

粉煤灰对高碱含量水泥基材料早期收缩性能影响

贺元启¹, 张 晖², 李 洋²

(1. 浙江省石油股份有限公司, 杭州 310050;
2. 长江水利委员会长江科学院 工程质量检测中心, 武汉 430072)

摘 要: 为探究粉煤灰对高碱含量水泥基材料早期收缩性能的影响程度及机制, 选择 2 种类型碱和 2 种类型水泥基材料, 利用相关检测技术, 从水化进程、孔结构及孔隙溶液离子含量角度揭示其影响机制。结果表明: 粉煤灰抑制了低热水泥体系和普硅水泥体系由碱引起的干燥收缩和自收缩, 其中对低热水泥体系收缩抑制作用大于普硅水泥体系, 对掺 K_2SO_4 引起的收缩抑制作用高于掺 Na_2SO_4 。其抑制机制在于, 体系水泥含量降低对碱起到稀释作用, 导致体系水化进程减缓, 从而降低了水泥基材料早期收缩率; 不同类型碱对水泥基材料收缩性能的影响不同, 与其水化产物孔结构参数的差异相关。因此, 粉煤灰更有利于降低低热水泥的收缩, 更有利于降低含掺 K_2SO_4 的水泥基材料收缩, 在实际使用粉煤灰时, 需关注水泥基材料类型和所含碱类型, 研究结果可为相关项目提供参考。

关键词: 粉煤灰; 碱; 低热硅酸盐水泥; 收缩性能; 微观结构

中图分类号: TV4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 03-0096-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.016

The Influence of Fly Ash on the Early Shrinkage Performance of High Alkali Content Cement-based Materials

HE Yuanqi¹, ZHANG Hui², LI Yang²

(1. Zhejiang Petroleum Co., Ltd., Hangzhou 310050, China;
2. Engineering Quality Inspection Center, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430072, China)

Abstract: To investigate the degree and mechanism of the influence of fly ash on the early shrinkage performance of high alkali content cement-based materials, two types of alkali and two types of cement-based materials were selected. Relevant detection techniques were used to reveal the influencing mechanism from the perspectives of hydration process, pore structure, and ion content of pore solution. The results indicated that fly ash inhibited the autogenous shrinkage and drying shrinkage caused by alkali in both low-heat Portland cement system and ordinary Portland cement system. Among them, the shrinkage inhibition effect on low-heat Portland cement system was greater than that on ordinary Portland cement system, and it is more effective in suppressing shrinkage caused by potassium sulfate than by sodium sulfate. Mechanism studies had shown that the main

作者简介: 贺元启 (1974—), 男, 硕士, 高级经济师、工程师, 研究方向: 能源投资开发、建设运营以及企业经营管理等。

通信作者: 李 洋 (1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 水泥基材料收缩开裂与预防、水泥基材料微结构分析、水工建筑物全过程质量控制等。

收稿日期: 2025-02-14

mechanism by which fly ash inhibited the shrinkage of high alkali cement-based materials were: Fly ash dilutes alkali by reducing the cement content in the system, slows down the hydration process of the system, thereby reducing the early shrinkage rate of cement-based materials; The influence of different types of alkali on the shrinkage performance of cement-based materials varies, which is related to the differences in pore structure parameters of their hydration products. Therefore, fly ash is more conducive to reducing the shrinkage of low heat cement and cement-based materials containing potassium sulfate. When using fly ash to suppress the shrinkage of cement-based materials in practice, attention should be paid to the type of cement-based material and the type of alkali it contains, The findings provide a reference for related projects.

Key words: fly ash; alkali; low-heat portland cement; shrinkage property; microstructure

0 引言

水泥基材料由于自身的材料特性, 体积变形伴随着其整个服役周期, 其中早期收缩, 如化学收缩、自收缩和干燥收缩对其耐久性能影响较大, 此阶段水泥基材料的抗拉强度较低, 而收缩变形却迅速发展, 在约束条件下, 极易造成水泥基材料体积稳定性不良, 引起开裂^[1]。但随着现代水泥基材料组成的革新和服役环境的变化, 水泥基材料早期收缩性能的研究仍十分重要。

高碱含量能引起水泥混凝土早期收缩开裂问题, 理查德·W·伯罗斯等^[2]、吴华明等^[3] 通过研究表明随着碱含量的提高, 水泥基材料收缩率提高, 其开裂敏感性也随之提高; Yang 等^[4] 研究碱对水泥基材料塑性收缩影响, 表明碱含量的增加, 会导致水泥基材料塑性收缩率的提高。现阶段, 工程中一般选择使用低碱水泥 (碱含量小于 0.6%), 但在水泥基材料中实际拥有 Na_2O 和 K_2O 两种类型的碱, 李洋等^[5] 通过研究外掺 Na_2SO_4 和 K_2SO_4 对水泥基材料开裂敏感性的影响, 证实不同类型的碱对水泥基材料收缩性能的影响差异较大。而随着现代胶凝体系组成的多元化, 及使用环境向西部高寒、高海拔、盐碱地区、沿海海洋区域转移, 整个胶凝体系早期收缩开裂仍面临碱含量这一因素的危害。

为解决水泥基材料早期收缩开裂问题, 改变水泥基材料胶凝组份是重要措施。如使用低 C_3A 含量水泥, Li 等^[6-7] 研究表明低 C_3A 含量的中热硅酸盐水泥和低热硅酸盐水泥具有较低的自收缩和干燥收缩率, 降低了水泥基材料的开裂敏感性; Wang 等^[8] 研究表明, 白鹤滩水电站全坝采用低热水泥, 全坝未出现温度裂缝, 证明低 C_3A 含量水泥在预防大体积混凝土开裂方面, 具有明显优势。但碱在较大程度会促进水泥

水化, 从而提高水泥基材料收缩率, 高碱含量下, 低 C_3A 水泥的收缩特性需要进一步探究。

使用粉煤灰也是改变水泥基材料胶凝组份的重要途径, 付振博等^[9-12] 研究表明粉煤灰取代水泥, 可降低水泥基材料的收缩变形及开裂。但碱对粉煤灰具有一定的激发作用, 宋育鑫等^[13] 研究表明, 碱激发了粉煤灰活性, 在一定程度上提高了混凝土的密实度, 从而提高了其早期强度; 而 Tu 等^[14-16] 在研究碱激发潜在活性材料矿渣胶凝体系时发现, 碱的激发作用与其含量成正比, 碱较大程度上促进矿渣胶凝体系水化, 导致其收缩率提高。高碱含量下, 碱较高的激发作用, 是否会对掺粉煤灰水泥基材料收缩变形性能产生不利影响, 需进一步探究。

通过外掺碱的方式, 调节水泥基材料碱含量, 研究高碱含量下, 粉煤灰对普通硅酸盐水泥 (普硅水泥)、低热硅酸盐水泥 (低热水泥) 干燥收缩和自收缩的影响, 并基于水泥基材料水化进程、孔结构及孔隙溶液离子含量, 探究粉煤灰对不同类型高碱含量水泥基材料早期收缩性能的影响程度及机制。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

采用 P·LH 42.5 低热硅酸盐水泥 (以下简称低热水泥) 和 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥 (以下简称普硅水泥), 其化学组成和矿物组成见表 1。P·LH 42.5 总碱当量 ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) 为 0.40%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (质量比, 下同) 为 2.4, 属低碱水泥; P·O 42.5 总碱当量 ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) 含量较高, 为 0.68%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 4.9。P·LH 42.5 C_2S 含量高于 C_3S 含量, 且 C_4AF 含量高于 15%, C_3A 含量仅为 1.62%, 典型的低热水泥矿物组成; P·O 42.5 中 C_2S 含量低于 C_3S 含量, C_3A 含量达 7.32%。

表 1 水泥化学组成和矿物组成

Table 1 Chemistry composition and Mineral composition of cement

/ %

水泥种类	化学组成									矿物组成			
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Na ₂ O _{eq}	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
P · LH 42.5	59.47	22.59	3.82	5.03	4.71	1.87	0.38	0.16	0.40	32.21	40.47	1.62	15.30
P · O 42.5	61.25	19.84	4.60	2.88	2.18	2.23	0.79	0.16	0.68	57.19	13.74	7.32	8.77

采用 I 级粉煤灰，化学组成和相关物理特性见表 2，可见，粉煤灰总碱当量（Na₂O_{eq}）为 1.48%，高于水泥的总碱量，分别是 P · LH 42.5 水泥的 3.70 倍，P · O 42.5 水泥的 2.18 倍。但早期粉煤灰的碱基本被固化，计算时暂不考虑其碱含量。

表 2 粉煤灰的化学组成

Table 2 Chemical compositions of fly ash

/ %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Na ₂ O _{eq}
42.93	24.25	6.36	2.53	0.93	0.54	16.3	1.34	0.60	1.48

用来调节水泥碱含量的 Na₂SO₄ 和 K₂SO₄ 为分析纯，使用的砂为 ISO 标准砂，此骨料与碱不产生碱骨料反应。

1.2 试验方法

干缩试验、自收缩和孔结构采用砂浆，试验配合比水泥：砂：水为 1：2：0.4，孔隙溶液离子含量和水化产物微观结构采用净浆，试验配合比水泥：水为 1：0.4。通过掺入一定量的 Na₂SO₄ 和 K₂SO₄ 调节水泥的碱含量至 1.2%，掺入的 Na₂SO₄ 和 K₂SO₄ 以水泥质量百分比计量。粉煤灰掺量为 20%。按水泥类型、碱类型和总碱含量将各体系命名，净浆命名去掉砂浆命名后的“M”。水泥砂浆配合比见表 3。

表 3 水泥砂浆配合比

Table 3 Mix proportion of the mortars

编号	水泥类型	水胶比	胶材：砂	外掺	外掺	粉煤灰掺量	总碱含量
				Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄		Na ₂ O _{eq}
L0M		0.4	1：2				0.40
L12NM	低热水泥	0.4	1：2	1.83			1.20
L12KM		0.4	1：2		2.25		1.20
LNFM		0.4	1：2	1.83		20	1.20
LKFM		0.4	1：2		2.25	20	1.20
P0M		0.4	1：2				0.68
P12NM	普硅水泥	0.4	1：2	1.19			1.20
P12KM		0.4	1：2		1.46		1.20
PNFM		0.4	1：2	1.19		20	1.20
PKFM		0.4	1：2		1.46	20	1.20

收缩性能测试（砂浆棒法）：分别开展自收缩与干燥收缩试验。其中自收缩试件处理方式：先对试件表面均匀涂抹凡士林进行密封，再用保鲜膜多

层包覆，包覆层数不低于 5 层，确保试件在标准干缩室内不与外界发生水分交换；干燥收缩试件按对应规范要求放置养护。采用微量热仪对不同水泥体系的水化放热过程进行监测，分析不同组别的水化发展进程。采用吸水动力学法对砂浆试件的孔结构特征进行检测分析。采用火焰光度计测定孔隙溶出溶液中 Na₂O 和 K₂O 的含量，样品预处理流程为：将净浆样品磨细后，按固液比 1：10 的比例称取试样与蒸馏水混合，静置后取上层清液进行检测。

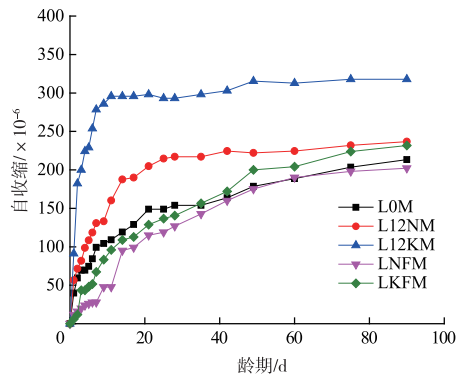
2 结果与讨论

2.1 粉煤灰对水泥基材料收缩特性影响

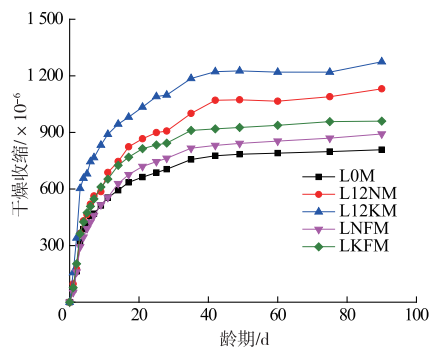
由图 1 可知，粉煤灰对高碱水泥体系自干燥收缩均具有一定的抑制作用。但对不同水泥体系的自收缩影响规律不一致，在低热水泥体系中，如图 1（a）所示，粉煤灰仅对早期（28 d）前的自收缩具有一定的抑制作用，随着龄期的增加，掺粉煤灰试件的自收缩大于空白组试件自收缩，而在普硅水泥中，如图 1（c）所示，粉煤灰具有抑制普硅水泥自收缩的作用，这可能与不同水泥基材料矿物组成及碱对粉煤灰激发作用有关。

粉煤灰对不同水泥基材料掺 Na₂SO₄ 和掺 K₂SO₄ 的抑制程度不一样。在低热水泥体系中，28 d 时，如图 1（a）~图 1（b）所示，不掺粉煤灰高碱水泥砂浆试件 L12NM 和 L12KM 自收缩率分别为 217.0×10⁻⁶ 和 293.2×10⁻⁶，掺粉煤灰高碱水泥砂浆试件 LN-FM 和 LKFM 自收缩率分别为 126.8×10⁻⁶ 和 140.6×

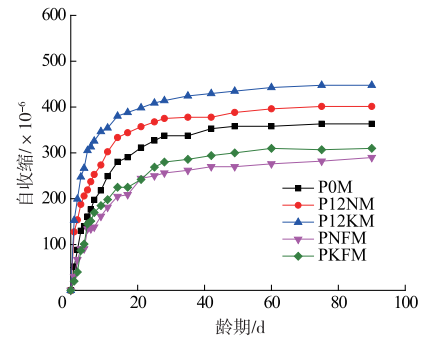
10^{-6} ，不掺粉煤灰高碱水泥砂浆试件 L12NM 和 L12KM 干燥收缩率分别为 907.6×10^{-6} 和 $1\,098.4 \times 10^{-6}$ ，掺粉煤灰高碱水泥砂浆试件 LNFM 和 LKFM 干燥收缩率分别为 763.2×10^{-6} 和 843.4×10^{-6} ，可知，以不掺粉煤灰高碱水泥体系为基础，粉煤灰对掺 Na_2SO_4 和掺 K_2SO_4 水泥体系自收缩的抑制率分别为 41.6% 和 52.0%，干燥收缩的抑制率分别为 15.9% 和 23.2%；同样，在普硅水泥体系中，28 d 龄期时，如图 1 (c) ~ 图 1 (d) 所示，不掺粉煤灰高碱水泥砂浆试件 P12NM 和 P12KM 自收缩率分别为 375.2×10^{-6} 和 414.0×10^{-6} ，掺粉煤灰高碱水泥砂浆试件 PNFM 和 PKFM 自收缩率分别为 256.1×10^{-6} 和 280.0×10^{-6} ，不掺粉煤灰高碱水泥砂浆试件 P12NM 和 P12KM 干燥收缩率分别为 887.3×10^{-6} 和 $1\,038.3 \times 10^{-6}$ ，掺粉煤灰高碱水泥砂浆试件 PNFM 和 PKFM 干燥收缩率分别为 818.0×10^{-6} 和 896.4×10^{-6} ，可知，粉煤灰对掺 Na_2SO_4 和掺 K_2SO_4 水泥体系自收缩的抑制率分别为 31.8% 和 32.4%，干燥收缩的抑制率分别为 7.8% 和 13.7%。在水泥基体系中，粉煤灰对掺 K_2SO_4 引起的水泥基材料收缩的抑制作用高于对掺



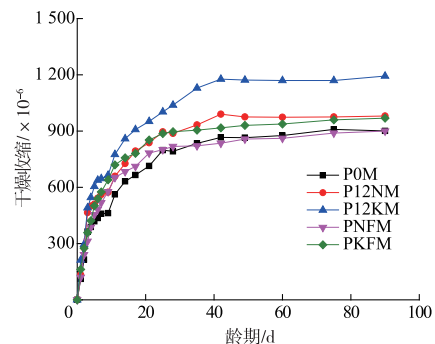
(a) 掺粉煤灰高碱低热水泥自收缩曲线



(b) 掺粉煤灰高碱低热水泥干燥收缩曲线



(c) 掺粉煤灰高碱普硅水泥自收缩曲线



(d) 掺粉煤灰高碱普硅水泥干燥收缩曲线

图 1 掺粉煤灰高碱水泥收缩曲线

Fig. 1 Shrinkage curves of high alkali content cement mixing with fly ash

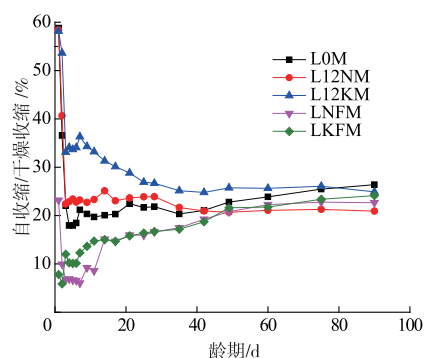
Na_2SO_4 引起的。而不同矿物组成的水泥基材料体系中，粉煤灰的抑制作用为：低热水泥体系 > 普硅水泥体系。

与未掺粉煤灰体系不一致，粉煤灰对不同水泥基材料自收缩与干燥收缩发展历程的影响也不相同，对于自收缩影响龄期，在低热水泥体系中，影响龄期 80 d 以上，而在普硅水泥体系中，影响龄期主要为 35 d 内；对于干燥收缩影响龄期主要为 49 d 内。自收缩在一定程度上影响了干燥收缩，如图 2 所示，在掺粉煤灰的各水泥基体系中，均表现为前期 (28 d 之前) 较小，后期增加，在低热水泥体系中由 10% 增加至 20%，在普硅水泥体系中由 10% 增加至 30%，这与未掺粉煤灰水泥基体系相反，这可能是由粉煤灰后期水化活性激发导致。

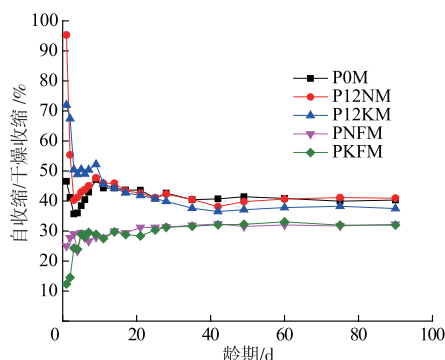
2.2 粉煤灰对水泥基材料水化特征的影响

由图 3 和图 4 可知，粉煤灰均一定程度上降低了高碱水泥基材料的水化进程，其作用机制均为降低最高水化速率和延长水化诱导期（最高放热峰推迟），

材料科学



(a) 掺粉煤灰高碱低热水泥



(b) 掺粉煤灰高碱普硅水泥

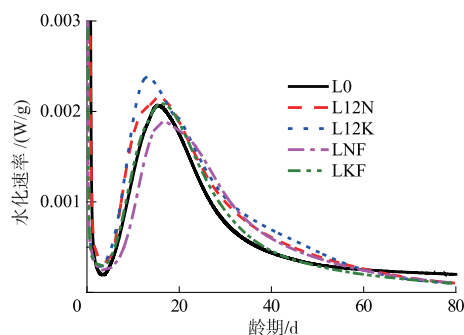
图2 掺粉煤灰高碱水泥自收缩与干燥收缩比率曲线

Fig. 2 The ratio of autogenous shrinkage vs drying shrinkage of high alkali content cement mixing with fly ash

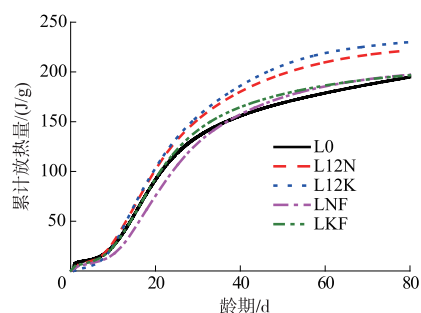
掺入 20% 粉煤灰, 高碱水泥基材料的水化热基本与空白组水化热一致, 甚至低于空白组, 如普硅水泥体系, 这可能是由于粉煤灰对碱的稀释作用导致。

但在各类水泥基材料中, Na_2SO_4 和 K_2SO_4 对掺粉煤灰高碱水泥基材料体系与未掺粉煤灰高碱水泥基材料体系的影响一致, 在低热水泥体系中掺 K_2SO_4 体系的水化高于掺 Na_2SO_4 体系, 但在普硅水泥体系中, 规律相反。对比收缩性能规律, 粉煤灰对高碱水泥基材料的水化的影响在一定程度上反映了其对收缩的影响, 这主要是由于粉煤灰对水化的影响导致水泥水化产物微结构的演变发生变化, 而水泥基材料宏观表象是其微结构的演变的结果。

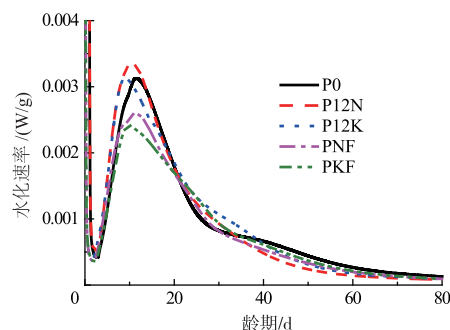
在不同水泥基材料中, 粉煤灰对高掺 Na_2SO_4 和高掺 K_2SO_4 水泥基材料水化进程降低作用不同。在低热水泥体系中, 以高碱组为基准, 粉煤灰对掺 Na_2SO_4 和掺 K_2SO_4 引起的最高水化速率的降低率分别为 12.6% 和 12.2%, 对其出现时间推迟率分别为 7.0% 和 23.5%; 在普硅水泥体系中, 粉煤灰对掺 Na_2SO_4 和掺 K_2SO_4 引起的最高水化速率的降低率分



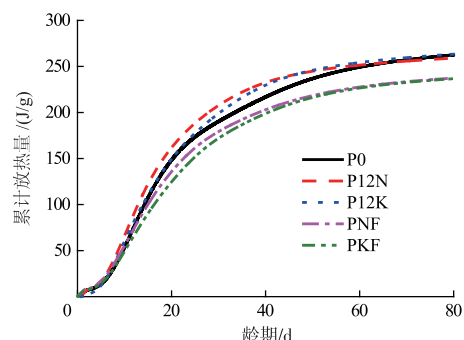
(a) 水化速率曲线



(b) 累计放热量曲线

图3 掺粉煤灰高碱低热水泥水化速率与累计放热量曲线
Fig. 3 Heat flow and cumulative heat of high alkali content low heat cement mixing with fly ash

(a) 水化速率曲线



(b) 累计放热量曲线

图4 掺粉煤灰高碱普硅水泥水化速率与累计放热量曲线
Fig. 4 Heat flow and cumulative heat of high alkali content ordinary portland cement mixing with fly ash

别为 22.5% 和 23.0%，对其出现时间推迟率分别为 7.4% 和 17.2%。这说明，粉煤灰对掺 K_2SO_4 的水化进程降低程度高于掺 Na_2SO_4 。

2.3 粉煤灰对水泥基材料孔结构的影响

由图 5 可知，在低热水泥体系和普硅水泥体系中，粉煤灰使水泥基材料的孔径均匀性参数 (α) 和平均孔径参数 (λ) 均减小，孔径均匀性参数 (α) 减小表明粉煤灰促使高碱水泥基材料孔径分布变窄，平均孔径参数 (λ) 均减小表明粉煤灰一定程度上细化了水泥基材料孔结构，这与粉煤灰的填充效应有关。细化的孔径在失水时，会产生较大的拉应力，引起浆体收缩，这可能是掺 20% 粉煤灰后高碱水泥基材料收缩仍大于空白组的原因之一（见 2.1 节）。此外，低热水泥体系平均孔径参数大于普硅水泥体系，这与各水泥基材料收缩性能规律基本一致。

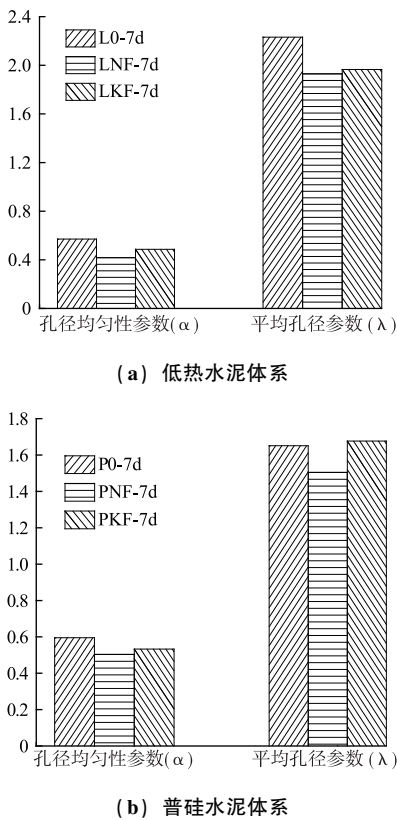


图 5 掺粉煤灰高碱水泥基材料砂浆 7 d 龄期孔结构参数
Fig. 5 Pore structure parameters of high alkali content cement mortarmixing with fly ash at 7 d

在各水泥基材料体系中，粉煤灰对由不同类型碱引起的孔结构参数变化的影响不同。粉煤灰对掺 Na_2SO_4 水泥基材料体系的孔径均匀性参数 (α) 和

平均孔径参数 (λ) 的降低作用高于掺 K_2SO_4 的水泥基材料体系。平均孔径的规律与掺 Na_2SO_4 和掺 K_2SO_4 引起的水泥基材料收缩规律相反，这说明，不同类型碱对水泥基材料收缩性能的影响，除与孔隙细化作用有关外，还与其在不同程度上降低了水泥基材料毛细孔的均匀性有关。

2.4 粉煤灰对水泥基材料孔隙溶液离子

由表 4 可知，在不同水泥基材料空白组试件中，孔隙溶液中当量碱含量远低于原材料水泥中的碱含量，这是由于水泥水化产物对碱金属离子的吸附作用导致。粉煤灰可有效降低高碱水泥基材料中的孔隙溶液的碱含量，起到对碱的稀释作用，这是粉煤灰能降低水泥基材料水化的原因之一。这进一步印证了粉煤灰中虽具有较高的当量碱含量，但碱是随其水化而逐渐释放，3 d 时，粉煤灰的活性效应基本未被激发，其内含碱含量基本为无效碱，从而使掺粉煤灰水泥基材料中的实际碱含量降低。

粉煤灰掺入后，在各水泥基材料体系中对掺 Na_2SO_4 和掺 K_2SO_4 的降低作用不一致。以各水泥基材料高碱体系孔隙中碱含量为基准，在低热水泥体系中，粉煤灰对掺 Na_2SO_4 试件中的碱含量降低率为 13.8%，对掺 K_2SO_4 试件中的碱含量降低率为 12.9%；在普硅水泥体系中，粉煤灰对掺 Na_2SO_4 试件中的碱含量降低率为 29.8%，对掺 K_2SO_4 试件中的碱含量降低率为 3.33%。这说明，粉煤灰对掺 Na_2SO_4 引起的高碱水泥基材料总碱含量降低效果高于掺 K_2SO_4 。各掺粉煤灰和未掺粉煤灰的高碱水泥基材料中，孔隙溶液 K_2O/Na_2O 比基本全部大于原材料中的 K_2O/Na_2O 比，这也说明了水化产物 C-S-H 对 Na^+ 的结合能力大于 K^+ 。

表 4 掺粉煤灰高碱水泥体系孔隙溶液碱含量
Table 4 Alkali content in pore solution of cement mixing with fly ash / %

编号	K ₂ O	Na ₂ O	R ₂ O	K ₂ O/Na ₂ O
L0-3 d	0.024	0.008	0.024	3.0
L12N-3 d	0.048	0.128	0.160	0.4
L12K-3 d	0.224	0.016	0.163	14.0
LNF-3 d	0.040	0.112	0.138	0.4
LKF-3 d	0.192	0.016	0.142	12.0
P0-3 d	0.088	0.008	0.066	11.0
P12N-3 d	0.072	0.104	0.151	0.7
P12K-3 d	0.216	0.008	0.150	27.0
PNF-3 d	0.064	0.064	0.106	1.0
PKF-3 d	0.208	0.008	0.145	26.0

材料科学

3 结论

通过粉煤灰对高碱含量水泥基材料早期收缩性能的影响研究,得出以下结论:

(1) 粉煤灰在一定程度上抑制了低热水泥体系和普硅水泥体系由碱引起的干燥收缩和自收缩,且对由碱引起的低热水泥体系收缩抑制作用,大于普硅水泥体系;在低热水泥体系中,粉煤灰仅对其早期自收缩(28 d)产生有效抑制作用,这可能与低热水泥的特性相关;粉煤灰对掺 K_2SO_4 引起的收缩抑制作用高于掺 Na_2SO_4 。

(2) 高碱水泥基材料的水化被明显抑制,粉煤灰对掺 K_2SO_4 的水化进程降低程度高于掺 Na_2SO_4 ,这与宏观收缩规律一致。

(3) 平均孔径参数的降低规律可以较好地解释掺粉煤灰后高碱水泥基材料的收缩规律,但掺 Na_2SO_4 和掺 K_2SO_4 水泥基材料收缩规律还与孔径均匀性有关。

(4) 粉煤灰可有效降低高碱水泥基材料中的孔隙溶液碱含量,起到对碱的稀释作用,其对掺 Na_2SO_4 引起的高碱水泥基材料总碱含量降低效果高于掺 K_2SO_4 。

(5) 粉煤灰更有利于降低低热水泥的收缩,更有利于降低含掺 K_2SO_4 的水泥基材料收缩,在实际使用粉煤灰时,需关注水泥基材料类型和所含碱类型。

参 考 文 献

- [1] LI Z Advanced Concrete Technology [M]. 2011, Wiley: America.
- [2] 理查德·W·伯罗斯,伯罗斯,廉慧珍,等. 混凝土的可见与不可见裂缝 [M]. 中国水利水电出版社, 2013.
- [3] 吴华明,李明,王育江. 普通硅酸盐 $P \cdot O$ 42.5 级水泥抗裂性控制指标研究及工程实践 [J]. 混凝土, 2023 (12): 89-92.
- [4] YANG K, ZHONG M, MAGEE B, et al. Investigation of effects of Portland cement fineness and alkali content on concrete plastic shrinkage cracking [J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 279-290.
- [5] 李洋,张国锋,张晖,等. 碱含量对水泥基材料开裂敏感性的影响 [J]. 长江科学院院报, 2024, 41 (9): 153-160.
- [6] LI Y, ZHANG H, ZHANG Z, et al. The early-age cracking sensitivity, shrinkage, hydration process, pore structure and micromechanics of cement-based materials containing alkalis with different metal ions [J]. Developments in the Built Environment, 2024, 18: 100454.
- [7] LI Y, ZHANG H, HUANG M, et al. Influence of Different Alkali Sulfates on the Shrinkage, Hydration, Pore Structure, Fractal Dimension and Microstructure of Low-Heat Portland Cement, Medium-Heat Portland Cement and Ordinary Portland Cement [J]. Fractal and Fractional. 2021; 5 (3): 79.
- [8] WANG F, SONG R, YU H, et al. Thermal parameter inversion of low-heat cement concrete for Baihetan arch dam [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 131: 107823.
- [9] 付振博,杨曦昊,赵伊萌,等. 粉煤灰掺量对碱激发材料干燥收缩及抗压强度的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (5): 1717-1725.
- [10] 李聪,黄伟,陈宝春. 粉煤灰超高性能混凝土收缩与抗压强度相关性研究 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2019, 47 (2): 251-257.
- [11] 陈欣,郑建岚,王国杰. 矿物掺合料对再生混凝土干燥收缩性能的影响 [J]. 混凝土, 2016 (10): 16-20, 24.
- [12] 蔡秀敏. 不同养护温度下粉煤灰混凝土的收缩与徐变性能 [J]. 粉煤灰综合利用, 2019 (3): 37-39.
- [13] 宋育鑫,邹春霞,薛慧君,等. 碱激发对粉煤灰混凝土强度及微观结构的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2024, 42 (2): 254-261.
- [14] TU W, FANG G, DONG B, et al. Behaviour of alkali-activated fly ash-slag paste at elevated temperatures: An experimental study [J]. Cement and Concrete Composites, 2024, 147: 105438.
- [15] WEI Y, DOU H, HE T, et al. Investigation of shrinkage mechanism of alkali-activated slag [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03493.
- [16] CHEN H, QIN Z, CHEN J, et al. Experimental study on drying shrinkage and microscopic characteristics of borax-sodium silicate alkali-activated slag mortar [J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41 (4): 25-31.