

文章编号:1007-9629(2024)07-0573-07

# 玄武岩纤维表面改性对混凝土力学性能的影响

杜常博<sup>1,\*</sup>, 朱明皓<sup>1</sup>, 易富<sup>1,2</sup>, 陶晗<sup>1</sup>, 孙迪<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 北京京能地质有限公司, 北京 102300;  
3. 辽宁省交通规划设计院, 辽宁 沈阳 110166)

**摘要:**用偶联剂 KH550 与纳米 SiO<sub>2</sub> 协同改性玄武岩纤维(BF), 研究了 BF 表面改性对玄武岩纤维混凝土(BFRC)力学性能的影响. 结果表明:经 KH550 与纳米 SiO<sub>2</sub> 改性后, BF 表面出现了 C—H 键, 且 Si—O—Si 键对应的振动峰变强; 当纳米 SiO<sub>2</sub> 用量为 BF 质量的 3% 时, BF 形貌变化最为明显, 此时改性 BFRC 的力学强度及抗裂性能均高于普通 BFRC; 在 KH550 的桥联作用下, 纳米 SiO<sub>2</sub> 可有效增强纤维与混凝土基体的黏结强度, 从而提高 BFRC 的力学强度和抗裂性能.

**关键词:**玄武岩纤维; 抗裂; 纳米 SiO<sub>2</sub>; 混凝土; 改性; 力学性能

中图分类号: TU526

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.07.001

## Effect of Basalt Fiber Surface Modification on Mechanical Properties of Concrete

DU Changbo<sup>1,\*</sup>, ZHU Minghao<sup>1</sup>, YI Fu<sup>1,2</sup>, TAO Han<sup>1</sup>, SUN Di<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Liaoning Engineering University, Fuxin 123000, China; 2. Beijing Jingneng Geology Co., Ltd., Beijing 102300, China; 3. Liaoning Transportation Planning and Design Institute, Shenyang 110166, China)

**Abstract:** Basalt fiber (BF) was modified by coupling agent (KH550) and nano-SiO<sub>2</sub>, and the effect of BF surface modification on the mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) was studied. The results show that after modification with KH550 and nano-SiO<sub>2</sub>, the surface of BF forms C—H bonds, and the vibration peak corresponding to Si—O—Si bonds becomes stronger. When the amount of nano-SiO<sub>2</sub> is 3% of the mass of BF, the morphology of BF changes most significantly, and the mechanical strength and crack resistance of modified BFRC are significantly higher than those of ordinary BFRC. Under the bridging effect of KH550, nano-SiO<sub>2</sub> can effectively enhance the bonding strength between fibers and the concrete matrix, thereby improving the mechanical strength and crack resistance of BFRC.

**Key words:** basalt fiber; crack resistance; nano-SiO<sub>2</sub>; concrete; modification; mechanical property

为了克服水泥基材料脆性较大的缺点, 纤维增强水泥基材料在近年来受到越来越多的关注<sup>[1-3]</sup>. 由于玄武岩纤维(BF)具有较好的化学稳定性以及耐高温性能<sup>[4-5]</sup>, 因此被广泛应用于石油及车辆船舶等诸多领域<sup>[6-7]</sup>.

研究表明, 添加适量 BF 可以显著提高水泥基材料的吸能能力<sup>[8]</sup>. Yang 等<sup>[9]</sup>研究发现, 添加了 BF 的

混凝土极限抗拉强度可以提高 50%. 然而, Dias 等<sup>[10]</sup>研究发现, 当 BF 体积分数为 1.0% 时, 混凝土的劈裂抗拉强度比素混凝土有所降低, 且未改性 BF 的加入对水泥基材料抗裂性能的提升作用并不明显. 其原因主要为: BF 具有化学惰性, 导致纤维-基体的黏合力较弱<sup>[11]</sup>; BF 韧性较强, 不能制成弯钩状以增强机械锚固效果<sup>[12]</sup>. 对 BF 进行表面处理可有效改善其与水

收稿日期: 2023-09-05; 修订日期: 2023-10-31

基金项目: 辽宁省教育厅青年基金资助项目(LJKQZ2021153); 辽宁工程技术大学首批“双一流”学科建设创新团队项目(LNTU20TD-12)

第一作者(通讯作者): 杜常博(1992—), 男, 辽宁阜新人, 辽宁工程技术大学副教授, 硕士生导师, 博士. E-mail: duchangbo2839@163.com

泥基体的界面性能,最常用的方法是等离子改性法和酸碱刻蚀法<sup>[13-14]</sup>。酸碱刻蚀会对BF本身造成损伤,降低BF的断裂强度和拉伸强度<sup>[15]</sup>,而等离子体束的高温同样会损伤纤维本体<sup>[16]</sup>。近年来,纳米材料逐渐被应用到纤维的改性中<sup>[17-18]</sup>。

本文用偶联剂KH550将纳米SiO<sub>2</sub>接枝到BF表面<sup>[19]</sup>,探究了BF表面改性对玄武岩纤维混凝土(BFRC)力学性能的影响。

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥为阜新市大鹰水泥制造有限公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥,比表面积大于300 m<sup>2</sup>/kg;粗集料为5~20 mm的花岗岩石;砂选用细度模数为2.5的天然河砂;减水剂使用湖南中岩建材科技有限公司生产的聚羧酸减水剂;BF为湖南汇祥纤维生产有限公司生产的短切玄武岩纤维;粉煤灰为天津市龙江粉煤灰开发利用有限公司生产的I级粉煤灰;纳米SiO<sub>2</sub>购自苏州比斯利新材料有限公司,平均粒径为15 nm。

### 1.2 BF改性及BFRC的制备

将BF置于250℃下烘干2 h,用去离子水清洗,放入烘箱中干燥,得到预处理BF,记为MBF。将无水乙醇与去离子水按9:1(质量比,文中涉及的掺量、比值等均为质量分数或质量比)混合,再加入1.2%的KH550,将其置于65℃的恒温水浴锅中水解30 min。按3:10的浴比加入MBF,在50℃下磁力搅拌1 h,烘干得到KH550改性BF(KH550/BF)。

在KH550水解溶液中加入不同质量分数的纳米SiO<sub>2</sub>,并在50℃下搅拌1 h,得到KH550改性纳米SiO<sub>2</sub>(KH550/SiO<sub>2</sub>)溶液;将MBF放入KH550/SiO<sub>2</sub>溶液中加热至50℃并搅拌30 min,制得KH550和纳米SiO<sub>2</sub>改性BF(KH550/SiO<sub>2</sub>/BF)。以BF质量计,设置纳米SiO<sub>2</sub>的质量分数 $w(\text{SiO}_2)$ 为0%(即KH550/BF)、1%、2%、3%、4%,将改性BF制备的BFRC(后文简称改性BFRC)分别记为K-BP、K/S1-BP、K/S2-BP、K/S3-BP、K/S4-BP。基准组为未处理BF增强混凝土,记为普通BFRC(BP)。BFRC中水泥、粉煤灰、砂、骨料、水、减水剂和纤维的用量分别为37.00、94.00、740.00、1 022.00、164.00、4.68、7.95 kg/m<sup>3</sup>。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 微观形貌及化学结构测试

采用S-4800型扫描电子显微镜(SEM)对改性前后BF以及纳米SiO<sub>2</sub>的表面形貌进行观察,工作电压为15 kV。采用Thermo Scientific Nicolet iS5型傅里叶红外光谱仪(FTIR)对改性前后BF及纳米SiO<sub>2</sub>

的化学结构进行分析,制样采用压片法。

#### 1.3.2 力学性能试验

将混凝土试样在标准养护条件下养护至龄期 $t$ 为3、7、28 d。抗压强度及劈裂抗拉强度试验的试样尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,抗折强度试验的试样尺寸为100 mm×100 mm×400 mm。

#### 1.3.3 界面能试验

分别把单根和4根改性BF平放于模具正中间,将砂浆分2次注入,养护24 h后拆模,在(20±1)℃、相对湿度(90±1)%下进行标准养护。砂浆中水泥、粉煤灰、河砂、水和减水剂的用量分别为559.62、139.91、1 101.40、244.09、2.80 kg/m<sup>3</sup>。

#### 1.3.4 抗裂性能试验

使用圆环法测试材料的抗裂性能,模具为内径305 mm、外径425 mm、高100 mm的圆环试模。采用MG10085—1A型裂缝测宽仪辅以直尺对裂缝宽度 $W$ 及长度 $l$ 进行测量。

抗裂性能试验中,裂缝总面积 $A$ <sup>[20]</sup>和裂缝面积降低率 $\eta$ 分别为:

$$A = \sum_{i=1}^n W_{i,\max} l_i \quad (1)$$

$$\eta = \frac{A_0 - A_i}{A_0} \quad (2)$$

式中: $n$ 为裂缝总数量; $l_i$ 为第 $i$ 条裂缝长度; $W_{i,\max}$ 为裂缝中第 $i$ 条裂缝的最大缝宽; $A_0$ 为基准组试样的裂缝总面积; $A_i$ 为对比试样的裂缝总面积。

## 2 结果和分析

### 2.1 表面形貌分析

改性前后BF的SEM照片见图1。由图1可见:当 $w(\text{SiO}_2)=3\%$ 时,改性后BF表面凸起形貌最为明显,这是纳米SiO<sub>2</sub>大量附着在BF表面;当 $w(\text{SiO}_2)=4\%$ 时,BF表面纳米SiO<sub>2</sub>的附着量反而减少。这主要是由于当纳米SiO<sub>2</sub>掺量过高时,KH550无法同时充分包裹BF和纳米SiO<sub>2</sub>,而无法被包裹的纳米SiO<sub>2</sub>大量自团聚,导致其无法稳定沉积于BF表面。

纳米SiO<sub>2</sub>可与Ca(OH)<sub>2</sub>发生二次水化反应,提高水泥的力学强度和耐久性<sup>[21]</sup>。同时,由于纳米SiO<sub>2</sub>呈三维网状结构,且表面存在多种状态的羟基以及大量不饱和键,使得纳米SiO<sub>2</sub>的表面能较高。具有较大表面能的纳米SiO<sub>2</sub>粒子在偏碱性和复杂离子环境下易形成团聚体,对BF的改性效果产生负面影响。KH550改性前后纳米SiO<sub>2</sub>的SEM照片见图2。由图2可见,KH550改性后纳米SiO<sub>2</sub>的粒径均匀,且分散性增加,团聚现象明显减弱。

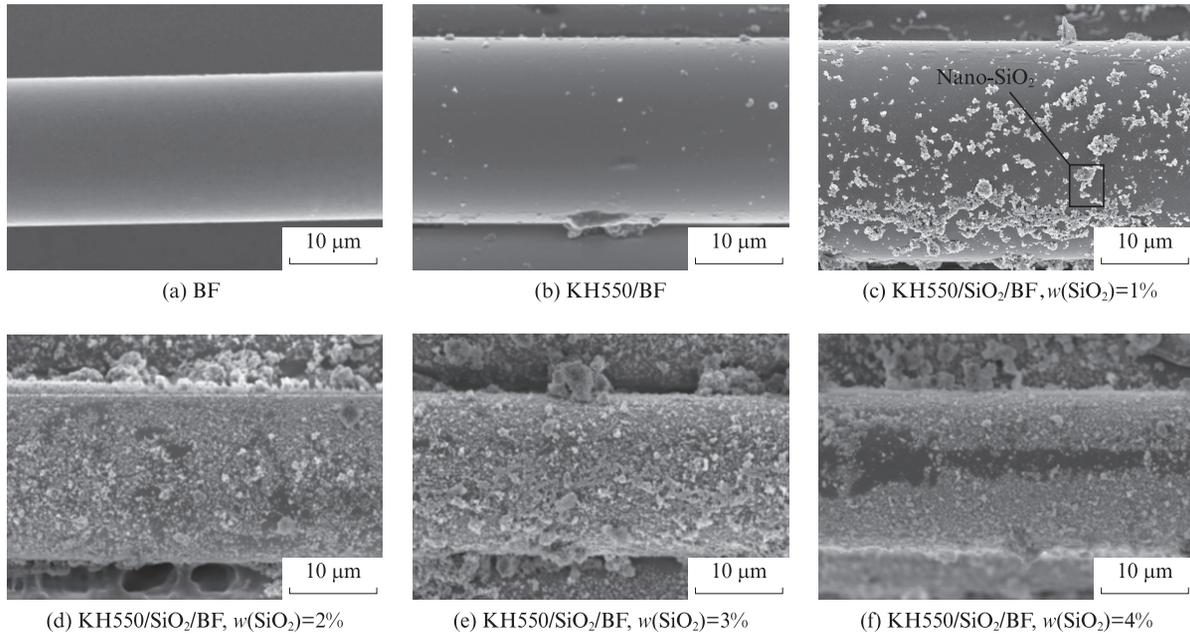


图1 改性前后BF的SEM照片

Fig. 1 SEM images of BF before and after modification

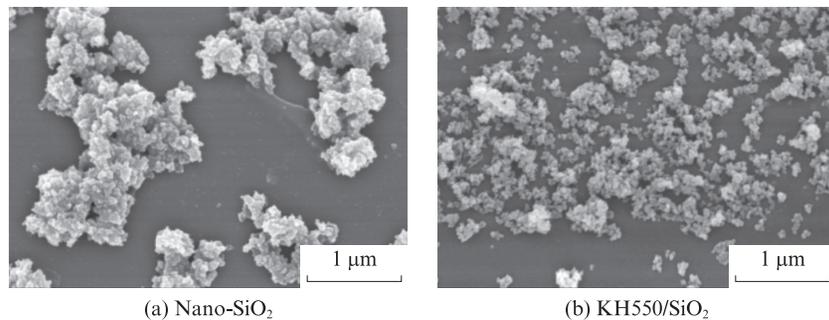


图2 KH550改性前后纳米SiO<sub>2</sub>的SEM照片

Fig. 2 SEM images of nano-SiO<sub>2</sub> before and after modification by KH550

### 2.2 化学结构分析

为探究纳米SiO<sub>2</sub>附着于BF的机理,利用红外光谱对改性前后BF化学结构变化的角度进行分析,结果见图3.由图3可见:与纳米SiO<sub>2</sub>相比,KH550/SiO<sub>2</sub>在2860.21 cm<sup>-1</sup>处出现了C—H伸缩振动吸收峰,且1100.16 cm<sup>-1</sup>处—Si—O—伸缩振动峰强度明显增大,表明KH550与纳米SiO<sub>2</sub>发生了键合反应;经KH550改性后,纳米SiO<sub>2</sub>各基团特征的峰位置并无变化,而峰的强度改变较大;与BF相比,KH550/BF在2920.35 cm<sup>-1</sup>处出现了C—H键的伸展峰,这说明KH550成功包裹在BF上,1261.85 cm<sup>-1</sup>处Si—O—Si的吸收峰强度较大,表明在KH550的耦合作用下,纳米SiO<sub>2</sub>与BF成功连接;KH550/SiO<sub>2</sub>/BF的C—H振动峰较明显,Si—O—Si键振动峰强度明显增大,证明BF与纳米SiO<sub>2</sub>的连接方式为化学键连接.综上,BF经纳米SiO<sub>2</sub>处理后表面吸附了一层纳米SiO<sub>2</sub>,进而增强了其与基体的黏结强度.

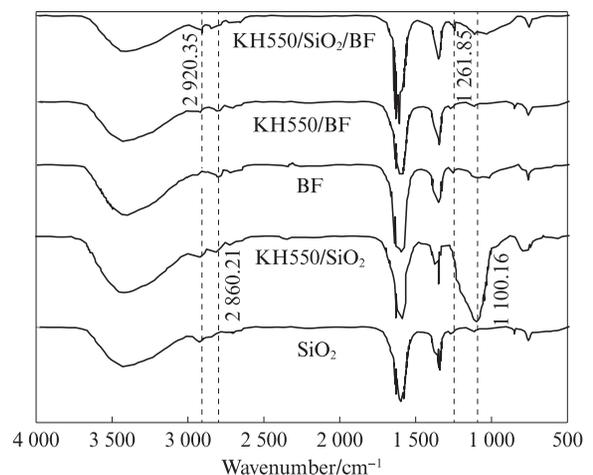


图3 改性前后BF和纳米SiO<sub>2</sub>的红外光谱

Fig. 3 FTIR spectra of BF and nano-SiO<sub>2</sub> before and after modification

### 2.3 力学强度分析

混凝土的抗压强度见图4.由图4可见:与基准组BP相比,改性BFRC抗压强度明显增大;随着养

护龄期的延长,试样抗压强度的差距逐渐增大,这表明纳米  $\text{SiO}_2$  是随着水化反应的进行而逐渐发挥作用的;随着纳米  $\text{SiO}_2$  掺量的增加,BFRC的抗压强度表现出先增大后减小的趋势,当  $w(\text{SiO}_2)=4\%$  时,试样 K/S4-BP 的抗压强度降低.混凝土受压破坏是内部微裂缝扩展的结果,BF 在 BFRC 中主要通过“桥接作用”与“摩擦效应”来阻止微裂缝的产生与扩展,改性 BF 摩擦效应更佳,能够更有效地阻止微裂缝的扩展.与基体接触面积的增大有助于 BF 更好地发挥“桥接作用”,当混凝土内部出现微小裂缝时,BF 能够填充裂缝并形成桥梁,从而提高混凝土的力学性能.

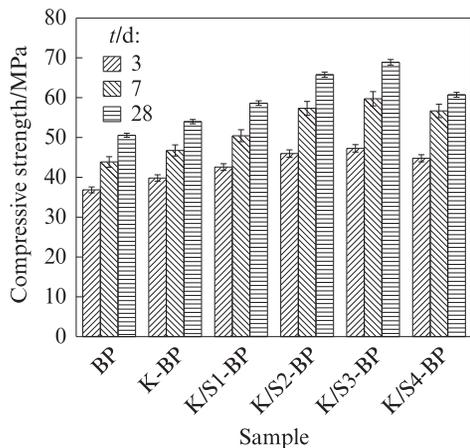


图4 混凝土的抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of concretes

混凝土的抗折强度见图5.由图5可见:试样BP的抗折强度最低,试样K/S3-BP的抗折强度最大;纳米  $\text{SiO}_2$  参与改性BF后,BFRC抗折强度明显提升,且随着纳米  $\text{SiO}_2$  掺量的增加,BFRC的抗折强度表现出与抗压强度一致的趋势(先增大后减小),当  $w(\text{SiO}_2)=4\%$  时,与试样K/S3-BP相比,试样K/S4-BP的抗折强度降低.

混凝土的劈裂抗拉强度见图6.由图6可见:试样BP的劈裂抗拉强度最低,试样K/S3-BP的劈裂抗拉强度最大;纳米  $\text{SiO}_2$  参与改性BF后,BFRC劈裂抗拉强度明显提升;相较于抗压强度与抗折强度,BF的改性对混凝土劈裂抗拉强度的影响最大,这是由于BF在水泥基体中主要承受拉应力,且随着混凝土养护龄期的延长,纳米  $\text{SiO}_2$  逐渐发挥化学特性,各组混凝土的力学性能差距呈现逐渐增大的趋势,其中试样K/S3-BP的抗压强度、抗折强度以及劈裂抗拉强度后期增长最大.

相较于未改性BF,改性BF可对混凝土力学性能发挥更好的提升效果,且该效果是随着水化反应

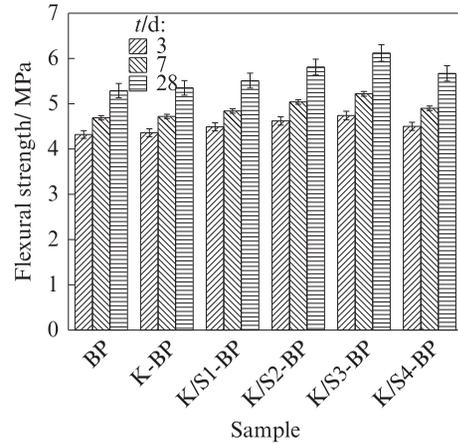


图5 混凝土的抗折强度

Fig. 5 Flexural strength of concretes

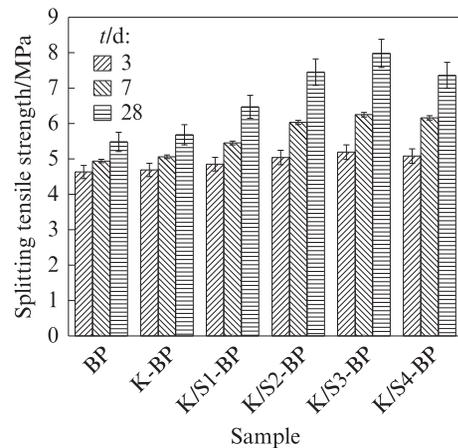


图6 混凝土的劈裂抗拉强度

Fig. 6 Splitting tensile strength of concretes

的进行而逐渐显露的.在改性过程中,当偶联剂用量固定,纳米  $\text{SiO}_2$  掺量过多( $w(\text{SiO}_2)=4\%$ )时,改性液中的纳米  $\text{SiO}_2$  会发生团聚,BF表面纳米  $\text{SiO}_2$  的沉积量反而减少,混凝土的性能出现衰减.由此可见,BF的改性效果和BFRC的整体性能取决于改性溶液中纳米  $\text{SiO}_2$  分布的均匀性.

综上,纳米  $\text{SiO}_2$  的最佳掺量为3%,此时BF的改性效果最佳,BFRC力学强度及抗裂性能提升最显著.

## 2.4 界面能分析

混凝土中纤维拔出荷载-位移曲线见图7.由图7可见,改性BF对混凝土拉性能提升明显.这是由于BF经KH550改性后,纤维与砂浆的锚固力增大;经KH550和纳米  $\text{SiO}_2$  共同改性后,纳米  $\text{SiO}_2$  使一定量的硅羟基粘附于BF表面,使其表面出现了Si—O—Si为主的三维网络结构,从而使经KH550/ $\text{SiO}_2$  改性后的BF拉伸性能得到提高.得益于BF与水泥基体整体性的改善,改性BF力学性能的提高直接提升了BFRC的力学性能.

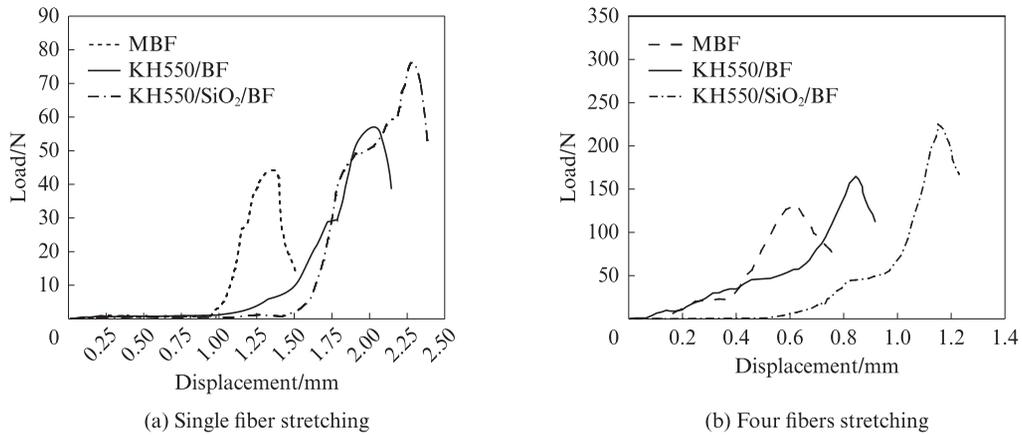


图7 混凝土中纤维拔出荷载-位移曲线  
Fig. 7 Load-displacement curves of fiber pulling in concrete

2.5 抗裂性能分析

混凝土的抗裂性能参数见图8.由图8可见,随着养护龄期的增加,BFRC裂缝宽度和长度的扩展呈现“减缓”的趋势,裂缝数量与裂缝面积先增加后减少.

从宏观角度来说,混凝土裂缝产生的原因为内应力超过了混凝土的承载能力<sup>[22]</sup>,而BF改性后与基体间的咬合力增强,使混凝土具有了更高的内应力承载能力.

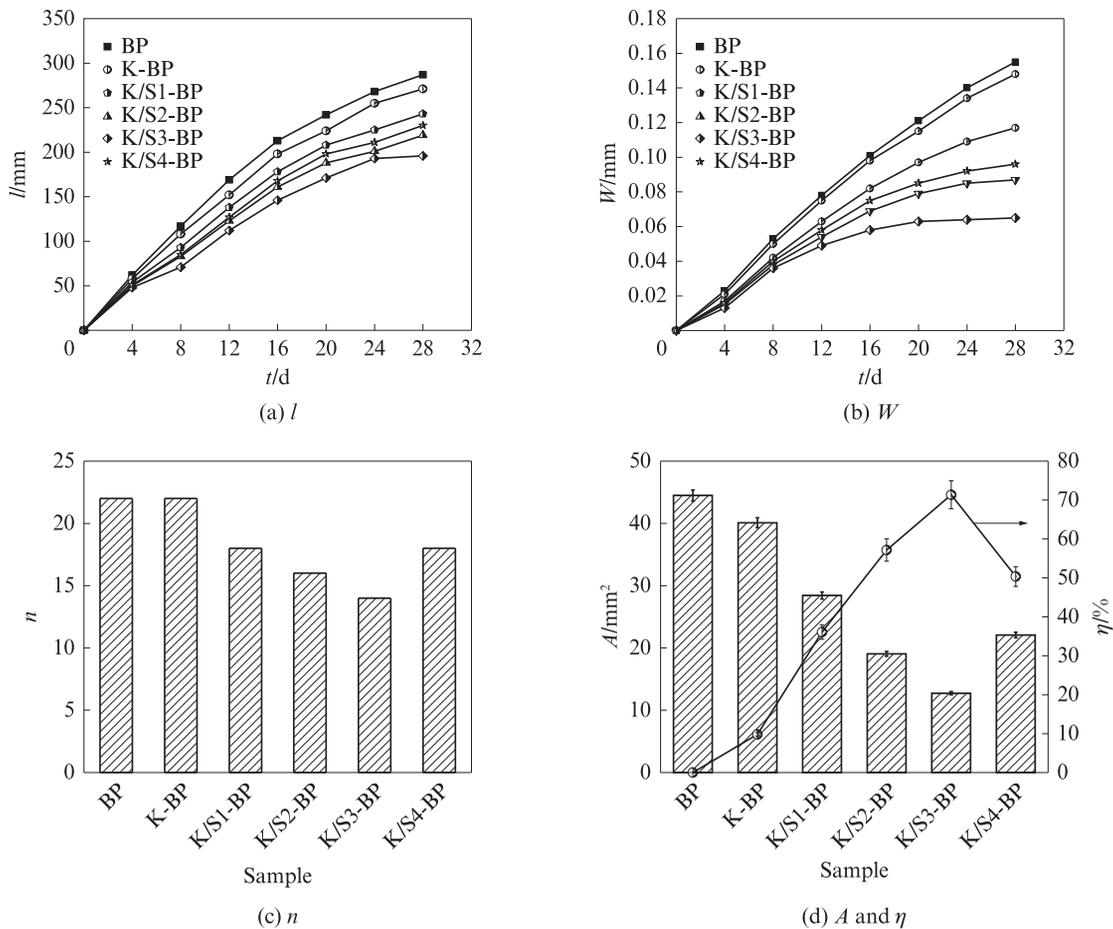


图8 混凝土的抗裂性能参数  
Fig. 8 Crack resistance parameters of concretes

从微观角度分析,BF与基体的界面区中主要存在钙矾石(Aft)、水化硅酸钙(C-S-H)凝胶、Ca(OH)<sub>2</sub>(CH)晶体以及部分尚未水化的熟料颗粒、微孔洞及

裂缝等.界面黏结度的高低主要取决于CH晶体的富集程度及取向,CH晶体数量越多,尺寸越大,界面黏结力越弱.与混凝土其他部位相比,BF与基体的界

面存在更多的原生微孔洞及微裂缝,且BF与基体界面间CH晶体数量较砂浆处更多、平均尺寸更大<sup>[23]</sup>,这有利于裂缝不断延伸.而在KH550存在的条件下,纳米SiO<sub>2</sub>的分散性增强,活性增加,可有效弥补BF与水泥基体间的缝隙,减少界面区的微孔洞及微裂缝的数量.同时,由于纳米SiO<sub>2</sub>的火山灰效应,在二次水化反应过程中,CH晶体被有效消耗,水化反应产生的C-S-H凝胶也进一步增强了界面黏结强度<sup>[24-25]</sup>.此外,由于纳米SiO<sub>2</sub>不规则依附于BF表面,使得BF与基体间的界面变得更加“曲折”,从而使裂缝的开展与传播变得更加困难.

### 3 结论

(1)KH550可使纳米SiO<sub>2</sub>粒径更加均匀.纳米SiO<sub>2</sub>可增强BF与基体的界面性能,且促进BF与纳米SiO<sub>2</sub>通过化学键连结.随着纳米SiO<sub>2</sub>掺量的增加,BFRC的力学强度及抗裂性能均呈现先升高后降低的趋势.

(2)纳米SiO<sub>2</sub>可通过KH550的桥联作用不规则地沉积在BF表面,形成一层致密的纳米SiO<sub>2</sub>层.纳米SiO<sub>2</sub>可与BF附近积累的Ca(OH)<sub>2</sub>发生反应,生成均匀致密的水化产物C-S-H,可有效提高BF与水泥基体的整体性.

(3)BF的改性效果取决于溶液中纳米SiO<sub>2</sub>的均匀性,纳米SiO<sub>2</sub>最佳掺量为3%,此时BF的改性效果最佳,BFRC力学强度及抗裂性能的提升最显著.

#### 参考文献:

- [1] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of ultra-high performance concrete (UHPC) with a low binder amount[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 65:140-150.
- [2] SHAFIEIFAR M, FARZAD M, AZIZINAMINI A. Experimental and numerical study on mechanical properties of ultra high performance concrete (UHPC)[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 156:402-411.
- [3] QIU J, LIM X N, YANG E H. Fatigue-induced deterioration of the interface between micro-polyvinyl alcohol (PVA) fiber and cement matrix[J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 90: 127-136.
- [4] 王庆轩, 丁一宁. 玄武岩纤维耐碱性能及其网格布对混凝土的增强效应[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(1):54-62, 70. WANG Qingxuan, DING Yining. Alkali resistance of basalt fiber and reinforcement effect of grid fabric on concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(1):54-62, 70. (in Chinese)
- [5] 李趁趁, 马娇, 张普, 等. 混杂纤维/束高强混凝土的抗冻性[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(10):1072-1081. LI Chenchen, MA Jiao, ZHANG Pu, et al. Frost resistance of hybrid fiber/bundle high strength concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(10):1072-1081. (in Chinese)
- [6] 同月苹, 王艳, 张少辉. 隧道衬砌纤维混凝土力学性能与耐久性能的研究进展[J]. *材料科学与工程学报*, 2022, 40(3):528-536. TONG Yueping, WANG Yan, ZHANG Shaohui. Research progress on mechanical properties and durability of fiber reinforced concrete for tunnel lining [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2022, 40(3):528-536. (in Chinese)
- [7] 苏丽, 牛获涛, 黄大观, 等. 海洋环境中玄武岩/聚丙烯纤维增强混凝土氯离子扩散性能[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(1):44-53. SU Li, NIU Ditao, HUANG Dagan, et al. Chloride diffusivity of basalt/polypropylene fiber reinforced concrete in marine environment [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(1): 44-53. (in Chinese)
- [8] 任韦波, 许金余, 张宗刚, 等. 高温后玄武岩纤维增强混凝土的冲击变形特性[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(5):768-773. REN Weibo, XU Jinyu, ZHANG Zonggang, et al. Impact deformation characteristics of basalt fiber reinforced concrete after high temperature [J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(5): 768-773. (in Chinese)
- [9] YANG L Y, XIE H Z, FANG S Z, et al. Experimental study on mechanical properties and damage mechanism of basalt fiber reinforced concrete under uniaxial compression[J]. *Structures*, 2021, 31(9):330-340.
- [10] DIAS D P, THAUMATURGO C. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(1):49-54.
- [11] XING D, XI X Y, MA P C. Factors governing the tensile strength of basalt fibre[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 119:127-133.
- [12] LEE Y, KANG S T, KIM J K. Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(10):2030-2041.
- [13] 文爱诗, 何素萍, 潘浩津, 等. 低温等离子体预处理对混杂纤维复合材料性能的影响[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2023, 52(3):423-428. WEN Aishi, HE Suping, PAN Haojin, et al. Effect of low temperature plasma pretreatment on properties of hybrid fiber composites [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science)*, 2023, 52(3):423-428. (in Chinese)
- [14] AFROZ M, PATNAIKUNI I, VENKATESAN S. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 154: 191-203.
- [15] LEE S O, RHEE K Y, PARK S J. Influence of chemical surface treatment of basalt fibers on interlaminar shear strength and fracture toughness of epoxy-based composites[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, 32:153-156.
- [16] PARK O K, KIM W Y, KIM S M, et al. Effect of oxygen plasma treatment on the mechanical properties of carbon nanotube fibers [J]. *Materials Letters*, 2015, 156:17-20.

- [17] ZHANG W, ZOU X S, WEI F Y, et al. Grafting SiO<sub>2</sub> nanoparticles on polyvinyl alcohol fibers to enhance the interfacial bonding strength with cement [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 162:500-507.
- [18] PI Z Y, XIAO H G, DU J J, et al. Interfacial microstructure and bond strength of nano-SiO<sub>2</sub>-coated steel fibers in cement matrix [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 103:1-10.
- [19] LI H Y, LIEBSCHER M, MICUSIK M, et al. Role of pH value on electrophoretic deposition of nano-silica onto carbon fibers for a tailored bond behavior with cementitious matrices[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 600:154000.
- [20] 王宗熙,姚占全,何梁,等. 纳米SiO<sub>2</sub>对混凝土耐蚀性能和溶蚀寿命的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(4):766-773.  
WANG Zongxi, YAO Zhanquan, HE Liang, et al. Effect of nano-SiO<sub>2</sub> on corrosion resistance and dissolution life of concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24 (4):766-773. (in Chinese)
- [21] LU M Y, XIAO H G, LIU M, et al. Carbon fiber surface nano-modification and enhanced mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 370:130701.
- [22] MA Y, DI H H, YU Z X, et al. Fabrication of silica-decorated graphene oxide nanohybrids and the properties of composite epoxy coatings research [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 360: 936-945.
- [23] 王健,马强,于剑桥,等. 纳米SiO<sub>2</sub>改性聚合物水泥砂浆力学性能及干缩性能研究[J]. *混凝土*, 2022(12):131-135.  
WANG Jian, MA Qiang, YU Jianqiao, et al. Study on mechanical properties and dry shrinkage properties of polymer cement mortar modified by nano-SiO<sub>2</sub>[J]. *Concrete*, 2022(12): 131-135. (in Chinese)
- [24] XIE T Y, YANG G S, ZHAO X Y, et al. A unified model for predicting the compressive strength of recycled aggregate concrete containing supplementary cementitious materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251:119752.
- [25] 刘雪,郭远臣,王雪,等. 混凝土裂缝成因研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(7):2173-2178.  
LIU Xue, GUO Yuanchen, WANG Xue, et al. Research progress on the causes of concrete cracks [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(7):2173-2178. (in Chinese)