

# 碱激发多元复合胶凝材料研究进展

张浩力<sup>1</sup>, 姚欣远<sup>2</sup>, 洪伟华<sup>3</sup>, 武金婷<sup>2</sup>

<sup>1</sup>重庆交通大学土木工程学院, 重庆

<sup>2</sup>浙江宁波理工学院土木建筑工程学院, 浙江 宁波

<sup>3</sup>浙江交投矿业有限公司, 浙江 舟山

收稿日期: 2022年10月23日; 录用日期: 2022年11月19日; 发布日期: 2022年11月28日

## 摘要

为实现“碳中和”的目标以及工业废渣的合理利用, 绿色建筑材料的的应用将逐渐成为主流, 其中, 碱激发材料成为研究的热点。本文通过水化过程、产物和微观结构阐述碱激发多元复合胶凝材料的水化机理, 介绍各类材料的特点和制备方法, 总结碱激发矿渣/粉煤灰基复合体系、偏高岭土基复合体系、赤泥基复合体系的性能, 包括强度、流动度、凝结时间、固化性等。对今后碱激发多元复合胶凝材料的开发和应用提供一定的参考, 并对未来的研究重点提出建议。

## 关键词

碱激发, 多元复合, 水化机理, 制备, 性能研究

# Research Progress of Alkali Activated Multi-Component Composite Cementitious Materials

Haoli Zhang<sup>1</sup>, Xinyuan Yao<sup>2</sup>, Weihua Hong<sup>3</sup>, Jinting Wu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

<sup>2</sup>School of Civil Engineering and Architecture, Ningbo Tech University, Ningbo Zhejiang

<sup>3</sup>Zhejiang Jiaotou Mining Co., Ltd., Zhoushan Zhejiang

Received: Oct. 23<sup>rd</sup>, 2022; accepted: Nov. 19<sup>th</sup>, 2022; published: Nov. 28<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In order to achieve the goal of “carbon neutralization” and the rational utilization of industrial

文章引用: 张浩力, 姚欣远, 洪伟华, 武金婷. 碱激发多元复合胶凝材料研究进展[J]. 材料科学, 2022, 12(11): 1184-1190. DOI: 10.12677/ms.2022.1211131

waste residue, the application of green building materials will gradually become the mainstream, among which alkali activated materials become the research focus. This paper describes the hydration mechanism of alkali activated multi-component composite cementitious materials through the hydration process, products and microstructure, introduces the characteristics and preparation methods of various materials, and summarizes the properties of alkali activated slag/fly ash-based composite systems, metakaolin-based composite systems, and red mud based composite systems, including strength, fluidity, setting time, solidification, etc. It provides some reference for the development and application of alkali activated multi-component cementitious materials in the future, and puts forward suggestions for future research focus.

## Keywords

Alkali Activated, Multi-Component Composite, Hydration Mechanism, Preparation, Performance Study

Copyright © 2022 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

碱激发材料是以矿渣、粉煤灰等具有潜在活性的工业废渣为主要胶凝组分，以  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 、 $\text{NaOH}$  等碱化合物为激发剂，混合制备而成，具有早强、耐久性好、生产便利、低碳等优势[1] [2] [3] [4]，是一种理想的硅酸盐水泥替代品。国外对碱激发材料的研究较早，最早可追溯至 1930 年，德国的 Kuhl 对  $\text{KOH}$  矿渣混合物的凝结特性展开研究，而我国起步较晚，在二十世纪八十年代才开始对碱激发材料进行研究。

我国在建筑领域的投入日益加大，水泥消耗巨大，环境问题愈发严重。传统的硅酸盐水泥是最主要的建筑材料，在生产过程中会排放大量的二氧化碳气体，同时消耗大量的不可再生资源。国家提出 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和，这两个目标使得减碳需求更加迫切。因此，对碱激发材料开发和应用可实现资源合理化应用，能够有效降低碳排放，助力“双碳”目标的实现，对于我国水泥行业发展意义重大。

工业废渣种类较多，具有不同的特点，对多种废渣复合材料激发可产生协同效应，能制备出性能更加优异的胶凝材料[5]。目前，碱激发多元复合胶凝材料包括矿渣/粉煤灰基、偏高岭土基、赤泥基等体系。

本文从水化机理、制备和性能三个方面对碱激发多元复合胶凝材料进行归纳总结，介绍其水化产物、微观结构等，概述制备的原材料及配制方式，分析各多元体系的流动度、凝结时间、力学性能等，并对未来的研究趋势进行展望。

## 2. 碱激发多元复合胶凝材料的水化机理

### 2.1. 水化反应过程及产物

碱激发矿渣的作用机理已较为成熟，普遍认为碱性激发剂破坏矿渣表面结构( $\text{Si-O-Si}$ 、 $\text{Al-O-Al}$ 、 $\text{Si-O-Al}$  等共价键)，释放内部的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{SiO}_4^{4-}$  等离子，发生缩聚反应，生成  $\text{C-S-H}$  等产物[6]。

Yin B [7]认为碱激发低钙粉煤灰反应过程可分为四个阶段：1) 溶解阶段，粉煤灰和碱溶液混合后释放出一系列活性离子；2) 解聚阶段，破坏硅铝酸盐网络结构；3) 缩聚和聚合物凝胶阶段，产生铝硅酸盐

凝胶, 并逐渐累积; 4) 扩散阶段, 由于前期反应产生的沉淀覆盖尚未溶解的颗粒, 阻碍其接触, 此时离子通过沉淀间的缝隙扩散而反应, 且速率逐渐降低。Sun J [8]发现碱激发钢渣的水化放热过程与水泥相似, 但是休眠期提前, 累积放热量更低, 水化产物为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{C}(\text{A})\text{-S-H}$ 。当在碱激发的体系中存在一定量的微细惰性废渣, 如石灰石粉[9], 能产生成核效应, 加速其水化, 虽然石灰石粉反应微弱, 但可改善整体结构, 增强性能。

杜天玲[10]以水玻璃和  $\text{NaOH}$  为激发剂, 激发矿渣-粉煤灰复合材料, 分析得出其水化过程为激发剂破坏矿渣和粉煤灰的表面结构, 使  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$ 等活性物质溶出, 重新聚合生成  $\text{C-S-H}$  和  $\text{C-A-S-H}$  凝胶。但 Bernal S A [11]认为碱激发矿渣/粉煤灰的水化产物为  $\text{C-A-S-H}$  和  $\text{N-A-S-H}$  凝胶。在碱激发的水化反应过程中, 除了生成三种凝胶外还有可能出现  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、沸石、水滑石、莫来石等物质[12] [13] [14]。

## 2.2. 微观结构

Zhang Z [15]利用  $\text{NaOH}$  激发碱渣和矿渣复合材料进行研究, 结果显示: 当  $\text{Na}_2\text{O}$  为 3% 时, 促进了水化, 凝胶分布连续且孔隙较小, 但  $\text{Na}_2\text{O}$  增加到 4% 时, 凝胶生成速率明显增加, 导致分布不均匀, 产生的大孔数量增加, 因此需要注意控制激发剂的掺量。

Aemail H E C C [16]探讨试件在水中养护的条件下, 碱激发矿渣/粉煤灰混凝土的微观结构演变过程, 1 d 龄期的混凝土会形成许多微小裂隙, 在 7 d 龄期时没有发生明显变化, 而龄期到达 28 d, 由于粉煤灰活性相对较弱, 后期仍在持续水化, 生成强度较差的  $\text{N-A-S-H}$  凝胶, 微裂纹进一步发展。

Zhu C [17]采用扫描电镜分析碱激发矿渣-粉煤灰的微观结构, 结果表明: 在水化早期浆体结构较为致密, 但会出现粉煤灰的大量堆积, 且随着粉煤灰的掺量增加, 孔隙、微裂纹也随之增加。

但在高温的环境下, 碱激发矿渣-粉煤灰材料的微观结构会有所变化[18]: 在  $400^\circ\text{C}$  以下, 随温度的升高, 会有额外的凝胶产生, 促使整体结构更加致密; 在  $400^\circ\text{C}$  以上会发生  $\text{C-A-S-H}$  的脱水和  $\text{N-A-S-H}$  凝胶的生成, 内部孔隙由微孔状态逐渐转变为大孔状态。

## 3. 碱激发多元复合胶凝材料的制备

### 3.1. 胶凝材料及激发剂

胶凝材料主要分为高钙和低钙两种类型。高钙材料有: 矿粉、磷渣等; 低钙材料有: 粉煤灰、高岭土等。高钙材料由于该含量较高, 硅氧四面体的聚合度相对低, 容易被激发潜在的活性。碱激发剂有: 水玻璃、 $\text{NaOH}$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{KOH}$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  等, 其中水玻璃- $\text{NaOH}$  复合激发剂效果好, 应用最为广泛。何瑞征[19]认为在碱激发矿渣材料中掺入适量的玄武岩石粉, 当硅酸钠含量为 25.08%~35.58%、模数为 1.00~1.50 时, 28 d 抗压强度可达 40 MPa 以上。Chi M [20]从强度、吸水率和干燥收缩三个方面研究碱激发矿渣-粉煤灰的性能, 认为其最佳配比为: 粉煤灰/矿渣 = 1,  $\text{Na}_2\text{O}$  掺量为 6%。马倩敏[21]使用水玻璃和  $\text{NaOH}$  复合激发矿渣, 研究发现  $\text{Na}_2\text{O}$  掺量为 6%, 模数为 1.5 时, 矿渣的激发效果最佳, 抗压强度达到最大值。

### 3.2. 外加剂

在水泥基材料中通常加入外加剂来改善其性能, 便于工程应用, 但大量研究表明, 因碱激发水化机理和原材料性质不同, 传统外加剂的作用效果也有所差异, 表 1 列举了各类外加剂的对碱激发材料的作用效果。

**Table 1.** Research results of additives in alkali activated system**表 1.** 碱激发体系中外加剂的研究成果

学者	外加剂类型	研究内容及成果
M. P, F. P [22]	减水剂	研究聚羧酸盐、乙烯基共聚物、三聚氰胺和萘系减水剂对 NaOH 激发矿渣的作用，分析得出，只有萘系减水剂能提高浆体的流动性。
刘荣[23]	减水剂	探讨了各类减水剂对碱激发矿渣-粉煤灰的作用效果，结果表明：木质素磺酸钠对浆体的流动度有一定的改善作用，聚羧酸减水剂反而加快凝结。
樊晓丹[24]	缓凝剂	通过调整 BaCl <sub>2</sub> 、Zn(NO) <sub>3</sub> 、Zn(NO) <sub>3</sub> 和葡萄糖酸钠复合缓凝剂的掺量，均可延长碱激发矿渣的凝结时间，满足注浆料所需的强度和凝结时间的目标。
Xinyu C [25]	缓凝剂	采用 Zn(NO) <sub>3</sub> 、葡萄糖酸钠，结果表明：葡萄糖酸钠促进碱激发矿渣的水化，而 Zn(NO) <sub>3</sub> 可显著延长凝结时间。
Gao X [26]	膨胀剂	以碱激发煤矸石-矿渣为研究对象，添加 SAC、HCSA 和 UEA 三种膨胀剂，从水化机理、干燥收缩和抗压强度三个角度，分析各膨胀剂的适用性，结果表明：SAC 可减缓早期的水化反应，HCSA 和 UEA 则根据掺量促进或抑制反应；三种膨胀剂均能减少材料的干燥收缩；HCSA 和 UEA 对抗压强度的敏感性很高，随掺量的增加会产生显著的变化。
Shen W [27]	膨胀剂	利用 MgO 膨胀剂改性碱激发矿渣-粉煤灰水泥，干燥收缩和抗裂性得到很大提高，标准稠度用水量和凝结时间与普通硅酸盐水泥接近。
麻鹏飞[28]	膨胀剂	采用氧化钙膨胀剂和氧化钙-硫铝酸钙复合膨胀剂研究碱激发矿渣的收缩规律，结果显示：在掺量为 6%~10% 时，氧化钙膨胀剂的抗收缩效果较好，甚至会出现膨胀；而氧化钙-硫铝酸钙复合膨胀剂则相反，基本无改善效果。

### 3.3. 配制方式

碱激发剂有两种类型，分别以液体和固体的形式存在。目前有两种碱激发剂的添加方式，分别为：

1) 将碱激发剂调配好以溶液的形式进行添加，而后与固废原料进行拌合；2) 将固体碱激发剂直接与粉料混合，搅拌均匀，最后加入水制成浆体。其中，因液体水玻璃的制作及成本等原因，市场上的液体水玻璃模数较高，处于 2.2~3.3 之间，一般通过加入 NaOH 来调整模数，具体流程如下：向水玻璃中加入一定量的水和 NaOH，搅拌溶解，配制成所需模数的碱激发剂，静置一天，冷却至室温及达到化学稳定。

为达到更好的激发效果，可将工业废渣进行一定时间的机械粉磨。机械粉磨有以下三方面的作用[29]：

- 1) 造成颗粒尺寸减小，密度和吸附能力的改变
- 2) 引起结晶构造甚至晶型的改变
- 3) 进行合成反应，并使物质的潜在活性得到进一步的发挥。

## 4. 碱激发多元复合胶凝材料的性能

### 4.1. 矿渣/粉煤灰基复合体系

庄培镇[30]以矿渣掺量为变量，研究其对碱激发矿渣-粉煤灰的净浆和砂浆的力学性能，结果显示：随矿渣掺量的增加，会促进强度的发展，同时砂浆弹性模量高于净浆，但是会引起脆性的增强。Koplík J [31]研究碱激发矿渣-粉煤灰的固化特性，结果表明：在矿渣-粉煤灰的激发过程中可固化 Ba、Cu、Pb 三种重金属，分别形成 BaSO<sub>4</sub>、Pb(OH)<sub>2</sub> 和 Cu(OH)<sub>2</sub> 沉淀，被包裹在材料中。碱激发矿渣砂浆的收缩较大，远大于普通水泥砂浆，会引起结构开裂，王东平[32]认为可在碱激发矿渣掺入粉煤灰改善其性能，分析得出：粉煤灰掺量与浆体的凝结时间和收缩率呈正相关，自收缩下降的幅度明显大于化学收缩，但是抗压

强度则随之下降,当粉煤灰掺量在 20%~40%,28 d 抗压强度能保持在 40 MPa 以上,凝结时间和收缩率也能满足要求。

吴旻[13]利用石灰激发矿渣-钢渣-粉煤灰复合材料,分析得出,矿渣掺量小于 10%,且矿渣/石灰的比例为 1~2,可达到较高强度,适量的生石灰和原材料中的惰性成分能促进早期强度的发展,后期强度的增长主要有粉煤灰和钢渣的水化反应提供。Meysam N [33]研究发现,碱激发天然火山灰-矿渣砂浆在水化放热量、吸水率和氯离子渗透三方面与普通硅酸盐水泥相比有明显的优势。

## 4.2. 偏高岭土基复合体系

袁正平[34]研究发现,激发剂的模数对冶炼铅渣-偏高岭土复合胶凝材料 28 d 抗压强度的影响最大,当模数为 1.4 时,28 d 抗压强度最大可达 56.18 MPa。顾海荣[35]以偏高岭土和改良土为胶凝材料,以生石灰和小苏打为复合激发剂,进行强度试验和扫描电镜测试,结果表明其固化效果优于黏土和普通硅酸盐水泥。李相国[36]通过测试强度、裂缝宽度和面积,分析认为分散乳胶粉和苯丙乳液明显改善碱激发偏高岭土的抗裂性、柔韧性和界面黏结性。

## 4.3. 赤泥基复合体系

李召峰[37]研究石粉对碱激发赤泥的作用,发现石粉可发挥成核效应和填充效应,有效促进水化,降低孔隙率,石粉掺量为 5%时为最佳,3 d 抗压强度能提升 18.94%。安强[38]通过对碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料的研究发现,28 d 抗压强度最大可达 20.1 MPa,同时对重金属离子的固化性较好。宋丽娜[39]进行拜耳法赤泥激发研究,根据正交试验结果得出,石油焦脱硫石膏对强度的影响大于水胶比和高贝利特硫酸盐水泥,28 d 抗压强度最大为 25 MPa。

## 5. 结语

1) 碱激发材料的水化机理尚未统一,但各类碱激发材料的反应过程较为相似,包括单一胶凝组分和多元复合胶凝组分,可概括为溶解、解聚、缩聚、硬化四个阶段,水化产物主要为 C-S-H、C-A-S-H 和 N-A-S-H 凝胶,因其胶凝组分、激发剂类型会导致水化产物的差异。

2) 碱激发多元复合胶凝材料以矿渣/粉煤灰基复合体系、偏高岭土基复合体系、赤泥基复合体系三种体系为主,关于矿渣/粉煤灰基复合体系的研究最为深入。各种体系的强度接近甚至高于普通硅酸盐水泥,惰性材料具有促进水化和增强体积稳定性的作用。同时其固化性较好,包括对重金属离子和土体的固化。材料性能的主要影响因素为原材料、碱激发剂的种类、碱激发剂的掺量等,当碱激发剂为水玻璃和 NaOH 复合时,Na<sub>2</sub>O 最佳掺量为 5%左右,最佳模数集中在 1.0~1.5。

3) 碱激发多元复合材料虽然在强度、水化热、固化性等方面优于普通硅酸盐水泥,但材料性能不稳定以及收缩大等问题限制了它的推广和应用。未来应针对各类碱激发材料的特点提出相应的配比和制备方法,并形成系统,对碱激发多元复合胶凝材料现有的性能缺陷进行改性增强研究,扩大其应用范围。

## 基金项目

浙江省自然科学基金(LY20E080002),国家级大学生创新创业项目(202213022043)。

## 参考文献

- [1] Tayeh, B.A., Hamada, H.M., Almeshal, I., *et al.* (2022) Durability and Mechanical Properties of Cement Concrete Comprising Pozzolanic Materials with Alkali-Activated Binder: A Comprehensive Review. *Case Studies in Construction Materials*, **17**, e1429. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01429>
- [2] Zhou, S., Tan, C., Gao, Y., *et al.* (2021) One-Part Alkali Activated Slag Using Ca(OH)<sub>2</sub> and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Instead of NaOH

- as Activator: More Excellent Compressive Strength and Microstructure. *Materials Research Express*, **8**, Article ID: 085501. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac16f4>
- [3] Komljenović, M.M., Baščarević, Z., Marjanović, N., *et al.* (2012) Decalcification Resistance of Alkali-Activated Slag. *Journal of Hazardous Materials*, **233-234**, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.063>
- [4] 郑文忠, 邹梦娜, 王英. 碱激发胶凝材料研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 28-39.
- [5] 宋维龙, 朱志铎, 浦少云, 等. 碱激发二元/三元复合工业废渣胶凝材料的力学性能与微观机制[J]. 材料导报, 2020, 34(22): 22070-22077.
- [6] 张兰芳. 碱激发矿渣水泥和混凝土[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2018.
- [7] Yin, B., Kang, T., Kang, J., *et al.* (2018) Analysis of Active Ion-Leaching Behavior and the Reaction Mechanism during Alkali Activation of Low-Calcium Fly Ash. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **12**, Article No. 50. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0282-3>
- [8] Sun, J., Zhang, Z., Zhuang, S., *et al.* (2020) Hydration Properties and Microstructure Characteristics of Alkali-Activated Steel Slag. *Construction and Building Materials*, **241**, Article ID: 118141. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118141>
- [9] Nailia, R.R., Ravil, Z.R., Natalia, I.N., *et al.* (2016) Influence of Limestone Content, Fineness, and Composition on the Properties and Microstructure of Alkali-Activated Slag Cement. *Cement and Concrete Composites*, **72**, 268-274. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.015>
- [10] 杜天玲, 刘英, 于咏妍, 等. 水玻璃对粉煤灰矿渣地聚合物强度的影响及激发机理[J]. 公路交通科技, 2021, 38(1): 41-49.
- [11] Bernal, S.A., Provis, J.L., Walkley, B., *et al.* (2013) Gel Nanostructure in Alkali-Activated Binders Based on Slag and Fly Ash, and Effects of Accelerated Carbonation. *Cement and Concrete Research*, **53**, 127-144. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.06.007>
- [12] 蒋勇, 贾陆军, 文梦媛, 等. 碱激发粉煤灰/钢渣胶凝材料的制备[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2152-2156.
- [13] 吴旻, 谢胜华, 葛根旺. 碱激发钢渣矿渣复合基层材料的强度特性及微观机制[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2640-2646.
- [14] 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>
- [15] Zhang, Z., Xie, C., Sang, Z., *et al.* (2022) Mechanical Properties and Microstructure of Alkali-Activated Soda Residue-Blast Furnace Slag Composite Binder. *Sustainability*, **14**, Article No. 11751. <https://doi.org/10.3390/su141811751>
- [16] Aemail, H.E.C.C., Shehab, E. and Al-Sallamin, A. (2021) Effect of Curing Regime on the Performance and Microstructure Characteristics of Alkali-Activated Slag-Fly Ash Blended Concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, **10**, 289-317. <https://doi.org/10.1080/21650373.2021.1883145>
- [17] Zhu, C., Wan, Y., Wang, L., *et al.* (2022) Strength Characteristics and Microstructure Analysis of Alkali-Activated Slag-Fly Ash Cementitious Material. *Materials*, **15**, Article No. 6169. <https://doi.org/10.3390/ma15176169>
- [18] Park, S.M., *et al.* (2016) Physicochemical Properties of Binder Gel in Alkali-Activated Fly Ash/Slag Exposed to High Temperatures. *Cement and Concrete Research*, **89**, 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.004>
- [19] 何瑞征, 黄吉意, 钱亚, 等. 玄武岩石粉-矿渣碱激发胶凝材料的制备研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(11): 115-118.
- [20] Chi, M. and Huang, R. (2013) Binding Mechanism and Properties of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Mortars. *Construction and Building Materials*, **40**, 291-298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.003>
- [21] 马倩敏, 黄丽萍, 牛治亮, 等. 碱激发剂浓度及模数对碱矿渣胶凝材料抗压性能及水化产物的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6): 2002-2007.
- [22] Palacios, M. and Puertas, F. (2004) Effect of Superplasticizer and Shrinkage-Reducing Admixtures on Alkali-Activated Slag Pastes and Mortars. *Cement and Concrete Research*, **35**, 1358-1367. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.014>
- [23] 刘荣, 马玉玮, 李源, 等. 外加剂对碱激发粉煤灰/矿渣胶凝材料早期性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 107-113.
- [24] 樊晓丹, 李玉祥, 王少剑, 等. 碱激发超细矿渣粉制备灌浆料的缓凝问题研究[J]. 混凝土, 2014(10): 81-85.
- [25] Cong, X.Y., *et al.* (2019) Low Field NMR Relaxation as a Probe to Study the Effect of Activators and Retarders on the Alkali-Activated GGBFS Setting Process. *Cement and Concrete Composites*, **104**, Article ID: 103399. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103399>

- [26] Gao, X., Liu, C., Shui, Z., *et al.* (2021) Effects of Expansive Additives on the Shrinkage Behavior of Coal Gangue Based Alkali Activated Materials. *Crystals*, **11**, Article No. 816. <https://doi.org/10.3390/cryst11070816>
- [27] Shen, W., Wang, Y., Zhang, T., *et al.* (2011) Magnesia Modification of Alkali-Activated Slag Fly Ash Cement. *Journal of Wuhan University of Technology—Materials Science Edition*, **26**, 121-125. <https://doi.org/10.1007/s11595-011-0182-8>
- [28] 麻鹏飞, 李爽, 程宝军, 等. 碱激发矿渣水泥基材料收缩性能研究[J]. 无机盐工业, 2020, 52(10): 145-150.
- [29] 杨南如. 非传统胶凝材料化学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2018.
- [30] 庄培镇, 马玉玮, 罗甜恬, 等. 碱激发矿渣/粉煤灰净浆/砂浆力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(10): 3578-3589.
- [31] Koplík, J., Kalina, L., Másilko, J., *et al.* (2016) The Characterization of Fixation of Ba, Pb, and Cu in Alkali-Activated Fly Ash/Blast Furnace Slag Matrix. *Materials*, **9**, Article No. 533. <https://doi.org/10.3390/ma9070533>
- [32] 王东平, 陈佩圆, 王亮, 等. 粉煤灰掺量对碱激发矿渣砂浆减缩特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(2): 701-705.
- [33] Meysam, N., Nader, G. and Mohammadreza, S. (2018) Alkali-Activated Natural Pozzolan/Slag Mortars: A Parametric Study. *Construction and Building Materials*, **164**, 625-643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.222>
- [34] 袁正平, 耿新洋, 王富林. 碱激发冶炼铅渣-偏高岭土复合胶凝材料的制备及水化机理[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1724-1733.
- [35] 顾海荣, 张鹏, 王盛年, 等. 偏高岭土地聚物改良土最优配比及固化效果分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17): 7089-7098.
- [36] 李相国, 段超群, 马保国, 等. 聚合物对偏高岭土地聚物的改性研究[J]. 混凝土, 2013(12): 103-106.
- [37] 李召峰, 陈经棚, 杨磊, 等. 石粉对赤泥基注浆材料的影响机制[J]. 工程科学学报, 2021, 43(6): 768-777.
- [38] 安强, 潘慧敏, 赵庆新, 等. 碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料性能研究[J]. 建筑材料学报, 2022: 1-10.
- [39] 宋丽娜, 高嵩, 李秋义, 等. 高贝利特水泥-赤泥地聚合物材料制备研究[J]. 混凝土, 2020(7): 124-126.