阶段混合工艺下混合碱激发水泥的物理力学性能

黄延锟[1]，蓝立耿[1]，陈超松[1]，黄炳伦[1]，马彬[1,*]
1. 桂林电子科技大学，建筑与交通工程学院，广西 桂林，541004

摘要：以地聚合物与水泥的混合体系为研究对象，采用双阶段混合工艺，研究水泥掺量、双阶段静置时间对混合碱激发水泥抗压强度、流动度、凝结时间和表观粘度的影响规律，为开发新型工程材料提供指导。结果表明，地聚合物浆体和水泥浆体混合后具有显著的协同增强效应。随着水泥掺量的增加，试样抗压强度先升高后降低，其中水泥掺量为 10%、静置时间为 15 min 时，试样抗压强度最高。水泥掺量越高，体系中激发剂占比降低，水分占比升高，致使混合碱激发水泥的流动度增大。然而，混合碱激发水泥的凝结时间随着水泥掺量的增加呈现先缩短再变长最后再缩短的趋势。此外，随着水泥掺量的增加，混合碱激发水泥的表观粘度先增大后减小，其中水泥掺量为 10%试样浆体的表观粘度最大。

关键词：地聚合物；水泥；阶段混合工艺；物理力学性能

Physical and mechanical properties of hybrid alkali-activated cements under stage mixing technology

Yankun Huang[1], Ligeng Lan[1], Chaosong Chen[1], Binglun Huang[1], Bin Ma[1,*]
1. School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

Abstract: Taking the mixed system of geopolymer and cement as the research object, the influence of cement content and two-stage standing time on the compressive strength, fluidity, setting time and apparent viscosity of hybrid alkali-activated cements was studied by the two-stage mixing technology. This study will provide guidance for the development of new engineering materials. Results show that the mixture of geopolymer slurry and cement slurry has a significant synergistic enhancement effect. With the increase of cement content, the compressive strength of sample increases first and then decreases. When the cement content is 10 % and the standing time is 15 min, compressive strength of sample is the highest. The higher the cement content, the lower the proportion of activator in the system, and the higher the proportion of water, resulting in the greater fluidity of hybrid alkali-activated cements. However, setting time of hybrid alkali-activated cements decreases first, then increases and finally decreases as the cement content increases. In addition, with the increase of cement content, the apparent viscosity of hybrid alkali-activated cements increases first and then decreases. Among them, the apparent viscosity of the sample slurry with 10 % cement content is the largest.

Keywords: Geopolymer; cement; Stage mixing technology; Physical and mechanical properties

水泥作为混凝土的主要粘结剂，在生产过程中会伴随产生大量 CO_2。水泥工业是碳中和的重要领域，是中国 CO_2 排放的主要来源之一，其排放量占中国 CO_2 总排放量的 14.3%[1]。与水泥相比，地聚合物具有较低的能源消耗和 CO_2 排放。此外，地聚合物常由许多工业固体废弃物碱激发而制成，如粉煤灰、矿渣、赤泥等，具有高早强、耐火和耐腐蚀等优良性能，有广阔的工程应用前景[2]。然而，

地聚合物也具有一些缺点，例如高碱性、高收缩、过快凝固和易风化等[3-5]，阻碍了其进一步地推广应用。

近年来，混合碱激发水泥因其优异的力学性能、耐久性和快速凝固等特性而备受国内外学者关注[6]。本质上，混合碱激发水泥代表了地聚合物和水泥的融合，利用两者优势创造出一种比单个组分性能更优越的复合凝胶材料。例如，Mohapatra 等[7]采用粉煤灰与水泥按不同配比混合制备混合碱激发水泥，发现由于水泥在碱性溶液下快速反应且会形成非球形水泥颗粒，导致水泥掺量越高，浆体流动性越低。Saloni 等[8]探讨了含不同水泥掺量的稻壳灰基地聚合物混凝土的性能特性，并指出当水泥掺量为 15%时，试样抗压强度显著增大（22.44%），这一现象归因于较高含量的 C-S-H、C-A-S-H、N-A-S-H 凝胶共同存在。Delgado-Plana 等[9]探讨了将硅锰渣废料循环利用制备混合碱激发水泥的潜力，发现添加水泥可显著提高混合碱激发水泥的弯曲强度与抗压强度，其中在养护 28 天后，其最大抗压强度可达 24.7 MPa。Fu 等[10]探索了硫酸钠对矿渣-水泥体系反应活性及早期强度的提升作用机制，认为试样早期强度的提升是因为硫酸钠能够促使水泥水化反应增强与矿渣溶解速率加快。Zhang 等[11]发现混合碱激发水泥浆体的抗压强度随着养护温度的升高而逐渐增加，且在零下养护温度下，混合碱性激发水泥也表现出比水泥更好的抗压强度。然而，现阶段混合碱激发水泥多是通过工业固废和水泥与碱性激发剂直接混合制备，化学反应复杂，且协同机制不清晰，阻碍了其进一步推广应用。

本文以地聚合物与水泥的混合体系为研究对象，采用双阶段混合工艺，研究水泥掺量、双阶段静置时间对混合碱激发水泥抗压强度、流动度、凝结时间和表观粘度的影响规律，为开发新型工程凝胶材料提供理论指导。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

地聚合物的原材料选用工业固废赤泥和矿渣，其中赤泥颗粒直径为 300 目~400 目来自山东益铸材料厂，矿渣（S95 级）来自恒旺环保材料厂。水泥选用海螺牌 PO 42.5 级普通硅酸盐水泥。上述原材料的化学组成见表 1。此外，水玻璃和氢氧化钠均来自桂林鸿昇达化学试剂有限公司，其中水玻璃的模数为 3.3，氢氧化钠的固体纯度为 98%。

表 1 原材料的化学组成/%

Table 1 Chemical compositions of raw materials

成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	CaO	TiO_2	MgO
赤泥	18.53	22.60	39.04	10.92	1.23	6.26	0.16
矿渣	36.10	16.32	0.14	-	35.58	-	11.32
水泥	19.69	4.75	3.66	1.28	61.68	2.73	-

1.2 试验方案设计

混合碱激发水泥由地聚合物浆体和水泥浆体二次混合制备。其中，赤泥与矿渣按 1:1 质量比进行配合，在激发剂模数为 1.4，水胶比为 0.45，砂胶比为 1.5，碱掺量为 5%的条件下，制备地聚合物浆体。水泥掺量以占原材料总质量的百分比计，分别选取水泥掺量为 0%、10%、20%、30%制备水泥浆体，其中水胶比和砂胶比与地聚合物浆体保持一致。试样的具体配合比如表 2 所示。

表 2 试样的配合比/g

Table 2 Mix proportions of specimens

实验组	水泥浆体			地聚合物浆体					
	水泥	砂子	水	矿渣	赤泥	砂子	NaOH	水玻璃	水
OPC0	0	0	0	250	250	750	16.02	113.1	151.1
OPC10	50	75	22.5	225	225	675	14.6	101.8	136
OPC20	100	150	45	200	200	600	13	90.5	120.9
OPC30	150	225	67.5	175	175	525	11.4	79.2	105.8

1.3 试样制备

首先，制备地聚合物浆体和水泥浆体。将水玻璃与氢氧化钠混合，调至模数为 1.4 的碱激发剂溶液，冷却至室温备用。称取适量矿渣、赤泥、砂子，依次倒入搅拌机，低速搅拌使材料混合均匀，加入碱激发剂溶液，搅拌至浆体均匀，制得地聚合物浆体。此外，称取适量水泥、砂子、水，置于另一搅拌机并搅拌均匀，制得水泥浆体。然后，将上述两种浆体分别静置至设定时间（0 min、15 min、30 min）后，迅速混合并快速搅拌获得混合碱激发水泥浆体。最后，将浆体倒入 40 mm×40 mm×40 mm 的模具中，并在振动台上振实以排除气泡，试样成型后移入标准养护箱（温度 20±2 ℃，相对湿度≥95%），养护 24 h 后拆模并编号。拆模后试样继续置于标准养护箱至规定龄期。

1.4 性能测试

力学性能测试参照《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》（GB/T 17671-2021），流动度测试参照《水泥胶砂流动度测定方法》（GB/T 2419-2005），凝结时间测试参照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》（GB/T 1346-2011），表观粘度测试参照《Standard Guide for Measurement of the Rheological Properties of Hydraulic Cementitious Paste Using a Rotational Rheometer》（C1749-17a）。

2 结果分析与讨论

2.1 抗压强度

图 1 为水泥掺量、静置时间对试样 28 d 抗压强度的影响。可见，随着水泥掺量的增加，试样的抗压强度呈现先升高后降低的趋势，且水泥掺量为 10%时试样的抗压强度最高。当静置时间为 0 min 时，水泥掺量为 10%试样的抗压强度最高，这是由于水泥充当了富钙型原材料促使体系中形成了更多钙化物，加快了原材料的聚合过程，并产生了更多的 C-A-S-H 凝胶[8]。然而，随着水泥掺量的增加，体系中碱含量逐渐降低，原材料反应不充分，生成的凝胶量减少，致使试样的抗压强度逐渐降低。

当静置时间为 15 min 时，与静置时间为 0 min 试样相比，地聚合物浆体和水泥浆体混合后呈现出显著的协同增强效应。当静置时间为 0 min 时，由于水泥水化反应比地聚合物反应的速度慢，地聚合物所生成的凝胶会在部分水泥颗粒周围形成一层半保护性的涂层，阻碍了物质扩散和化学反应的进行[12]。当静置时间为 15 min 时，由于水泥具有充分时间进入水化阶段，两种浆体再进行混合，会避免出现水泥颗粒被地聚合物凝胶包裹的情况[13]，可以使水泥在碱性环境下更加充分地参与反应，故其试样抗压强度较高。

当静置时间为 30 min 时，与静置时间为 0 min 试样相比仍具有一定的增强作用。当水泥掺量为 10%和 20%时，静置时间为 30 min 试样的抗压强度要低于静置时间为 15 min 试样，这是由于随着静置时间的增加，水泥以自身水化反应为主，参与地聚合反应的成分减少所致。当水泥掺量为 30%时，

随着静置时间的增加，试样的抗压强度显著升高，但整体仍低于水泥掺量为 10%和 20%试样的抗压强度。

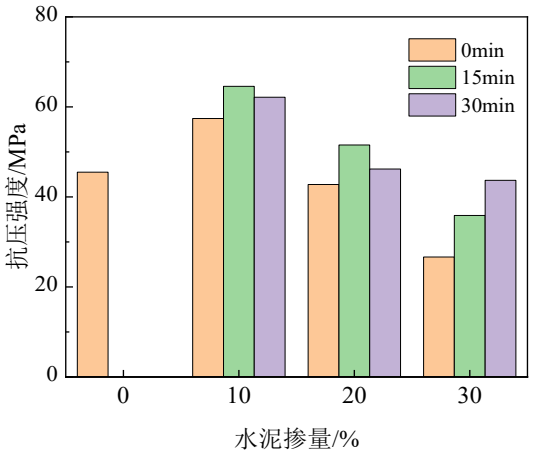


图 1 试样 28d 抗压强度

Fig. 1 28 d compressive strength of specimen

2.2 流动度

图 2 为静置时间为 15 min 时水泥掺量对流动度的影响。可见，随着水泥掺量的增加，混合碱激发水泥浆体的流动度呈现先减小后增大的趋势。当水泥掺量为 10%时，与水泥掺量为 0%试样相比，水泥起到了增加钙元素的作用，加速了原材料早期的水化反应，导致试样的流动度减小。其次，水泥掺量较低时，体系中碱激发剂占比较高且粘度较大，导致新拌浆体粘度大，试样的流动度减小。然而，随着水泥掺量的增大，体系中碱激发剂占比逐渐降低，水分占比逐渐升高，浆体粘度降低，导致试样的流动度增大。其次，由于水分占比的增加，碱激发剂被稀释，原材料的早期水化反应速度减缓，也会促使试样的流动度增大。

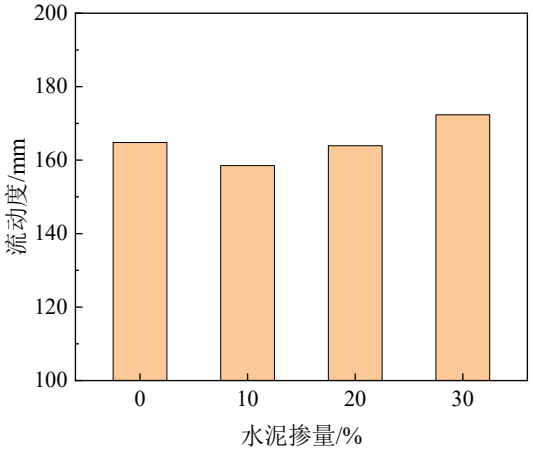


图 2 静置 15 min 时水泥掺量对流动度的影响

Fig. 2 Cement content effect on the fluidity when the standing time is 15 min

2.3 凝结时间

图 3 为静置时间为 15 min 时水泥掺量对凝结时间的影响。可见，随着水泥掺量的增加，混合碱激发水泥的凝结时间呈现先缩短再变长最后再缩短的趋势。当水泥掺量为 0%～10%时，原材料中的钙硅比增加，在碱性环境下溶解的钙离子浓度较高，加速了浆体的凝固过程，导致试样的凝结时间缩短[14]。当水泥掺量为 10%～20%时，体系的碱性环境开始减弱，原材料的溶解速度变慢，导致试样的凝结时间变长。当水泥掺量继续增大（30%），体系中地聚合反应和水泥的水化反应并存，且水

泥的水化反应能够为地聚合反应提供足够的热量，促进了原材料的进一步反应[15]，致使试样的凝结时间开始缩短。

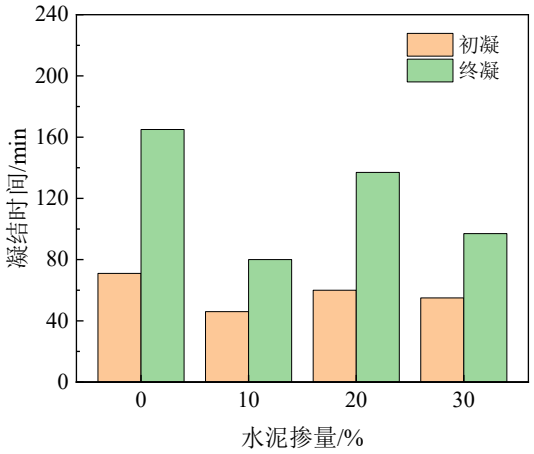


图 3 静置 15 min 时水泥掺量对凝结时间的影响

Fig. 3 Cement content effect on the setting time when the standing time is 15 min

2.4 表观粘度

图 4 为静置时间为 15 min 时水泥掺量对表观粘度的影响。可见，随着水泥掺量的增加，混合碱激发水泥的表观粘度呈现先增大后减小的趋势。在混合碱激发水泥浆体中，固体颗粒之间通过物理吸附、化学键或凝胶产物的桥接，会相互连接形成一个松散但整体的絮凝结构。当剪切速率较低时，絮凝结构保持的较完整，浆体的流动阻力和表观粘度较大。随着剪切速率逐渐增大，浆体的絮凝结构被破坏，原本被包裹在结构内部的束缚水被释放并转化为自由水，自由水的增加起到了润滑剂的作用，降低了整个浆体的表观粘度[16]。此外，当水泥掺量为 10%时，试样浆体的表观粘度最大，这是由于水泥的加入，体系补充了钙元素，促进了原材料的反应，生成的凝胶量增多，所形成的絮凝结构更加稳定，从而导致试样浆体的表观粘度增大。然而，随着水泥掺量的增多，体系中碱浓度变低，原材料的反应速率降低，生成的凝胶量减少，所形成的絮凝结构不稳定，导致试样浆体的表观粘度减小。

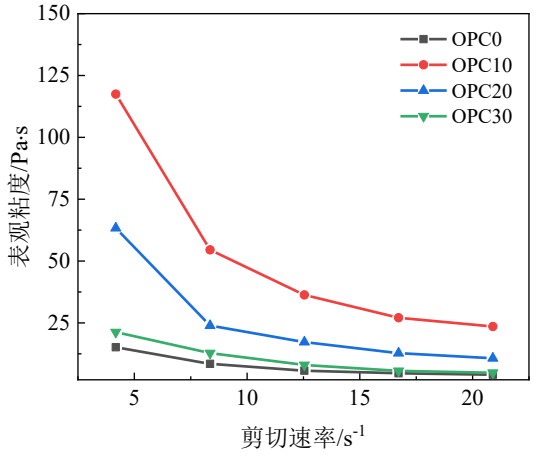


图 4 静置 15 min 时水泥掺量对表观粘度的影响

Fig. 4 Cement content effect on the apparent viscosity when the standing time is 15 min

3 结论

本文以矿渣-赤泥基地聚合物浆体与水泥浆体的混合体系为研究对象，研究了水泥掺量与静置时间对混合碱激发水泥抗压强度、流动度、凝结时间和表观粘度的影响规律，主要结论如下：

（1）地聚合物浆体和水泥浆体混合后具有显著的协同增强效应。随着水泥掺量的增加，试样抗压强度先升高后降低。当水泥掺量为 10%和静置时间为 15 min 时，试样的抗压强度最高。

（2）随着水泥掺量的增加，混合碱激发水泥的流动度先减小后增大。水泥掺量越高，体系中碱激发剂比例降低，水分占比升高，浆体粘度降低，致使混合碱激发水泥的流动度增大。然而，混合碱激发水泥的凝结时间随着水泥掺量的增加，呈现先缩短再变长最后再缩短的趋势。

（3）随着水泥掺量的增加，混合碱激发水泥的表观粘度先增大后减小。其中，当水泥掺量为 10%时，浆体表观粘度最大。当水泥过量时，体系中碱浓度变低，生成的凝胶量减少，所形成的絮凝结构不稳定，导致试样浆体表观粘度减小。

参考文献

[1] 白玫. 中国水泥工业碳达峰、碳中和实现路径研究[J]. 价格理论与实践, 2021, 4: 4-11.

[2] 马彬, 陈至远, 衣兆林, 等. SiO_2 气凝胶改性地聚合物的干燥收缩性能[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(9):846-852.

[3] Fu B, Cheng Z Y, Han J Y, et al. Understanding the Role of Metakaolin towards Mitigating the Shrinkage Behavior of Alkali-Activated Slag[J]. Materials, 2021, 14(22):6962.

[4] El-Yamany H E, El-Salamawy M A, El-Assal N T. Microstructure and mechanical properties of alkali-activated slag mortar modified with latex[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191:32-38.

[5] Li S Q, Si W, Hui J Q, et al. The effect and mechanism of superplasticizers on the efflorescence performance of alkali-activated slag-based materials[J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 22:e04160.

[6] Mahapatra A K, Pradhan B. Hybrid alkali activated cements (HAACs) system: a state-of-the-art review on fresh, mechanical, and durability behaviour[J]. Construction and Building Materials, 2022, 361: 129636.

[7] Mohapatra A K, Pradhan B. A study on early age properties of hybrid alkali activated mortars cured under ambient condition[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 65:954-960.

[8] Saloni, Parveen, Lim Y Y, et al. Influence of Portland cement on performance of fine rice husk ash geopolymer concrete: strength and permeability properties[J]. Construction and Building Materials, 2021, 300:124321.

[9] Delgado-Plana P, García-Díaz A, Bueno-Rodríguez S. Influence of NaOH molarity and Portland cement addition on performance of alkali activated cements based in silicomanganese slags[J]. Construction and Building Materials, 2023, 407:133544.

[10] Fu J, Jonesa A M, Bligha M W, et al. Mechanisms of enhancement in early hydration by sodium sulfate in a slag-cement blend-Insights from pore solution chemistry[J]. Cement and Concrete Research, 2020, 135:106110.

[11] Zhang G, Yang H, Ju C, et al. Novel selection of environment-friendly cementitious materials for winter construction: alkali-activated slag/Portland cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258:120592.

[12] García-Lodeiro I, Fernández-Jiménez A, Palomo A. Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash-portland cement blends[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 52: 112-122.

[13] 王卫中, 冯忠绪, 张晓波. 混凝土二次搅拌的机理分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, 28(1): 103-107.

[14] Wang S, Kong J F, Li Z H, et al. Effect of initial calcium to silicon ratio on the hybrid alkali-activated cement: From strength development to microstructure evolution[J]. Construction and Building Materials, 2025, 464: 140179.

[15] Xue L L, Zhang Z H, Wang H. Early hydration kinetics and microstructure development of hybrid alkali activated cements (HAACs) at room temperature[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 123: 104200.

[16] 俞莉, 张树祥, 朱涛, 等. 钢渣-矿粉基地聚合物的流变性能及其参数预测[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(5):465-476.

基金项目：自治区级大学生创新创业训练计划项目（S202510595165）。

[1] **第 1 作者简介：**黄延锟（2003-），男，本科生在读，研究方向：土木工程材料。E-mail: 17754548159@163.com。

[*]**通讯作者简介：**马彬（1986-），男，博士研究生，副教授，研究方向： 土木工程材料。 E-mail: guidianma@163.com。