

矿粉-粉煤灰-偏高岭土地聚物的性能研究

李铁铮

(河北地质大学 华信学院,河北 石家庄 050700)

摘要:地聚物是一种环境友好型胶凝材料,具有低能耗、低碳排等优点。采用偏高岭土、粉煤灰和矿渣为前驱体,水玻璃和氢氧化钠的混合物为碱激发剂,制备了一种高强度、微收缩的矿粉-粉煤灰-偏高岭土地聚物。研究了水胶比、碱激发剂的碱含量和模数对地聚物流动性、凝结时间、抗压强度和干缩性能的影响,并结合微观测试手段探讨了复合胶凝体系形成的微观机理。结果表明,水胶比对地聚物流动性、凝结时间与干缩性能的影响最大;碱含量是影响地聚物强度的最显著因素。当水胶比为0.32、碱激发剂的碱含量和模数分别为8%和1.25时,地聚物3 d和28 d抗压强度分别达到了39.0 MPa和62.0 MPa,56 d收缩值稳定在 4.5×10^{-4} 左右。碱激发剂激发粉体活化,溶解形成活性 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 并聚合成凝胶,大量莫来石结构的C-(A)-S-H凝胶与少量的 CaCO_3 晶体相互交织形成致密的硬化结构,从而赋予地聚物高强度、微收缩的性能。

关键词:地聚物;力学性能;干缩性能;机理分析

中图分类号: TQ528.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2025)01-0084-07

地聚物被认为是替代普通硅酸盐水泥最具潜力的绿色胶凝材料之一,它是一种由粉煤灰、矿渣、偏高岭土等矿物掺合料在碱激发剂和外加剂的作用下反应得到的一种由Si、O、Al等以共价键连接成骨架的新型胶凝材料^[1],具有碳排放量低^[2]、快硬早强^[3]、耐腐蚀^[4]等优点。

近年来,许多学者研究了一元、二元地聚物力学性能以及干缩性能的一系列影响因素。许云鹏等^[4]通过制备不同水胶比的偏高岭土地聚物混凝土,建立了地聚物混凝土的立方体抗压强度曲线及其与其他力学性能指标之间的关系。WANG et al^[5]发现,随碱激发剂碱含量和模数的增大,反应初期生成在粉煤灰颗粒表面的Al单体的增加,抑制了地聚合反应,延长了凝结时间。FANG et al^[6]发现,矿渣-粉煤灰基碱激发材料的抗压强度随矿渣粉掺量和NaOH摩尔浓度的增加以及碱激发剂与胶凝剂比的降低而增加,但与水玻璃与NaOH比的关系并不显著。RAVIKUMAR et al^[7]发现较高的碱含量有利于地聚物抗压强度的提升,较高的模数也会使后期强度略有提升,但会导致早期抗压强度的降低,并提出了 Na_2O 和 SiO_2 含量对抗压强度的相关系数。YANG et al^[8]发现偏高岭土地聚物的干缩要大于水泥浆体的干缩;此外,偏高岭土地聚物的干缩会随着碱激发剂模数的降低、激发剂浓度和水胶比的增加而增大。

地聚物自身存在收缩现象导致其体积稳定性较差,且原材料的差异会导致地聚物性能的较大变化。相比于偏高岭土一元地聚物,掺入矿渣能降低浆体流动性,缩短其凝结时间,促进体系在常温下固化^[9],掺入具有微集料效应的粉煤灰可以起到密实填充的作用,提高体系的致密度和均匀性^[10]。此外,截至目前碱激发剂对地聚物性能的影响及内在机理并未形成统一的认识。基于上述分析,将富钙粒状高炉矿渣和硅铝酸盐源偏高岭土、低钙粉煤灰作为复合胶凝体系,水玻璃和NaOH的混合物作为碱激发剂,通过改变水胶比、碱激发剂的碱含量及模数设计正交试验,探究了碱激发剂参数对地聚物力学以及收缩性能的影响,分析复合胶凝体系形成的微观机理,旨在为新型低碳胶凝材料的工程应用提供技术支持。

收稿日期:2024-10-19 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxsbzrb.20240263

作者简介:李铁铮(1989—),男,讲师,研究方向为建筑施工技术。E-mail:247117800@qq.com

李铁铮.矿粉-粉煤灰-偏高岭土地聚物的性能研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2025,38(1):84-90.

1 试验部分

1.1 原材料

矿渣源于石家庄矿渣粉厂(S95,比表面积 $398 \text{ m}^2/\text{kg}$);偏高岭土购自唐山麦迪逊高岭土股份有限公司(纯度 $\geq 96.4\%$,细度 400 目),粉煤灰选自石家庄良工科技有限公司(Ⅱ级粉煤灰,比表面积 $325 \text{ m}^2/\text{kg}$);上述 3 种前驱体的化学成分、XRD 和粒径分布分别见表 1 和图 1。水玻璃(模数 3.3,固含量 40%,比重 1.35,波美度 38°Bé)来自保定化工材料厂,NaOH(分析纯,纯度 $\geq 98\%$)来自君正能源化工集团股份有限公司。

表 1 前驱体的化学组成(质量分数)

组成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	Loss
矿渣	33.18	16.62	35.78	11.320	2.42	—	—	—	—	0.680
偏高岭土	52.08	44.23	0.14	0.084	0.52	0.22	0.16	—	1.22	1.346
粉煤灰	58.80	26.60	3.02	0.870	4.06	0.72	2.72	0.48	—	2.730

1.2 样品制备

1.2.1 碱激发剂的制备

碱激发剂由水玻璃和 NaOH 粉体按照一定比例搅拌混合而成,计算过程如下:设碱激发剂的模数($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)为 1.25,碱含量(Na_2O)为 8%,总量设为 1 000 g, $\text{Na}_2\text{O}:1\,000 \times 8\% = 80 \text{ g}$,设 SiO_2 为 $X \text{ g}$,NaOH 为 $Y \text{ g}$,固体 $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3.3\text{SiO}_2$ 为 $Z \text{ g}$,则 NaOH 和水玻璃用量的计算方法见式(1)~式(4)。

$$\frac{\frac{X}{60}}{\frac{80}{62}} = 1.25 \quad (1)$$

$$3.3 \frac{Z}{260} = \frac{X}{60} \quad (2)$$

$$\frac{Y}{40} + \frac{2Z}{260} = \frac{80}{62} \times 2 \quad (3)$$

$$\text{水玻璃的用量} = \frac{Z}{40\%} \quad (4)$$

1.2.2 地聚物试件的制备与养护

在前期试验基础上,选定矿粉:粉煤灰:偏高岭土的质量比为 4:3:3。以水胶比(A)、碱激发剂的碱含量(B)和模数(C)为变量设计正交试验来制备地聚物,其中水胶比为 0.32、0.36、0.40,碱激发剂的碱含量为 5%、8%、11%,碱激发剂的模数为 1.00、1.25、1.50,具体配比见表 2。

依据 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》和 JC/T 603—2004《水泥胶砂干缩试验方法》标准制备抗压强度试件和收缩试件,养护 24 h 拆模后,再放入标养箱中养护至所需龄期。

表 2 碱激发剂参数正交配比

编号	水胶比	碱含量/%	模数	编号	水胶比	碱含量/%	模数
D-1	0.32	5	1.00	D-6	0.36	11	1.00
D-2	0.32	8	1.25	D-7	0.40	5	1.50
D-3	0.32	11	1.50	D-8	0.40	8	1.00
D-4	0.36	5	1.25	D-9	0.40	11	1.25
D-5	0.36	8	1.50				

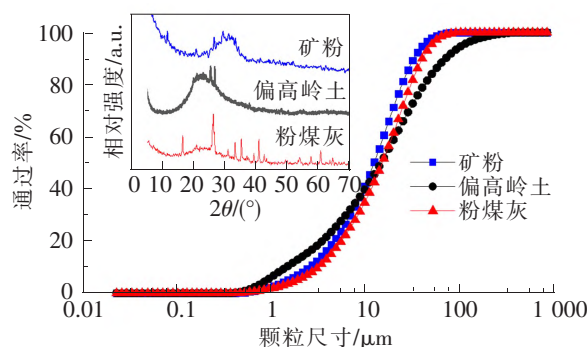


图 1 各原料的 XRD 和粒径分布

1.3 测试方法

参照 GB/T 50448—2015《水泥基灌浆材料应用技术规范》和 GB/T 1346—2011《水泥标准稠度、凝结时间、安定性检验方法标准》进行流动度和凝结时间测定;参照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》标准进行 1、3、7、28 d 抗压强度测试;参照 JC/T 603—2004《水泥胶砂干缩试验方法》标准,选用千分尺测定试件(尺寸 25 mm×25 mm×280 mm)养护各养护龄期的长度变化,进行干缩性能评定。采用 X 射线衍射仪(XRD, D8 ADVANCE)、傅里叶变换红外(FTIR, VATAR-330)分析和扫描电子显微镜(SEM, S-4800)对试验样品进行物相、形貌分析。

2 结果与讨论

2.1 凝结时间与流动度

地聚物浆体试件凝结时间与流动度的测试结果如图 2 所示。不同水胶比下,当碱含量从 5% 增加至 11% 时, D-1 ~ D-3、D-7 ~ D-9 组的初凝、终凝时间均呈现增长趋势,而 D-5 组的终凝时间则长于 D-4、D-6 组,且流动度有所降低。这可能是由于激发剂模数为 1.50 时,可溶性 SiO_2 的增加和激发剂碱度的降低使聚合过程的速率变慢,终凝时间更长^[11],而 Na_2SiO_3 是碱激发剂中最黏稠的组分,也会导致流动性降低。

表 3 给出了水胶比、碱激发剂的碱含量和模数 3 因素对凝结时间及流动度影响的极差分析结果,根据 R 值可知,流动性、凝结时间显著因子的顺序均为 $A > B > C$ 。说明水胶比是影响流动性的最显著因素,这是因为增加水胶比后水分子充分包裹固体颗粒,固体颗粒表面摩擦力减少,地聚物流动性提高,水胶比过高会抑制聚合反应的过程,延长浆体凝结时间。

表 3 凝结时间及流动度正交试验极差分析

因素	初凝时间/min			终凝时间/min			流动度/mm		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K_1	240	276	339	334	389	456	245	270	285
K_2	433	396	382	617	555	529	350	325	340
K_3	479	480	431	638	645	582	380	380	350
R	79.6	68.0	30.7	101.3	85.3	42.0	45	36.7	21.7

2.2 抗压强度

图 3 给出了水胶比、碱激发剂的碱含量和模数参数对地聚物抗压强度影响的测试结果。由图 3 可见, D-1、D-4、D-7、D-8 这 4 组无论是早期还是 28 d 龄期的抗压强度均较低,这可能是由于 4 组配比中碱含量较低,无法提供有利于硅铝酸盐中硅和铝溶出的碱环境,地聚物聚合反应速率变慢,导致成型强度过低^[12]。相对比而言, D-2、D-3、D-5、D-6、D-9 这 5 组早期和后期抗压强度均较高,其中 D-2 组 3 d 和 28 d 抗压强度达到了 39.0 MPa 和 62.0 MPa。

3 d 和 28 d 抗压强度的正交试验极差分析见表 4。

根据 R 值得到因子的主次顺序均为 $B > A > C$ 。可见,碱含量对抗压强度发展作用最为显著。这是由于碱激发剂溶液中碱含量越高,粉体活化程度越高,溶解形成的活性 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 越多,重构再聚合的地聚物凝胶越多,宏观性能表现为抗压强度的增加^[13]。

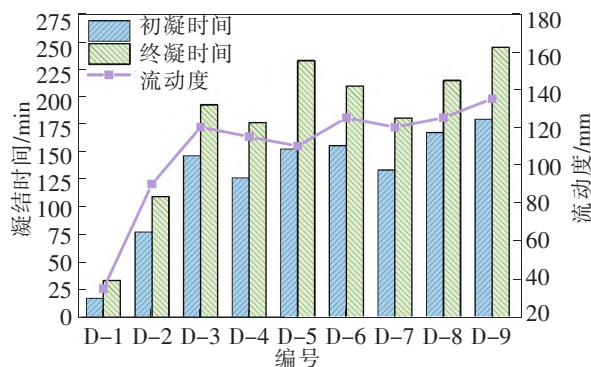


图 2 水胶比、碱激发剂的碱含量和模数对地聚物凝结时间及流动度的影响

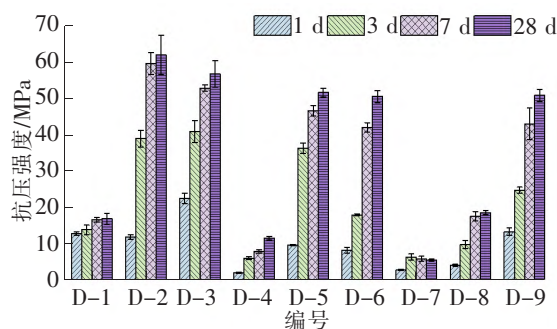


图 3 水胶比、碱激发剂的碱含量和模数对地聚物抗压强度的影响

表4 3 d 和 28 d 抗压强度正交试验极差分析

因素	3 d 抗压强度/MPa			28 d 抗压强度/MPa		
	A	B	C	A	B	C
K_1	94	27	42	136	34	86
K_2	61	85	70	114	132	125
K_3	41	84	84	75	158	114
R	17.7	19.3	14.0	20.3	41.3	13.0

2.3 干缩性能

图4给出了水胶比、碱激发剂的碱含量和模数对地聚物干缩性能影响的测试结果。由图4可见,试件在前7 d 收缩速率呈直线增长,收缩增长速度快,之后逐渐趋于平缓,这主要是前7 d 试件内部相对湿度下降速度快引起的^[14]。其中D-2组收缩值最小,56 d 龄期收缩值稳定于 4.5×10^{-4} 。值得注意的是,当水胶比为0.36时,随着碱含量的增加,D-4、D-5、D-6组56 d 龄期的收缩值分别为 8×10^{-4} 、 1.3×10^{-3} 、 1.5×10^{-3} ;当水胶比为0.40时,随着碱含量的增加,D-7、D-8、D-9组的56 d 龄期收缩值进一步增长,分别为 1.90×10^{-3} 、 2.65×10^{-3} 、 2.75×10^{-3} 。可见,地聚物的收缩值随着水胶比和碱含量的增加而增大。因为水胶比越大,水分蒸发引起表面张力的下降速度越快,收缩也就越大^[15-16];在相同水胶比下,收缩随碱含量增加而增大可能是碱含量增加会加快地聚物聚合反应速率,促使更多水化产物的生成,这些水化产物填充在孔隙中,导致孔隙率和孔隙尺寸的增大,干燥收缩也相应增大,这与文献[17]~文献[20]阐述是一致的。

2.4 XRD 和 IR 分析

图5为28 d 龄期下地聚物不同配合比的XRD图谱,观察到不同配合比产物图谱间整体差别很小,20°~40°之间观察到宽峰,这是粉体和碱性活化剂反应形成的非晶相凝胶^[21]。除此之外,样品中均存在莫来石($\text{Al}_{4.52}\text{Si}_{1.48}\text{O}_{9.74}$, PDF#79-1457)和石英(SiO_2 , PDF#77-1060, $2\theta = 20.7^\circ, 26.6^\circ$)相关峰,这可能是由于未反应粉煤灰的不完全地质聚合,D-2组来自未反应样品的衍射峰略小于其他配比,初步解释了其力学性能优异的现象。此外,观察到 CaCO_3 (CaCO_3 , PDF#2-1652)的衍射峰,推测 CaCO_3 晶体与凝胶相互胶结,不仅有利于提高浆体整体强度,还有利于试件的补偿收缩。

图6显示了样品28 d 龄期400~4 000 cm^{-1} 范围内FTIR的测试结果。重点是Si-O-T(T=Si, Al),

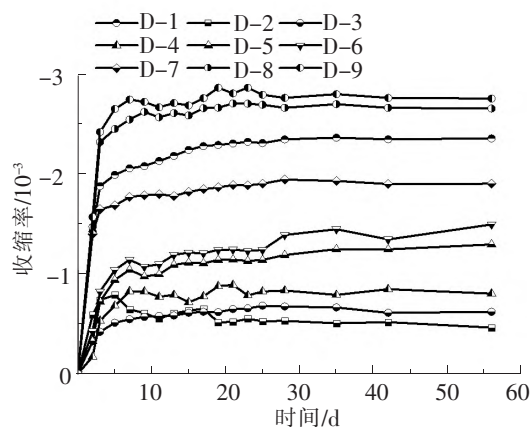


图4 地聚物的干缩性能

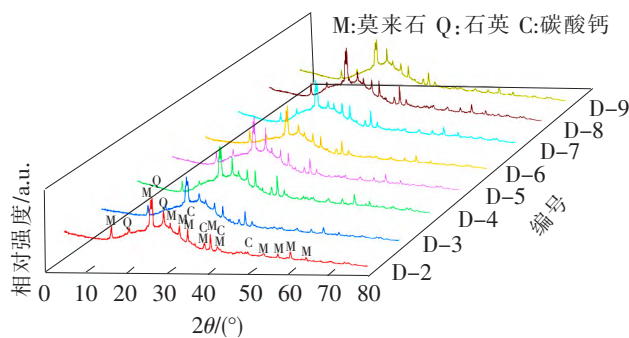


图5 28 d 龄期时地聚物 XRD 图谱

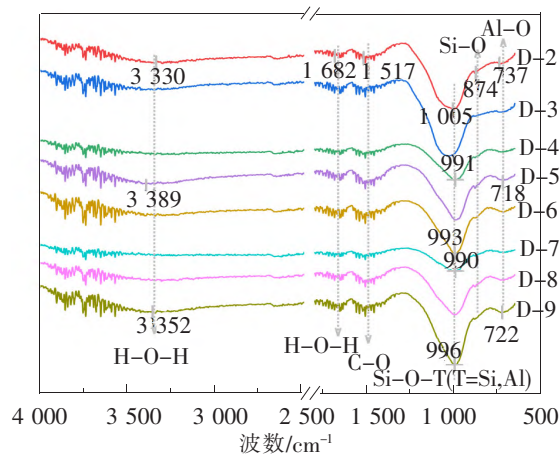


图6 养护28 d 龄期时地聚物 FTIR 光谱

H-O-H 和 C-O 的谱带,其分别对应于反应产物凝胶、化学结合水和 CaCO_3 [22],这与上述 XRD 分析结果相一致。所有样品在约 $1\,000\text{ cm}^{-1}$ 处都有一个主要的吸收峰,对应于前驱体中铝硅酸盐相的溶解而导致的 Si-O-T (T=Si, Al) 键的不对称拉伸振动 [23]。在 880 cm^{-1} 处的小峰可以归属于 Si-O 基团的弯曲振动 [24]。由于原料经历快速溶解,因此认为此处是形成活性 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 单体的情况。在大约 720 cm^{-1} 处的驼峰,与 AlO_4 四面体群中 Al-O 键的对称伸缩振动有关。此外, $3\,400\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,680\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰归因于 H-O-H 键的不对称伸缩和弯曲振动,这表明强氢键之间存在层间水,主要来自 C-(A)-S-H 凝胶的羟基 [25]。在 $1\,500\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰是来自 CaCO_3 的 C-O 键的伸缩振动,说明地聚物在养护过程中可能发生了碳化 [26]。

由图 6 可知,不同水胶比,当碱含量从 5% 增加至 11% 时, Si-O-T 谱带的波数 990 cm^{-1} 移动到 996 cm^{-1} 的更高波数,这是由于来自偏高岭土的更多 Al 相参与反应,从而导致形成具有高聚合度的 C-(A)-S-H 凝胶,且该谱带峰值随碱含量增加而增强,这意味溶解形成的活性 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 多,重构再聚合的地聚物凝胶多,同时解释了抗压强度随碱含量的增加而提高的原因。特别地, D-2、D-3 组在约 $1\,000\text{ cm}^{-1}$ 处的谱带明显更宽,说明其反应程度更大,进一步解释了其力学性能优异的现象。

2.5 SEM 分析

图 7 给出了 28 d 龄期地聚物硬化体的 SEM 图。由图 7(a)、图 7(b) 可见, D-2、D-3 组试样硬化浆体结构较为致密, CaCO_3 微晶(见图 7(a)) 镶嵌正纤维状或箔状 C-(A)-S-H 凝胶结构 [27]。这与 XRD 的分析结果是一致的。相比而言,当水胶比为 0.36 时, D-4 组样品上存在未反应的粉体颗粒(见图 7(c)),产生的胶凝物质少,结构疏松; D-5 组产生了一定的 C-(A)-S-H 胶凝物质、但结构仍存在一定的孔隙(见图 7(d)), D-7、D-8 和 D-9 组样品的微观结构与之相似。SEM 分析与上述力学性能、干缩测试结果是一致的。

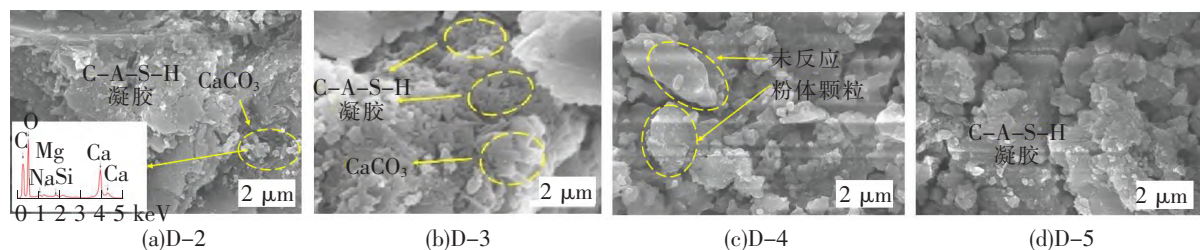


图 7 28 d 龄期地聚物硬化体的 SEM 图

3 结论

本文研究了水胶比、碱激发剂的碱含量和模数对地聚物流动性、凝结时间、抗压强度和干缩性能的影响,所得结论如下:

(1) 水胶比是流动度和凝结时间的最显著因素,流动度随着水胶比的增加而增加。当水胶比为 0.40、碱激发剂的碱含量和模数分别为 11% 和 1.25 时,流动度与凝结时间都为最大值,最大流动度为 135 mm,初凝时间为 179 min,终凝时间为 244 min。

(2) 碱含量是抗压强度的最显著因素,水胶比越高时,碱激发剂碱含量和模数的增加使前驱体的解聚与生成的凝胶逐步达成平衡,从而提高地聚物的抗压强度。当水胶比为 0.32、碱激发剂的碱含量和模数分别为 8% 和 1.25 时,地聚物 3 d 抗压强度达到 39.0 MPa,28 d 抗压强度达到 62.0 MPa。

(3) 地聚物收缩量随着水胶比和碱含量的增加而增大,相同水胶比下,碱含量越高,收缩越大,水胶比为 0.32、碱激发剂的碱含量和模数分别为 8% 和 1.25 时,地聚物收缩值最小,56 d 收缩值稳定于 4.5×10^{-4} 。

(4) 合适的碱激发参数对粉体活化的激发程度最高,溶解形成的活性 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 多,重构再聚合的地聚物凝胶多,大量莫来石结构的 C-(A)-S-H 凝胶与少量的 CaCO_3 微晶体相互交织形成致密的硬化结构,从而赋予地聚物高强度、微收缩的性能。

参 考 文 献

- [1] 简家成, 刘峥, 杨宏斌, 等. 地聚物胶凝材料制备及应用研究现状[J]. 矿产综合利用, 2014, 187(3): 18-22.
- [2] FAROOQ F, XIN J, JAVED M F, et al. Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review [J/OL]. Construction and Building Materials, 2021, 306: 124762[2024-10-19]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124762>.
- [3] ALLAUI D, NADI M, HATTANI F, et al. Eco-friendly geopolymer concrete based on metakaolin and ceramics sanitaryware wastes[J]. Ceramics International, 2022, 48(23): 34793-34802.
- [4] 许云鹏, 王文新, 颜俊, 等. 偏高岭土基聚物混凝土力学性能探究[J]. 工业建筑, 2023, 53: 704-707.
- [5] WANG W L, FAN C C, WANG B M, et al. Workability, rheology, and geopolymerization of fly ash geopolymer: Role of alkali content, modulus, and water-binder ratio[J/OL]. Construction and Building Materials, 2023, 367: 130357[2024-10-19]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130357>.
- [6] FANG G H, HO W K, TU W L, et al. Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature[J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 476-487.
- [7] RAVIKUMAR D, NEITHALATH N. Effects of activator characteristics on the reaction product formation in slag binders activated using alkali silicate powder and NaOH[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(7): 809-818.
- [8] YANG Y W, WANG B W, YUAN Q M, et al. Characterization and fractal analysis of drying shrinkage of metakaolin-based geopolymers under gradually-decreasing humidity [J/OL]. Construction and Building Materials, 2024, 414: 134856[2024-10-19]. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01957>.
- [9] 崔潮, 彭晖, 刘扬, 等. 矿渣掺量及激发剂模数对偏高岭土基聚物常温固化的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(4): 535-542.
- [10] 张冰雪. 矿渣-粉煤灰/偏高岭土基聚物再生混凝土轴压性能试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [11] 刘冀玮, 张祖华, 史才军, 等. 硅灰对高强度地聚物胶凝材料性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1689-1699.
- [12] 何俊峰. 碱含量对水玻璃激发地聚物的激发效果研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [13] 高黎明, 王永宝, 郭天天, 等. 偏高岭土基聚物力学性能研究进展[J]. 混凝土, 2022, 338(2): 116-120.
- [14] KUMARAPPA D B, PEETHAMPARAN S, NGAMI M. Autogenous shrinkage of alkali activated slag mortars basic mechanisms and mitigation methods[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 109: 1-9.
- [15] 万聪聪, 姜天华. 高性能地聚物混凝土早期收缩特性[J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 952-964.
- [16] FRASSON B J, ROCHA J C. Drying shrinkage behavior of geopolymer mortar based on kaolinitic coal gangue [J/OL]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01957[2024-10-19]. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01957>.
- [17] 崔潮, 孙小惠, 王岚, 等. 活性 MgO 对碱-矿渣-偏高岭土基聚物干缩特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(6): 579-586.
- [18] THOMAS R J, LEZAMA D, PEETHAMPARAN S. On drying shrinkage in alkali-activated concrete: Improving dimensional stability by aging or heat-curing[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 91: 13-23.
- [19] SANJAYAN F. Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(9): 1401-1406.
- [20] ANTONIO A, MARIA A, WELLINGTON R. Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(4): 565-574.
- [21] ZHANG P, WANG K X, LI Q F, et al. Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders-A review[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258(C): 120896[2024-10-19]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120896>.
- [22] FU B, CHENG Z, HAN J Y, et al. Understanding the role of metakaolin towards mitigating the shrinkage behavior of alkali-activated slag[J/OL]. Materials, 2021, 14(22): 6962[2024-10-19]. <https://doi.org/10.3390/ma14226962>.
- [23] 荆锐, 刘宇, 张慧杰, 等. 偏高岭土和粉煤灰对碱-矿渣复合胶凝材料的凝结时间及早期力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3237-3243.
- [24] LI Z M, ZHANG S Z, ZUO Y B, et al. Chemical deformation of metakaolin based geopolymer[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 120: 108-118.
- [25] SHI Y X, ZHAO Q X, XUE C H, et al. Preparation and curing method of red mud-calcium carbide slag synergistically activated fly ash-ground granulated blast furnace slag based eco-friendly geopolymer[J/OL]. Cement and Concrete Composites,

- 2023, 139: 104999[2024-10-19]. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104999>.
- [26] ÁLVAREZ-AYUSO E, QUEROL X, PLANA F, et al. Environmental, physical and structural characterization of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 154(1-3): 175-183.
- [27] HAY R, LI J Q, CELIK K. Phase evolution, micromechanical properties, and morphology of calcium (alumino) silicate hydrates C-(A)-S-H under carbonation[J/OL]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 152: 106683[2024-10-19]. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106683>.

Study on Properties of Mineral Powder-fly Ash-metakaolin Geopolymers

LI Tiezheng

(Huaxin College of Hebei GEO University, Shijiazhuang 050700, China)

Abstract: Geopolymer is an environmentally friendly cementing material with the advantages of low energy consumption and low carbon emission. Using metakaolin, fly ash and slag as precursors, water glass and sodium hydroxide mixture as alkali activator, a high strength and micro-shrinkage slag-flyash-metakaolin geopolymer was prepared. The effects of water-binder ratio, alkali content and modulus of alkali activator on the fluidity, setting time, compressive strength and dry shrinkage of the geopolymers were studied. The microscopic mechanism of the composite gelling system was explored by combining micro testing methods. The results show that the water-binder ratio has the greatest influence on the fluidity, setting time and dry shrinkage of the geopolymer. Alkali content is the most significant factor affecting the strength of geopolymer. When the water-binder ratio is 0.32 and the alkali content and modulus of the alkali activator are 8% and 1.25, respectively, the 3 d and 28 d compressive strength of the geopolymer reaches 39.0 MPa and 62.0 MPa, respectively, and the shrinkage value is stable at about 4.5×10^{-4} at 56 d. Alkali activator activates the powder, dissolves to form active $[\text{SiO}_4]^{4-}$ and polymerizes into gels. A large amount of C-(A)-S-H gel are intermixed with a small amount of CaCO_3 crystal to form a dense hardened structure, which endows the geopolymer with high strength and micro-shrinkage properties.

Key words: geopolymer; mechanical properties; dry shrinkage performance; mechanism analysis