1	3
CGM-5	2	2	1
CGM-6	2	3	2
CGM-7	3	1	2
CGM-8	3	2	3
CGM-9	3	3	1

3 试验结果及分析

3.1 集料对灌浆料流动度及强度的影响

集料对灌浆料流动度及抗压强度的影响如表 7 所示,优化颗粒级配的机制砂全部替代天然黄砂后,灌浆料的流动度与 30 min 经时损失均有所下降,但机制砂的整体强度较黄砂更高,主要是机制砂粒型与黄砂不同,黄砂多呈圆粒型,手感细腻,而机制砂呈棱角、不规则形状,手感粗糙,且机制砂石粉含量较多,需水量较大,容易限制灌浆料的流动性能,但优化颗粒级配后的机制砂辅以适当的石粉含量,能够减少集料的空隙率,增大集料间的咬合力,从而提供更高的强度。

表 7 集料对灌浆料流动度及强度的影响

Tab. 7 Effect of aggregate on fluidity and strength of grouting material					
编号	流动度/mm		抗压强度/MPa		
	初始	30 min	1 d	3 d	28 d
HS	328	305	37.2	52.5	74.6
JZS	320	295	41.5	55.6	77.8

3.2 矿物掺合料对全机制砂灌浆料流动度及强度的影响

3.2.1 矿物掺合料对全机制砂水泥基灌浆料流动性能的影响

矿物掺合料对灌浆料流动性能影响的试验结果如图 1 所示。图 1(a) 显示,硅灰掺量为 0、3%、5%、7%、9%、11% 的初始流动度与 30 min 流动度分别为 320 mm/295 mm、323 mm/302 mm、328 mm/310 mm、310 mm/285 mm、290 mm/260 mm、280 mm/240 mm,硅灰掺量为 5% 时初始流动度与 30 min 流动度最高,较未掺硅灰时分别增大了 2.4%、4.8%;当硅灰掺量达 11% 时,灌浆料的流动状态较差,初始流动度与 30 min 流动度较未掺时分别下降 14.3%、22.9%,这是因为硅灰较大的比表面积使得灌浆料需水量激增,而试验固定了用水量,所以灌浆料的流动性能受到抑制,呈十分粘稠状态,几乎无法流动。

由图 1(b)(c) 可知:粉煤灰与矿粉均能有效提高灌浆料的流动性能,减少 30 min 流动度的经时损失,粉煤灰掺量为 0、2%、4%、6%、8%、10% 的初始流动度与 30 min 流动度分别为 320 mm/295 mm、327 mm/305 mm、335 mm/317 mm、342 mm/330 mm、355 mm/345 mm、357 mm/350 mm,矿粉掺量为 0、

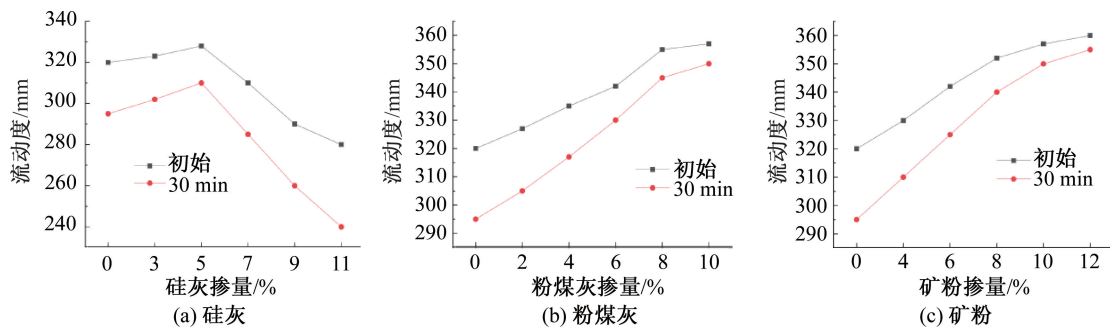


图1 矿物掺合料对灌浆料流动度的影响

Fig. 1 Influence of silica fume on fluidity of grouting material

4%、6%、8%、10%、12%的初始流动度与30 min流动度分别为320 mm/295 mm、330 mm/310 mm、342 mm/325 mm、352 mm/340 mm、357 mm/350 mm、360 mm/355 mm;其中,粉煤灰掺量为10%时灌浆料的初始流动度与30 min流动度最大,较未掺粉煤灰时分别提高10.4%、15.7%,而矿粉掺量为12%时初始流动度与30 min流动度最优,较未掺矿粉时分别提高11.1%、16.9%,但在进行单掺粉煤灰、矿粉的试验中发现,当粉煤灰掺量>8%、矿粉掺量>10%时灌浆料流动性能发展均逐渐放缓,且掺量为10%的粉煤灰与掺量为12%的矿粉其灌浆料表面呈轻微浮浆,试块成型后截面出现轻微分层现象,说明粉煤灰与矿粉的掺量均不宜过高。

综合矿物掺合料对全机制砂灌浆料流动性能的影响考虑,硅灰适宜掺量为3%~5%,粉煤灰适宜掺量为6%~8%、矿粉适宜掺量为8%~10%。

3.2.2 矿物掺合料对全机制砂水泥基灌浆料力学性能的影响

从图2(a)中可看出,机制砂灌浆料的抗压强度随着硅灰掺量的提高呈先增大后降低趋势。当硅灰掺量为5%时,灌浆料1、3 d的抗压强度最优,分别为43.5、63.5 MPa,较未掺硅灰提高了4.6%、12.4%,而硅灰掺量为7%时,灌浆料28 d强度最

大,为87.8 MPa,较未掺硅灰时提高了11.4%。硅灰对灌浆料抗压强度的贡献可以从以下两方面展开:一方面,硅灰的颗粒较细,能够很好地填充于灌浆料空隙间,增加其堆积密实度,有效提高灌浆料的强度;另一方面,硅灰的高火山灰活性有助于自身的 SiO_2 与水泥浆中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成稳定的C-S-H凝胶,也有效保证了灌浆料后期强度的发展^[16]。结合硅灰对灌浆料抗压强度的影响,建议硅灰掺量范围为3%~7%。

由图2(b)(c)可知:单掺粉煤灰或矿粉对灌浆料早期强度的影响都比较大,随着掺量的提高,其1 d的抗压强度不断下降,3与28 d的强度则呈先增大后减小趋势;粉煤灰掺量为6%时,灌浆料3与28 d的抗压强度达到最优,分别为58.4、82.8 MPa,较未掺粉煤灰时分别提高了4.8%、6.0%,而矿粉掺量为10%时,灌浆料3与28 d抗压强度最大,分别为63.8、85.9 MPa,较未掺矿粉时分别提高了12.9%、9.4%,对比可见,单掺矿粉对灌浆料中后期强度的贡献较单掺粉煤灰要大。原因分析:单掺粉煤灰或矿粉均能有效减少砂浆体系的水化热,所以灌浆料早期的水化速度较为缓慢,从而降低了砂浆的早期强度,但随着龄期的发展,粉煤灰与矿粉的火山灰效应开始逐渐发挥作用,粉煤

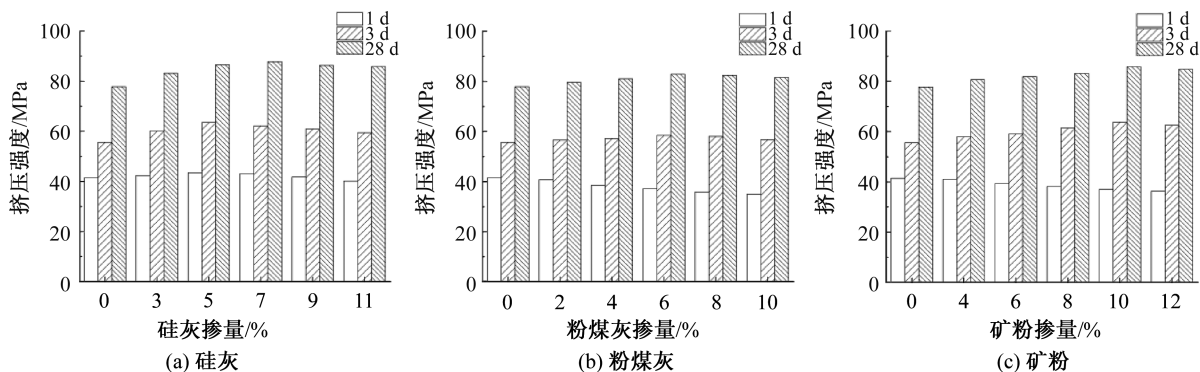


图2 矿物掺合料对灌浆料抗压强度的影响

Fig. 2 Influence of mineral admixture on compressive strength of grout

灰自身的 SiO_2 、 Al_2O_3 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应生成水化硅酸钙凝胶和水化铝酸钙,后期强度逐渐增大,而矿粉逐渐受到碱性材料的激发促进了二次水化反应,后期强度亦不断提高^[17]。

结合矿物掺合料对机制砂灌浆料力学性能的影响考虑,硅灰适宜掺量为 3%~7%、粉煤灰适宜掺量为 4%~8%、矿粉适宜掺量为 8%~12%。

3.3 矿物掺合料的正交试验优化

综合 3.2 中矿物掺合料对机制砂灌浆料流动度及强度的影响,选择正交试验的水平掺量为:硅灰 3%~7%、粉煤灰 4%~8%、矿粉 8%~12% (增量均为 2%)。试验采用 $L_9(3^4)$ 正交表,其试验结果如表 8 所示。

3.3.1 流动度极差分析

灌浆料流动度极差分析结果如表 9 所示。由表 9 可知,矿物掺合料对机制砂水泥基灌浆料初始

流动度及 30 min 流动度的影响顺序均为:硅灰>矿粉>粉煤灰;通过对比未掺矿物掺合料时的机制砂灌浆料而言,硅灰、粉煤灰与矿粉三者复掺后灌浆料的流动度均有较大的提升,原因是三者之间的粒径差异较大,复掺后能够很好地填充骨料中的空隙,减少空隙中的自由水,提高灌浆料的密实度,而且粉煤灰较强的亲水性与矿粉较强的憎水性能使两者优势互补,从而进一步改善灌浆料的流动性、保水性与耐久性。

3.3.2 抗压强度极差分析

灌浆料抗压强度极差分析结果如表 10 所示。表 10 结果显示,三种矿物掺合料复掺后对机制砂灌浆料 1、3 d 抗压强度影响的先后顺序为:硅灰>矿粉>粉煤灰,28 d 抗压强度影响的先后顺序为:硅灰>粉煤灰>矿粉。

粉煤灰与矿粉都能与水泥水化过程中产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行二次水化反应生成 C-S-H 凝胶,

表 8 正交试验结果
Tab. 8 Orthogonal test results

试验号	流动度/mm		抗压强度/MPa			竖向膨胀率/%		
	初始	30 min	1 d	3 d	28 d	3 h	24 h	差值
CGM-1	355	330	42.9	63.5	91.1	0.27	0.36	0.09
CGM-2	350	343	42.5	62.9	92.3	0.3	0.44	0.14
CGM-3	362	345	41.8	64.4	93.1	0.28	0.47	0.19
CGM-4	360	332	42.8	65.8	94.2	0.33	0.37	0.04
CGM-5	355	319	47.5	68.1	98.7	0.30	0.44	0.14
CGM-6	357	328	44.9	62.8	95.5	0.27	0.46	0.19
CGM-7	345	315	44.2	66.1	92.7	0.29	0.36	0.07
CGM-8	350	320	44.7	64.9	94.5	0.32	0.45	0.13
CGM-9	343	312	46.0	65.2	96.4	0.26	0.41	0.15

表 9 流动度极差分析
Tab. 9 Analysis of fluidity range

编号	初始流动度/mm			30 min 流动度/mm		
	硅灰	粉煤灰	矿粉	硅灰	粉煤灰	矿粉
均值一	355.67	353.33	351.00	339.33	325.67	320.33
均值二	357.33	351.67	350.67	326.33	327.33	328.67
均值三	346.00	354.00	357.33	315.67	328.33	332.33
极差	11.33	2.33	6.67	23.67	2.67	12.00

表 10 抗压强度极差分析
Tab. 10 Range analysis of compressive strength

编号	1 d 抗压强度/MPa			3 d 抗压强度/MPa			28 d 抗压强度/MPa		
	硅灰	粉煤灰	矿粉	硅灰	粉煤灰	矿粉	硅灰	粉煤灰	矿粉
均值一	42.40	43.30	45.47	63.60	65.13	65.60	92.17	92.67	95.40
均值二	45.07	44.90	43.87	65.57	65.30	63.93	96.13	95.17	93.50
均值三	44.97	44.23	43.10	65.40	64.13	65.03	94.53	95.00	93.93
极差	2.67	1.60	2.37	1.97	1.17	1.67	3.97	2.50	1.90

从而提高灌浆料的后期强度^[14];其次硅灰的加入不仅能促进矿粉与粉煤灰的水化反应,生成水化硅酸钙,保障后期强度的发展,而且硅灰较大的比较面积具有很强的吸附作用,可以减少矿粉与粉煤灰复掺后的高流动度所带来的泌浆、离析等缺点。三种矿物掺合料相得益彰,能够有效地提高灌浆料的抗压强度。

3.3.3 竖向膨胀率极差分析

灌浆料竖向膨胀率的均值处理与极差分析如表 11 所示。表 11 中,三个因素对灌浆料 3、24 h 竖向膨胀率影响顺序均为:粉煤灰>矿粉>硅灰,而竖向膨胀率差值的影响顺序则为:粉煤灰>硅灰>矿粉。虽然矿物掺合料复掺对竖向膨胀率有一定的影响,但得益于灌浆料基准配比成分中含有适量的膨胀剂,所以 9 组试验的竖向膨胀率数据均满足灌浆料规范要求。

结合矿物掺合料对全机制砂灌浆料流动度、抗压强度及竖向膨胀率的试验数据与极差分析结果可知,流动度最优方案为 A2B3C3(5%硅灰、8%粉煤灰、12%矿粉),强度最优方案为 A2B2C1(5%硅灰、6%粉煤灰、8%矿粉),3 h 竖向膨胀率最优方案为 A2B2C3(5%硅灰、6%粉煤灰、12%矿粉),竖向膨胀率差值最优方案为 A1B3C1(3%硅灰、8%粉煤灰、8%矿粉),本文为精确矿物掺合料的最优掺量,将四组方案重新进行验证试验,试验结果如表 12 所示。

从表 12 中可以看出,4 组试验组合的竖向膨胀率均能达到灌浆料规范要求,故从流动度与抗压强度的角度进行对比分析,从试验数据可见,流动度最优的仍然是 A2B3C3,抗压强度最优的则为

A2B2C1,但两者均满足Ⅱ类灌浆料流动度要求(初始流动度为 340 mm、30 min 流动度为 310 mm),最终从敏感度分析考虑选用强度最优方案(A2B2C1),即 5%的硅灰、6%的粉煤灰和 8%的矿粉。

3.3.4 微观机理分析

图 3、图 4 分别为未掺矿物掺合料组与优化矿物掺合料组不同龄期的机制砂水泥基灌浆料的电镜照片,从中可以看出,相比于未掺矿物掺合料组,优化矿物掺合料组各个龄期(以下简称优化组)的界面过渡区中机制砂与水泥浆体胶结更好,结构更为密实。优化组龄期为 1 d 时,水化反应生成的针棒状 Aft 与 C-S-H 凝胶相对均匀,但仍有不少孔隙,随着龄期的发展,水化反应进行到 3 d 时,优化组中机制砂与水泥浆体间的胶结越来越紧密,结构孔隙逐渐减少,这主要是分散在水泥浆体中的矿物掺合料逐渐起晶核作用,与 Ca(OH)₂ 反应生成更多的 C-S-H 凝胶,改善了灌浆料孔隙结构,此时灌浆料已经具备相对较高的抗压强度,当水化进行到 28 d 时,此时针棒状的 Aft 晶体与 C-S-H 凝胶相互交织,灌浆料内部孔隙减少,结构密实性进一步改善,宏观表现为高强度特征。

4 结论

1) 利用全机制砂制备水泥基灌浆料较天然黄砂相比,虽然流动度有所下降,但 30 min 经时损失差别不大,而且机制砂灌浆料的抗压强度更优,原因是经过优化颗粒级配后的机制砂与天然黄砂相比,堆积密度更大,空隙率小,灌浆料体系更为密实。

表 11 竖向膨胀率极差分析

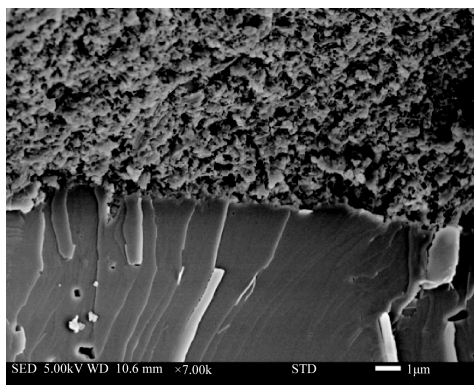
Tab. 11 Range Analysis of Vertical expansion rate

编号	3 h 竖向膨胀率/%			24 h 竖向膨胀率/%			竖向膨胀率差值/%		
	硅灰	粉煤灰	矿粉	硅灰	粉煤灰	矿粉	硅灰	粉煤灰	矿粉
均值一	0.28	0.30	0.28	0.42	0.36	0.40	0.14	0.07	0.13
均值二	0.30	0.31	0.29	0.42	0.44	0.42	0.12	0.14	0.13
均值三	0.29	0.27	0.31	0.41	0.45	0.43	0.12	0.18	0.12
极差	0.02	0.04	0.03	0.02	0.08	0.03	0.02	0.11	0.01

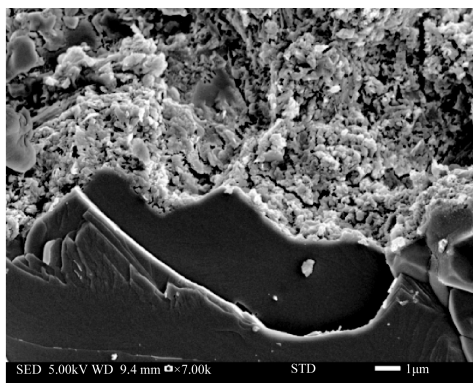
表 12 验证试验结果

Tab. 12 Verify the test results

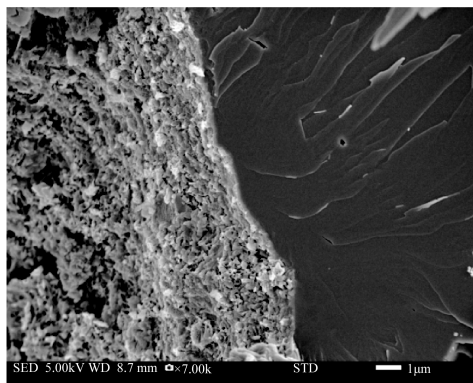
试验组合	流动度/mm		抗压强度/MPa			竖向膨胀率/%		
	初始	30 min	1 d	3 d	28 d	3 h	24 h	差值
A2B3C3	362	338	44.1	65.5	96.5	0.33	0.46	0.13
A2B2C1	355	319	47.5	68.1	98.7	0.30	0.44	0.14
A2B2C3	360	332	44.9	65.8	95.4	0.31	0.46	0.15
A1B3C1	355	320	43.5	64.2	94.1	0.29	0.46	0.17



(a) 1 d SEM图



(b) 3 d SEM图



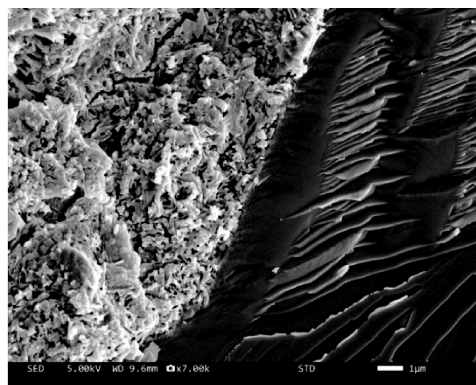
(c) 28 d SEM图

图3 未掺矿物掺合料组 SEM图

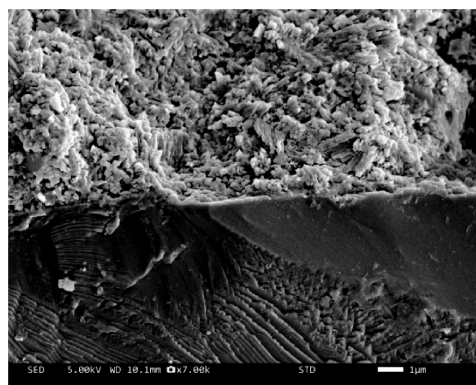
Fig. 3 SEM diagram of unmineral admixture group

2) 适量硅灰的掺入能够有效提高机制砂灌浆料的早期及后期强度,这得益于硅灰的填充作用与高火山灰活性,因为硅灰颗粒粒径很细,比表面积较大,能够有效地填充于水泥浆体中,增加其致密性,而高火山灰活性能够促进 SiO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,生成更为稳定、强度更高的水化硅酸钙凝胶,当硅灰掺量为 5% 时,灌浆料的流动度与 1、3 d 抗压强度最优,而掺量为 9% 时,其 28 d 抗压强度最优。

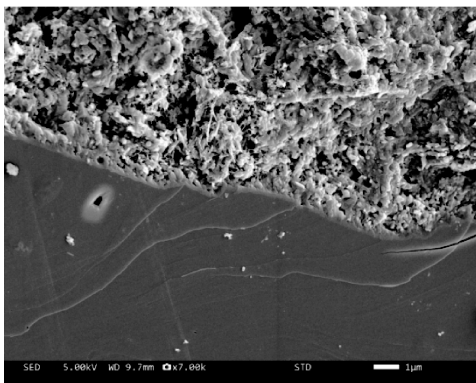
3) 单掺粉煤灰或者矿粉均能增大灌浆料的流动性,并减少 30 min 的经时损失,但掺量过大容易



(a) 1 d SEM图



(b) 3 d SEM图



(c) 28 d SEM图

图4 优化矿物掺合料组 SEM图

Fig. 4 Optimizing SEM diagram of mineral admixture group

造成灌浆料泌浆、离析分层等现象,而粉煤灰与矿粉对灌浆料抗压强度的贡献主要集中在中后期,因为两者的早期活性较低,水化速度缓慢,导致灌浆料早期强度较差,但随着龄期增长,粉煤灰与矿粉均逐渐发生二次水化反应,所以灌浆料的中后期强度逐渐提高,当粉煤灰单掺 6% 或矿粉单掺 10% 时,机制砂灌浆料的 3 与 28 d 抗压强度均达到最优。

4) 由优化配合比后的全机制砂灌浆料与基准配合比的微观机理分析对比可知,硅灰、粉煤灰与矿粉三种矿物掺合料复掺后,灌浆料的密实度、流

动性、力学性能及竖向膨胀率均得到改善,通过正交试验优化后的矿物掺合料最佳掺量为:硅灰5%、粉煤灰6%、矿粉8%。

参考文献:

- [1] 丁成,杨医博. 水泥基灌浆材料性能与组成材料研究进展[J]. 河南科学, 2021, 39(08): 1250-1256.
- [2] 张勇,田文丽,马超然,等. 我国水泥基灌浆材料研究进展[J]. 混凝土, 2018(06): 124-126, 131.
- [3] 王红霞,王星,何廷树,等. 灌浆材料的发展历程及研究进展[J]. 混凝土, 2008(10): 30-33.
- [4] 汪良强,符海龙. 机制砂在干混砂浆中的应用和发展趋势[J]. 工程技术研究, 2020, 5(06): 143-144.
- [5] 刘通. 机制砂特性对水泥基材料性能影响的试验研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2021.
- [6] 潘小平,吴漫天,徐建华,等. 机制砂特点与干混砂浆的生产及施工[J]. 建设机械技术与管理, 2019, 32(02): 52-56.
- [7] 程勇刚. 机制砂对灌浆料性能的影响研究[J]. 福建建材, 2022(03): 23-25.
- [8] 张杰. 全机制砂制备高性能灌浆料试验研究[J]. 公路工程, 2017, 42(03): 278-281.
- [9] 赵淑静. 一种石灰石机制砂制备高性能灌浆料的试验

研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2021.

- [10] 单俊鸿,张景华,王荣荣,等. 矿物掺合料对机制砂水泥基自流平砂浆性能的影响[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(03): 1-6, 68.
- [11] 陈涛. 高性能水泥基灌浆料制备技术、力学性能与微观机理研究[D]. 广州:广州大学, 2020.
- [12] LI X J, HAO J Y, ZHANG Q. Effect of mineral admixtures on the properties of grouting materials made from ternary complex system[J]. Advances in Cement Research, 2019.
- [13] 李天水. 高性能水泥基灌浆料研制及性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018.
- [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] 赵同义. 机制砂制灌浆材料在装配式建筑中的应用研究[D]. 郑州:郑州大学, 2018.
- [16] 吴吉昊,李志华,张聪. 硅灰掺量对水泥基灌浆料与老混凝土界面粘结强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(12): 3989-3995.
- [17] 冷达,张雄,沈中林,等. 水泥基灌浆材料主要成分对其新拌及硬化性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2008(05): 12-16.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第27页)

- [16] CHENG X D, MA C, YANG W D, et al. Failure mode analysis of X80 buried steel pipeline under oblique-reverse fault[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 125: 105723.
- [17] 代建波,马静,胡成涛,等. 横向非一致地震激励下埋地管道的动力响应分析[J]. 地震工程学报, 2022, 44(6): 1277-1286.
- [18] 马俊玲,丁海平. 土层地震反应分析中不同阻尼取值的影响比较[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(05): 517-523+547.

- [19] 肖东辉,马巍,赵淑萍,等. 冻土动力学参数研究的成果综述与展望[J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1611-1626.
- [20] 郭思远. 城镇埋地排水管道地震响应分析[D]. 大连:大连理工大学, 2020.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2022[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2022.
- [22] 全国地震标准化技术委员会. 中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.

(责任编辑 周雪梅)