

内掺硅烷对硫铝酸盐水泥砂浆力学和吸水性能的影响

薛善彬 王丹 马金元 白如飞 郭哲名 高小建

Effects of incorporated silane on mechanical and water absorption properties of sulphoaluminate cement mortar

XUE Shanbin, WANG Dan, MA Jinyuan, BAI Rufe, GUO Zheming, GAO Xiaojian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241030.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

BFRP筋与低碱度硫铝酸盐水泥混凝土粘结性能试验

Experimental investigations on bonding performance between BFRP bars and low alkalinity sulphoaluminate cement concrete

复合材料学报. 2023, 40(6): 3513–3528 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220906.001>

UHPC与混凝土基体间界面剪切强度的影响因素

Factors influencing interfacial shear strength between UHPC and concrete substrate

复合材料学报. 2024, 41(12): 6492–6501 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241030.001>

CFRP@GFRP混杂复合材料杆体在水浸泡环境下的性能演化

Property evolution of CFRP@GFRP hybrid composite rod exposed in the distilled water

复合材料学报. 2021, 38(10): 3290–3301 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201215.008>

再生粗骨料硅烷浸渍处理对混凝土介质传输性能的影响

Effect of recycled coarse aggregate after strengthening by silane impregnation on mass transport of concrete

复合材料学报. 2020, 37(10): 2602–2609 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200316.002>

高温对钢纤维-聚乙烯醇纤维-CaCO₃晶须多尺度纤维/水泥复合材料弯曲性能和微观结构的影响

Influence of high temperature on flexural properties and micro structure of steel fiber-polyvinyl alcohol fiber-CaCO₃ whisker multi-scale fibers/cement composite

复合材料学报. 2021, 38(7): 2326–2335 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200907.001>

磁场诱导定向碳纤维增强水泥砂浆的力学性能

Mechanical properties of cement mortar reinforced with aligned carbon fibers by magnetic field

复合材料学报. 2019, 36(11): 2726–2733 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190318.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

内掺硅烷对硫铝酸盐水泥砂浆力学和吸水性能的影响



分享本文

薛善彬^{*1}, 王丹¹, 马金元¹, 白如飞¹, 郭哲名¹, 高小建²

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 通过内掺硅烷对硫铝酸盐水泥 (Sulphoaluminate cement, SAC) 砂浆进行疏水改性, 以提升其在海洋等严酷环境中的耐久性。首先, 分析了内掺不同量硅烷 SAC 净浆的凝结时间和水化放热行为, 系统研究了硅烷掺量对不同龄期 SAC 砂浆力学和吸水性能的影响规律。之后, 基于压汞法、扫描电镜、X 射线衍射法和材料表面水分接触角等测试结果探讨了内掺硅烷 SAC 砂浆力学与吸水性能的演化机制。最后, 研究了不同硅烷掺量 SAC 砂浆与不同含水饱和度旧砂浆基体间界面剪切强度的演化规律。结果表明: 掺入不同量硅烷的 SAC 净浆仍具备速凝特征, 其快速放热阶段均集中于加水拌合后的 2 h 内。内掺水泥质量 0.5%~2% 的硅烷会对 SAC 砂浆的抗压强度产生一定的负面影响, 但会略微提升其 28 d 龄期时的抗折强度。1~28 d 龄期内, 内掺硅烷 SAC 砂浆试件的毛细吸水系数相较未掺试件降低了 71.0% 以上。内掺硅烷未造成 SAC 砂浆孔隙率的显著增长, 但使直径大于 50 nm 的毛细孔体积分数升高以及水化产物含量有所增加。SAC 砂浆中硅烷掺量的增加导致其表面水分接触角增大, 并进一步降低了其毛细吸水性能。3 d 龄期时, SAC 砂浆与基体间的界面剪切强度随硅烷掺量的增加而升高, 随基体饱和度的增加而降低。与不同饱和度基体粘结后, 内掺硅烷 SAC 砂浆仍具有较低的吸水性能。

关键词: 硫铝酸盐水泥; 硅烷改性; 毛细吸水; 界面剪切强度; 微观机制

中图分类号: TU528; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)07-3943-12

Effects of incorporated silane on mechanical and water absorption properties of sulphoaluminate cement mortar

XUE Shanbin^{*1}, WANG Dan¹, MA Jinyuan¹, BAI Rufe¹, GUO Zheming¹, GAO Xiaojian²

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In this paper, the hydrophobic modification of sulphoaluminate cement (SAC) mortar was carried out by adding silane to improve its durability in harsh environments such as the ocean. Firstly, the setting time and hydration exothermic behavior of SAC paste with different saturation of silane were analyzed, and the influence of silane content on the mechanical and water absorption properties of SAC mortar at different ages was systematically investigated. The mechanical and water absorption evolution mechanism of silane-doped SAC mortar was further discussed based on the results of mercury intrusion porosimetry, scanning electron microscope, X-ray diffraction and surface moisture contact angle tests. Finally, the evolution law of interface shear strength between SAC mortar with different silane contents and old mortar substrates with different water saturation was investigated. The results show that the SAC pastes with different silane contents still possess quick-setting characteristics, and its

收稿日期: 2024-07-30; 修回日期: 2024-10-14; 录用日期: 2024-10-19; 网络首发时间: 2024-10-30 15:38:24

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241030.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (U2106220; 52008222); 青岛市科技惠民示范专项 (24-1-8-cspz-9-nsh)

National Natural Science Foundation of China (U2106220; 52008222); Demonstration Project of Benefiting People with Science and Technology of Qingdao, China (24-1-8-cspz-9-nsh)

通信作者: 薛善彬, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为混凝土耐久性 E-mail: xueshanbin@qut.edu.cn

引用格式: 薛善彬, 王丹, 马金元, 等. 内掺硅烷对硫铝酸盐水泥砂浆力学和吸水性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(7): 3943-3954.

XUE Shanbin, WANG Dan, MA Jinyuan, et al. Effects of incorporated silane on mechanical and water absorption properties of sulphoaluminate cement mortar[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(7): 3943-3954(in Chinese).

rapid exothermic stage is concentrated within 2 h after water mixing. The incorporation of silane (0.5%-2% of cement in mass) has a certain negative effect on the compressive strength of SAC mortar, but can improve its flexural strength at the age of 28 d. The capillary water absorption coefficients of SAC mortar specimens incorporated with silane are reduced by more than 71.0% compared with specimens without silane at the age of 1-28 d. The incorporation of silane does not cause a significant increase in the porosity of SAC mortar, but increases the volume fraction of capillary pores with a diameter greater than 50 nm and the content of hydration products. The increase of silane content in SAC mortar leads to the increase of its surface water contact angle and further reduces its capillary water absorption properties. At the age of 3 d, the interface shear strength between SAC mortar and substrates increases with the increase of silane content, and decreases with the increase of the saturation of substrates. The SAC mortar with silane still have low water absorption properties after bonding to substrates with different saturation.

Keywords: sulphoaluminate cement; silane modification; capillary water absorption; interface shear strength; micro mechanism

硫铝酸盐水泥 (Sulphoaluminate cement, SAC) 基材料具有早强速凝、抗硫酸盐侵蚀等特点, 在工程抢修、海工基础设施建设等领域有着广阔的应用前景^[1-2]。SAC 基材料凝结硬化后形成的多孔结构会成为外部水分的入渗通道, 加速其在严酷环境中的劣化进程^[3-4]。因此, 有效降低水分在 SAC 基材料中的入渗对于提升其在海洋等严酷环境中的耐久性具有重要意义。

硅烷是一种有机硅材料, 含有多种类型的基团^[5]。将带有疏水基团的硅烷涂刷在水泥基材料表面后, 硅烷在水分的参与下通过一系列水解、缩合反应与水泥基材料建立连接并形成疏水膜, 从而有效延缓水分的入渗^[6-8]。除涂外, 硅烷也可在水泥基材料拌合阶段内掺使用, 使材料具备整体疏水性能。针对硅酸盐水泥基材料的研究表明^[9-10]: 内掺进水泥基材料中的硅烷水解形成的疏水膜会覆盖在水泥等颗粒表面, 并阻碍早期水化反应, 导致材料早期力学性能的降低; 但硅烷也能够促进水化后期水化硅酸钙凝胶的生成, 进而提升水泥基材料 28 d 龄期时的抗压强度。

已有研究表明: 外涂或内掺硅烷能够有效降低 SAC 基材料的吸水性能^[11-12]。而内掺不同量的硅烷对不同龄期 SAC 基材料力学和吸水性能的影响规律及其微观机制值得进一步研究。此外, 已有研究指出: 硅烷浸渍纤维、再生骨料能够改善其与砂浆基体间的粘结性能^[13-14]。而在新拌硅酸盐水泥基材料中内掺硅烷会影响其与基体间的粘结性能^[15-16]。同时, 硅酸盐水泥基材料与基体间

的粘结性能受基体初始含水饱和度的影响^[17-18]。目前, SAC 基材料与基体间的粘结性能得到了一定研究, 但尚未考虑 SAC 基材料中内掺硅烷和基体初始饱和度的影响^[19]。

鉴于以上分析, 本文首先研究了内掺硅烷对 SAC 净浆凝结时间与水化放热行为的影响; 之后, 研究了硅烷掺量对 0.45 水灰比的 SAC 砂浆在不同龄期时的抗压、抗折强度以及毛细吸水性能的影响规律。此外, 利用压汞法 (Mercury intrusion porosimetry, MIP)、扫描电子显微镜 (Scanning electron microscopy, SEM) 和 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 技术研究了内掺硅烷 SAC 砂浆微结构的演化规律与机制。结合材料表面水分接触角等测试结果, 探讨了材料吸水性能的演化机制。最后, 研究了 SAC 砂浆与基体间界面剪切强度的主要影响因素及其作用机制。相关研究成果对于耐侵蚀快硬水泥基修补材料的研发和应用具有重要的参考价值。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

原材料选用: 曲阜中联水泥有限公司制造的 42.5 快硬 SAC, 其主要成分见表 1; 山东山水集团生产的 P·O 425 普通硅酸盐水泥; 粒径小于 4.75 mm 的建筑用砂; 山东烟台莱阳市宏祥建筑外加剂厂生产的聚羧酸高效减水剂; 青岛本地自来水; 北京蒙泰伟业建材有限公司生产的异辛基三乙氧基硅烷, 有效成分大于 98.9%。

表 1 硫铝酸盐水泥 (SAC) 的化学成分
Table 1 Chemical composition of sulphoaluminate cement (SAC)

Component	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Others
Mass fraction/wt%	2.67	16.87	10.48	12.90	52.40	2.86	1.82

1.2 试件制备

1.2.1 SAC 砂浆试件制备

按水泥：砂：水：减水剂=1：2.7：0.45：0.0084 的质量比制备水灰比为 0.45 的 SAC 砂浆，以水泥质量的 0.5%、1%、2% 确定硅烷掺量。首先将水泥与砂混合搅拌 120 s，再将硅烷、减水剂与水拌合后一同加入，再次搅拌 120 s。最后将浆体分 3 次装入 40 mm×40 mm×160 mm 试模中，每次装入后使用振动台振实后再继续装入浆体。

将试件放入 20℃、95% 相对湿度 (RH) 标准养护室中养护 6 h 后拆模，拆模后将试件放入标准养护室继续养护。到达龄期后，利用钻孔机从尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的长条形试件中钻取尺寸为直径 19 mm、高 40 mm 的圆柱体试件进行毛细吸水性能测试。

1.2.2 SAC 基修补材料与基体复合试件制备

(1) 基体制备

为测试 SAC 砂浆与硅酸盐水泥砂浆基体间的粘结性能，按水泥：砂：水=1：2.7：0.6 的质量比制备水灰比为 0.6 的普通硅酸盐水泥砂浆作为基体。具体过程为：将水泥与砂混合搅拌 120 s，加水再次搅拌 120 s；将浆体分 3 次装入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 试模中，每次装入后使用振动台振实后再继续装入；室温下覆盖保鲜膜静置 24 h 后脱模，放入 20℃、95%RH 标准养护室中养护 90 d。

将养护至龄期的试块切割成 70.7 mm×70.7 mm×35.35 mm 的试块，即得到旧砂浆基体。之后将基体于 105℃ 烘干至恒重，待其冷却至室温后用保鲜膜密封，得到饱和度为 0% 的干燥基体。将基体浸没至水中直至其恒重，用保鲜膜密封，得到饱和度为 100% 的基体。将同一块基体烘干再泡水，分别得到其干燥质量 m_0 和饱水质量 m_w 。利用下式计算其 50% 饱和度时对应的目标质量 m_1 ，并将该饱水基体于 105℃ 烘至目标质量 m_1 。用保鲜膜将烘干至目标质量的试件密封后静置 7 d，得到饱和度为 50% 的基体：

$$S = \frac{m_1 - m_0}{m_w - m_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中：S 为基体的饱和度 (%)； m_0 、 m_1 和 m_w 分别为基体为 0% 饱和度、50% 饱和度和 100% 饱和度时的对应质量 (g)。

(2) 复合试件制备

将不同饱和度的 70.7 mm×70.7 mm×35.35 mm

旧砂浆基体放入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 试模内部的一侧，在基体旁浇筑新拌 SAC 砂浆并充分振捣。将试件放入 20℃、95%RH 的标准养护室中养护 6 h 后拆模，拆模后将试件放入标准养护室中继续养护至指定龄期后进行界面剪切强度测试。

1.3 试验方法

1.3.1 凝结时间和水化热测试

按水泥：水：减水剂=1：0.45：0.0084 的质量比制备水灰比为 0.45 的 SAC 净浆，以水泥质量的 0.5%、1%、2% 确定硅烷掺量。将水泥与水一同搅拌 120 s 制成净浆。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)^[20] 测定新拌 SAC 净浆的初凝和终凝时间。将制备的 SAC 净浆迅速放入美国 TA Instruments 公司生产的 TAM AIR 型量热仪中进行水化热测试，在不同硅烷掺量样品的测试中，加水拌合后 150 s 开始获取水化热测试数据。

1.3.2 力学试验

(1) 抗压与抗折强度测试

将尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的 SAC 砂浆试件养护至指定龄期后测定其抗压、抗折强度，试验参照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—2021)^[21] 进行。

(2) 界面剪切强度测试

采用图 1 所示装置进行复合试件界面剪切试验，加载速度为 2.5 kN/s。根据下式计算界面剪切强度，每组取 3 个试件，以平均值作为最终测试结果。

$$\tau = \frac{P}{A} \tag{2}$$

式中： τ 为界面剪切强度 (MPa)；A 为试件受力面积 (mm²)；P 为破坏荷载 (N)。

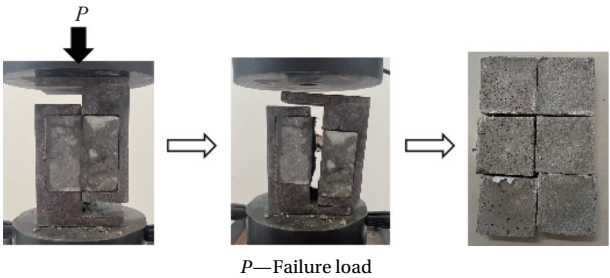


图 1 试件的界面剪切强度测试
Fig. 1 Interface shear strength test of samples

1.3.3 毛细吸水试验

将钻取的圆柱体 SAC 砂浆试件和 SAC 砂浆与

基体粘结复合试件在 45℃ 烘箱中烘干至恒重后，用铝箔胶带密封其侧面。复合试件以 SAC 砂浆面为吸水面。在吸水过程中保持水面高出试件底面 2~3 mm，间隔一定时间称量试件质量。根据下式测定试件的毛细吸水系数：

$$\frac{\Delta W}{A} = C \sqrt{t} \tag{3}$$

式中：ΔW 为试件累计吸水质量 (g)；C 为毛细吸水系数 (g·cm⁻²·min^{-0.5})；t 为吸水时间 (min)。

1.3.4 MIP 测试

采用美国麦克仪器有限公司的 MicroActive AutoPore V 9600 压汞仪进行测试。取试件中心部位且尺寸不超过 10 mm×10 mm×10 mm 的块状样品用于测试，测试前将样品放入无水乙醇中浸泡 3 d 后干燥，烘干温度为 45℃。

1.3.5 SEM 试验

将 SAC 砂浆加工为直径 Φ19 mm×10 mm 的圆柱形样品，于 45℃ 中干燥至恒重。试验采用日本电子 (JEOL) JSM-7610F 热场发射扫描电子显微镜设备。

1.3.6 表面水分接触角测定

使用德国 Kruss Dsaht 17C 接触角测量仪测定 3 d 龄期时试件表面水分接触角。待水分与试件表面接触 1~3 s 后测定该点表面水分接触角，在试件表面选取 9 处平整区域进行测试，取其平均值为该试件的表面水分接触角最终测定值。

1.3.7 XRD 测试

采用日本理学 Rigaku miniflex 6000 X 射线衍射仪对 1 d 和 3 d 龄期的 SAC 净浆进行物相定性分析，测量范围为 15°~50°，步长为 2°/min。

2 结果与讨论

2.1 内掺硅烷对 SAC 净浆凝结时间和水化放热的影响规律

不同硅烷掺量的 0.45 水灰比 SAC 净浆的凝结时间如图 2 所示。未掺硅烷时，SAC 净浆的初凝时间为 18.5 min，终凝时间为 23.7 min。掺入不同量硅烷的 SAC 净浆仍具备显著的速凝特征，初凝、终凝时间分别均在 22 min 和 25 min 以内。掺入 0.5% 硅烷后，SAC 净浆的初凝和终凝时间较未掺硅烷时变化较小。而掺入 1% 和 2% 硅烷后，SAC 净浆的初凝时间均延长了 14.6%，终凝时间均缩短了 4.6%。

不同硅烷掺量 SAC 净浆 12 h 内的水化累计放

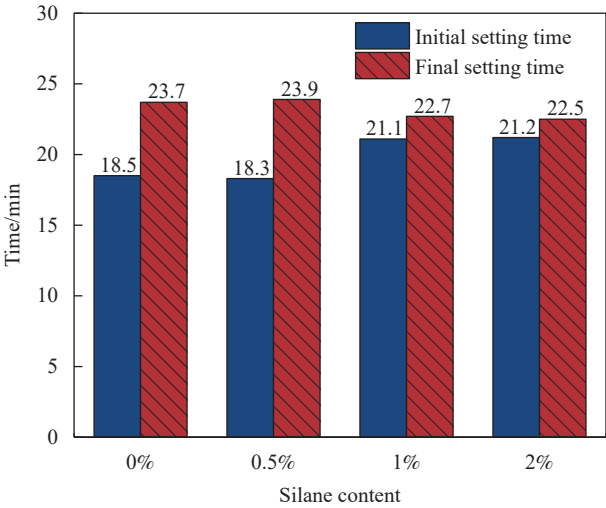


图 2 不同硅烷掺量对 SAC 净浆凝结时间的影响

Fig. 2 Effects of different silane contents on the setting time of SAC paste

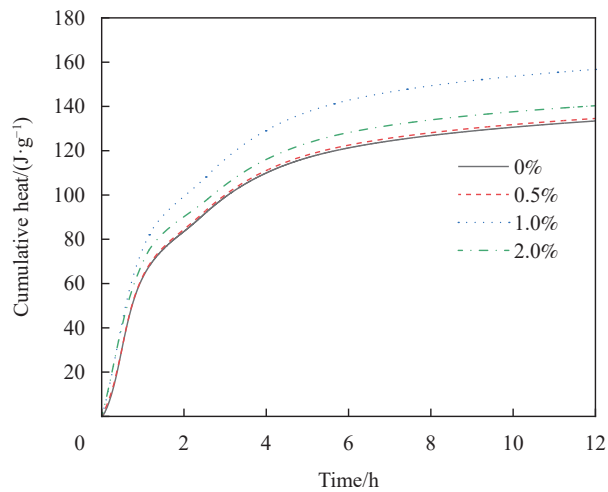
热总量和放热速率测试结果如图 3 所示。图 3(a) 表明：0.45 水灰比 SAC 净浆累计放热总量在水化热测试开始后的 2 h 内快速升高，2 h 至 8 h 内继续增加，8 h 后趋于平缓。掺入 0.5% 硅烷后，SAC 净浆的累计放热曲线与未掺硅烷时类似，而掺入 1% 和 2% 硅烷后 SAC 净浆的累计放热总量有所升高。水化热测试 12 h 时，0.5%、1% 和 2% 硅烷掺量 SAC 净浆的累计放热总量分别为未掺硅烷时的 1.01 倍、1.17 倍和 1.05 倍。

根据图 3(b)，不同硅烷掺量 SAC 净浆快速放热阶段均集中于加水拌合后的 2 h 内。掺入硅烷的浆体在加水拌合后的 10 min 内均出现第一个放热峰。该放热峰随硅烷掺量增加而升高，可能与硅烷遇水后的水解反应有关。试验所用的异辛基三乙氧基硅烷单体中含有的烷氧基遇水 10 min 内即发生水解反应并释放热量^[22]。水解后的硅烷相互缩合及其与 SAC 间的化学反应也可产生热量^[23]。此后，不同硅烷掺量 SAC 净浆的水化放热速率曲线均在加水拌合 25~35 min 后出现第二个放峰值，且峰值与未掺硅烷浆体较为接近。该放热峰表明 SAC 在该阶段集中水化。

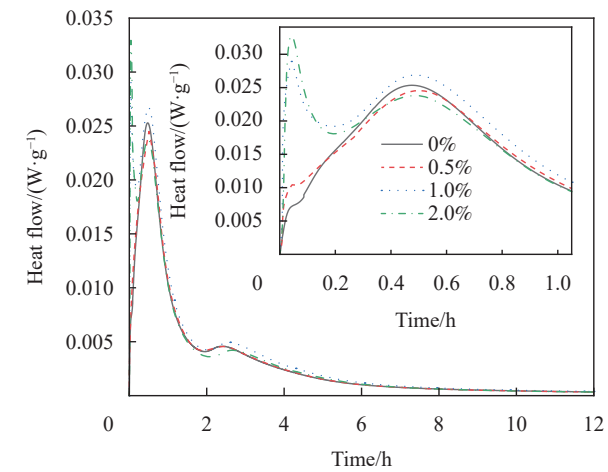
2.2 内掺硅烷对 SAC 砂浆抗压与抗折强度及其吸水性能的影响

2.2.1 抗压与抗折强度

SAC 砂浆抗压与抗折强度随硅烷掺量和龄期的演化规律如图 4 所示。图 4(a) 表明：未掺硅烷试件 1 d 时的抗压强度达 30.5 MPa，3 d、7 d 和 28 d 时试件的抗压强度增长为 1 d 时的 1.16 倍、1.21 倍和 1.34 倍。内掺硅烷试件仍具备早强的特



(a) Cumulative heat curves of SAC paste with different silane contents



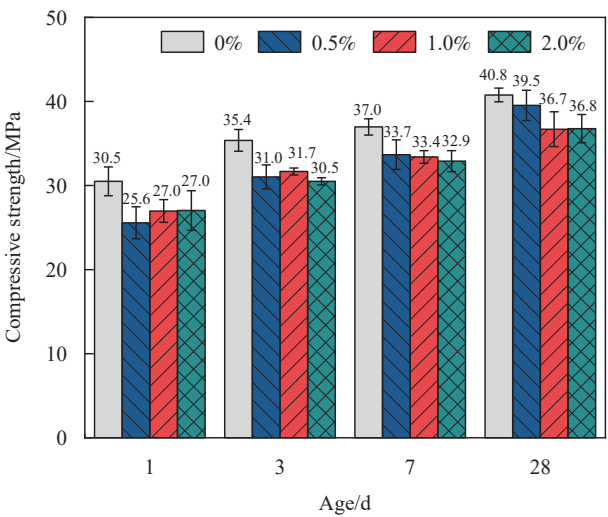
(b) Heat flow curves of SAC paste with different silane contents

图3 不同硅烷掺量对 SAC 净浆水化放热的影响

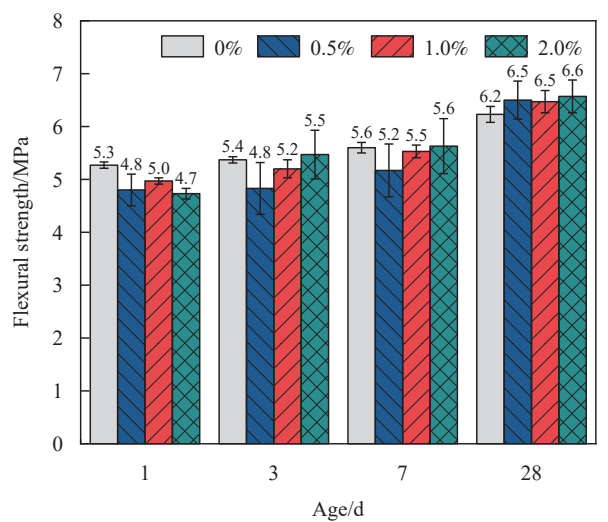
Fig. 3 Effects of different silane contents on the hydration heat of SAC paste

性：0.5%、1%、2% 硅烷掺量试件 1 d 时的抗压强度分别为 25.6 MPa、27.0 MPa 和 27.0 MPa，此后其抗压强度在 3~28 d 内增幅为 12.8%~54.6%。内掺硅烷对 SAC 砂浆不同龄期时的抗压强度均产生一定的负面影响：1 d 至 28 d 龄期时，0.5%、1%、2% 硅烷掺量试件的抗压强度分别为未掺硅烷试件的 83.9%~96.8%、88.5%~90.5% 和 86.2%~90.2%。

图 4(b) 表明：未参与掺入硅烷的 SAC 砂浆均在 1 d 时形成一定的抗折强度，且其抗折强度随龄期的增加而表现出不同程度的增长。3 d 时，2% 硅烷掺量试件的抗折强度较 1 d 时增长幅度最大，为 15.6%，而 0%、0.5% 和 1% 硅烷掺量试件的抗折强度仅增长了 0.6%~4.6%。3~7 d 时，内掺



(a) Compressive strength of SAC mortar with different silane contents



(b) Flexural strength of SAC mortar with different silane contents

图4 SAC 砂浆抗压与抗折强度随硅烷掺量和龄期的演化规律

Fig. 4 Evolution of the compressive and flexural strength of SAC mortar with silane contents and ages

硅烷试件抗折强度的增长幅度为 2.3%~7.0%。28 d 时，不同硅烷掺量试件抗折强度较 7 d 时增长 11.3%~25.7%。总结数据发现：1 d 龄期时，SAC 砂浆的抗折强度受内掺硅烷的负面影响较为显著，内掺硅烷试件的抗折强度较未掺硅烷试件低 5.7%~10.2%。随着龄期增长，不同硅烷掺量试件的抗折强度不再显著低于未掺组。28 d 龄期时，不同硅烷掺量试件的抗折强度约为 6.5 MPa，较未掺硅烷试件高 4.8%~6.5%。

2.2.2 毛细吸水性能

SAC 砂浆试件的吸水数据如图 5 所示，基于

式(3)对9 h内测得的数据进行拟合,测定了试件的毛细吸水系数C。结果表明:内掺硅烷显著降低了SAC砂浆的毛细吸水系数。1 d、3 d、28 d时,内掺0.5%的硅烷试件的毛细吸水系数较未掺硅烷试件分别降低了71.0%~80.8%。同时,1%和2%硅烷掺量试件的毛细吸水系数较0.5%硅烷掺量试件分别降低了46.7%~54.5%和66.7%~80.0%。内掺硅烷导致SAC砂浆吸水量大幅降低,并增加称量误差,从而使拟合度降低。

基于上述测试结果发现:内掺不同量的硅烷均显著降低了SAC砂浆的吸水性能,且当硅烷掺量由0.5%增加至1%时,SAC砂浆的毛细吸水系数下降了46.7%~54.5%。而当硅烷掺量进一步增加至2%时,试件毛细吸水系数的下降幅度变小。

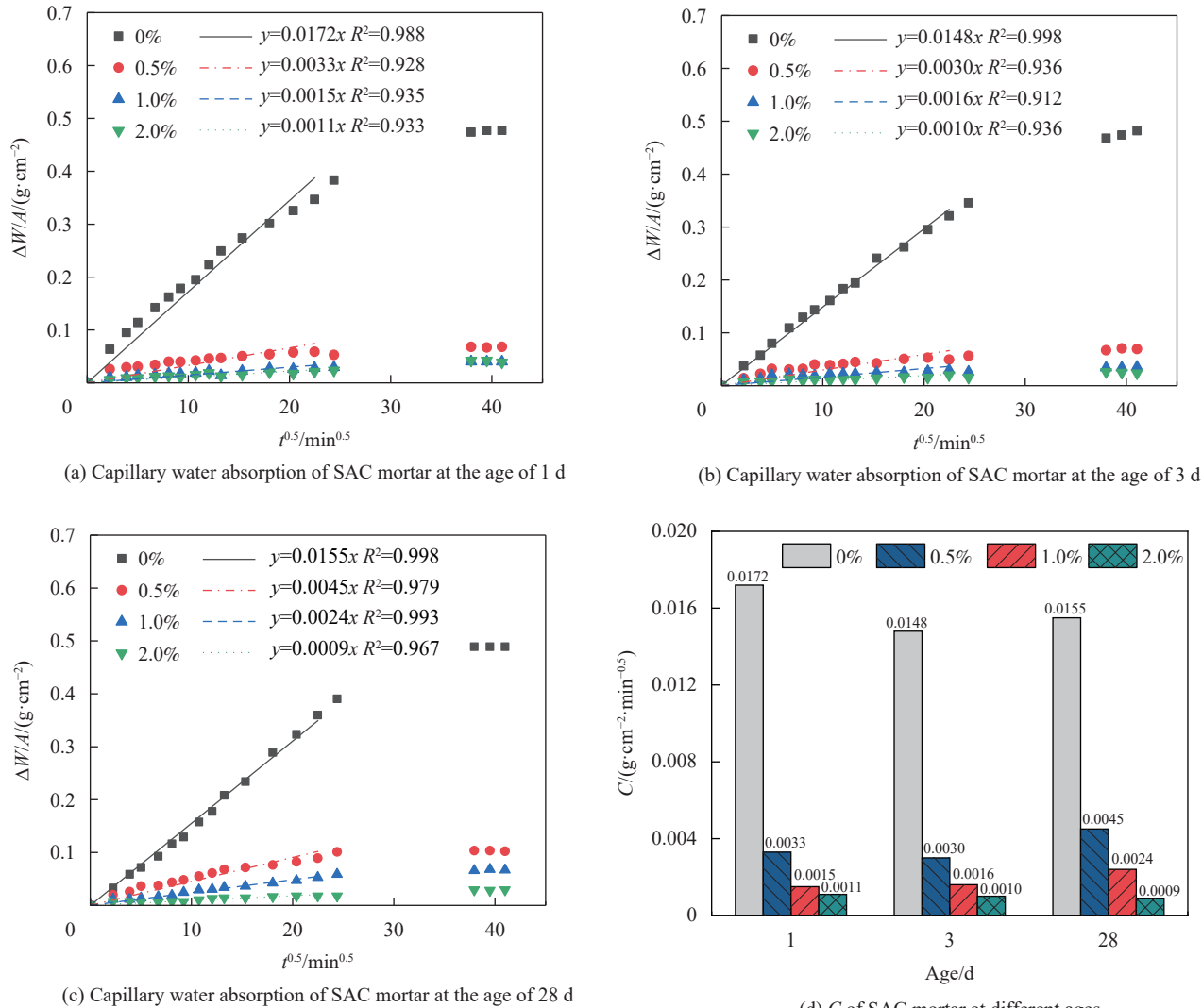
因此,1%的硅烷掺量对于改善材料的疏水性能较为有利。同时,虽然1%的硅烷掺量也可导致SAC砂浆抗压强度的下降,但其对抗压强度的负面影响未明显高于0.5%以及2%的硅烷掺量。就经济成本而言,1%的硅烷掺量较2%时更有优势。综上所述,内掺1%的硅烷掺量的SAC砂浆能够在海工混凝土补强加固工程中取得良好的应用效果。

2.3 内掺硅烷对SAC砂浆力学与吸水性能的影响机制

2.3.1 力学性能的影响机制分析

(1) 基于孔结构的分析

基于MIP测得SAC砂浆试件的孔隙率如图6所示,结果表明:内掺硅烷试件未对SAC砂浆试件的孔隙率造成显著影响,不同硅烷掺量试件孔



ΔW —Mass of water absorption; A —Area; t —Time; R^2 —Coefficient; C —Capillary water absorption

图5 不同硅烷掺量 SAC 砂浆试件的吸水数据

Fig. 5 Water absorption data of SAC mortar with different silane contents

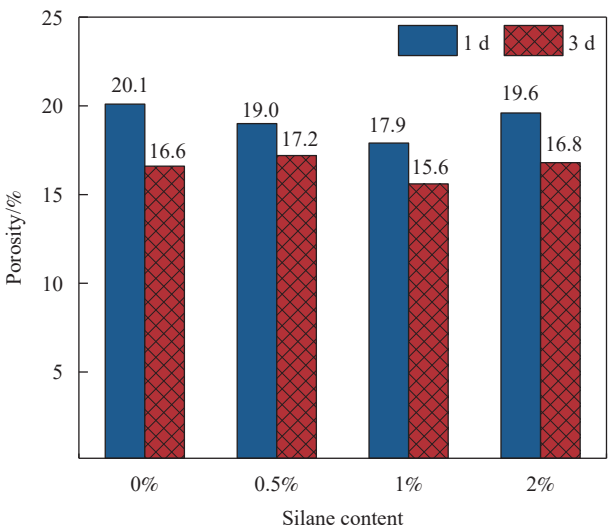


图6 不同硅烷掺量 SAC 砂浆 1 d 和 3 d 龄期孔隙率
Fig.6 Porosity of SAC mortar with different silane contents at the age of 1 d and 3 d

隙率随龄期增长而普遍有所降低。1 d、3 d 龄期时，不同硅烷掺量试件的孔隙率分别为 17.9%~20.1%、15.6%~17.2%。

基于 MIP 测得的 SAC 砂浆孔径分布曲线如图 7 所示。1 d 龄期时：未掺硅烷试件的孔径呈多峰分布，除 100~1 000 nm 处分布有代表毛细孔的主峰外，还在直径为 4~100 nm 处分布有代表凝胶孔的峰；而内掺硅烷试件孔径分布曲线的主峰主要分布在 100~1 000 nm 的范围内，同时试件中存在一定数量的凝胶孔。3 d 龄期时，不同硅烷掺量试件的孔径分布曲线虽然在 100~1 000 nm 处也分布有主峰，但并不突出。同时，内掺硅烷试件的毛细孔主峰位置相较于未掺硅烷试件更靠右。此外，3 d 龄期的不同硅烷掺量试件中均含有较丰富的直径小于 100 nm 的凝胶孔。

为进一步量化分析 SAC 砂浆的孔径分布情况，根据图 7 中的孔径分布曲线对其内部孔隙按照直径大小进行分类。其中，直径为 0~50 nm 的孔隙被划分为凝胶孔，直径为 51~10 000 nm 的孔隙被划分为毛细孔，而直径大于 10 000 nm 的则被划分为气孔^[24]。基于累计进汞数据计算了不同类型孔隙的体积分数即不同类型孔隙体积与试件体积间的比值，如图 8 所示。结果表明：1 d 龄期时，未掺硅烷试件中凝胶孔的体积分数较高，为 8.2vol%。3 d 龄期时，未掺硅烷试件中毛细孔和气孔的体积分数较 1 d 龄期试件略有降低，但凝胶孔体积分数降低了 32.9%。可见，该阶段水化

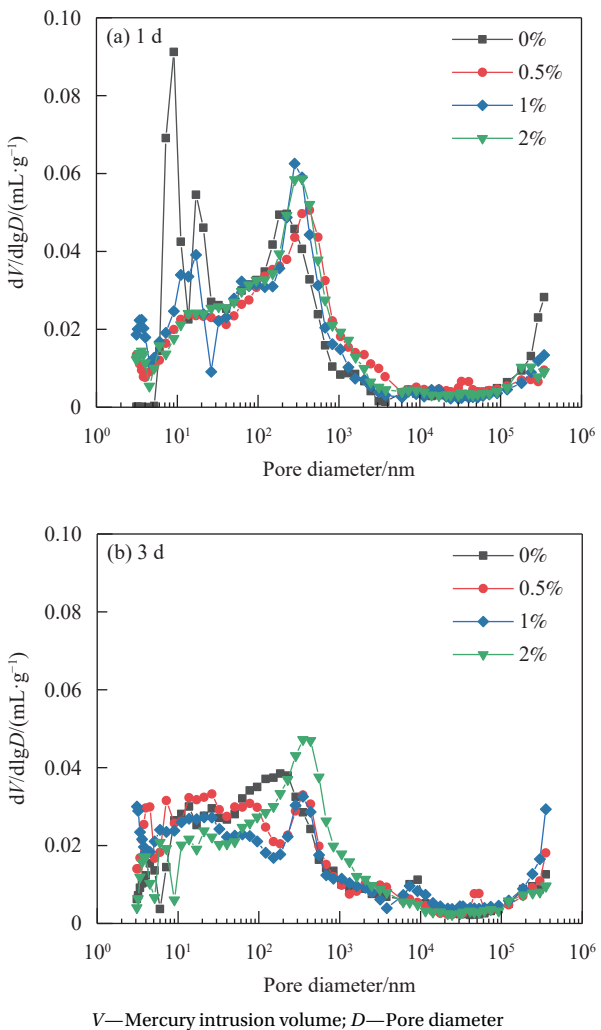


图7 不同硅烷掺量 SAC 砂浆 1 d 和 3 d 龄期的孔径分布曲线
Fig.7 Pore size distribution curves of SAC mortar with different silane contents at the age of 1 d and 3 d

产物的生成主要密实了材料中的纳米级孔隙。

1 d 龄期时，不同硅烷掺量试件中凝胶孔的体积分数较未掺硅烷试件低 22.0%~35.4%，但其毛细孔体积分数较未掺硅烷试件高 23.5%~32.7%。1 d 龄期时毛细孔体积的显著增长可能是导致内掺硅烷试件抗压强度下降的主要原因。

3 d 龄期时，内掺 0.5% 和 1% 硅烷试件中的凝胶孔体积分数分别较 1 d 龄期时增加了 29.1% 和 10.9%，毛细孔体积分数分别降低了 12.5% 和 22.9%。而 2% 硅烷掺量试件中的凝胶孔体积分数较 1 d 时降低了 18.2%，毛细孔体积分数则增加了 13.5%。

(2) 基于微观形貌的分析

基于 SEM 获得 3 d 龄期时掺入 2% 硅烷前后 SAC 砂浆微观形貌如图 9 所示。图 9(a) 表明：3 d 龄期时，未掺硅烷 SAC 砂浆表面块状水化产物堆

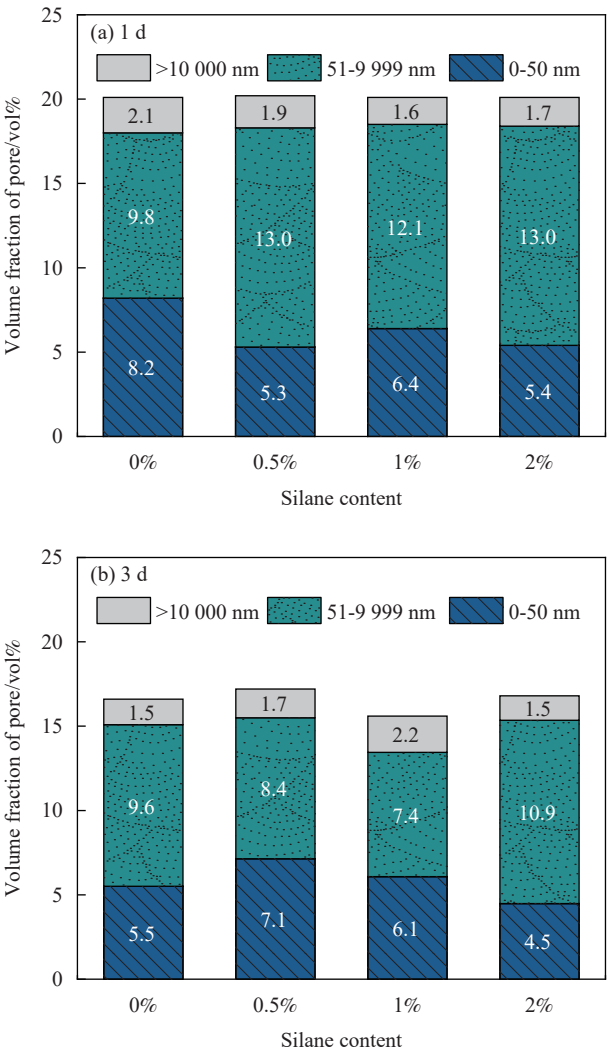


图 8 不同硅烷掺量 SAC 砂浆 1 d 和 3 d 龄期的孔隙体积分数
Fig. 8 Pore volume fraction of SAC mortar with different silane contents at the age of 1 d and 3 d

积较为致密。根据图 9(b)：掺入 2% 硅烷的 SAC 砂浆内部板状与块状水化产物之间交错堆积，但表面结构疏松，暴露出少量细针状钙矾石 (AFt)。

(3) 基于水化产物的分析

1 d 和 3 d 龄期时，基于 XRD 对 0%~2% 硅烷

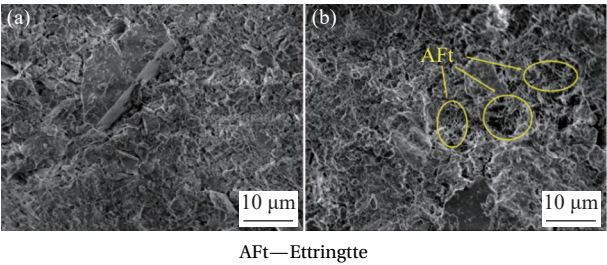


图 9 3 d 龄期时 0% (a) 和 2% (b) 硅烷掺量 SAC 砂浆微观形貌
Fig. 9 Microscopic topography of SAC mortar with 0% (a) and 2% (b) silane content at the age of 3 d

掺量的 SAC 净浆的水化产物进行了测定。图 10(a) 表明：SAC 净浆水化后的主要物相有钙矾石、硅酸二钙 (C₂S) 和碳酸钙等。相同龄期时，硅烷掺量的增加未导致衍射峰角度的明显变化，即硅烷未改变 SAC 净浆水化产物的类型。但 SAC 主要水化产物钙矾石的衍射峰峰值随硅烷掺量的增加而显著升高，这说明硅烷掺量的增加促进了水化产物的生成。图 10(b) 表明：3 d 龄期时，掺加不同量的硅烷均会增加 SAC 水化产物中钙矾石的含量，这与 1 d 龄期时的现象类似。

钙矾石生长一方面能够填充凝胶孔等空隙，另一方面其体积膨胀也可导致浆体开裂和孔隙粗化。此外，硅烷水解后形成的羟基硅烷间的缩合反应可形成二聚体或多聚体的网状结构^[25-26]，该网状结构可将 SAC 砂浆中原本紧密堆积的水化产物分隔开，并导致孔隙粗化。图 7 中的孔径分布

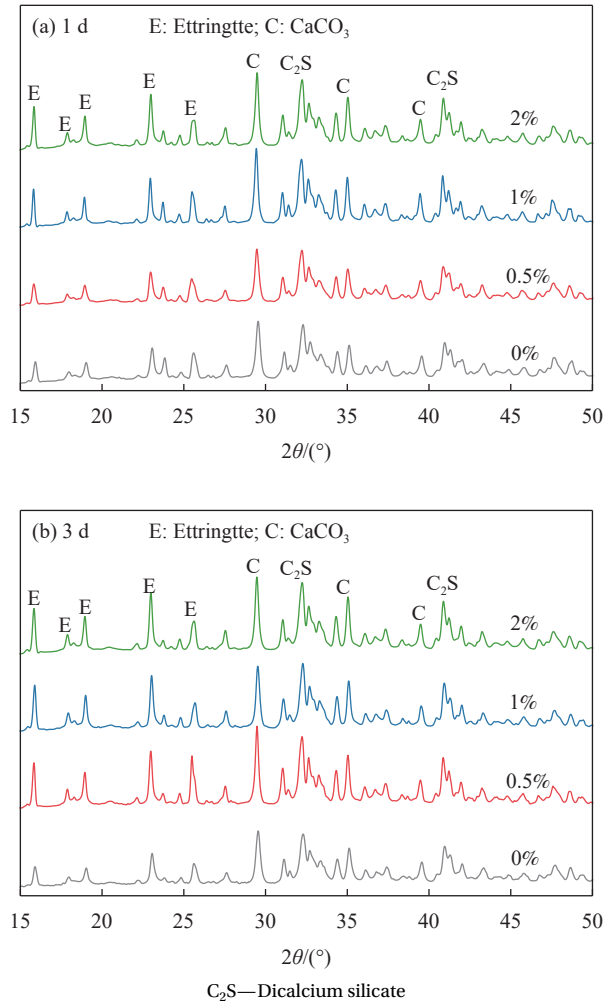


图 10 1 d 和 3 d 龄期时不同硅烷掺量 SAC 净浆试样的 XRD 图谱
Fig. 10 XRD patterns of SAC paste with different silane contents at 1 d and 3 d ages

测试结果以及图 9 的 SEM 图像也证实了以上论述。而浆体开裂和孔隙粗化可进一步导致 SAC 砂浆抗压强度的下降。

此外，内掺硅烷 SAC 砂浆中生成的大量针棒状钙矾石互相搭接，可对浆体产生类似于纤维的增韧作用。而羟基硅烷间缩合反应形成的二聚体或多聚体网状结构也有利于 SAC 砂浆韧性的提升。上述机制可减轻内掺硅烷导致的浆体开裂和孔隙粗化对 SAC 砂浆抗折强度的负面影响。因此，较长龄期的内掺硅烷 SAC 砂浆的抗折强度未显著低于空白组。

2.3.2 吸水性能的影响机制分析

3 d 龄期时，内掺不同量硅烷 SAC 砂浆的表面水分接触角如图 11 所示，结果表明：硅烷掺量越高，表面水分接触角越大。0.5%、1%、2% 硅烷掺量试件表面水分接触角较未掺硅烷的试件分别增加了 27.65%、48.36%、72.9%。具有硅烷的疏水改性能够降低 SAC 砂浆表面能，使得材料表面水分接触角增大[27]。

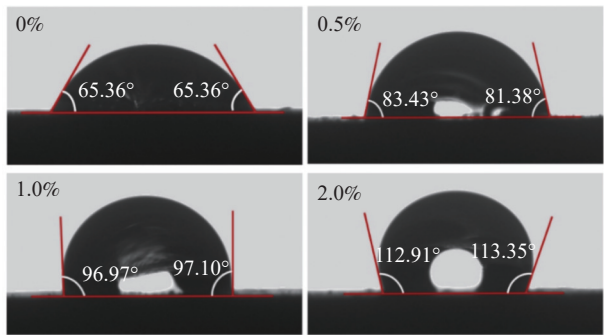


图 11 不同硅烷掺量对 SAC 砂浆表面水分接触角的影响
Fig. 11 Effects of different silane contents on the water contact angle of SAC mortar

已有研究将多孔介质中复杂的孔隙结构简化为弯曲毛管束，并结合理论分析推导出吸水模型，根据相关研究[28-30]：多孔介质吸水初期的毛细吸水系数与表面水分接触角的余弦值间存在正比例关系。本文利用线性函数拟合分析了不同硅烷掺量 SAC 砂浆毛细吸水系数 C 与表面水分接触角余弦值 cosθ 间的关系，如图 12 所示。

结果表明：掺入硅烷后，C 与 cosθ 间具有良好的线性关系；但未掺硅烷试件的 C 和 cosθ 并未满足上述线性函数关系。在未掺硅烷试件中，水分主要通过连通性较好的毛细孔进行传输，其毛细吸水性能主要由孔结构控制[31]。掺入硅烷后，

覆盖在毛细孔表面的疏水膜使其不能够有效传输液态水分，即导致实际参与试件毛细吸水过程的毛细孔数量显著减少。而掺入硅烷后，试件中参与毛细吸水过程的孔隙数量相当。因此，内掺硅烷 SAC 砂浆的毛细吸水过程主要由其表面水分接触角控制，受孔结构的影响较小。

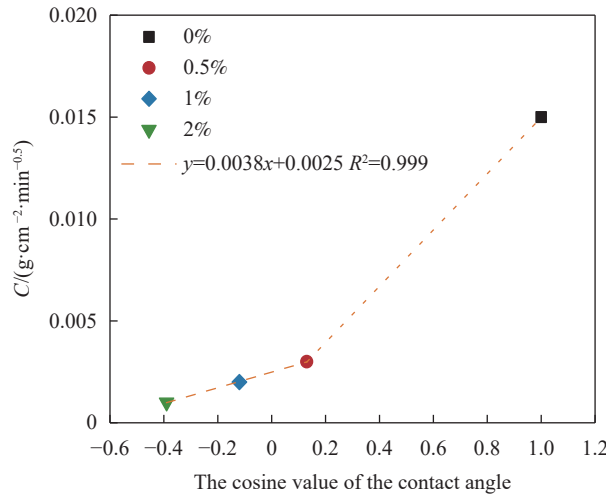


图 12 不同硅烷掺量 SAC 砂浆接触角 θ 余弦值与 C 间的关系
Fig. 12 Relationships between cosine value of the contact angle θ and the C of SAC mortar with different silane contents

硅烷对 SAC 和硅酸盐水泥基材料力学和吸水性能的影响存在类似规律，但其对两种水泥基材料中的水化过程、孔结构的影响并不完全相同。已有研究指出[15, 32-33]：硅烷对硅酸盐水泥早期水化具有显著的延缓作用。而前述水化热、水化产物与孔结构测试结果均表明：硅烷并未显著延缓 SAC 的早期水化，且 1 d 和 3 d 龄期的 SAC 浆体中的水化产物含量较空白组更多。

2.4 内掺硅烷 SAC 砂浆与基体复合体的性能

2.4.1 内掺硅烷 SAC 砂浆与基体间的界面剪切强度

3 d 龄期时，不同硅烷掺量 SAC 砂浆与不同初始饱和度基体间的界面剪切强度如图 13 所示。结果表明：未掺硅烷的 SAC 砂浆与基体间的界面剪切强度随基体饱和度增加而降低，当基体饱和度由 0% 增加至 50% 和 100% 时，界面剪切强度分别由 1.72 MPa 降低至 1.44 MPa 和 1.27 MPa。内掺硅烷能够提高 SAC 砂浆与不同饱和度基体间的界面剪切强度，且硅烷掺量越高越明显。当基体饱和度为 0%、50% 和 100% 时，内掺 0.5%、1% 和 2% 硅烷的 SAC 砂浆与基体间的界面剪切强度较未掺硅烷组分别提高了 4.7%~7.0%、11.0%~16.5% 和

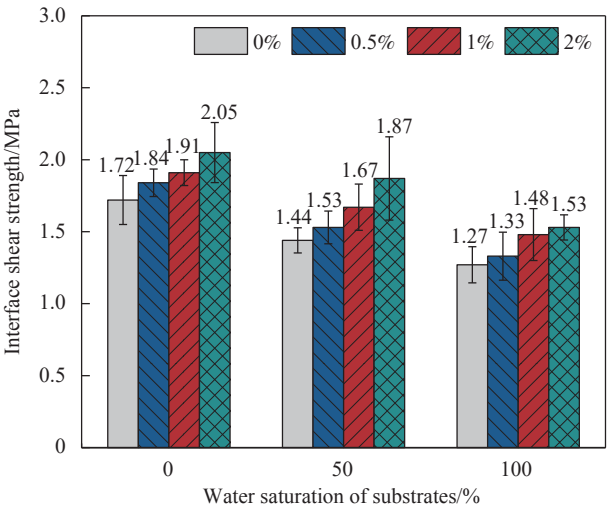


图 13 不同硅烷掺量 SAC 砂浆与不同饱和度的基体间界面剪切强度
Fig. 13 Interface shear strength between SAC mortar with different silane contents and substrates with different saturation

19.2%~29.9%。

同时注意到，内掺硅烷 SAC 砂浆与基体间的界面剪切强度随基体饱和度的增加而降低。对于不同硅烷掺量的 SAC 砂浆，其与 50% 和 100% 饱和度基体间的界面剪切强度较 0% 饱和度基体分别降低了 8.8%~16.8% 和 22.5%~27.7%。

2.4.2 与基体粘结的 SAC 砂浆吸水性能

在 3 d 龄期时，对基体粘结的 SAC 砂浆的吸水性能进行了测试。将测试结果与图 5 中未与基体粘结的 SAC 砂浆吸水数据进行了对比分析，如图 14 所示。由于未掺硅烷试件吸水量较高，利用式 (3) 对图 14(a) 中未掺硅烷试件前 11 h 内的吸水数据进行拟合。结果表明：与基体粘结后，未掺硅烷 SAC 砂浆的毛细吸水系数为 0.012~0.015 g/(cm²·min^{0.5})，较未与基体粘结的 SAC 砂浆变化不显著。

如图 14(b) 所示，利用式 (3) 对吸水试验中前 7 h 内获得的内掺 2% 硅烷 SAC 砂浆的吸水数据进行拟合。其中，空心符号和实心符号分别代表未粘结、粘结基体的试件数据。结果表明：与基体粘结的内掺 2% 硅烷 SAC 砂浆的毛细吸水系数为 9.9×10⁻⁴~14.5×10⁻⁴ g/(cm²·min^{0.5})，和未与基体粘结的内掺 2% 硅烷 SAC 砂浆试件接近，但显著低于与基体粘结的未掺硅烷试件。图 14(b) 中各试件的毛细吸水数据仅为图 14(a) 中各试件的 1/10。该结果表明：不论与基体粘结与否，内掺硅烷均能够显著降低 SAC 砂浆的毛细吸水性能。

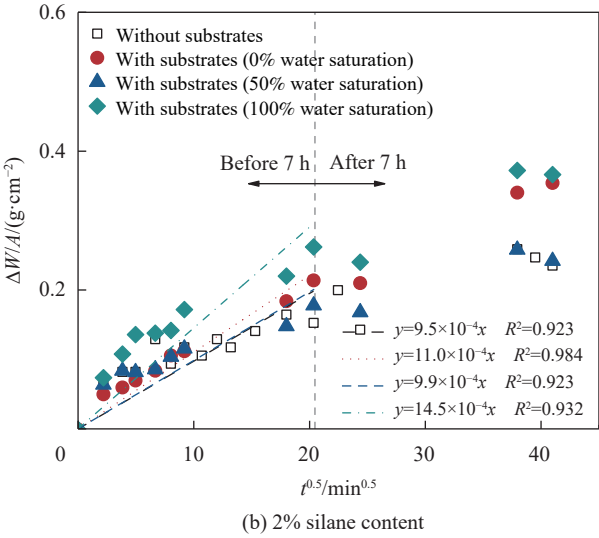
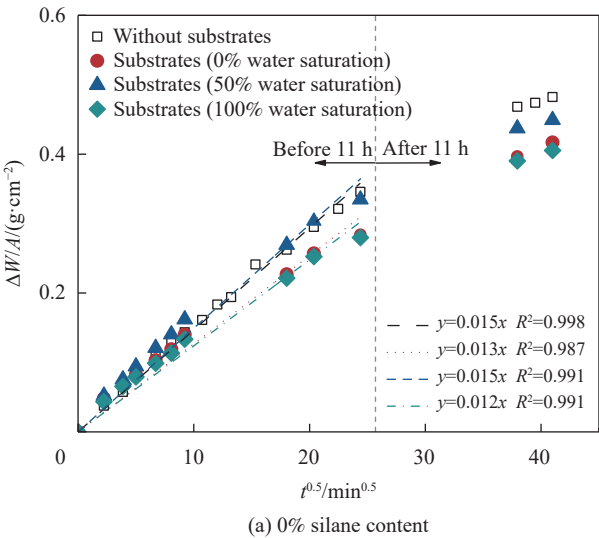


图 14 与基体粘结前后 SAC 砂浆的毛细吸水性能

Fig. 14 Capillary water absorption properties of SAC mortar before and after bonding to substrates

3 结论

系统研究了内掺硅烷对硫铝酸盐水泥 (Sulpho-aluminate cement, SAC) 砂浆力学和吸水性能的影响规律及其微观机制，得出如下主要结论：

(1) 内掺硅烷的 SAC 净浆能够速凝，其水化剧烈放热阶段集中于加水拌合后的 2 h 内，而内掺硅烷 SAC 砂浆仍具备早强的特性。1 d 至 28 d 期间，内掺硅烷试件的抗压强度为同龄期末掺硅烷试件的 83.9%~96.8%。而内掺硅烷仅降低了早龄期试件的抗折强度，28 d 龄期时，内掺硅烷试件的抗折强度略高于未掺硅烷试件。内掺硅烷显著降低了不同龄期 SAC 砂浆的毛细吸水系数，且掺量越高越明显；

(2) 1 d 和 3 d 龄期时, 内掺硅烷对 SAC 砂浆孔隙率的影响较小, 但会导致其孔结构更为疏松。而内掺硅烷 SAC 净浆中的水化产物含量较空白组有所增加, 大量针棒状钙矾石生成和搭接以及硅烷缩合产生的网状结构能够提高 SAC 砂浆的韧性。SAC 砂浆的表面水分接触角随硅烷掺量增加而增大, 且内掺硅烷 SAC 砂浆的毛细吸水系数与其表面水分接触角的余弦值存在良好的线性关系;

(3) 3 d 龄期时, 未掺硅烷 SAC 砂浆与不同饱和度基体间的界面剪切强度为 1.27~1.72 MPa。掺入硅烷能够提升 SAC 砂浆与基体间的界面剪切强度, 且掺量越高越明显。内掺 2% 硅烷的 SAC 砂浆与不同饱和度基体间的界面剪切强度较未掺硅烷组增加了 19.2%~29.9%。无论内掺硅烷与否, SAC 砂浆与基体间的界面剪切强度均随基体饱和度增加而降低, 其与饱水基体间的界面剪切强度为干燥基体的 22.5%~27.7%。与不同饱和度基体粘结后, 内掺硅烷 SAC 砂浆仍具备较低的毛细吸水性能。

参考文献:

[1] CUI K, LIANG K, CHANG J, et al. Investigation of the macro performance, mechanism, and durability of multiscale steel fiber reinforced low-carbon ecological UHPC[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 327: 126921.

[2] 李恒, 王正君, 杜英欣. 纳米 SiO₂ 对硫铝酸盐混凝土负温力学性能与微观结构的影响 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(3): 1555-1565.

LI Heng, WANG Zhengjun, DU Yingxin. Effect of nano-SiO₂ on negative temperature mechanical properties and micro-structure of sulfoaluminate concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(3): 1555-1565(in Chinese).

[3] WANG Y, LI J, UEDA T, et al. Meso-scale mechanical deterioration of mortar subjected to freeze thaw cycles and sodium chloride attack[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 117: 103906.

[4] 童良玉, 刘清风. 考虑时变孔隙结构的非饱和混凝土扩散性能预测模型 [J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(8): 1950-1961.

TONG Liangyu, LIU Qingfeng. Prediction model for diffusivity of unsaturated concrete by considering time-varying pore structure[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(8): 1950-1961(in Chinese).

[5] 胡曙光. 先进水泥基复合材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 66.

HU Shuguang. Advanced cement-based composite materials[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2009: 66(in Chinese).

[6] 李克非, 景炜, 杨睿. 混凝土表面硅烷浸渍及其长期防护效果研究进展 [J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(8): 1181-1190.

LI Kefei, JING Wei, YANG Rui. Review on silane impregnation of concrete surface and its long-term hydrophobic performance[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 47(8): 1181-1190(in Chinese).

[7] PAN X, SHI Z, SHI C, et al. A review on surface treatment for concrete—Part 2: Performance[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 133: 81-90.

[8] JAHANDARI S, TAO Z, ALIM M A, et al. Integral waterproof concrete: A comprehensive review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 78: 107718.

[9] CHEN B, SHAO H, LI B, et al. Influence of silane on hydration characteristics and mechanical properties of cement paste[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 113: 103743.

[10] HUSILLOS-RODRÍGUEZ N, MARTÍNEZ-RAMÍREZ S, ZARZUELA R, et al. Effect of alkoxysilane on early age hydration in portland cement pastes[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 50: 104127.

[11] CHEN H, GUO Z, HOU P, et al. The influence of surface treatment on the transport properties of hardened calcium sulfoaluminate cement-based materials[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114: 103784.

[12] LIANG C, ZHAO P, LIU L, et al. Fabrication of bulk hydrophobic cement-based materials with ultra-high impermeability[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 63: 105492.

[13] 鲍玖文, 李树国, 张鹏, 等. 再生粗骨料硅烷浸渍处理对混凝土介质传输性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2020, 37(10): 2602-2609.

BAO Jiuwen, LI Shuguo, ZHANG Peng, et al. Effect of recycled coarse aggregate after strengthening by silane impregnation on mass transport of concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(10): 2602-2609(in Chinese).

[14] 田杰夫, 杨贞军, 杨国君, 等. 硅烷-纳米 SiO₂ 复合表面改性钢筋纤维超高性能混凝土参数优化及其力学性能 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(3): 1479-1488.

TIAN Jiefu, YANG Zhenjun, YANG Guojun, et al. Optimization of parameters and mechanical properties of silane-nano SiO₂ composite surface modified steel fiber reinforced ultra-high performance concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(3): 1479-1488(in Chinese).

[15] 郭旗. 水泥基修补材料与既有基体粘结及水分传输性能试验研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.

GUO Qi. Experimental study on bonding and water transport properties of cement-based repair materials-existing substrates[D]. Qingdao: Qingdao University of Techno-

- logy, 2023(in Chinese).
- [16] HUANG H, SONG X, SONG X, et al. A migrating and reactive polycarboxylate superplasticizer with coupled functions of new/old concrete interfacial agent and water reducer[J]. *Cement and Concrete Research*, 2023, 172: 107218.
- [17] BEUSHAUSEN H, HÖHLIG B, TALOTTI M. The influence of substrate moisture preparation on bond strength of concrete overlays and the microstructure of the OTZ[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 92: 84-91.
- [18] ZHANG Y, ZHU P, LIAO Z, et al. Interfacial bond properties between normal strength concrete substrate and ultra-high performance concrete as a repair material[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 235: 117431.
- [19] 孙华阳. 负温路面快速修补用硫铝酸盐水泥 ECC 性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
SUN Huayang. Study on performance of sulphoaluminate cement ECC for quick pavement repair at negative temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022(in Chinese).
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法: GB/T 1346—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Water requirement for standard consistency of cement, setting time, and stability test methods: GB/T 1346—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011(in Chinese).
- [21] 中国国家标准化管理委员会. 水泥胶砂强度检验方法: GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Method for testing the strength of cement mortar: GB/T 17671—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021(in Chinese).
- [22] DONATTI D A, VOLLET D R. Effects of the water quantity on the solventless TEOS hydrolysis under ultrasound stimulation[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2000, 17(1): 19-24.
- [23] SHE Y, CHEN Y, LI L, et al. Understanding the generation and evolution of hydrophobicity of silane modified fly ash/slag based geopolymers[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 142: 105206.
- [24] KUMAR R, BHATTACHARJEE B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(1): 155-164.
- [25] 景炜. 水泥基材料硅烷浸渍老化机理研究 [D]. 北京: 清华大学, 2019.
JING Wei. Study on aging mechanism of silane-impregnated cement-based materials[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019(in Chinese).
- [26] LI F, LIU L, LIU K, et al. Investigation on waterproof mechanism and micro-structure of cement mortar incorporated with silicane[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 239: 117865.
- [27] CAO Y, WANG Q, ZHOU W, et al. Fabrication of hierarchical superhydrophobic structures by silane enriched with nanomaterials for enhancing permeability and freeze-thaw resistance[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 426: 136016.
- [28] 刘杰, 黄飞, 杨渝南, 等. 基于毛管浸润技术的岩石孔隙率无损测试 [J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1137-1144.
LIU Jie, HUANG Fei, YANG Yunan, et al. Nondestructive testing of porosity of rock based on capillary infiltration technique[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(3): 1137-1144(in Chinese).
- [29] BENAVENTE D, PLA C, CUETO N, et al. Predicting water permeability in sedimentary rocks from capillary imbibition and pore structure[J]. *Engineering Geology*, 2015, 195: 301-311.
- [30] CAI J, PERFECT E, CHENG C, et al. Generalized modeling of spontaneous imbibition based on Hagen-Poiseuille flow in tortuous capillaries with variably shaped apertures[J]. *Langmuir*, 2014, 30(18): 5142-5151.
- [31] 宋辰, 姜超, 顾祥林. 碳化对混凝土微孔特征和吸水性能的影响 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2024, 52(4): 567-573.
SONG Chen, JIANG Chao, GU Xianglin. Effects of carbonation on microscopic pore characteristics and water absorption performance of concrete[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2024, 52(4): 567-573(in Chinese).
- [32] ZHANG C, ZHANG S, YU J, et al. Water absorption behavior of hydrophobized concrete using silane emulsion as admixture[J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 154: 106738.
- [33] 喻建伟, 张朝阳, 孔祥明, 等. 内掺硅烷乳液憎水剂对混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 372-380.
YU Jianwei, ZHANG Chaoyang, KONG Xiangming, et al. Influence of silane emulsion hydrophobic agent on concrete properties[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(2): 372-380(in Chinese).