

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.02.020

粉煤灰-矿渣基地聚物胶凝材料的 力学性能及其微观结构试验研究

谭雨晴^{1,2}, 洪丽^{1,2,3}, 朱玲玲^{1,2}, 赵丹^{1,2}, 李虹岑^{1,2}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009; 3. 水泥基材料低碳技术与装备教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章研究了粉煤灰与矿渣的质量比、碱激发剂的质量分数和碱激发剂模数对地聚物胶凝材料的水化反应、凝结时间及力学性能的影响,并通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、X-射线能谱仪(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)、傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)等对材料微观结构进行了表征。结果表明:随着粉煤灰与矿渣质量比的不断减小,地聚物胶凝材料的水化反应速率加快,凝结时间缩短,抗压强度和抗折强度不断增大;随着碱激发剂质量分数的增加,地聚物胶凝材料的水化反应速率加快,凝结时间缩短,抗压强度增大,抗折强度先增大后减小;随着碱激发剂模数的增加,地聚物胶凝材料的水化反应速率减慢,凝结时间延长,且抗压强度和抗折强度均不断减小。分析试验结果发现,在粉煤灰与矿渣的质量比为2:8、氧化钠和二氧化硅的质量分数分别为5.25%和4.20%时,28 d地聚物胶凝材料的抗压强度和抗折强度分别达到68.90、11.50 MPa。微观测试结果进一步证明,随着粉煤灰与矿渣质量比的减小、碱激发剂质量分数的增加和碱激发剂模数的减小,SEM表征的微观结构逐渐趋向致密,与宏观力学性能的变化是一致的。同时EDS和FTIR表征结果表明,C-A-S-H凝胶是不同配比地聚物水化产物的主要成分。该研究结果为地聚物胶凝材料的推广和应用提供了理论基础。

关键词:地聚物胶凝材料;力学性能;凝结时间;水化热;微观结构

中图分类号:TU528.044 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)02-0268-10

Experimental study on mechanical properties and microstructure of geopolymer materials based on fly ash and powder

TAN Yuqing^{1,2}, HONG Li^{1,2,3}, ZHU Lingling^{1,2}, ZHAO Dan^{1,2}, LI Hongcen^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China; 3. Engineering Research Center of Low-carbon Technology and Equipment for Cement-based Materials, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract: In this paper, the effects of the ratio of fly ash to powder, the mass fraction of alkali activator and the modulus of alkali activator on the hydration reaction, setting time and mechanical properties of the geopolymer material were studied. The microstructure of the material was characterized by scanning electron microscope (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results show that with the decrease of the ratio of fly ash to powder, the hydration reaction rate of the geopolymer material is accelerated, the setting time is shortened, and the compressive strength and flexural strength are increased. With the increase of the mass fraction of alkali activator, the hydration reaction rate of the geopolymer material is accelerated,

收稿日期:2023-09-21;修回日期:2024-01-05

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1909901)

作者简介:谭雨晴(1994—),女,河南永城人,合肥工业大学硕士生;

洪丽(1985—),女,安徽宣城人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: hongli2014@hfut.edu.cn.

the setting time is shortened, the compressive strength is increased, and the flexural strength is first increased and then decreased. With the increase of the modulus of alkali activator, the hydration reaction rate of the geopolymer material slows down, the setting time prolongates, and the compressive strength and flexural strength decrease continuously. The results show that when the ratio of fly ash to powder is 2 : 8 and the mass fractions of sodium oxide and silicon oxide are 5.25% and 4.20%, respectively, the compressive strength and flexural strength of the 28-day geopolymer material reach 68.90 MPa and 11.50 MPa. The microscopic test results further prove that with the decrease of the ratio of fly ash to powder, the increase of the mass fraction of alkali activator and the reduction of the modulus of alkali activator, the microstructure revealed by SEM gradually tends to be dense, which is consistent with the change of macroscopic mechanical properties. The results of EDS and FTIR show that C-A-S-H gel is the main component of the hydration products of different ratios of geopolymer material. The conclusion of the study provides a theoretical basis for the popularization and application of geopolymer material.

Key words: geopolymer material; mechanical properties; setting time; hydration heat; microstructure

粉煤灰和矿渣是富含活性硅铝质的原材料^[1],为地聚物的制备提供了潜在的可再生资源。作为普通硅酸盐的辅助胶凝材料,地聚物胶凝材料不仅有助于减少废弃物的堆积,同时也能够降低二氧化碳的排放量,这与可持续发展的理念相符^[2-3]。已有研究表明,粉煤灰基地聚物的水化产物通常为具有沸石结构的 N-A-S-H 凝胶,为了达到建筑用途所需的强度,通常需要较高的碱用量和固化温度^[4]。矿渣基地聚物的水化产物以托贝莫来石状结构的 C-A-S-H 凝胶为主,虽然其具有良好的力学性能^[5],但也面临凝结时间过短的挑战^[6]。文献^[7]研究发现,将矿渣适量加入粉煤灰基地聚物中,有助于提升其力学性能,而将粉煤灰加入矿渣基地聚物中,则可延缓凝结时间;文献^[8]探讨矿渣与粉煤灰的比例对矿渣-粉煤灰地聚物力学性能的影响,结果显示掺入 75% 矿渣和 25% 粉煤灰的地聚物具有最佳抗压强度;文献^[9]研究表明,当粉煤灰与矿渣质量比为 1 : 9、水胶比为 0.4 时,地聚物胶凝材料的 28 d 抗压强度可达到 61.68 MPa;文献^[10]研究表明,随着矿渣质量分数的增加,粉煤灰-矿渣地聚物的水化热反应速率和累计放热量增加,对应着更强烈的水化过程和更高的早期抗压强度;文献^[11]研究表明,在粉煤灰-矿渣基地聚物中,水化反应强度愈加剧烈,地聚物凝结时间愈短,早期力学性能越好。因此,通过水化热的测定,可以较好地解释凝结时间和早期力学性能的演变。

文献^[12]研究表明,当粉煤灰-矿渣基地聚物中矿渣质量分数超过 30% 时,地聚物的水化产物主要为 C-A-S-H 凝胶和 N-A-S-H 凝胶的共存状

态;文献^[13]研究表明,在粉煤灰-矿渣基地聚物中,当粉煤灰的质量分数为 20% 时存在 N-A-S-H 凝胶,且随着粉煤灰质量的增加,N-A-S-H 凝胶增加而 C-A-S-H 凝胶减少;文献^[14]研究表明,在碱活化粉煤灰与矿渣质量比为 1 : 1 的混合物中,反应产物中的钠是水溶性的,且未与 C-A-S-H 化学结合。总的来看,碱活化矿渣-粉煤灰地聚物的反应过程比矿渣基或粉煤灰基地聚物更为复杂,导致水化反应产物的确定变得更加困难。尽管目前已经有大量关于粉煤灰-矿渣基地聚物胶凝材料凝结时间和力学性能的研究,但主要集中在单个或 2 个因素对凝结时间和力学性能的影响上。然而,地聚物胶凝材料的性能受多个因素的影响,因此需考虑多个因素对性能的综合影响。

本文研究了粉煤灰与矿渣的质量比、碱激发剂的质量分数和碱激发剂模数对碱活化材料的凝结时间、水化热和力学性能的影响;并采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、X-射线能谱仪(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)、傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)等表征材料微观性能,以分析各反应组分对地聚物性能的影响机制,为地聚物胶凝材料的优化设计、工程应用和可持续发展提供理论支持。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

本文所用矿渣和粉煤灰购于安徽省池州市尚夏建材有限公司,其化学组成由 X 射线荧光光谱分析测得,结果见表 1 所列。

表 1 矿渣和粉煤灰的化学成分及其质量分数

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O
矿渣	27.29	11.68	10.15	3.36	34.52	0.20	3.18	0.37
粉煤灰	44.62	24.52	7.55	0.30	5.74	0.21	1.69	3.52

颗粒的粒径分布由激光粒度仪测得,结果如图 1 所示。从图 1 可以看出,粉煤灰的粒度比矿渣的小。

粉煤灰和矿渣的 SEM 图如图 2 所示,其中粉煤灰中存在大量光滑的圆球颗粒与絮状物,而矿渣主要以无规则块状和片状的无定形分散状态为主。碱激发剂由固体速溶硅酸钠、氢氧化钠和水组成。固体速溶硅酸钠和氢氧化钠均来自河南铂润铸造材料有限公司,其中固体速溶硅酸钠中 Na₂O 和 SiO₂ 的质量分数分别为 6.99% 和 13.71%,氢氧化钠纯度为 99%,均为工业级。

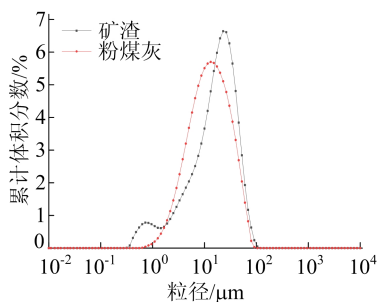


图 1 矿渣和粉煤灰的粒径分布曲线

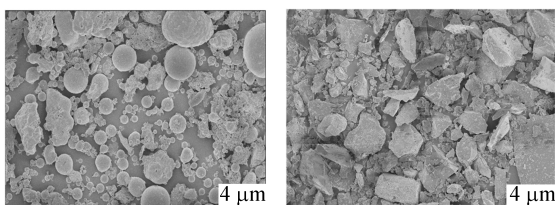


图 2 矿渣与粉煤灰的 SEM 微观形貌

1.2 配合比及试样设计

为研究各原料质量分数对地聚物力学性能的影响,本次试验设计了 8 组配合比,见表 2 所列。试验设计过程中水胶比均为 0.4,碱激发剂中的氧化钠和二氧化硅的摩尔比,即碱激发剂模数,通过加入氢氧化钠来调节。其中:G1~G4 研究粉煤灰与矿渣质量比的影响;G4~G6 研究碱激发剂的质量分数的影响;G5、G7、G8 研究碱激发剂模数的影响。评估这些因素对地聚物凝结时间、抗压强度、抗折强度、水化热和微观结构的影响。基于配合比设计 8 组 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体试件,每组包含 9 个试件,总计浇筑 72 个试件。

表 2 地聚物的配合比设计

试样	$m(\text{粉煤灰}) : m(\text{矿渣})$		$w/\%$		模数
			Na ₂ O	SiO ₂	
G1	5	5	4.38	3.50	0.8
G2	4	6	4.38	3.50	0.8
G3	3	7	4.38	3.50	0.8
G4	2	8	4.38	3.50	0.8
G5	2	8	5.25	4.20	0.8
G6	2	8	6.10	4.90	0.8
G7	2	8	4.20	4.20	1.0
G8	2	8	3.50	4.20	1.2

1.3 试验方法

1.3.1 宏观性能的测定

地聚物凝结时间的测试方法按照 GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》^[15] 的规定进行。地聚物水化热的测定采用合肥工业大学水泥基材料低碳技术与装备教育部工程技术研究中心的等热量热仪。按照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》^[16] 测试各组试件 3、7、28 d 的抗压强度和抗折强度。

1.3.2 微观结构的表征

为进一步揭示各原材料质量分数对地聚物宏观性能的影响,本文采用 ZeissG500 型的 SEM 和 EDS 对地聚物微观结构进行表征,采用 Nicolet IS50 iN10 型的 FTIR 对地聚物水化产物进行检测,波数扫描范围为 4 000~500 cm⁻¹。

2 地聚物胶凝材料的性能试验结果

2.1 各影响因素对地聚物凝结时间的影响

粉煤灰与矿渣的质量比、碱激发剂质量分数和碱激发剂模数对凝结时间的影响情况如图 3 所示。

从图 3a 可以看出,随着粉煤灰与矿渣质量比的减少,地聚物胶凝材料的凝结时间明显缩短。与粉煤灰与矿渣的质量比为 5:5 相比,粉煤灰与矿渣的质量比为 2:8 时,对应地聚物的初凝时间和终凝时间分别缩短了 57.1% 和 48.0%。这主要是由于矿渣具有较高的活性,促使水化产物更早地生成,从而加速了反应过程,缩短了凝结时间^[17-18]。

由图 3b 可知,随着碱激发剂质量分数的增加,

地聚物胶凝材料的凝结时间逐渐缩短。当氧化钠和二氧化硅的质量分数分别由 4.4% 和 3.5% 增大到 5.3% 和 4.2% 时,初凝时间和终凝时间分别缩短了 27.8% 和 38.5%。这是由于增加碱激发剂的质量分数可以增强粉煤灰和矿渣的活化能力,加速其溶解速率,为地聚物的反应提供更多的前驱体,从而加快反应速度,缩短凝结时间^[19]。

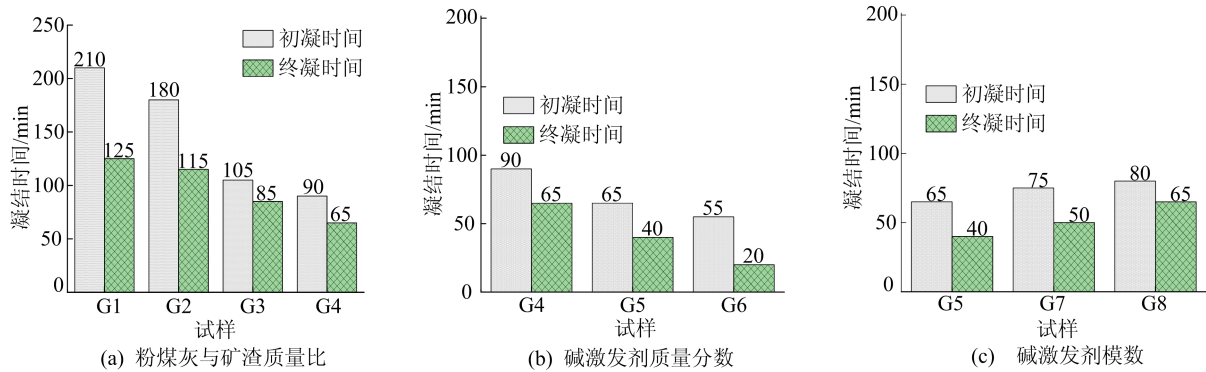


图 3 各影响因素对地聚物凝结时间的影响

2.2 各影响因素对地聚物水化热的影响

通过等温量热法测定地聚物胶凝材料的早期水化反应的放热量和反应速率,测定结果如图 4 所示。由图 4a 可知,随着粉煤灰与矿渣质量比的减小,水化放热量曲线逐渐升高,这表明反应程度逐渐提高,水化产物增多,导致了地聚物胶凝材料的力学性能逐渐提高。这也证实了矿渣水化反应

的放热特性。此外,由图 4b 可知,随着粉煤灰与矿渣质量比的减小,水化放热速率增加,水化放热速率峰值出现的时间提前,表明了凝结时间的缩短。当粉煤灰和矿渣的质量比为 2:8 时,相较于粉煤灰与矿渣质量比为 5:5,水化放热速率峰值出现时间提前了约 20 h,这表明矿渣的活性高于粉煤灰^[21]。

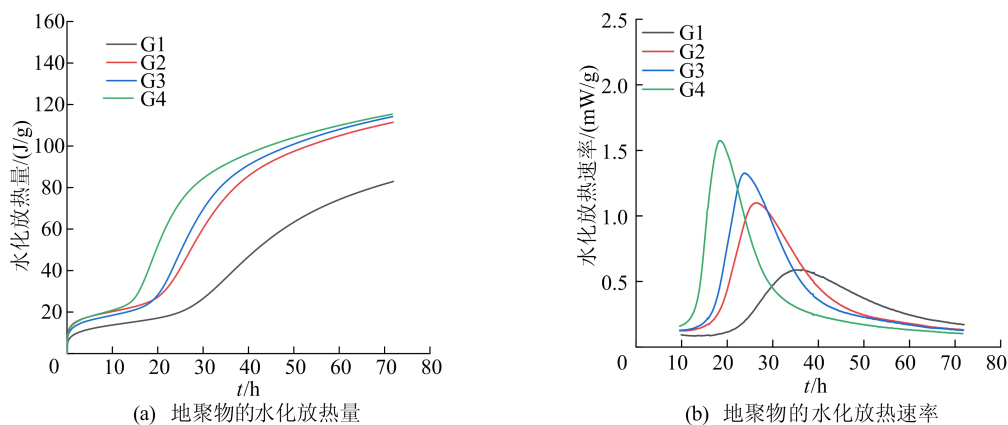


图 4 不同粉煤灰与矿渣的质量比对地聚物胶凝材料的水化放热量和水化放热速率的影响

不同碱激发剂的质量分数对地聚物胶凝材料的水化放热量和水化放热速率的影响如图 5 所示。从图 5a 可以看出,当氧化钠和二氧化硅的质量分数分别由 4.4% 和 3.5% 增大到 5.3% 和 4.2% 时,水化放热量值增加了 12.5%。从图 5b 可以看出,水化放热速率最高峰的出现时间提前了约 5 h。这是由于碱激发剂质量分数越高,对

粉煤灰和矿渣的活化能力越好,反应速率越快,从而导致产生的水化产物越多^[9],地聚物胶凝材料的抗压强度和抗折强度增加,凝结时间缩短。当氧化钠和二氧化硅的质量分数由 5.3% 和 4.2% 增大到 6.1% 和 4.9% 时,水化放速率增加了 11.9%,水化放热速率的最高峰没有出现明显的提前。

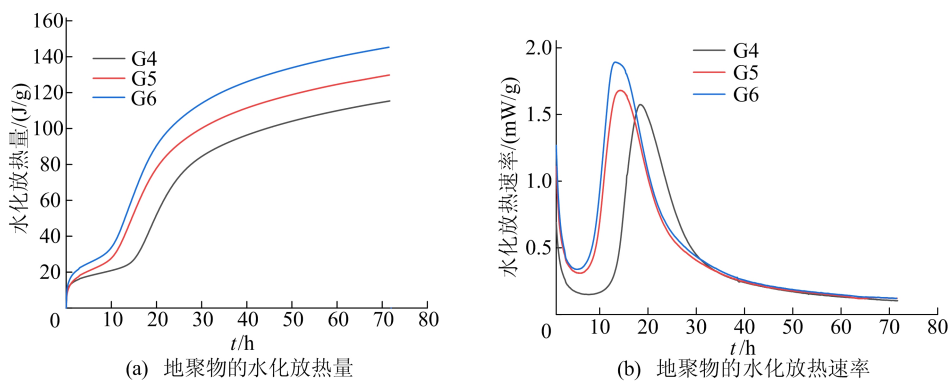


图 5 不同碱激发剂的质量分数对地聚物胶凝材料的水化放热量和水化放热速率的影响

不同碱激发剂模数对地聚物胶凝材料水化放热量和水化放热速率的影响如图 6 所示。

从图 6a 可以看出,在碱激发剂的质量分数一定情况下,碱激发剂模数分别为 0.8、1.0、1.2 时,相应水化放热量分别为 129.8、120.1、109.1 J/g。从图 6b 可以看出,水化放热速率的最高峰出现时间分别为 15、25、38 h,这是由于随着氧化钠质量

分数的降低,体系中的 OH^- 离子质量分数减少,降低了对粉煤灰和矿渣的溶解作用。较少的 OH^- 离子导致释放出较少具有较高连接可能性的单体,进一步导致更少凝胶的产生^[22]。因此,地聚物水化放热速率的最高峰出现时间延迟,水化放热量降低,这与凝结时间的延长和力学性能的降低变化是一致的。

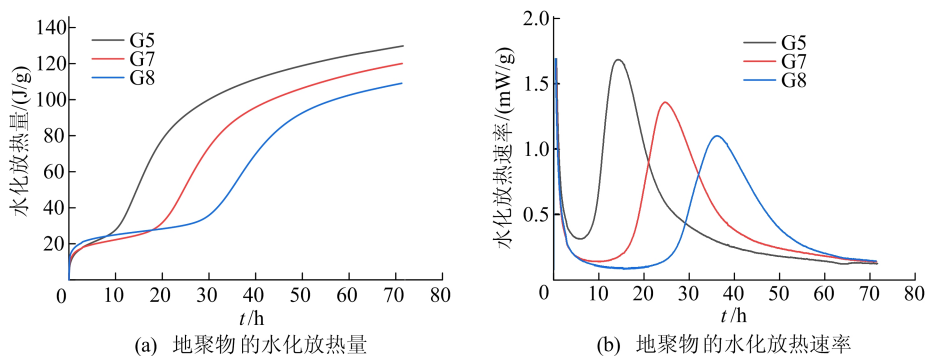


图 6 不同碱激发剂模数对地聚物胶凝材料水化放热量和水化放热速率的影响

2.3 各影响因素对地聚物力学性能的影响

不同粉煤灰与矿渣质量比对地聚物胶凝材料的力学性能影响如图 7 所示。

由图 7 可知,随着粉煤灰与矿渣质量比的减小,地聚物的抗压强度和抗折强度相应地增加。这主要是由于矿渣相较于粉煤灰,具有更高的水化能力,且矿渣中富含大量游离的钙或钙化合物,能够促进大量水化产物的形成^[23]。这些水化产物的生成有助于填充材料中的孔隙结构,从而提高了材料的致密性。

不同碱激发剂质量分数对地聚物胶凝材料的力学性能影响如图 8 所示。由图 8 可知,随着碱激发剂质量分数的增加,地聚物胶凝材料的抗压强度先增大后趋于稳定,抗折强度呈现先增大后减小的趋势。与碱激发剂中氧化钠和二氧化硅质

量分数分别为 4.4% 和 3.5% 的试样相比,质量分数分别为 5.3% 和 4.2% 的试样 3 d 的抗压强度增加了 38.9%,抗折强度增加了 20.0%。然而,当碱激发剂中的氧化钠和二氧化硅的质量分数分别增加到 6.1% 和 4.9% 时,3 d 抗压强度仅增加了 6.2%,而抗折强度降低了 53.8%。这一现象表明,适当质量分数的碱激发剂可以增强地聚物的活化效果^[24]。抗折强度的变化趋势是由于碱激发剂质量分数过大,导致 OH^- 的量较高,在矿渣颗粒的表面形成一层薄薄的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,使 Ca 与 Al 和 Si 反应形成 C-A-S-H 凝胶的能力较弱,因此阻碍了随后的聚合,降低了强度^[22]。

不同碱激发剂模数对地聚物胶凝材料的力学性能影响如图 9 所示。

由图 9 可知,随着碱激发剂模数的增加,地聚

物胶凝材料的抗压强度和抗折强度均呈下降趋势。这说明较低的氧化钠质量分数导致较低的 OH^- 质量分数进一步降低了矿渣和粉煤灰的溶解性。这种溶解性降低不利于释放更多连接性较

高的单体,产生更少的凝胶,而这些凝胶的形成和增加,进一步增强了材料的内聚力和强度,因此随着氧化钠质量分数的降低,地聚物表现出较差的抗压强度和抗折强度^[22]。

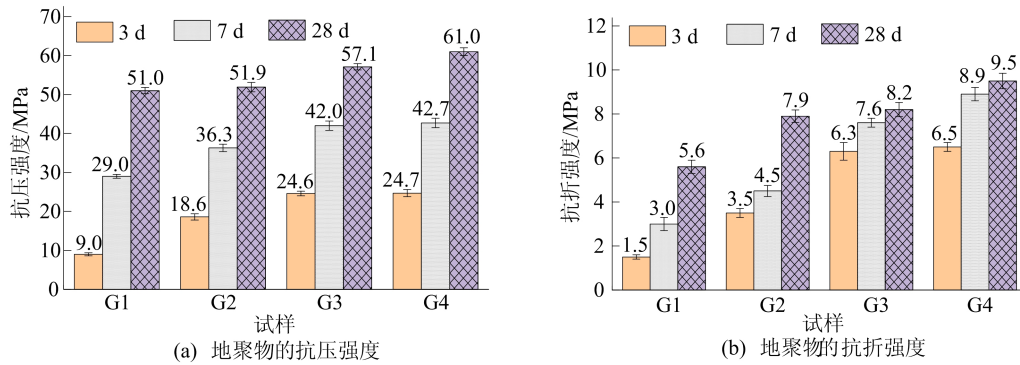


图7 不同粉煤灰与矿渣的质量比对地聚物胶凝材料的力学性能影响

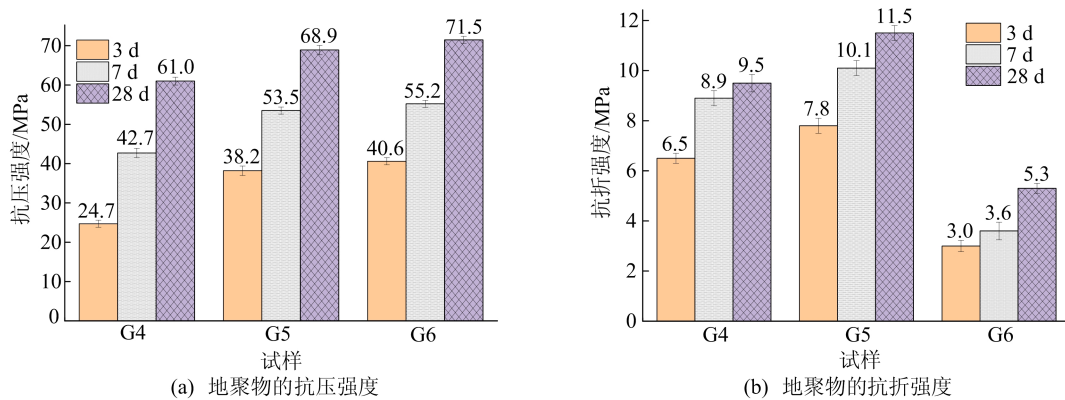


图8 不同碱激发剂质量分数对地聚物胶凝材料的力学性能影响

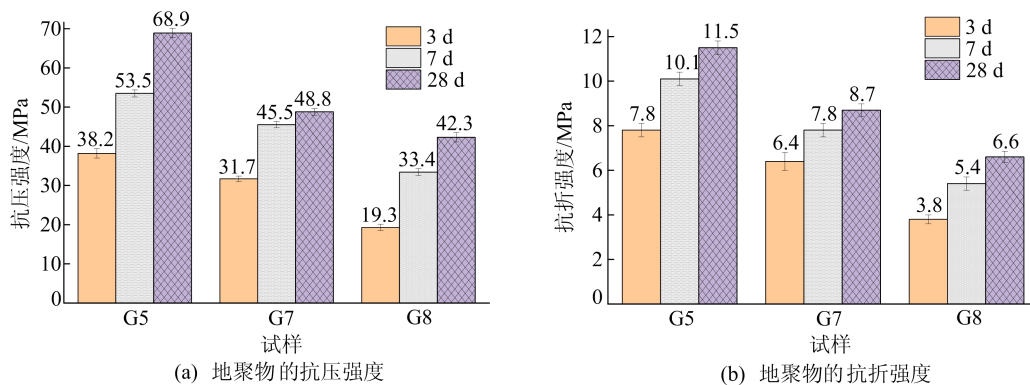


图9 不同碱激发剂模数对地聚物胶凝材料的力学性能影响

3 地聚物胶凝材料的微观结构分析

3.1 SEM表征结果与分析

试样G1~试样G4在3、28 d的SEM图像如图10所示。

从图10可以看出,随着粉煤灰与矿渣质量比

的减小,未反应的粉煤灰和矿渣逐渐减少,与此同时不定型凝胶逐渐增多,地聚物胶凝材料的结构也逐渐变得紧密。这一现象表明矿渣的引入对水化产物生成的积极促进作用。这种微观结构的变化也进一步解释了抗压强度和抗折强度随着粉煤灰与矿渣质量比的减小而增大的规律。与3 d龄

期的试样相比,28 d 龄期的试样结构更加致密,这主要是由于水化反应持续进行,水化产物的生成量逐渐增加,逐渐填充了试样中的孔隙和空隙,导致结构变得更加紧密。

试样 G4~试样 G6 在 3、28 d 的 SEM 图像如图 11 所示。从图 11 可以看出,随着碱激发剂质量分数的增加,未反应的粉煤灰和矿渣颗粒逐渐减少,同时产生了更多薄片状结构的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。

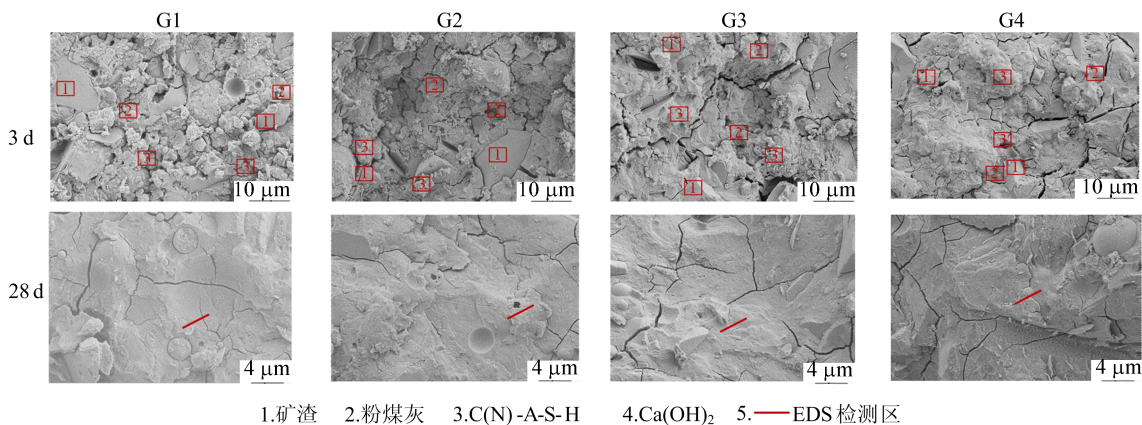


图 10 不同粉煤灰与矿渣质量比的地聚物胶凝材料的 SEM 图像

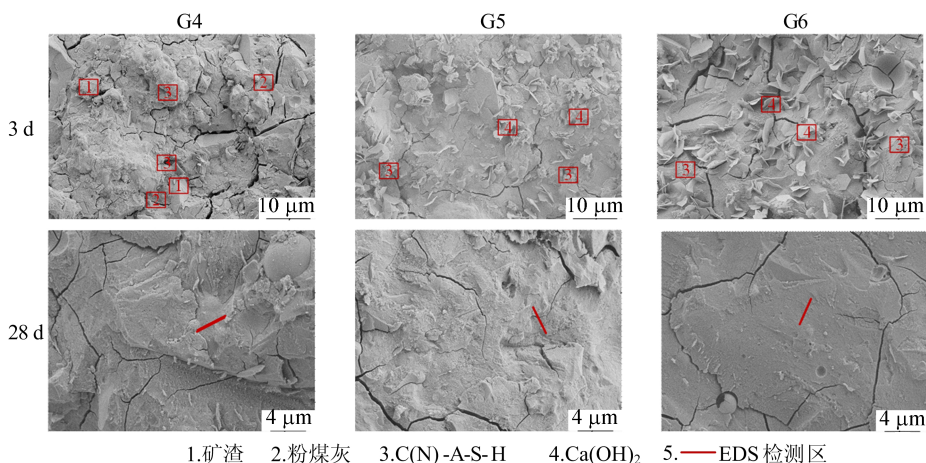


图 11 不同碱激发剂质量分数的地聚物胶凝材料的 SEM 图像

此外,随着 Na_2O 和 SiO_2 质量分数的进一步增加,加强了粉煤灰和矿渣的活化能力,而 SiO_2 质量分数的增加则增加了反应物中凝胶的质量分数^[25]。与碱激发剂中 Na_2O 和 SiO_2 质量分数分别为 4.40% 和 3.50% 的试样相比,其质量分数增加到 5.25% 和 4.20% 的试样中的裂缝和孔洞明显减少,结构更加致密。

然而,当碱激发剂中 Na_2O 和 SiO_2 的质量分数分别增加到 6.10% 和 4.90% 时,虽然产生了更多的水化产物,但裂缝也随之增多。这主要是由于过量的碱激发剂导致水化产物分布不均匀,以及由碱性物质引发的碳化反应所致。这一微观结构的变化进一步解释了抗压强度和抗折强度随着碱激发剂质量分数的变化趋势。其次随着时间的推移,水化产物逐渐增多,地聚物胶凝材料的结构

逐渐变得更加致密。

试样 G5、试样 G7 和试样 G8 在 3、28 d 的 SEM 图像如图 12 所示。

从图 12 可以看出,随着碱激发剂模数的增加,聚合反应所生成的凝胶量减少,未反应的粉煤灰与矿渣颗粒增多,孔洞和裂缝明显增多,导致其结构逐渐变得松散。这种现象可以解释为 Na_2O 质量分数的减少降低了硅和铝的溶解速率,限制凝胶的形成过程,影响了地聚物胶凝材料的水化进程。这一微观结构的变化也进一步说明了抗压强度和抗折强度随着氧化钠质量分数的降低而降低的原因。

与 3 d 试样的结构相比,28 d 试样的结构更加致密,表明后期形成的凝胶逐渐填充了材料的孔隙和空隙,使结构变得更加紧密。

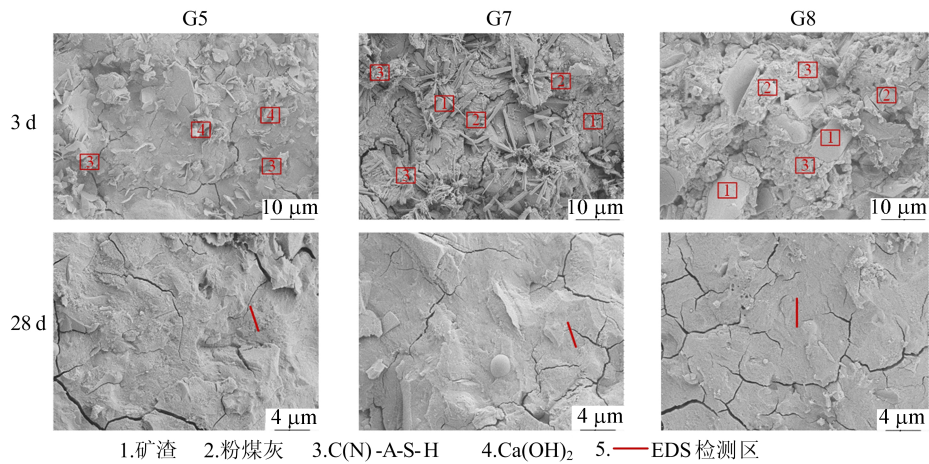


图 12 不同碱激发剂模数的地聚物胶凝材料的 SEM 图像

3.2 EDS 表征结果与分析

对 3.1 节的 28 d 的 SEM 图像中直线标示的

EDS 检测区域进行分析其元素成分的结果见表 3 所列。

表 3 不同试样元素的质量分数

试样	w/%					$m(\text{Si})/m(\text{Al})$	$m(\text{Na})/m(\text{Al})$	凝胶类型
	O	Na	Al	Si	Ca			
G1	46.77	6.63	17.34	13.32	15.94	0.76	0.38	C(N)-A-S-H
G2	47.63	8.27	6.90	16.56	20.64	2.40	1.19	C(N)-A-S-H
G3	53.82	8.14	7.41	13.09	17.54	1.76	1.09	C(N)-A-S-H
G4	46.98	6.01	6.67	14.94	25.39	2.24	0.90	C(N)-A-S-H
G5	46.59	7.79	4.72	15.57	25.33	3.29	1.65	C(N)-A-S-H
G6	48.94	7.50	6.50	15.43	21.64	2.37	1.15	C(N)-A-S-H
G7	53.90	9.24	5.64	13.55	17.67	2.40	1.63	C(N)-A-S-H
G8	41.60	6.25	7.41	15.99	28.75	2.15	0.84	C(N)-A-S-H

在对 8 组地聚物胶凝材料的元素质量分数进行分析,发现不同配合比元素组成主要包括氧、钠、钙、硅和铝。根据硅铝原子比不同,可以将地聚物凝胶大致分别分为硅铝长链(R-PS)、双硅铝长链(R-PSS)和三硅铝长链(R-PSS)^[26]这 3 类,其中 R 代表碱金属元素。由表 3 可知:试样 G5 的 Si 与 Al 质量比为 3.29,表明该凝胶属于 T-PSDS 类型;对于试样 G1,其 Si 与 Al 质量比为 0.76,因此凝胶类型是 R-PS;然而,对于其他试样的 Si 与 Al 质量比约为 2.0,因此凝胶类型可以判定为 R-PSS。由本文 2.3 节的力学性能结果可知,试样 G5 的抗压强度和抗折强度均较好,即 T-PSDS 类型的力学性能高于其他类型^[27]。

根据表 3 中各个元素的质量分数,初步判断这些凝胶的类型可能是 C(N)-A-S-H。文献[17]研究表明,在地聚物的聚合过程中,Na⁺和 Ca²⁺在平衡铝解离产生的负电荷方面扮演关键角色,当钠铝质量比小于 1 时,表示 Na⁺不足以平衡体系中的负电荷,这可能不利于聚合反应中 N-A-S-

H 凝胶的形成,C-A-S-H 凝胶占主导地位,因此可能只包含少量的 N-A-S-H 凝胶。

3.3 FTIR 表征结果与分析

不同配比地聚物胶凝材料在 3、28 d 的 FTIR 谱图如图 13 所示。

在不同配比试样的 667.0 cm⁻¹附近的吸收峰与 T—O—Si(T 表示 Al 或 Si)的弯曲振动相关^[28],这表明不同配比的试样内部玻璃相结构发生了一定程度的解聚。另外,1 415.5 cm⁻¹处的谱带振动与碳酸盐中 O—C—O 键的拉伸模式相关,这表明试样可能发生了碳化反应^[29]。在图 13a 的 953.9 cm⁻¹和图 13b 的 951.2 cm⁻¹附近,可以观察到谱带振动,这与 Si—O—T 的不对称拉伸(T 表示 Si 或 Al)有关,表明[SiO₄]四面体的溶解及其参与了 C-A-S-H 凝胶的形成^[30]。1 645.0 cm⁻¹的谱带由 O—H 弯曲振动引起,表明水化产物中含有结合水^[31]。3 420.0 cm⁻¹处的振动带则源于 H—O—H 振动,表明地聚物中含有 Ca(OH)^[32]。

C-A-S-H 凝胶吸收峰的位置从高波数向低波数移动,可以推断 Si—O—T 的不对称拉伸中更多的 Si—O 被 Al—O 取代,表明地聚物的聚合反应更加充分^[33]。由图 13a 可知,随着粉煤灰与矿渣质量比的减小(试样 G1~试样 G4)、碱激发剂质量分数的增加(试样 G4~试样 G6)以及碱激发剂模数的减小(试样 G5、试样 G7、试样 G8),C-A-S-H 凝胶的吸收峰均向低波数移动,这进一步表明地聚物的聚合反应更加充分,与其抗压强度变化趋势相一致。综合 3 d 到 28 d 的 FTIR 谱图可知,地聚物材料的水化产物在不同龄期中仅发生量的变化,没有新的水化产物生成。这一结果进一步支持了对地聚物材料在不同龄期内水化过程的认识,有助于更好地理解材料的微观结构演变和性能变化。

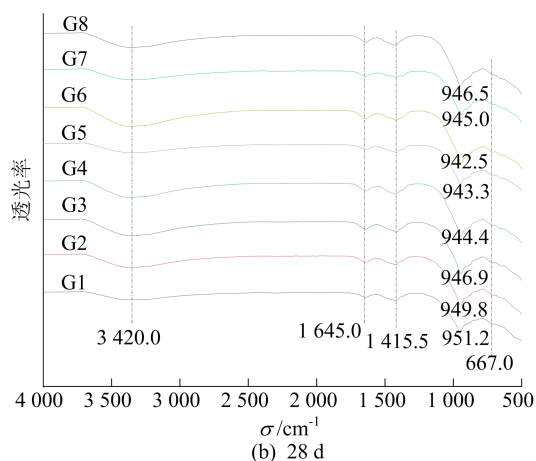
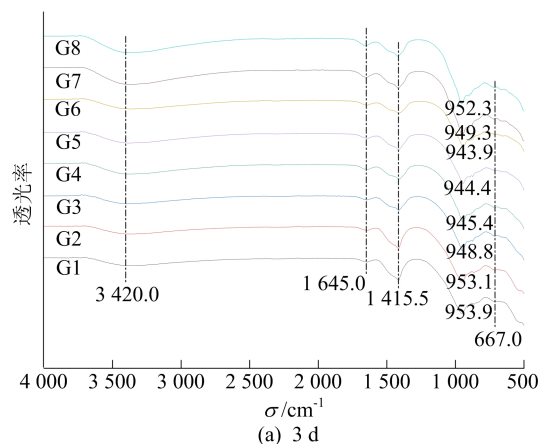


图 13 地聚物胶凝材料的 FTIR 光谱

4 结 论

本文研究了粉煤灰与矿渣的质量比、碱激发剂的质量分数和碱激发剂模数对地聚物胶凝材料的水化反应、凝结时间、抗压强度和抗折强度的影

响。运用 SEM、EDS 和 FTIR 对试样进行表征,揭示了地聚物胶凝材料微观结构的演化和水化凝胶的类型,得出如下结论。

1) 地聚物胶凝材料随着粉煤灰与矿渣质量比的减小,水化反应速率增加,力学性能不断增大,凝结时间不断缩短;当粉煤灰与矿渣质量比为 2 : 8 时,力学性能最好,水化反应速率最快。

2) 当碱激发剂中氧化钠和二氧化硅质量分数分别为 5.25% 和 4.20% 时最佳,抗压强度和抗折强度在 28 d 分别达到 68.90、11.50 MPa,初凝时间和终凝时间分别为 65、40 min。

3) 当粉煤灰与矿渣的质量比为 2 : 8,随着碱激发剂模数的增大,氧化钠质量分数的降低导致水化反应速率的减缓,影响了力学性能的表现和凝结时间的延长。

4) 通过 SEM 表征发现,随着粉煤灰与矿渣质量比的减小、碱激发剂质量分数的增大和模数的减小,地聚物胶凝材料的微观结构裂缝孔洞逐渐减小,结构逐渐致密;其次通过 EDS 和 FTIR 手段分析表明,粉煤灰-矿渣地聚物胶凝材料的水化产物主要为 C-S-A-H 凝胶为主。总之,通过 SEM、EDS 和 FTIR 等手段进行微观结构分析,为解释抗压强度和抗折强度的变化提供了更有力的支持。

[参 考 文 献]

- [1] PROVIS J L. Alkali-activated materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 114: 40-48.
- [2] AMRAN Y H, ALYOUSSEF R, ALABDULJABBAR H, et al. Clean production and properties of geopolymer concrete: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251: 1-27.
- [3] 谢隼伦,钟卿瑜,杨翼玮,等. 偏高岭土-矿渣地聚物孔结构及介质传输性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(6): 2092-2105.
- [4] KUNTHER W F. Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium-silicate-hydrate binders[J]. *Journal of Materials Chemistr*, 2017, 5(33): 1-12.
- [5] SITARZ M, HAGER I. Evolution of mechanical properties with time of fly-ash-based geopolymer mortars under the effect of granulated ground blast furnace slag addition[J]. *Energies*, 2020, 13(5): 1135.
- [6] SHI L N, ZHANG C J, ZHU Z H, et al. A mixture proportioning method for the development of performance-based alkali-activated slag-based concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 93: 163-174.
- [7] SHI X, ZHANG C, WANG X, et al. Response surface methodology for multi-objective optimization of fly ash-GGBS

- based geopolymer mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 315: 1-16.
- [8] EL-HASSAN H, SHEHAB E, AL-SALLAMIN. A effect of curing regime on the performance and microstructure characteristics of alkali-activated slag-fly ash blended concrete [J]. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2021, 10(5/6): 289-317.
- [9] YIGANG L, CUI W, WEI W H, et al. Study of the mechanical properties and microstructure of alkali-activated fly ash-slag composite cementitious materials [J]. *Polymers*, 2023, 15: 1-17.
- [10] RAFEET M S. Effects of slag substitution on physical and mechanical properties of fly ash-based alkali activated binders [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 122: 118-135.
- [11] MACHOWSKA A, ZBIGNIEW K, IWONA W, et al. A study of the early hydration processes and properties of fly ash-slag binders [J]. *Bulletin of Materials Science*, 2019, 42(5): 213.
- [12] OUYANG X, MA Y, LIU Z, et al. Effect of the sodium silicate modulus and slag content on fresh and hardened properties of minerals alkali-activated fly ash/slag [J]. *Minerals*, 2019, 10(1): 15.
- [13] HU X, SHI C, SHI Z, et al. Compressive strength, pore structure and chloride transport properties of alkali-activated slag/fly ash mortars [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 104: 1-10.
- [14] REDDY K, SUBRAMANIAM K V L. Investigation on the roles of solution-based alkali and silica in activated low-calcium fly ash and slag blends [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 123: 1-14.
- [15] 中国建筑材料科学研究总院. 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法: GB/T 1346—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 5-6.
- [16] 中国建筑材料科学研究总院有限公司. 水泥胶砂强度检验方法: GB/T 17671—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 12-13.
- [17] DINESHKUMAR M, UMARANI C. Effect of alkali activator on the standard consistency and setting times of fly ash and GGBS-based sustainable geopolymer pastes [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1-10.
- [18] ALDAWSARI S, KAMPMANN R, HARNISCH J, et al. Setting time, microstructure, and durability properties of low calcium fly ash/slag geopolymer: a review [J]. *Materials*, 2022, 15(3): 876.
- [19] 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.
- [20] 黄华, 郭梦雪, 张伟, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土力学性能与微观结构 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(3): 74-84.
- [21] CHITHIRAPUTHIRAN S, NEITHALATH N. Isothermal reaction kinetics and temperature dependence of alkali activation of slag, fly ash and their blends [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 45: 233-242.
- [22] SUNB, YE G, SCHUTTER G D. A review: reaction mechanism and strength of slag and fly ash-based alkali-activated materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 326: 1-18.
- [23] PRADIP N, PRABIR K S. Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 66: 163-171.
- [24] SHI Z, SHI C, WAN S, et al. Effects of alkali dosage and silicate modulus on alkali-silica reaction in alkali-activated slag mortars [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 111: 104-115.
- [25] 杨世林. 粉煤灰-矿渣地聚物混凝土的制备及其纤维改性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [26] GUO X, SHI H, DICK W. A compressive strength and microstructural characteristics of class c fly ash geopolymer [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(2): 142-147.
- [27] SHA D, PAN B F, SUN Y R. A novel raw material for geopolymers: coal-based synthetic natural gas slag [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 1-14.
- [28] 孙大全, 顾泽宇, 孙硕. 碱激发粉煤灰-硅灰地质聚合物的性能及表征 [J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(5): 1533-1539.
- [29] ZERZOURI M, HAMZAOURI R, ZIYANI L, et al. Influence of slag based pre-geopolymer powders obtained by mechanosynthesis on structure, microstructure and mechanical performance of geopolymer pastes [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 361: 1-11.
- [30] ISMAIL I, BERNAL S A, PROVVIS J L, et al. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 45: 125-135.
- [31] ZHANG J, SHI C, ZHANG Z. Effect of Na_2O concentration and water/binder ratio on carbonation of alkali-activated slag/fly ash cements [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 269(12): 1-14.
- [32] ACHOWSKA A, ZBIGNIEW K. A study of the early hydration processes and properties of fly ash-slag binders [J]. *Bulletin of Materials Science*, 2019, 42(5): 213.
- [33] WEI Z, YAN C J, DUAN P, et al. A comparative study of high- and low- Al_2O_3 fly ash based-geopolymers: the role of mix proportion factors and curing temperature [J]. *Materials and Design*, 2016, 9: 63-74.

(责任编辑 吴亮)