

粉煤灰 - 矿渣地质聚合物基本力学性能研究

Research on Basic Mechanical Properties of Fly Ash - slag Geopolymer

姜天华^{1,2}, 赵成耿^{1,2}, 万聪聪^{1,2}, 胡宇成^{1,2}, 郑智敏³, 黄燕南⁴

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 武汉 430065; 2. 武汉科技大学 高性能工程结构研究院, 武汉 430065;
3. 福建省凡士建设集团有限公司, 莆田 351139; 4. 亿耀 (福建) 建设有限公司, 莆田 351139)

摘要: 为评估矿渣掺量、水胶比和 NaOH 溶液浓度对粉煤灰 - 矿渣地质聚合物立方体抗压强度和轴心抗压强度的影响, 采用正交试验设计, 研究不同矿渣掺量、水胶比和 NaOH 溶液浓度对材料性能的作用。结果表明: 随着矿渣掺量和 NaOH 溶液浓度的增加, 粉煤灰 - 矿渣地质聚合物的立方体抗压强度和轴心抗压强度均呈现增强趋势, 水胶比的增加则导致强度先增强后减弱; 在 70% 矿渣掺量、0.30 水胶比和 16 mol/L NaOH 溶液浓度的条件下, 材料的立方体抗压强度和轴心抗压强度达到最高, 分别为 65.52 MPa 和 56.27 MPa; 三因素对立方体抗压强度和轴心抗压强度的影响顺序为: 矿渣掺量 > NaOH 溶液浓度 > 水胶比; 基于应力 - 应变全曲线分析, 建立了粉煤灰 - 矿渣地质聚合物的应力 - 应变本构关系, 为进一步的材料设计 and 应用提供了理论基础。

关键词: 粉煤灰; 矿渣; 地质聚合物; 基本力学性能; 应力 - 应变曲线; 本构关系

中图分类号: TU528.57; TU317

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0065-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.013

JIANG Tianhua^{1,2}, ZHAO Chenggeng^{1,2}, WAN Congcong^{1,2}, HU Yucheng^{1,2}, ZHENG Zhimin³, HUANG Yannan⁴

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. Institute of High Performance Engineering Structure, Wuhan University of Science and Technology,

Wuhan 430065, China; 3. Fujian Fanshi Construction Group Co., Ltd., Putian 351139, China;

4. Yiyao (Fujian) Construction Co., Ltd., Putian 351139, China)

Abstract: In order to assess the impact of slag content, water-to-binder ratio, and NaOH solution concentration on the cubic compressive strength and axial compressive strength of fly ash-slag geopolymers, an orthogonal test design was utilized to analyse the effects of these variables on material performance. The results show that as the slag content and NaOH solution concentration increased, the cubic compressive strength and axial compressive strength of the fly ash-slag geopolymers both exhibited an enhancing trend. However, an increase in the water-to-binder ratio initially enhanced the strength, which then decreased. The highest compressive strengths were observed at a slag content of 70%, a water-to-binder ratio of 0.30, and a NaOH solution concentration of 16 mol/L, reaching 65.52 MPa and 56.27 MPa, respectively. The influence of the three factors on the compressive strength, in descending order, was identified as: slag content > NaOH solution concentration >

基金项目: 湖北省建设科技计划项目 ([2023] 1656 号 - 159); 福建省住建行业建设科技研究开发项目 (2022-K-16, 2022-K-18)。

作者简介: 姜天华 (1971—), 博士, 教授, 研究方向: 混凝土材料。

通信作者: 赵成耿 (1998—), 硕士, 助理工程师, 研究方向: 地质聚合物。

收稿日期: 2023-09-15

材料科学

water-to-binder ratio. A stress-strain constitutive relationship for fly ash-slag geopolymers was established based on a comprehensive stress-strain curve analysis, providing a theoretical foundation for further material design and application.

Key words: fly ash; slag; geopolymer; basic mechanical properties; stress-strain curve; constitutive relationship

0 引言

混凝土是现代建筑和基础设施工程中最常用的建筑材料之一。据有关统计,2020 年我国硅酸盐水泥产量达到了 23.95 亿 t^[1]。然而,硅酸盐水泥的生产过程产生大量的二氧化碳,对环境造成了严重的影响^[2]。为了应对气候变化和可持续发展带来的挑战,研究人员一直在寻找替代材料和新型混凝土配方,以减少碳排放并提高材料的性能。

在这个背景下,由法国材料学家 Davidovits^[3]提出的地质聚合物不失为一种良好的替代品,碱激发地质聚合物作为环境友好型胶凝材料,在建筑工程领域应用潜力受关注,其力学、热学及耐久性能优化是研究热点;Masi 等^[4]研究了有机与无机纤维对铝酸盐激活地质聚合物的作用;Sanjayan 等^[5]探究了轻质充气多孔聚合物特性;Menna 等^[6]探索了地质聚合物增强混凝土构件外部结构;Bai 等^[7]用固体废物改性偏高岭土基聚合物。地聚物地质聚合物的原料来源广泛,包括粉煤灰、矿渣、高岭土等。粉煤灰作为混凝土优质掺合料,可有效改善混凝土相关性能^[8-9]。黄华等^[10]对矿渣基地质聚合物力学性能及微观结构展开了研究,结果表明地质聚合物力学性能相比普通混凝土更优;梁永宸等^[11]对地质聚合物性能与环境的相关性展开了研究并得到相关评价指标;方明伟等^[12]针对碱激发剂对粉煤灰地质聚合物的影响展开了研究并得到了碱激发剂的合适范围;刘刚等^[13]对地质聚合物的水化行为展开了研究并得到了其机理;原元等^[14]对地质聚合物抗碳化性能展

开了研究,发现地质聚合物抗碳化性能弱于普通混凝土;姜天华等^[15]对玄武岩橡胶混凝土基本力学性能展开了研究,发现掺入适量玄武岩纤维与橡胶颗粒可改善混凝土脆性。

综上所述,众多学者对地质聚合物展开了研究,但对其应力-应变曲线展开的研究较为不足。通过混凝土材料的立方体抗压强度,轴心抗压强度等关键性能指标,分析矿渣掺量、水胶比和 NaOH 溶液浓度均对地质聚合物的抗压强度的影响。研究旨在深入探讨粉煤灰-矿渣地质聚合物的基本力学性能,以评估其不同应用领域中的可行性,为地质聚合物的力学性能研究提供了新的思路和方法,对地质聚合物的使用及相关行业的发展也具有一定意义。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

胶凝材料为粉煤灰、矿渣粉;粗骨料采用碎石,级配为:粒径 5~10 mm,15%;10~20 mm,85%。细骨料采用河砂,细度模数为 2.8;碱激发剂为 NaOH 溶液与硅酸钠溶液(水玻璃)按质量比 1:2.5 混合而成;水玻璃液态 3.1~3.4 波美度,掺量为 40%;NaOH 纯度为 96%,加入蒸馏水配置成 8、12、16 mol/L 三种浓度的 NaOH 溶液。

1.2 配合比

采用正交试验,试验设计为 L₉(3³)型,见表 1。其中各组试验矿渣、粉煤灰、粗骨料、细骨料的质量之和相同,骨料掺量和砂率参照普通硅酸盐水泥混凝土,砂率为 35%。

表 1 正交试验配合比表
Table 1 Orthogonal test mix ratio table

编号	原材料质量/(kg/m ³)						矿渣掺量 /%	NaOH 溶液浓度 /(mol/L)	水胶比
	粉煤灰	矿渣	细骨料	粗骨料	NaOH 溶液	Na ₂ SiO ₃ 溶液			
1	367	157	500	929	70	175	30	8	0.30
2	131	305	531	986	70	175	30	12	0.35
3	111	258	554	1 030	70	175	30	16	0.40
4	221	221	546	1 005	70	175	50	16	0.35
5	198	198	545	1 012	70	175	50	8	0.40
6	254	254	506	939	70	175	50	12	0.30
7	114	266	551	1 022	70	175	70	12	0.40
8	148	244	511	950	70	175	70	16	0.30
9	135	315	526	977	70	175	70	8	0.35

1.3 试件制备

试验试件制作依据 JTG 3420—2020 《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》和 GB/T 50081—2019 《混凝土物理力学性能试验方法标准》分别制作边长为 100 mm 的立方体试件，用于立方体抗压强度测试；尺寸为 100 mm × 100 mm × 300 mm 的棱柱体试件用于轴心抗压测试。试件在标准塑料模具中边振

捣边浇筑，分层浇筑成型，浇筑完成后，待其凝固成型后脱模，按规范标准养护 28 d 后进行基本力学性能测试。

2 基本力学性能分析

各组地质聚合物基本力学性能结果见表 2。

表 2 地质聚合物基本力学性能 Table 2 Basic mechanical properties of geopolymer									
指标名称	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9
立方体抗压强度	41.52	48.41	49.31	62.59	50.65	53.75	56.18	65.52	58.67
轴心抗压强度	35.45	39.72	40.35	49.12	42.88	45.36	49.32	56.27	50.17

2.1 直观分析

各组地质聚合物试件抗压强度测量值在 41.52 ~ 65.52 MPa，轴心抗压强度测量值在 35.45 ~ 56.27 MPa。从直观数据可知，第 8 组试件的立方体抗压和轴心抗压强度的测量值均为最大，表明第 8 组的配合比最优，即 70% 的矿渣掺量、0.30% 的水胶比和 16 mol/L NaOH 溶液的配合比下力学性能最佳。

2.2 极差分析

表 3 为各组地质聚合物试件极差分析结果。各因素对于立方体抗压强度和轴心抗压强度的影响程度大小排序均为：矿渣掺量 > NaOH 溶液浓度 > 水胶比。即矿渣掺量对试件立方体抗压强度影响最大，水胶比最小，NaOH 溶液浓度影响居中。

表 3 地质聚合物正交试验各因素极差分析结果 Table 3 Results of range analysis of various factors in geopolymer orthogonal test			
样本	矿渣含量 (A) / %	水胶比 (B) / %	NaOH 溶液浓度 (C) / (mol/L)
立方体抗压强度/MPa	13.71	4.51	8.86
轴心抗压强度/MPa	13.40	2.16	5.75

2.3 方差分析

为了进一步探明 3 个因素对地质聚合物基本力学性能的影响，采用方差分析法得到各因素对地质聚合物基本力学性能影响的主次顺序，结果见表 4。

方差分析结果与极差分析结果一致。即，各因素对于立方体抗压强度和轴心抗压强度的影响程度大小排序均为：矿渣掺量 > NaOH 溶液浓度 > 水胶比。即矿渣掺量对试件立方体抗压强度影响最大，水胶比最小，NaOH 溶液浓度影响居中。对立方体抗压强度各影响因素中矿渣掺量贡献率最大，为 64.9%；NaOH 溶液浓度贡献率居中，为 27.7%；水

表 4 地质聚合物正交试验各因素方差分析结果 Table 4 Variance analysis results of various factors in the geopolymer orthogonal test						
指标名称	因素	类平方和	自由度	均方值	F	贡献率/%
立方体抗压强度	矿渣掺量	293.481	2	146.709	92.334	64.9
	NaOH 溶液浓度	31.504	2	15.752	9.914	6.9
	水胶比	125.199	2	62.600	39.398	27.7
	误差	2.000	2	1.589		0.5
	总计	453.299	8			
轴心抗压强度	矿渣掺量	270.534	2	135.267	64.583	81.2
	NaOH 溶液浓度	7.331	2	3.665	1.750	2.2
	水胶比	51.180	2	25.590	12.218	15.3
	误差	4.189	2	2.094		1.3
	总计	333.243	8			

胶比的贡献率最小为 6.9%，3 因素的贡献率远大于误差贡献率。对轴心抗压强度影响因素中在各因素中矿渣掺量贡献率最大，为 81.2%，远大于误差贡献率；NaOH 溶液浓度贡献率居中，为 15.3%，是误差贡献率的 11.8 倍；水胶比的贡献率最小为 2.2%，是误差贡献率的 1.7 倍。

2.4 试件破坏形态

地质聚合物立方体抗压破坏过程中，首先在内部产生微裂缝，然后裂缝扩展直至出现宏观裂缝。在达到峰值荷载之前，其外观不会呈现明显变化，仅表面出现微小裂缝，当荷载继续增加时，上下表面微小裂缝向中间扩展，直至形成上下贯通裂缝。此时地质聚合物试件已经破坏，但仍维持一个比较完整的形态，整个过程缓慢而安静，试件没有产生爆裂声也没有碎裂，破坏后的试件如图 1（a）所示。

地质聚合物轴心抗压破坏过程，开始施加荷载应力时，未观察到明显裂纹；随着荷载增大，沿加载方向逐渐形成微裂纹；当应力达到峰值时，随着

材料科学

位移的增大，裂缝向中部扩展，最后贯穿整个试件。但是地质聚合物试件轴压破坏后的外观形态更为完整，裂缝分布较为均匀如图 1（b）所示。



(a) 立方体抗压破坏形态 (b) 轴心抗压破坏形态

图 1 地质聚合物试件破坏形态

Fig. 1 Failure pattern of geopolymer specimens

2.5 各因素对基本力学性能的影响

2.5.1 立方体抗压强度

各因素对立方体抗压强度的影响如图 2 所示。

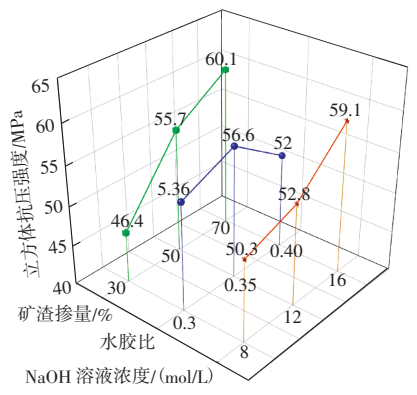


图 2 各因素对立方体抗压强度的影响

Fig. 2 Effects of various research factors on compressive strength

2.5.1.1 矿渣掺量

随着矿渣掺量的提高，地质聚合物的立方体抗压强度逐渐增大。当矿渣掺量由 30%（水平 1）增加到 50%（水平 2）时，立方体抗压强度增加了 20.04%；而矿渣掺量由 50%（水平 2）增加到 70%（水平 3）时，立方体抗压强度增加了 7.89%。这是因为地质聚合物的抗压强度主要由沉淀的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和周围的硅酸盐凝胶粘结在一起提供，矿渣中 CaO 的含量高达 40%，是粉煤灰的 5 倍以上。在地聚合反应过程中，较高的含钙量可以促进胶凝材料形成胶凝相结构（C-S-H），提高了地质聚合物前期的致密性，减少了孔隙率。随着矿渣掺量的进一步提高，由于矿渣中的钙成分比粉煤灰中的钙成分更易

溶，产生大量游离态的 Ca^{2+} ，游离态的 Ca^{2+} 还会促进粉煤灰的溶解，加快粉煤灰的火山灰反应，发挥协同效应，从而使胶凝材料更加充分发生水化反应，提高了地质聚合物的立方体抗压强度。

2.5.1.2 水胶比

立方体抗压强度随水胶比的增加呈现先增加后减少的趋势，水胶比由 0.30（水平 1）增加到 0.35（水平 2）时，立方体抗压强度增加了 6.80%；而由 0.35（水平 2）增加到 0.40（水平 3）时，立方体抗压强度减小了 8.13%。这说明在试验变化范围内，当水胶比为 0.35 时，地质聚合物的抗压强度达到了最大值，根据极差分析计算结果可知，水胶比的变化幅度对立方体抗压强度的影响远没有矿渣掺量和 NaOH 溶液浓度影响大。当水胶比过低时，胶凝材料难以与骨料充分混合，水的掺量太低，导致胶凝材料之间的水化反应不充分，生成的胶凝相结构不足；水胶比过大时，由于自由水不参与地质聚合物聚合反应，还会降低碱激发剂的碱度，减缓其水化反应，更重要的是多余的水分刚开始会残留在混凝土的内部；在地质聚合物养护期间，水的蒸发会导致地质聚合物内部产生大量孔隙，从而破坏地质聚合物的致密结构，最终导致地质聚合物抗压强度的下降。

2.5.1.3 NaOH 溶液浓度

NaOH 溶液浓度对地质聚合物立方体抗压强度影响趋势与矿渣掺量类似。 NaOH 溶液浓度由 8 mol/L 增加到 12 mol/L 时，立方体抗压强度增加了 4.97%；由 12 mol/L 增加到 16 mol/L 时，立方体抗压强度增加了 11.93%。可以看出， NaOH 溶液浓度对地质聚合物抗压强度影响显著。因为 NaOH 不仅是地质聚合物聚合过程中的前驱物原料，而且作为激发剂，更是直接决定胶凝材料水化过程的快慢。随着溶液中 NaOH 溶液浓度的提升，碱激发剂模数会降低，在地质聚合反应过程中，强碱环境下有利于形成硅铝酸盐；同时由于硅铝酸盐掺量的增加，参加缩聚反应的反应物增加，生成的地质聚合物凝胶相对也就越多，其抗压强度越高。相反，当 NaOH 溶液浓度较低时，不仅不利于粉煤灰和矿渣的溶解，而且影响胶凝材料的解聚，可能碱激发溶液已经被消耗殆尽而仍有胶凝材料没有参与反应，不能生成稳定的胶凝相结构，从而降低了地质聚合物的强度。

2.5.2 轴心抗压强度

由图3可知,随着矿渣掺量的提高,地质聚合物的轴心抗压强度逐渐增大。当矿渣掺量由30%增加到50%时,轴心抗压强度增加了18.96%;矿渣掺量由50%增加到70%时,轴心抗压强度增加了13.31%。矿渣的掺入除了提高胶凝材料中钙的掺量,还加快胶凝相结构的生成;同时,矿渣掺量越高,其凝结时间越短,短时间生成大量凝胶提高地质聚合物强度。

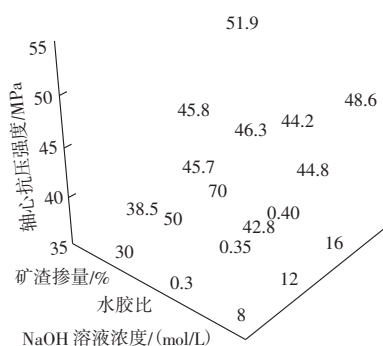


图3 各因素对轴心抗压强度的影响

Fig. 3 The influence of various research factors on axial compressive strength

与立方体抗压强度类似,轴心抗压强度随水胶比的增加呈现先增加后减少的趋势,水胶比由0.30增加到0.35时,轴心抗压强度增加了1.31%;由0.35增加到0.40,轴心抗压强度减小了4.53%。当水胶比为0.35时,地质聚合物的轴心抗压强度达到了最大值。但根据极差分析计算结果可知,与矿渣掺量和NaOH溶液浓度相比,在轴心抗压试验中,水胶比仍然不是主要影响因素。

NaOH溶液浓度由8 mol/L增加到12 mol/L时,轴心抗压强度增加了4.67%;由12 mol/L增加到

16 mol/L时,轴心抗压强度增加了8.48%。可以看出,随着NaOH溶液浓度的提高,其轴心抗压强度也在提高,其原因可能与矿渣掺量类似,高浓度NaOH溶液提高反应速率;同时未反应的氧化铝和氧化硅凝胶逐渐减少,反应程度趋于完全。

3 应力-应变关系及本构模型

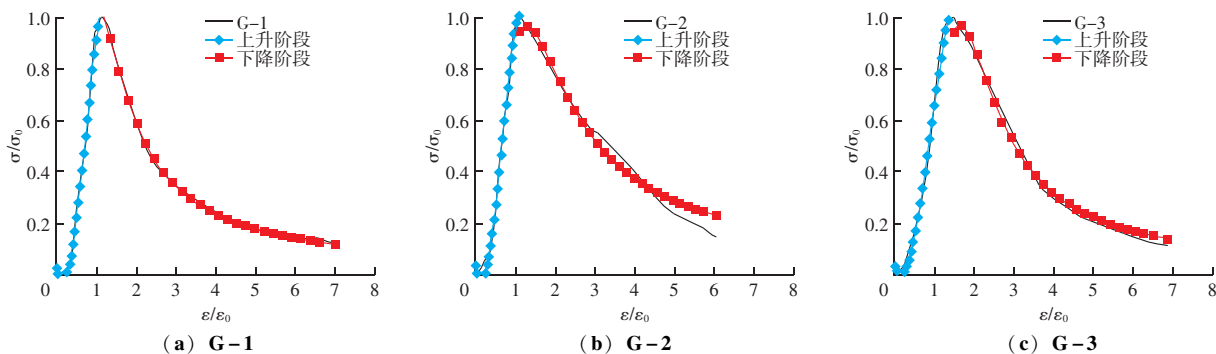
为了对地质聚合物结构性能进行更加全面的分析,需要建立完整的应力-应变本构模型。参考过镇海^[16]建议的分段式曲线方程,采用分别拟合上升阶段与下降阶段的方法来描述粉煤灰-矿渣地质聚合物的应力-应变本构模型,该模型各阶段的表达式如下:

$$y = \begin{cases} \alpha x^3 + \beta x^2 + \gamma x + \xi & (\text{上升段}) \\ \frac{x}{\delta x^2 + \mu x + \omega} & (\text{下降段}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 、 β 、 γ 、 ξ 、 δ 、 μ 、 ω 分别为待定的参数值; y 为应力-应变曲线应力值; x 为应力-应变曲线应变值。

为消除不同量纲带来的问题,将地质聚合物的应力-应变曲线进行无量纲处理,即将应力 σ 除以峰值应力 σ_0 ,应变 ε 除以峰值应力 σ_0 对应的应变 ε_0 ,经过无量纲处理后的试件应力-应变曲线拟合结果如图4所示。

利用本构模型拟合后得到的相关系数 R^2 基本都在0.97以上,只有G-7组的上升段相关系数 R^2 为0.959 08,小于0.97。此结果表明拟合曲线和试验曲线的吻合度较高,拟合程度好;试件的无量纲应力-应变曲线表明所用的本构模型可以较为准确地反映粉煤灰地质聚合物应力-应变的全过程。



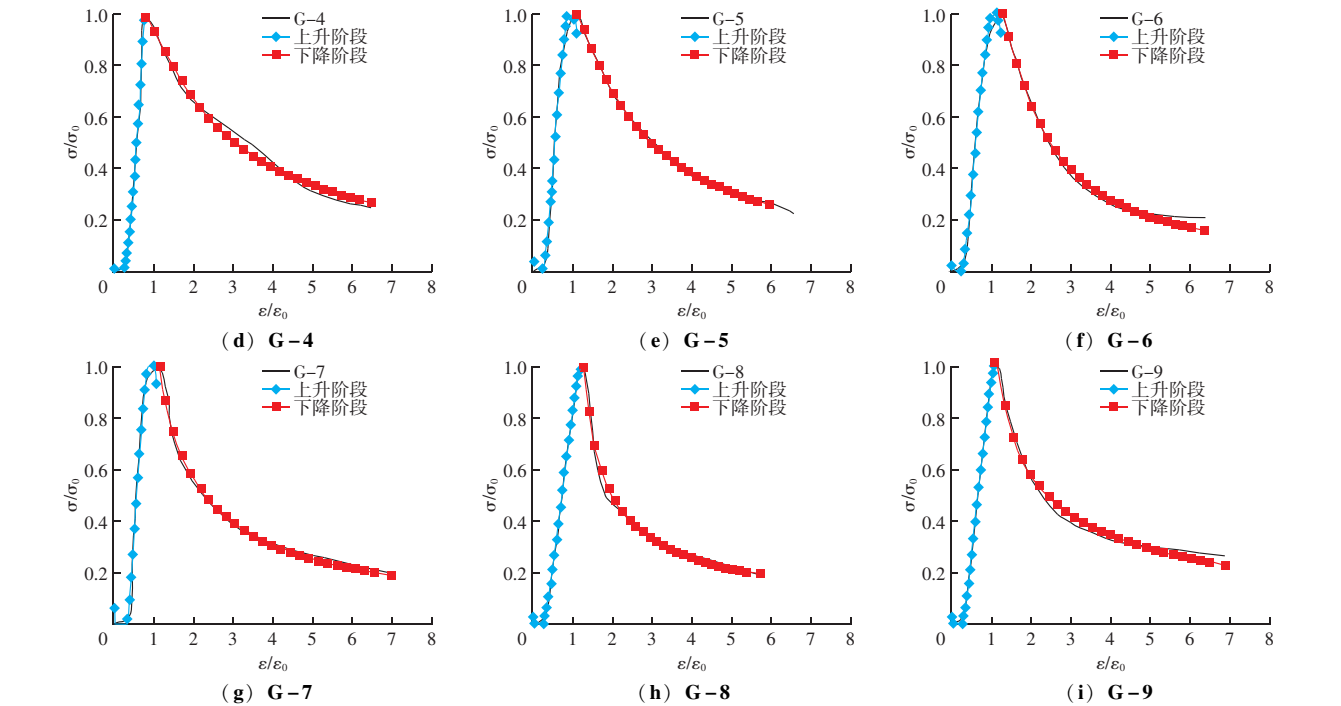


图4 无量纲应力-应变曲线拟合结果
Fig. 4 Dimensionless stress-strain curve fitting results

表5 地质聚合物应力-应变曲线拟合参数
Table 5 Geopolymer stress-strain curve fitting parameters

组别	上升阶段					下降阶段			
	α	β	γ	ξ	R^2	δ	μ	ω	R^2
G-1	-0.812 53	3.136 66	-1.428 69	0.026 43	0.991 64	1.465 42	-1.962 99	1.458 84	0.999 39
G-2	-0.845 05	3.573 99	-1.815 15	0.039 77	0.992 10	0.875 57	-1.164 70	1.381 66	0.978 18
G-3	-0.486 66	1.723 67	-0.621 40	-0.038 47	0.986 84	1.520 08	-3.956 05	4.091 14	0.991 70
G-4	-0.815 14	3.543 71	-0.997 56	-0.014 98	0.980 67	0.514 81	0.372 92	0.179 46	0.989 34
G-5	-1.538 76	6.509 21	-3.997 55	0.039 75	0.979 64	0.646 58	-0.054 93	0.377 23	0.999 27
G-6	-1.059 46	4.489 90	-2.456 53	0.019 54	0.987 39	1.154 02	-1.284 92	1.033 46	0.995 02
G-7	-2.488 03	8.654 54	-5.197 03	0.065 51	0.959 08	0.660 89	0.714 02	-0.543 37	0.987 75
G-8	-0.666 51	2.706 66	-1.229 46	0.021 81	0.998 20	0.666 03	1.679 68	-1.978 70	0.988 13
G-9	-0.815 49	3.495 39	-1.762 51	0.029 21	0.998 05	0.456 04	1.331 48	-1.025 87	0.990 09

4 结论

通过混凝土材料的立方体抗压强度、轴心抗压强度等试验，研究矿渣掺量、水胶比和 NaOH 溶液浓度均对地质聚合物的影响，得到以下主要结论：

(1) 地质聚合物试件受压破坏时为延性破坏，破坏时未出现大面积破坏崩裂现象，无明显压缩变形，形态较为完整。

(2) 基于正交试验实测立方体抗压，轴心抗压强度值，70% 的矿渣掺量、0.30 的水胶比和 16 mol/L NaOH 溶液地质聚合物试件基本力学性能最优；矿渣掺量对立方体抗压强度和轴心抗压强度影响最大，水胶比最小，NaOH 溶液浓度影响居中。

(3) 建立了地质聚合物应力-应变曲线的应力-应变本构模型，进而可以为实际工程中的应用提供理论和试验参考。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京：中国统计出版社，2021.

[2] WU Y G, LU B W, BAI T, et al. Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges [J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 930-949.

[3] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials [J].

- Journal of thermal analysis, 1989, 35 (2): 429-441.
- [4] MASI G, RICKARD W, BIGNOZZI M, et al. The effect of organic and inorganic fibres on the mechanical and thermal properties of aluminate activated geopolymers [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 76: 218-228.
- [5] SANJAYAN J G, NAZARI A, CHEN L, et al. Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer [J]. Construction and Building Materials, 2015, 79: 236-244.
- [6] MENNA C, ASPRONE D, FERONE C, et al. Use of geopolymers for composite external reinforcement of RC members [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45 (1): 1667-1676.
- [7] BAI T, SONG Z, WANG H, et al. Performance evaluation of metakaolin geopolymer modified by different solid wastes [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 226: 114-121.
- [8] 唐力军, 刘卫东, 陈凯伦. 超细活性粉煤灰对碱激发矿渣体系的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (4): 92-97.
- [9] 邓嘉, 鲍文博, 杨宇豪, 等. 粉煤灰基尾矿碱激发地质聚合物耐久性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (5): 58-66.
- [10] 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.
- [11] 梁永宸, 石膏爽, 张聪, 等. 粉煤灰地聚物混凝土性能与环境影响的综合评价 [J]. 材料导报, 2023, 37 (2): 82-87.
- [12] 方明伟, 王丹, 周枫桃, 等. 碱激发剂对粉煤灰地聚物混凝土的性能影响 [J]. 功能材料, 2023, 54 (11): 11170-11176.
- [13] 刘刚, 丁明巍, 刘金军, 等. 碱激发矿粉-粉煤灰-偏高岭土地聚物水化行为和力学性能 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (6): 2106-2114.
- [14] 原元, 赵人达, 占玉林, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土的抗碳化性能 [J]. 西南交通大学学报, 2021, 56 (6): 1275-1282.
- [15] 姜天华, 莫定聪, 万聪聪, 等. 玄武岩橡胶混凝土基本力学性能及受压应力-应变曲线 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (11): 4063-4071, 4121.
- [16] 过镇海. 混凝土的强度和变形: 试验基础和本构关系 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 31-35.

(上接第 64 页)

- [7] 胡良鹏, 陈徐东, 朱祥意, 等. 不同骨料粒径钢渣透水混凝土力学性能分析及离散元模拟 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (1): 69-75, 132.
- [8] 王晨霞, 刘军, 曹芙波, 等. 钢渣粗骨料混凝土单轴受压应力-应变试验 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2022, 38 (6): 1096-1103.
- [9] 王成刚, 刘耀伟, 王帅, 等. 钢渣双掺混凝土力学与耐久性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (8): 2846-2855.
- [10] 樊俊江, 於林锋, 王林. 钢渣骨料水工生态框混凝土制备方法 & 性能研究 [J]. 金属矿山, 2022 (1): 28-34.
- [11] 王浩, 项国圣, 李华健. 钢渣细骨料泡沫混凝土制备及抗压强度计算 [J]. 混凝土, 2024 (3): 171-176, 181.
- [12] 叶雁飞, 马伟克, 申振伟, 等. 钢渣对混凝土安定性的影响及评价 [J]. 化工矿物与加工, 2024, 53 (2): 40-46.
- [13] 房延凤, 王淦宁, 佟钰, 等. 碳酸化预处理对钢渣-水泥复合胶凝材料体积安定性及水化活性的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (3): 1001-1007.
- [14] 谢智超, 汪保印, 蒋正武. 钢渣骨料混凝土体积安定性及其抑制效果评价 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25 (10): 1077-1085.
- [15] 袁正国, 陶智忠. 基于水化特性的钢渣膨胀抑制机理研究 [J]. 金属矿山, 2025 (2): 263-269.