第 54 卷第 2 期
2026 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 54，No. 2
February，2026

http://jccsoc.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20250519

高盐、碱性环境下改性高吸水性树脂内养护碱激发砂浆收缩与耐久性能

陈柯宇，夏 晋

(浙江大学建筑工程学院，杭州 310058)

摘 要：碱激发砂浆收缩控制与耐久性协同调控策略成为其工程应用的核心瓶颈，而既有的内养护控制机制使用的聚丙烯酸高吸水性树脂(SAP)在高碱和含盐环境中面临耐久性差的问题。基于此，通过优化设计参数制备淀粉接枝/硅藻土改性聚丙烯酸(MSAP)，继而探究不同 MSAP 掺量对碱激发粉煤灰–矿渣砂浆流变特性、强度收缩及耐久性能的调控规律。结果表明：MSAP 在去离子水中的吸液倍率可达 472 g/g，且其在盐溶液中的吸液倍率最高可达商用 SAP 的 5 倍；MSAP 早期抑制了凝胶骨架的生成，使得砂浆的凝结时间明显延长。而在长周期内砂浆的水化程度得到提高，促使砂浆相对渗透系数与氯离子扩散系数分别降至 4.29×10^{-12} m/s 与 6.0×10^{-12} m^2/s。MSAP 会在碱激发砂浆中表现出显著的吸液–释液行为，其掺量与碱激发砂浆化学收缩行为的关联性呈现显著的龄期依赖性。而砂浆体系中的自收缩补偿效能存在阈值效应，当 MSAP 掺量为 0.2%时，自收缩补偿率提升至 52.2%~63.1%。

关键词：碱激发砂浆；内养护；高吸水性树脂；收缩；耐久性
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2026)02–0556–14
网络出版时间：2026–01–05

碱激发材料系由具火山灰活性的硅铝质材料与碱性介质反应生成的一类胶凝材料，常见前驱体涵盖粉煤灰、矿渣等工业固废[1]。既有研究已证实，应用碱激发材料可实现节能减排，是替代水泥助力中国达成“双碳”目标的关键路径之一。然而，碱激发粉煤灰–矿渣砂浆因化学收缩与自收缩耦合作用，早期即诱发显著体积变形；后期则因耐久性不足，致使气体/液体介质及侵蚀性离子侵入砂浆内部，劣化修补结构服役寿命[2]。故针对高耐久性现代工程需求，研发碱激发砂浆收缩控制与耐久性协同调控策略成为其工程应用的核心瓶颈。

诸多学者尝试通过配合比优化、外掺剂改性及养护制度调控等手段改善碱激发粉煤灰–矿渣材料的收缩与耐久性缺陷。相对较低的水胶比会促使碱激发凝胶密实度增加，抑制非均匀收缩应力，但受限于水分供给不足易导致前驱体反应不完全。Ballekere 等[3]和 Hu 等[4]通过降低孔隙溶液表面张力抑制碱激发矿渣砂浆的自收缩发展，但其高成本及对开裂时间的有限调控作用限制了工程应用。膨胀剂的引入可部分补偿收缩，但难以较好的实现和易性和收缩性的平衡关系，且长期收缩补偿效率较差[5, 6]。叶蛟龙等[7]与 Uppalapati 等[8]均指出适当的高温养护可抑制毛细管应力，但热梯度效应易导致现浇砂浆内部微裂缝扩展。上述方法在工程适用性方面均存在显著局限，亟待开发符合现场施工需求的实用化调控技术。

内养护技术通过轻质骨料或高吸水性树脂(SAP)的吸水–释水特性调控体系湿度平衡，为缓解基体自干燥及早期收缩开裂提供了新思路。但轻质骨料因密度差异引起的骨料–浆体垂直分层将严重劣化混凝土力学性能[9]。相较下，SAP 作为一种通过自由基聚合反应制备的水溶性高分子聚合物，其三维网络结构中丰富的亲水性官能团赋予其优异的吸水–保水特性。在碱激发胶凝体系中，SAP 可构

收稿日期：2025–06–30。　修订日期：2025–08–18。
基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFB2606000)；国家自然科学基金面上项目(52278278，52578331)。
第一作者：陈柯宇(1997—)，男，博士研究生。
通信作者：夏 晋(1982—)，男，博士，教授。

Received date: 2025–06–30.　**Revised date:** 2025–08–18.
First author: CHEN Keyu (1997–), male, Doctoral candidate.
E-mail: chenkeyu0209@163.com
Correspondent author: XIA Jin (1982–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: xiajin@zju.edu.cn

建分布式“微蓄水池”结构，通过持续释水维持基体内部湿度场稳定。该机制能够有效延缓胶凝相凝聚后因持续水化反应引发的湿度梯度演变及伴随的体积形变。研究表明，SAP 的引入能够显著改善碱激发体系的收缩行为[10]。

然而，既有研究多采用的市售有机聚丙烯酸类 SAP，其在海洋、盐渍土等严苛的高盐(如富含 Cl^-、Na^+)、高碱(pH 值>12)耦合环境中，耐侵蚀性能严重不足，且在孔隙溶液中极易发生被动释水行为，显著削弱其内养护效能。盐溶液中的离子产生渗透压，导致 SAP 所吸收的水分被“挤出”，显著降低其吸水能力[11]。同时，阳离子与 SAP 结构中的负电荷基团相互作用，减少了静电排斥力，使聚合物网络收缩，进一步减少了可容纳水分的空间[12]；另一方面，水泥及碱激发胶凝体系孔隙液特有的高碱性，极易引发 SAP 羧基水解甚至链断裂，破坏聚合物网络结构稳定性。此外，基于内养护的碱激发砂浆的收缩控制与耐久性能提升的机制尚未明确。

基于此，本研究采用水溶液聚合法，通过优化设计参数制备淀粉接枝/硅藻土改性聚丙烯酸(MSAP)，继而系统研究不同 MSAP 掺量对碱激发粉煤灰–矿渣砂浆流变特性、抗压强度发展及收缩、耐久性能的调控规律。

1　实验

1.1　材料

低钙粉煤灰(FA)产自浙江省台州市玉环电场，比表面积为 390 m^2/kg，平均粒径为 13 μm，含水率为 0.44%；矿渣(GGBS)产自云南省玉溪市通海纳古毕荣炼钢厂，比表面积为 513 m^2/kg，平均粒径为 12 μm，含水率为 0.25%。前驱体的氧化物组成见表 1。

表 1　部分原材料的氧化物组成

Table 1　Oxide compositions of dead-burned magnesia powder and cement　　*w*/%

Oxide	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	Others
FA	50.86	26.00	7.69	9.69	0.59	0.41	0.62	4.14
GGBS	34.01	10.57	39.90	0.54	0.83	2.15	7.50	4.50
MgO			4.50			92.30		3.20

w is mass fraction

碱激发剂为碳酸钠(Na_2CO_3)、硫酸钠(Na_2SO_4)、硅酸钠($Na_2O·2SiO_2$)固体粉末。细骨料为天然河砂。试验用水均为自来水。外掺料为活性氧化镁(MgO)，平均颗粒粒径为 5 μm。

接枝/改性高吸水性树脂制备的分析纯化学助剂为：可溶性淀粉($C_{12}H_{22}O_{11}$，SS)、丙烯酸($C_3H_4O_2$，AA)、氢氧化钠(NaOH)、过硫酸铵($H_8N_2O_8S_2$，APS)、硅藻土(SiO_2，DE)、N,N'-亚甲基双丙烯酰胺($C_7H_{10}N_2O_2$，MBA)。

1.2　制备

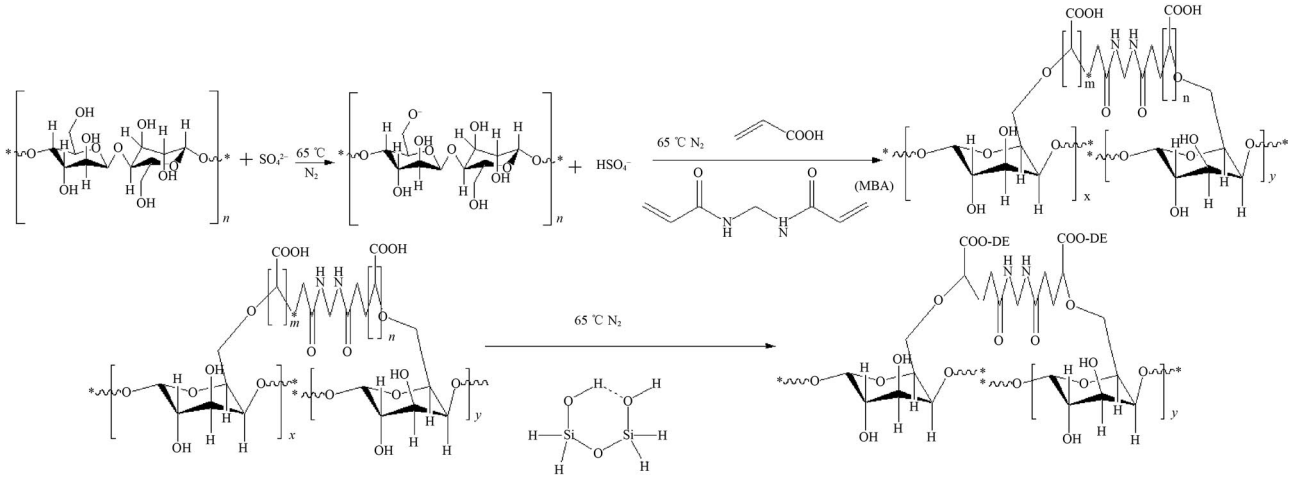
1) MSAP 设计及制备思路

利用自由基聚合机制，可以通过接枝反应将 AA 引入到其他聚合物骨架上。SS 由直链和支链组成，其分子链富含极性羟基，赋予 SS 良好的亲水性和高效的吸水能力。通过接枝改性，不仅可以增加材料表面的亲水基团多样性，提高吸水效率，还能利用 SS 作为高分子骨架，增强聚丙烯酸 SAP 的凝胶刚度与稳定性。另一方面，DE 具有较大的比表面积和强吸附性，能够吸附部分盐离子，增大网络内外的渗透压，提高 SAP 的耐盐性。同时，DE 表面的硅羟基可通过酯化反应接枝到聚丙烯酸链上，增强凝胶的强度。MSAP 的反应制备原理如图 1a 所示。

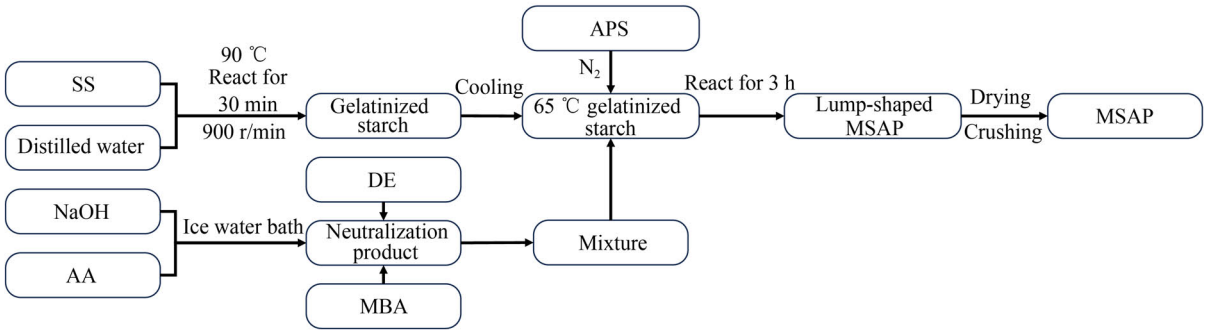
基于该设计思路，本研究在加热条件下，APS 引发剂分解产生硫酸根自由基，夺取 SS 中羟基的氢生成硫酸氢根，引发 AA 单体聚合生成聚丙烯酸链自由基，链自由基浓度增加，聚丙烯酸链上的羧基密度随之增大。DE 表面的硅羟基与聚丙烯酸链上的羧基发生酯化反应的概率升高，增强了两者之间的结合。由于强相互作用，聚丙烯酸链自由基经历链终止反应。在 MBA 交联剂的作用下，形成具有三维网络结构的超吸水性聚合物，化学合成工艺如图 1b 所示。通过前期预实验确定变量范围，探究 MSAP 在丙烯酸/淀粉质量比(2~8)、丙烯酸/硅藻土质量比(5~15)、引发剂 APS 用量(相对于单体 AA 质量的 0.05%~0.25%)、交联剂 MBA 用量(相对于 AA 单体质量的 0.01%~0.10%)等因素作用下的保水–释放性能，合成配合比见表 2。试验对照组为未改性的市售聚丙烯系 SAP(CG)。

2) 碱激发砂浆设计及制备思路

分批次浇筑多组碱激发砂浆样品，筛选具有较好力学性能及黏结性的配合比。选用 FA 与 GGBS 作为前驱体，质量比为 1∶1。砂浆的水灰比与砂灰比分别为 0.40 与 2.00。碱激发剂选用了由粉末状 Na_2SiO_3、Na_2CO_3 与 Na_2SO_4 组成的三元体系(质量比为 4∶1∶1)。掺入 4%的 MgO 外掺料，以此提升复合碱组分激发粉煤灰–矿渣砂浆的早龄期强度。MSAP 掺量设为 0%~0.5% (以前驱体质量计)。



(a) Reaction mechanism of MSAP



(b) Process of chemical synthesis

图 1 淀粉接枝/硅藻土改性聚丙烯酸(MSAP)的设计与制备思路

Fig. 1 Design and preparation of starch grafted/diatomite-modified polyacrylic acid (MSAP)

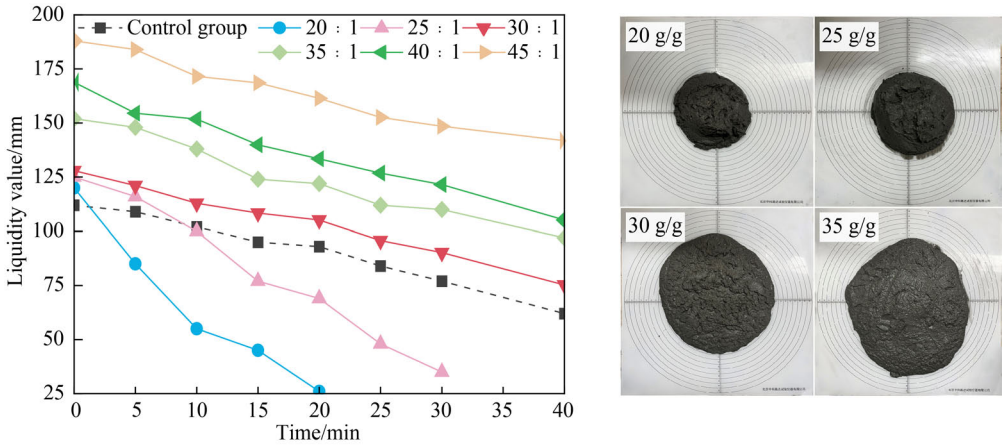
表 2 MSAP 的合成配合比

Table 2 Mix proportions of the MSAP

SAP type	AA/mL	SS/g	DE/g	NaOH/mL	AA/SS	AA/DE	*w*(APS)/%	*w*(MBA)/%
AA2	3	1.5	0.2	3.5	2	15	0.15	0.05
AA6	3	0.5	0.2	3.5	6	15	0.15	0.05
AA8	3	0.4	0.2	3.5	8	15	0.15	0.05
DE10	3	0.5	0.3	3.5	6	10	0.15	0.05
DE20	3	0.5	0.1	3.5	6	20	0.15	0.05
APS5	3	0.5	0.2	3.5	6	15	0.05	0.05
APS25	3	0.5	0.2	3.5	6	15	0.25	0.05
MBA1	3	0.5	0.2	3.5	6	15	0.15	0.01
MBA10	3	0.5	0.2	3.5	6	15	0.15	0.10

而在砂浆体系中，MSAP 颗粒的分散、团聚及破碎可能导致其理论吸液量与实际效果存在偏差[13]。因此，本研究在确保掺入 SAP 前后砂浆流动性相近的前提下，评估了 MSAP 吸水–释水行为的差异。MSAP 在砂浆孔隙液中 25 min 达到最大吸液倍率。综合实测吸液量及前期研究建议[13, 14]，控制内养护水与 MSAP 的质量比范围为 20∶1~45∶1。

以掺量为 0.1%的 MSAP 碱激发砂浆为例，图 2 展示了不同内养护水含量下砂浆流动性能随时间的变化。加入更多内养护水的砂浆样品在初始时刻具有更高的流动性。对于内养护水与 MSAP 的质量比为 20∶1 与 25∶1 组的砂浆样品，流动性均在 5 min 后迅速下降，且在 20 min 后浆体的流动直径显著低于未掺 MSAP 的对照组。这一现象主要是由于内养护水不足，降低了基体的实际有效水灰比；当质量比达 30∶1 时的砂浆样品与对照组的流动性变化趋势较为相似。当内养护水用量进一步增加时，体系内的实际水灰比增大，砂浆的流动性明显提高。因此，上述试验通过探究砂浆流动随时间的变化规律，明确了最优内养护水与 MSAP 的质量比为 30∶1，其余 MSAP 掺量的样品可得到类似的结论。碱激发砂浆样品的配合比参数见表 3。



(a) Fluidity of mortar　　(b) Slurry images

图 2　不同内养护水含量的碱激发砂浆流动性能

Fig. 2　Flow properties of alkali-activated mortar with different internal curing water content

表 3　碱激发砂浆的配合比

Table 3　Mix proportions of the alkali-activated mortar　　kg/m^3

Samples No.	Precursors		Alkali activator	Fine aggregate	Water	MgO	MSAP
	FA	GGBS					
S00	300	300	90	1200	210	24	0
S01	300	300	90	1200	228	24	0.6
S02	300	300	90	1200	246	24	1.2
S03	300	300	90	1200	264	24	1.8
S04	300	300	90	1200	282	24	2.4
S05	300	300	90	1200	300	24	3.0

试块的制备及养护均在室温条件(25 ℃)进行。预先将粉料与河砂搅拌 1 min，倒入自来水搅拌 3 min 直至均匀。将浆体倒入模具中，养护 24 h 后拆模。

1.3　测试方法

依据《混凝土高吸水性树脂内养护剂》(JCT 2551—2019)规范[15]要求，通过茶袋法表征 MSAP 在去离子水、0.9%NaCl 溶液、复合碱组分激发粉煤灰–矿渣砂浆孔隙液保水–释水性能。将茶袋预先润湿并称重，记为 m_0。称取干燥的 SAP 粉末约 0.3 g 放入茶袋，记为 m_1。将装有 SAP 的茶袋浸入待测溶液中，在特定时间后取出，用干布擦拭茶袋表面并称量，记为 m_2。吸液倍率 ω 计算如式(1)所示。

$$\omega = \frac{m_2 - m_1 - m_0}{m_1} \tag{1}$$

利用 Gemini 500 场发射扫描电子显微镜(FESEM)对 MSAP 与砂浆微观结构进行观测，加速电压为 4 kV；傅里叶变换红外光谱(FTIR)试验在 Thermo Scientific Nicolet iS20 型光谱仪上进行，测试波数范围为 400~4000 cm^{-1}。

对有砂浆的流动性(跳台法)及凝结时间进行测定，其中取初凝时间为凝结时间的试验结果；使用 YAW-300C 试验机，对硬化 1、3、7、28 d 的试块进行立方体(70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm)抗压。

依据 ASTM C1608—12 标准[16]推荐的膨胀法测定碱激发砂浆的化学收缩；使用非接触式波纹管装置测量样品的自生体积变形，其可将流动状态的碱激发砂浆体积变形转化为长度变形。引入收缩补偿率系数以讨论掺不同比例 MSAP 对碱激发砂浆化学变形与自生体积变形的影响规律，如式(2)所示。

$$\mathrm{CR} = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{\varepsilon_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中：CR 为收缩补偿率；ε_0 为不掺 MSAP 的 S00 样品化学收缩/自收缩率；ε_1 为掺不同比例 MSAP 样品化学收缩/自收缩率。

采用 HKT-XY 型湿度传感器测定碱激发砂浆养护 0~28 d 内部相对湿度的变化，传感器埋入深度约为 35 mm；采用毛细管压力传感系统测定砂浆的毛细管压力。对传感系统真空预处理后，将毛细管压力传感探头尖端垂直插入新浇碱激发砂浆试件内部，通过探头内部水相与砂浆孔隙游离水建立水力

连通。试件采用边长为 70.7 mm 立方体试件，传感探头插入深度为 3 cm，采样频率为 2 min；采用压汞法(MIP)在 AutoPore IV 9510 全自动压汞仪上测定养护 28 d 后砂浆的孔隙结构参数。

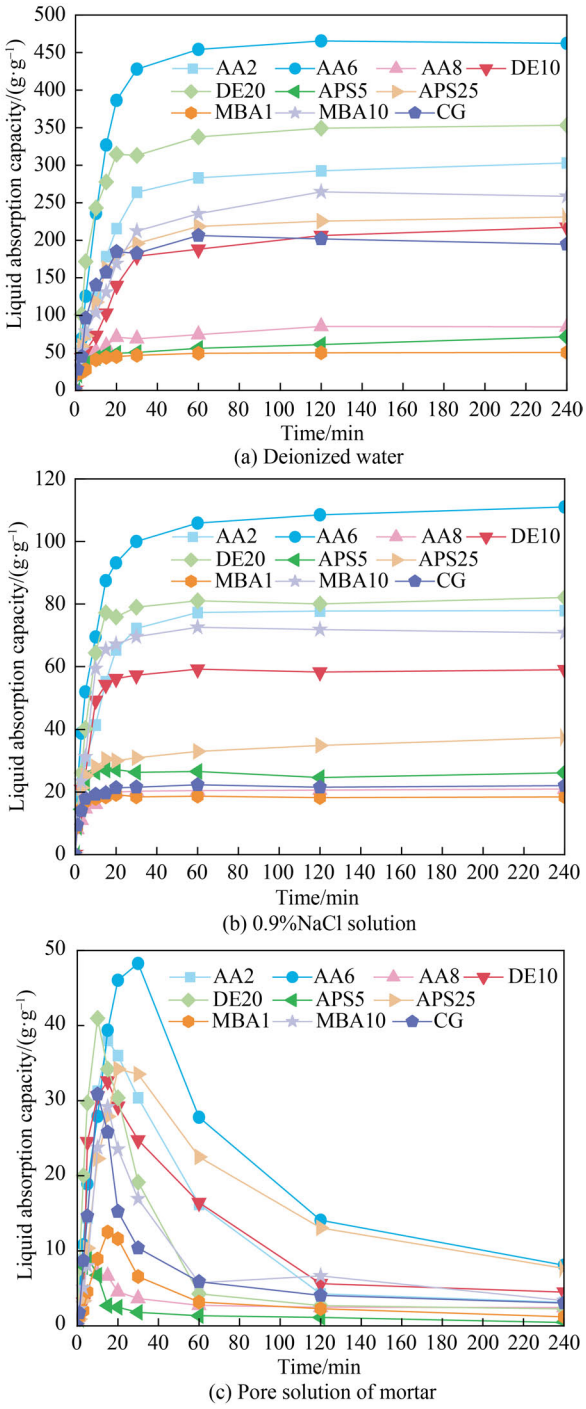
碱激发砂浆的抗水渗透性能与抗盐渗透特性的定量表征可作为评价其在海洋工程结构中适用性的关键指标。利用恒水压法与快速氯离子迁移系数法(RCM)评价碱激发砂浆的抗水渗透性与抗氯盐渗透特性。试件采用尺寸分别为上口直径为 70 mm、下口直径为 80 mm、高为 30 mm 的截头圆锥试件与 ϕ100 mm×50 mm 的圆柱体砂浆试件。

2 结果与讨论

2.1 MSAP 合成参数对吸水–释水性能的影响

图 3 为 MSAP 在不同溶液中的吸液倍率。由不同合成参数制备的 MSAP 在去离子水中均表现出前 30 min 内快速吸水的特性，随后吸液速率逐渐减缓，并在 120 min 后达到吸液平衡状态。AA6 型 MSAP 在去离子水中的吸液倍率最高，在 240 min 时可达 472 g/g。当 SS 用量较大时，部分 SS 难以充分转化为自由基，仍保持糊化状态。处于自由基糊化状态的 SS 与 AA 单体间的相互作用主要依赖于氢键。这种弱连接导致形成的高分子网络结构较为脆弱，故 AA8 型 MSAP 吸水倍率大幅度降至 85 g/g。在改性过程中，DE 表面的硅羟基与聚丙烯酸链上的羧基通过酯化反应形成稳定的交联结构，以 DE 颗粒为核心构建聚合物网络，增强了 MSAP 的吸液能力。当 DE 的用量过多时，交联点变得过于密集，限制了大分子链端的自由移动和扩展，减少了水分子进入和扩散的空间，这导致 MSAP 表面迅速吸水而内部渗透不足。

与去离子水相比，由不同合成参数制备的 MSAP 在 0.9% (质量分数) NaCl 溶液中的吸液倍率显著下降，原因之一在于 MSAP 在 NaCl 溶液中的渗透压低于在去离子水中；同时，由 NaCl 引起的同离子效应与空间位阻效应[17]抑制了 MSAP 中离子型基团的解离，降低了 MSAP 内部的负电荷密度，进而阻碍了水分子的有效渗透。由不同合成参数制备的 MSAP 在 0.9%NaCl 溶液中表现出与去离子水相似的吸液特性，即前 30 min 内快速吸水且吸液速率随时间发展而逐渐放缓。值得注意的是，CG 组在 NaCl 溶液中的吸液倍率仅为 23 g/g，说明其并不适用于高盐场景；而经 SS 接枝与 DE 改性后的 MSAP 吸液倍率可达 110 g/g。



CG is control group without MSAP inclusion.

图 3 MSAP 在不同溶液中的吸液倍率

Fig. 3 Liquid absorption capacity of MSAP in different solutions

砂浆孔隙液中的离子与物质组成十分复杂，包含多种阴阳离子，由不同合成参数制备的 MSAP 在碱激发粉煤灰–矿渣砂浆孔隙液中吸液倍率如图 3c 所示。MSAP 在孔隙液中出现明显的吸液–释液特征，即 MSAP 达到溶胀平衡后，吸液倍率逐渐下降并趋于稳定。AA6 型 MSAP 在砂浆孔隙液 240 min 时下降至 10 g/g。造成吸液倍率下降的主要原因在

孔隙液中的 Ca^{2+} 与 MSAP 网络结构上的羧基发生络合反应，MSAP 的整体结构趋向于收缩。这种收缩力，迫使部分水分从 SAP 中挤出。

2.2　MSAP 的形貌及化学结构表征

MSAP 多尺度形貌图如图 4 所示。在细观层面上，干燥状态下的 MSAP 呈现出致密的网络结构，表现出较低的透光率；而在微观层面，MSAP 颗粒形态不规则，表面存在丰富的孔洞与褶皱，且表面分布着许多微小的粒状颗粒。这不仅使得 MSAP 颗粒比表面积增大，使得更多的羧酸钠基团能快速与液体组分充分接触，提高了样品的吸液能力；多孔空间结构充当液体组分的“蓄水池”，促进了水分渗透并增强了保水性能。MSAP 在不同溶液中均可观察到明显的颗粒体积膨胀现象，且溶胀达到平衡后的颗粒呈现透明状。MSAP 在碱激发砂浆孔隙液中出现明显的吸液–释液特征。

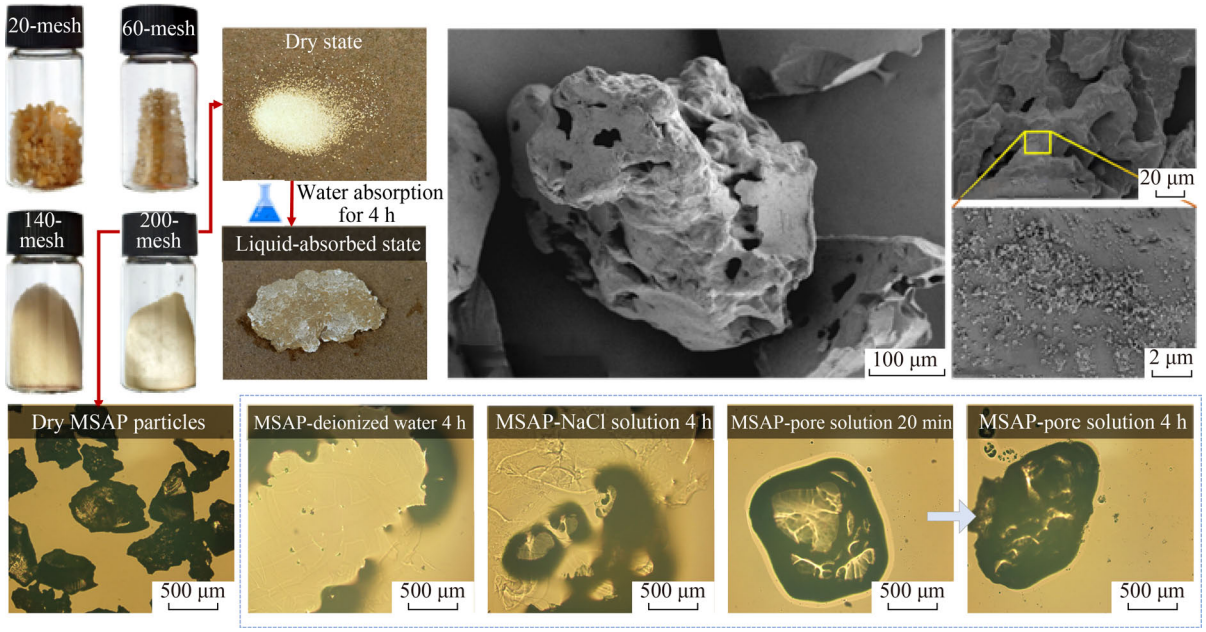


图 4　吸液前后的 MSAP 多尺度形貌照片

Fig. 4　Multiscale morphology images of MSAP before and after liquid absorption

对比分析 AA6 及 CG 样品的官能团种类，试验谱图见 5。图 5 中 3438 cm^{-1} 处的宽峰对应于物理吸附水和化学结合水中的—OH 基团拉伸振动以及 H—O—H 键弯曲振动；2949 cm^{-1} 处的吸收峰为 AA 单体中 CH_2 键的反对称伸缩振动，表明样品中含有烷基链结构；1591 cm^{-1} 处为 C＝O 的伸缩振动峰。经 SS 接枝与 DE 改性后的 AA6 型 MSAP 在 1650 cm^{-1} 为 SS 葡萄糖单元中糖苷键上的—O—伸缩振动峰；1345 cm^{-1} 与 1280 cm^{-1} 附近分别为—COOR 和 C—O—C 键的振动峰；474.95 cm^{-1} 处的特征峰为 DE 中的 Si—O 的伸缩振动峰，表明 AA 的羧酸基团与 DE 表面的羟基发生了酯化反应。

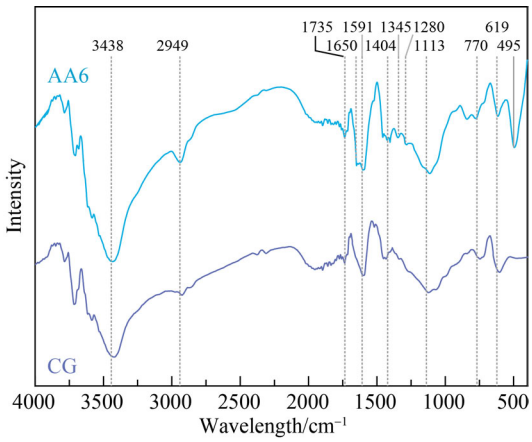


图 5　MSAP 样品的 FTIR 谱

Fig. 5　FTIR spectra of MSAP samples

通过单一变量法明确了 MSAP 的最优制备参数，即丙烯酸/淀粉质量比为 6、丙烯酸/硅藻土质量比为 10、引发剂 APS 用量为 0.15%、交联剂 MBA 用量为 0.05%。

2.3　碱激发砂浆流动性与凝结时间

不同比例 MSAP 碱激发砂浆流动性如图 6a 所示。S00 样品的初始流动值为 112 mm，而碱激发砂浆的初始流动值随着 MSAP 掺量的增加而增大，S05 样品的初始流动值上升至 165 mm。这是因为此时 MSAP 颗粒尚未达到吸液饱和状态，而额外内养护水的掺入使得砂浆的流动性提升。掺入不同比例 MSAP 的碱激发砂浆流动性均随时间推移逐渐降低，其中未掺 MSAP 的 S00 样品在经 40 min 后的

流动值降低至 65 mm。由于内养护水胶比的增大，使得掺 MSAP 的碱激发砂浆早期凝胶性能与结构不完善，故而流动值下降较为缓慢。而 MSAP 会在砂浆孔隙液中表现出显著的吸液–释液行为，吸收的孔隙液会因 MSAP 收缩而被挤出。因此，掺入 0.5%MSAP 的 S05 样品在 70 min 后的流动值仍维持在 100 mm 的较高水平。

掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆的凝结时间发展如图 6b 所示。S00 碱激发砂浆样品的初凝与终凝时间分别为 64 min 与 92 min。掺入不同比例 MSAP 的碱激发砂浆的凝结时间明显延长，如 S04 砂浆样品的初凝与终凝时间分别上升至 127 min 与 169 min，分别较 S00 样品上升约 98.4%与 83.7%。这是由于吸水饱和后的 MSAP 延缓了碱激发砂浆的水化反应速率，并在早期抑制了凝胶骨架的生成。

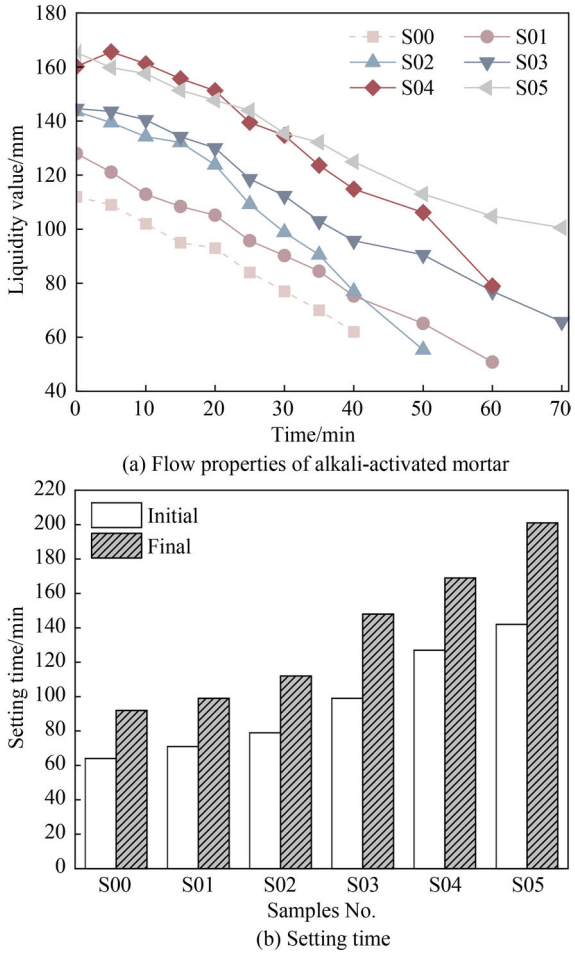


图 6 掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆流动性与凝结时间

Fig. 6 Fluidity and setting time of alkali-activated mortar with different proportions of MSAP

2.4 碱激发砂浆力学性能

掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆养护不同龄期的抗压强度如图 7 所示。未掺 MSAP 的 S00 样品在养护 1、3、7 d 与 28 d 后的抗压强度分别为 10.7、23.4、35.6 MPa 与 47.5 MPa。在早龄期内，掺入 MSAP 的砂浆的抗压强度出现较为明显的下降，掺入 0.5%MSAP 的 S05 样品在养护 1、3、7 d 后的抗压强度分别下降至 5.7、13.8 MPa 与 19.3 MPa，分别较同龄期 S00 样品下降约 87.7%、69.6%与 84.4%，这是由于 MSAP 引入的孔隙会对碱激发砂浆的抗压强度产生负面影响并降低基体的刚度。而适量的 MSAP (<0.3%)引入对碱激发砂浆的抗压强度无明显折减影响。掺入 0.1%MSAP 的 S01 样品的 28 d 抗压强度为 52.4 MPa，相较于同龄期 S00 样品略有提高。

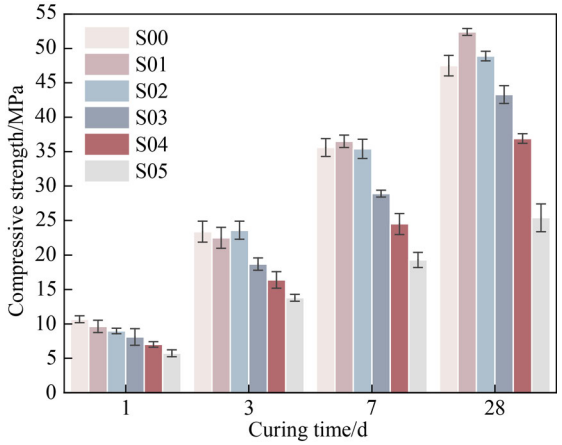


图 7 掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆抗压强度

Fig. 7 Compressive strength of alkali-activated mortar with different proportions of MSAP

2.5 碱激发砂浆化学变形

图 8 给出了掺入 MSAP 不同质量比例的碱激发砂浆在短周期(0~48 h)与长周期(0~28 d)的化学收缩演变规律。碱激发砂浆的化学收缩演变呈多阶段性特征：第 1 阶段(0~2 h)，在初始水化阶段，碱激发砂浆样品快速膨胀，这主要归因于活性 MgO 的快速水化反应产生的体积膨胀效应抵消了部分早期化学收缩；第 2 阶段(2~16 h)，样品的收缩率显著增大，此时碱激发反应进入加速期，前驱体中的活性组分在碱性环境下快速溶出并伴随着产生大量的凝胶相生成；第 3 阶段(16~56 h)，收缩增幅趋缓，这与 $Mg(OH)_2$ 晶体的生长与 $CaSO_4/CaCO_3$ 结晶相的协同补偿作用有关；第 4 阶段(56~120 h)，此时 MSAP 在孔隙液中出现明显的释液行为，补充了前驱体反应所需的水分供应，促使未反应的前驱体继续水化，从而提高碱激发砂浆的水化程度，新生成的凝胶相持续脱水收缩主导了该阶段的形变发展，故收缩速率再次呈现上升趋势；第 5 阶段(120 h 后)，样品的化学变形逐渐稳定。

此外，MSAP 掺量增加抑制了砂浆的早龄期化学

收缩行为，如图 8a 所示。掺 0%~0.5%的样品 1440 min 化学收缩率分别为 0.0258、0.0193、0.0140、0.0110、0.0090 mL/g 与 0.0070 mL/g，这主要可归因于：1) MSAP 颗粒在碱性环境中优先吸附孔隙溶液，通过物理阻隔效应延缓降低了前驱体的水化速率[18]；2) MSAP 中的羧酸钠基团与水分子通过氢键作用形成稳定的水化层，该水化层的吸水膨胀部分补偿了由化学收缩产生的变形张应力。而在 0~120 min 内，S05 的化学收缩率略高于 S03 样品，这表明在初始阶段碱激发砂浆与 MSAP 的反应速率尚未达到稳定状态。而掺 0.1%~0.5%的样品的 672 h 化学收缩率相较于对照组 S00 样品分别提升约 5.3%、13.1%、29.7%、40.9%与 63.3%。

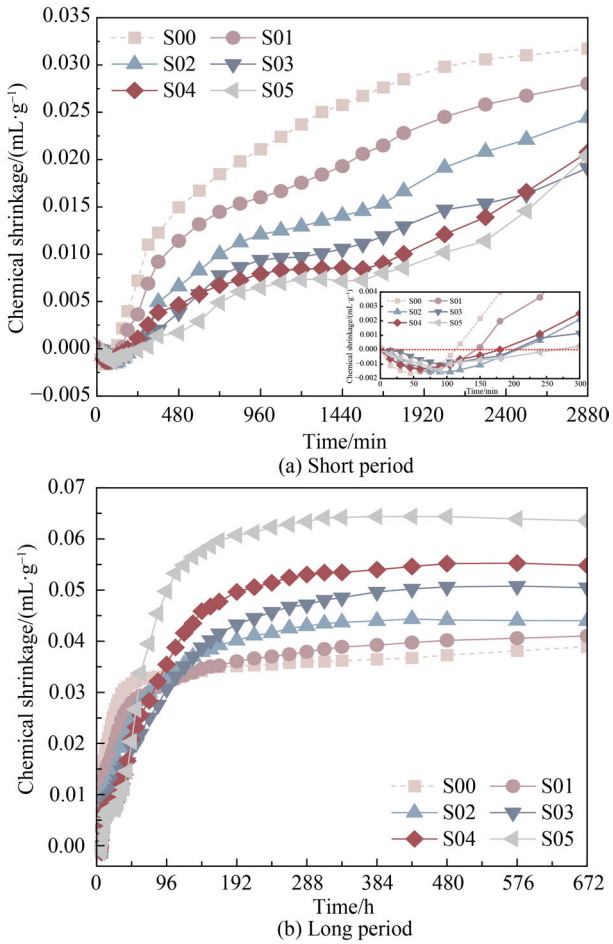


图 8　掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆化学变形

Fig. 8　Chemical deformation of alkali-activated mortar with different proportions of MSAP

2.6　碱激发砂浆自生体积变形

图 9 为掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆不同龄期的自生体积变形发展。测试结果表明：碱激发砂浆在养护前 120 min 表现出快速而轻微的膨胀，这是由于活性 MgO 在溶液内快速水化并与水发生界面反应，Mg^{2+}溶出扩散，生成 $Mg(OH)_2$ 水化产物数量较多，晶体生长压作用宏观表现为对胶凝体系产生体积补偿效应。未掺 MSAP 的 S00 样品始终保持最高的自收缩率，其 1440 min 自收缩率约为 2520 μm/m，与 OPC 凝胶的自收缩率较为接近(24 h 自收缩率小于 2500 μm/m)[19]。

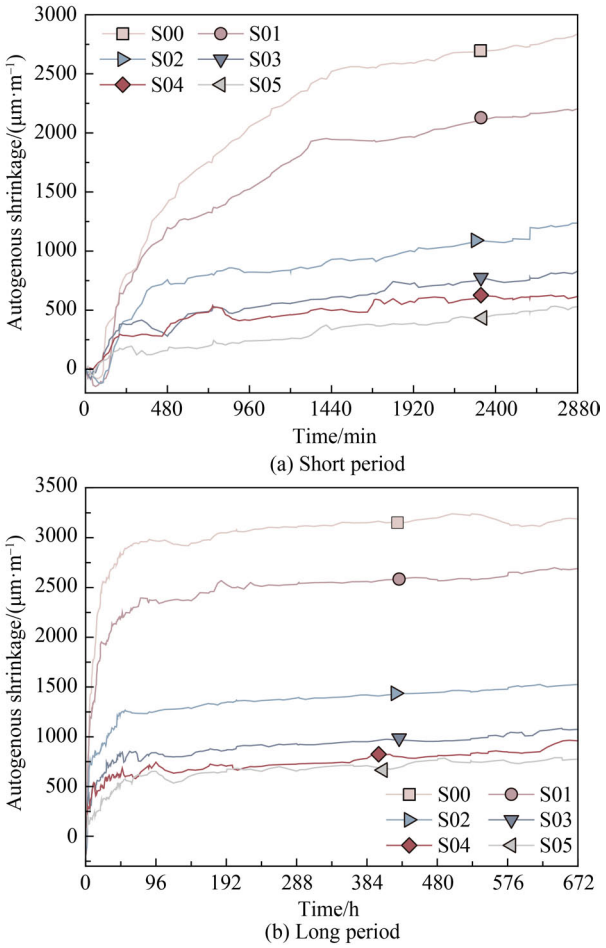


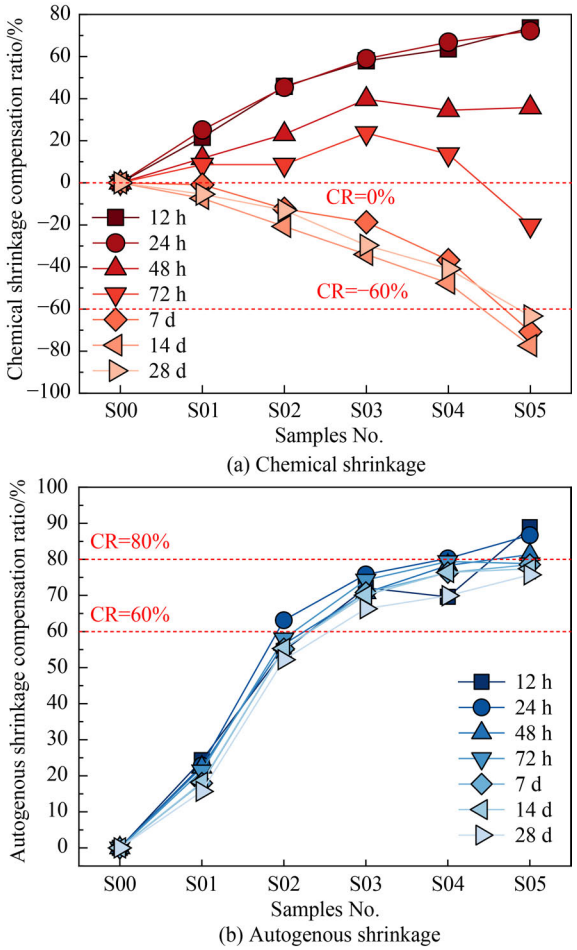
图 9　掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆自生体积变形

Fig. 9　Autogenous volume deformation of alkali-activated mortar with different proportions of MSAP

在塑性阶段，化学收缩可完全转化为表观体积的变化。当碱激发凝胶骨胶生成后活性 MgO 的微膨胀补偿效应逐渐削弱，碱激发砂浆样品的自收缩率在水化后 48 h 内迅速上升，后期保持相对稳定。硬化的凝胶相可部分抵消由化学收缩引起的体积变化；同时，反应持续消耗孔隙溶液导致内部相对湿度由饱和态向亚稳态转变，毛细管收缩应力随之产生。随着碱激发砂浆内部相对湿度下降，吸液饱和的 MSAP 释放水分，促使内部维持相对恒定的湿度水平，减少了由于水分快速丢失导致的自收缩。掺 0.1%~0.5%的样品在 48 h 自收缩率分别较同龄期的 S00 样品下降约 22.4%、56.4%、70.8%、78.3%与 81.3%。随着 MSAP 掺量的增加，碱激发砂浆内部湿度更为稳定，内养护作用区域更大，自收缩改善

效果更为明显。当养护龄期达到 672 h 时，掺 0.1%~0.5%的样品分别为 2690、1525、1075、960 μm/m 与 775 μm/m，分别较同龄期的 S00 样品(3190 μm/m)下降约 15.7%、52.2%、66.3%、69.9%与 75.7%。这说明当 MSAP 掺量超过 0.2%后，不同碱激发砂浆样品自收缩下降程度差异较小。

图 10 给出掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆不同龄期的收缩补偿率发展规律。可见，MSAP 掺量与碱激发砂浆自收缩行为呈现显著的非线性正相关特性。当 MSAP 掺量为 0.2%时，自收缩补偿率提升至 52.2%~63.1%，表明碱激发砂浆的收缩行为已获得明显改善；进一步增加至 0.5%时，补偿率范围扩大为 75.7%~88.9%，接近完全补偿状态。值得注意的是，当 MSAP 掺量超过 0.3%后，收缩补偿率对掺量变化的响应敏感性显著降低，其波动范围稳定在 65%~85%。MSAP 掺量与碱激发砂浆化学收缩行为的关联性呈现显著的龄期依赖性：在早龄期表现为正相关趋势，而在高掺量条件下，养护后期则会出现显著的体积负效应。在 0.1%掺量时，化学收缩补偿率维持在–8.9%~25.1%，表明 MSAP 对体系化学收缩的调控作用较弱；当掺量增至 0.5%时，补偿率波动范围显著扩展为–77.4%~73.6%，养护后期揭示出明显的化学收缩加剧现象。



CR is is shrinkage compensation ratio.

图 10 掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆的收缩补偿率

Fig. 10 Shrinkage compensation of alkali-activated mortar with different proportions of MSAP

2.7 碱激发砂浆内部相对湿度与毛细管力

图 11a 为掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆内部相

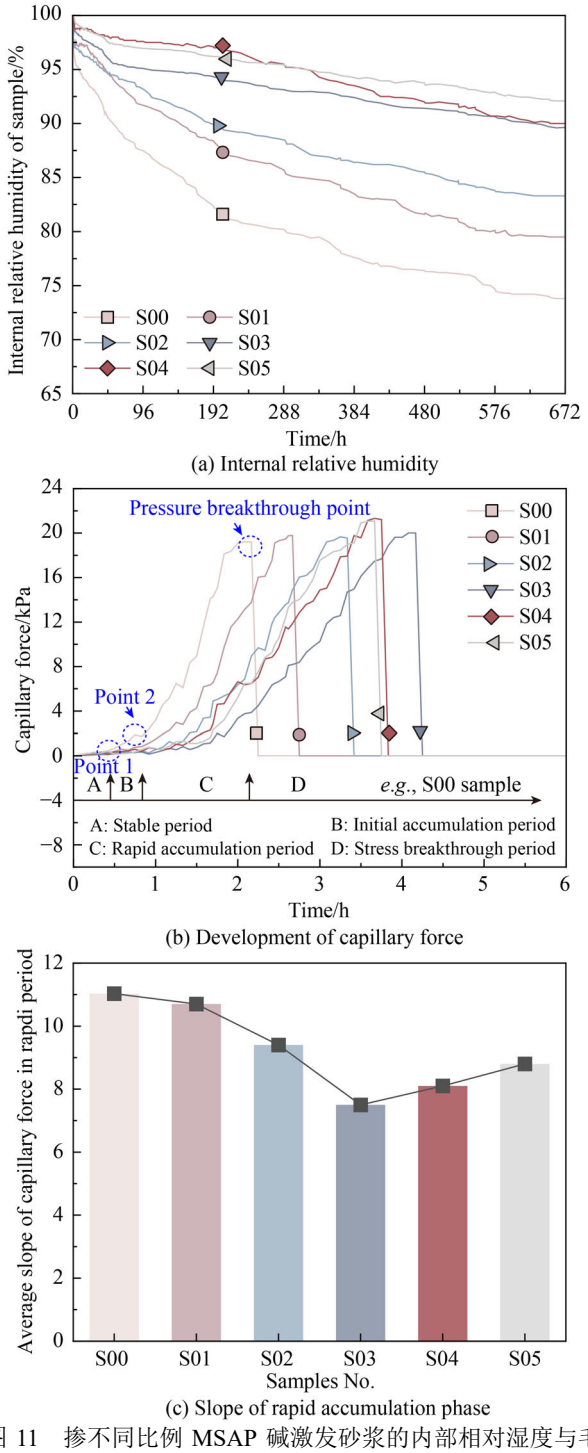


图 11 掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆的内部相对湿度与毛细管力

Fig. 11 Internal relative humidity and capillary force of alkali-activated mortar with different proportions of MSAP

对湿度变化规律。掺 0.1%~0.5%MSAP 的样品在养护 28 d 时的相对湿度分别下降至 79.5%、83.3%、89.7%、90.0%与 92.1%，分别较同龄期 S00 样品提高约 7.7%、12.9%、21.5%、22.0%与 24.8%。这主要是由于MSAP可在砂浆拌合初期吸附并储存自由水，随后随着水化反应的进行逐步释放水分。

毛细管力的产生源于碱激发砂浆孔隙内液体的表面张力效应。图 11b 揭示了掺不同比例 MSAP 的碱激发砂浆在不同龄期的毛细管力发展规律。所有试样的毛细管力峰值相近，且均呈 3 个阶段特征：1) 压力稳定期，初期孔隙水分饱和，毛细管力维持稳定；2) 初始积累期，水分开始散失，负压缓慢累积；3) 快速上升期，负压增速显著提升，直至达到压力突破点。此时毛细管力骤降至大气压，传感器检测到空气侵入，标志着材料内部孔隙连通性增强。未掺 MSAP 的 S00 样品在初凝转向终凝阶段时毛细管力迅速增加到 20 kPa。而掺入 0.1%~0.3% MSAP 的样品的毛细管力快速上升期起始时间分别延长至 74、86 min 与 106 min。这主要是由于 MSAP 通过释放吸附水分补充体系自由水消耗，从而有效缓解碱激发砂浆内部毛细管压力发展。图 11c 比较了毛细管力快速上升期的平均斜率差异。可见，当 MSAP 掺量为 0%~0.3%时，MSAP 延缓了毛细管力在快速上升期内的增长速度，延长了压力稳定期的时间。然而，当 MSAP 掺量大于 0.3%时，平均斜率反而有所提高。这种加速现象归因于内养护水的引入促使砂浆的初始水灰比增加，使得在短期内砂浆表面出现泌水现象。

2.8　碱激发砂浆微观形貌

掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆养护 28 d 的微观结构如图 12 所示。S00 样品中结晶相均匀分布在样品表面，细骨料与浆体紧密结合并构成一个整体，界面过渡(ITZ)区域不易分辨。当 MSAP 掺量提升至 0.3%时，微观结构呈现更高的致密化特征，ITZ 区域未检测到明显微裂纹，这表明适量 SAP 颗粒通过内部储水的缓释作用有效促进了碱激发凝胶产物的水化反应进程。然而，随着 MSAP 掺量继续增加，试样的微观结构出现显著劣化现象，孔隙周边呈现结构松散特征并伴随微裂纹萌生。这一现象可能源于两个协同作用机制：过量水分导致水化反应程度降低，同时残余 MSAP 颗粒在释水后形成团状聚集体。特别是在 S04 和 S05 试样中观察到显著增加的不规则孔隙结构，这些由 MSAP 释水遗留的缺陷结构具有明显的三维连通特征。

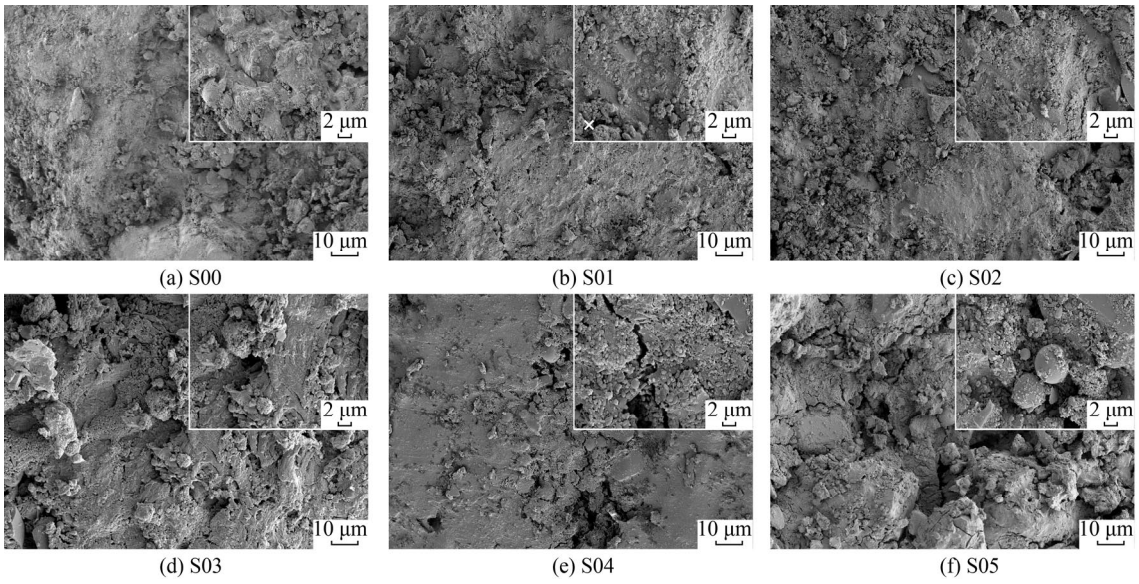


图 12　掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆的微观形貌照片

Fig. 12　Microstructures of alkali-activated mortar with different proportions of MSAP

2.9　碱激发砂浆孔隙结构

图 13 分别展示了砂浆样品进汞孔隙累计微分分布与孔径分布。依据孔隙等效直径的大小，碱激发砂浆的孔隙被分为凝胶孔(<10 nm)、介孔(10~50 nm)、毛细孔(50~1000 nm)和大孔(>1000 nm)。未掺 MSAP 的S00样品的凝胶孔与大孔体积分数分别为35.50%与 4.42%。而随着 MSAP 掺量的增加，碱激发砂浆大孔的体积分数均有较为明显的上升趋势。在干燥过程中，小尺度孔隙的优先排空会引发较高的收缩应力，而大孔的存在通过降低孔隙系统的等效平均曲率半径，有效缓解了毛细管压力梯度，从而改善碱激发砂浆的收缩应力分布特征。此外，掺入

0.1%~0.4%MSAP 的样品的凝胶孔体积分数从35.5%逐渐增大至 46.2%。MSAP 可在较长时间内向碱激发砂浆体系内中释放水分，从而提高砂浆的水化程度。新生成的水化产物通过“填充–分割”效应将原有毛细孔与介孔重构为更细小的凝胶孔。值得注意的是，当 MSAP 掺量增至 0.4%~0.5%时，毛细孔体积分数分别上升至 12.5%和 15.9%。这主要是由于在高 MSAP 掺量条件下，部分水分以自由水形式扩散至基体而非参与水化反应，导致未水化区域形成亚微米级孔隙网络，不利于结构致密性。该现象可解释高掺量 MSAP 对碱激发砂浆抗压强度的负面作用。

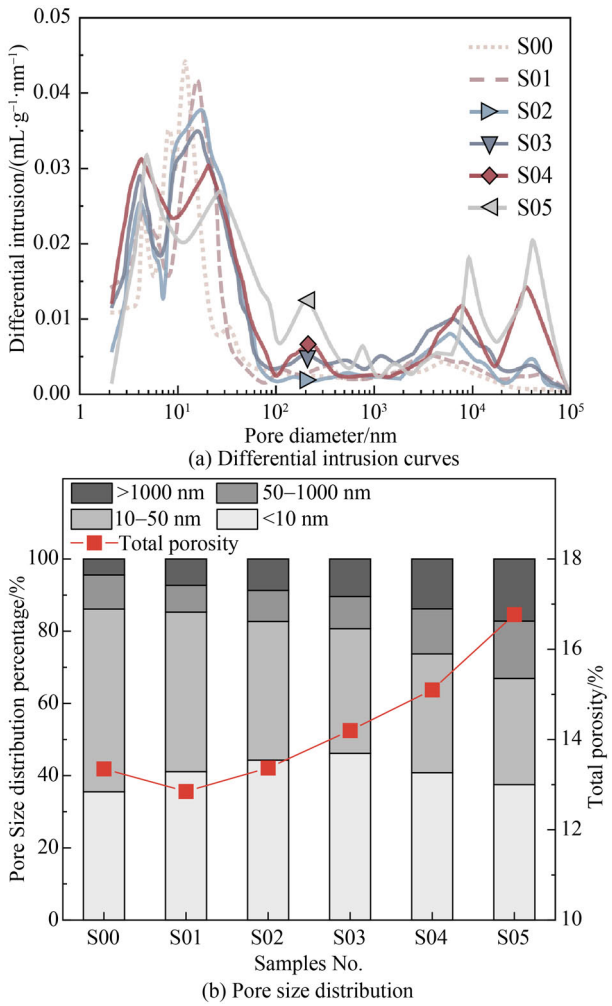


图 13 掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆的孔隙结构

Fig. 13 Pore structures of alkali-activated mortar with different proportions of MSAP

2.10 碱激发砂浆耐久性能

测定碱激发砂浆的耐久性能是确保其长期服役寿命可靠性的关键。图 14 为掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆的相对渗透系数。可见未掺 MSAP 的 S00 样品的相对渗透系数约为 7.15×10^{-12} m/s；而 MSAP 掺量从 0.1%上升至 0.2%时，试样的相对渗透分别为 5.02×10^{-12} m/s 与 4.29×10^{-12} m/s，相较于 S00 样品分别下降约 29.8%与 40.0%，表明合理掺量的 MSAP 可改善碱激发砂浆的抗渗性能。这种改善效应主要归因于新生成的水化产物通过“填充–分割”效应将原有毛细孔与介孔重构为更细小的凝胶孔，提高了结构的致密性；且 MSAP 可通过物理填充效应堵塞空隙，导致液体渗流阻力增大，从而降低砂浆相对渗透系数，延缓水分的扩散，改善碱激发砂浆的抗渗性能。当 MSAP 掺量大于 0.2%时，材料抗渗性能呈现逆向演变趋势，S03~S05 碱激发砂浆的相对渗透系数分别上升至 6.67×10^{-12}、12.99×10^{-12} m/s 与 18.49×10^{-12} m/s。这种现象源于过量 MSAP 引发的结构劣化效应：高含量的 MASP 在碱激发砂浆内形成连通孔隙网络，加速水分渗透。同时，局部区域出现的宏观裂纹与孔洞显著削弱了材料的密实性，在压力梯度作用下更易形成优势渗流路径。

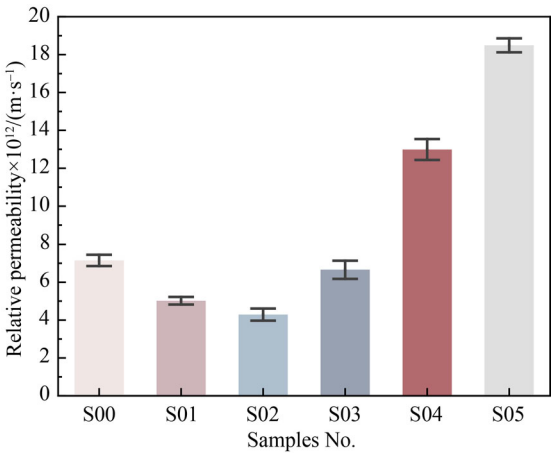


图 14 掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆抗渗性能

Fig. 14 Permeability resistance of alkali-activated mortar with different proportions of MSAP

掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆的非稳态氯离子迁移系数如图 15 所示。7 d 时未掺 MSAP 的 S00 对照组非稳态氯离子迁移系数达 14.3×10^{-12} m^2/s。掺 0.1%MSAP 的 S01 样品的氯离子扩散系数降低了 4.9%，而 S02~S05 样品氯离子扩散系数提高了 2.1%~60.2%。28 d 和 56 d 时，S00 样品的氯离子扩散系数下降至 8.5×10^{-12} m^2/s 与 7.3×10^{-12} m^2/s。而同龄期下，S02 样品的氯离子扩散系数下降至 6.0×10^{-12} m^2/s 与 4.8×10^{-12} m^2/s，分别较同龄期 S00 样品显著降低 20.0%与 23.8%，展现出优异的抗氯离子渗透性能。相反，部分水分以自由水形式滞留于基体内部而非参与水化反应，导致亚微米级连通孔隙网络的形成。这种孔隙结构缺陷使得 28 d 和 56 d

龄期S05组的氯离子扩散系数分别高达16.5×10^{-12} m^2/s与15.3×10^{-12} m^2/s，显著高于对照组。

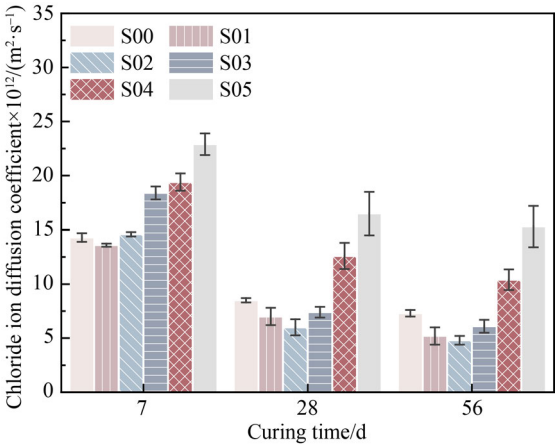


图 15　掺不同比例 MSAP 碱激发砂浆抗氯盐渗透性能

Fig. 15　Chloride resistance performance of alkali-activated mortar with different proportions of MSAP

3　结论

1) 通过优化设计参数制备淀粉接枝/硅藻土改性聚丙烯酸 MSAP，得到最优制备参数：丙烯酸/淀粉质量比为 6、丙烯酸/硅藻土质量比为 10、引发剂 APS 用量为 0.15%、交联剂 MBA 用量为 0.05%(质量分数)，其中 AA6 型 MSAP 在去离子水中的 240 min 吸液倍率可达 472 g/g，且相较于商用 SAP，本研究制备的 MSAP 在盐溶液中具有更好的耐久性。

2) MSAP 会在碱激发砂浆孔隙液中表现出显著的吸液–释液行为，使得砂浆在 60 min 后仍维持大于 60 mm 流动度的较高水平。MSAP 延缓了碱激发砂浆的水化反应速率，并在早期抑制了凝胶骨架的生成，使得掺入不同比例 MSAP 的碱激发砂浆的凝结时间明显延长。而在长周期内砂浆的水化程度得到提高，微观结构更为密实，掺入 0.1%MSAP 的 S01 样品的 28 d 抗压强度可达 52.4 MPa。

3) 本研究中的碱激发砂浆的化学收缩呈多阶段性特征：早期膨胀期–收缩加速期–释液补偿期–收缩平缓期。MSAP 掺量增加抑制了砂浆的早龄期化学收缩行为；而在高掺量条件下，养护后期则会出现显著的体积负效应，当 MSAP 掺量增至 0.5%时，补偿率波动范围显著扩展为–77.4%~73.6%。

4) MSAP 掺量与碱激发砂浆自收缩行为呈现显著的非线性正相关特性，且在碱激发砂浆体系中的补偿效能存在阈值效应。当 MSAP 掺量为 0.2%时，显著延缓了砂浆内部毛细管压力发展时间，自收缩补偿率提升至 52.2%~63.1%；当 MSAP 掺量超过 0.3%后，收缩补偿率对掺量变化的响应敏感性显著降低，其波动范围稳定在 65%~85%。

5) MSAP 的物理填充与水化促进作用可使得导致液体渗流阻力增大，从而降低砂浆相对渗透系数，延缓水分的扩散。MSAP 掺量达 0.2%时，试样的相对渗透系数分别为 4.29×10^{-12} m/s，相较于对照样品分别下降约 40.0%。类似地，S02 样品的氯离子扩散系数下降至 6.0×10^{-12} m^2/s。相反，高含量的 MASP 在碱激发砂浆内形成连通孔隙网络，且局部区域出现的宏观裂纹与孔洞对砂浆的耐久性存在负面影响。

参考文献:

[1] 周霄骋, 李曼, 施锦杰. 柠檬酸钠对碱激发粉煤灰滤液中钢筋的阻锈机制[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(2): 603–613.
ZHOU Xiaocheng, LI Man, SHI Jinjie. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(2): 603–613.

[2] 刘志勇, 蒋金洋, 李洋, 等. 聚丙烯酸乳液改性碱激发矿渣修补材料的力学耐久性能和作用机理[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(2): 498–512.
LIU Zhiyong, JIANG Jinyang, LI Yang, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(2): 498–512.

[3] BALLEKERE KUMARAPPA D, PEETHAMPARAN S, NGAMI M. Autogenous shrinkage of alkali activated slag mortars: Basic mechanisms and mitigation methods[J]. Cem Concr Res, 2018, 109: 1–9.

[4] HU X, SHI C J, ZHANG Z H, et al. Autogenous and drying shrinkage of alkali-activated slag mortars[J]. J Am Ceram Soc, 2019, 102(8): 4963–4975.

[5] BAKHAREV T, SANJAYAN J G, CHENG Y B. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete[J]. Cem Concr Res, 2000, 30(9): 1367–1374.

[6] YE H L, RADLIŃSKA A. Shrinkage mitigation strategies in alkali-activated slag[J]. Cem Concr Res, 2017, 101: 131–143.

[7] 叶蛟龙, 范小春, 高旭, 等. 养护制度调控碱激发材料收缩性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(10): 63–69.
YE Jiaolong, FAN Xiaochun, GAO Xu, et al. J Wuhan Univ Technol, 2023, 45(10): 63–69.

[8] UPPALAPATI S, VANDEWALLE L, CIZER Ö. Autogenous shrinkage of slag-fly ash blends activated with hybrid sodium silicate and sodium sulfate at different curing temperatures[J]. Constr Build Mater, 2020, 265: 121276.

[9] SAKULICH A R, BENTZ D P. Mitigation of autogenous shrinkage in alkali activated slag mortars by internal curing[J]. Mater Struct, 2013, 46(8): 1355–1367.

[10] 杨进, 段晓鹏, 邱金胤, 等. 高吸水树脂水凝胶用于水泥基材料裂纹自封堵的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(11): 3015–3024.
YANG Jin, DUAN Xiaopeng, QIU Jinyin, et al. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(11): 3015–3024.

[11] 祁晓华. 耐盐性高吸水树脂的合成及其溶胀动力学研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
QI Xiaohua. Study on the synthesis and swelling kinetics of salt-resistant superabsorbent polymers[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.

[12] 刘淑琼, 唐陈云, 李真真, 等. 以海藻酸钠为骨架的四元共聚高吸水性树脂的合成[J]. 塑料科技, 2017, 45(1): 65–68.
LIU Shuqiong, TANG Chenyun, LI Zhenzhen, et al. Plast Sci Technol,

2017, 45(1): 65–68.
[13] TU W L, ZHU Y, FANG G H, et al. Internal curing of alkali-activated fly ash-slag pastes using superabsorbent polymer[J]. Cem Concr Res, 2019, 116: 179–190.
[14] LIU J H, FARZADNIA N, SHI C J. Microstructural and micromechanical characteristics of ultra-high performance concrete with superabsorbent polymer (SAP)[J]. Cem Concr Res, 2021, 149: 106560.
[15] 混凝土高吸水性树脂内养护剂. JC/T 2551–2019[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2019.
[16] Standard test method for chemical shrinkage of hydraulic cement paste. ASTM C1608-12[S]. American society for testing and materials, 2012.
[17] 程明扬, 吴彦晨, 戚后娟, 等. 用 β-环糊精、聚乙烯醇和丙烯酰胺制备的高吸水性树脂的耐盐性及生物降解行为[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(10): 112–116.
CHENG Mingyang, WU Yanchen, QI Houjuan, et al. J Northeast For Univ, 2016, 44(10): 112–116.
[18] 吕阳, 吴远帅, 葛云露, 等. 稻壳灰与 SAP 协同内养护对碱激发矿渣胶凝材料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(2): 634–641.
LYU Yang, WU Yuanshuai, GE Yunlu, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2025, 44(2): 634–641.
[19] WU L M, FARZADNIA N, SHI C J, et al. Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review[J]. Constr Build Mater, 2017, 149: 62–75.

Shrinkage and Durability of Alkali-Stimulated Mortar in Modified Superabsorbent Polymer under High Salt and Alkaline Environment

CHEN Keyu, *XIA Jin*
(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Extended Abstract

Introduction The utilization of alkali-activated materials represents an effective approach to energy conservation and emission reduction in the construction sector, having a strategic importance for supporting the achievement of “dual-carbon” goals. However, alkali-activated mortar is prone to substantial volume deformation at early stage due to the coupling effect of chemical shrinkage and autogenous shrinkage. In the long term, its insufficient durability adversely affects the service life of repair structures, thereby restricting broader engineering applications. Furthermore, conventional internal curing methods using polyacrylic superabsorbent polymer (SAP) exhibit a poor durability in high-alkali and salt-rich environments. Therefore, this study was to synthesize a modified polyacrylic-based SAP (MSAP) through starch grafting and diatomite incorporation, with optimized design parameters. The influence of MSAP dosage on the rheological properties, strength development, shrinkage behavior, and durability of alkali-activated fly ash-slag mortar was investigated. The findings could provide new methodologies and technical support for controlling shrinkage and enhancing the durability of alkali-activated mortar, thereby facilitating its large-scale green application.

Methods The MSAP was synthesized *via* aqueous solution polymerization. The key synthesis parameters (*i.e.*, the acrylic acid-to-starch mass ratio, acrylic acid-to-diatomite mass ratio, amount of initiator ammonium persulfate, and amount of crosslinker N,N'-methylene bisacrylamide) were systematically optimized. The water retention and release performance of the MSAP were evaluated by a tea-bag method in different solutions. Multiple batches of mortar samples were casted. Mix proportions with favorable mechanical properties and bond strength were screened, and the optimal internal curing water dosage was determined for the mortar system. Furthermore, the influence of MSAP content (*i.e.*, 0–0.5%) on the properties of alkali-activated mortar was investigated.

The workability (*i.e.*, flowability and setting time) and mechanical properties (*i.e.*, compressive strength) of the mortar were tested in accordance with the JGJ/T 70-2009. The chemical shrinkage was measured by an expansion method based on the standard ASTM C1608-12, while the autogenous volume deformation was determined via a non-contact corrugated tube tester based on the standard ASTM C1698-00. Internal relative humidity development within the mortar for 0–28 d of curing was monitored by HKT-XY humidity sensors. The capillary pressure was recorded by a capillary pressure sensing system. The microstructural and pore structure characteristics were examined by field emission scanning electron microscopy and mercury intrusion porosimetry.

Results and discussion The MSAP samples synthesized under different parameters all exhibit a rapid liquid absorption within the first 30 min in deionized water, followed by a gradual decrease in absorption rate until reaching equilibrium after 120 min. Compared to deionized water, the absorption capacity of MSAP in 0.9% NaCl solution is significantly reduced. A commercial SAP shows an absorption ratio of only 23 g in NaCl solution, indicating its inadequacy for high-salinity environments. The modified MSAP developed in this study achieves a markedly improved absorption ratio of up to 110 g/g. In the dry state, MSAP particles display a dense network structure with a low light transmittance. Microstructurally, the particles exhibit irregular morphologies with abundant pores, wrinkles, and fine granular protrusions on the surface.

The MSAP demonstrates significant liquid absorption and release behaviors in the pore solution of alkali-activated mortar, helping to maintain a high flowability (>60 mm) even after 60 min. It delays the hydration reaction rate and inhibits the early formation of gel frameworks, resulting in prolonged setting time across mixes with different MSAP contents. For longer curing periods, however, the hydration degree improves and the microstructure becomes denser. The incorporation of MSAP at appropriate

dosages (*i.e.*, <0.3%) does not significantly compromise the compressive strength. Sample S01 with 0.1% MSAP reaches a 28 d compressive strength of 52.4 MPa, which is slightly higher than that of the reference group.

The chemical shrinkage of alkali-activated mortar shows a multi-stage evolution, *i.e.*, initial expansion, accelerated shrinkage, release-compensation, and steady phases. A greater MSAP content suppresses an early-age chemical shrinkage. However, at excessive dosages (*e.g.*, 0.5%), notable negative volumetric effects emerge at later stages, with compensation rates varying widely from –77.4% to 73.6%.

A non-linear positive correlation occurs between MSAP content and autogenous shrinkage compensation, exhibiting a threshold effect. At 0.2% MSAP, the development of capillary pressure is significantly delayed, the autogenous shrinkage compensation rate reaches 52.2%–63.1%. Beyond 0.3% MSAP, the sensitivity of compensation efficiency to further dosage increases diminished, stabilizing within 65%–85%.

The physical filling effect and hydration promotion by MSAP increase a fluid flow resistance, thereby reducing the relative permeability coefficient and slowing moisture diffusion. At 0.2% MSAP, the relative permeability coefficient decreases to 4.29×10^{-12} m/s, which is approximately 40.0% lower than that of the control group. Similarly, the chloride diffusion coefficient of sample S02 decreases to 6.0×10^{-12} m^2/s. Conversely, a greater MSAP content leads to interconnected pore networks and localized macro-cracks and voids, adversely affecting the durability of the mortar.

Conclusions　The optimal preparation parameters for starch-grafted/diatomite-modified polyacrylic acid MSAP involved the mass ratio of acrylic acid to starch of 6, the mass ratio of acrylic acid to diatomite of 10, the amount of initiator APS of 0.15%, and the amount of crosslinking agent MBA of 0.05%. An appropriate dosage of SAP particles effectively promoted the hydration process of alkali-activated gel products through the slow release of internally stored water, thereby improving the pore structure and enhancing both mechanical properties and durability. Meanwhile, MSAP could supply the consumption of free water in the system *via* releasing absorbed moisture, thus mitigating the development of capillary pressure within the alkali-activated mortar and reducing its autogenous shrinkage.

Keywords　alkali-activated mortar; internal curing; superabsorbent polymer; shrinkage; durability