

# 玄武岩纤维耐碱性及对混凝土力学性能的影响

黄凯健, 邓敏\*

(南京工业大学 材料科学与工程学院, 材料化学工程国家重点实验室, 南京 210009)

**摘要:** 为研究玄武岩纤维的耐碱性能及其对混凝土力学性能的影响规律, 试验将玄武岩纤维分别置于不同碱浓度、不同温度的溶液中浸泡 1 天、3 天和 5 天后, 测量其质量损失率; 并在偏光显微镜下观察腐蚀后的表面形貌; 同时研究了 3 种不同玄武岩纤维掺量的混凝土强度性能, 采用 SEM 观察混凝土中纤维的腐蚀情况。结果表明, 随着碱溶液浓度和浸泡温度的提高, 纤维的质量损失率增加, 表面剥落严重。玄武岩纤维混凝土与空白样相比 7 天的力学性能变化不大, 而养护 28 天的抗压、抗折强度则随纤维掺量的增加有明显的下降, 电镜照片显示混凝土中纤维表面被腐蚀, 混凝土强度损失可能与玄武岩纤维耐碱性能不强有关。

**关键词:** 玄武岩纤维; 耐碱性能; 混凝土; 力学性能; 耐久性

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A

## Stability of basalt fibers in alkaline solution and its effect on the mechanical property of concrete

HUANG Kaijian, DENG Min\*

(College of Materials Science and Engineering, State Laboratory Materials-Printed Chemical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** Experiments were carried out to test the alkaline resistance properties of basalt fibers and their effects on the mechanical property of fiber reinforced concrete. Mass loss rates of fibers were weighed after being soaked at different aqueous alkali and at different temperatures respectively. Meanwhile, mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) were tested with three different volume fractions of basalt fiber. Microphotographs of corroded fibers show that as alkalinity and curing temperature increase, the scaling of fiber appears even worse. However, mechanical properties of BFRC at the early age are close to those of the reference while compressive strength and flexural strength of BFRC at 28 d are deeply lower than those of the reference. Microstructure images of basalt fiber in concrete appear to be corroded seriously. The results show that instability of basalt fiber in alkaline solution may impact the mechanical property of BFRC.

**Keywords:** basalt fiber; alkaline resistance properties; concrete; mechanical property; durability

玄武岩纤维是以天然的玄武岩石为主要原料, 通过熔融拉丝工艺制备得到的一种无机纤维<sup>[1]</sup>。由于该纤维在生产和应用过程中无环境污染, 属于绿色生态材料, 正被积极推广于航空、建筑、汽车工业、电子工业等多个领域<sup>[2]</sup>。目前, 研究文献提出玄武岩纤维具有稳定的化学性能和热稳定性能, 能有效提高混凝土的耐磨性、韧性等多种性能。与碳纤维、玻璃纤维相比性能优越, 性价比高, 是很好的替代产品<sup>[3-6]</sup>。对于玄武岩纤维的耐腐蚀性能特别是耐碱性能, 国内多数学者认为该纤维的耐碱性能是优良的<sup>[7-8]</sup>, 但也有部分国外研究者提出相反

的观点。Robinovic 等人将玄武岩纤维置于 20℃ 的饱和 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液中经过 3 个月腐蚀后, 纤维强度损失达 60% 以上, 且 12 个月后纤维强度几乎全部损失<sup>[9]</sup>。Sim 等人也做了相关的耐碱性能实验, 结果显示玄武岩纤维在 40℃ 的 1 mol/L NaOH 强碱溶液中腐蚀 7 天和 28 天后, 表面剥落情况严重<sup>[10]</sup>。本文作者在国内文献研究基础上, 主要研究玄武岩纤维在不同温度、不同碱浓度溶液中浸泡后的质量损失情况, 通过偏光显微镜分析玄武岩纤维腐蚀后的表面相貌特征, 并结合玄武岩纤维的微观结构特征分析其耐碱性能; 文章同时研究了不

同掺量的玄武岩纤维对混凝土力学性能的影响, 通过观察混凝土中玄武岩纤维的微观结构, 来分析玄武岩纤维在混凝土中的耐碱性能。

## 1 实验

### 1.1 原材料

水泥: P·II 42.5 道路硅酸盐水泥, 中国水泥厂; 砂: 石英砂; 骨料: 玄武岩, 级配 5~20 mm、20~40 mm; 减水剂: JM-B 型萘系高效减水剂, 江苏省建筑科学研究院产品; 引气剂: 型号为 SJ-2, 江苏省建筑科学研究院产品; 玄武岩纤维: 规格 18 tex, 上海俄金玄武岩纤维有限公司产品, 化学成分见表 1; 水: 自来水, 符合国家标准。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 玄武岩纤维耐碱性能研究

将 1.5 g 玄武岩纤维分别置于 1 mol/L NaOH 及 0.5 mol/L Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液中, 在 20℃ 和 80℃ 恒温水箱中浸泡 1 天、3 天和 5 天后洗净、烘干, 测量其质量损失。将浸泡后的纤维分别制样, 采用偏光显微镜 (LEICA DM RX) 观察其表面形貌特征。

#### 1.2.2 玄武岩纤维混凝土力学性能研究

实验参考 GB/T 50081-2002 普通混凝土力学性能试验方法标准进行, 采用 150 mm×150 mm×550 mm 试模成型, 试件脱模后置于标准养护室养护 7 天、28 天后测量其抗压、抗折强度。混凝土设计容重为 2500 kg/m<sup>3</sup>, 其中水泥 340 kg/m<sup>3</sup>, 水 153 kg/m<sup>3</sup>, 砂 692 kg/m<sup>3</sup>, 石 1978 kg/m<sup>3</sup>, 减水剂 2.04 kg/m<sup>3</sup>, 水胶质量比 0.45, 砂率 0.35, 引气剂掺量 0.0102 kg/m<sup>3</sup>。玄武岩纤维掺量体积分数  $V_f$  分别为: 0.3%(BF<sub>1</sub>)、0.4%(BF<sub>2</sub>)及 0.5%(BF<sub>3</sub>), 下同。

## 2 结果与分析

### 2.1 玄武岩纤维耐碱腐蚀性能

图 1~图 3 为玄武岩纤维在不同碱浓度下浸泡 1 天、3 天和 5 天后的偏光显微照片。由图可见, 玄武岩纤维随着碱溶液浓度的增加, 腐蚀更为明显, 其中在 1 mol/L NaOH 溶液中浸泡 5 天后的纤维表层剥落后直径损失约 1/3。表 2 为玄武岩纤维在不同碱浓度溶液和不同浸泡温度下的质量损失率。由表 2 数据可知, 玄武岩纤维随浸泡温度的提高腐蚀加重。其中玄武岩纤维在 20℃ 强碱溶液中的腐蚀速度相对平稳, 5 天后质量损失率为 13.23%; 而其在 80℃ 强碱溶液中的腐蚀相对严重, 5 天后的质量损失率达 65.82%。观察玄武岩纤维在不同温度的强碱溶液中腐蚀 5 天后的表观特征发现, 20℃ 下浸泡的纤维表面光泽已经失去, 但仍有一定的韧性; 而在 80℃ 下浸泡的纤维则基本失去韧性, 极易碎裂。图 4 为玄武岩纤维在 1 mol/L NaOH 溶液中 20℃ 和 80℃ 浸泡 5 天后的 SEM 显微照片, 其中在 20℃ 下浸泡的纤维表面被腐蚀, 出现剥离现象; 而在 80℃ 下浸泡的纤维则腐蚀严重, 出现明显的剥落。可见玄武岩纤维在强碱溶液中的腐蚀速度与浸泡温度有关, 随着浸泡温度的提高, 纤维腐蚀加快。表 2 数据还表明, 玄武岩纤维随浸泡温度和碱溶液浓度的提高, 腐蚀加重。其中玄武岩纤维腐蚀程度受浸泡温度的影响要大于受碱溶液浓度的影响。上述结果与国内部分文献结论相反, 其原因可能为两者模拟条件不同。后者模拟条件为玄武岩纤维在 1 mol/L NaOH 强碱溶液中煮沸数小时内的质量损失情况。此时碱溶液与玄武岩纤维反应不充分, 故质量损失不明显。而本文中设计的模拟条件,

表 1 玄武岩纤维的化学组成

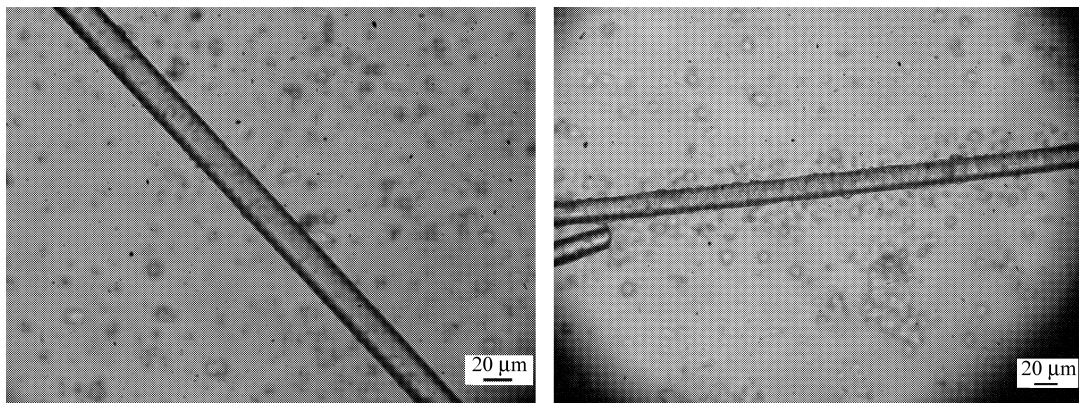
Table 1 Chemical composition of basalt fiber

Composition	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Mass fraction/%	56.45	9.04	16.41	6.71	4.54	0.00	2.26	3.84

表 2 玄武岩纤维质量损失率

Table 2 Mass loss rate of corroded basalt fiber

Alkali solution	Soaked temperature	Mass loss rate/%		
		1 d	3 d	5 d
1 mol/L NaOH	80℃	13.20	30.86	65.82
0.5 mol/L Ca(OH) <sub>2</sub>	80℃	0.50	21.62	53.71
1 mol/L NaOH	20℃	6.68	9.57	13.23

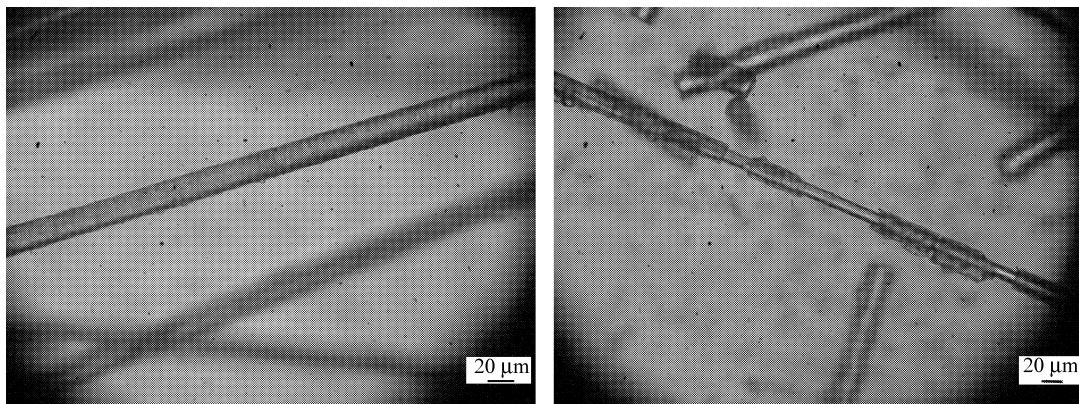


(a) 0.5 mol/L Ca(OH)<sub>2</sub>

(b) 1 mol/L NaOH

图 1 玄武岩纤维在 0.5 mol/L Ca(OH)<sub>2</sub> 和 1 mol/L NaOH 溶液中 80℃ 浸泡 1 天后的薄片分析

Fig. 1 Thin section of basalt fibers after being soaked in 0.5 mol/L Ca(OH)<sub>2</sub> and 1 mol/L NaOH for 1 d at 80℃

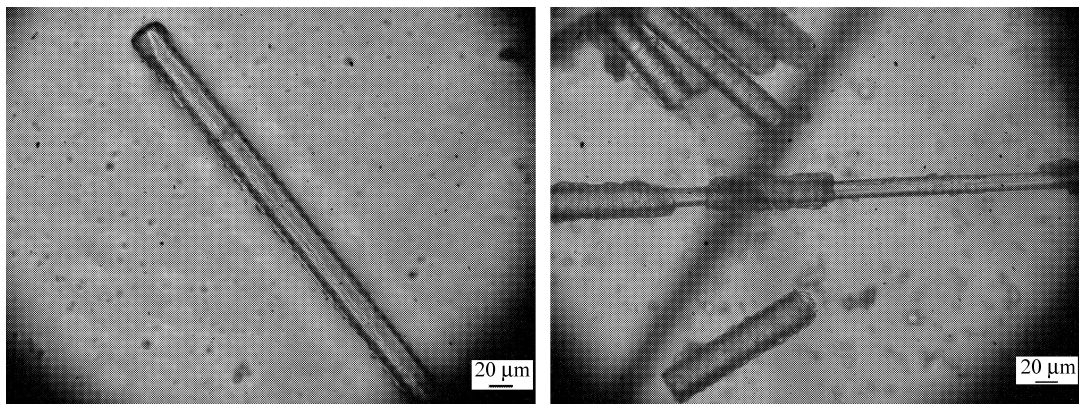


(a) 0.5 mol/L Ca(OH)<sub>2</sub>

(b) 1 mol/L NaOH

图 2 玄武岩纤维在 0.5 mol/L Ca(OH)<sub>2</sub> 和 1 mol/L NaOH 溶液中 80℃ 浸泡 3 天后的薄片分析

Fig. 2 Thin section of basalt fibers after being soaked in 0.5 mol/L Ca(OH)<sub>2</sub> and 1 mol/L NaOH for 3 d at 80℃



(a) 0.5 mol/L Ca(OH)<sub>2</sub>

(b) 1 mol/L NaOH

图 3 玄武岩纤维在 0.5 mol/L Ca(OH)<sub>2</sub> 和 1 mol/L NaOH 溶液中 80℃ 浸泡 5 天后的薄片分析

Fig. 3 Thin section of basalt fibers after being soaked in 0.5 mol/L Ca(OH)<sub>2</sub> and 1 mol/L NaOH for 5 d at 80℃

则保证了玄武岩纤维与碱溶液充分的反应时间，能够较客观地反应玄武岩纤维在碱溶液中的腐蚀性能。

研究表明<sup>[11]</sup>，玄武岩纤维是一种以非晶组分为主、在纤维方向较有序的中间序性物质(有序尺

寸约为 0.91 nm)。构成玄武岩纤维的结构单元是四面体[MO<sub>4</sub>](M=Si<sup>4+</sup>, Al<sup>3+</sup>)和八面体[MO<sub>6</sub>](M=Al<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>)。近邻四面体共顶连接构成链状骨架结构，四面体与八面体之间共棱连

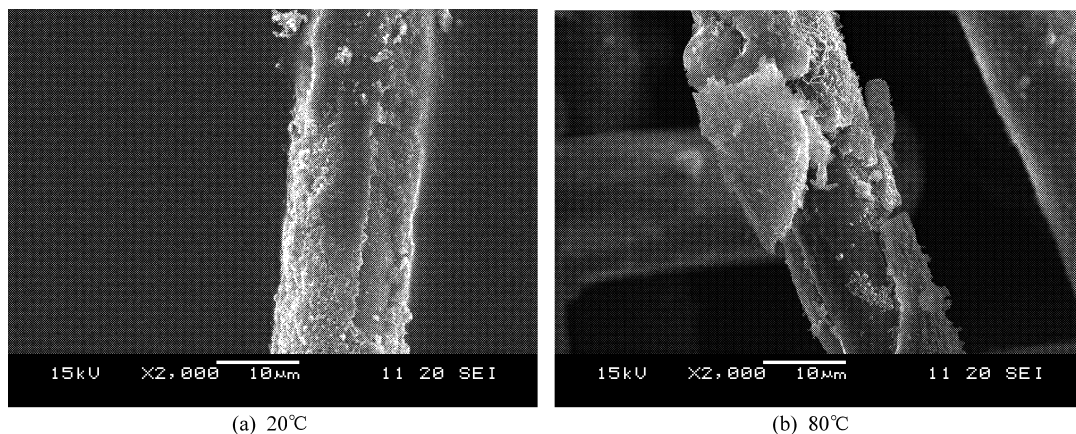
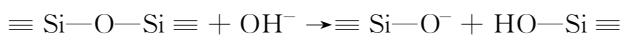


图4 玄武岩纤维在1 mol/L NaOH溶液中20°C和80°C浸泡5天后的显微照片

Fig. 4 Microstructure images of basalt fibers after being soaked in 1 mol/L NaOH for 5 d at 20°C and 80°C

接、八面体与八面体主要以共顶方式连接。金属阳离子  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  等位于多面体堆积产生的空隙中,以平衡电价、稳定结构。因此,连续玄武岩纤维本体具有近程有序远程无序的结构特征<sup>[12]</sup>。在碱性溶液中,玄武岩纤维中的硅氧四面体的桥氧与  $\text{OH}^-$  发生反应,如下式:



此时四面体中的桥氧键断裂,纤维表面被腐蚀,出现剥落现象。

## 2.2 玄武岩纤维混凝土力学性能

图5和图6分别为玄武岩纤维增强混凝土的抗折强度和抗压强度柱状图。由图5和图6可见,玄武岩纤维随掺量的增加对纤维混凝土的增强效果不明显,随着玄武岩纤维掺量的增加,纤维混凝土养护7天的抗压、抗折强度略有提高,但养护28天的强度均出现不同程度的倒缩。纤维混凝土的增强是通过纤维在混凝土内部均匀分散形成纤维网络来达到补强增韧的效果。分散的纤维能有效阻止混凝土内部微裂缝的产生和发展,从而达到一定的增强作用<sup>[13]</sup>。纤维与混凝土间的粘结性能是影响纤维发挥增强作用的一个重要因素,如果纤维因腐蚀而剥落、失去韧性,则会大大影响纤维增强增韧的效果,甚至会降低混凝土的强度。图7为玄武岩纤维在混凝土中的SEM照片。由图7可见,玄武岩纤维表层已被腐蚀,出现剥落现象。当混凝土中的玄武岩纤维表面出现腐蚀时,纤维与周围砂浆的粘结性能大大降低,此时的纤维不但不能有效阻止微裂缝的发展,而且还在一定程度上引导裂缝的产生。在外界载荷的作用下,腐蚀后的纤维网络失去支撑作用,混凝土强度出现损失。随着玄武岩纤维掺量

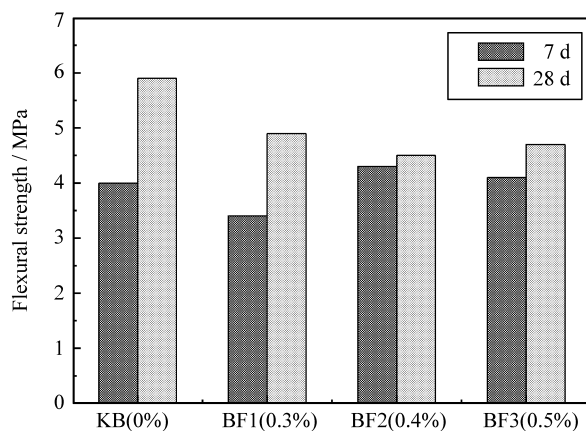


图5 玄武岩纤维增强混凝土抗折强度

Fig. 5 Flexural strength of BFRCC

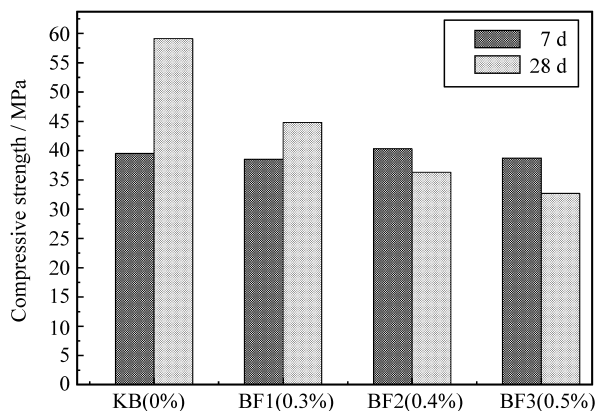


图6 玄武岩纤维增强混凝土抗压强度

Fig. 6 Compressive strength of BFRCC

的增加,混凝土内部因纤维引起的缺陷增多,混凝土后期强度反而有所降低。由文2.1可知,玄武岩纤维在20°C常温下腐蚀速度较慢,因此,常温下玄武岩纤维混凝土中早期纤维的腐蚀不严重,尚能提

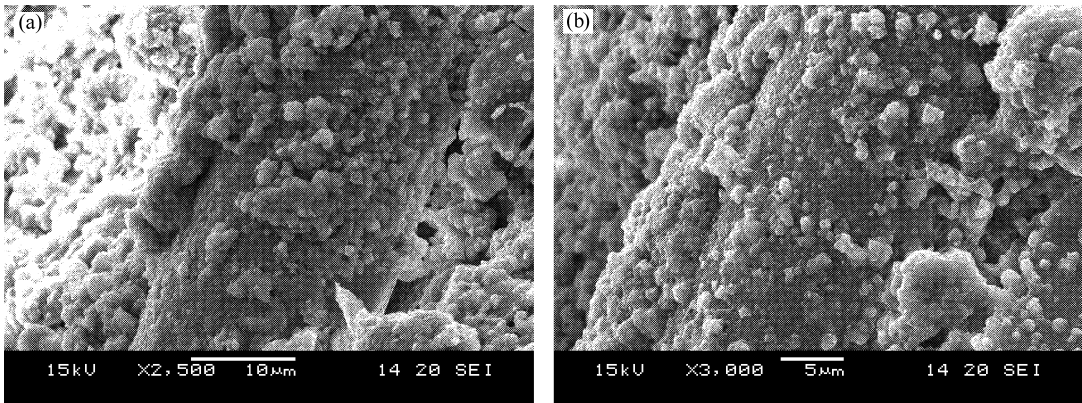


图7 纤维混凝土中玄武岩纤维的显微照片

Fig. 7 Microstructure images of basalt fibers in fiber reinforced concrete

高混凝土 7 天的强度；而 28 天后随着玄武岩纤维的进一步腐蚀，混凝土的强度损失越明显。

### 3 结论

(1) 玄武岩纤维在 1 mol/L NaOH 和 0.5 mol/L  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  碱溶液中 80℃ 浸泡 5 天后的质量损失率分别为 65.82% 和 53.71%，而在 20℃、1 mol/L NaOH 碱溶液中浸泡 5 天后的质量损失率为 13.32%。可见玄武岩纤维随碱溶液浓度和浸泡温度的提高，其腐蚀速度增大。其中，玄武岩纤维的碱腐蚀程度受温度的影响要大于受碱溶液浓度的影响。

(2) 玄武岩纤维混凝土随掺量的增加，养护 7 天强度略有提高，而养护 28 天后的强度降低明显。观察混凝土中玄武岩纤维发现，纤维表面被腐蚀。玄武岩混凝土后期强度损失可能与玄武岩纤维的耐碱性能不佳有关。

### 参考文献：

[1] 曹海琳, 郎海军, 孟松鹤. 连续玄武岩纤维结构与性能试验研究[J]. 高科技纤维与应用, 2007, 32(5): 71-74.  
Cao Hailin, Lang Haijun, Meng Songhe. Experimental research on the basic structure and properties of the continuous basalt fiber [J]. Hi - Tech Fiber and Application, 2007, 32(5): 71-74.

[2] 崔毅华. 玄武岩连续纤维的基本特性[J]. 纺织学报, 2005, 26(5): 120-121.  
Cui Yihua. Primary properties of basalt continuous filament [J]. J Textile Res, 2005, 26(5): 120-121.

[3] 李为民, 许金余. 玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(4): 65-69.  
Li Weimin, Xu Jinyu. Strengthening and toughening in basalt fiber reinforced concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(4): 65-69.

[4] 胡显奇, 申屠年. 连续玄武岩纤维在军工及民用领域的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(6): 75-77.  
Hu Xianqi, Shen Tunian. The applications of the CBF in war industry and civil fields [J]. Hi - Tech Fiber and Application,

2005, 30(6): 75-77.

[5] 沈刘军, 许金余, 李为民, 等. 玄武岩纤维增强混凝土静、动力性能试验研究[J]. 混凝土, 2008(4): 65-67.  
Shen Liujun, Xu Jinyu, Li Weimin, et al. Experimental investigation on the static and dynamic behavior of basalt fibers reinforced concrete [J]. Concrete, 2008(4): 65-67.

[6] Dias Dylmar Pentead, Thaumaturgo Clelio. Fracture toughness of geopolymeric & concretes reinforced with basalt fibers [J]. Cement & Concrete Composites, 2005, 27(1): 49-54.

[7] 王明超, 张佐光, 孙志杰. 连续玄武岩纤维及其复合材料耐腐蚀特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(10): 1255-1258.  
Wang Mingchao, Zhang Zuoguang, Sun Zhijie. Corrosion resistance characteristic of continuous basalt fiber and its reinforcing composites [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(10): 1255-1258.

[8] 霍文静, 张佐光, 王明超, 李敏, 孙志杰. 复合材料用玄武岩纤维耐酸碱性实验研究[J]. 复合材料学报, 2007, 24(6): 77-82.  
Huo Wenjing, Zhang Zuoguang, Wang Mingchao, Li Min, Sun Zhijie. Experimental study on acid and alkali resistance of basalt fiber used for composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(6): 77-82.

[9] Robinovic F N, Zenza V N, Makeeva L V. Stability of basalt fibers in a medium of hydrating cement [J]. Glass and Ceramics, 2001, 58(12): 11-12.

[10] Sim Jongsung, Park Cheolwoo, Moon Do Young. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures [J]. Composites Part B, 2005, 36(6/7): 504-512.

[11] 胡琳娜, 陈济舟. 玄武岩纤维微观结构的初步研究[C]// 第八届全国 X 射线衍射学术会议论文集. 南宁: 中国物理学会, 2003: 117-119.  
Hu Linna, Chen Jizhou. Study on the microstructure of basalt fiber [C]// Proceedings of the 8th National Symposium on X - Ray Diffraction. Nanning: Chinese Society of Physics, 2003: 117-119.

[12] 胡琳娜, 尚德库, 艾明星, 王广健. 玄武岩纤维复合材料研究[J]. 河北工业大学学报, 2003, 32(2): 21-24.  
Hu Linna, Shang Deku, Ai Mingxing, Wang Guangjian. The study on the basalt fiber composite material [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2003, 32(2): 21-24.

[13] Qian C X, Stroeven P. Development of hybrid polypropylene - steel fibre - reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(1): 63-69.