

硅酸钠模数对高粉煤灰掺量地质聚合物力学性能的影响

房万山

黑龙江省公路建设中心, 黑龙江 哈尔滨
Email: wanshanfang@163.com

收稿日期: 2021年7月12日; 录用日期: 2021年7月26日; 发布日期: 2021年8月11日

摘要

研究了模数0.3至1.8 M范围内的硅酸钠溶液对粉煤灰掺量高达90%的粉煤灰地质聚合物力学性能的影响。结果表明: 常温养护条件下, 高粉煤灰掺量的地质聚合物强度增幅良好, 28天抗折强度相对于3天强度增幅为59.6%至130.2%, 28天抗压强度相对于3天强度增幅范围达到123.2%至161.9%。抗压强度随龄期增幅总体高于抗折强度。对于粉煤灰掺量90%的地质聚合物胶凝浆体, 硅酸钠模数对强度影响效果显著, 综合考虑3天和28天抗压、抗折强度, 硅酸钠溶液模数最优值为1.5 M。

关键词

地质聚合物, 高掺量粉煤灰, 硅酸钠模数, 力学性能

Effect of Sodium Silicate Modulus on Mechanical Properties of Geopolymers with High Fly Ash Content

Wanshan Fang

Heilongjiang Provincial Highway Construction Center, Harbin Heilongjiang
Email: wanshanfang@163.com

Received: Jul. 12th, 2021; accepted: Jul. 26th, 2021; published: Aug. 11th, 2021

Abstract

The effect of sodium silicate solution with a modulus of 0.3 to 1.8 M on the mechanical properties

of fly ash-based geopolymer with a fly ash content of up to 90% was studied. The results show that the strength of geopolymer with high fly ash content increases well under normal temperature curing conditions, and the 28-day flexural strength increases from 59.6% to 130.2% compared to the 3-day strength. The 28-day compressive strength increased from 123.2% to 161.9% compared to the 3-day strength. The increase of compressive strength with curing age is generally higher than that of flexural strength. For geopolymer with a fly ash content of 90%, the modulus of sodium silicate has a significant effect on strength. Considering the 3- and 28-day compressive and flexural strengths, the optimal modulus of sodium silicate solution is 1.5 M.

Keywords

Geopolymer, High Fly Ash Content, Sodium Silicate Modulus, Mechanical Properties

Copyright © 2021 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

作为水泥混凝土的必备胶凝材料,普通硅酸盐水泥的生产是一个能源密集消耗的过程,并排放大量有害的温室气体(如二氧化碳),严重污染环境。据文献统计,生产水泥排放的二氧化碳约占全球排放量的7%,而且随着世界各地基础设施建设的激增,水泥需求量和产量也会随之增加[1]。因此,为了减少生产普通硅酸盐水泥产生的温室气体排放的负面影响,寻找一种水泥的绿色替代品势在必行。地质聚合物混凝土显示出了成为水泥混凝土合适替代品的潜力,因为它利用了粉煤灰(代替水泥)作为粘结材料,结合碱性激发剂溶液和骨料进行生产。粉煤灰是一种传统的燃煤火力发电厂产生的废弃物,作为一种新型可持续发展材料,粉煤灰基地聚合物具有优异的工程技术性能、突出的节能环保优势和巨大的市场潜力,成为当前研究的前沿热点[2]。研究表明,粉煤灰基地地质聚合物混凝土的二氧化碳排放量要比普通混凝土低15%,其温室气体排放主要集中在碱激活剂的制备和后期高温养护上[3]。利用粉煤灰制备地质聚合物,不仅使固体废弃物得到资源化再利用,而且还能发挥地质聚合物在重金属离子吸附、防火保温、耐腐蚀以及低碳排放等领域的作用,从而实现资源的高效利用[4][5]。

目前国内外对粉煤灰基地聚合物制备以及性能进行了较为广泛研究。对粉煤灰基地聚合物早期性能进行试验研究发现,粉煤灰的掺入量会影响地质聚合物的抗压强度,当采用较低的水灰比时,制备地聚合物的抗压强度更大,但水灰比太低会影响地聚物试件入模成型。搅拌的时间过长会使部分新拌和的浆体由流体状态变为塑性状态,也不利于试件成模[6]。通过微观物相和微观形貌分析表明,粉煤灰基地聚合物抗拉强度的大小与地聚合物反应生成的凝胶物质含量有关,密实的空间网状结构可以使抗拉强度更大[7]。通过研究养护制度对粉煤灰基地地质聚合物强度影响发现,养护条件对抗压强度的增加有重要作用,适宜的高温养护方法能提高强度,使产物迅速形成大量的钠铝硅酸盐[8][9][10]。对粉煤灰基地聚合物进行快速冻融的试验表明,矿渣含量增加能够降低地质聚合物的强度损失和质量损失,有效提高其抗冻性能,粉煤灰基地聚合物体系中加入矿渣可以降低孔隙率,使平均孔径和最可几孔径减小,增加无害孔的数量,减少有害孔和多害孔数量,抗冻性能优于硅酸盐水泥[11]。对粉煤灰基地聚合物高温性能的研究表明,不同矿渣掺量试样的质量损失率均随试验温度的升高而增大,地质聚合物混凝土属于聚合反应,反应过程中水仅作为反应媒介,不参与反应,高温前后质量损失与初始制备时所添加水的质量基本吻合[12]。

通过上述文献的分析可知，粉煤灰地质聚合物多采用高温养护，这会增加制备成本，不利于工程上推广应用，且高温养护会增加二氧化碳排放量，不利于节能减排。因此，本研究中采用了常温标准条件养护。另外，为了充分利用粉煤灰，提高地质聚合物中粉煤灰比率，本研究采用 10% 的矿粉替代率，将粉煤灰掺入量提高到 90%，研究了作为碱激发剂的不同模数硅酸钠溶液对高掺量粉煤灰地质聚合物胶凝浆体性能的影响情况。

2. 试验材料和试验程序

2.1. 原材料和配合比

试验采用一级粉煤灰和 S95 级矿渣，粉煤灰和矿渣的化学组成见表 1，碱激发剂包括硅酸钠和氢氧化钠，液体硅酸钠($\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$)为半透明粘稠状液体，其基本参数见表 2。氢氧化钠为纯度 99% 的工业级白色片状固体。

Table 1. Chemical composition of fly ash and mineral powder

表 1. 粉煤灰和矿渣的化学成分

化学成分(%)	粉煤灰	矿粉
SiO ₂	64.8	28.97
CaO	2.43	40.22
Al ₂ O ₃	21.67	16.54
Fe ₂ O ₃	3.87	1.32
MgO	1.72	7.96
SO ₃	0.48	0.08
Na ₂ O	0.17	-
K ₂ O	0.01	-
烧失量	4.85	4.91

Table 2. Basic parameters of sodium silicate

表 2. 硅酸钠基本参数

波美度	40Be
铁(Fe)含量	0.01%
水不溶物含量	0.05%
密度	1.385 g/cm ³
氧化钠(Na ₂ O)含量	8.90%
二氧化硅(SiO ₂)含量	28.80%
模数	3.34 M

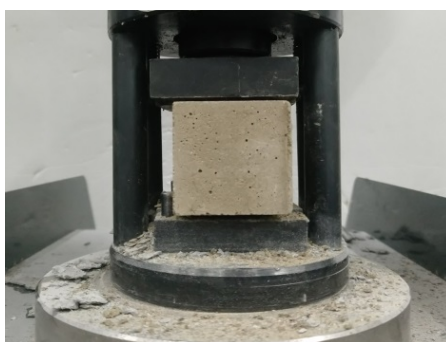
试验设计中，水胶比 W/B 固定为 0.4，采用 10% 质量分数的矿渣替代粉煤灰，通过氢氧化钠溶液将硅酸钠溶液模数调整为 0.3 至 1.8 M，试验配合比如表 3 所示。

Table 3. Test mix ratio**表 3.** 试验配合比

样本编号	W/B	粉煤灰(g)	矿渣(g)	硅酸钠模数(M)
F1	0.4	900	100	0.3
F2	0.4	900	100	0.6
F3	0.4	900	100	0.9
F4	0.4	900	100	1.2
F5	0.4	900	100	1.5
F6	0.4	900	100	1.8

2.2. 试验程序

首先, 采用水泥胶砂搅拌机将粉煤灰和矿渣搅拌均匀, 倒入调配好模数的硅酸钠溶液, 搅拌均匀后入模, 养护 48 小时脱膜, 放入水中常温养护至测试龄期进行测试。试件尺寸为 40 * 40 * 160 mm 的棱柱体试块。力学性能试验按照规范 GB/T 17671-1999 《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》进行, 抗折强度测试(图 1 所示)每组 3 个试块, 抗压强度测试(图 2 所示)每组 6 个试块, 测试后取平均值以减少试验误差。

**Figure 1.** Flexural strength test device**图 1.** 抗折强度测试装置**Figure 2.** Compressive strength test device**图 2.** 抗压强度测试装置

3. 试验结果与讨论

3.1. 抗折强度

高粉煤灰掺量地质聚合物试块抗折强度试验结果如表 4 和图 3、图 4 所示。图 3 为硅酸钠溶液模数

对 3 天龄期地聚物抗折强度的影响。可知，地聚物 3 天龄期抗折强度随硅酸钠模数增加，先上升后有所下降，F1 组中硅酸钠模数为 0.3 M，其 3 天抗折强度为 0.69 MPa，当硅酸钠模数为 1.2 M 时，3 天抗折强度值最大，为 1.41 MPa，相比 F1 组增加了 104.3%。F6 组当硅酸钠模数增加至 1.8 M 时，抗折强度值为 0.86 MPa，相比 F1 增加了 24.6%。

Table 4. Test results of flexural strength

表 4. 抗折强度试验结果

序号	F1	F2	F3	F4	F5	F6
3 天抗折强度	0.69	1.03	1.07	1.41	1.25	0.86
28 天抗折强度	1.43	1.90	2.36	2.25	2.42	1.98

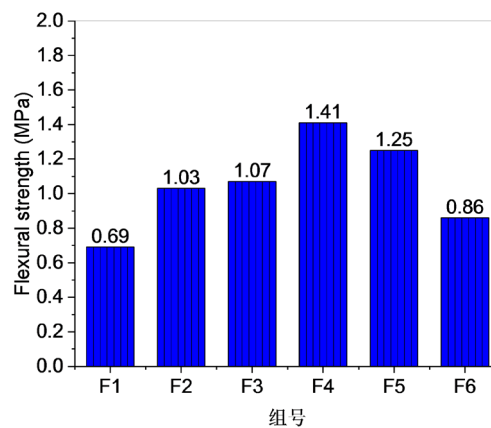


Figure 3. 3 d flexural strength

图 3. 3 天抗折强度

图 4 为试块 28 天龄期抗折强度测试结果，与 3 天抗折强度变化相似，随着硅酸钠模数增加，28 天抗折强度总体呈先增加后降低趋势。F1 组硅酸钠模数为 0.3 M 时，强度为 1.43 MPa，F3、F4 和 F5 组强度值差别较小，F5 组硅酸钠模数 1.5 M 时 28 天抗折强度最大，为 2.42 MPa，相比 F1 组增幅为 69.2%。

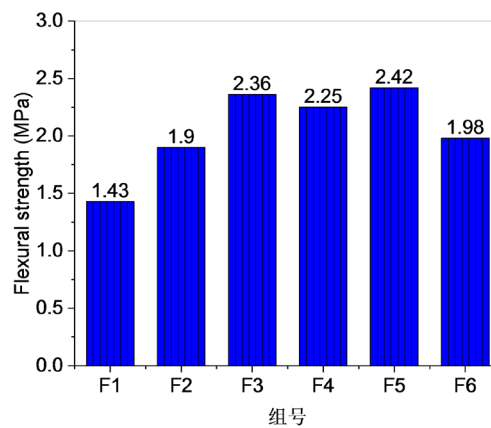


Figure 4. 28 d flexural strength

图 4. 28 天抗折强度

3.2. 抗压强度

高粉煤灰掺量地质聚合物抗压强度试验结果如表 5 和图 5、图 6 所示。图 5 为硅酸钠模数对 3 天龄期地聚物试块抗压强度的影响。F1 至 F5 组中, 可知, 硅酸钠模数从 0.3 M 增加至 1.5 M 时, 3 天抗压强度值从 3.02 MPa 依次增加至 8.14 MPa, 增幅达到 169.5%。F6 组强度值虽有所降低, 但相比 F1 组仍增加了 129.1%。

Table 5. Test results of compressive strength

表 5. 抗压强度试验结果

序号	F1	F2	F3	F4	F5	F6
3 天抗压强度	3.02	5.0	5.49	7.58	8.14	6.92
28 天抗压强度	7.91	12.11	13.84	18.02	18.17	16.55

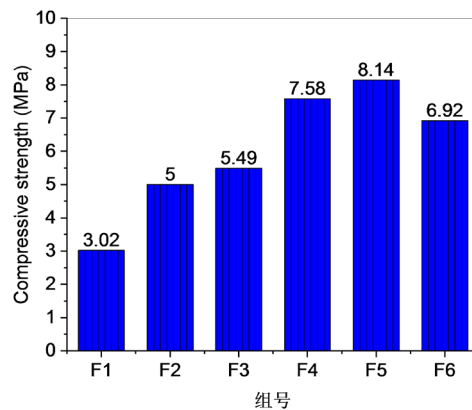


Figure 5. 3 d compressive strength

图 5. 3 天抗压强度

图 6 为粉煤灰基地聚物 28 天龄期抗压强度值, 与图 5 对比可知, 同样 F5 组抗压强度值最大, 为 F1 组 7.91 MPa 的 1.29 倍。首先, 硅酸钠的模数越高, 其黏度明显增大。其次, 硅酸钠的模数决定着硅酸钠溶液中硅氧四面体的聚合状态, 在硅酸钠模数较高的溶液中, 硅氧四面体的聚合程度较高, 而且单聚体和单体数量相对较少, 其活性与模数较低的硅酸钠溶液活性相比较低。因此对于某一配比的粉煤灰基地聚物前驱体, 硅酸钠模数存在一个适宜区间。本研究中硅酸钠溶液模数 1.5 M 为最优模数。

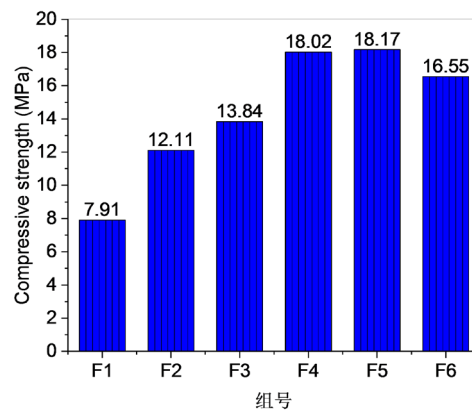


Figure 6. 28 d compressive strength

图 6. 28 天抗压强度

4. 结论

1) 常温养护条件下, 90%粉煤灰掺量的粉煤灰地质聚合物强度增长幅度良好, 28天抗折强度相对于3天强度增幅范围为59.6%至130.2%, 28天抗压强度相对于3天强度增幅范围为123.2%至161.9%。抗压强度随龄期增幅总体高于抗折强度。

2) 对于粉煤灰掺量90%的地质聚合物胶凝体系, 硅酸钠模数对强度影响效果显著, 综合考虑3天和28天抗压、抗折强度, 可知硅酸钠模数最优值为1.5 M。

参考文献

- [1] Ojha, A. and Aggarwal, P. (2021) Fly Ash Based Geopolymer Concrete: A Comprehensive Review. *Silicon*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01044-0>
- [2] 陈瑜, 韩汤益, 邓怡帆. 粉煤灰基地聚合物若干关键问题研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(7): 1864-1870.
- [3] 蒲云辉, 王清远, 李文渊, 张国敏, 杨平. 粉煤灰地质聚合物混凝土和普通混凝土温室气体排放量的对比研究[J]. 混凝土, 2019(4): 10-13.
- [4] 王丽萍, 徐靓, 王永旺, 李超. 粉煤灰地质聚合物研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(3): 90-94.
- [5] Saha, S. and Rajasekaran, C. (2017) Enhancement of the Properties of Fly Ash Based Geopolymerpaste by Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Construction & Building Materials*, **145**, 615-620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.139>
- [6] 征西遥, 闵一凡, 俞钧凯, 吴俊. 矿渣粉煤灰基地聚合物早期力学性能试验研究[J]. 施工技术, 2020, 49(3): 80-82+86.
- [7] 邓新, 徐方, 李增辉, 杨涛, 黄晟. 粉煤灰基地聚合物拉伸性能研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(24): 87-92.
- [8] 刘春原, 赵献辉, 朱楠, 刘宇飞, 庞云泽. 粉煤灰地质聚合物力学性能及碱渣改性机理[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2): 679-685+691.
- [9] 丁二宝, 曹春娥, 胡海泉, 陈云霞, 卢希龙. 养护制度对粉煤灰地质聚合物强度影响的研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(4): 1115-1120+1127.
- [10] Lna, A., Eed, B., Eb, C., et al. (2016) Investigation of Early Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, **112**, 807-815. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.008>
- [11] 梁广伟, 诸华军, 严鹏, 刘武, 杨涛, 徐俊, 周阳. 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.
- [12] 张雷苏, 何胜豪, 周华飞, 李显, 谢子令. 矿渣掺量对粉煤灰地质聚合物混凝土高温性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(10): 36-39+48.