

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.04.023

# 改性剂对橡胶混凝土的作用机理研究

张国岑<sup>1,4</sup>, 徐宏殷<sup>1,3</sup>, 袁群<sup>1,2</sup>, 胡凤启<sup>5</sup>

(1. 河南省水利工程安全技术重点实验室, 河南 郑州 450003;

2. 河南省水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 3. 郑州大学, 河南 郑州 450002;

4. 河南省白龟山水库管理局, 河南 平顶山 467031; 5. 河南省开封水文水资源勘测局, 河南 开封 475001)

**摘要:** 针对现有橡胶混凝土改性剂的研究结论存在较大差异的现象, 分析了 NaOH 溶液和 KH570 两种改性剂的作用效果, 发现有研究结果存在相悖现象。试验研究了两种改性剂对橡胶混凝土强度的影响, 并对两种改性剂的作用机理进行了深入的分析。试验结果表明, 改性剂的作用效果受橡胶品种的影响较大。分析认为, NaOH 溶液和 KH570 对橡胶混凝土的改性效果均存在正负两个方面: 一方面, 改性剂能够增强橡胶颗粒与水泥石的黏结作用, 提高橡胶混凝土的强度; 另一方面, 改性剂会增大橡胶混凝土的含气量, 削弱混凝土的密实性, 降低橡胶混凝土的强度。两种作用的相对强弱与采用的橡胶颗粒的品种有关。

**关键词:** 橡胶混凝土; NaOH 溶液; KH570; 强度; 作用机理

**中图分类号:** TU528.042

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1144(2015)04-0115-06

## Study on the Mechanism of Modifiers to Rubberized Concrete

ZHANG Guocen<sup>1,4</sup>, XU Hongyin<sup>1,3</sup>, YUAN Qun<sup>1,2</sup>, HU Fengqi<sup>5</sup>

(1. He'nan Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety Technology, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

2. He'nan Provincial Water Conservancy Research Institute, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

3. Zhengzhou University, Zhengzhou, He'nan 450002, China;

4. He'nan Baiguishan Reservoir Management Bureau, Pingdingshan, He'nan 467031, China;

5. Kaifeng Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Kaifeng, He'nan 475001, China)

**Abstract:** There are differences in the existing studies on the modifiers of rubberized concrete. The effects of two modifiers, namely, calcium chlorides solution and KH570 were analysed and it was found that the existing conclusions were contradictory. The influence of the two modifiers on improving the strength of rubberized concrete was researched through experiments, and the mechanism was deeply analyzed. The test results indicate that the effect of the two modifiers has much to do with the variety of the rubber particles. The research suggests that both calcium chlorides solution and KH570 have positive and negative effects on the strength of rubberized concrete. On the one hand, modifiers can help improve the bonding action between rubber particles and cement stone, which will enhance the strength of rubberized concrete. On the other hand, modifiers can amplify the air content of rubberized concrete and reduce the compaction of rubberized concrete. The relative strength of the two effects is related to the variety of rubber particles.

**Keywords:** rubberized concrete; calcium chlorides solution; KH570; strength; mechanism

橡胶混凝土作为一种新型混凝土材料, 具有质量轻、韧性好、抗裂性好、抗震性好、耐久性好等优点<sup>[1-4]</sup>。组成橡胶混凝土的橡胶颗粒主要取材于废旧橡胶轮胎, 价格低廉。将橡胶颗粒应用于混凝土

材料的开发, 还能减轻因废旧轮胎引发的环境问题。所以, 橡胶混凝土是一种非常有发展潜力的新型环保混凝土材料。但橡胶颗粒具有憎水性, 加入混凝土中后与水泥石的黏结作用较差, 直接导致橡胶混

凝土的强度较普通混凝土有较大幅度的下降<sup>[5]</sup>。为了增强橡胶颗粒与水泥石的黏结作用,国内外学者通过改性剂处理橡胶颗粒后拌制橡胶混凝土,这种混凝土称为改性橡胶混凝土。

NaOH 溶液和硅烷偶联剂 KH570 是常用的两种橡胶混凝土改性剂。本文通过对国内外文献的分析总结,发现不同学者对两种改性剂作用效果的研究存在相悖现象。为了深入分析 NaOH 溶液和 KH570 两种改性剂对橡胶混凝土的影响,试验采用粒径为 1 mm ~ 3 mm 的两种不同的橡胶颗粒配制改性橡胶混凝土,研究改性剂对橡胶混凝土抗压强度的作用效果,并在此基础上深入分析了改性剂的作用机理。

## 1 改性剂的作用效果研究现状

### 1.1 NaOH 改性

对 NaOH 改性橡胶混凝土的研究普遍认为,NaOH 溶液能够与橡胶表面的硬脂酸锌等憎水性物质反应,增强橡胶颗粒表面的亲水性,从而提高橡胶颗粒与水泥石的黏结性。不少学者在对 NaOH 改性橡胶混凝土的研究中也发现,通过 NaOH 改性能提高橡胶混凝土的强度<sup>[6-7]</sup>,但也有学者得到了不同的研究结论。

文献[8]采用 4 种浓度不同的 NaOH 溶液浸泡橡胶颗粒,然后用清水冲洗并晾干。用处理后的橡胶颗粒拌制 NaOH 改性橡胶水泥砂浆,得到的改性橡胶水泥砂浆的强度如图 1 所示。由图 1 可看出,随着所用 NaOH 浓度的不断提高,改性橡胶水泥砂浆的抗压强度逐渐下降。

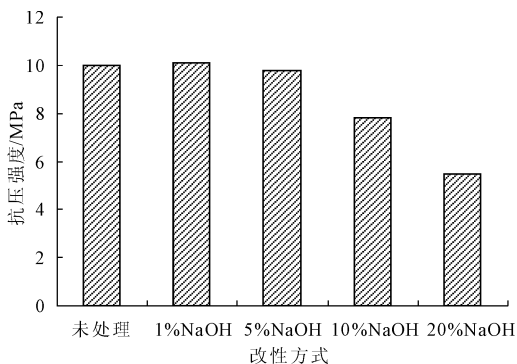


图 1 不同浓度 NaOH 溶液改性橡胶水泥砂浆强度<sup>[8]</sup>

文献[9]用饱和的 NaOH 溶液浸泡橡胶粉 20 min,洗涤过滤后晾干,然后配制改性橡胶水泥砂浆。得到的改性橡胶水泥砂浆的 28 d 抗压强度如图 2 所示。由图 2 可以看出:40 目的橡胶粉配制的橡胶水泥砂浆,NaOH 改性橡胶水泥砂浆的抗压强度低

于基准橡胶水泥砂浆;而 60 目和 80 目的橡胶粉配制的橡胶水泥砂浆,NaOH 改性橡胶水泥砂浆的抗压强度却高于基准橡胶水泥砂浆,与 40 目的试验结果正好相反。

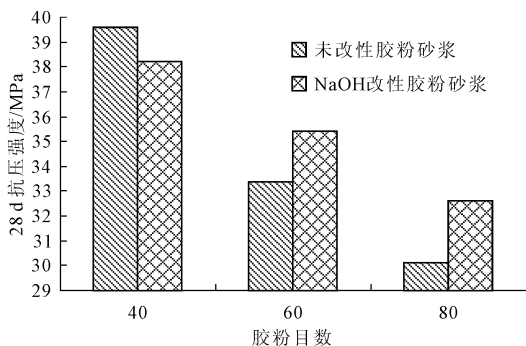


图 2 NaOH 改性橡胶水泥砂浆与基准橡胶水泥砂浆的抗压强度<sup>[9]</sup>

### 1.2 KH570 改性

KH570 属于硅烷偶联剂系列。研究认为,偶联剂能够较好的促进橡胶颗粒与水泥石的黏结。目前关于偶联剂改性橡胶混凝土的理论有 3 种<sup>[10]</sup>:① 化学键理论。偶联剂同时拥有亲无机官能团和亲有机官能团,能够作为桥梁在橡胶颗粒与水泥石之间起到黏结作用。② 表面浸润理论。偶联剂与橡胶颗粒组成的聚合物能够与水泥石完全浸润,而这种浸润作用会产生很强的表面吸附力。③ 变形层理论。偶联剂通过在橡胶颗粒与水泥石之间形成一种变形层来阻止裂缝的开展,从而提高两者之间的黏结强度。

现有理论均认为偶联剂能够改善橡胶颗粒与水泥石的黏结作用,进而提高橡胶混凝土的强度。大多数的研究表明,使用硅烷偶联剂改性能够提高橡胶混凝土的强度<sup>[11-12]</sup>,但也存在不统一的研究结论。

文献[9]采用液相和固相两种工艺处理橡胶粉,制备硅烷偶联剂橡胶水泥砂浆。如图 3 所示,经过硅烷偶联剂改性后的橡胶水泥砂浆较基准橡胶混凝土砂浆,抗压强度均有所提高,但提高幅度不大。液相反应条件和固相反应条件下,改性橡胶水泥砂浆的抗压强度最大增幅分别为 5.5% 和 4%。而文献[10]得到的硅烷偶联剂改性橡胶水泥砂浆的 28 d 抗压强度与普通橡胶水泥砂浆相当,甚至略有下降。

综上所述,理论上,NaOH 溶液和硅烷偶联剂 KH570 对橡胶混凝土均有较好的改性效果,但试验结果与理论分析存在较大出入。NaOH 改性橡胶混凝土和 KH570 改性橡胶混凝土在理论分析与试验

结果上以及不同试验结果之间存在相悖现象。

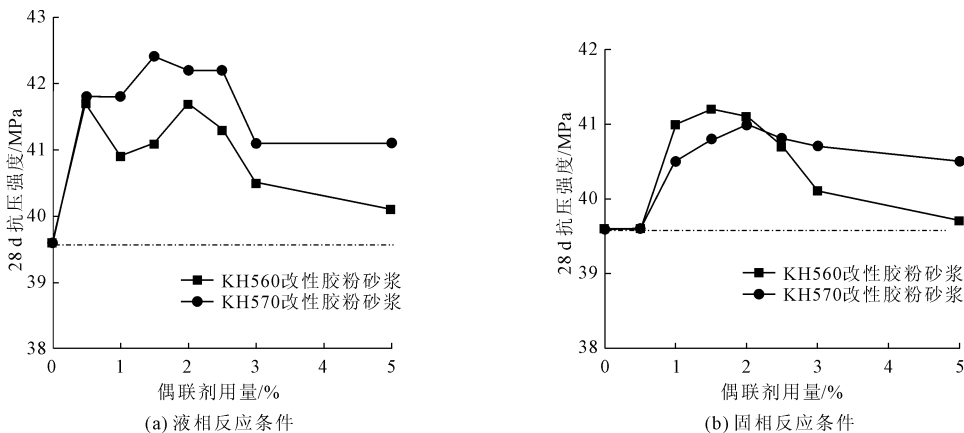


图 3 硅烷偶联剂改性橡胶水泥砂浆的强度<sup>[9]</sup>

## 2 改性剂的作用效果试验分析

为了验证两种改性剂的作用效果,深入分析改性剂的作用机理。试验采用粒径为 1 mm ~ 3 mm 的两个品种的橡胶颗粒,用 NaOH 溶液和 KH570 两种改性剂配制改性橡胶混凝土,通过其立方体抗压强度判定改性剂的作用效果。

### 2.1 试验设计

#### (1) 原材料

试验以 C20 混凝土为基准,分别配制了基准橡胶混凝土(RC)、NaOH 改性橡胶混凝土(RC - Na)、KH570 改性橡胶混凝土(RC - KH)、NaOH + KH570 复合改性橡胶混凝土(RC - F)。基准橡胶混凝土和

改性橡胶混凝土中的橡胶颗粒按照 15% 的掺量等体积取代基准混凝土中的砂子。

试验采用了两种不同的橡胶颗粒,粒径均为 1 mm ~ 3 mm,但品种不同,分别来自河南焦作(橡胶颗粒 A)和河南新乡(橡胶颗粒 B)。从外表观察,橡胶颗粒 A 致密性较好,颗粒表面光滑,没有明显的开口孔隙;而橡胶颗粒 B 致密性较差,颗粒表面粗糙度大,有很多开口孔隙。从两种橡胶颗粒的 BSE 图(见图 4)可以看出,橡胶颗粒 B 的材质较差。从生产厂家反馈的信息来看,橡胶颗粒 A 的材料来源为废旧轮胎的外胎,而橡胶颗粒 B 的材料来源为普通废旧橡胶。

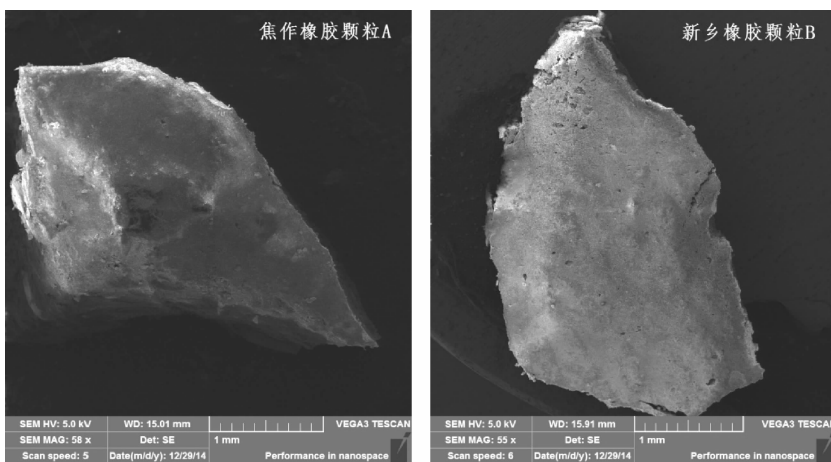


图 4 两种橡胶颗粒形态 BSE 图像

#### (2) 改性方法

根据前期的研究成果<sup>[13]</sup>,采用 5% ~ 30% 浓度系列的 NaOH 溶液和 0.5% ~ 3% 质量分数系列的 KH570 处理橡胶混凝土,得到 NaOH 溶液的最优浓度为 20%,KH570 的最优质量分数为 1%。所以,本

文试验采用的改性方式如下:

**NaOH 改性:**用质量浓度为 20% 的 NaOH 溶液浸泡橡胶颗粒 24 h,然后用大量清水冲洗直至 pH 约为 7,再将橡胶颗粒用清水浸泡 2 h 后晾干备用。

**KH570 改性:**称取占橡胶质量 1% 的 KH570,用适量无水乙醇溶解。将 KH570 乙醇溶液加入橡胶颗粒,充分搅拌,使橡胶颗粒完全润湿。将改性后的橡胶颗粒放于阴凉干燥处晾干备用。

**NaOH + KH570 复合改性:**用质量浓度为 20% 的 NaOH 溶液浸泡橡胶颗粒 24 h,然后用大量清水冲洗直至 pH 约为 7,再将橡胶颗粒用清水浸泡 2 h 后晾干。待橡胶颗粒晾干后再用 KH570 的乙醇溶液处理橡胶, KH570 的用量仍为橡胶颗粒质量的 1%。将橡胶颗粒放于阴凉干燥处晾干备用。

## 2.2 试验结果

按照上述方法用改性后的橡胶颗粒配制改性橡胶混凝土,混凝土试件到达养护龄期后,根据《水工混凝土试验规程》<sup>[14]</sup>(DL/T5150-2001)中的方法进行混凝土立方体抗压强度试验。将改性橡胶混凝土的抗压强度与基准橡胶混凝土相比,试验结果如图 5 所示。

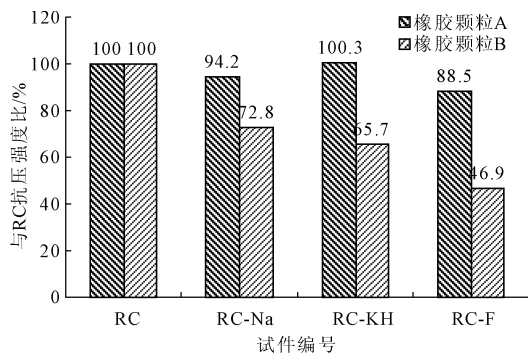


图 5 改性橡胶混凝土的抗压强度与 RC 的比值

由图 5 可以看出,除由橡胶颗粒 A 拌制的 RC-KH 混凝土的抗压强度稍高于 RC 混凝土外,其余所有的改性橡胶混凝土的抗压强度较 RC 混凝土均有下降。但橡胶颗粒 A 拌制的改性橡胶混凝土的抗压强度的降幅明显低于由橡胶颗粒 B 拌制的改性橡胶混凝土,说明不同橡胶品种对改性剂的作用效果有不同的影响。

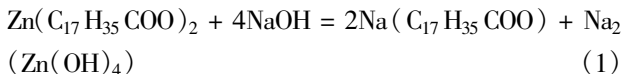
## 3 改性剂的作用效果机理分析

理论上均认为 NaOH 改性和 KH570 改性能增强橡胶颗粒与水泥石的黏结作用,从而提高橡胶混凝土的强度。但国内外的研究现状以及本文的试验结果与理论分析存在较大反差。所以,现有研究对 NaOH 改性和硅烷偶联剂 KH570 改性的作用机理的阐释显然是不完善的。本文根据试验过程中的现象、试验结果以及电镜等技术手段,尝试对 NaOH 溶液和 KH570 对橡胶混凝土的作用机理进行补充阐

释。

### 3.1 NaOH 改性机理

在橡胶的生产过程中,常常需要加入硬脂酸锌等外加剂。硬脂酸锌的化学式为  $(C_{17}H_{35}COO)_2Zn$ ,能够与酸碱反应。现有研究表明,硬脂酸锌是降低橡胶颗粒和水泥石之间结合力的主要原因<sup>[15]</sup>。用 NaOH 溶液浸泡橡胶颗粒能够祛除橡胶颗粒表面的硬脂酸锌,反应方程如式(1):



反应生成的  $Na(C_{17}H_{35}COO)$  和  $Na_2(Zn(OH)_4)$  均易溶于水,可以在冲洗的过程中洗掉。经过如此处理,祛除了橡胶颗粒表面的硬脂酸锌,增强了橡胶颗粒与水泥石的黏结强度。文献[9]采用红外光谱分析了 NaOH 改性后的橡胶颗粒表面的分子结构和化学键,发现橡胶颗粒的表面在  $3485\text{ cm}^{-1}$  处出现了羟基(-OH)的峰包(见图 6),说明 NaOH 改性后的橡胶颗粒亲水性更好,更有利于与水泥石的黏结。

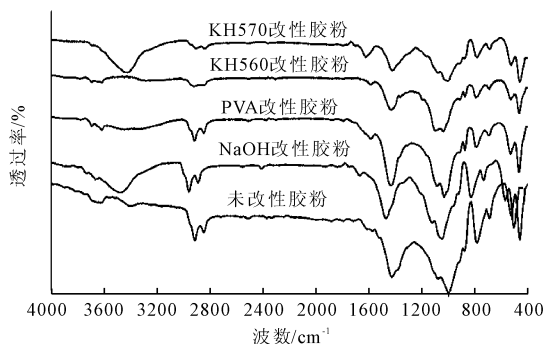


图 6 不同改性方式的红外光谱图<sup>[9]</sup>

理论分析认为,经过 NaOH 处理的橡胶颗粒能与水泥石更好的黏结,对橡胶混凝土的强度会有较大的提升作用。但实际试验的结果与理论分析并不完全一致。所以,一定存在一些不利因素,对 NaOH 改性橡胶混凝土的强度有削弱的作用效果。文献[8]提出,NaOH 改性橡胶混凝土较普通橡胶混凝土强度下降是因为橡胶颗粒经过处理后,不能完全清洗干净,残存的 NaOH 对混凝土的强度造成了不利影响。本文在清洗 NaOH 溶液浸泡过的橡胶颗粒时,用大量清水冲洗,直至冲洗用水的 pH 值达到 7 左右,再用清水浸泡 2 h,以清除残存于橡胶颗粒孔隙中的 NaOH。以如此方法制作的 NaOH 改性橡胶混凝土的强度仍大大低于普通混凝土,说明残存 NaOH 不是混凝土强度下降的真实原因。所以,NaOH 改性使橡胶混凝土强度下降另有其他原因。

影响混凝土强度的因素主要有原材料的选用、配合比的设计、生产拌和工艺以及养护条件。NaOH 改性橡胶混凝土与普通橡胶混凝土拥有相同的原材料、配合比、生产工艺和养护条件。所以,NaOH 改性橡胶混凝土与普通橡胶混凝土的差异在于内部的结构。试验现象表明,NaOH 改性橡胶混凝土的密实度较基准橡胶混凝土有较大下降,试件到达养护日期后可以看到,在试件的侧表面有很多的孔隙。并且在拌和的过程中发现改性橡胶混凝土拌和物中存在较多气泡。所以,NaOH 改性橡胶混凝土强度下降的原因是在拌和的过程中引入了较多的空气,

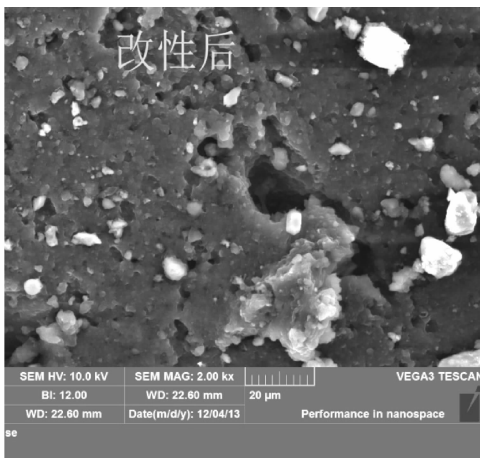
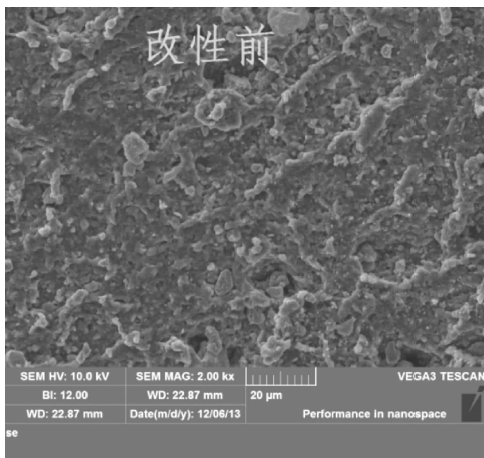


图7 NaOH 改性前后橡胶颗粒 BSE 图像

综上所述,NaOH 溶液对橡胶颗粒的改性作用有两个方面:(1) NaOH 溶液能够祛除橡胶颗粒表面的硬脂酸锌等物质,增强橡胶颗粒与水泥石的黏结作用。(2) 橡胶颗粒经过 NaOH 溶液处理后,会在表面形成许多开口孔隙,这些孔隙能够增强橡胶颗粒的引气作用,造成混凝土的不密实。

NaOH 溶液的两种作用一正一负,其相对大小影响了 NaOH 改性橡胶混凝土的强度。试验分析认为,两种作用效果的相对强弱与橡胶颗粒的化学组成和颗粒形态有关。当橡胶颗粒成分中硬脂酸锌等能与 NaOH 溶液反应的物质较多,且较为集中时,改性后会在橡胶颗粒表面形成更多更深的孔隙,增强其引气作用。另外,当橡胶颗粒本身的密实性较差时,NaOH 溶液能够渗透到橡胶颗粒内部进行反应,在橡胶颗粒表面形成的孔洞也更多,其引气作用也更强。

### 3.2 KH570 改性机理

在硅烷偶联剂的 3 种作用机理中,目前比较认可的为化学键理论。该理论认为,偶联剂同时拥有亲无机官能团和亲有机官能团,能够作为桥梁在橡

从而降低了改性橡胶混凝土的密实性。

橡胶颗粒增大混凝土拌和物含气量的机理有 2 个方面:① 橡胶颗粒本身的孔隙中含有大量空气;② 橡胶颗粒是憎水性材料,其表面与水分子不相互吸附,造成空气更易进入混凝土拌和物。用 NaOH 溶液浸泡橡胶颗粒,橡胶颗粒中的硬脂酸等物质会与 NaOH 溶液反应,之后会在橡胶颗粒表面以及内部形成更多的开口孔隙(见图 7),这些孔隙能够将更多的空气引入混凝土拌和物。另外,经过处理的橡胶颗粒的比表面积会增大,与水的接触面积变大,同样会增大混凝土拌和物的引气性。

胶颗粒与水泥石之间起到黏结作用。

硅烷偶联剂 KH570 的分子式是  $\text{CH}_2 = \text{C}(\text{CH}_3)\text{COO}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ ,其中甲氧基为可水解基团,遇水引起分解,与无机物表面有较好的反应性。随着混凝土的水化干燥,甲氧基能够与水泥中的羟基脱水缩合成  $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$  键,这时 KH570 与水泥石之间就形成了单分子层<sup>[16]</sup>。而 KH570 分子式左侧的有机官能团能够与橡胶颗粒表面形成化学键。通过此过程,橡胶颗粒与水泥石之间很好的黏结在一起。文献[16]给出了偶联剂在橡胶颗粒与水泥石之间可能的连接模式,如图 8 所示。文献[9]通过红外光谱分析,发现经过 KH570 改性后的橡胶颗粒分别在  $1795 \text{ cm}^{-1}$  和  $1630 \text{ cm}^{-1}$  处出现了羟基  $\text{C} = \text{O}$  和不饱和的双键  $\text{C} = \text{C}$ (见图 6),其表面活性增强,促进了橡胶颗粒与水泥石的黏结作用。

理论上,KH570 改性能够大大增强橡胶颗粒与水泥石之间的黏结作用,对橡胶混凝土的强度有较大的促进作用,但国内外的研究及本文的试验过程发现,KH570 改性橡胶混凝土的抗压强度与普通橡胶混凝土相比提升幅度不大,文献[9]发现,当

KH570 的用量过多时,改性橡胶混凝土的强度甚至有所下降。

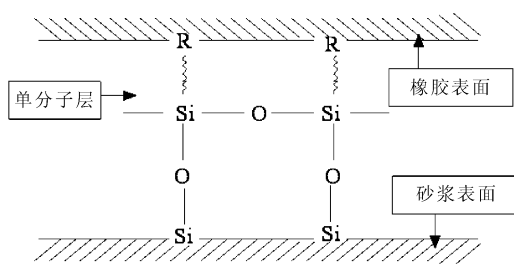


图 8 硅烷偶联剂在橡胶颗粒与水泥石表面可能的连接模式<sup>[16]</sup>

KH570 改性剂对橡胶混凝土强度的作用效果不仅存在有利的一面,也存在不利的一面。根据试验现象,KH570 改性橡胶混凝土和复合改性橡胶混凝土的流动性大大增强,主要原因是拌和物中存在大量的气泡。所以,KH570 能够增大橡胶混凝土拌和物的含气量,削弱混凝土的密实性。根据以上分析,KH570 遇水分解后能够与无机物表面有较好的黏结作用,其吸附空气的性能也会大大增强。另外,KH570 改性橡胶混凝土在拆模时成型效果很差,前期强度较低。可以推测 KH570 的加入对水泥的水化反应有一定影响,并且是不利的影响。

综上所述,KH570 改性剂对橡胶混凝土有两个方面的作用效果:(1) KH570 能够在橡胶颗粒与水泥石之间形成稳定的化学键,增强两者的黏结作用,这种作用主要表现在混凝土水化的后期阶段。(2) 经过 KH570 改性的橡胶颗粒,其吸附空气的能力增强,会提高橡胶混凝土拌和物的含气量,降低混凝土的密实性。两种作用效果一正一负,其相对强弱决定了改性橡胶混凝土的强度。当橡胶颗粒表面平整,开口空隙较少时,黏结作用表现的更为明显,改性橡胶混凝土的强度就会增强。当橡胶颗粒开口空隙较多,其比表面积更大,引气作用更强,改性橡胶混凝土的强度就会下降。

## 4 结 语

(1) NaOH 和 KH570 对橡胶混凝土改性效果的研究结论存在相悖现象。试验结果表明,改性剂对不同品种橡胶颗粒的改性效果不同。

(2) NaOH 溶液和 KH570 对橡胶混凝土的改性效果存在正负两个方面:一方面,增强橡胶颗粒与水泥石的黏结作用;另一方面,增大混凝土的含气量,削弱混凝土的密实性。两种作用的相对强弱决定了

改性橡胶混凝土的强度。

(3) 本文试验仅证实了 NaOH 溶液和 KH570 的改性效果与采用橡胶的品种有关,究竟哪一品种橡胶能够经改性剂改性后获得最优的效果,仍有待于更进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] L. Zheng a, X. Sharon Huo a, Y. Yuan. Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete[J]. Construction and Building Materials, 2008(22): 939-947.
- [2] 冯凌云,袁群,杨卫坤. 橡胶混凝土抗渗性能试验研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(9): 125-127.
- [3] F. Herna'ndez - Olivares a, G. Barluenga b, B. Parga - Landa, et. al. Fatigue behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete and its implications in the design of rigid pavements[J]. Construction and Building Materials, 2007(21): 1918-1927.
- [4] 刘日鑫,侯文顺,徐永红. 废橡胶颗粒对混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 341-344.
- [5] 管学茂,张海波,勾密峰. 表面改性对橡胶水泥石性能影响研究[C]//中国硅酸盐学会水泥分会首届学术年会论文集, 2009.
- [6] 刘日鑫,侯文顺,徐永红. 废橡胶颗粒对混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 341-344.
- [7] Segre N, Joekes L. Use of tire rubber particles as addition to cement paste[J]. Cement and Concret Research, 2000, 30(9): 1421-1425.
- [8] 范璐璐. 废旧轮胎橡胶颗粒水泥混凝土路用性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [9] 于利刚. 废橡胶粉的杂化改性及其对水泥基材料结构与性能的影响[D]. 广东: 华南理工大学, 2010.
- [10] 罗琦. 橡胶粒子改性混凝土的物理力学性能及耐久性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- [11] 刘日鑫,徐开胜,高炜斌. 胶粉对混凝土初塑性的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(1): 24-26.
- [12] 董素芬,姜丽,田元艳. 硅烷偶联剂对橡胶集料水泥砂浆力学性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(5): 20-23.
- [13] 代灿灿,李宗坤,冯凌云,等. 橡胶混凝土改性剂的配制研究[J]. 混凝土, 2014(9): 68-71.
- [14] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T5150 - 2001. 水工混凝土试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [15] N. Segre, J Paulo, M. Monteiro, et al. Surface characterization of recycled tire rubber to be used in cement paste matrix[J]. Colloid and Interface Science, 2002, 248: 521-523.
- [16] 王敏. 橡胶集料水泥砂浆的力学及建筑功能特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.