

doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.201903002

集束 PBO 纤维增强 UHPC 性能的研究

孙义牛,郭建好,管仁彪,官 海

(智聚装配式绿色建筑创新中心南通有限公司,江苏 南通 226010)

摘要:钢纤维和 PVA 纤维是 UHPC 常用的增强纤维。但是,钢纤维易腐蚀,且容易扎伤人。PVA 纤维力学强度不高,限制了其应用。采用集束 PBO 纤维增强 UHPC,考察其流动度、力学强度和收缩性能,并与钢纤维-UHPC、PVA 纤维-UHPC 进行比较。结果显示集束 PBO 纤维增强 UHPC 的综合性能优于 PVA 纤维增强 UHPC,且掺量为 2% (体积百分比) 时,集束 PBO 纤维增强 UHPC 的抗弯性能和收缩性能与钢纤维增强 UHPC 相当,抗压强度则低 20%。

关键词:PBO 纤维;UHPC;流动度;力学强度

中图分类号:TU528 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2019)03-0012-05

超高性能混凝土(UHPC)是指以水泥、硅灰等活性掺合料、细骨料、高性能聚羧酸减水剂和高强度增强纤维等原料生产的水泥基材料。它具有高流动性,蒸汽养护后,压缩强度能达到 200 MPa 以上。UHPC 用于建筑结构构件时,增强纤维使用高强度钢纤维;用于外挂装饰板时,增强纤维使用聚乙烯醇(PVA)纤维。GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》规定:钢纤维需满足直径 0.18 ~ 0.22 mm,长度 12 ~ 16 mm,抗拉强度 $\geq 2\,000$ MPa。钢纤维赋予 UHPC 超高强度和超高韧性,但是钢纤维也存在问题。第一,钢纤维容易生锈,构件表面出现密密麻麻的锈点,表面被污染,不美观;第二,钢纤维容易刺伤人,安全性不佳;第三,在腐蚀性自然环境中,钢纤维在 UHPC 构件内部,不会被腐蚀,但是当构件出现小裂缝时,内部的钢纤维极易被腐蚀,造成力学性能下降。PVA 纤维耐腐蚀,也能对 UHPC 起到增强增韧的效果,但是其性能远不及钢纤维,不能单独用于结构构件,且掺量过大时,会影响 UHPC 流动度。

聚对苯撑苯并双恶唑(PBO)纤维被称为“超级纤维”,具有耐酸耐碱耐腐蚀、超高强度、超高模量、超高耐热性、超阻燃性。全世界目前只有日本东洋纺生产,商标为“zylon”。各种常用增强纤维的拉伸性能如图 1 所示,从图中可以看出,PBO

纤维拉伸强度大于 5 000 MPa,弹性模量大于 50 GPa,拥有最完美的力学性能。梁希凤等^[1]研究了单项 PBO 纤维片材增强混凝土的弯曲性能,发现 PBO 纤维体积含量达到 1.35% 时,弯曲强度为素混凝土的 3.6 倍,而且破坏形式由脆性破坏转变为韧性断裂。屈慕超等^[2]研究了 PBO 纤维与 CF(碳纤维)协同增强混凝土的弯曲性能,发现 PBO 纤维和 CF 制作的片材协同增强混凝土,具有比单一纤维更好的弯曲强度和破坏吸收能。但是他们都是将 PBO 纤维制作成长度 160 mm,宽度 40 mm 的单向单一片材,且对象都是素混凝土,没有研究其工作性能和收缩性能。目前国内还无人将 PBO 纤维应用于 UHPC。

本文研究了 PBO 纤维增强 UHPC 的工作性能、力学性能和收缩性能,并与钢纤维增强 UHPC 和 PVA 纤维增强 UHPC 进行了性能比较,分析了其作用机理,希望能将 PBO 纤维增强 UHPC 用于建筑结构构件。

1 试验

1.1 使用材料

试验使用材料如表 1 所示。目前市售的东洋纺 PBO 纤维是复丝,它由几百根直径 0.012 mm 的单丝并合而成。如果直接掺入到 UHPC 中,流

收稿日期:2018-12-17

作者简介:孙义牛(1986—),男,江苏南京人,工程师,硕士,主要研究方向为装配式预制构件钢筋连接体系和外墙结构保温装饰一体化。

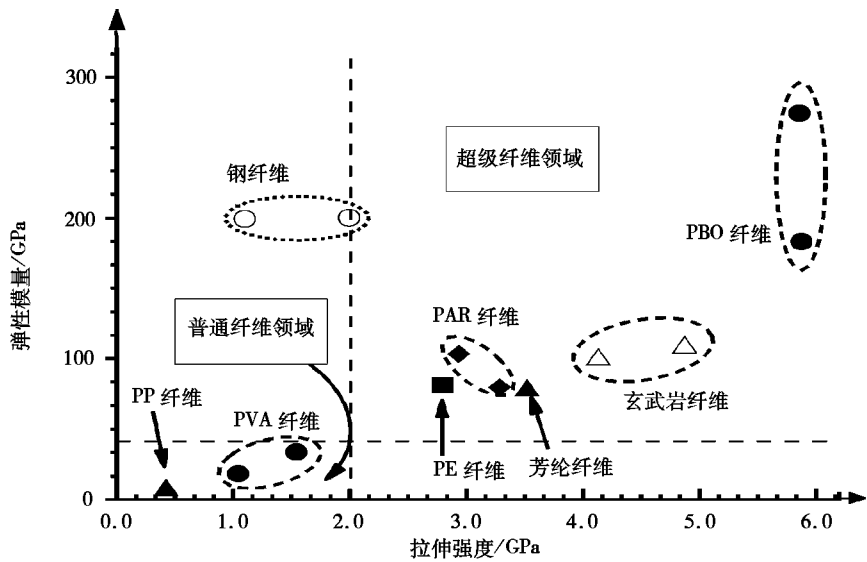


图 1 各种纤维的拉伸强度与弹性模量

Fig. 1 Tensile strength and young's modulus of various fibers

动性将非常差。为了同时保证材料的强度和流动性,将 PBO 纤维单丝用专用树脂进行集束加工,这样搅拌时可以避免纤维束被破开。本试验 3 种增强纤维的物性数据、PBO 单丝的物性数据、预混料的配合比分别如表 2、表 3 和表 4 所示。

1.2 搅拌及养护方法

将预混料、减水剂和水投入到强制式搅拌机中,搅拌 10 min,倒入纤维,搅拌 5 min,保证纤维分散均匀。浇筑试块成型后,在室温 20 ℃下,覆膜养护 24 h,脱模,90 ℃蒸汽养护 48 h(升温 and 降温速度均为 15 ℃/h)。

表 1 试验使用材料
Table 1 Laboratory materials

种类	概要
PII52.5 水泥	南京江南 - 小野田水泥厂
30 ~ 50 目细砂	江西鄱阳湖湖砂
50 ~ 100 目 细砂硅灰	上海天恺 940 黑硅灰
消泡剂	南京四新 G-20
减水剂	苏州兴邦 PC-1060 液体聚羧酸减水剂
钢纤维	上海真强纤维有限公司
PVA 纤维	日本可乐丽 (kuraray)
PBO 纤维	日本东洋纺
水	南京江宁区自来水, 水温 20 °C

表 2 三种增强纤维的物性
Table 2 Physical properties of three kinds of reinforcing fibers

纤维种类	厂家	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	直径/mm	长度/mm	拉伸强度/GPa	弹性模量/GPa
钢纤维	上海真强	7.85	0.2	15	2.0	200
PVA 纤维	日本可乐丽	1.3	0.2	12	0.91	29
集束 PBO 纤维	日东纺	1.51	0.23	15	3.5	141

注:PVA 纤维为日本可乐丽 Ductal 专用,型号为 RF350 $\times$ 12 mm

表 3 PBO 单丝的物性
Table 3 Physical property of PBO single fiber

物性参数	数值
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.54
直径/mm	0.012
拉伸强度/GPa	5.8
弹性模量/GPa	180
断裂伸长率/%	3.5
分解温度/ $^{\circ}\text{C}$	650
水含量/%	2.0
LOI	68

表 4 预混料的配合比
Table 4 Mix proportion of premix

物料	用量
水泥 PII 52.5	765
30 ~ 50 目砂	472
50 ~ 100 目砂	472
硅灰	158
偏高岭土	135
消泡剂	0.8
水	190

1.3 测试项目和试验方法

测试项目、试块尺寸及参考标准如表 5 所示。

初裂弯拉强度为三点抗弯测试中,曲线由线性转变为非线性时的转折点所对应的强度。

表 5 测试项目、试块尺寸及参考标准

Table 5 Test items, sample size and test standard

测试项目	试块尺寸	参考标准
流动度		GB/T 50448—2008《水泥基灌浆材料应用技术规范》
抗压强度	40 mm×40 mm×160 mm	
抗弯强度(三点)	40 mm×40 mm×160 mm	GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》
初裂弯拉强度	40 mm×40 mm×160 mm	
收缩性	100 mm×100 mm×515 mm	GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》

2 试验结果与分析

2.1 流动度

UHPC 的施工性能由流动度来表征。UHPC 要满足浇筑要求,初始流动度必须大于 250 mm。减水剂添加量与 UHPC 流动度的关系如图 2 所示。由图 2 可知,减水剂掺量大于 21 kg/m³ 时,UHPC(1% 集束 PBO 纤维)初始流动度大于 250 mm,满足规格值。减水剂掺量大于 27 kg/m³ 时,UHPC(2% 集束 PBO 纤维)初始流动度也无法满足施工要求。此外,减水剂掺量越大,UHPC(2% 钢纤维)流动度增大明显。减水剂掺量大于 23 kg/m³ 时,UHPC(1.75% PVA 纤维)初始流动

度大于 250 mm,满足施工要求。综上所述,体积掺入量一定时,流动度:UHPC(钢纤维)>UHPC(集束 PBO 纤维)>UHPC(PVA 纤维),且集束 PBO 纤维掺量小于 2% 时,流动度能满足施工要求。

UHPC 的流动度与纤维的掺量和吸水率有关^[3]。钢纤维属于金属,具有很高的表面能和憎水性,吸水率近似为零。集束 PBO 纤维和 Ductal 专用的 PVA 纤维虽然也是憎水性纤维,但是本质上是有机纤维,搅拌过程中,表面会吸附少量的拌合水,降低了流动度,纤维掺量变化对流动度影响相较于钢纤维更大。

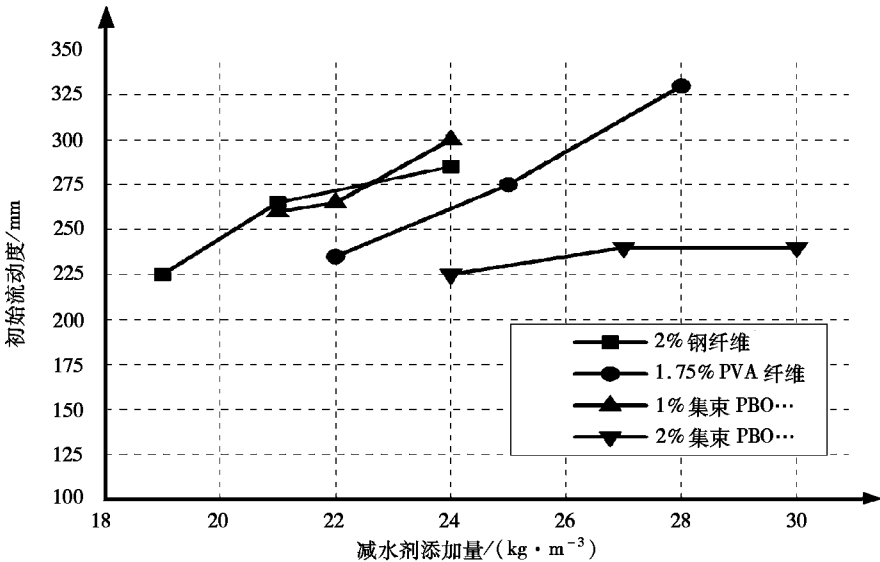


图 2 减水剂添加量 - 初始流动度关系图

Fig. 2 Effect of water-reducing agent content on the initial fluidity

2.2 抗压强度

各纤维增强 UHPC 的力学性能如表 6 所示。由表 6 可知,UHPC(1% 集束 PBO 纤维)的抗压强度大于 180 MPa,满足 UHPC 最高规格值。集束 PBO 纤维掺量越大,抗压强度越小。UHPC(2% 集束 PBO 纤维)的抗压强度比 UHPC(2% 钢纤维)低约 20%,比 UHPC(1.75% PVA 纤维)高约 40%。

钢纤维属于金属纤维,是各向同性材料,在拉伸方向和压缩方向上都具有超高的强度^[3]。集束 PBO 纤维和 PVA 纤维同属有机纤维,是各项异性材料,在拉伸方向上具有很高的强度,但在其他方向上强度则相对很低。从表 2 可知,集束 PBO 纤维的拉伸强度和弹性模量远大于 PVA 纤维,因此在压缩方向上,集束 PBO 纤维抵抗变形的能力比 PVA 纤维更高。综上所述,压缩强度:UHPC(2% 钢纤维)≥UHPC(1% 集束 PBO 纤维)≈UHPC(2% 集束 PBO 纤维)≥UHPC(1.75% PVA 纤维)。

2.3 抗弯强度

由表 6 可知,集束 PBO 纤维掺量越大,抗弯强度增大明显,初裂弯拉强度不变,且远高于

PVA 纤维增强 UHPC。UHPC(2% 集束 PBO 纤维)与 UHPC(2% 钢纤维)有同等的抗弯性能。

三点抗弯试验中,纤维在弯曲方向上受到拉伸作用,且起主导作用。由表 2 可知,集束 PBO 纤维拉伸强度最大,其次是钢纤维,PVA 纤维最低。集束 PBO 纤维和 PVA 纤维同属各向异性材料,只有拉伸方向的纤维起作用,因此抗弯强度:UHPC(2% 集束 PBO 纤维)≥UHPC(1% 集束 PBO 纤维)≥(1.75% PVA 纤维)。钢纤维属于各向同性材料,各个方向的纤维均发挥抵抗作用。相同体积掺量下,发挥抑制变形作用的钢纤维数量比集束 PBO 纤维更多,弥补了钢纤维拉伸强度的不足。因此 UHPC(2% 钢纤维)的抗弯强度与 UHPC(2% 集束 PBO 纤维)大致相等。

三点抗弯试验中,初裂弯拉强度与纤维的种类和掺量无关,只与基体材料混凝土的抗压强度有关,初裂抗弯强度应与抗压强度规律一致^[4]。根据上述 2.2 抗压强度的结论,初裂抗弯强度:UHPC(2% 钢纤维)≥UHPC(1% 集束 PBO 纤维)≈UHPC(2% 集束 PBO 纤维)≥UHPC(1.75% PVA 纤维)。

表 6 各纤维增强 UHPC 的力学性能

Table 6 Mechanical properties of various fiber reinforced UHPC			MPa
纤维掺量	抗压强度	抗弯强度	初裂弯拉强度
2% 钢纤维	222	37.6	27.1
1.75% PVA 纤维	125	18	8
1% 集束 PBO 纤维	185	24.2	21.9
2% 集束 PBO 纤维	177	38.3	21.9

2.4 收缩性能

各纤维增强 UHPC 的收缩性能如表 7 所示。由表 7 可知,UHPC(1.75% PVA)的收缩率最大,UHPC(集束 PBO 纤维)与 UHPC(2% 钢纤维)有同等的收缩率,且集束 PBO 纤维的掺量不影响收

缩率。这是因为 UHPC 的收缩率与纤维的弹性模量有关。纤维的弹性模量越大,UHPC 的收缩率越小。由表 2 可知,集束 PBO 纤维与钢纤维的弹性模量是同等级,故两者具有相同等级抑制收缩变形的性能,且两者远大于 PVA 纤维。

表 7 各纤维增强 UHPC 的收缩性能

Table 7 Shrinkage properties of various fiber reinforced UHPC			
纤维掺量	一次养护(20 ℃,24 h)/10 ⁻⁶	二次养护(90 ℃,48 h)/10 ⁻⁶	总收缩率/10 ⁻⁶
2% 钢纤维	223	626	849
1.75% PVA 纤维	551	396	947
1% 集束 PBO 纤维	277	600	877
2% 集束 PBO 纤维	351	513	864

3 结论

集束 PBO 纤维克服了钢纤维易生锈、安全性不高等缺点,同时力学性能大于钢纤维和 PVA 纤维。本文用集束 PBO 纤维增强 UHPC,考察了其工作性能、力学性能和收缩性能,并与 UHPC(钢纤维)、UHPC(PVA 纤维)进行了比较。结论如下:

(1) 集束 PBO 掺量越高,UHPC 的流动性越低,掺量小于 2% 时,流动度大于 250 mm,工作性

能可以满足施工要求。

(2) 相比于 PVA 纤维增强 UHPC,集束 PBO 纤维增强 UHPC 具有更高的抗压强度、抗弯强度和更低的收缩率,克服了 PVA 纤维增强 UHPC 力学性能不高等缺陷。

(3) 2% 集束 PBO 纤维-UHPC 与 2% 钢纤维-UHPC 具有同等的抗弯性能与收缩率,抗压强度则比 2% 钢纤维-UHPC 低 20%,具有一定的实用价值。

参考文献:

[1] 梁希凤,张春华,屈慕超,等. PBO 纤维片材加固混凝土弯曲性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2009(4):77-79,82.

[2] 屈慕超,张春华,梁希凤,等. PBO 纤维和碳纤维混杂增强混凝土抗弯曲性能研究[J]. 高科技纤维与应用,2009,34(2):18-21,29.

[3] 程站起,夏乃凯. 考虑界面影响的钢纤维混凝土细观力学等效性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2014,35(1):104-107.

[4] 王成志. 超高性能混凝土结构抗弯性能试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.

Study on the Performance of Clustered PBO Fiber Reinforced UHPC

SUN Yiniu, GUO Jianhao, GUAN Renbiao, GONG Hai

(ZHIJU Fabricated Green Building Innovation Center Nantong Co., LTD, Nantong Jiangsu 226010, China)

Abstract: Steel fibers and PVA fibers are commonly used as reinforcing fibers in UHPC. However, steel fibers are prone to corrosion and puncture injury. The mechanical strength of PVA fiber is not high, which limits its application. The fluidity, mechanical strength and shrinkage properties of cluster PBO fiber reinforced UHPC were investigated and compared with those of steel fiber-UHPC and PVA fiber-UHPC. The results show that the comprehensive performance of cluster PBO fiber reinforced UHPC is better than that of PVA fiber reinforced UHPC. The flexural and shrinkage properties of cluster PBO fiber reinforced UHPC are similar to those of steel fiber reinforced UHPC, and the compressive strength of cluster PBO fiber reinforced UHPC is 20% lower when the content is 2% (volume percentage).

Keywords: PBO fiber; UHPC; fluidity; mechanical strength

(责任编辑:熊璐璐)