第 48 卷第 10 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 48，No. 10
2020 年 10 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　October，2020
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200283

有机硅憎水剂对混凝土强度与毛细吸水性能的影响

鲍玖文[1]，胡文文[1]，张　鹏[1]，李　政[2]，雷芳华[2]，赵铁军[1]

(1. 青岛理工大学土木工程学院，山东 青岛 266033；2. 瓦克化学(中国)有限公司，上海 200233)

摘　要：选取乳液型和粉末型各 2 种有机硅材料，分别将不同掺量(0、0.25%、0.50%、1.00%，质量分数)的有机硅材料整体内掺到混凝土中，通过接触角、抗压强度和毛细吸水试验，研究了内掺有机硅整体憎水混凝土的毛细吸水性能。结果表明：掺入新型有机硅后，乳液型有机硅相比粉末型有机硅对相同龄期下混凝土抗压强度的影响较小，特别是掺量为 0.25%的乳液型有机硅对混凝土 28 d 时抗压强度影响甚微，水灰比为 0.53 和 0.35 时，抗压强度分别降低了 0.5%和 7.8%。当有机硅在混凝土表面形成膜结构，接触角达到约 100°以上，且随着掺量继续增加，接触角基本保持不变。相比普通混凝土，掺入有机硅的混凝土吸水 72 h 后，毛细吸水量至少降低了 60%，且吸水 36 h 后，吸水速率便趋于稳定。

关键词：憎水混凝土；有机硅；防水性能；接触角；毛细吸水
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)10–1644–09
网络出版时间：2020–07–28



Effect of Organic Silicon Hydrophobic Agent on Strength and Capillary Absorption of Concrete

BAO Jiuwen[1], *HU Wenwen*[1], *ZHANG Peng*[1], *LI Zheng*[2], *LEI Fanghua*[2], *ZHAO Tiejun*[1]
(1. Department of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China;
2. Wacker Chemical (China) Co., Ltd. Shanghai 200233, China)

Abstract: Two kinds of emulsion organic silicon and two types of powder organic silicon, with different contents (0, 0.25%, 0.50%, 1.00%, in mass fraction) were mixed into concrete. The water absorption behavior of hydrophobic concrete internally incorporating organic silicon was investigated by contact angle, compressive strength and capillary absorption measurements. The results show that the effect of emulsion organic silicon on the compressive strength of concrete at the same age is less than that of powder after the addition of organic silicon. The concrete with 0.25% emulsion organic silicon has a little effect on its compressive strength during 28 d curing. The compressive strength is reduced by 0.5% and 7.8% when the water-cement ratio is 0.53 and 0.35, respectively. After a silicon membrane is formed on the concrete surface, the contact angle reaches over 100° and is not affected by further increasing admixture amount of organic silicon. In addition, compared to ordinary concrete, the amount of absorbed water is reduced by 60% at least and the water absorption rate is stabilized for 36 h after the addition of silicon into concrete.

Keywords: hydrophobic concrete; organic silicon; waterproofing performance; contact angle; capillary water absorption

混凝土因其自身所具有的良好性能被广泛应用于各类工程建设中，且在今后相当长的时间里，仍将在我国土木水利工程中占据主导地位。然而，服役过程中往往由于其内部多孔性，易使以水为载

收稿日期：2020–04–21。　修订日期：2020–05–15。
基金项目：国家自然科学基金(51922052，51778309，51908307，U1706222)；山东省自然科学基金(ZR2018JL018)；山东省“双一流”建设工程-土木；青岛市博士后应用研究项目(A2020-007)；大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放课题基金(LP1902)。
第一作者：鲍玖文(1989—)，男，博士，副教授。
通信作者：张　鹏(1981—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–04–21.　**Revised date:** 2020–05–15.
First author: BAO Jiuwen (1989–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: baojiuwen@qut.edu.cn
Correspondent author: ZHANG Peng (1981–), male, Ph. D., Professor.
E-mail: peng.zhang@qut.edu.cn

体的有害离子(如氯离子，硫酸根离子等)侵入混凝土内部，导致其内部钢筋锈蚀和混凝土保护层剥落，大大缩短了钢筋混凝土结构服役寿命[1–3]。因此，为了防止水分及有害离子的侵入，若采取有效防水处理，对钢筋混凝土结构耐久性能提升具有重要意义。

混凝土防水处理主要包括有机硅类表面防水和内掺憎水改性 2 种方式，其中，表面处理通常有外涂成膜型有机涂层、表面孔隙堵塞、表面浸渍憎水处理和外涂胶凝材料面层等几种方式[4–7]。虽然以上方法已广泛应用于工程实际，由于有机硅类防水材料仅仅存在于混凝土的表面，在短时间内能起到良好的防水效果，但随着水分的渗透和长时间与水、空气及紫外线照射下，易发生老化，而导致防水性能下降[8]。若混凝土表面存在磨损的情况下，将导致其无法达到较好的防水效果。此外，表面浸渍憎水处理受混凝土内部湿度、孔隙结构等因素影响较大，且随着表面涂刷次数的减少、磨损深度的增加会明显削弱硅烷浸渍的防水效果。因此，内掺硅烷类防水剂已成为可以显著提高混凝土抗渗性能的有效途径[9–11]。硅烷能在内部孔表面形成膜结构，阻止水分及有害介质的侵入。这主要由于有机硅分子结构是以硅氧烷为主链的聚合物，掺入混凝土时其相邻 2 个活性基之间发生脱水缩合反应，形成网状结构的硅氧膜，同时与硅酸盐基材中的羟基反应发生脱水缩合，形成末端带有非极性的—Si—R 基硅烷链，能与水分子中的氢原子相互排斥，使得内掺硅烷后的混凝土具有憎水性[12]，有机硅基本单元及缩合反应如图 1 所示。

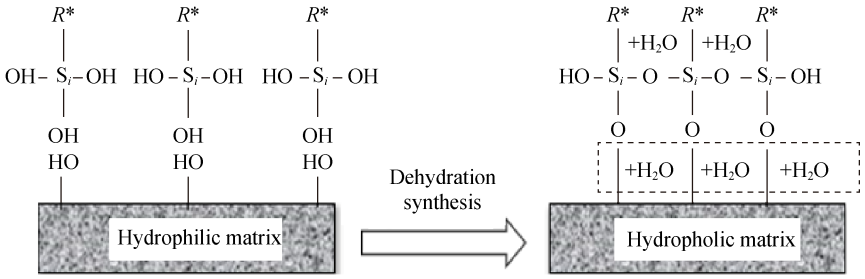


图 1　有机硅基本单元及缩合反应示意图

Fig. 1　Schematic diagram of silicon basic unit and condensation reaction

目前关于内掺有机硅整体憎水混凝土防水性能方面已开展了相关的研究，如姜蓉等[13]采用 4 种类型的金属皂防水剂，研究了内掺处理对混凝土防水效果的影响，结果表明：金属皂防水剂具有较高的防水性能，但混凝土抗压强度随着金属皂掺量增加而大幅度降低。Kong 等[14]采用四乙氧基硅烷、3-氨基丙基三乙氧基硅烷、N-2-氨基乙基-3-氨基丙基三甲氧基硅烷，研究了 3 种硅烷对水泥砂浆流动性、强度发展及水化动力学的影响规律和作用机理。结果表明：掺入硅烷后能够延缓了水泥水化进程，但水解后的醇类对其工作性能和强度发展无显著作用。Falchi 等[15]将硬脂酸钙和硬脂酸锌、硅烷/硅氧烷产品(作为液体溶液和粉末)混合到石灰石水泥砂浆中，获得用于建筑防水和降解作用的散装防水砂浆，通过压汞法、吸水试验和接触角测量等方法评价了外加剂对建筑砂浆的防水效果。马志鸣[16]研究了不同硅烷掺量(0%、2%和 4%，质量分数，下同)对混凝土抗冻性能的影响，与普通混凝土相比，内掺硅烷显著削弱了混凝土抗冻性能，且随着掺量的增加，抗冻性能逐渐降低。尽管目前大部分学者开展了内掺有机硅防水性能的研究，但主要仍集中于有机硅初始掺量在 2%甚至更高的影响，虽然提高了混凝土抗渗性，但随着掺量的增加，混凝土抗压强度、抗折强度等力学性能下降幅度较大。为了能保证内掺有机硅后混凝土力学性能不受显著影响，需进一步研究低掺量对内掺有机硅整体憎水混凝土抗压强度及毛细吸水性能的影响规律。本工作选取 4 种掺量(0、0.25%、0.50%、1.00%)，且具有低掺量、高效防水特点的新型有机硅材料，通过接触角、抗压强度和毛细吸水试验，研究不同种类及掺量有机硅对混凝土的抗压强度和防水性能的影响规律，揭示低掺量内掺有机硅整体憎水混凝土的防水机理，对新型有机硅材料的实际工程应用提供技术支撑具有重要作用。

1　实验

1.1　原材料及混凝土配合比

所用水泥为山水集团 P·O 42.5 普通硅酸盐水

泥。细骨料为青岛本地河砂，粒径小于 5 mm。粗骨料为粒径 5~20 mm 连续级配的天然玄武岩。拌合水为自来水。由青岛市政砼业工程有限公司提供高效聚羧酸减水剂。为了分析不同有机硅含量及状态对防水性能的影响，选用 4 种有机硅材料(A、B、C 和 D)，其有效成分的质量分数分别为 50%、36%、20%和 15%；A、B 为乳液状，C、D 为粉末型，其中粉末型有机硅成分主要是有机硅和硅粉。此外，4 种有机硅基本单元支链—*R**也存在显著差异，其水解缩合后形成的憎水膜结构也不同，掺入到水泥胶凝体系中制备 4 种不同有机硅掺量的整体憎水混凝土，进一步评价 4 种有机硅的防水效果。实验选取质量分数为 0%、0.25%、0.50%和 1.00%四种有机硅掺量，即有机硅有效成分相对于水泥质量的百分比，按式(1)进行计算：

$$m = \beta m_c / \omega \tag{1}$$

式中：m 为有机硅用量(kg)；β 为有机硅掺量(%)；m_c 为混凝土水泥质量(kg)；ω为有机硅有效成分含量(%)。

混凝土水胶比是根据工程实际应用时，使用最广泛的 C30 和 C50 等级混凝土，并参考实验经验后确定为 0.35 和 0.53 两种，其配合比如表 1 所示。制备混凝土试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体，需提前将乳液型有机硅称量后倒入拌合水中搅拌均匀，而粉末型有机硅需要和粗细骨料一同搅拌，直至均匀后再加入拌合水。由于有机硅的有效成分及掺量不同，试验拌合水已减去乳液中含有的水，以避免其对水灰比的影响。24 h 脱模后将试件放入标准养护室[相对湿度 RH≥95%，温度 T=(20±2) ℃]进行养护。使用济南纳斯诺工业测试系统有限公司生产的 YAW-3000D 型微机控制恒应力压力试验机，对 7 d 和 28 d 养护龄期下内掺有机硅混凝土进行抗压强度测试。

1.2 接触角及毛细吸水试验

试件养护 28 d 后从标准养护室中取出，待室内自然风干表面后，使用美国科诺工业有限公司生产的 SL150 型视频光学接触角测定仪测试混凝土表面与水的接触角。对混凝土 4 个成型表面，选取不低于 12 个点进行接触角测试并取其平均值。然后从中间切开试件，放入 45 ℃烘干箱中干燥 7 d。为保证水分的一维传输，预留成型面和切割面，采用石蜡密封其余四面。依据 ASTM C1585 标准进行处理，将试件成型面与水源接触，并浸入 3~5 mm；采用传统测重法开展毛细吸水试验，吸水测试如图 2 所示。利用精度为 0.01 g 的电子称记录试件吸水前的质量，吸水开始后每隔一定时间记录一次吸水质量，分别测不同时间段内累积毛细吸水质量。

表 1 内掺有机硅混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of concrete internally incorporating organic silicon

Sample No.	Silicon type	Water/ binder ratio	Cement/ (kg·m^{-3})	Coarse aggregate/ (kg·m^{-3})	Fine aggregate/ (kg·m^{-3})	Water/ (kg·m^{-3})	Superplasticizer/ %	*w*(organic silicon admixture)/ %
SC1-A	Emulsion	0.53	375	1 125	750	200.0	0.3%	0/0.25/0.50/1.00
SC1-B		0.53	375	1 125	750	200.0	0.3%	0/0.25/0.50/1.00
SC1-C	Powder	0.53	375	1 125	750	200.0	0.3%	0/0.25/0.50/1.00
SC1-D		0.53	375	1 125	750	200.0	0.3%	0/0.25/0.50/1.00
SC2-A	Emulsion	0.35	450	1 125	675	157.5	1.0%	0/0.25/0.50/1.00
SC2-B		0.35	450	1 125	675	157.5	1.0%	0/0.25/0.50/1.00
SC2-C	Powder	0.35	450	1 125	675	157.5	1.0%	0/0.25/0.50/1.00
SC2-D		0.35	450	1 125	675	157.5	1.0%	0/0.25/0.50/1.00

w is mass fraction.

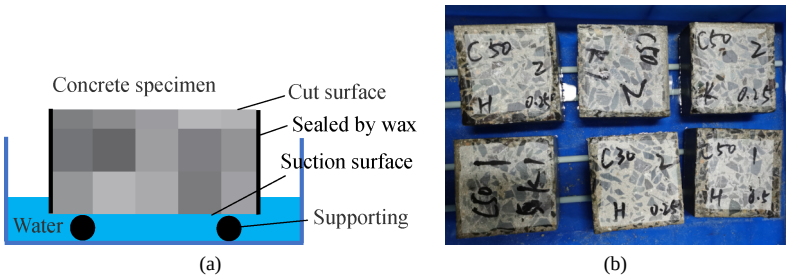


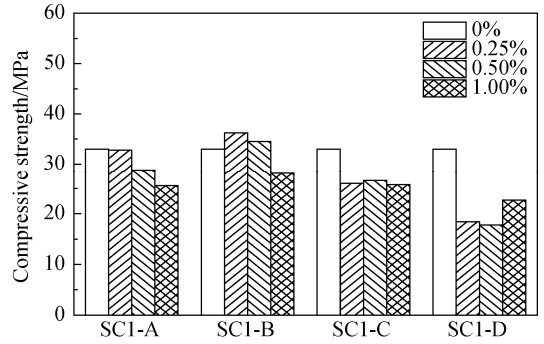
图 2 混凝土毛细吸水试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water absorption test

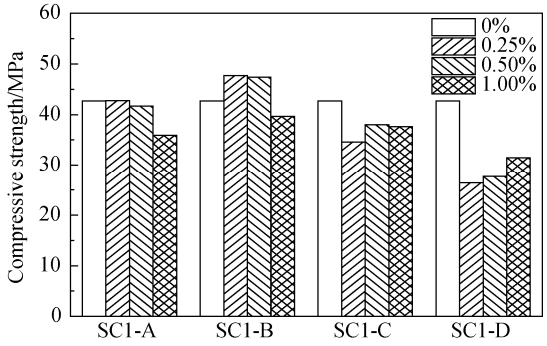
2　结果与讨论

2.1　抗压强度

图 3 和图 4 分别为水灰比为 0.53、0.35 的内掺有机硅混凝土 7 d 和 28 d 抗压强度变化。相同龄期条件下，随着有机硅掺量的增加总体上抗压强度逐渐减小。以样品 SC1-A 为例，从图 3 可见，与不掺有机硅的普通混凝土相比，样品 SC1-A 有机硅掺量为 0.25%时，养护 7 d 的抗压强度下降了 0.50%，28 d 时抗压强度与普通混凝土基本相等。试验表明：掺入 0.25%有机硅后，养护 7 d 和 28 d 抗压强度与未掺有机硅混凝土基本相等。当有机硅掺入量为 0.50%时，相比未掺有机硅的普通混凝土，7 d 时抗压强度降低较大，但 7 d 到 28 d 时间内强度增长较快，与掺入 0.25%有机硅相比，龄期为 7d 的抗压强度下降较为显著。当掺量为 1.00%时，相比未掺有机硅的普通混凝土，7 d 的抗压强度下降幅度高出 15%。



(a) 7 d

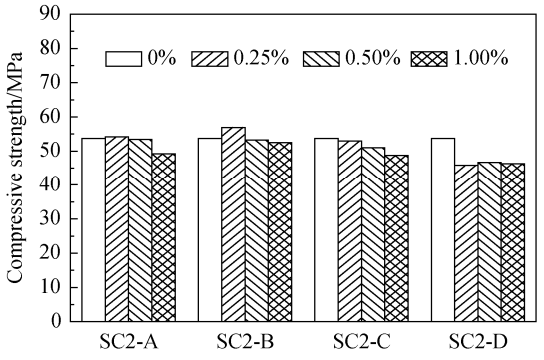


(b) 28 d

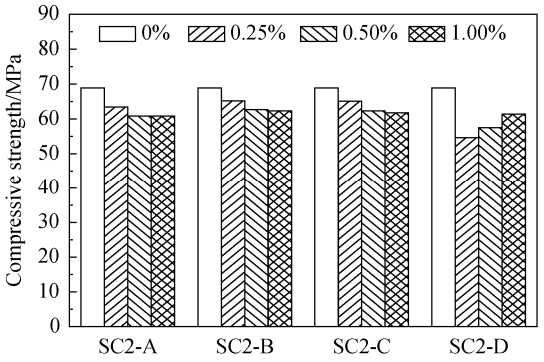
图 3　不同龄期下内掺有机硅的 SC1 混凝土抗压强度

Fig. 3　Compressive strength of SC1 concrete with organic silane at different ages

表 2 为内掺有机硅混凝土 7 d 和 28 d 抗压强度损失率(强度改变量与普通混凝土强度的比值)。从表 2 可见，乳液型有机硅对混凝土抗压强度的影响



(a) 7 d



(b) 28 d

图 4　不同龄期下内掺有机硅的 SC2 混凝土抗压强度

Fig. 4　Compressive strength of SC2 concrete with organic silane at different ages

表 2　内掺有机硅混凝土 7 d 和 28 d 抗压强度损失率

Table 2　Loss rate of compressive strength of concrete with organic silane at age of 7 d and 28 d

Sample No.	Age/d	Loss rate of compressive strength/%		
		w=0.25%	*w*=0.50%	*w*=1.00%
SC1-A	7	0.50	12.90	22.40
	28	–0.02	2.40	15.90
SC1-B	7	–9.80	–4.70	14.90
	28	–11.70	–10.90	7.10
SC1-C	7	21.20	19.30	21.80
	28	19.00	11.10	11.90
SC1-D	7	44.20	46.10	31.20
	28	38.20	35.20	26.30
SC2-A	7	–0.90	0.50	8.40
	28	7.80	11.70	11.70
SC2-B	7	–6.10	0.90	2.20
	28	5.40	9.00	9.50
SC2-C	7	1.40	5.10	9.30
	28	5.50	9.50	10.30
SC2-D	7	14.70	13.00	13.80
	28	20.60	16.50	10.80

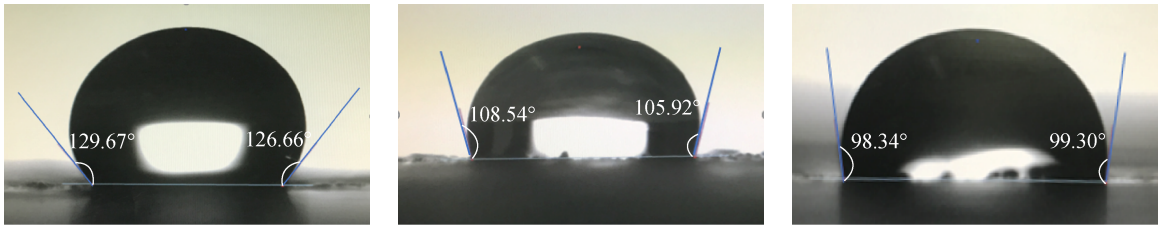
w is mass fraction of organic silicon admixture; "–" represents the increase of concrete strength; "+" represents the decrease of concrete strength.

明显小于粉末型有机硅，其原因为硅粉的加入导致了混凝土工作性能降低。有机硅之间防水机理均为硅烷分子通过脱水缩合反应，在混凝土内部形成憎水膜，但有机硅支链有所差别。此外，包裹有机硅的分子胶粒有所差别，乳液型对混凝土的流动性影响较小，但粉末型对内部孔隙有一定的填充作用。同时有效成分含量越低，粉末量越大，导致内部更难以振实，故强度降低大于乳液型有机硅。然而，乳液型有机硅整体憎水混凝土随掺量的增加，抗压强度损失率逐渐增大，而粉末型有机硅掺量对其强度变化率幅度的影响并不显著。

此外，抗压强度的变化幅度与有机硅的有效成分密切相关，有效成分含量越大，其掺量对抗压强度变化幅度的影响较小，反之影响较大。产生这一规律可能主要是由于有机硅物质状态和有效成分含量对混凝土工作性能有较大影响，从而影响混凝土拌合物的流动性，导致混凝土内部气泡较多，引起抗压强度降低幅度较大，这一试验规律与 Zhu 等[17]试验结论基本相同。

2.2 接触角

图 5 为内掺有机硅混凝土表面与水接触时典型的接触角测试图，多组测试的不同配比混凝土与水接触角的平均值如表 3 所示。SC1 和 SC2 普通混凝土对照组养护 28 d 后，与水的接触角分别为 34.59°和 30.24°，接触角均小于 90°，为亲水性水泥基材料。掺入有机硅后，接触角明显增大，且基本随着掺量的增加而增大。以样品 SC1-A 类为例，当掺量为 0.25%时，接触角为 46.92°，相比较普通混凝土，有所增加；当掺量为 0.50%时，接触角达到 106.92°，接触角显著增大，表明此时有机硅已经在混凝土表面形成了一层憎水膜；当掺量增加到 1.00%时，接触角为 121.28°，接触角增加较少，继续增加有机硅的掺量，无法继续显著增加接触角。



(a) SC1-A, *w*=1.00% (b) SC1-A, *w*=0.50% (c) SC1-B, *w*=1.00%

图 5 内掺有机硅混凝土典型的接触角测试图

Fig. 5 Typical contact angle of concrete internally incorporating organic silicon

表 3 不同配比混凝土与水的接触角

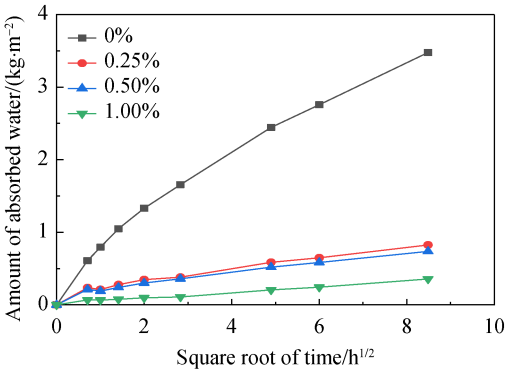
Table 3 Contact angles between concrete and water in different ratios

w/%	Contact angle/(°)							
	SC1-A	SC1-B	SC1-C	SC1-D	SC2-A	SC2-B	SC2-C	SC2-D
0.25	46.92	65.95	86.95	83.23	85.5	62.21	79.81	78.03
0.50	106.92	77.76	103.3	81.10	103.25	65.56	105.65	70.81
1.00	121.28	97.46	108.20	111.9	103.43	68.24	105.19	109.32

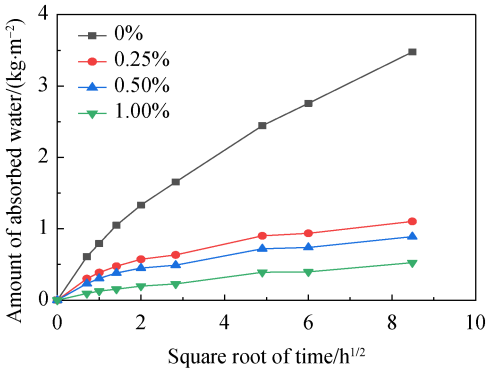
从试验结果可以看出，SC1 和 SC2 混凝土掺入有机硅后，与普通对照组相比，接触角明显增大，且整体上随着掺量的增加而增大。当混凝土表面基本形成一层憎水膜后，继续增加掺量，对接触角的改变较小。由接触角变化规律可以看出，混凝土表面形成憎水膜与有机硅的有效成分密切相关，有效成分含量越高，越容易在低掺量时形成憎水膜。

2.3 毛细吸水量

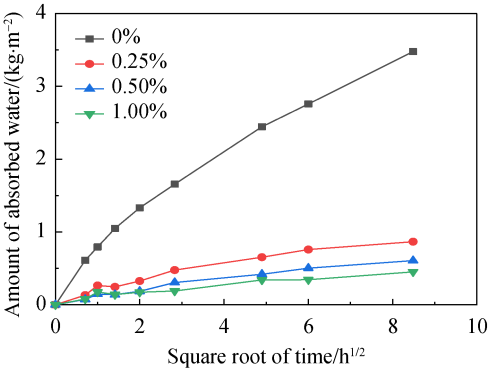
图 6 和图 7 分别为内掺有机硅的 SC1、SC2 混凝土毛细吸水量随时间变化曲线。与普通对照组相比，吸水 72 h 内掺有机硅混凝土的毛细吸水质量显著降低。掺入有机硅后均显著降低相同时间内的毛细吸水质量，并随着掺量的增加，吸水质量逐渐降低。从图 6a 可见，3 种掺量的样品 SC1-A 混凝土吸水 72 h 后毛细吸水质量分别减少了 76.3%、78.8%和 89.8%。由图 7c 可见，SC2 混凝土掺入 C 类有机硅吸水 72 h 后，3 种掺量分别降低 62.1%、74.7%和 79.2%。内掺有机硅后，混凝土具有较好的防水效果，是由于烷基烷氧基硅烷分子首先与孔隙水发生水解反应生成硅烷醇，然后与硅酸盐水泥基体中的羟基反应并相互缩合形成致密的膜结构覆盖在孔隙表面，但是当掺量从 0.50%增加到



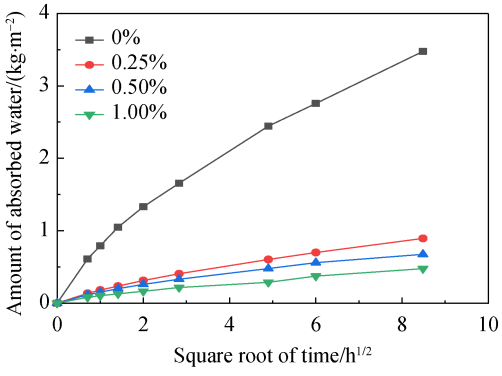
(a) SC1-A



(b) SC1-B



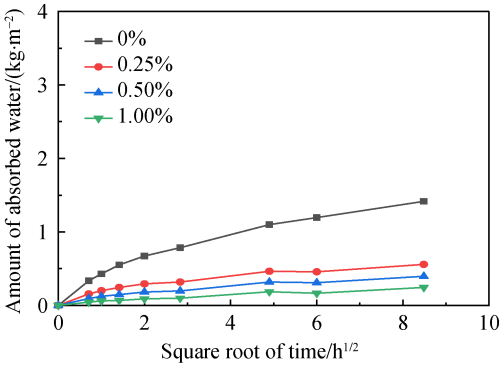
(c) SC1-C



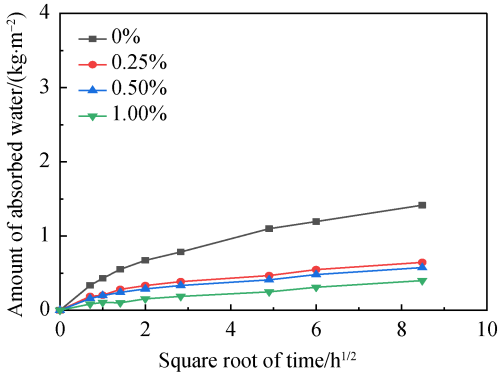
(d) SC1-D

图 6　内掺有机硅的 SC1 混凝土毛细吸水量曲线

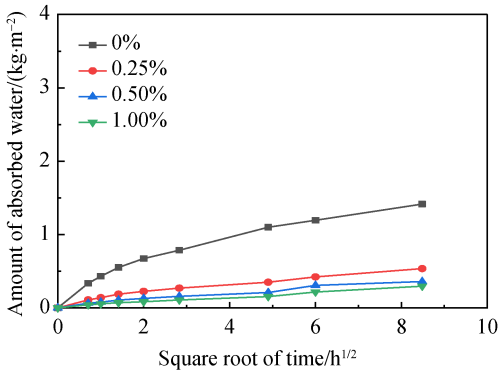
Fig. 6　Capillary water absorption curves of SC1 concrete internally incorporating organic silicon



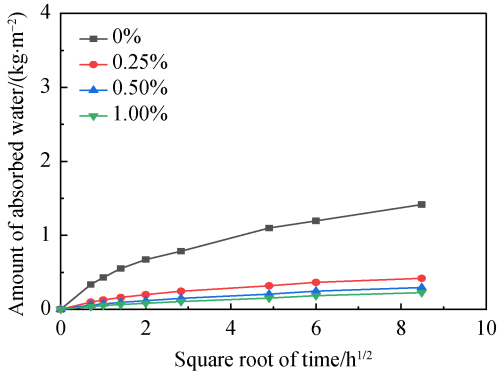
(a) SC2-A



(b) SC2-B



(c) SC2-C



(d) SC2-D

图 7　内掺有机硅的 SC2 混凝土毛细吸水量曲线

Fig. 7　Capillary water absorption curves of SC2 concrete internally incorporating organic silicon

1.00%时，相同时间内毛细吸水质量变化不大，其主要原因可能是当有机硅掺量达到一定浓度后，硅烷水解形成的憎水膜基本覆盖孔隙壁时，再增加掺量，混凝土的毛细吸水质量变化较小。与 SC2 混凝土相比较，SC1 混凝土由于内部孔隙较多，不同掺量的混凝土毛细吸水量明显多于 SC2 混凝土。

相同时间内，内掺 B 类整体憎水混凝土的毛细吸水质量明显大于其它 3 类，原因可能是 B 类有机硅分子在脱水缩合中形成的憎水膜较差，防水效果一般。除 B 类有机硅以外，内掺粉末型有机硅(C、D)整体憎水混凝土总体稍高于内掺乳液型有机硅(A)，这是由于粉末的掺入导致拌合物的流动性较差，凝结硬化后，混凝土内部存在较多孔隙，其防水效果不及内掺乳液型整体憎水混凝土。此外，有机硅的有效成分含量也显著影响着混凝土毛细吸水质量的变化，有效成分越高，乳液或粉末量越少，对混凝土造成的不利影响越小，防水效果越好。

2.4 毛细吸水系数

毛细吸水试验过程中，由于试件四周密封石蜡，故吸水方式符合水分的一维传输。在重力忽略不计时，水泥基材料在单位面积内对水的毛细吸收总量与时间的平方根呈线性相关的关系[18–19]：

$$\Delta W = A\sqrt{t} \tag{2}$$

式中：ΔW 为单位面积毛细吸水量，g/m^2；A 为毛细吸水系数，g/(m^2·h$^{1/2}$)；t 为吸水时间，h。若考虑重力条件影响时，利用指数函数关系来描述水泥基材料毛细吸水量与时间平方根的关系为[20–22]：

$$\Delta W = a[1-\exp(-b\sqrt{t})] \tag{3}$$

式中：a、b 为拟合系数。对式(3)两边 $\sqrt{t}$ 求导可得：

$$A(t) = \frac{\mathrm{d}\Delta W}{\mathrm{d}\sqrt{t}} = A_i \exp(-b\sqrt{t}) \tag{4}$$

即可获得初始毛细吸水系数 A_i=a×b。

图 8 和图 9 分别为内掺有机硅的 SC1、SC2 混凝土毛细吸水系数随时间变化曲线。从图 8 和图 9 可见，SC2 混凝土毛细吸水系数曲线和 SC1 混凝土毛细吸水系数曲线变化趋势基本相同，但毛细吸水系数明显低于 SC1 混凝土，其原因是 SC2 混凝土内部较密实，本身吸水速率就较低，这与毛细吸水质量试验结果变化趋势相同。

从图 8d 可见，与未掺有机硅的混凝土对照组相比，混凝土的毛细吸水系数随掺量的增加而逐渐减小，如内掺 D 类有机硅憎水混凝土吸水 72 h 后，

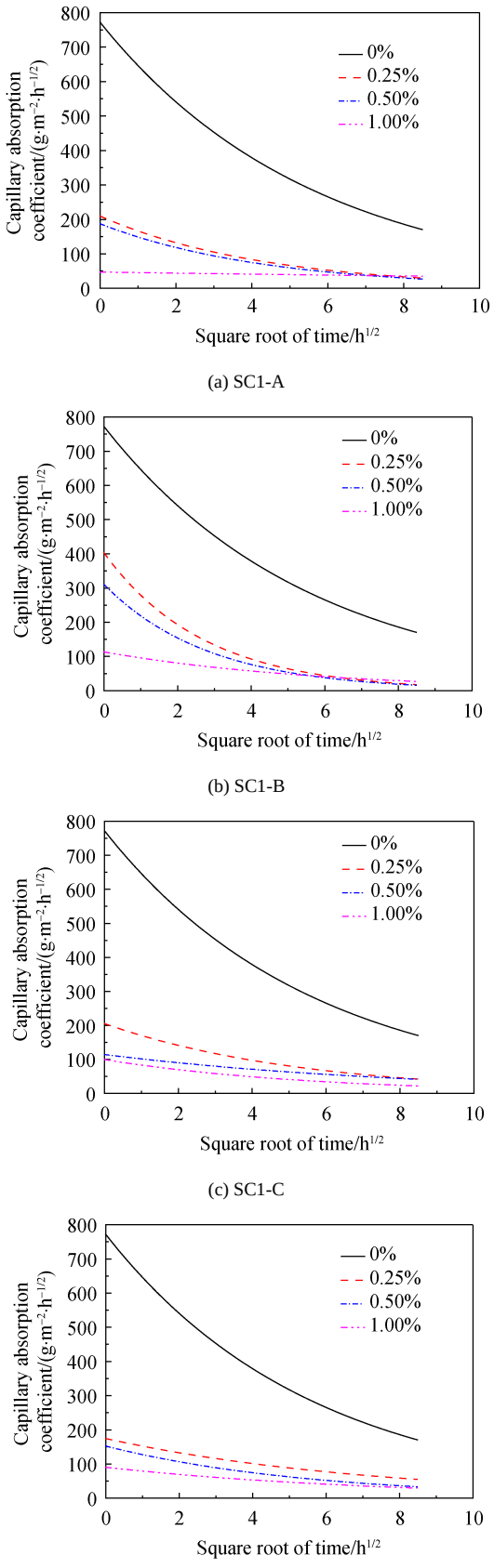
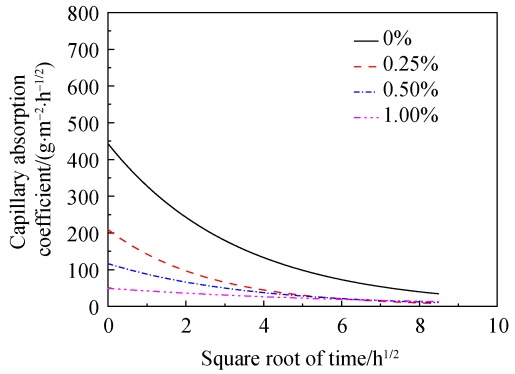
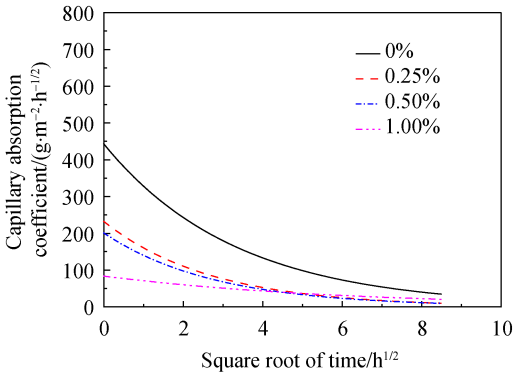


图 8 SC1 混凝土毛细吸水系数变化曲线

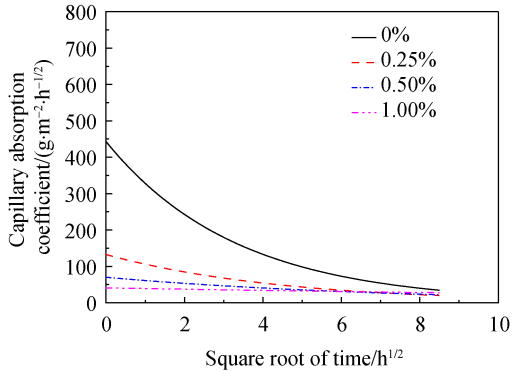
Fig. 8 Capillary water absorption coefficient curves of SC1 concrete



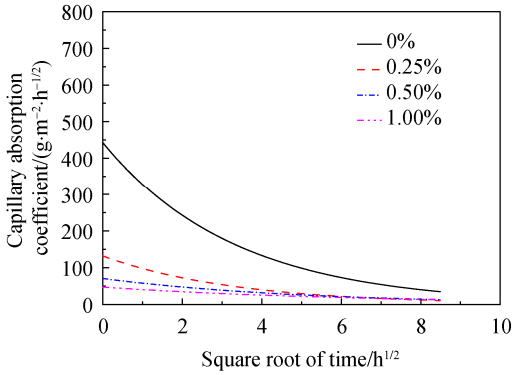
(a)SC2-A



(b)SC2-B



(c)SC2-C



(d) SC2-D

图 9　SC2 混凝土毛细吸水系数变化曲线

Fig. 9　Capillary water absorption coefficient curves of SC2 concrete

掺量为 0.25%、0.50%和 1.00%时混凝土的毛细吸水系数分别降低了 74.3%、80.6%和 86.3%。此外，整体憎水混凝土的毛细吸水系数曲线仍符合平滑的下降趋势，并在 36 h 后逐渐稳定，这与普通混凝土的变化规律是相类似的。值得注意的是，内掺 B 类有机硅整体憎水混凝土的毛细吸水系数明显大于其它 3 类，这主要是因为该有机硅分子形成的憎水膜防水性能较差。

3　结论

1) 内掺有机硅后，混凝土的抗压强度有所降低，且随掺量的增加抗压强度逐渐降低。在掺量为 0.25%时，内掺乳液型有机硅整体憎水混凝土的强度变化率在 15%以内；此外，有机硅的有效成分越高，混凝土抗压强度变化幅度也越小，如水灰比为 0.53 的混凝土在掺入 0.50%的 A 类有机硅(有效成分 50%)后，其 28 d 抗压强度仅降低了 2.4%。

2) 与未掺有机硅的对照组混凝土相比，掺入有机硅后，混凝土表面接触角明显增大，且随着掺量的增加，不断增大。相同类型的有机硅，有效成分越高，越容易形成憎水膜；当掺量达到 0.50%时，接触角均能达到 100°以上。

3) 内掺有机硅整体憎水混凝土的毛细吸水质量随有机硅掺量的增加而不断降低。水灰比为 0.53 的混凝土在掺入 0.25%的 A 类有机硅后，其 72 h 毛细吸水质量降低 76.3%，而水灰比为 0.35 的混凝土，毛细吸水质量降低了 60.6%。

参考文献:

[1] 姜文镏, 刘清风. 冻融循环下混凝土中氯离子传输研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(2): 258–272.
JIANG Wenqiang, LIU Qingfeng. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(2): 258–272.

[2] 鲍玖文, 魏佳楠, 张鹏, 等. 海洋环境下混凝土抗氯离子侵蚀的相似性研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5): 689–704.
BAO Jiuwen, WEI Jianan, ZHANG Peng, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(5): 689–704.

[3] ZHAO K, XUE S, ZHANG P, et al. Application of natural plant fibers in cement-based composites and the influence on mechanical properties and mass transport[J]. Materials, 2019, 12(21): 3498.

[4] 沈川越, 汪群, 黄佳健, 等. 渗透型防水材料对混凝土抗氯离子渗透性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2015, 42(11): 81–83.
SHEN Chuanyue, WANG Qun, HUANG Jiajian, et al. New Build Mater (in Chinese), 2015, 42(11): 81–83.

[5] LIU Z, HANSEN W. Effect of hydrophobic surface treatment on freeze-thaw durability of concrete[J]. Cem Concr Compos, 2016, 69: 49–60.

[6] ZHENG H, LI W, MA F, et al. The effect of a surface-applied corrosion inhibitor on the durability of concrete[J]. Constr Build Mater,

2012, 37: 36–40.

[7] CHRISTODOULOU C, GOODIER C I, AUSTIN S A, et al. Long-term performance of surface impregnation of reinforced concrete structures with silane[J]. Constr Build Mater, 2013, 48: 708–716.

[8] 刘萍. 有机成膜涂层混凝土抗氯盐性能的时变退化[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.
LIU Ping. Time dependent degradation of chloride resistance of concrete with organic film coating (in Chinese, dissertation). Beijing: China University of Mining and Technology, 2017.

[9] 马志鸣, 赵铁军, 王鹏刚, 等. 硅烷乳液对水泥基整体防水材料渗透性的影响[J]. 有机硅材料, 2014(1): 39–43.
MA Zhiming, ZHAO Tiejun, WANG Penggang, et al. Org Silicone Mater (in Chinese), 2014(1): 39–43.

[10] 朱方之, 赵铁军, 王鹏刚. 内掺和外涂硅烷防水混凝土抗盐冻剥蚀性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015 (8): 87–92.
ZHU Fangzhi, ZHAO Tiejun, WANG Penggang. Bull Chin Ceramic Soc (in Chinese), 2015(8): 87–92.

[11] MORA E, GONZÁLEZ G, ROMERO P, et al. Control of water absorption in concrete materials by modification with hybrid hydrophobic silica particles[J]. Constr Build Mater, 2019, 221: 210–218.

[12] 王柱, 杨番, 哈成勇, 等. 一种新型含硅拒水剂的合成与应用[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(1): 96–100.
WANG Zhu, YANG Fan, HA Chengyong, et al. Chin J Mater Sci Eng (in Chinese), 2017, 35(1): 96–100.

[13] 姜蓉, 张鹏, 赵铁军, 等. 内掺金属皂类防水剂对混凝土防水和抗氯离子效果研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(9): 61–64.
JIANG Rong, ZHANG Peng, ZHAO Tiejun, et al. New Build Mater (in Chinese), 2010, 37(9): 61–64.

[14] KONG X M, LIU H, LU Z B, et al. The influence of silanes on hydration and strength development of cementitious systems[J]. Cem Concr Res, 2015, 67: 168–178.

[15] FALCHI L, ZENDRI E, MÜLLER U, et al. The influence of water-repellent admixtures on the behaviour and the effectiveness of Portland limestone cement mortars[J]. Cem Concr Compos, 2015, 59: 107–118.

[16] 马志鸣. 内掺硅烷乳液混凝土在冻融环境下试验性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
MA Zhiming. Study on the durability of concrete with addition of silane emulsion under freeze-thaw environment (in Chinese, dissertation). Qingdao: Qingdao University of Technology, 2012.

[17] ZHU Y, KOU S, POON C, et al. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete[J]. Cem Concr Compos, 2013, 35(1): 32–38.

[18] ZHANG P, WITTMANN F H, ZHAO T J, et al. Neutron radiography, a powerful method to determine time-dependent moisture distributions in concrete[J]. Nucl Eng Des, 2011, 241: 4758–4766.

[19] WITTMANN F H, WITTMANN A D A, WANG P G. Capillary absorption of integral water repellent and surface impregnated concrete[J]. Restor Build Monum, 2014, 20(2): 281–290.

[20] LU W P, WITTMANN F H, WANG P G, et al. Influence of an applied compressive load on capillary absorption of concrete: Observation of anisotropy[J]. Restor Build Monum, 2014, 20(2): 131–136.

[21] ZHANG P, WITTMANN F H, VOGEL M, et al. Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete[J]. Cem Concr Res, 2017, 100: 60–67.

[22] WANG Y R, CAO Y B, ZHANG P, et al. Water absorption and chloride diffusivity of concrete under the coupling effect of uniaxial compressive load and freeze-thaw cycles[J]. Constr Build Mater, 2019, 209: 566–576.