

碱激发矿渣粉煤灰地聚物力学性能研究

刘扬,王集昭*,鲁乃唯,王柏文

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为响应国家节能减排战略,提高工业废弃物的综合利用率。该文通过单一变量和正交试验法,并结合XRD、SEM,分析了矿渣掺量、碱当量、水玻璃模数和水灰比对矿渣粉煤灰地聚物抗压强度、孔隙率的影响。结果表明:矿渣掺入增多,促进了凝胶的生成,地聚物结构更加致密,有利于强度的发展。标准养护28 d后,各因素对地聚物抗压强度的影响程度从大到小依次为:矿渣掺量、碱当量、水灰比和水玻璃模数。矿渣掺量为0.5,碱当量为0.07,水灰比为0.36,水玻璃模数为1.6时,地聚物的抗压强度最高,达到78.84 MPa。

关键字:矿渣;地聚物;抗压强度;微观结构;正交试验

中图分类号:U414

文献标志码:A

Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag-Fly Ash Geopolymers

LIU Yang, WANG Jizhao*, LU Naiwei, WANG Bowen

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In order to respond to the national strategy of energy saving and emission reduction and improve the comprehensive utilization rate of industrial waste, the influence of slag content, alkali equivalent, sodium silicate modulus, and water-cement ratio on the compressive strength of slag-fly ash geopolymers was investigated by single variable and orthogonal experiment method. The compressive strength of geopolymers was analyzed by combining XRD, SEM, and porosity. The results show that the gel formation is promoted with the increase in slag content, and the structure of geopolymers is more compact, which is conducive to the development of strength. After 28 days of standard curing, the influence of various factors on the compressive strength of geopolymers in descending order is as follows: slag content, alkali equivalent, water-cement ratio, and sodium silicate modulus. When the slag content, alkali equivalent, water-cement ratio, and sodium silicate modulus are 0.5, 0.07, 0.36, and 1.6, the compressive strength of geopolymers is the highest, reaching 78.84 MPa.

Keywords: slag; geopolymer; compressive strength; microstructure; orthogonal experiment

0 引言

1978年,法国科学家Davidovits^[1]提出地质聚合物。地聚物是由硅铝原材料在碱性激发剂作用下,通过溶解、解聚、缩合而形成的一种无定形三维网状无机聚合物^[2]。相比于水泥,地聚物性能优良且节能

环保^[3-4]。CO₂排放量统计显示,生产过程中地聚物的碳排放量低于水泥,前者仅为后者的1/5左右^[5-6]。

矿渣和粉煤灰是两种产量较大的工业废弃物,这些废弃物大量堆积会造成环境污染、资源浪费等问题,在一定程度上制约了工业的绿色发展^[7]。随着研究的深入,一些学者发现矿渣和粉煤灰可用于制

收稿日期:2024-05-25(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52178207)

作者简介:刘扬,男,博士,教授.E-mail:liuyangbridge@163.com

*通信作者:王集昭,男,硕士研究生.E-mail:2911310497@qq.com

备地聚物。詹疆淮等^[8]指出矿渣地聚物凝结时间快,硬化后强度高,粉煤灰地聚物凝结时间长,强度发展较慢,两者混合能改善单一材料激发效果;孙双月^[9]研究了不同因素对地聚物力学性能的影响,发现矿渣粉煤灰配比为1:1、水灰比为0.4、水玻璃模数为1.2时,地聚物抗压强度最大,为68.45 MPa;程国东等^[10]发现随着矿渣掺量的增多,地聚物抗压强度增大,流动性降低;王东平等^[11]发现粉煤灰掺量为20%~40%时,粉煤灰矿渣地聚物具有良好的力学性能,收缩性减小。上述研究表明:单一原材料制备地聚物不能得到很好的性能,粉煤灰和矿渣互掺后能改善性能。目前,由于地聚物开发利用时间短,不同的原材料、配合比制备的地聚物性能差异大,仍然需要大量试验研究。

本文在已有研究的基础上,采用粉煤灰和矿渣制备地聚物,研究不同因素对粉煤灰矿渣地聚物力

学性能的影响,结合微观结构、孔隙率进行分析,确定最优配合比。以期让本试验制备的粉煤灰矿渣地聚物力学性能满足土木工程建设的需求,为地聚物材料的推广应用提供相应的数据参考。

1 试验

1.1 原材料

粉煤灰来自河南某电厂,属于低钙粉煤灰,主要由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等组成,主要的晶相为石英和莫来石。矿渣来自湖南某钢铁厂,主要由 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 等组成。粉煤灰和矿渣具体组成如表1所示,XRD图谱见图1。

选取固体氢氧化钠、水玻璃(Na_2SiO_3 溶液)、水配制成复合碱性激发剂。水玻璃溶液模数为3.28, SiO_2 质量分数为26.54%, Na_2O 质量分数为8.35%。固体氢氧化钠纯度为99.5%。

表1 矿渣和粉煤灰的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of slag and fly ash

原材料	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{TiO}_2)$	$w(\text{K}_2\text{O})$
粉煤灰	47.98	33.73	5.52	0.48	6.66	2.18	1.52	1.26
矿渣	35.00	15.38	38.19	7.06	0.44	2.47	0.58	0.49

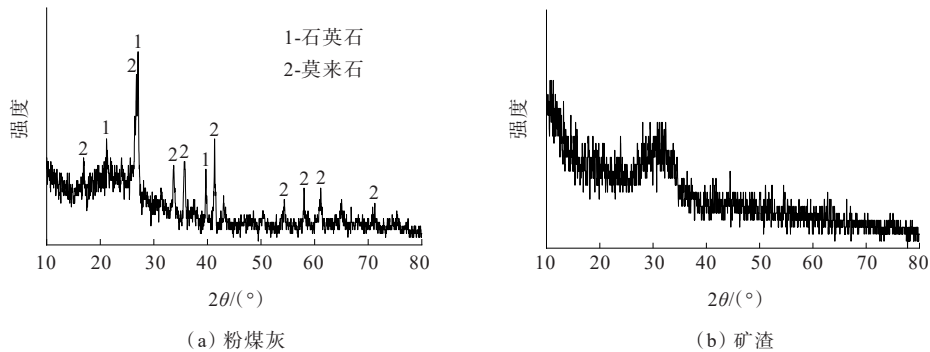


图1 原材料XRD图

Figure 1 XRD patterns of raw materials

1.2 试验方法

本试验以矿渣掺量(A)、碱当量(B)、水玻璃模数(C)、水灰比(D)为因素,设计单一因素变量试验和4因素5水平正交试验,以试样7 d、28 d龄期的抗压强度作为考察指标,探讨多因素多水平对地聚物抗压强度的影响规律,确定最优配合比,因素水平表见表2。

试件制备:根据配合比称取相应质量的粉煤灰与矿渣,用搅拌机充分搅拌均匀,加入碱性激发剂,充分搅拌反应后倒入模具,振动台振捣2 min后养

护,24 h后拆模。每组制作3个试块,试件尺寸为50 mm×50 mm×50 mm,在标准条件下[温度(20±2)℃、湿度95%±2%]养护至特定龄期(7 d、28 d)。养护完成后进行抗压强度测试,抗压强度取3个试块的平均值,压力测试参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO)》(GB/T 17671—2020),选取养护28 d试块进行XRD、SEM、孔隙率测试分析。本试验采用型号为CD/max2200vpc的XRD衍射分析仪,德国蔡司公司生产的EVO MA25型号的电子显微镜

(SEM),康塔仪器公司生产的 Pore Master 33GT 型号压汞仪。

表 2 因素水平表
Table 2 Factor levels

水平	矿渣掺量 (A)	碱当量 (B)	水玻璃模数 (C)	水灰比 (D)
1	0.1	0.04	0.80	0.34
2	0.2	0.05	1.00	0.38
3	0.3	0.06	1.20	0.42
4	0.4	0.07	1.40	0.36
5	0.5	0.08	1.60	0.40

2 结果与讨论

2.1 矿渣掺量对地聚物抗压强度的影响

保持 B、C、D 三因素不变,矿渣掺量对抗压强度和孔隙率的影响试验结果见表 3。

表 3 矿渣掺量对强度和孔隙率的影响

Table 3 Influence of slag content on strength and porosity

组号	因素				孔隙率/ %	抗压强度/MPa	
	A	B	C	D		7 d	28 d
S1	0.1	0.06	1.2	0.38	12.69	8.76	31.41
S2	0.2	0.06	1.2	0.38	9.38	24.18	47.81
S3	0.3	0.06	1.2	0.38	7.32	38.03	58.86
S4	0.4	0.06	1.2	0.38	5.20	43.90	66.35
S5	0.5	0.06	1.2	0.38	4.15	51.76	76.13

由表 3 可知:① 养护龄期为 7 d、28 d 时地聚物抗压强度均随着矿渣在胶凝材料中占比的增多而增大,矿渣掺量对地聚物抗压强度的增长具有显著的影响。矿渣掺量较小时,地聚物早期抗压强度低。当掺量为 0.1 时,7 d 强度只有 8.76 MPa;随着矿渣掺入的增多,地聚物早期强度提高,掺量为 50% 时,7 d 强度达到 51.76 MPa,养护龄期为 7 d、28 d 时,地聚物抗压强度分别增长了 490.87%、142.38%;② S1 到 S5 样品的孔隙率由 12.69% 下降到 4.15%,致密性增强抗压强度增大。朱娟娟^[12]指出胶凝材料中钙含量多,能促进强度发展。矿渣中含有较多氧化钙,比表面积大活性高^[13],碱性环境下会溶解出许多钙离子,溶解出的钙离子能与硅离子迅速反应生成 C—S—H 凝胶,C—S—H 凝胶生成速度较快,提高了地聚物强度。

不同矿渣掺量下养护 28 d 地聚物材料 XRD 结果如图 2 所示。

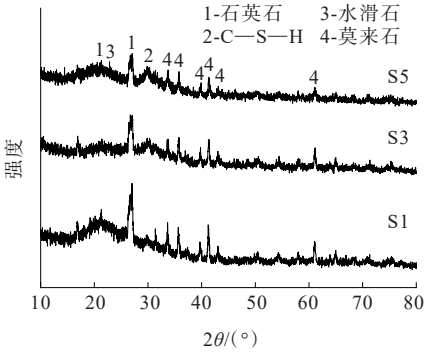


图 2 不同矿渣掺量下 XRD 图

Figure 2 XRD pattern under different slag contents

由图 2 可知:随着矿渣掺量的增多,在 $2\theta=30^\circ$ 时,C—S—H 凝胶衍射峰增强,生成的 C—S—H 凝胶增多。石英(Quartz)、莫来石(Mullite)衍射峰强度逐渐降低,水化反应增强。养护龄期为 28 d 时,相对于早期,抗压强度仍然有较大的提升,随着水化反应的进行,粉煤灰、矿渣不断水解,体系中生成的凝胶增多,地聚物材料结构更加稳定,促进了试块强度的发展。

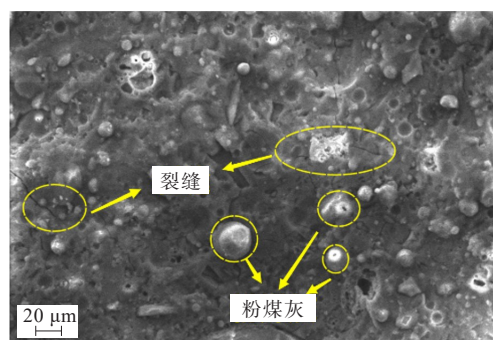
不同矿渣掺量下养护 28 d 地聚物材料 SEM 扫描结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出:矿渣掺量少,粉煤灰活性低,反应速率慢,生成的凝胶数量少,S1 中有大量未反应的粉煤灰,裂缝较多,结构密实性差;随着矿渣掺量的增多,生成的凝胶数量变多,结构致密性增强,S5 中未反应的原材料减少,裂缝减少,水化反应更加充分,抗压强度逐渐增高。

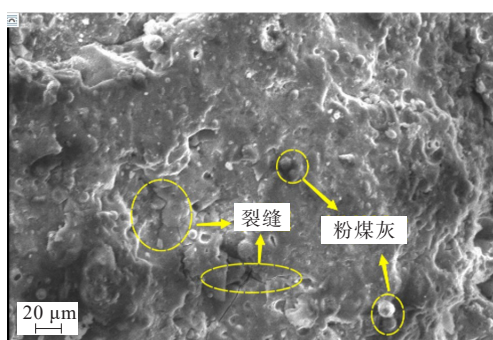
2.2 碱当量对地聚物抗压强度的影响

保持 A、C、D 三因素不变,碱当量对强度和孔隙率的影响试验结果见表 4。

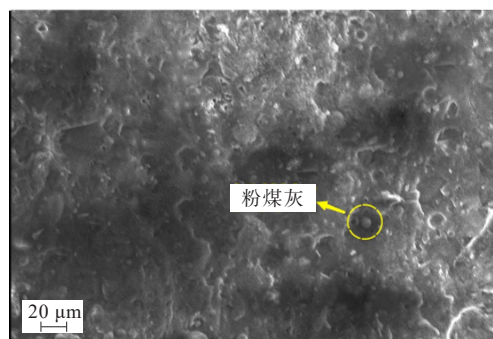
由表 4 可知:养护龄期为 7 d、28 d 时,地聚物抗压强度随着碱当量的增加先增大后减小,碱当量为 7% 时取到最大值。碱当量过高或过低,都会使材料的抗压强度降低^[14]。碱当量未到临界值时,随着碱当量的增加, OH^- 浓度增大,粉煤灰矿渣溶解速率快,硅铝酸盐的解聚程度随着体系中 OH^- 浓度增大而增大,水化反应增强,促进了强度的发展。碱当量超过临界值时,使得早期产生的 C—S—H 凝胶、C—A—S—H 凝胶出现不均匀性,产生的凝胶会过早地将未反应的原料包裹,抑制解聚的发生,阻碍地聚物



(a) S1



(b) S3



(c) S5

图3 不同矿渣掺量下SEM图

Figure 3 SEM images under different slag contents

表4 碱当量对强度和孔隙率的影响

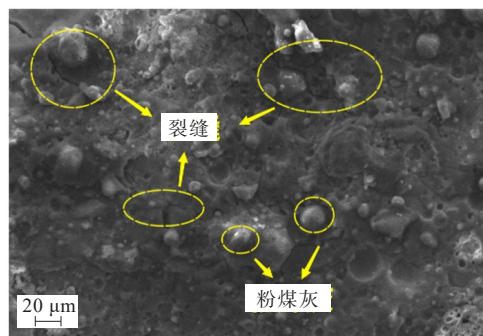
Table 4 Influence of alkali equivalent on strength and porosity

组号	因素				孔隙率/%	抗压强度/MPa	
	A	B	C	D		7 d	28 d
N1	0.3	0.04	1.2	0.38	14.42	19.44	31.32
N2	0.3	0.05	1.2	0.38	10.21	27.81	50.01
N3	0.3	0.06	1.2	0.38	7.32	38.03	58.86
N4	0.3	0.07	1.2	0.38	6.48	45.65	64.17
N5	0.3	0.08	1.2	0.38	6.89	39.78	57.18

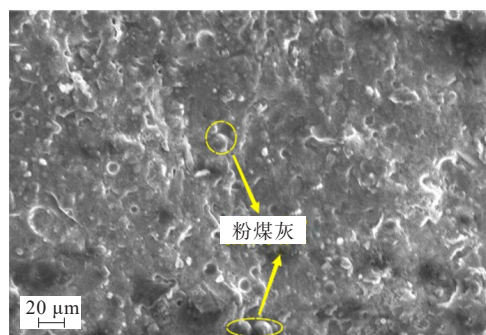
进一步反应^[15]。碱当量过高时,金属离子会在粉煤灰颗粒表面发生钝化反应,降低粉煤灰矿渣溶解速

率,水化反应变弱,生成的凝胶数量减少,结构致密性变差^[16]。此外,过量的碱会与空气中的二氧化碳反应生成碳酸盐,在地聚物内部生成一种强度较低的硬化体,造成强度降低。

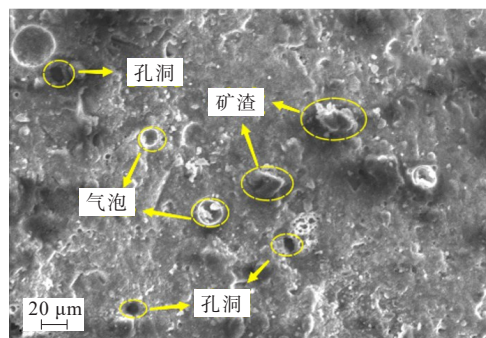
不同碱当量下养护 28 d 地聚物材料 SEM 扫描结果如图 4 所示。



(a) N1



(b) N4



(c) N5

图4 不同碱当量下SEM图

Figure 4 SEM images under different alkali equivalents

从表 4 和图 4 可以看出:碱当量过低,N1 水化反应程度较低,对原材料的激发效果不充分,裂缝较多;随着碱当量的增加,N1 到 N4 水化反应逐渐充分,生成的凝胶增多,未反应的原材料减少,孔隙率逐渐降低,从 14.42% 降低到 6.48%,结构致密性增强;N4 到 N5 时,碱当量过高,凝结时间过快,浆体空间分布

不均匀,未反应的原材料变多,内部出现部分孔洞,孔隙率从6.48%升高到6.89%,导致强度降低。

2.3 水玻璃模数对地聚物抗压强度的影响

保持A、B、D三因素不变,水玻璃模数对强度和孔隙率的影响试验结果见表5。

表5 水玻璃模数对强度和孔隙率的影响

Table 5 Influence of modulus on strength and porosity

组号	因素				孔隙率/%	抗压强度/MPa	
	A	B	C	D		7 d	28 d
M1	0.3	0.06	0.8	0.38	9.13	32.48	49.88
M2	0.3	0.06	1.0	0.38	8.61	36.05	52.01
M3	0.3	0.06	1.2	0.38	7.32	38.03	58.86
M4	0.3	0.06	1.4	0.38	7.14	40.16	59.12
M5	0.3	0.06	1.6	0.38	6.88	41.24	60.07

由表5可知:随着水玻璃模数的增大,地聚物抗压强度逐渐增大。7 d抗压强度增长了26.97%,28 d抗压强度增长了20.43%。水玻璃在地聚合反应过程中主要起到两个作用:一是作为激发剂,提供碱性环境;二是作为反应物,提供相应的硅组分。随着水玻璃模数的增大,一方面,提供的活性SiO₂变多,促进了硅组分与钙组分生成C—S—H凝胶,生成的水化产物多,水化产物相互连结形成网络,提高试块的强度;另一方面,水玻璃黏结力越强,析出的硅酸凝胶会填充孔隙。此外,未反应的硅酸钠会结晶,这种晶体能增加地聚物的强度^[17],宏观上表现为抗压强度逐渐增长。通常来说水玻璃模数越大,碱矿渣粉煤灰地聚物抗压强度越大,但当水玻璃模数超过一定界限时,地聚物强度会随着水玻璃模数的升高出现下降,这个界限为1.2~1.6^[18]。

不同水玻璃模数下养护龄期28 d试块SEM扫描结果如图5所示。

从图5可以看出:各组试块结构较为致密,未反应的原材料较少,地聚合反应较为充分,再次解释了其孔隙率和强度均未出现较大变化的原因。

2.4 水灰比对地聚物抗压强度的影响

保持A、B、C三因素不变,水灰比对强度和孔隙率的影响试验结果见表6。

由表6可知:地聚物抗压强度随着水灰比增大先增大后减小,各龄期下水灰比为0.36时取最大值。在地聚物反应过程中,水在硅铝组分的溶解、离子转移、硅铝化合物的水解及硅铝单体的聚合等过程中起媒介作用^[19],地聚合反应不消耗体系中的自由

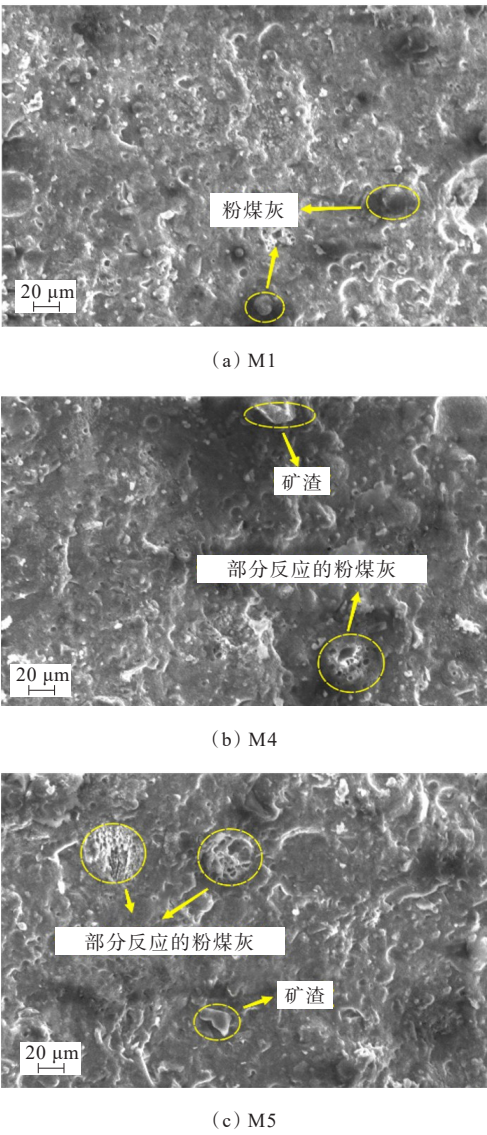


图5 不同水玻璃模数下SEM图
Figure 5 SEM images under different sodium silicate moduli

表6 水灰比对强度和孔隙率的影响

Table 6 Influence of water-cement ratio on strength and porosity

组号	因素				孔隙率/%	抗压强度/MPa	
	A	B	C	D		7 d	28 d
W1	0.3	0.06	1.2	0.34	6.67	35.34	53.66
W2	0.3	0.06	1.2	0.36	5.14	47.55	67.49
W3	0.3	0.06	1.2	0.38	7.32	38.03	58.86
W4	0.3	0.06	1.2	0.40	9.17	30.35	51.04
W5	0.3	0.06	1.2	0.42	11.25	23.15	44.98

水^[20]。体系中水灰比小,粉煤灰矿渣与碱性激发剂液体混合不均,影响和易性,浆体空间分布不均匀,导致地聚物强度下降。体系中水灰比大,水含量增

多,碱性激发剂浓度降低,粉煤灰和矿渣溶解速率变低,地聚合反应速率变缓,流动性变大,导致孔隙率变大^[21],强度降低。

不同水灰比下养护龄期 28 d 试块 SEM 扫描结果如图 6 所示。

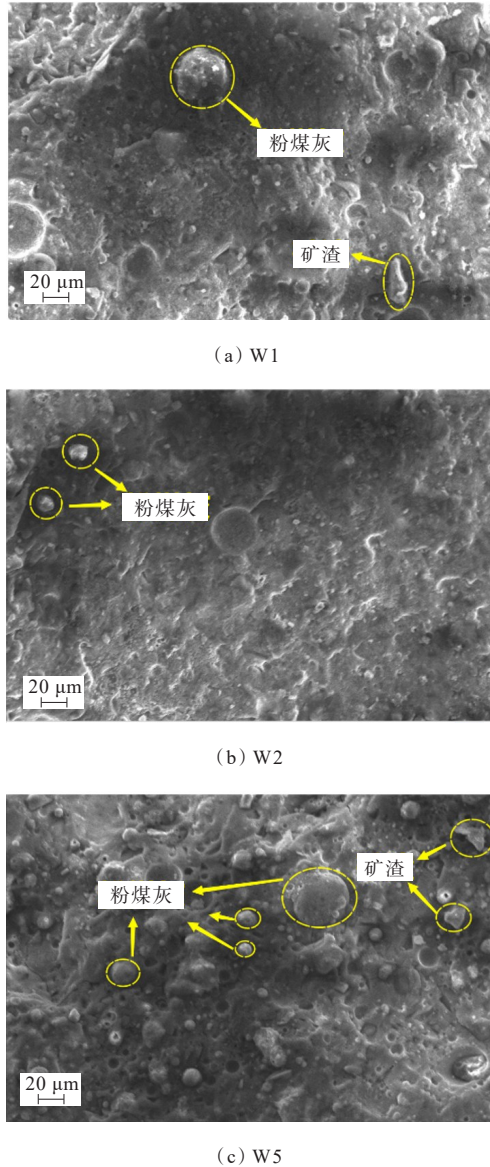


图 6 不同水灰比下 SEM 图

Figure 6 SEM images under different water-cement ratios

从图 6 可以看出:水灰比小于 0.36 时,由于碱性液体浓度较大,随着水灰比的增大,水化反应趋于完全,未反应的原材料逐渐减少,样品的总孔隙率下降。水灰比大于 0.36 时,由于水含量过多,碱性下降,反应速率变慢。W5 生成的凝胶较少,内部存在大量未反应的原材料颗粒。由表 6 可知:水灰比从 0.36 到 0.42,样品的孔隙率从 5.14% 逐渐升高到

11.25%,密实性变差,强度逐渐降低。

3 正交试验结果与极差分析

根据单一因素设计正交试验,抗压强度结果见表 7,极差分析结果见表 8。

表 7 抗压强度结果

Table 7 Compressive strength results

组号	因素				抗压强度/MPa	
	A	B	C	D	7 d	28 d
1	0.1	0.04	0.8	0.34	1.62	5.51
2	0.2	0.04	1.0	0.38	4.11	14.83
3	0.3	0.04	1.2	0.42	4.22	18.12
4	0.4	0.04	1.4	0.36	41.17	58.08
5	0.5	0.04	1.6	0.40	38.31	48.23
6	0.1	0.05	1.0	0.36	8.34	34.04
7	0.2	0.05	1.2	0.40	14.78	36.80
8	0.3	0.05	1.4	0.34	37.90	57.99
9	0.4	0.05	1.6	0.38	42.39	57.40
10	0.5	0.05	0.8	0.42	35.98	59.32
11	0.1	0.06	1.2	0.38	8.76	31.41
12	0.2	0.06	1.4	0.42	16.29	34.50
13	0.3	0.06	1.6	0.36	39.73	63.73
14	0.4	0.06	0.8	0.40	32.96	50.06
15	0.5	0.06	1.0	0.34	48.66	69.15
16	0.1	0.07	1.4	0.40	8.53	26.10
17	0.2	0.07	1.6	0.34	23.30	49.38
18	0.3	0.07	0.8	0.38	35.29	63.42
19	0.4	0.07	1.0	0.42	33.92	61.35
20	0.5	0.07	1.2	0.36	60.62	71.73
21	0.1	0.08	1.6	0.42	7.57	28.79
22	0.2	0.08	0.8	0.36	21.86	40.01
23	0.3	0.08	1.0	0.40	36.42	42.87
24	0.4	0.08	1.2	0.34	51.81	64.82
25	0.5	0.08	1.4	0.38	41.08	46.64

如表 8 所示, K_i 为一个因素下相同水平的各个试验结果之和的平均数($i=1,2,3,4,5$),用 K_i 当作最优水平的评价指标,选择 K_i 值最大的水平作为最优水平。 R 为正交试验结果的极差,每个因素下 K_i 最大值与最小值之差的绝对值为该因素的极差,根据 R 值的大小判断不同因素的影响程度, R 值越大影响程度越大。

根据表 8 的极差分析结果可知:养护龄期为 7 d 时,因素 A 的极差最大,为 37.97,因素 C 的极差最小,

为4.72。4个因素对复合胶凝材料强度影响顺序为: A>D>B>C,即矿渣掺量对抗压强度影响最大,其次是水灰比、碱当量、水玻璃模数,各因素抗压强度最优组合为A5D4B4C5,抗压强度为62.21 MPa。而养护龄期28 d时,复合胶凝材料抗压强度影响顺序为:A>B>D>C,各因素最优组合为A5B4D4C5,抗压强度为78.84 MPa,相比于7 d抗压强度提升了26.7%。随着养护龄期的增大,地聚合反应更加充分,生成的凝胶产物更多,促进了强度的发展。

表8 极差分析结果
Table 8 Range analysis results

项目	7 d抗压强度				28 d抗压强度			
	A	B	C	D	A	B	C	D
K1	6.96	17.89	25.54	32.66	25.17	28.95	43.66	49.37
K2	16.07	27.88	26.29	26.33	35.10	49.11	44.45	42.74
K3	30.71	29.28	28.04	19.59	49.22	49.77	44.58	40.41
K4	40.45	32.33	28.99	34.34	58.34	54.40	44.66	53.52
K5	44.93	31.75	30.26	26.20	59.01	44.63	49.51	40.81
R	37.97	14.44	4.72	14.75	33.84	25.44	5.84	13.11
影响顺序	A>D>B>C				A>B>D>C			
最优组合	A5D4B4C5				A5B4D4C5			

28 d最优组合下地聚物抗压强度满足硅酸盐水泥养护龄期28 d抗压强度要求^[22]。普通硅酸盐水泥62.5R级要求养护龄期28 d时,抗压强度大于62.5 MPa,本试验最优组制备的地聚物符合要求。

由极差分析可知:碱当量(Na₂O含量)在后期影响程度变大,主要原因是随着反应的进行,粉煤灰矿渣不断溶解,体系中的钠离子使得C—S—H凝胶向N—A—S—H、(N,C)—A—S—H凝胶转变,钠离子平衡了凝胶结构中负电荷,使结构更加致密,促进强度发展^[2]。水灰比在后期影响减弱,随着龄期的增大,地聚合反应速率变缓,水在离子转移、硅铝化合物水解等方面的作用逐渐降低,对后期抗压强度的影响变弱。

4 结论

(1) 微观结构和物相组成分析表明,矿渣的加入有利于地聚物强度的发展,增加了凝胶生成数量,提高了结构的致密性。

(2) 正交试验极差分析显示:养护龄期为7 d、28 d时,矿渣掺量为0.5%,碱当量为0.07,水灰比为

0.36,水玻璃模数为1.6时,地聚物的抗压强度最高,7 d抗压强度达到62.21 MPa,28 d抗压强度达到78.84 MPa。

(3) 根据极差分析可知,养护龄期为7 d时,各因素对粉煤灰矿渣地聚物抗压强度影响顺序依次为:矿渣掺量、水灰比、碱当量、水玻璃模数。养护龄期为28 d时,影响顺序依次为:矿渣掺量、碱当量、水灰比、水玻璃模数。

参考文献:
References:

[1] DAVIDOVITS J.Geopolymers and geopolymeric materials [J].Journal of Thermal Analysis,1989,35(2): 429-441.

[2] 赵献辉,王浩宇,周博宇,等.粉煤灰基地聚物的性能影响因素及其凝胶产物研究进展[J].硅酸盐通报,2021,40(3): 867-876.

ZHAO Xianhui, WANG Haoyu, ZHOU Boyu, et al. Research development on influencing factors of performances and gel products in fly ash-based geopolymer material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2021,40(3):867-876.

[3] 张军辉,李海,杨豪,等.盾构渣土资源化再利用技术研究综述[J].中外公路,2022,42(6):1-11.

ZHANG Junhui,LI Hai,YANG Hao,et al.An overview on the “reuse potential” for managing shield tunnel spoils as resources[J].Journal of China & Foreign Highway,2022,42 (6):1-11.

[4] 袁开新,何永健,张来君,等.地聚合物稳定建筑固废再生集料力学特性研究[J/OL].中外公路,1-12[2024-04-24].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240424.1107.002.html>.

YUAN Kaixin, HE Yongjian, ZHANG Laijun, et al. Mechanical properties of geopolymer stabilized construction and demolition wastes recycled aggregate[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway,1-22[2024-04-24].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240424.1107.002.html>.

[5] DUXSON P,PROVIS J L,LUKEY G C,et al.The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete”[J].Cement and Concrete Research,2007, 37(12): 1590-1597.

[6] JANNIE S,VAN D J,JOHN L,et al.The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete”[J].Minerals Engineering,2012,29:89-104.

[7] 王浩,王晓佳,桂峰,等.高炉矿渣资源化利用现状及展望

- [J]. 化工矿物与加工, 2021, 50(11): 48-53.
- WANG Hao, WANG Xiaojia, GUI Feng, et al. The status and prospect of blast furnace slag resource utilization[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021, 50(11): 48-53.
- [8] 詹疆淮, 李宏波, 傅博, 等. 不同碱当量、粉煤灰和矿渣掺量对碱激发粉煤灰-矿渣地聚物力学性能及微观结构的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 12218-12224.
- ZHAN Jianghuai, LI Hongbo, FU Bo, et al. Effect of different alkali equivalent, fly ash and slag content on the mechanical properties and microstructure of alkali-activated fly ash-slag geopolymer[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(28): 12218-12224.
- [9] 孙双月. 利用矿渣和粉煤灰制备地聚物胶凝材料的正交试验研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(11): 118-122, 127.
- SUN Shuangyue. Orthogonal experiment research on geopolymer synthesis by utilizing slag and fly ash as raw material[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(11): 118-122, 127.
- [10] 程国东, 黄天勇, 刘泽, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚合物胶砂性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(1): 50-53.
- CHENG Guodong, HUANG Tianyong, LIU Ze, et al. Research on the performance of ash-slag based geopolymer mortar[J]. New Building Materials, 2020, 47(1): 50-53.
- [11] 王东平, 陈佩圆, 王亮, 等. 粉煤灰掺量对碱激发矿渣砂浆减缩特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(2): 701-705.
- WANG Dongping, CHEN Peiyuan, WANG Liang, et al. Reducing the shrinkage of alkali-activated slag mortar by adding fly ash[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(2): 701-705.
- [12] 朱娟娟. 粉煤灰-矿渣复合基矿物聚合物的制备及性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- ZHU Juanjuan. Preparation and performance of fly ash-slag geopolymer[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [13] 杨斌, 盛彬, 王珺卓, 等. 粉煤灰与矿渣在单掺和复掺情况下对混凝土强度的影响研究[J]. 中外公路, 2017, 37(3): 212-215.
- YANG Bin, SHENG Bin, WANG Junzhuo, et al. Study on the influence of fly ash and slag on concrete strength under the condition of single admixture and compound admixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(3): 212-215.
- [14] 彭玉清, 郭荣鑫, 林志伟, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚合物砂浆凝结时间及力学性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(12): 138-144.
- PENG Yuqing, GUO Rongxin, LIN Zhiwei, et al. Experimental study on setting time and mechanical properties of fly ash-slag geopolymer mortar[J]. New Building Materials, 2021, 48(12): 138-144.
- [15] 邢志强. 纤维-地聚物砂浆及其混凝土力学性能与耐久性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
- XING Zhiqiang. Study on mechanical properties and durability of fiber-polymer mortar and concrete[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.
- [16] 黄科, 马玉玮, 郭奕群, 等. 碱激发粉煤灰/矿渣复合体系的性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(10): 2769-2774.
- HUANG Ke, MA Yuwei, GUO Yiqun, et al. Properties of alkali-activated fly ash/slag composite system[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(10): 2769-2774.
- [17] PUERTAS F, MARTÍNEZ-RAMÍREZ S, ALONSO S, et al. Alkali-activated fly ash/slag cements[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(10): 1625-1632.
- [18] 杜天玲, 刘英, 于咏妍, 等. 水玻璃对粉煤灰矿渣地聚物强度的影响及激发机理[J]. 公路交通科技, 2021, 38(1): 41-49.
- DU Tianling, LIU Ying, YU Yongyan, et al. Influence of sodium silicate on fly ash slag geopolymer strength and stimulating mechanism[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(1): 41-49.
- [19] WENG L, SAGOE-CRENTSIL K. Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I—low Si/Al ratio systems[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(9): 2997-3006.
- [20] 王子帅. 水盐含量对碱激发地聚物反应进程及强度影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- WANG Zishuai. Influence of water and salt content on the react process and strength of alkali-activated geopolymer[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [21] 郭志坚, 李文凯. 碱激发矿渣/粉煤灰复合混凝土性能研究[J]. 中外公路, 2022, 42(5): 216-220.
- GUO Zhijian, LI Wenkai. Study on properties of alkali activated slag/fly ash composite concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5): 216-220.
- [22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 通用硅酸盐水泥: GB 175—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Common portland cement: GB 175—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.