

矿渣与碱用量对地聚合物混凝土物理力学性能的影响

肖涛*, 魏华北, 彭明岭

塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔

收稿日期: 2023年4月25日; 录用日期: 2023年5月15日; 发布日期: 2023年5月30日

摘要

以粉煤灰和矿渣为硅铝质原材料, Na_2SiO_3 与 NaOH 为碱性激发剂制备地聚合物混凝土, 探究粉煤灰与矿渣掺比、碱激发剂用量、砂率等因素对地聚合物混凝土力学性能, 吸水率的影响。研究表明矿渣含量增加, 地聚合物混凝土的力学强度也随之增大, 但吸水率减小, 矿渣含量超过40%后力学强度的增长变缓, 当矿渣含量为80%时力学强度最大。随着碱用量的增加地聚合物混凝土的吸水率增加, 但力学强度先增后减, 碱用量为11%时力学性能最优。随着砂率增加地聚合物混凝土的力学强度先增后减, 当砂率为30%时力学强度最大。

关键词

矿渣, 粉煤灰, 碱用量, 力学性能, 地聚合物

Effect of Slag and Alkali Dosage on Physical and Mechanical Properties of Geopolymer Concrete

Tao Xiao*, Huabei Wei, Mingling Peng

College of Water Conservancy and Building Engineering, Tarim University, Alar Xinjiang

Received: Apr. 25th, 2023; accepted: May 15th, 2023; published: May 30th, 2023

Abstract

Geopolymer concrete was prepared by using fly ash and slag as silicon-aluminum raw materials,

*通讯作者。

文章引用: 肖涛, 魏华北, 彭明岭. 矿渣与碱用量对地聚合物混凝土物理力学性能的影响[J]. 土木工程, 2023, 12(3): 646-653. DOI: 10.12677/hjce.2023.125072

and Na_2SiO_3 and NaOH as alkaline activators. The effects of fly ash and slag ratio, alkali activator dosage and sand ratio on the mechanical properties and water absorption of geopolymer concrete were investigated. The results show that the mechanical strength of geopolymer concrete increases with the increase of slag content, but the water absorption decreases. When the slag content exceeds 40%, the growth of mechanical strength slows down. When the slag content is 80%, the mechanical strength is the largest. With the increase of alkali dosage, the water absorption of geopolymer concrete increases, but the mechanical strength increases first and then decreases. The mechanical properties are optimal when the alkali dosage is 11%. With the increase of sand ratio, the mechanical strength of geopolymer concrete increases first and then decreases. When the sand ratio is 30%, the mechanical strength is the largest.

Keywords

Slag, Fly Ash, Alkali Dosage, Mechanical Properties, Geopolymer

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地聚合物是以来源广泛的富含硅铝质的工业固体废弃物或铝硅酸盐矿物为主要原材料，与碱性激发剂溶液进行复合形成由 $[\text{AlO}_4]$ 和 $[\text{SiO}_4]$ 四面体组成的三维立体结构的硅铝酸盐无机矿物聚合物，其具有强度高、硬化快、渗透率低、耐高温、耐久性优良等优点，应用前景广阔[1] [2] [3] [4] [5]。

国内外学者对地聚合物的性能进行了广泛研究，Komljenovic 等对不同种类的激发剂进行研究，发现相比 NaOH 、 KOH 、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等碱性激发剂， Na_2SiO_3 溶液表现的活化潜力更高，含有溶解的 Si 颗粒，在地聚合过程中更易发生反应[6]。Puligilla 等研究发现矿渣中溶解的钙对早龄期和晚龄期的性能都有显著的影响，而游离钙离子能有效性延长粉煤灰的溶解时间，促进了地聚合物凝胶的形成[7]。Nath 研究表明将矿渣掺入粉煤灰地聚合物中有助于其获得与普通硅酸盐水泥相当的抗压强度，但凝结时间会降低[8]。梁广伟[9]等研究发现矿渣含量增加能够降低地聚合物的强度损失和质量损失，减少孔隙率，有效提高其抗冻性能，其抗冻性能优于硅酸盐水泥。Mallikarjuna 等研究了矿渣掺量、碱胶比、养护条件对地聚合物混凝土抗压强度及和坍落度的影响[10]。杨立荣等人研究了矿渣掺量及水玻璃模数对地聚合物抗压强度的影响发现对同一水玻璃模数，随矿渣掺量的增加，试样的抗压强度也随之增强[11]。丁琴等通过正交试验研究了水胶比，矿渣与粉煤灰掺比与砂率对地聚合物混凝土工作与力学性能的影响发现矿渣与粉煤灰掺比对抗压强度影响最为显著，水胶比次之，而砂率对强度发展几乎没有影响[12]。赵素宁等对粉煤灰地聚合物的水化产物成分及力学性能进行了研究，发现在水化过程中粉煤灰内玻璃体发生了解聚-缩聚反应，主要形成产物是 N-A-S-H [13]。黄华[14]等通过微观分析手段并结合力学性能，地聚合物混凝土的微观结构随着凝胶含量的增加表现出更高的致密性，若反应体系中同时存在 N-A-S-H 、 C-S-H 、 C-A-S-H 凝胶，其微观结构更为致密，力学性能更高。

研究表明以矿渣等量替换粉煤灰，能够明显改善粉煤灰地聚合物的性能，提高其力学强度，碱激发剂配比与含量是地聚合物性能的主要影响因素；目前对于地聚合物物理力学性能的研究主要集中在抗压强度上，对于抗折强度，劈裂抗拉强度与吸水率的研究相对较少，本文以矿渣含量，碱激发剂含量，砂率为变量因素，探究各因素对地聚合物混凝土 28 d 抗压，抗折，劈裂抗拉强度与吸水率的影响，为地聚合

混凝土在工程中推广应用提供一定的数据支持。

2. 试验材料

粉煤灰为 II 级粉煤灰, 矿渣为 S95 级, 均为市售, 其主要化学成分如表 1 所示。粗骨料为破碎卵石 5~20 mm 连续级配; 细骨料为中砂, 细度模数为 2.7。试验采用水玻璃(Na_2SiO_3)与 NaOH 的复合溶液为碱激发剂, Na_2SiO_3 为白色粉末状, 模数为 2.80 ± 0.5 , 其中 SiO_2 为 60.44%, Na_2O 为 21.73%; NaOH 为片状固体纯度 96% 以上。

Table 1. Main components and contents of fly ash and slag powder

表 1. 粉煤灰及矿渣主要成分及含量

化学成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	MgO	Loss
粉煤灰(%)	53.97	31.15	4.16	4.01	0.73	1.01	2.34
矿渣(%)	34.50	17.70	1.03	34.00	1.64	6.01	0.84

3. 试验方案设计

采用单因素多水平试验设计: 其他因素不变, 只改变某一因素。探究矿渣含量(占总硅铝质原材料的百分比): 0%、20%、40%、60%、80%, 碱用量(碱激发剂内 Na_2O 与硅铝质材料质量的比值): 6.5%、8%、9.5%、11%、12.5%, 砂率: 25%、30%、35%、40%、45% 对地聚合物混凝土抗压, 抗折, 劈裂抗拉强度等力学性能的影响规律, 同时探究矿渣掺量及碱用量对地聚合物混凝土吸水率的影响。

地聚合物混凝土的配合比为: 水胶比为 0.35, 硅铝质材料(粉煤灰与矿渣)为 380 kg/m^3 , 粗骨料为 1162 kg/m^3 , 细骨料为 625 kg/m^3 , 水为 133 kg/m^3 , 碱激发剂模数(碱激发剂内 SiO_2 与 Na_2O 的摩尔比)为 1.2 模。当矿渣含量为变量时: 碱用量为 6.5%, 砂率 35%。当碱用量为变量时: 矿渣含量为 20%, 砂率 35%。当砂率为变量时矿渣含量为 20%, 碱用量为 6.5%。地聚合物混凝土试件的制作、养护、工作性能及力学性能测试参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)执行[15]。

4. 试验结果与讨论

4.1. 抗压强度

由图 1 可知地聚合物混凝土的抗压强度随着矿渣含量的增加而增长, 矿渣含量对地聚合物混凝土抗压强度增幅较为明显, 矿渣含量 0% 时地聚合物混凝土的抗压强度较低, 仅为 21.95MPa, 当矿渣含量 80% 时抗压强度最大为 87.73MPa, 矿渣含量为 80% 时的抗压强度相比矿渣含量为 0% 时增长了 300%。同时矿渣含量为 20% 时相比于 0% 增长了 18.9 MPa, 40% 相比 20% 增长了 29.67 MPa, 60% 与 40% 相比增长了 10.17 MPa, 80% 与 60% 相比增长仅 7.03 MPa。说明随着矿渣含量的增加, 对地聚合物混凝土力学强度的增长逐渐变小, 矿渣含量保持在 40% 以内最优, 增长最大, 超过 40% 增长变小。出现此现象原因可能是, 粉煤灰作为火山灰质材料, 具有潜在活性, 但在常温条件下粉煤灰的活性较低激发难度较大, 生成的 N-A-S-H 凝胶较少, 因此未掺入矿渣时 28 d 力学强度较低[13] [16]。同时矿渣的活性较高, 在与激发剂反应时会产生热量, 一方面放出的热量会促进粉煤灰发生聚合反应, 另一方面矿渣中的 CaO 能够促进水化产物的生成, 生成具有较高致密性与力学性能的 C-(A)-S-H 凝胶, 同时生成的 C-S-H 也可以作为凝结核加速 N-A-S-H 凝胶的产生使其生成的凝胶更多, 强度更高, 因此随着矿渣含量增加力学强度随之增加, 但是矿渣含量过多时与粉煤灰减少, 二者协同作用减弱, 强度增长放缓[7] [14] [17] [18] [19]。

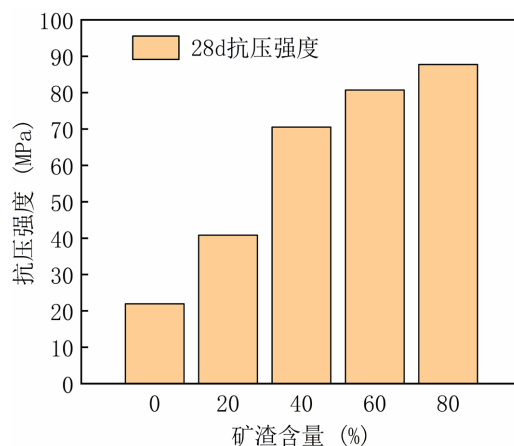


Figure 1. Effect of slag on compressive strength
图 1. 矿渣对抗压强度的影响

由图 2 可知随着碱用量的增加抗压强度呈现先增后减的趋势,碱用量为 11% 时抗压强度最大为 65.65 MPa,碱用量 6.5% 最低为 38.27 MPa,二者相差 27.38 MPa,相比于矿渣,碱用量对力学强度的影响幅度较小。此现象的原因可能是,在一定程度范围内,随着激发剂 Na_2O 浓度的增加溶液的 PH 值增大,硅铝质原料的溶解度更高,反应生成的凝胶增多力学强度增加,但当碱浓度过高时,金属离子在粉煤灰与矿渣颗粒表面发生钝化反应,反应产物包裹在未反应颗粒表面,反而会降低粉煤灰和矿渣的溶解速率,导致生成的凝胶减少,导致力学强度降低[14] [20] [21]。

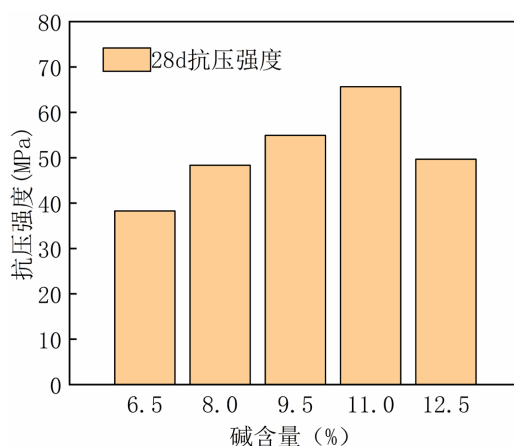


Figure 2. Effect of alkali dosage on compressive strength
图 2. 碱用量对抗压强度的影响

通过图 3 可知随着砂率的增加,抗压强度先后减,砂率由 25%~45%,28 d 抗压强度分别为为 36.35 MPa、41.56 MPa、40.85 MPa、36.91 MPa 与 36.79 MPa,砂率为 30% 时 28 d 抗压强度最高为 41.56 MPa,其相比于矿渣与碱用量,砂率对力学强度的影响最小。

4.2. 抗折强度

通过图 4 可知随着矿渣掺量的增加,抗折强度逐渐增大,矿渣含量为 0% 时抗折强度仅为 2.41 MPa,含量 80% 时为 6.23 MPa,说明矿渣掺量对抗折强度也有明显的影响。且当矿渣掺量超过 40% 时,抗折强

度不再大幅增长，与抗压强度发展趋势表现一致。由图 5 可知，随着碱用量的增加地聚合物混凝土抗折强度先增后减，碱用量为 11% 抗折强度最大为 4.62 MPa。

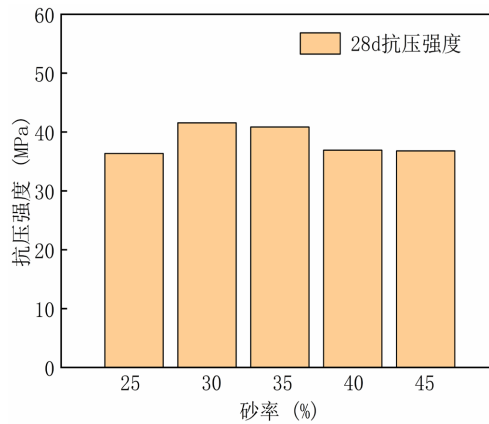


Figure 3. Effect of sand ratio on compressive strength
图 3. 砂率对抗压强度的影响

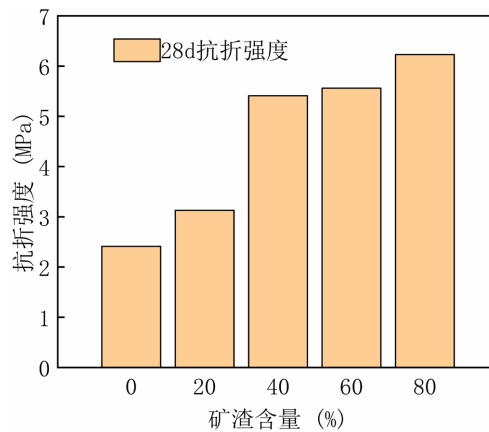


Figure 4. Effect of slag on flexural strength
图 4. 矿渣对抗折强度的影响

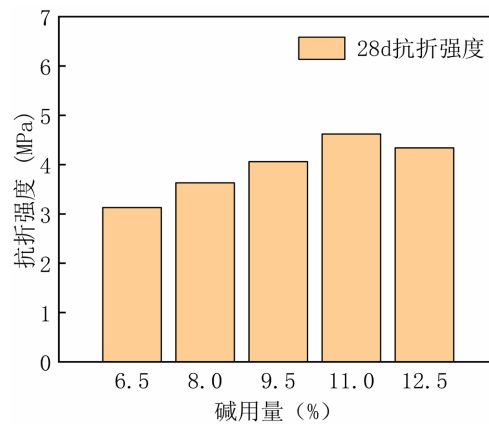


Figure 5. Effect of alkali dosage on flexural strength
图 5. 碱用量对抗折强度的影响

4.3. 劈裂抗拉强度

通过图 6 可知随着矿渣掺量的增加, 劈裂抗折强度逐渐增大, 矿渣含量为 0% 时劈裂抗拉强度仅为 1.95 MPa, 含量 80% 时为 5.15 MPa, 增长幅度较大, 说明矿渣掺量对劈裂抗拉强度也有明显的影响。相邻矿渣含量劈裂抗拉强度差值为(20%~80%): 1.38 MPa, 0.86 MPa, 0.54 MPa, 0.42 MPa, 表明随着矿渣含量增加劈裂抗拉强度增长逐渐减少。由图 7 可知, 随着碱用量的增加地聚合物混凝土劈裂抗拉强度先增后减, 碱用量为 11% 劈裂抗压强度最大为 4.62 MPa。

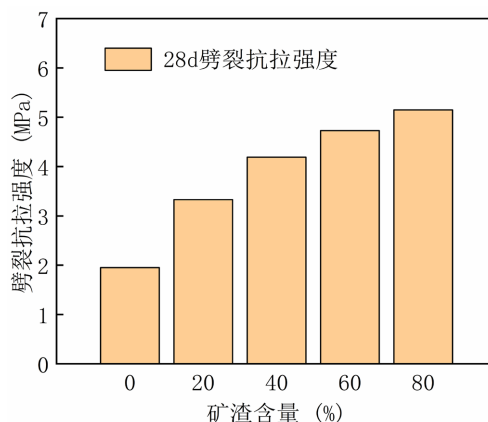


Figure 6. Effect of slag on splitting tensile strength

图 6. 矿渣对劈裂抗拉强度的影响

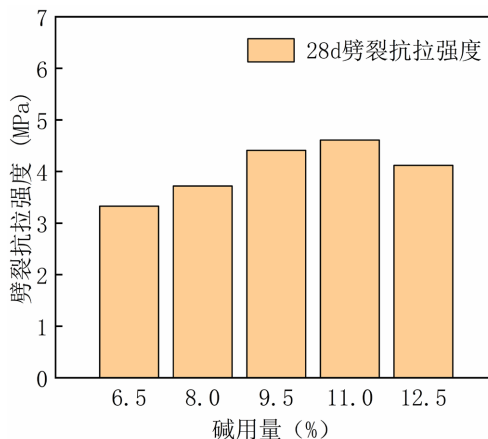


Figure 7. Effect of alkali dosage on splitting tensile strength

图 7. 碱用量对劈裂抗拉强度的影响

4.4. 吸水率

通过图 8 可知地聚合物混凝土的吸水率随着矿渣含量的增加而减少, 矿渣含量 0% 时吸水率最大为 6.25%, 当矿渣含量 80% 时吸水率最小为 3.86%, 矿渣含量 80% 的吸水率与含量 0% 相比下降了 38%。由图 9 可知随着碱用量的增加, 地聚合物混凝土的吸水率缓慢增加, 碱用量由 6.5%~12.5%, 与此对应吸水率由 5.1% 上升到了 5.6%, 碱用量 12.5% 的吸水率相比于 6.5% 增长了 10%。由变化幅度可知, 矿渣含量对地聚合物混凝土吸水率的影响最大。

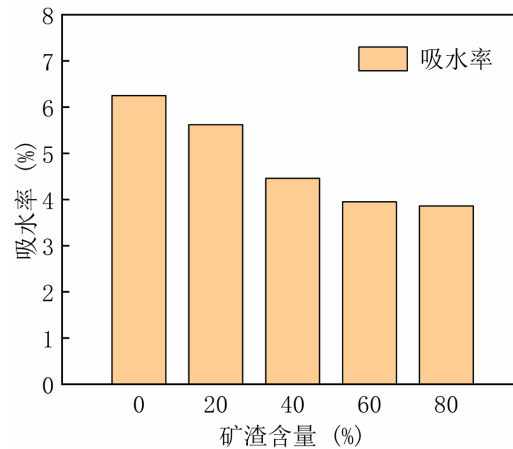


Figure 8. Effect of slag on water absorption

图 8. 矿渣对吸水率的影响

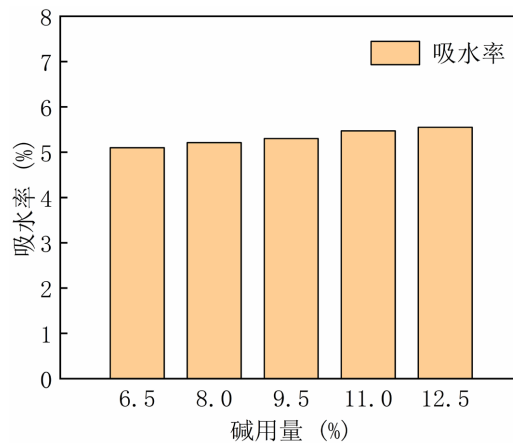


Figure 9. Effect of alkali dosage on water absorption

图 9. 碱用量对吸水率的影响

5. 结论

1) 研究表明,地聚合物混凝土的力学强度随硅铝质原材料矿渣含量的增加而增加,当矿渣掺量为 80% 时各力学性能最优,但是当矿渣掺量大于 40% 时力学强度不再大幅增长,矿渣相比于粉煤灰价格较高,因此含量控制在 40% 以内为宜。地聚合物混凝土的吸水率,随着矿渣掺量的增加而减少。

2) 随着砂率的增加,地聚合物混凝土力学强度先增后减,砂率为 30% 时力学强度最大,但相比于矿渣与碱用量对地聚合物混凝土力学强度的影响,砂率对地聚合物混凝土力学强度的影响最小。

3) 地聚合物混凝土力学强度随着碱用量的增加先减,当碱用量为 11% 时各力学性能最优抗压强度为 65.66 MPa,抗折强度为 4.62 MPa,劈裂抗拉强度为 4.61 MPa。地聚合物混凝土的吸水率,随着碱用量增加而增加,但碱用量对吸水率的影响相比于矿渣较小。

参考文献

- [1] Deventer, J., Provis, J.L. and Duxson, P. (2012) Technical and Commercial Progress in the Adoption of Geopolymer Cement. *Minerals Engineering*, **29**, 89-104. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.009>
- [2] 张长森, 朱宝贵, 李杨, 等. 镍渣/偏高岭土基地聚合物的制备与表征[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 193-197.

- [3] Sg, A., Cong, M.B., Gl, B., *et al.* (2019) Cleaner One-Part Geopolymer Prepared by Introducing Fly Ash Sinking Spherical Beads: Properties and Geopolymerization Mechanism. *Journal of Cleaner Production*, **219**, 686-697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.116>
- [4] 张大旺, 王栋民. 地质聚合物混凝土研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(9): 1519-1527+1540.
- [5] 许凌云, 张祖华, 史才军, 等. 地质聚合物混凝土力学性能和结构性能的研究进展[J]. 材料导报, 2022(7): 1-29.
- [6] Komljenovic, M., Bascarevic, R. and Bradic, R. (2010) Mechanical and Microstructural Properties of Alkali-Activated Fly Ash Geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, **181**, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.064>
- [7] Puligilla, S. and Mondal, P. (2013) Role of Slag in Microstructural Development and Hardening of Fly Ash-Slag Geopolymer. *Cement and Concrete Research*, **43**, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.004>
- [8] Nath, P. and Sarker, P.K. (2014) Effect of GGBFS on Setting, Workability and Early Strength Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Cured in Ambient Condition. *Construction & Building Materials*, **66**, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>
- [9] 梁广伟, 诸华军, 严鹏, 等. 矿渣-粉煤灰基地聚合物抗冻性能的研究[J]. 非金属矿, 2018, 41(3): 11-13.
- [10] Mallikarjuna Rao, G. and Gunneswara Rao, T.D. (2018) A Quantitative Method of Approach in Designing the Mix Proportions of Fly Ash and GGBS-Based Geopolymer Concrete. *Australian Journal of Civil Engineering*, **16**, 53-63. <https://doi.org/10.1080/14488353.2018.1450716>
- [11] 杨立荣, 王春梅, 封孝信, 等. 粉煤灰/矿渣基地聚合物的制备及固化机理研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(7): 115-119.
- [12] 丁琴, 陶明, 李响. 地聚合物混凝土配比及力学性能研究[J]. 黄金科学技术, 2022, 30(2): 243-253.
- [13] 赵素宁, 曲烈, 张泉. 粉煤灰地聚物的力学性能及其化学分析[J]. 山西建筑, 2010, 36(25): 1-3.
- [14] 黄华, 郭梦雪, 张伟, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚合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.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [16] 彭玉清, 郭荣鑫, 林志伟, 等. 粉煤灰地聚合物力学性能影响因素研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 858-866.
- [17] 常利, 艾涛, 延西利, 等. 地聚合物水泥路面快速修补材料性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(5): 49-54.
- [18] Marcin, M., Sisol, M. and Brezani, I. (2016) Effect of Slag Addition on Mechanical Properties of Fly ash Based Geopolymers. *Procedia Engineering*, **151**, 191-197. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.380>
- [19] Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., *et al.* (2014) Modification of Phase Evolution in Alkali-Activated Blast Furnace Slag by the Incorporation of Fly Ash. *Cement and Concrete Composites*, **45**, 125-135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006>
- [20] Provis, J.L. and Deventer, J. (2009) *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*. Woodhead-Verlag, Berlin.
- [21] Phair, J.W. and Van Deventer, J.S.J. (2002) Effect of the Silicate Activator pH on the Microstructural Characteristics of Waste-Based Geopolymers. *International Journal of Mineral Processing*, **66**, 121-143. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00013-3)