

# 玄武岩纤维及其格栅布对超高性能水泥基 复合材料力学性能的影响规律

石立安<sup>1,2</sup> 麻海燕<sup>1</sup> 戎志丹<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016; 2. 浙江建设职业技术学院建筑工程系, 杭州, 311231;  
3. 东南大学材料科学与工程学院, 南京, 210096)

**摘要:**通过大掺量超细工业废渣及采用普通工艺成功制备了3类超高性能水泥基复合材料,分别测试了其7,28,90 d的抗压强度和抗折强度,并对其进行了分析。讨论了玄武岩纤维及玄武岩纤维格栅布对其力学性能的影响,并对其弯曲荷载-挠度曲线进行了分析。结果表明,玄武岩纤维体积掺量为0.5%~1.5%时可以提高混凝土的抗折强度和抗压强度,但提高幅度有限,而玄武岩纤维格栅布对提高复合材料的力学性能有明显的效果,表现出良好的增强增韧效果。

**关键词:**玄武岩纤维;玄武岩纤维格栅布;超高性能水泥基复合材料;力学性能

**中图分类号:**TU528.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2012)03-0415-05

## Influence of Basalt Fiber and Its Geotextile on Mechanical Performance of Ultra-High Performance Cement Composites

Shi Li'an<sup>1,2</sup>, Ma Haiyan<sup>1</sup>, Rong Zhidan<sup>3</sup>

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;  
2. Department of Building Engineering, Zhejiang College of Construction, Hangzhou, 311231 China;  
3. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

**Abstract:** Three kinds of ultra-high performance cement composites (UHPCCs) are prepared by substitution of ultra-fine industrial waste for large quantity of cement and by using the conventional technology. The compressive strength and flexural strength are tested when the concretes are 7, 28, 90 d. The influence of basalt fiber and its geotextile on the mechanical performance of UHPCC are discussed. The flexural load-displacement curves are studied. Results show that basalt fiber with volume fraction of 0.1%~0.5% has little benefit for the accretion of the flexural strength and compressive strength of UHPCC, whereas, the geotextile of basalt fiber improves the mechanical performance of UHPCC greatly.

**Key words:** basalt fiber; geotextile of basalt fiber; ultra-high performance cement composites (UHPCCs); mechanical performance

混凝土材料是世界上研究最多、应用极广的土木工程结构材料。随着材料科学与应用技术的不断发展与进步,特别是我国重大基础设施如桥梁、铁道、港口、码头、机场、水电大坝、隧道、涵洞、国防防护等工程的兴建,不仅推动了结构材料用量巨幅提

升,而且对材料性能的要求也越来越高。传统的普通混凝土材料由于其抗拉、抗弯强度低以及脆性大、易开裂等缺点已不能满足上述发展的要求,研发新型的超高性能水泥基复合材料以成为目前混凝土技术发展方向之一<sup>[1-4]</sup>。利用工业废渣制备超

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2009CB623203)资助项目;国家住建部科技资金(2011-K4-24)资助项目;浙江省教育厅科研资金(y200909029)资助项目。

**收稿日期:**2011-12-03;**修订日期:**2012-03-19

**通讯作者:**石立安,男,副教授,1953年出生,E-mail:shilian06@126.com。

高性能水泥基复合材料大大促进了混凝土材料组成与结构的优化且具有节省资源和能源、耐久性优异、性价比高特点,同时,掺加纤维能提高水泥基体的韧性、抗拉强度和抗弯强度,使水泥基材料所固有的脆性问题得到极大的改善,从而满足土木工程日益苛刻的要求,也是建筑材料走可持续发展道路的一个重要途径。

玄武岩纤维被称为“岩石之丝”,100%由矿物组成,制造时不添加其他成份,是以纯天然玄武岩矿石为原料,在1 450~1 500 °C的高温熔融后,通过铂铑合金拉丝漏板高速拉制而成的连续纤维。由于玄武岩纤维在生产及应用过程中无环境污染,无工业垃圾,因此属于一种新型的绿色环保纤维,正被积极推广到航空、建筑、交通、军事等领域,成为目前研究的热点<sup>[5-8]</sup>。

玄武岩纤维因其优异的耐高温、耐烧蚀、耐酸碱性能、热稳定性能、抗冲击性能以及取材广泛、性价比而被誉为21世纪新型绿色环保材料,目前已在军工和民用领域得到越来越多的应用。在建筑领域,将短切玄武岩纤维掺入混凝土中以增强其阻

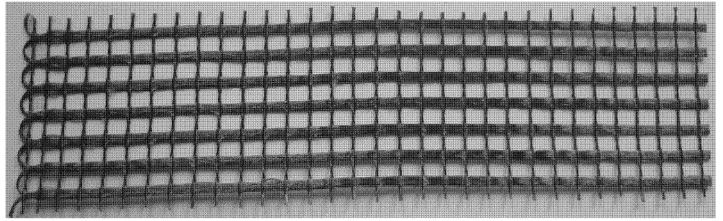
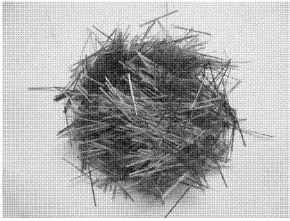


图1 玄武岩纤维及玄武岩纤维格栅布实物图

表1 超高性能水泥基材料的配合比 kg/m<sup>3</sup>

代号	水泥	硅灰	粉煤灰	外加剂	砂	水
KB	585	98	293	19.5	1 170	166

表1中,KB表示未掺纤维的空白基体试样,其水胶比为0.17。在此基础上采用混合搅拌方式掺加了体积分数分别为0.1%,0.3%,0.5%,1.0%和1.5%的玄武岩纤维(分别记为BF1,BF2,BF3,BF4和BF5),另外,玄武岩纤维格栅布分别采用1层及3层的方式均匀分布在试件中,其换算体积分数分别为0.06%和0.2%(分别记为TBF1和TBF2)。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 成型

混凝土成型过程中先将原材料(水泥、粉煤灰、硅灰、砂)干拌均匀,然后在搅拌过程中将混合均匀的水和外加剂缓慢地倒入搅拌机内,湿拌2~3 min。当混合料进入粘流状态后,均匀地撒入连续

裂性能及力学性能;玄武岩纤维制成织物或片材可用于混凝土结构的补强、修复与加固;玄武岩纤维增强复合塑料(Fiber reinforced plastic,FRP)筋可取代钢筋用于新建混凝土结构中。基于玄武岩纤维在提高混凝土性能中的较大竞争优势,本文旨在探索连续玄武岩纤维及玄武岩纤维格栅布在超高性能水泥基复合材料中应用的可行性。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

水泥:南京江南-小野田生产的P·II 52.5R 硅酸盐水泥;超细粉煤灰:南京热电厂超细粉煤灰,比表面积600 m<sup>2</sup>/kg;硅灰:埃肯公司生产的微硅粉,比表面积20 000 m<sup>2</sup>/kg;细集料:最大粒径2.5 mm的普通黄砂,细度模数2.35,连续级配;高效减水剂:聚羧酸型高效减水剂,固含量35%,减水率大于40%;连续玄武岩纤维:长度18 mm,直径11 μm,弹性模量79.3~93.1 GPa,密度2.8 g·cm<sup>-3</sup>,抗拉强度3 500 MPa,断裂伸长率3.1%;玄武岩纤维格栅布:1 600 mm×40 mm×2 mm,网格孔为5 mm×5 mm,见图1。

超高性能水泥基复合材料基体的配合比见表1。

玄武岩纤维,继续搅拌2~3 min。之后在模具中浇筑成型,并适当加以振动以增进密实。标准养护1 d后拆模,试件标准养护到规定龄期后测试其各项力学性能。而对于TBF系列的玄武岩纤维格栅布,采用特制模具先将格栅布均布于40 mm×40 mm×160 mm的混凝土钢模具中(固定好位置),之后将搅拌好的空白水泥基复合材料浇筑钢模中成型,然后在振动台略微振捣、收浆、抹平即可。同样标准养护1 d后拆模并标准养护到规定龄期后测试其各项力学性能。

### 1.2.2 力学性能

弯曲试件尺寸为:40 mm×40 mm×160 mm的棱柱体,采用3点弯曲,跨距100 mm,试验设备为深圳新三思公司生产的CMT5105电子万能试验机,加载速度为0.5 mm/min,试验记录下试件的弯曲荷载-挠度曲线。

抗压试件为:40 mm×40 mm×40 mm 的立方体,实验设备为无锡新路达仪器设备有限公司生产的TYA-2000型电液式压力试验机。

弯曲韧性采用美国材料与试验协会ASTM1018-98韧性指数法来衡量钢纤维增强UHPCC的弯曲韧性<sup>[9]</sup>。此法是利用理想弹塑性体作为材料韧性的参考标准,选用弯曲荷载-挠度曲线的初裂点挠度 $\delta$ 的倍数作为终点挠度,即3倍( $3\delta$ )、5.5倍( $5.5\delta$ )、10.5倍( $10.5\delta$ ),如图2所示。弯曲韧性指数用 $I_5, I_{10}, I_{30}$ 表示,即 $I_5 = S_{OACD}/S_{OAB}, I_{10} = S_{OAEF}/S_{OAB}; I_{30} = S_{OAGH}/S_{OAB}$ 。

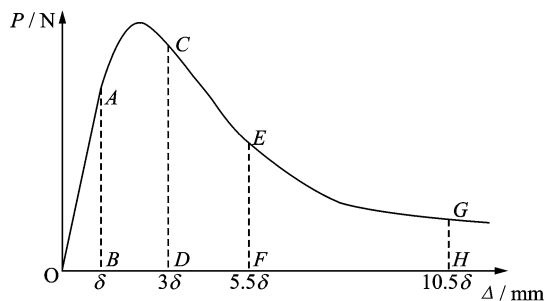


图2 ASTM1018-98韧性指数法

## 2 试验结果

### 2.1 抗压强度

超高性能水泥基复合材料在不同龄期(7, 28, 90 d)下的抗压强度见图3。可以看出,不同系列的超高性能水泥基复合材料的抗压强度随着龄期的增长而增大,但相对于空白试件,BF系列仅参加0.5%~1.0%增长幅度较大。这主要是由于该纤维本身的脆性很大,在搅拌的过程中一部分发生了断裂,故其在水泥基材料中也不能起到很好的增强效果,且如果玄武岩纤维掺量过高(>1.0%),过多的

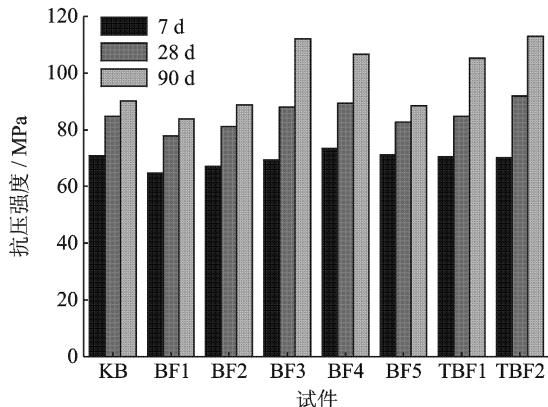


图3 不同龄期对UHPCC抗压强度的影响

纤维会发生团聚,使得在超高性能水泥基复合材料制备的过程中引入了更多的缺陷,从而使其抗压强度呈下降趋势。以玄武岩纤维格栅布增强的水泥基复合材料的抗压强度相对于空白试件及BF试件的抗压强度也略有不同程度的提高,但提高幅度不大,如以相同体积率来计算,玄武岩纤维格栅布的增强效果要明显好于连续玄武岩纤维,另外可以肯定的是,随着龄期的增加,火山灰反应不断进行,其抗压强度还可以进一步提高。

### 2.2 抗折强度

不同养护龄期下的纤维增强UHPCC的抗折强度见图4。可以看出,不同系列的超高性能水泥基复合材料的抗折强度随着龄期的增长而增大,以搅拌方式掺加连续玄武岩纤维的BF系列的抗折强度相对于空白试件在不同龄期下抗折强度相差不大,甚至还略有降低的趋势。而掺加玄武岩纤维格栅布的TBF系列的抗折强度相对于空白试件及BF试件的抗折强度则有不同程度的提高,且提高幅度明显。TBF1及TBF2相对于KB而言,其90 d的抗折强度提高幅度分别达30%和70%以上。

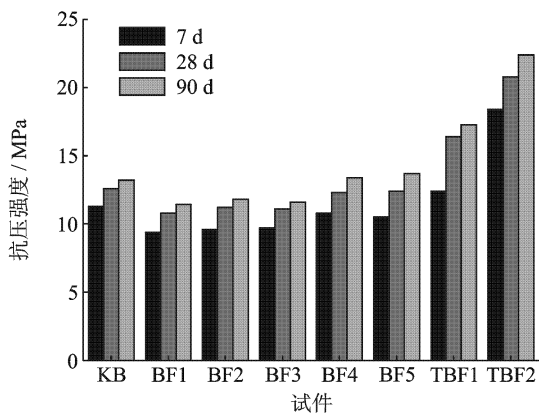


图4 不同龄期对UHPCC抗折强度的影响

玄武岩纤维以搅拌的方式加入超高性能水泥基材料中,由于该纤维本身的脆性很大,在搅拌的过程中很大一部分都发生了断裂,同时该纤维单丝直径很小,虽然其数量较多,能起到很好的抑制微裂纹的作用,但其在水泥基材料中的增韧效果却不明显。而掺加玄武岩纤维格栅布的超高性能水泥基复合材料,由于纤维的二维分布,且格栅布在编制过程中纤维束之间采用胶结的方式搭接,能起到很好的传递荷载的作用,在弯曲荷载作用下,格栅布的网状结构能有效地抑制和延缓裂纹的萌生和发

展,从而能起到很好的增韧效果,故水泥基复合材料的抗折强度得到了很大的提高。由于超高性能水泥基复合材料中掺入了40%的超细工业废渣,因此随着养护龄期的延长,其火山灰效应不断发挥,提高了基体的密实度和纤维与基体的界面粘结力,因此可以推测该水泥基材料的抗折强度将随着龄期的不断增大而有所提高。

### 2.3 弯曲韧性

以90 d龄期下的BF5, TBF1和TBF2为例,其荷载-挠度曲线如图5所示。

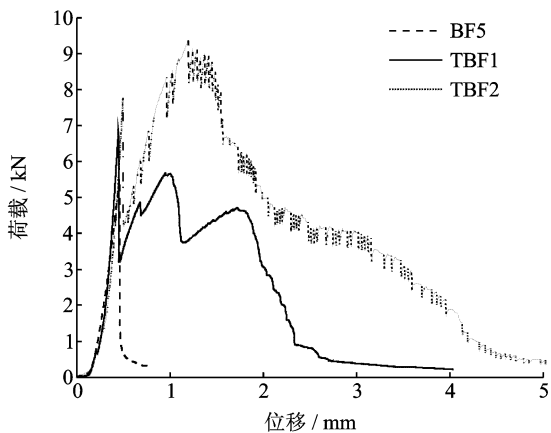


图5 BF5, TBF1和TBF2的荷载-挠度曲线(90 d)

分析图5可得90 d龄期下的BF5, TBF1和TBF2的弯曲韧性指数如表2所示。

表2 BF5, TBF1和TBF2超高性能水泥基复合材料的弯曲韧性(90d)

编号	韧性指数			抗弯韧性/ (kN·mm)
	$I_5$	$I_{10}$	$I_{30}$	
BF5	1.21	1.21	1.21	0.93
TBF1	6.55	11.61	12.43	9.09
TBF2	9.06	16.06	21.46	19.6

从表2中可以看出在相同养护龄期(90 d)内,掺加连续玄武岩纤维(体积率为1.5%)的水泥基复合材料的韧性指数最低,掺加3层玄武岩格栅布的水泥基复合材料的韧性指数最高。可以看出,掺加连续玄武岩纤维对水泥基材料的增韧效果不明显(同2.2节的结果一致),掺加格栅布后由于格栅布自身的强弯曲性能及与水泥基材料的强机械咬合力,使得水泥基复合材料整体的弯曲韧性得以大幅提高。

韧性可以定义为材料或结构从荷载作用到失效为止吸收能量的多少,即可以用荷载-挠度曲线下包围的面积来表示韧性。通过计算图5中试件弯

曲荷载-挠度曲线下的面积得到UHPCC的抗弯韧性,结果如表2所示。从表2中可以看出,相对于掺加连续玄武岩纤维的水泥基材料,掺加三层玄武岩格栅布的水泥基复合材料的弯曲韧性可提高20倍以上,显示出了玄武岩格栅布对水泥基复合材料优异的增强增韧效果。

### 3 玄武岩纤维增强水泥基材料机理

采用扫描电镜观察了玄武岩纤维同水泥基材料的界面结合情况,如图6所示。

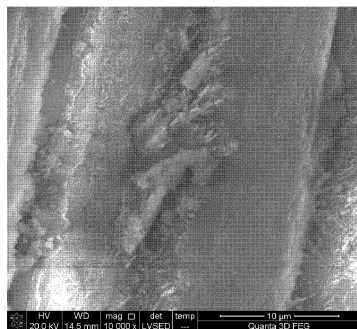


图6 玄武岩纤维同水泥基材料的界面结合情况

从图6中可以看出,玄武岩纤维同水泥基的结合十分牢固,玄武岩周围被水泥水化产物所包裹,纤维与水泥基体之间没有界面裂缝,这主要是由于玄武岩纤维是以天然的玄武岩矿石作为原料,与水泥基材料有着基本相同的成分,密度也较接近,且其温度变形系数类似,不存在温度膨胀导致的界面裂缝,所以玄武岩纤维同水泥基材料间的相容性较好,两者之间有着很强的物理结合,形成统一的整体,从而有利于提高复合材料的密实度,两者协同作用以提高复合材料的整体性能。

### 4 结论

(1) 玄武岩纤维以其自身的优异性能在诸多领域中得到广泛的应用,但由于其自身的脆性,在水泥基复合材料掺加连续玄武岩纤维可以提高复合材料的力学性能,但其提高幅度有限,且其最佳掺量为0.5%~1.0%。

(2) 玄武岩纤维格栅布能有效提高超高性能水泥基复合材料的抗折强度、抗压强度和弯曲韧性,这主要是由于玄武岩格栅布的二维网状结构能有效抑制微裂纹的萌生和发展。

(3) 玄武岩纤维与水泥基材料的界面粘结十分

牢固,两者之间有很强的物理结合,保证了复合材料的整体均匀性,从而提升了复合材料的整体性能。

#### 参考文献:

- [1] Van Tuan N, Ye Guang, Van Breugel K, et al. Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash[J]. *Cement and Concrete*, 2011,41(11):1104-1111.
- [2] Garas V Y, Kahn L F, Kurtis K E. Short-term tensile creep and shrinkage of ultra-high performance concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009,31(3),147-152.
- [3] Granger S, Loukili A, Cabot G P, et al. Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis [J]. *Cement and Concrete Research*,2007, 37(4): 1947-1954.
- [4] 戎志丹,孙伟. 粗集料对超高性能水泥基材料动态力学性能的影响[J]. *爆炸与冲击*,2009, 29(4):361-366.
- Rong Zhidan, Sun Wei. Influences of coarse aggregate on dynamic mechanical behaviors of ultrahigh-performance cementitious composites[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(4):361-366.
- [5] Sim J S, Park C, Moon Y. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures [J]. *Composites:Part B:Engineering*, 2005, 36(6/7):504-512.
- [6] 叶邦土,蒋金洋,孙伟,等. 玄武岩纤维增强大掺量矿物掺合料高强混凝土试验研究[J]. *东南大学学报*, 2010,41(3):611-615.
- Ye Bangtu, Jiang Jinyang, Sun Wei. Experimental study on reinforcing HSC with large volume mineral admixtures basalt fibers [ J ]. *Journal of Southeast University*, 2011, 41(3):611-615.
- [7] 唐明,杨欢. 玄武岩纤维增强水泥基复合材料研究[J]. *混凝土*,2010,5:76-78.
- Tang Ming, Yang Huan. Basalt fiber reinforce cement-based composite materials [J]. *Concrete*, 2010, 5:76-78.
- [8] 齐建林,朱江. 玄武岩纤维在混凝土中的应用与研究进展[J]. *混凝土*,2011,7:46-49.
- Qi Jianlin, Zhu Jiang. Study and application of basalt fiber in concrete [J]. *Concrete*, 2011, 7: 46-49.
- [9] ASTM. ASTM C1018-98 standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete [S]. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, 1998.