第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210062

老化和表面磨损对硅树脂表面浸渍混凝土防水效果的影响

王鹏刚[1]，隋晓萌[1]，田玉鹏[1]，李志文[1]，姜琳琳[2]

(1. 青岛理工大学土木工程学院，山东 青岛 266033；2. 青岛理工大学工程质量检测鉴定中心，山东 青岛 266033)

摘 要：研究了氙灯老化和表面磨损对硅树脂乳液表面浸渍混凝土防水效果的影响。结果表明：硅树脂用于表面防水处理能显著提高混凝土的憎水性能，明显降低混凝土的毛细吸水性能，且随着涂覆量的增加效果更为明显；氙灯老化 90 d 后硅树脂表面浸渍处理混凝土的接触角变化不大，混凝土试块的吸水曲线几乎没有变化，仍表现出良好的憎水性。Si—O—Si 主链的存在使得硅树脂具有良好的抗老化性能；随着磨损深度的增加，硅树脂表面防水处理混凝土试块的憎水性逐渐下降。

关键词：硅树脂；混凝土；老化；磨损；防水
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2478–08
网络出版时间：2021–10–12

Aging Resistance and Wear Resistance of Surface Impregated Concrete with Silicone Resin

WANG Penggang[1], *SUI Xiaomeng*[1], *TIAN Yupeng*[1], *LI Zhiwen*[1], *JIANG Linlin*[2]
(1. School of Civil Enginering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shangdong, China;
2. Engineering Quality Inspection and Appraisal Center of Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shangdong, China)

Abstract: The effects of xenon lamp and wear on the waterproofing effect of silicone emulsion were investigated. The results show that the surface impregnated treatment with silicone resin on concrete can improve the hydrophobicity of concrete, and reduce the capillary water absorption of concrete, and the effect becomes dominant with the increase of coating amount. After 90-d xenon lamp test, the contact angle of the surface impregnated concrete and the water absorption curve of the surface impregnated concrete do not change much. The surface impregnated concrete after aging still shows a good hydrophobicity. The existence of the main chain of Si–O–Si leads to a good aging resistance of silicone resin. The hydrophobicity of surface impregnated concrete with silicone resin decreases gradually with the increase of worn depth.

Keywords: silicone resin; concrete; aging; wear; water resistance

水分的存在及其在混凝土内部的传输会影响几乎所有钢筋混凝土耐久性劣化过程。采取措施提高混凝土的防水性能是提高其耐久性的有效途径之一[1]。有机硅类材料会使混凝土基体具有憎水性，并且能保证其自身的透气性，具有优良的热氧化稳定性、生物相容性和耐候性，是理想的混凝土防水剂[2–9]。然而，以往相关研究主要针对硅烷单体、低分子链的硅氧烷等开展研究[10–13]。硅树脂乳液在有机硅市场中占有很大的比重。然而，很多乳液是以一种单体制得，该类硅树脂防水剂与混凝土作用后生成的憎水薄膜比聚合得到的高交联硅树脂乳液薄，防水效果较差[14–15]。研究表明，随着碳原子数的增加，硅醇缩合反应生成的三维交联网状憎水性薄膜越厚，可以提高表面浸渍处理混凝土的憎水性[1]。但是，随着碳原子数的继续增加，硅烷在混凝土表面的渗透能力下降，有效憎水层变薄，表面浸渍处理后的混凝土憎水性反而变差。硅树脂结合了有机树脂和无机材料的双重特性，是一种具有高度交联结

收稿日期：2021–01–21。　修订日期：2021–04–07。
基金项目：NSFC-山东联合基金项目(U1706222)；山东省重点研发计划(2019GSF110006)；山东省“双一流”建设工程-土木。
第一作者：王鹏刚(1982—)，男，副教授。

Received date: 2021–01–21.　**Revised date:** 2021–04–07.
First author: WANG Penggang (1982–), male, Associate Professor.
E-mail: wangpenggang007@163.com

构的聚硅氧烷高分子聚合物[16]。连接到 Si 原子上的烃基热氧化后能产生更稳定的 Si—O—Si 键，不易降解。另外，在硅氧烷聚合物的表面上形成富含 Si—O—Si 键的稳定保护层，减少对聚合物内部的影响。硅树脂与混凝土反应会消耗混凝土中的亲水基团—OH，使得混凝土表现为憎水性[1]。众所周知，橡胶、塑料、树脂等高聚物在正常使用过程中随着服役时间的延长出现老化现象，导致其实际使用寿命达不到设计使用寿命。因此，用于混凝土表面防护用的防水材料需要具有良好的抗老化性能[17]，然而硅树脂表面浸渍混凝土的耐老化性能研究鲜有报道。另外，水工、海工混凝土表面会受到水流反复冲刷，路面混凝土会受冲压、挤压、机械摩擦，西北地区的建/构筑物通常会受到风蚀作用等，导致混凝土表面被磨损。硅烷表面浸渍处理混凝土表面如果受到磨损，其防护效果势必会受到影响。本研究通过测试氙灯老化和表面磨损后硅树脂防水处理混凝土试块的憎水性和毛细吸水性能，研究硅树脂表面浸渍混凝土的耐老化性能和抗磨损性能。

1　实验

1.1　混凝土试件制备

混凝土中的水泥、砂子、石子、拌合水用量分别为 350、750、1125、175 kg/m^3。水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，砂子采用最大粒径为 5 mm 的河砂，石子采用 5~20 mm 连续级配的玄武岩碎石。采用聚烷基三烷氧基硅氧烷(PATOS)乳液为混凝土表面防水剂。PATOS 由辛基三甲氧基硅烷，丙基三甲氧基硅烷和甲基三乙氧基硅烷通过乳液共聚方法聚合而成[1]，有效固含量为 30%，乳液 pH 值为 6~8。通过激光粒度仪测试得到 PATOS 乳液颗粒大小及分布，如图 1 所示。由图 1 可以看出，PATOS 乳液颗粒平均粒径为 4.406 μm，其中小于 10 μm 的乳液颗粒占总量的 97.43%。普通混凝土是由粗大孔(100 μm~10 mm)、毛细孔(0.05 ~100 μm)及凝胶孔(小于 50 nm)组成的多孔体系[18]。可见，PATOS 乳液颗粒粒径远小于混凝土的毛细孔和粗大孔孔径，可以渗透进入混凝土内部。

制备边长为 100 mm 的混凝土立方体试块。混凝土试块带模养护 1 d 后，拆模并将放入标准混凝土养护室养护至 7 d，然后取出部分试块沿着混凝土试件成型面将试块均匀切割成 2 个试块，并放入标准混凝土养护室中继续养护至 28 d。

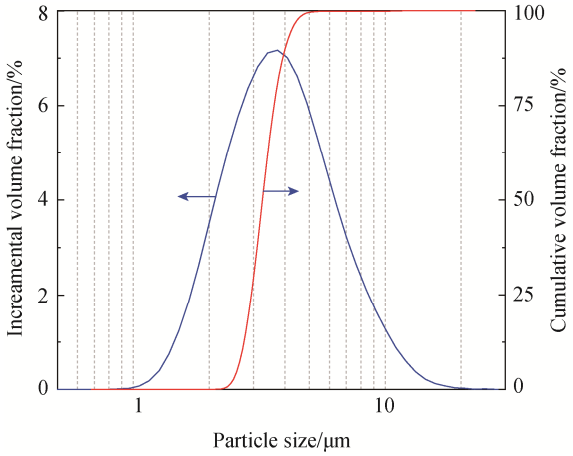


图 1　PATOS 乳液颗粒粒度分布

Fig. 1　PATOS emulsion particle size distribution

1.2　PATOS 表面浸渍处理

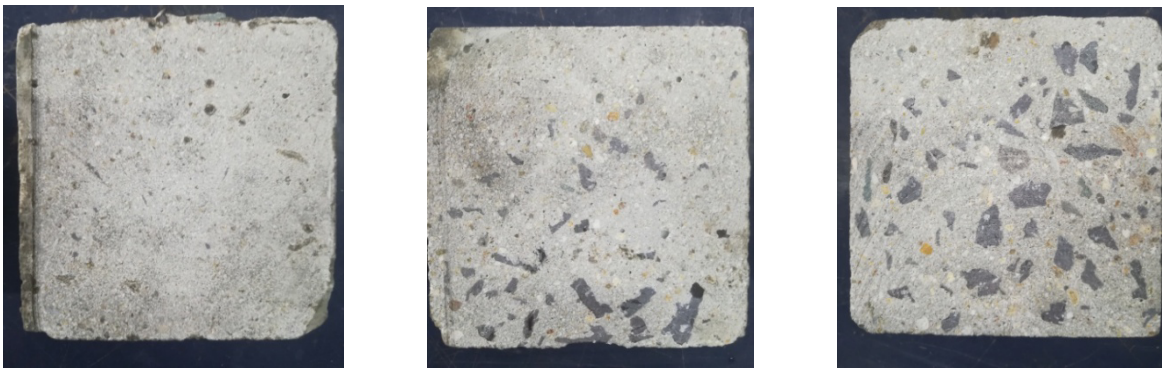
混凝土试块在标准混凝土养护室中养护至 28 d 后，将其从养护室取出并放入烘箱中烘干，设置烘箱内部温度为 50 ℃。用环氧树脂密封 4 个 100 mm×50 mm 的面，然后在 100 mm×100 mm 的混凝土侧面涂覆 PATOS 乳液，100 mm×100 mm 的切割面不做处理，涂覆用量分别为 0、100、200、300、400、600 g/m^2。表面浸渍处理后，将试块放在温湿度控制室(T=20 ℃，相对湿度=50%)内 1 周，以确保 PATOS 乳液有足够的时间发生水解和缩合反应。

1.3　氙灯老化试验

由于自然暴露老化试验存在环境因素不可控、试验周期长等问题，人们通常采用荧光紫外灯老化试验、氙灯老化试验等人工加速老化试验测试材料的耐老化性能。参照标准 BG/T14522—2008，通过氙灯老化试验研究硅树脂浸渍混凝土试块的耐老化性能。氙灯老化试验箱内部环境条件如下：相对湿度=50%，T=40 ℃，氙灯光伏照度为 600 W/m^2。将硅树脂表面浸渍处理后的混凝土试块均匀放入氙灯老化试验箱中老化。达到所设置的老化龄期后，取出混凝土试块，测试其毛细吸水性能和接触角。

1.4　混凝土表面磨损试验

将硅树脂表面浸渍处理后的混凝土试块用混凝土磨粉机逐层打磨，打磨深度分别为 0、0.5、1、2、4、6 mm，得到不同磨损程度的混凝土试块，如图 2 所示。很明显，磨损后混凝土试块表面浮浆层逐渐消失，石子逐渐显露。而骨料分布会影响硅树脂乳液在混凝土内部的分布，为避免测量误差，采用 3 个试块平行进行相关试验。



(a) Worn depth is 0.5 mm (b) Worn depth is 2 mm (c) Worn depth is 4 mm

图 2 硅树脂表面浸渍混凝土试块（试块截面尺寸为 100 mm×100 mm）表面磨损后的形貌

Fig. 2 Morphology of the silicon resin impregnated concrete after worn

1.5 接触角

假定液滴置于理想固体表面，液体、气体、固体三相介质的界面平衡可以用 Young 方程表示[19]，如式(1)所示。接触角的大小可以作为评价混凝土表面润湿性能好坏的评判指标。如果接触角 θ 小于 90°，液体可浸润混凝土，如果接触角 θ 大于 90°小于 180°，液体不能浸润混凝土。

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lg}} \tag{1}$$

式中：σ_{sg}、σ_{s1} 和σ_{s1} 分别是固–气、固–液和液–气界面的界面张力，N/m。

采用美国科诺工业有限公司生产的 SL150 静态接触角测定仪测试老化前后，以及表面磨损前后硅树脂表面浸渍处理混凝土试块表面与水的接触角。将需要测试的混凝土试块放在触角测定仪载物台上进行测试，每个混凝土试块选择 3 个区域进行测试，每个区域测试 5 次并取平均值。

1.6 毛细吸水试验

当非饱和混凝土与水接触后，混凝土内部的毛细压力会上升，从而导致水被吸入到混凝土的毛细孔内。研究表明[20–21]，混凝土的单位面积毛细吸水量与毛细吸水时间的平方根呈线性关系，如式(2)所示。毛细吸水系数 A 的大小可间接反映混凝土的渗透性能，所以混凝土的毛细吸水系数 A 是评价混凝土材料耐久性的重要指标之一[22–26]。

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

式中：ΔW 为混凝土的单位面积毛细吸水量，g/m^2；A 为混凝土的毛细吸水系数，g/(m^2·h$^{1/2}$)。

参照 ASTM C1585 标准，对老化前后，以及表面磨损前后的硅树脂表面浸渍处理混凝土试块进行毛细吸水试验。首先，将混凝土试块放入温度为 50 ℃的烘箱中烘干至质量恒定。然后，从烘箱中取出混凝土试块，并在室温环境下自然冷却。接着将混凝土试块的表面浸渍处理面/老化处理面/磨损面与水源接触，并浸入 3~5 mm，定时称量混凝土试件的质量。

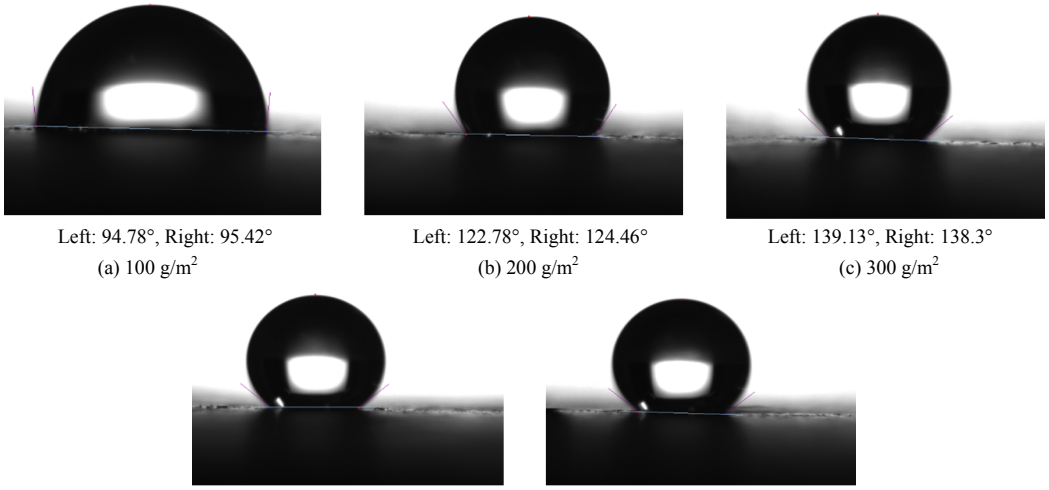
2 结果与讨论

2.1 氙灯老化对硅树脂表面浸渍处理混凝土接触角的影响

随着水分的蒸发，涂覆到混凝土表面的硅树脂逐渐水解，硅树脂乳液中聚硅氧烷的 Si—O 键发生断裂，生成硅醇，然后脱醇形成三维交联网状有机硅树脂。并且硅醇中的羟基还会与混凝土中的羟基发生缩合反应，脱去水分子。由于混凝土中的亲水基团—OH 被消耗，所以混凝土表现为憎水性。未老化硅树脂表面浸渍处理混凝土的接触角如图 3 所示。由图 3 可知，硅树脂表面浸渍处理混凝土试块的接触角均大于 90°，且随着硅树脂乳液涂覆量的增加而增大。

氙灯老化 30 d 后硅树脂表面浸渍处理混凝土的接触角如图 4 所示。由图 4 可知，经过 30 d 的氙灯照射，混凝土试块仍然具有良好的憎水性能，老化混凝土试块的接触角数值与未老化混凝土试块接触角数值基本一致。

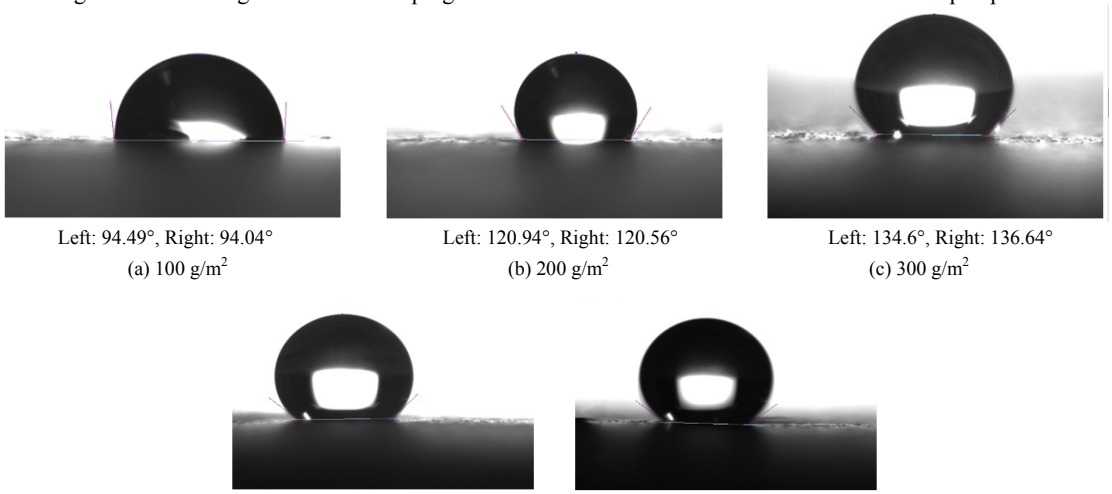
氙灯老化 90 d 后硅树脂表面浸渍处理混凝土的接触角如图 5 所示。由图 5 可以看出，氙灯老化 90 d 后硅树脂表面浸渍处理混凝土的接触角变化不大，仍表现出良好的憎水性。表明硅树脂–混凝土防水隔离层具有良好的耐老化性能。



Left: 94.78°, Right: 95.42°　(a) 100 g/m^2
Left: 122.78°, Right: 124.46°　(b) 200 g/m^2
Left: 139.13°, Right: 138.3°　(c) 300 g/m^2
Left: 140.35°, Right: 139.98°　(d) 400 g/m^2
Left: 140.08°, Right: 141.41°　(e) 600 g/m^2

图 3　未老化硅树脂表面浸渍处理混凝土试块的接触角

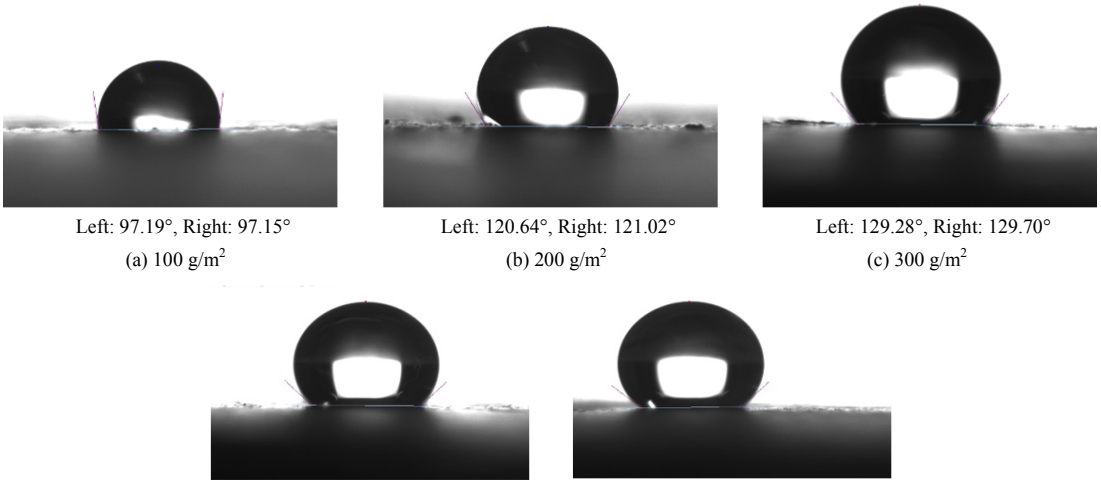
Fig. 3　Contact angle of surfaced impregnated concrete with silicone resin before xenon lamp exposure



Left: 94.49°, Right: 94.04°　(a) 100 g/m^2
Left: 120.94°, Right: 120.56°　(b) 200 g/m^2
Left: 134.6°, Right: 136.64°　(c) 300 g/m^2
Left: 138.56°, Right: 139.50°　(d) 400 g/m^2
Left: 142.24°, Right: 140.08°　(e) 600 g/m^2

图 4　氙灯老化 30 d 后硅树脂表面浸渍处理混凝土试块的接触角

Fig. 4　Contact angle of surfaced impregnated concrete with silicone resin after xenon lamp exposure for 30 days



Left: 97.19°, Right: 97.15°　(a) 100 g/m^2
Left: 120.64°, Right: 121.02°　(b) 200 g/m^2
Left: 129.28°, Right: 129.70°　(c) 300 g/m^2
Left: 133.39°, Right: 132.85°　(d) 400 g/m^2
Left: 138.23°, Right: 138.74°　(e) 600 g/m^2

图 5　氙灯老化 90 d 后硅树脂表面浸渍处理混凝土试块的接触角

Fig. 5　Contact angle of surfaced impregnated concrete with silicone resin after xenon lamp exposure for 90 days

2.2 氙灯老化对硅树脂表面浸渍处理混凝土毛细吸水性能的影响

氙灯老化后硅树脂表面浸渍处理混凝土的毛细吸水曲线如图 6 所示。氙灯老化 90 d 后，混凝土试块的吸水曲线几乎没有变化，充分表明通过硅树脂表面浸渍处理在混凝土表面建立的防水隔离层具有良好的抗老化性能。这是因为，一般硅树脂的主链是碳氧键(C—O—C)和碳键(C—C)，在光照下易分解。而本研究的聚烷基三烷氧基硅氧烷的主链是 Si—O—Si，其硅氧键的键能为 460 kJ/mol，高于太阳光中紫外线的量(315~415 kJ/mol)，所以在混凝土表面形成的防水隔离层在光照下不易分解。可见，聚烷基三烷氧基硅氧烷乳液用于混凝土表面浸渍防护具有明显的优势。

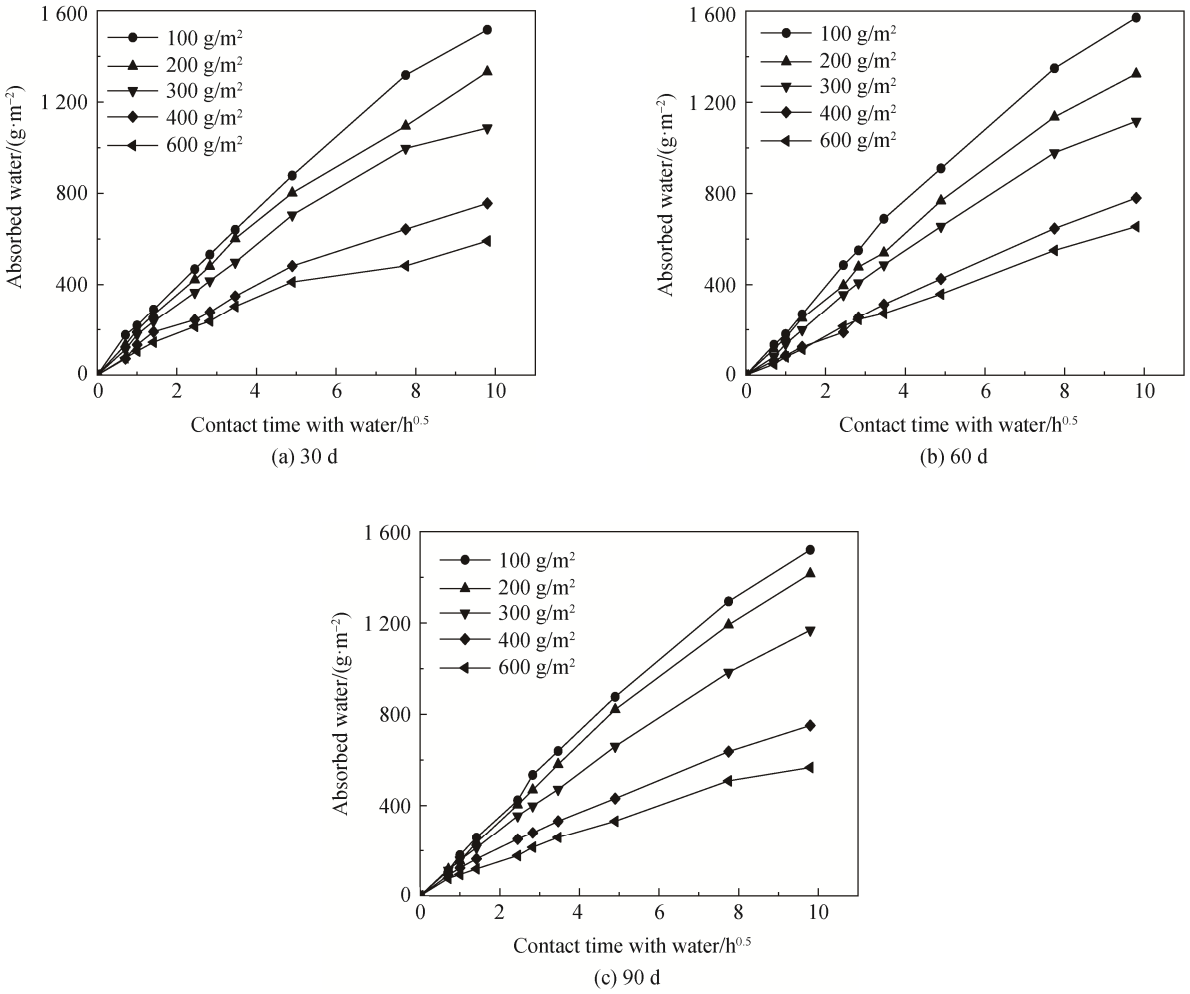


图 6 氙灯老化不同时间后硅树脂表面浸渍处理混凝土的毛细吸水曲线

Fig. 6 Capillary water absorption curve of surfaced impregnated concrete with silicone resin after xenon lamp exposure

2.3 表面磨损对硅树脂表面浸渍处理混凝土接触角的影响

图 7 为混凝土试块未磨损表面和磨损表面憎水性。由图 7 可以看出，表面磨损后的混凝土试块逐渐呈现亲水特性。磨损后硅树脂表面浸渍处理混凝土的接触角如图 8 所示。随着磨损程度的增加，混凝土试块的接触角逐渐减小。当涂覆量小于 300 g/m^2，磨损深度为 2~3 mm 时，混凝土试块基本表现为亲水性，随着磨损深度的增加，硅树脂在混凝土表面建立的防水隔离层消失。当涂覆量为 600 g/m^2，磨损深度大于 4 mm 时，混凝土试块基本表现为亲水性。表明高用量硅树脂防水剂在混凝土表面建立的防水层更厚，抗磨损能力更好。

2.4 表面磨损对硅树脂表面浸渍处理混凝土毛细吸水性能的影响

表面磨损后硅树脂表面浸渍处理混凝土毛细吸水曲线如图 9 所示。在硅树脂防水剂涂覆量一定的情况下，随着混凝土试块表面磨损深度的增

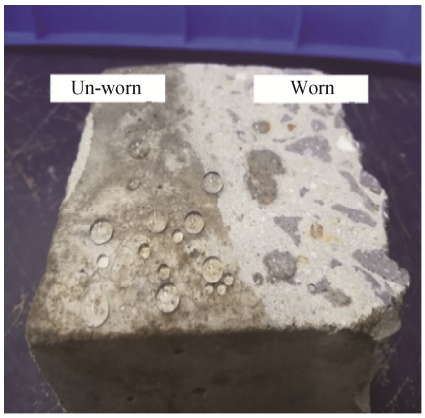


图 7　混凝土试块未磨损表面和磨损表面憎水性

Fig. 7　Hydrophobicity of un-worn and worn surface of concrete

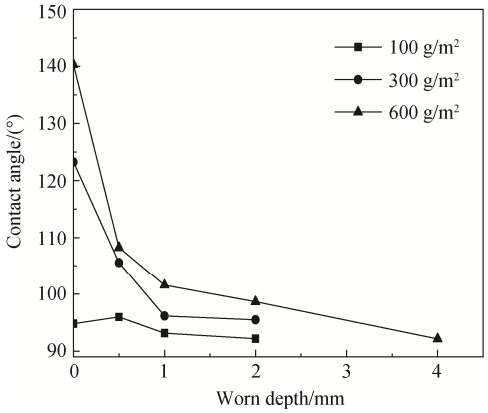


图 8　磨损后硅树脂表面浸渍处理混凝土的接触角

Fig. 8　Contact angle of surfaced impregnated concrete with silicone resin after worn with silicone

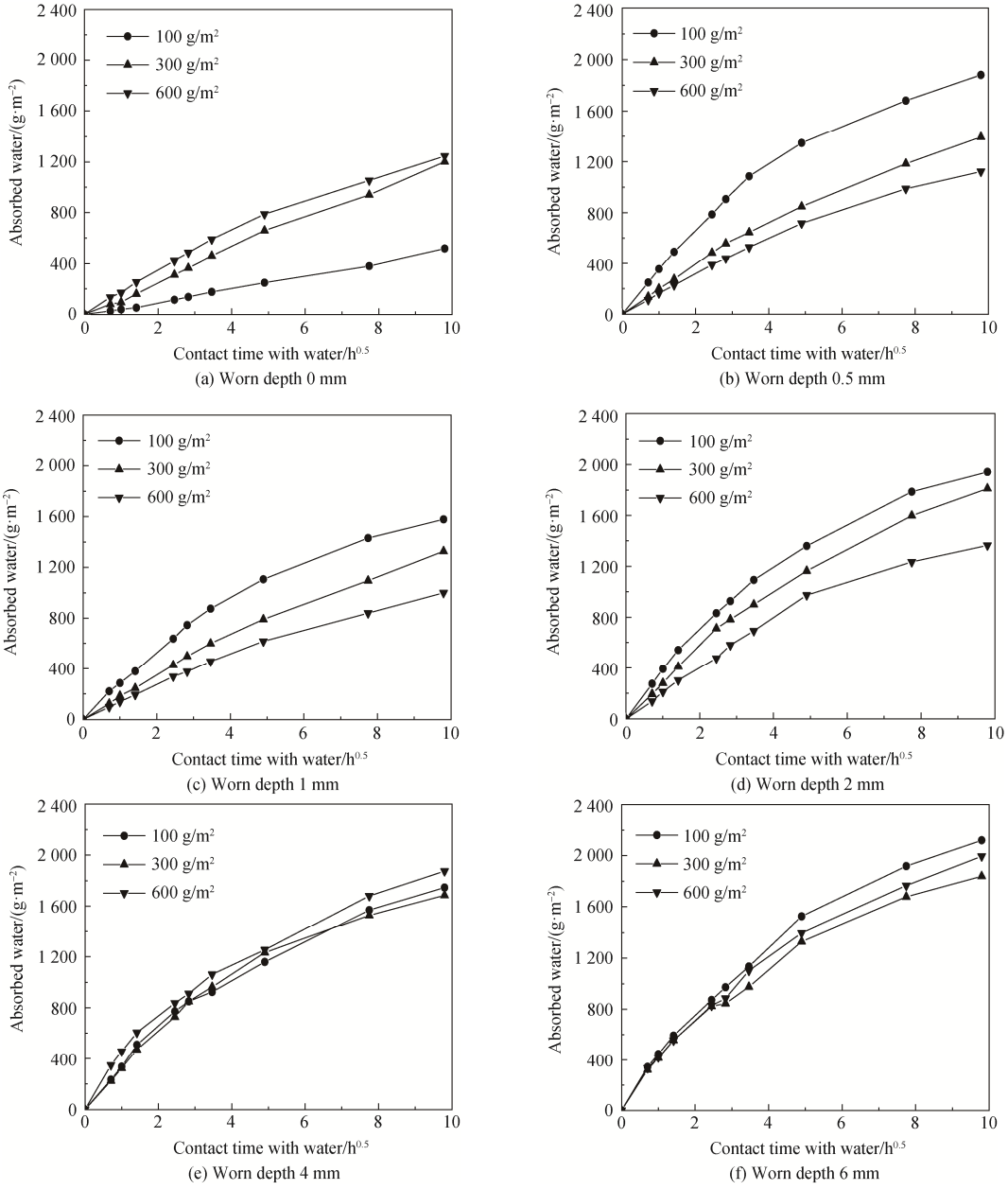


图 9　磨损后对硅树脂表面浸渍处理混凝土毛细吸水曲线

Fig. 9　Capillary water absorption curves of surfaced impregnated concrete with silicone resin after worn

加，混凝土试块的毛细吸水量逐渐增大。对于未磨损的混凝土试块，硅树脂乳液涂覆量为 600 g/m^2 的试块毛细吸水量远小于涂覆量为 100 g/m^2 和 300 g/m^2 的试块毛细吸水量，但是这种差异随着混凝土试块表面磨损深度的增加逐渐减小。由于硅树脂乳液分子粒径比硅烷乳液和低聚硅氧烷乳液大，与混凝土反应速度更快，导致涂覆于混凝土表面时其渗入混凝土内部的有效组分含量相对较少，导致硅树脂表面浸渍处理混凝土的抗磨损能力相对较弱。采用式(2)对图 9 中的数据进行拟合，得到磨损后硅树脂表面浸渍处理混凝土的毛细吸水系数，如图 10 所示。随着磨损深度的增加，混凝土试块的毛细吸水系数明显增大。磨损深度在 0~0.5 mm 范围时，混凝土试块的毛细吸水系数增加比较明显。原因如下：硅树脂乳液渗入混凝土内部后，形成高交联的硅树脂防水膜层，而硅树脂防水膜层在混凝土磨损过程中会被磨掉。硅树脂乳液渗入混凝土的量和渗透深度与涂覆用量有关，用量越大，渗透量越大，硅树脂乳液渗透深度也就越大，受磨损影响越小。硅树脂表面浸渍处理混凝土磨损深度小于 4 mm，涂覆用量为 100 g/m^2 的混凝土试块毛细吸水系数下降了 28.8%，其中 0~0.5 mm 深度内的下降量占 65%。而硅树脂乳液涂覆用量为 300 g/m^2 和 600 g/m^2 的混凝土试块毛细吸水系数分别下降了 40%和 28%。3 组涂覆用量的混凝土试块磨损 6 mm 时的毛细吸水系数均小于磨损 4 mm 时的毛细吸水系数。这是因为磨损深度为 4~6 mm 时，混凝土内部已经基本不含硅树脂防水膜，所以 4~6 mm 深度范围内的混凝土毛细吸水系数值基本上与混凝土自身的毛细吸水系数一致。

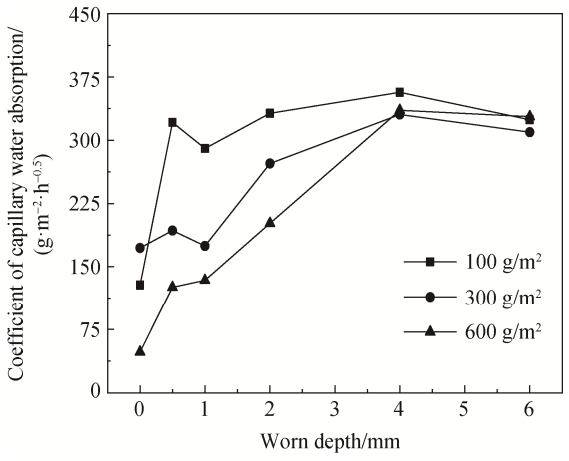


图 10 磨损后硅树脂防水处理混凝土的毛细吸水系数

Fig. 10 Coefficient of capillary water absorption of surfaced impregnated concrete with silicone resin after worn

3 结论

1) 硅树脂用于表面防水处理能显著提高混凝土的憎水性能，明显降低混凝土的毛细吸水性能，且随着涂覆量的增加效果更为明显。

2) 氙灯老化 90 d 后硅树脂表面浸渍处理混凝土的接触角变化不大，混凝土试块的吸水曲线几乎没有变化，仍表现出良好的憎水性。表明 Si—O—Si 主链的存在使得硅树脂具有良好的抗老化性能。然而，该材料在真实暴露环境的老化机理尚需深入研究，其长期防护效果有待验证。

3) 硅树脂在混凝土中建立的防水隔离层受磨损程度影响较大，随着磨损深度的增加，防水处理混凝土试块的憎水性逐渐下降，毛细吸水量和吸水速度显著提高大。

参考文献:

[1] 田玉鹏. 外涂硅树脂对水泥基材料性能的影响[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
TIAN Yupeng. The effect of externally coated silicone resin on the properties of cement-based materials(in Chinese, dissertation). Qingdao: Qingdao University of Technology , 2018.

[2] 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. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(8): 1181–1190.

[3] 刘贵昌, 苏本泽, 王立达 等. 混凝土表面硅烷改性后的防腐蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2012(12): 1087–1090.
LIU Guichang, SU Benze, WANG Lida, et al. Corros Prot (in Chinese), 2012, (12): 1087-1090.

[4] 曾彧. 硅烷浸渍混凝土结构耐久性设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
ZENG Yu. Study on the durability design method of silane-impregnated concrete structure(in Chinese, dissertation). Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

[5] 卢青, 吕昭元, 冯子强, 等. 硅烷浸渍工艺对混凝土浸渍深度和吸水率影响的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2018, 44(3): 93–96.
LU Qing, LU Zhaoyuan, FENG Ziqiang, et al. Sichuan Build Sci Res(in Chinese), 2018, 44(3): 93–96.

[6] 田玉鹏, 王鹏刚, 赵铁军, 等. 外涂聚烷基三烷氧基硅氧烷对水泥基材料耐久性的影响[J]. 混凝土, 2019, 11: 69–73.
TIAN Yupeng, WANG Penggang, ZHAO Tiejun, et al. Concrete (in Chinese), 2019, 11: 69–73.

[7] 王眺, 戴建国, 杨林虎, 等. 硅烷憎水处理混凝土的氯离子电场迁移模型研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1): 20–27.
WANG Tiao, DAI Jianguo, YANG Linhu, et al. China Civ Eng J (in Chinese), 2017, 50(1): 20–27.

[8] 孙红尧, 杨争, 王学川, 等. 混凝土表面防护的有机硅低聚物憎水渗透剂性能研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(6): 93–99.
SUN Hongyao, YANG Zheng, WANG Xuechuan, et al. Marine Eng (in Chinese), 2016, 34(6): 93–99.

[9] 倪静姣, 方翔, 王彭生. 海洋环境中硅烷对混凝土结构保护的评估

[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(10): 29–32,56.
NI Jingxi, FANG Xiang, WANG Pengsheng. Corros Prot (in Chinese), 2020, 41(10): 29–32, 56.

[10] VIPULANANDAN C. Testing and modeling composite coatings with silanes for protecting reinforced concrete in saltwater environment[J]. J Mater Civ Eng, 2011, 23(12): 155–161.

[11] TITTARELLI F, MORICONI G. The effect of silane-based hydrophobic admixture on corrosion of galvanized reinforcing steel in concrete[J]. Corros Sci, 2010, 52(9): 2958–2963.

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

[13] 朱方之. 受冻融混凝土耐久性及荷载耦合下钢筋混凝土粘结性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
ZHU Fangzhi. Research on the durability of freeze-thaw concrete and the bond performance of reinforced concrete under load coupling (in Chinese, dissertation). Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.

[14] 瓦克展示新型硅树脂乳液[J]. 有机硅材料, 2019, 33(6): p440.
Silicone Mater (in Chinese), 2019, 33(6): p440.

[15] 赵维, 邓宇凌, 李玉红. 甲基硅油改性丙烯酸树脂乳液的合成与性能研究[J]. 化学工程师, 2018, 32(4): 5–8.
ZHAO Wei, DENG Yuling, LI Yuhong. Chem Eng(in Chinese), 2018, 32(4): 5–8.

[16] 吴宏博, 丁新静, 于敬晖, 等. 有机硅树脂的种类、性能及应用[J]. 纤维复合材料, 2006, 23(2): 55–59.
WU Hongbo, DING Xinjing, YU Jinghui, et al. Fiber Compos (in Chinese), 2006, 23(2): 55–59.

[17] 周宁琳. 有机硅聚合物导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[18] 申爱琴. 水泥与水泥混凝土[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.

[19] YOUNG T. Miscellaneous Works [M]. Murray, London, 1885.

[20] KELHAM D. A. A water absorption test for concrete[J]. Mag Concr Res, 1988, (40): 106–110.

[21] HALL C. Water sorptivity of mortars and concrete –a review[J]. Mag Concr Res, 1989, 41(147): 167–171.

[22] 覃维祖. 混凝土耐久性若干问题的讨论[J]. 建筑技术, 2000, 31(1): 17–19.
QIN Weizu. Archit Technol (in Chinese), 2000, 31(1): 17–19.

[23] XIONG HOUREN, YUAN KELONG, XU JINMING, et al. Pore structure, adsorption, and water absorption of expanded perlite mortar in external thermal insulation composite system during aging[J]. Cem Concr Compos, 2021, 116: 103900.

[24] 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): 1–9.
YU Jianwei, ZHANG Chaoyang, KONG Xiangming, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(2): 1–9.

[25] 鲍玖文, 胡文文, 张鹏, 等. 有机硅憎水剂对混凝土强度与毛细吸水性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(10): 1644–1652.
BAO Jiuwen, HU Wenwen, ZHANG Peng, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(10): 1644–1652 .

[26] DING ZHU, LI Ding fa, WANG Yan shuai, et al. Water distribution characteristics and research with capillary absorption for magnesium phosphate cement-coated cement pastes[J]. Constr Build Mater, 2020, 265: 120319.