

粉煤灰-偏高岭土地质聚合物混凝土的性能研究

李文涛¹, 王彩萍¹, 曹红红^{1,2}, 渠永平¹, 焦伟洲³, 孙学良⁴, 李亚敏⁵

(1. 中北大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030051;

2. 工业固废协同处置与低碳化利用山西省技术创新中心, 山西 晋城 048000;

3. 中北大学 化学与化工学院, 山西 太原 030051; 4. 中规院(北京)规划设计有限公司, 北京 100044;

5. 长治市排水事务中心, 山西 长治 046000)

摘要: 为了解决粉煤灰地质聚合物混凝土早期强度较弱, 后期强度增长缓慢的问题, 本文以偏高岭土与粉煤灰为主要原料设计制备了固废地质聚合物混凝土, 并通过正交试验, 研究了水玻璃模数、碱含量、粉煤灰与偏高岭土的比例、减水剂掺量等4个因素对地质聚合物混凝土工作性能与力学性能的影响, 并对其机理进行了分析。结果表明: 最优配比为硅酸钠占比为45%, 粉煤灰与偏高岭土的比为1:1, 水胶比为0.55, 砂率为0.5, 水玻璃模数为1.4, 萘系减水剂掺量为1.2%。该配比下的混凝土相较于粉煤灰地质聚合物混凝土早期强度高, 后期强度增长率高, 28 d强度增长率达106%。偏高岭土地质聚合物混凝土的抗压强度的增长, 是因为偏高岭土中的石英和莫来石与水玻璃溶液发生地聚反应, 生成了无定型网状结构的钠沸石($\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。

关键词: 粉煤灰; 偏高岭土; 地质聚合物混凝土; 力学性能

中图分类号: U416.216 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2023.04.0013

引用格式: 李文涛, 王彩萍, 曹红红, 等. 粉煤灰-偏高岭土地质聚合物混凝土的性能研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(1): 124-132.

LI Wentao, WANG Caiping, CAO Honghong, et al. Study on performance of fly ash-metakaolin base geopolymer concrete[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(1): 124-132.

Study on Performance of Fly Ash-Metakaolin Base Geopolymer Concrete

LI Wentao¹, WANG Caiping¹, CAO Honghong^{1,2}, QU Yongping¹, JIAO Weizhou³,
SUN Xueliang⁴, LI Yamin⁵

(1. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Provincial Technology Innovation Center of Collaborative Disposal and Low-Carbon Utilization of Industrial Solid Waste, Jincheng 048000, China;

3. School of Chemistry and Chemical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

4. CAUPD Beijing Planning & Design Consultants Ltd., Beijing 100044, China;

5. Changzhi Drainage Affairs Center, Changzhi 046000, China)

收稿日期: 2023-04-13

基金项目: 山西省重点研发计划项目(202102090301024); 山西省重点研发计划项目(202102090301025); 山西省重点研发计划项目(2022ZDYF024); 长治市海绵示范城市建设相关技术研究; 山西省基础研究计划项目(20210302123049); 山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QE108)

作者简介: 李文涛(1999-), 男, 硕士, 主要从事无机非金属材料方面的研究。

通信作者: 渠永平(1989-), 男, 副教授, 博士, 主要从事建筑材料和固体废弃物的资源化利用方面的研究。E-mail: quyongping1989@163.com。

Abstract: In order to solve the problem of weak early strength and slow growth in later strength of fly ash based geopolymer concrete, this paper designed and prepared solid waste based geopolymer concrete using metakaolin and fly ash as the main raw materials. Through orthogonal experiments, the effects of four factors, including water glass modulus, alkali content, ratio of fly ash to metakaolin, and water reducer dosage, on the performance and mechanical properties of geopolymer concrete were studied, and its mechanism was analyzed. The results show that the optimal ratio is sodium silicate percentage of 45%, fly ash to metakaolin of 1:1, water cement ratio of 0.55, sand ratio of 0.5, water glass modulus of 1.4, and naphthalene based water reducer dosage of 1.2%. The concrete under this ratio has higher early strength and a larger growth rate in later strength compared with fly ash based geopolymer concrete, with a strength growth rate of 106% after 28 days. The increase in compressive strength of metakaolin geopolymer concrete is attributed to the geopolymerization reaction of quartz and mullite of metakaolin with water glass solution, resulting in the formation of amorphous network structured sodium zeolite ($\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Key words: fly ash; metakaolin; geopolymer concrete; mechanical properties

0 引言

粉煤灰与偏高岭土是两种重要的固体废弃物^[1]。粉煤灰大量堆积,不仅占用土地资源,也严重污染环境^[2]。另外,随着煤系高岭土产业的蓬勃发展,偏高岭土的堆积也引起了越来越广泛的关注^[3]。

地质聚合物是一种由硅铝质无机原料通过矿物缩聚生成的无定形网状结构的胶凝材料,主要由硅氧四面体与铝氧四面体聚合而成,内部以离子键和共价键为主,范德华键为辅^[4]。与传统的胶凝材料水泥相比,地质聚合物无需煅烧,而且大部分具有火山灰活性的固体废弃物都可以作为地质聚合物的原料,因此具有绿色低碳的优点^[5]。薛耀东^[6]研究了不同等级粉煤灰地质聚合物的性能,最后发现 I 级粉煤灰性能最好。张凤英等^[7]将粉煤灰作为胶凝材料,发现球磨时间为 80 min 时性能最好,7 d 抗压强度达到了 31.66 MPa。陈忠清等^[8]将炉渣和粉煤灰作为胶凝材料,炉渣掺量为 30%,当碱激发剂掺量为 40%,水玻璃模数为 1.4,水固质量比为 0.29 时,28 d 抗压强度最高,为 35.4 MPa。易龙生等^[9]以粉煤灰为主要原料,在粉煤灰掺量 100%、水玻璃模数 1.2、水玻璃掺量 8%、水胶比 0.35、养护温度 10 °C 的条件下,地质聚合物凝结时间为 114 min,3 d 抗压强度为 23 MPa。刘泽等^[10]以矿渣和粉煤灰为主要原料,Si/Al 为 1.49,制备的地质聚合物混凝土扩展度最高可以达到 175 mm。Alcan 等^[11]以粉煤灰为主要原料,发现粗骨料的尺寸在 12.5~25 mm 时,地质聚合物混凝土的 28 d 抗压强度可以达到 36 MPa。Lee 等^[12]以粉煤灰为胶凝材料,Si/Al 为 1.5,制备的地

质聚合物 28 d 最高强度可以达到 26.4 MPa。Alanazi 等^[13]以偏高岭土地质聚合物维护路面,发现高岭土地质聚合物 24 h 固化强度低,3 d 强度达到了 16.32 MPa。Kaya 等^[14]以赤泥和偏高岭土为主要材料制备了地质聚合物混凝土,发现偏高岭土地质聚合物混凝土的强度最高,达到了 51.5 MPa,但随着赤泥的参加,地质聚合物混凝土的强度在不断减小。易鸣等^[15]研究了偏高岭土地质聚合物的配合比,发现在偏高岭土 130 g、水玻璃模数 1.0、碱当量 11%、液固比 0.31 的配比时,地质聚合物 3d 强度达到了 53.7 MPa。

综上所述,粉煤灰地质聚合物具有较低的早期强度,但是它的后期强度增长较为迅速,可达普通硅酸盐混凝土的 2/3。偏高岭土地质聚合物具有很高的火山灰活性,有很高的早期强度,3 d 强度能达到 50 MPa 以上,但是它的后期强度增长缓慢,仅为普通硅酸盐混凝土的 1/4。基于此,本文以偏高岭土和粉煤灰为主要原料制备了粉煤灰-偏高岭土地质聚合物混凝土,对其工作性能和力学性能进行了研究。同时,使用扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)进行了微观形貌和胶凝物质转化规律的分析。

1 试验

1.1 主要试验材料

1) 偏高岭土, $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$, 山西金宇科林科技有限公司(忻州), 型号 90B, 白度 86%, 吸油值 72, 细度 500 目(约 30 μm), 煅烧温度 850 °C, 化学组成如表 1 所示。

表1 偏高岭土的化学组成

Tab.1 Chemical composition of metakaolin

组成	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	水分
质量分数/%	42.5	55	0.5	1.5	0.5

2) 粉煤灰,太钢火力发电厂,二级灰,细度45 μm筛余21.4%,活性指数83%,化学组成如表2所示。

表2 粉煤灰的化学组成

Tab.2 Chemical composition of fly ash

组成	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	TFe	LOI
质量分数/%	31.70	50.77	1.66	0.77	5.06	5.31

图1为粉煤灰的X射线衍射图谱。由图1可知粉煤灰主要由玻璃体组成(基线鼓起),仅含有少量的石英SiO₂和硅线石(Al₂O₃·SiO₂)晶体。

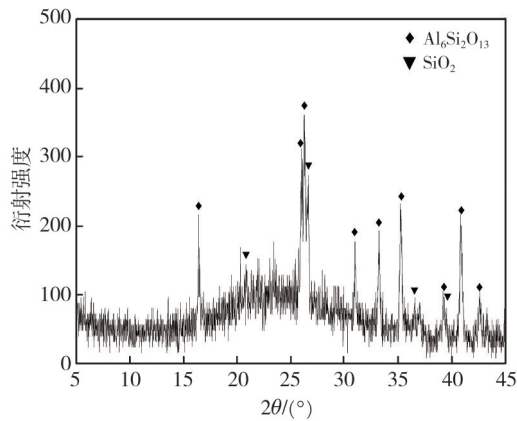


图1 粉煤灰的X射线衍射图谱

Fig.1 X-ray diffraction pattern of fly ash

图2为偏高岭土的X射线衍射图谱。由图2可

知偏高岭土主要由无定形体组成(基线鼓起),仅含有少量的石英SiO₂和莫来石(3Al₂O₃·2SiO₂)晶体。

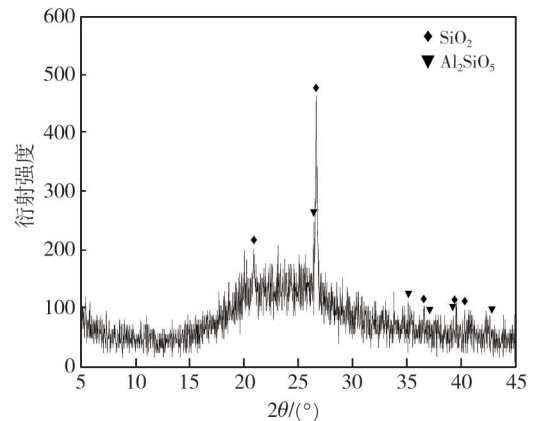


图2 偏高岭土的X射线衍射图谱

Fig.2 X-ray diffraction pattern of metakaolin

3) 水玻璃,山西交城县东街兴旺水玻璃厂。Na₂O·nSiO₂, SiO₂的质量分数为27.9%,体积质量为1 375 kg/m³,模数n=3.18。

1.2 试验方案

1.2.1 最佳配合比的确定

采用正交试验方法,考察水玻璃模数、碱质量分数、粉煤灰与偏高岭土的比例、减水剂掺量等4个因素对地质聚合物混凝土性质的影响,每个因素设3个水平,各因素的水平取值见表3。选用L9(3⁴)正交试验表,考核指标包括3d强度、7d强度、扩展度以及凝结时间。在表3所示的水平因素表基础上,设计了一组正交试验配比,详见表4。

表3 水平因素

Tab.3 Horizontal factors

水平	因素A(水玻璃模数)	因素B(碱质量分数)/%	因素C(<i>m</i> _{粉煤灰} : <i>m</i> _{偏高岭土})/%	因素D(减水剂掺量)/%
1	1.0	8	65:35	0.9
2	1.2	6	50:50	1.2
3	1.4	4	35:65	1.5

注:碱质量分数是指碱激发剂中氧化钠的质量与粉料的质量之比。

表4 正交试验配比

Tab.4 Orthogonal test proportioning

序号	偏高岭土	粉煤灰	水玻璃	火碱	水	砂	5~10 mm石子	减水剂	水胶比
1	129.92	241.28	327	82	0	504	230	3.34	0.55
2	185.6	185.6	245	62	50	504	230	4.45	0.55
3	241.28	129.92	163	41	100	504	230	5.56	0.55
4	185.6	185.6	327	88	0	504	230	5.56	0.55
5	241.28	129.92	245	64	50	504	230	3.34	0.55
6	129.92	241.28	163	43	28	504	230	4.45	0.55
7	241.28	129.92	327	90	0	504	230	4.45	0.55
8	129.92	241.28	245	66	50	504	230	5.56	0.55
9	185.6	185.6	163	45	100	504	230	3.34	0.55

注:水胶比中的“水”是指外加水 and 碱激发剂中的水之和,“胶”是指粉煤灰和偏高岭土的总量,水胶比固定为0.55。

1.2.2 试块的制备

1) 称取一定量的原状水玻璃于铁皮桶内, 加入一定量的片状火碱, 搅拌均匀, 配制要求模数的水玻璃, 冷却后待用;

2) 称取一定量的机制砂和粗细石子放于浅铁锅内, 再称取一定量的偏高岭土和粉煤灰放于铁皮桶内, 称取计量水量加入计量量的萘系减水剂

搅拌溶解均匀;

3) 将粗细石子、偏高岭土与粉煤灰倒入卧式搅拌机干搅拌 3 min, 再加入水玻璃溶液, 搅拌 5 min, 加入减水剂溶液后继续搅拌 5 min, 出料到湿润的不锈钢钢板上, 观察混凝土状态。

图 3 为地质聚合物混凝土试块试验流程图。

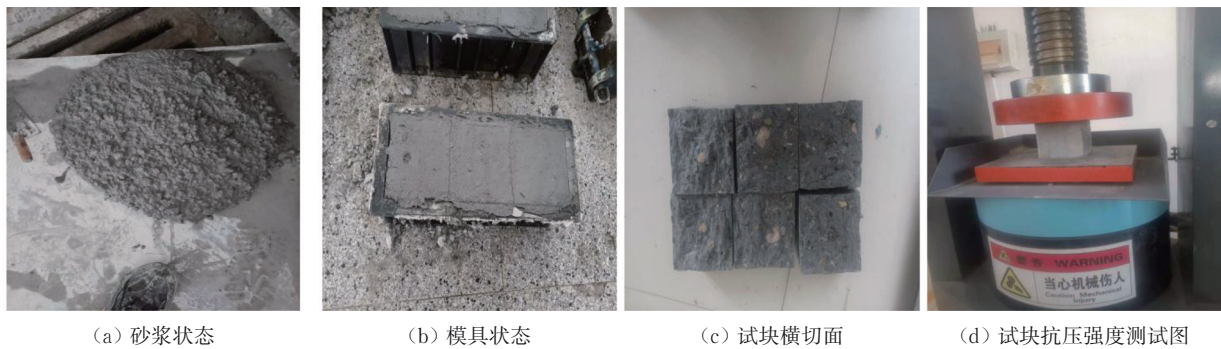


图 3 地质聚合物混凝土试块试验流程图

Fig. 3 Experimental flow chart of geopolymer concrete test blocks

1.2.3 试验方法

抗压强度的试验按照 GB50010《混凝土结构设计规范》进行。扩展度的试验按照 T0532-2020 水泥混凝土拌合物坍落扩展度及扩展时间试验方法进行。凝结时间的试验按照 GB3350.6 规定的标准进行测定。利用日本 JSM-7200F 高速分析热场发射扫描电子显微镜观察试块的表面形貌,

用日本理学 D/MAX-2200PC 型 X 射线衍射仪测定试样的 XRD 图谱, 扫描角度范围为 5°~90°, 扫描速度为 10°/min。

2 试验结果与讨论

本文在正交设计时未考虑因素之间的交互作用, 正交试验结果如表 5 所示。

表 5 正交试验结果

Tab. 5 Orthogonal test results

序号	因素 A (水玻璃模数)	因素 B (碱质量分数)	因素 C ($m_{\text{粉煤灰}}:m_{\text{高岭土}}$)	因素 D (减水剂掺量)	抗压强度/MPa		扩展度/mm	凝结时间/min
					3 d	7 d		
z1	1	1	1	1	25.4	26.5	255	75
z2	1	2	2	2	27.4	30.5	270	93
z3	1	3	3	3	31.4	37.3	235	120
z4	2	1	2	3	28.3	32.3	260	54
z5	2	2	3	1	34.0	41.3	220	84
z6	2	3	1	2	28.7	30.3	290	143
z7	3	1	3	2	27.3	32.4	230	43
z8	3	2	1	3	26.1	27.4	285	80
z9	3	3	2	1	29.3	33.4	225	105

2.1 极差分析

极差代表着该因素的水平变化对实验结果的

影响, 极差越大, 代表该因素越重要。对 3 d 强度、7 d 强度、扩展度以及凝结时间的极差分析结果见表 6~表 9。

表 6 3 d 强度正交试验分析

Tab. 6 Orthogonal test analysis of 3 d strength

序号	因素 A(水玻璃模数)	因素 B(碱质量分数)	因素 C($m_{\text{粉煤灰}}:m_{\text{高岭土}}$)	因素 D(减水剂掺量)
L1	28.1	27	26.7	29.6
L2	30.3	29.2	28.3	27.8
L3	27.6	29.8	30.9	28.6
极差	86(2.7)2	86(2.8)2	86(4.2)1	86(1.8)3

对于地质聚合物混凝土的3 d强度,各因素的重要性排序为 $C>A=B>D$,最优组合为 $A_2B_{2(3)}C_3D_1$;对于地质聚合物混凝土的7 d强度,各因素的重要性排序为 $C>A>B>D$,最优组合

为 $A_2B_{2(3)}C_3D_1$;对于扩展度,各因素的重要性排序为 $C>D>A=B$,最优组合为 $A_2B_2C_1D_2$;对于凝结时间,各因素的重要性排序为 $B>A>C>D$,最优组合为 $A_3B_1C_3D_3$ 。

表7 7 d强度正交试验分析

Tab. 7 Orthogonal test analysis of 7 d strength

序号	因素A(水玻璃模数)	因素B(碱质量分数)	因素C($m_{\text{粉煤灰}}:m_{\text{高岭土}}$)	因素D(减水剂掺量)
L1	31.4	30.4	28.1	33.7
L2	34.6	33.1	32.1	31.1
L3	31.1	33.7	37	32.3
极差	97.1(3.5)2	97.2(3.3)3	97.2(8.9)1	97.1(2.68)4

表8 扩展度正交试验分析

Tab. 8 Orthogonal test analysis of spreading degree

序号	因素A(水玻璃模数)	因素B(碱质量分数)	因素C($m_{\text{粉煤灰}}:m_{\text{高岭土}}$)	因素D(减水剂掺量)
L1	253	248	277	233
L2	257	258	252	263
L3	247	250	228	260
极差	252(10)3	252(10)3	252(49)1	252(30)2

表9 凝结时间正交试验分析

Tab. 9 Orthogonal experiment analysis of setting time

序号	因素A(水玻璃模数)	因素B(碱质量分数)	因素C($m_{\text{粉煤灰}}:m_{\text{高岭土}}$)	因素D(减水剂掺量)
L1	96	57	99	88
L2	93	85	84	93
L3	76	122	82	84
极差	88(20)2	88(65)1	88(17)3	252(9)4

2.2 水玻璃模数分析

图4显示了不同条件下地质聚合物混凝土的早期强度、扩展度和凝结时间的影响。

从图4(a)和图4(b)可以看出,随着水玻璃模数的增加,地质聚合物混凝土的3d和7d抗压强度呈现先增加后大幅下降的趋势。在水玻璃模数为1.2时,其抗压强度达到最大值,分别为30.3 MPa和34.6 MPa。这是因为随着水玻璃模数的增加,引入的硅酸根阴离子增加,从而提高了早期强度。然而,当模数过大时,会导致水玻璃溶液的碱性降低,偏高岭土的溶解速度减慢,从而对早期抗压强度的增长产生一定的抑制作用。相比之下,扩展度和凝结时间对水玻璃模数的影响较小(见图4(c)和图4(d))。因此,可以看出水玻璃模数对于地质聚合物混凝土的早期抗压强度影响较为重要,最佳选择为中间值L2(1.2)。

2.3 碱质量分数分析

由图4(a)和图4(b)可知,随着碱质量分数的不断降低,地质聚合物混凝土的3d和7d抗压强度均呈现上升的趋势,这是因为硅酸根离子达到饱和状

态时,多余的硅酸根离子会破坏反应过程与氢键,所以早期抗压强度不断升高。由图4(c)和图4(d)可知,随着氧化钠占粉料比例的不断降低,扩展度影响变小,而凝结时间呈现直线上升的趋势,相比普通硅酸盐水泥,凝结时间缩短近1倍。根据2.1节极差分析可以看出碱质量分数对凝结时间的影响最大,而对于地质聚合物混凝土而言,凝结时间越短越好,因此最佳选择为最大值L1(45%)。

2.4 粉煤灰与偏高岭土比例分析

由图4(a)和图4(b)可知,随着粉煤灰与高岭土比例的不断减小,地质聚合物混凝土的3d和7d抗压强度呈现显著上升的趋势,这是由于偏高岭土有更高的火山灰活性,会加速反应进程。由图4(c)和图4(d)可知,随着粉煤灰与高岭土比例的不断减小,扩展度呈现大幅下降的趋势,这是由于偏高岭土相较于粉煤灰的形状不规则且比表面积要更大,从而导致了它不具有粉煤灰的“滚珠”润滑作用,相反会由于它而增大胶凝材料之间的摩擦力而降低流动扩展度。由2.1节极差分析可以看出粉煤灰与高岭土比例对早期强度和扩展度的影响最大,但是由于随着粉煤灰与高岭土比

例的不断降低,早期强度和扩展度的影响趋势相

反,所以最佳选择为中间比例L2(50:50)。

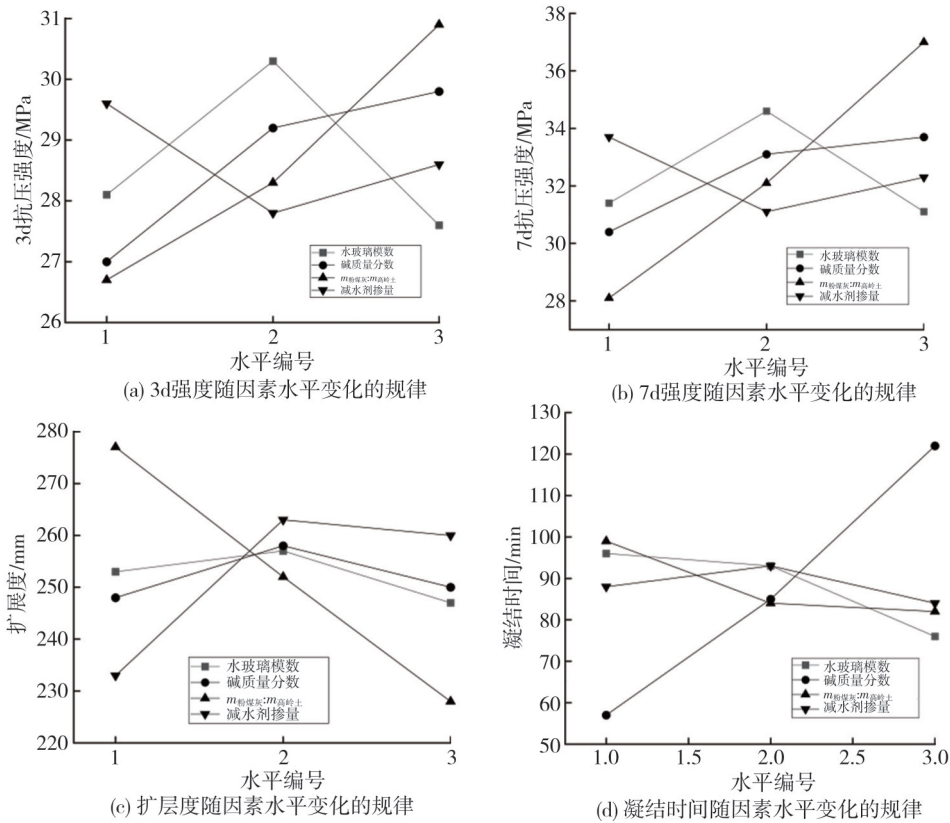


图4 各因素不同的水平条件对考察指标的影响

Fig. 4 The influence of different level conditions of each factor on the inspection index

2.5 减水剂掺量分析

由图 4(a)和图 4(b)可知,随着减水剂掺量不断升高,地质聚合物混凝土的 3 d 和 7 d 抗压强度呈现先减小后增大的趋势。由图 4(c)和图 4(d)可知,随着减水剂掺量不断升高,扩展度与凝结时间呈现先增大后减小的趋势。由 2.1 节极差分析可以看出减水剂掺量对扩展度的影响较大,所以最佳选择为掺量 L2(1.2%)。

2.6 对比分析

综上所述,对于偏高岭土-粉煤地质聚合物混凝土,最优配比为水胶比为 0.45,砂率为 0.5,水玻璃的模数为 1.2,氧化钠占粉料的比例为 45%,粉煤灰与偏高岭土的比例为 50:50,1.2% 掺量的奈系高效减水剂。在最优配比下,对比分析了粉煤灰基与偏高岭土-粉煤地质聚合物混凝土时的抗压强度,结果如表 10 所示。

由表 10 可知,偏高岭土-粉煤地质聚合物混凝土相较于粉煤灰地质聚合物混凝土的强度有显著增长,尤其是后期强度增长率更大,其中 3 d 和 7 d 强度的增长率分别为 11.6% 和 47.9%,

28 d 的强度为 48.9 MPa,增长率达到到了 106%。

表 10 粉煤灰基与偏高岭土-粉煤灰地质聚合物混凝土的抗压强度
Tab. 10 Compressive strength of fly ash based and metakaolin fly ash based geopolymer concrete

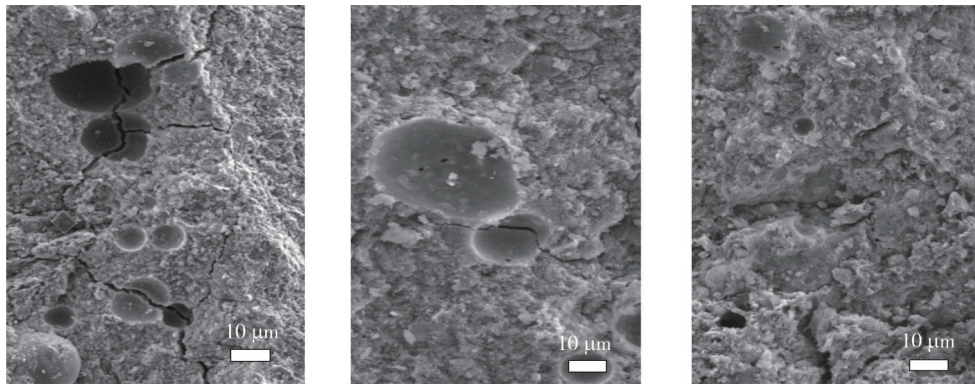
时间/d	粉煤灰地质聚合物 混凝土抗压强度/MPa	偏高岭土-粉煤地质聚合物 混凝土抗压强度/MPa
3	28.22	31.5
7	24.88	36.8
28	23.64	48.9

3 混凝土微观形貌及反应机理分析

3.1 SEM 分析

根据 2.4 节粉煤灰与偏高岭土比例分析的结果可知,粉煤灰与偏高岭土比例是地质聚合物混凝土早期强度与扩展度最重要的影响因素,为此对粉煤灰与偏高岭土不同比值的样品进行 SEM 分析。

图 5 展示了在 7 d 内,粉煤灰与偏高岭土不同比例的样品的扫描电子显微镜(SEM)图像。其中,图 5(a)展示了粉煤灰占比 100% 的样品,图 5(b)展示了粉煤灰与偏高岭土比例为 50:50 的样品,而图 5(c)展示了偏高岭土占比 100% 的样品。



(a) 粉煤灰占比100%(×500) (b) 粉煤灰与偏高岭土比例为50:50(×500) (c) 偏高岭土占比100%(×500)

图5 不同粉煤灰与偏高岭土比值样品的SEM图

Fig. 5 SEM images of samples with different ratios of fly ash to metakaolin

由图5可以看出,随着偏高岭土占比逐渐增加,粉煤灰玻璃微珠和微裂纹的数量不断减少。当偏高岭土占比达到100%时,如图5(c)所示,微裂纹几乎完全消失。这现象可以解释为偏高岭土的火山灰活性高于粉煤灰,导致其水化反应进展较快。在反应的早期阶段,生成了大量具有胶凝活性的水化产物,这提高了胶凝材料对骨料的包裹性和骨料界面的结合,减少了微裂纹的产生。

综上所述,当偏高岭土的比例较低时,可以观察到明显的微裂纹和较多的粉煤灰玻璃微珠。这表明骨料与地质聚合物混凝土水化产物的界面结合较差,孔隙率较高。相比之下,当偏高岭土的比例较高时,微裂纹明显较少,孔隙率降低,骨料与地质聚合物混凝土水化产物的界面结合较好,混凝土结构较致密,强度明显提高。

3.2 XRD分析

图6为粉煤灰地质聚合物的X射线衍射图谱。由图可知,粉煤灰地质聚合物中具有大量未水化完全的石英 SiO_2 和莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)晶体以及水化产物偏硅酸钠($\text{Na}_2\text{Si}_4\text{O}_9$)。

图7中的a和b分别为偏高岭土-粉煤灰地质聚合物混凝土和偏高岭土地质聚合物混凝土的X射线衍射图谱。由图7可知,二者的X射线衍射图基本相同。由图7的X射线衍射图谱可以看出,相比偏高岭土-粉煤灰地质聚合物混凝土,偏高岭土地质聚合物混凝土中,钠沸石($\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)的峰值显著增大,据此推断,地聚反应主要生成了产物钠沸石($\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),它是网状无定型的硅铝凝胶,对应的衍射峰区域为 $25^\circ \sim 30^\circ$ 。它可以加速原料中Si和Al的析出,使地质聚合物混凝土更加密实,从而提高

混凝土的力学强度,混凝土硬化后的孔隙率和新拌浆体扩展度无关。

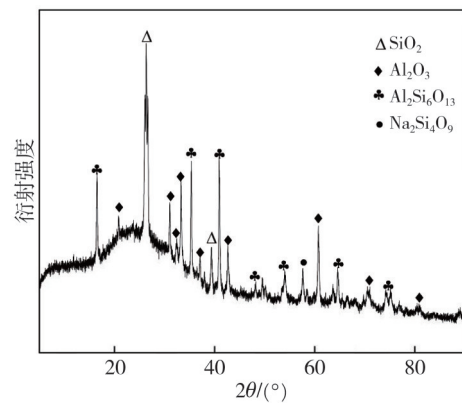


图6 粉煤灰地质聚合物的X射线衍射图谱

Fig. 6 X-ray diffraction pattern of fly ash based geological polymers

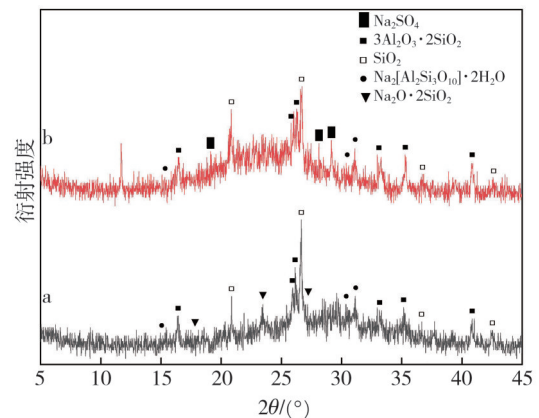


图7 偏高岭土-粉煤灰地质聚合物混凝土和偏高岭土地质聚合物混凝土的X射线衍射图谱

Fig. 7 X-ray diffraction patterns of metakaolin fly ash based geopolymer concrete and metakaolin based geopolymer concrete

4 结论

1) 实验结果表明,偏高岭土-粉煤灰地质聚合物混凝土的最佳配比:水胶比为0.55,砂率为

0.5, 碱含量为8%, 水玻璃的模数为1.4, 粉煤灰和偏高岭土的比例为50:50, 并加入1.2%的奈系高效减水剂。该配比下的偏高岭土-粉煤灰地质聚合物混凝土相对于粉煤灰地质聚合物混凝土表现出明显的强度增长, 尤其是后期强度的增长更加显著。3 d和7 d的强度分别增长了3.28 MPa和11.92 MPa, 而28 d的强度增长了25.26 MPa, 增长率达到了106%。

2) 从微观形貌观察可以得出结论: 随着偏高岭土含量的增加, 地质聚合物混凝土的抗压强度不断提高, 内部微裂缝减少。这是因为偏高岭土中的火山灰活性更高, 水化反应进行更快。在反应的早期阶段, 生成的定型网状结构中含有钠沸石($\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 对骨料的包裹效果更好。含有较高掺量偏高岭土的混凝土, 其骨料界面结合情况更好, 内部微裂纹较少, 结构更加致密。

参考文献:

- [1] 朱燕. 电力系统粉煤灰综合利用现状分析及前景探讨[J]. 山西电力, 2001(3): 60-62.
ZHU Yan. Status analysis and prospect study of fly ash comprehensive utilization [J]. Shanxi Electric Power, 2001(3): 60-62. (in Chinese)
- [2] 段永泽, 闫寒冰, 张秦燕, 等. 山西省火电厂粉煤灰渣资源综合利用现状及应用前景[J]. 山西电力, 2003(2): 57-59.
DUAN Yongze, YAN Hanbing, ZHANG Qinyan, et al. Applied prospect comprehensive utilization of pulverized coal ash condition of Shanxi fire power plant [J]. Shanxi Electric Power, 2003(2): 57-59. (in Chinese)
- [3] 陈漫, 陈肖汀, 黄腾, 等. 我国煤系高岭土应用现状研究与展望[J]. 矿产综合利用, 2022(6): 11-16.
CHEN Man, CHEN Xiaoting, HUANG Teng, et al. Application status of coal series Kaolin in China [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(6): 11-16. (in Chinese)
- [4] 孙道胜, 王爱国, 胡普华. 地质聚合物的研究与应用发展前景[J]. 材料导报, 2009, 23(7): 61-65.
SUN Daosheng, WANG Aiguo, HU Puhua. Research of geopolymer and its applications and development prospects [J]. Materials Reports, 2009, 23(7): 61-65. (in Chinese)
- [5] 倪文, 王恩, 周佳. 地质聚合物——21世纪的绿色胶凝材料[J]. 新材料产业, 2003(6): 24-28.
- [6] 薛耀东. 以不同等级粉煤灰为原料的粉煤灰地质聚合物的性能研究[J]. 工程与建设, 2022, 36(4): 1147-1149.
- [7] 张凤英, 南辉, 薛彩红. 球磨工艺对粉煤灰活性及地质聚合物抗压强度的影响[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2022, 40(2): 7-13.
ZHANG Fengying, NAN Hui, XUE Caihong. Effect of ball milling process on the activity of fly ash and the compressive strength of geopolymer [J]. Journal of Qinghai University (Natural Science Edition), 2022, 40(2): 7-13. (in Chinese)
- [8] 陈忠清, 陈文清, 吴早生, 等. 炉渣-粉煤灰地质聚合物的制备及性能研究[J]. 非金属矿, 2022, 45(1): 98-101.
CHEN Zhongqing, CHEN Wenqing, WU Zaosheng, et al. Preparation and properties of fly ash based geopolymer with bottom ash [J]. Non-Metallic Mines, 2022, 45(1): 98-101. (in Chinese)
- [9] 易龙生, 许元洪, 赵立华, 等. 粉煤灰地质聚合物凝结时间的影响因素研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(1): 114-117.
YI Longsheng, XU Yuanhong, ZHAO Lihua, et al. Study on the influencing factors for the setting time of fly ash based geopolymer [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(1): 114-117. (in Chinese)
- [10] 刘泽, 程国东, 黄天勇, 等. 粉煤灰-矿渣地质聚合物砂浆性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(6): 1883-1888.
LIU Ze, CHENG Guodong, HUANG Tianyong, et al. Research on properties of fly ash-blast furnace slag based geopolymer mortar [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(6): 1883-1888. (in Chinese)
- [11] ALCAN H G, BAYRAK B, ÖZ A, et al. A comprehensive characterization on geopolymer concretes with low content slag and quartz aggregates: the shielding features [J]. Radiation Effects and Defects in Solids, 2023, 178(7/8): 769-798.
- [12] LEE B, KIM G, KIM R, et al. Strength development properties of geopolymer paste and mortar with respect to amorphous Si/Al ratio of fly ash [J]. Construction & Building Materials, 2017, 151: 512-519.
- [13] ALANAZI H, YANG M, ZHANG D, et al. Bond strength of PCC pavement repairs using metakaolin-based geopolymer mortar [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 65: 75-82.
- [14] KAYA K, SOYER-UZUN S. Evolution of structural characteristics and compressive strength in red mud -

metakaolin based geopolymer systems [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(6): 7406-7413.

- [15] 易鸣, 吴大志, 夏琳玲. 偏高岭土地质聚合物的制备及其抗压强度研究[J]. *粉煤灰综合利用*, 2019, 32(6): 31-35.

YI Ming, WU Dazhi, XIA Linling. Study on preparation and compressive strength of metakaolin geopolymer[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2019, 32(6): 31-3571. (in Chinese)

声 明

本刊已许可中国知网、万方、维普、超星等数据库以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述数据库著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 本刊将按作者说明处理。
