

# 超高性能混凝土配合比设计及其受拉性能<sup>\*</sup>

胡翱翔<sup>1</sup>, 梁兴文<sup>1†</sup>, 李东阳<sup>1</sup>, 于婧<sup>1</sup>, 史庆轩<sup>1</sup>, 李林<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西建研结构工程股份有限公司, 陕西 西安 710082)

**摘要:**基于最大堆积密度理论,研究超高性能混凝土(UHPC)的配合比设计方法.采用修正的 Andreasen & Andersen 法计算石英砂级配,通过密度试验确定水泥和硅灰的相对质量分数;根据单一变量试配试验确定砂胶质量比、水胶质量比和纤维体积分数,综合考虑抗压强度和工作性能 2 个因素确定最佳配合比.按最佳配合比制作立方体试件和轴心受拉试件,进行受压和单轴拉伸力学性能试验,研究 UHPC 受压和单轴受拉力学性能以及纤维体积分数对 UHPC 单轴受拉力学性能的影响.结果表明:按照最佳配合比制备的 UHPC,其抗压强度为 116.64~134.85 MPa,抗拉强度为 4.761~8.504 MPa;随着纤维体积分数的增加,抗拉强度和韧性都大幅提高,试件也由脆性破坏转变为韧性破坏.研究成果可以为 UHPC 在国内的推广应用提供一定参考.

**关键词:**超高性能混凝土;配合比设计;抗压强度;抗拉强度;韧性

**中图分类号:**TU528.57

**文献标志码:**A

## Mix Design Method and Uniaxial Tensile Characteristics of Ultra-High Performance Concrete

HU Aoxiang<sup>1</sup>, LIANG Xingwen<sup>1†</sup>, LI Dongyang<sup>1</sup>, YU Jing<sup>1</sup>, SHI Qingxuan<sup>1</sup>, LI Lin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Jianyan Structural Engineering Co Ltd, Xi'an 710082, China)

**Abstract:** This paper proposed a new mix design method of ultra-high performance concrete (UHPC) based on the maximum particle packing density, and the modified Andreasen & Andersen particle packing model was used to calculate the quartz sand grading. Density test and single variable trial-mixing test were employed to design the remain parameters of the concrete mixture, and one group of mix proportion with better strength and fluidity was selected based on the test results. Then, the compressive and uniaxial tensile tests were performed to study the compressive strength and the influence of fiber volume content on the tensile characteristic of UHPC. The test results show that: the compressive strength of UHPC is between 116.64 MPa and 134.85 MPa, tensile strength is between 4.761 MPa and 8.504 MPa, and the tensile strength and toughness increase greatly with the increase of fiber volume content. Additionally, the brittleness failure mode transfers into ductile failure. The results of this paper provide a reference for the application of this kind of materials.

**Key words:** Ultra High Performance Concrete (UHPC); mix design; compressive strength; tensile strength; toughness

\* 收稿日期:2016-11-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278402), National Natural Science Foundation of China(51278402)

作者简介:胡翱翔(1990-),男,湖北襄阳人,西安建筑科技大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: liangxingwen2000@163.com

丹麦奥尔堡波特兰水泥与混凝土试验室的 Bache<sup>[1]</sup> 研发出高密度纤维增强复合材料 (Compact Reinforced Composite, CRC), 它是超高性能混凝土 (Ultra High Performance Concrete, UHPC) 的一种。CRC 是由水泥基体加上短细钢纤维组成, 钢纤维的体积分数通常在 6% 左右, 长度不超过 6 mm、直径  $\leq 0.2$  mm。CRC 材料的开裂强度高, 短纤维在混凝土受拉过程中可以有效地限制微观裂缝的产生和开展, 延迟混凝土开裂, 提高混凝土的开裂强度; CRC 强度高 (高温养护条件下强度超过 150 MPa)、硅灰质量分数高和纤维体积分数大的特性, 极大地提高了 CRC 材料的粘结强度<sup>[2]</sup>, 故将 CRC 材料运用于结构中时, 可以减小保护层厚度和钢筋间距, 保护层厚度通常取 10~15 mm<sup>[3-4]</sup>, CRC 材料构件能够配制大量的钢筋以改善结构的延性。CRC 可应用于桥梁结构构件、装配式构件之间的连接材料, 可制作预制楼梯、预制阳台, 以及抗冲击、抗爆等结构<sup>[2,5]</sup>。

CRC 与目前国内研究较多的活性粉末混凝土 (Reactive Powder Concrete, RPC) 相比, 具有以下优势: 1) CRC 采用的钢纤维长度 (6 mm 左右) 比 RPC (13 mm 左右) 短, 纤维体积分数较大时不易结团, 一般 RPC 的纤维体积分数都控制在 2% 左右, 而 CRC 纤维体积分数可以达到 6% 甚至更高; 2) 纤维体积分数大可极大地提高 CRC 材料与钢筋的粘结强度<sup>[2]</sup>。CRC 在国外研究比较深入并且已在实际工程中推广应用, 但是, 目前国内对 CRC 的研究相对较少。

现有文献中对于 UHPC 配合比的确定大都是基于经验并结合大量试配试验结果<sup>[6]</sup>, 找到相对的最优配合比, 理论性不强, 并且即使是同一种配合比, 采用不同地方的原材料配制, 其结果的离散性也较大<sup>[7]</sup>。对于钢纤维增强复合材料, 国内外也有很多相关研究, 但是钢纤维体积分数一般都不超过 3%, 比如 RPC<sup>[8-11]</sup>, 当纤维体积分数较大时, 纤维之间互相穿插容易结团, 导致搅拌过程中钢纤维分散不均匀, 严重影响混凝土的性能。国内对 UHPC 的单轴受拉力学性能研究相对较少, 杨志慧<sup>[12]</sup> 和原海燕<sup>[13]</sup> 自行设计 8 字型试件, 采用加大试件端头两端提拉的方法研究了钢纤维体积分数从 0 增加至 2% 时, 对 RPC 的单轴受拉力学性能的影响, 试验测得 RPC 受拉应力-应变全曲线并建立了 RPC 单轴受拉本构方程。李莉<sup>[14]</sup> 采用在 RPC 中插入钢筋的方法研究了一组钢纤维体积分数为 2% 的 RPC 单轴受拉力学性能等。罗百福<sup>[15]</sup> 通过单轴拉伸试验研究

了 RPC 在不同温度下的单轴受拉力学性能, 建立了 RPC 抗拉强度与温度的关系。

基于上述原因, 本文提出一种大体积分数 UHPC 的配合比设计方法, 与普通钢纤维增强复合材料配合比设计方法相比, 该法无需进行大量的试配试验, 当纤维体积分数大 ( $\geq 2\%$ ) 时不出现纤维结团现象, 抗压、抗拉强度较高, 工作性能良好。同时本文进行了立方体抗压强度试验和单轴受拉力学性能试验, 研究其受压、受拉性能, 为这种材料在工程中的推广应用提供参考。

## 1 试验材料

UHPC 由水泥、水、硅灰、石英砂、减水剂和纤维等组成。其中水泥选用某水泥厂生产的 P. O. 42.5R 普通硅酸盐水泥。拌合水选用自来水, 其品质应不低于 JGJ 63-2006《混凝土用水标准》等相关标准的要求, 碱的质量浓度不大于 1 000 mg/L。

硅灰选择某厂生产的无定形超细 (非晶体) 粉末, 灰白色, 比表面积为  $19 \text{ m}^2/\text{g}$ , 活性指标  $\geq 85 @ 28 \text{ d}$  (国标), 需水比  $\leq 125$ ,  $\text{SiO}_2$  质量分数  $\geq 93\%$ , 烧失量  $\leq 2.6\%$ 。石英砂选择  $\text{SiO}_2$  质量分数为 99.72%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  质量分数为 0.024% 的白色石英砂, 此次试验由 5 种不同粒径范围的石英砂组成。选择新一代聚羧酸高性能减水剂, 外观为浅黄色液体, pH 值为 6~8, 减水率为 30%~40%, 氯离子含量为零。

钢纤维选择上海某厂生产的长度为 6~8 mm、等效直径为 0.23 mm、长径比为 30 的圆柱形直钢纤维; 钢纤维形状合格率  $\geq 98\%$ , 纤维表面镀黄铜, 杂质质量分数  $< 0.1\%$ , 抗拉强度为 2 850 MPa, 弯曲性能合格, 质量符合 YB/T151-1999 质量标准, 如图 1 所示。

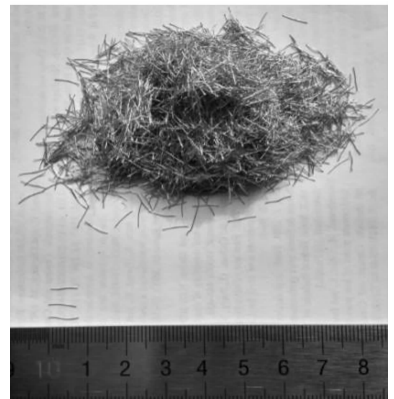


图 1 试验用钢纤维

Fig. 1 Steel fibers used in the test

## 2 石英砂级配计算

### 2.1 最优级配曲线理论

固体颗粒的细度和级配对混凝土的孔隙率有较大影响,所以改善固体颗粒的级配可以提高混凝土的力学性能.文献[16]通过计算调整颗粒级配进行混凝土的配合比设计,并提出了著名的富勒级配曲线,其表达式如下:

$$P'(d) = \left(\frac{d}{d_{\max}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: $P'(d)$ 为所有粒径小于 $d$ 固体颗粒的质量分数; $d_{\max}$ 为固体颗粒中的最大粒径.

式(1)的缺点是实际中无法满足这个等式,因为假定固体颗粒细度可以达到无限小,比如当 $d_{\min} = 0$ 时,孔隙率为0,但是实际中固体颗粒的最小粒径不可能接近零.

式(1)只是抛物线或椭圆型级配计算方法的一种,其更为一般的形式为<sup>[17]</sup>:

$$P'(d) = \left(\frac{d}{d_{\max}}\right)^q \quad (2)$$

式中: $q$ 为分布模量,是一个变量,并认为干料的孔隙率只与 $q$ 相关, $q$ 越小孔隙率越小,但是干料的孔隙率不可能接近零,所以必须对 $q$ 的取值范围加以限制.文献[16]建议, $q$ 的取值为0.33~0.50.文献[17]研究发现,当干料达到最大堆积密度时, $q$ 取值与骨料的形状相关,建议对于圆形骨料和角状骨料, $q$ 分别取0.4和0.3,这样可以获得较大的颗粒堆积密度.

但是式(1)和式(2)均只考虑最大粒径对材料级配曲线的影响,忽略了最小粒径的作用.文献[17]在对前人的研究成果进行总结、修正后得出同时考虑最大和最小粒径的级配曲线表达式,即

$$P'(d) = \frac{d^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q} \quad (3)$$

式中: $d_{\max}$ 和 $d_{\min}$ 分别为固体颗粒中的最大和最小粒径.式(3)称为修正的Andreasen和Andersen级配计算方法.对于分布模量 $q$ 的取值,文献[16]建议取0.22~0.25,文献[17]建议取0~0.28.

### 2.2 石英砂最大粒径

假定钢纤维在基体中均匀分布,纤维与骨料之间的分布形式如图2所示.

石英砂的平均粒径为 $d_{\text{aver}}$ ,纤维体积分数最大时( $V_f = 6\%$ )钢纤维之间的平均间距为 $s$ ,纤维与

石英砂之间的界面层厚度为 $t$ ,钢纤维的直径为 $d_f$ ,四者之间满足下列关系式:

$$d_{\text{aver}} = s - 4t - d_f \quad (4)$$

式中:钢纤维间平均间距 $s$ ,高丹盈等<sup>[18]</sup>给出了建议计算公式: $s = 13.8d_f \sqrt{1/V_f}$ .通常纤维、石英砂的界面层厚度 $t$ 取0.05~0.1 mm<sup>[19]</sup>,界面层是混凝土中最薄弱的部位,在外力作用下裂缝首先在这个部位产生.文献[19]中研究表明:纤维和骨料之间的界面层间相互交错、搭接能产生叠加效应,不同程度地引起界面层弱谷变浅,对界面层起强化作用.所以对于骨料的平均粒径可在如下范围内取值:

$$s - d_f - 4t \leq d_{\text{aver}} \leq s - d_f \quad (5)$$

将相关数据代入式(5)计算得到骨料平均粒径的取值为: $0.68 \leq d_{\text{aver}} \leq 1.08$ ,结合当地石英砂厂家生产的产品种类最终确定 $d_{\text{aver}} = 1$  mm.石英砂粒径大小连续均匀分布,平均粒径近似取最大粒径的一半,可得出石英砂的最大粒径 $d_{\max} = 2d_{\text{aver}} = 2$  mm.

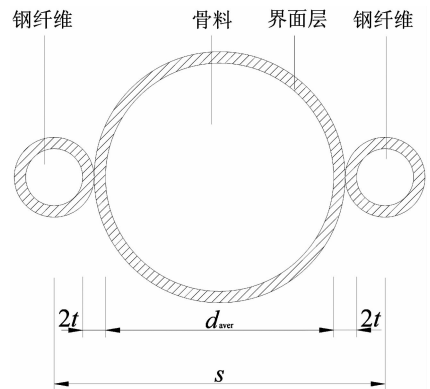


图2 纤维和骨料分布图

Fig. 2 Arrangements of steel fibers and aggregates in the cross-section

### 2.3 石英砂级配计算

采用式(3)计算石英砂的级配,计算结果如表1所示,其中 $d_{\min}$ 和 $d_{\max}$ 分别等于45  $\mu\text{m}$ 和2 000  $\mu\text{m}$ ,分布模量 $q=0.23$ .

表1 石英砂级配计算表

Tab. 1 Proportioning of the designed quartz sand mix		
目数/目	粒径/ $\mu\text{m}$	$P'(d)$
10	2 000	1.000
20	850	0.693
40	425	0.485
70	212	0.307
120	125	0.190
325	45	0.000

根据表1,各个粒径范围所占的比例如下.

10目-20目:

$$P'(2000) - P'(850) = 1 - 0.693 = 0.307 = 31\%$$

20目-40目:

$$P'(850) - P'(425) = 0.693 - 0.485 = 0.208 = 21\%$$

40目-70目:

$$P'(425) - P'(212) = 0.485 - 0.307 = 0.178 = 18\%$$

70目-120目:

$$P'(212) - P'(125) = 0.307 - 0.190 = 0.117 = 12\%$$

120目-325目:

$$P'(125) - P'(45) = 0.190 - 0.000 = 0.190 = 19\%$$

综上所述,5种不同粒径石英砂的质量比为 0.31 : 0.21 : 0.18 : 0.12 : 0.19.

按照上述石英砂级配和文献[20-21]中石英砂级配分别制作 UHPC 基体(不加钢纤维),并保持其他参数不变,比较其 7 d 和 28 d 的立方体抗压强度,见表 2.

表 2 石英砂级配验证试验  
Tab. 2 Test of the quartz sand grading

文献	抗压强度/MPa	
	7 d	28 d
文献[20]	75.38	88.56
文献[21]	73.56	86.55
本文	76.59	97.48

由表 2 可见,采用本文提出的石英砂级配计算方法,UHPC 的 7 d 和 28 d 立方体抗压强度均高于参考文献[20-21]中石英砂级配,验证了上述石英砂级配计算方法的有效性.

### 3 水泥和硅灰相对质量分数计算

由于水泥和硅灰 2 种胶凝材料粒径不连续,不能采用上述确定石英砂级配的方法进行计算. 根据最大堆积密度理论,参考 Westman 等<sup>[22]</sup>提出的算法,当 2 种粒径不连续材料的平均粒径比值超过 15 时,可以直接根据极限状态计算得到最优点. 硅灰的平均粒径为水泥平均粒径的几百分之一,2 种材料的平均粒径比远大于 15,故可以直接根据极限状态计算确定二者的相对质量分数. 本文参考文献[22]中的试验方法,先测量水泥和硅灰 2 种材料的孔隙率,然后计算 2 种材料的相对质量分数.

#### 3.1 材料的密度和堆积密度测量

测量水泥密度、硅灰密度和堆积密度的步骤如下:

1)用 2 个 200 mL 量筒在电子秤上分别称量质量为  $m_1$  和  $m_2$  的水泥和硅灰,向 2 个 500 mL 量筒中分别倒入适量的煤油,待液面稳定后读取量筒读数,记为  $V_{10}$  和  $V_{20}$ .

2)将装好水泥和硅灰的 2 个量筒固定在振动台上,在振动台上振动 30 min 左右,振动频率为 50 Hz. 振动过程中可以观察到量筒的读数先逐渐变小,后来又开始变大,可能是由于粒径较小的颗粒填充大颗粒之间的空隙,当达到最大密实度后,继续振动将出现分层现象,记下 2 个量筒的最小读数,记为  $V_{11}$  和  $V_{21}$ ,此体积即为材料的堆积体积.

3)将 200 mL 量筒中所有的水泥和硅灰分别倒入 2 个 500 mL 量筒中,待材料被煤油充分浸润并且分散均匀后,记下量筒的读数  $V_{12}$  和  $V_{22}$ .

#### 3.2 堆积密度和密度计算

水泥和硅灰的堆积密度分别为:

$$\rho_1 = \frac{m_1}{V_{11}}, \rho_2 = \frac{m_2}{V_{21}} \quad (6)$$

水泥和硅灰的密度分别为:

$$\rho'_1 = \frac{m_1}{V_{12} - V_{10}}, \rho'_2 = \frac{m_2}{V_{22} - V_{20}} \quad (7)$$

式中: $\rho_1$ 、 $\rho_2$  和  $\rho'_1$  和  $\rho'_2$  分别表示水泥和硅灰的堆积密度和密度.

对水泥和硅灰 2 种材料分别进行 3 次试验,密度和堆积密度计算值取 3 次试验的平均值,具体试验数据分别如表 3 和表 4 所示.

表 3 水泥的密度试验

Tab. 3 Density test of the cement

$m_1/g$	$V_{10}/mL$	$V_{11}/mL$	$V_{12}/mL$	堆积密度 /( $kg \cdot m^{-3}$ )	密度 /( $kg \cdot m^{-3}$ )
40	100	25.1	112.5	1 593.63	3 200.00
50	100	31.1	115.4	1 607.72	3 253.33
60	100	37.5	118.5	1 600.59	3 237.89
平均值				1 601.05	3 230.41

表 4 硅灰的密度试验

Tab. 4 Density test of the silica fume

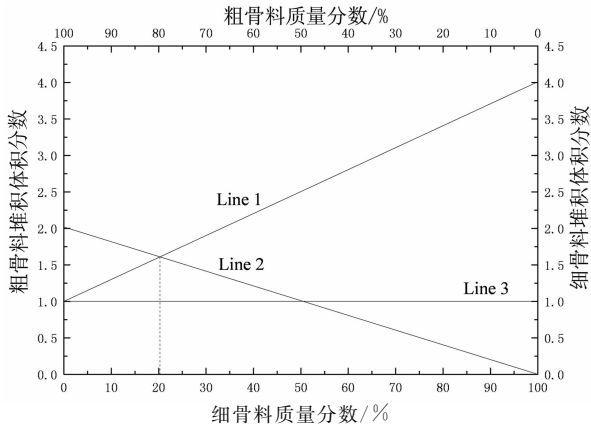
$m_2/g$	$V_{20}/mL$	$V_{21}/mL$	$V_{22}/mL$	堆积密度 /( $kg \cdot m^{-3}$ )	密度 /( $kg \cdot m^{-3}$ )
40	77.0	150	169.5	519.48	2 051.28
50	94.5	200	224.0	529.10	2 083.33
60	116.0	200	228.0	517.24	2 142.86
平均值				521.94	2 092.49

#### 3.3 水泥和硅灰相对质量分数计算

参考文献[17],假定材料的真实体积为 1 时,材料的堆积体积分数按下式计算:

$$V_a = \frac{\rho \times 1}{\rho_{\text{堆积}}} \quad (8)$$

式中:  $\rho$ 、 $\rho_{\text{堆积}}$  分别为材料的密度和堆积密度;  $V_a$  为材料的堆积体积分数. 按照式(8)计算得到水泥和硅灰的堆积体积分数分别为 2.02 和 4.01, 并按此作图如图 3 所示.



Line 1—最小堆积体积分数; Line 2—粗骨料堆积体积分数;  
Line 3—所有骨料的真实体积分数

图3 水泥和硅灰相对质量分数的计算  
Fig. 3 Algorithm for a mixture of cement  
(coarse fraction) and silica fume

由图 3 计算得出水泥和硅灰的质量比为 79.27 : 20.73, 即  $m_{\text{硅灰}} = 0.26m_{\text{水泥}}$  时, 2 种材料混合之后的孔隙率最低, 所以本文水泥与硅灰掺入的质量固定比例为  $m_{\text{硅灰}} : m_{\text{水泥}} = 0.26 : 1$ .

## 4 配合比的确定

砂胶质量比、水胶质量比和纤维体积分数 3 个参数对 UHPC 坍落度以及抗压强度等影响较大, 并与材料本身性能相关性较高, 选用不同地方原材料制作出来的 UHPC, 其性能离散性较大, 所以本文采用当地试验材料, 按照试配的方法确定上述 3 个参数, 对于采用其他地区原材料可以参考该试验方法.

试配的目标是在满足 UHPC 工作性能的前提下, 使其抗压强度达到最大. 参考 JGJ/T 10—2011《混凝土泵送施工技术规程》<sup>[23]</sup> 的规定: 当最大泵送高度为 100 m 时, 要求入泵坍落度为 150~180 mm, 故将目标坍落度定为 150 mm.

### 4.1 砂胶质量比的确定

本文参考文献[20]中的配合比, 并根据实际试配情况对其进行调整, 以满足工作性能的要求. 水胶质量比固定为 0.18; 砂胶质量比分别取 1.50、1.35、

1.27、1.00 和 0.80 五个水平, 考虑到砂胶质量比主要影响 UHPC 的流动性, 同时应实现纤维大体积分数, 所以该试验中纤维体积分数固定为 4%. 对水胶质量比、砂胶质量比和纤维体积分数分别取上述值后, 所得 UHPC 的坍落度和标准养护 28 d 的抗压强度试验结果如表 5 所示.

表5 砂胶质量比试验结果  
Tab. 5 Test of sand to binder ratio

编号	砂胶质量比	水胶质量比	纤维体积分数/%	坍落度/mm	抗压强度/MPa
1	1.50	0.18	4	80	94.32
2	1.35	0.18	4	93	96.09
3	1.27	0.18	4	175	130.20
4	1.00	0.18	4	228	128.66
5	0.80	0.18	4	243	112.23

由表 5 的试验结果可以看出, 砂胶质量比为 1.50 和 1.35 时, 可能由于 UHPC 的流动性较差, 导致钢纤维在基体中分散不均匀, 所以抗压强度较低; 砂胶质量比从 1.35 减小到 1.27, 再减小到 1.00, UHPC 的坍落度分别增大了 88% 和 145%, 抗压强度分别增大了 35% 和 34%; 砂胶质量比从 1.27 减小到 1.00 时, 抗压强度略有减小, 但是坍落度却增大了 30%. 砂胶质量比从 1.00 减小至 0.80 时, 坍落度增加 6%, 但是抗压强度降低 13%. 表明砂胶质量比对 UHPC 坍落度的影响较大, 这是因为当水胶质量比固定, 砂胶质量比减小时, 用水量增大的结果.

综上所述, 当纤维体积分数为 4% 时, 砂胶质量比取 1.27 和 1.00 效果较好. 砂胶质量比为 1.00, UHPC 的抗压强度为 128.66 MPa, 坍落度为 228 mm; 砂胶质量比取 1.27, UHPC 的抗压强度为 130.20 MPa, 坍落度为 175 mm, 均满足工作性能要求, 但是砂胶质量比为 1.27 时坍落度已接近限值, 且两组抗压强度比较接近, 所以本文建议砂胶质量比取 1.00.

### 4.2 水胶质量比的确定

根据上述试验结果, 将砂胶质量比固定为 1.00, 并继续进行试验, 进一步确定最佳水胶质量比. 考虑到本文目的是要配制出强度较高的 UHPC, 所以选择较低的水胶质量比, 即 0.20、0.18、0.16、0.14 和 0.12; 砂胶质量比固定为 1.00, 纤维体积分数为 4%, UHPC 的坍落度和标准养护 28 d 的抗压强度试验结果如表 6 所示.

由表 6 的试验结果可以看出: 随着水胶质量比的降低坍落度逐渐减小, 抗压强度逐渐增大; 水胶质

量比从 0.20 降低到 0.18 再降低到 0.14, 抗压强度分别提高了 15% 和 16%; 坍落度分别降低 11% 和 18%, 但是均能够满足工作性能要求; 水胶质量比从 0.18 降低到 0.16 时, 坍落度减小 8%, 抗压强度仅增加 1%; 水胶质量比分别为 0.14 和 0.12 时均不满足工作性能的要求。

综合考虑强度和坍落度两个因素, 本文建议水胶质量比取 0.18。

表 6 水胶质量比的优选试验结果  
Tab. 6 Test of water to binder ratio

编号	砂胶质量比	水胶质量比	纤维体积分数/%	坍落度/mm	抗压强度/MPa
1	1.00	0.20	4	255	112.34
2	1.00	0.18	4	228	128.66
3	1.00	0.16	4	210	130.17
4	1.00	0.14	4	135	141.68
5	1.00	0.12	4	93	103.25

#### 4.3 纤维体积分数的确定

根据上述试验, 将砂胶质量比和水胶质量比分别取为 1.00 和 0.18, 通过调整纤维体积分数得出纤维体积分数对坍落度和抗压强度的影响. UHPC 的坍落度和标准养护 28 d 的抗压强度试验结果如表 7 所示。

表 7 纤维体积分数的优选试验结果  
Tab. 7 Test of fiber content

编号	砂胶质量比	水胶质量比	纤维体积分数/%	坍落度/mm	抗压强度/MPa
1	1.00	0.18	2	250	116.64
2	1.00	0.18	3	245	122.54
3	1.00	0.18	4	228	128.66
4	1.00	0.18	5	155	134.85
5	1.00	0.18	6	65	147.10

由表 7 试验结果可知, 纤维体积分数超过 4% 之后坍落度急剧减小, 但是抗压强度随着纤维体积分数的增加而提高, 如图 4 所示。

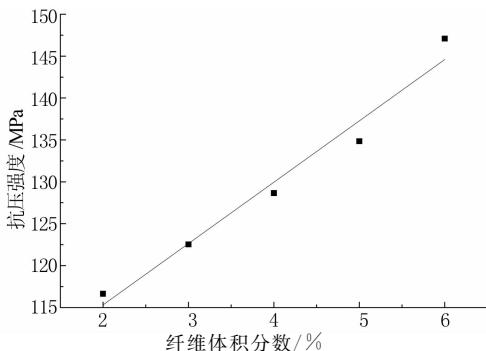


图 4 抗压强度与纤维体积分数的关系  
Fig. 4 Relationship of compressive strength and fiber content

从图 4 可以看出, 抗压强度  $f_c$  与纤维体积分数  $V_f$  之间近似满足线性关系, 拟合公式为:

$$f_c = 100.6 + 7.323V_f, R^2 = 0.96 \quad (9)$$

式中:  $f_c$  表示 UHPC 的抗压强度 (MPa);  $V_f$  表示纤维体积分数。

同样, 由表 6 数据可得坍落度  $S$  与纤维体积分数  $V_f$  之间的关系曲线, 见图 5. 采用多项式对  $S$  与  $V_f$  之间的关系进行拟合, 可得

$$S = 146.6 + 83.14V_f - 16.14V_f^2, R^2 = 0.99 \quad (10)$$

式中:  $S$  为 UHPC 的坍落度 (mm)。

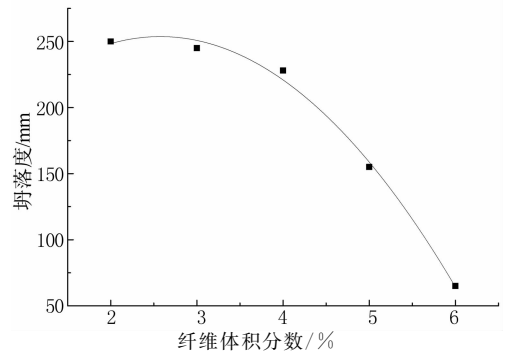


图 5 坍落度与纤维体积分数关系

Fig. 5 Relationship of concrete slump and fiber content

#### 4.4 其他参数的确定

减水剂的质量分数随着水泥标号、质量的不同会稍有变化, 因此可以根据试配确定. 本文根据实际试配效果, 建议减水剂质量分数取为水泥用量的 3%。

#### 4.5 最终配合比

按照上述方法最后优选出一组最优配合比. 这组配合比满足工作性能要求, UHPC 在搅拌过程中没有出现纤维结团现象, 而且抗压强度较高, 其配合比详情如表 8 所示。

表 8 UHPC 的最优配合比  
Tab. 8 Mix proportion of the UHPC

质量比					钢纤维体积分数/%
水泥	水	硅灰	石英砂	减水剂	
1.00	0.23	0.26	1.26	0.03	2~5

### 5 单轴受拉力学性能试验结果

采用上述最佳配合比制作单轴受拉试件, 研究不同纤维体积分数 UHPC 的抗拉性能. 纤维体积分数为 0~5%, 共 6 组试验, 每组 3 个试件. 试件制作完成之后室温养护 36 h 之后脱模, 随后放进标准养

护室养护至 28 d 龄期取出,放置室内直至试验.试验在 100 kN 微机控制电子万能试验机(CMT5105)上进行.本文根据试件形状自主设计了夹具,夹具应保证几何对中,防止偏心.夹具上、下端采用销钉与试验机相连,夹头与连接杆之间采用铰链连接.试验时先将上、下夹具安装就位,然后将试件放进夹具夹头之间,保证试件处于中心位置,防止加载过程中试件产生偏心;同时在试件前、后面各安装一个电子引伸计测量试件的竖向变形,取两个引伸计的平均值计算试件的竖向变形以克服可能产生的偏心影响.试验全程采用位移控制加载,加载速率为 0.05 mm/min.加载装置如图 6 所示.

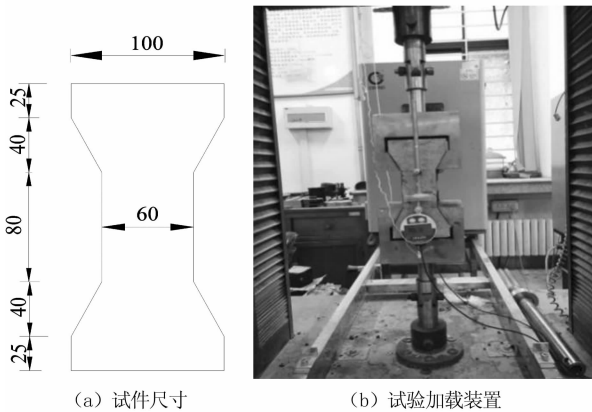


图 6 试件尺寸及单轴受拉试验加载装置  
Fig. 6 Measurement of the specimen and apparatus for the uniaxial tensile test

图 7 为各组试件的平均应力-应变曲线.从图 7 可以看出,随着纤维体积分数的增加,UHPC 的抗拉强度逐渐增加,应力-应变曲线下包围的面积逐渐增大,表明 UHPC 抗拉韧性增大,试件由脆性破坏转化为韧性破坏.

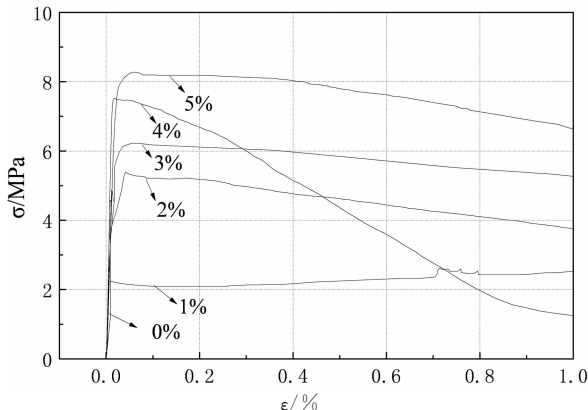


图 7 各组试验平均应力-应变曲线  
Fig. 7 Average curves of the uniaxial tensile test

平均值以及峰值拉应变平均值.从表 9 可以看出,随着纤维体积分数的增加,抗拉强度和峰值应变都明显提高;即纤维体积分数从 0 增加到 5%时,抗拉强度和峰值应变分别增加 79%和 1 090%,纤维的增强、增韧效果显著.

表 9 单轴受拉试验结果  
Tab. 9 Results of the uniaxial tensile test

编号	纤维体积分数/%	抗拉强度/MPa	峰值应变/ $\mu\epsilon$
1	0	4.761	136
2	1	5.373	188
3	2	5.601	235
4	3	6.365	356
5	4	7.543	500
6	5	8.504	1 619

根据上述试验结果,对试验数据进行拟合,得到抗拉强度与纤维体积分数、峰值应变与抗拉强度之间近似满足关系式:

$$f_{tu} = f_{t0} (1 + 0.141V_f), R^2 = 0.942 \quad (11)$$

$$\epsilon_{tp} = 0.00214 \times f_{tu}^{6.302}, R^2 = 0.918 \quad (12)$$

式中:  $f_{tu}$  为 UHPC 抗拉强度;  $f_{t0}$  为不掺纤维 UHPC 抗拉强度;  $\epsilon_{tp}$  为峰值应变.

## 6 结 论

1)提出一种 UHPC 的配合比设计方法.第 1 步采用修正的 Andreasen 和 Andersen 级配计算方法确定石英砂的级配;第 2 步根据孔隙率试验确定水泥和硅灰的相对质量分数;第 3 步通过单一变量试配试验确定砂胶质量比、水胶质量比和纤维体积分数.按照这种方法优选出一组最优配合比:水胶质量比为 0.18,砂胶质量比为 1.00,纤维体积分数为 2%~5%时,抗压强度为 116.64~134.85 MPa.

2)根据试验数据进行拟合,得到抗压强度与纤维体积分数之间近似满足线性关系,坍落度与纤维体积分数之间满足二次多项式关系,并且拟合精度较高.

3)单轴受拉试验结果表明,基于本文提出的最优配合比配制 UHPC,纤维体积分数从 0 增加至 5%,对 UHPC 的增强、增韧效果提高显著,尤其对受拉韧性的提高,试件抗拉强度为 4.761~8.504 MPa;根据试验数据拟合得到抗拉强度与纤维体积分数、峰值应变与抗拉强度之间的关系式.

## 参考文献

[1] BACHE H H. The new strong cements; their use in structures

表 9 列出了试验测得各组试件的单轴抗拉强度

- [J]. *Physics in Technology*, 1988, 19(2): 43–50.
- [2] CRC® Technology. Compact reinforced composite[EB/OL]. [2017-01-17]. www.crc-tech.dk.
- [3] AARUP B, JENSEN L R. Compact reinforced concrete CRC: Applications of fiber-reinforced high-performance concrete[J]. *Concrete Plant and Precast Technology*, 2008, 74(10): 18–26.
- [4] BACHE A. CRC-a special fiber reinforced high performance concrete[C]//International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering. Bagnaux, France: RILEM Publications, 2004.
- [5] KAPTIJN N, BLOM J. A new CRC (Compact Reinforced Composite) bridge deck[C]//The 18th BIBM International Congress. Amsterdam, Netherlands, 2005: 1–7.
- [6] 郑文忠, 李莉. 活性粉末混凝土配制及其配合比计算方法[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(2): 13–17.  
ZHENG W Z, LI L. Preparation and mix proportion calculation of reactive powder concrete[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2009, 36(2): 13–17. (In Chinese)
- [7] 何峰, 黄政宇. 原材料对RPC强度的影响初探[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2001, 28(2): 89–94.  
HE F, HUANG Z Y. Study on the effect of materials on RPC strength [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2001, 28(2): 89–94. (In Chinese)
- [8] 方志, 向宇, 匡镇, 等. 钢纤维含量对活性粉末混凝土抗疲劳性能的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(6): 6–12.  
FANG Z, XIANG Y, KUANG Z, *et al.* Fatigue properties of reactive powder concrete with different steel fiber ratio [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2011, 38(6): 6–12. (In Chinese)
- [9] 闫光杰. 200 MPa级活性粉末混凝土试验研究[J]. *铁道学报*, 2004, 26(2): 116–119.  
YAN G J. Experimental study on 200 MPa reactive powder concrete[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2004, 26(2): 116–119. (In Chinese)
- [10] 单波. 活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2002: 13.  
SHAN B. Experimental research on mechanical properties of RPC [D]. Changsha: School of Civil Engineering, Hunan University, 2002: 13. (In Chinese)
- [11] 谭彬. 活性粉末混凝土受压应力应变全曲线的研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2007: 24.  
TAN B. Research on stress-strain curves of reactive powder concrete under uniaxial compression[D]. Changsha: School of Civil Engineering, Hunan University, 2007: 24. (In Chinese)
- [12] 杨志慧. 不同钢纤维掺量活性粉末混凝土的抗拉力学特性研究[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2006: 37–54.  
YANG Z H. Study on tension mechanical performance of reactive powder concrete in different steel fiber volume fractions [D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2006: 37–54. (In Chinese)
- [13] 原海燕. 配筋活性粉末混凝土受拉性能试验研究及理论分析[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2009: 27–48.  
YUAN H Y. Theoretical analysis and experimental research on tensile performance of reinforced reactive powder concrete[D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2009: 27–48. (In Chinese)
- [14] 李莉. 活性粉末混凝土梁受力性能及设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2010: 44–54.  
LI L. Mechanical behavior and design method for reactive powder concrete beams[D]. Harbin: School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 2010: 44–54. (In Chinese)
- [15] 罗百福. 高温下活性粉末混凝土爆裂规律及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2014: 44–92.  
LUO B F. Study on explosive spalling rules and mechanical properties of reactive powder concrete at elevated temperatures [D]. Harbin: School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 2014: 44–92. (In Chinese)
- [16] HUNGER M. An integral design concept for ecological self-compacting concrete[D]. Eindhoven: Department of Construction, Eindhoven University of Technology, 2010: 63–79.
- [17] HÜSKEN G. A multifunctional design approach for sustainable concrete: with application to concrete mass products door [D]. Eindhoven: Department of Construction, Eindhoven University of Technology, 2010: 39–64.
- [18] 高丹盈, 刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京: 科学技术出版社, 1994: 242–243.  
GAO D Y, LIU J X. Basic theory of steel fiber reinforced concrete [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1994: 242–243. (In Chinese)
- [19] 孙伟, MANDEL J A. 纤维间距对界面层的影响[J]. *硅酸盐学报*, 1989, 17(3): 266–271.  
SUN W, MANDEL J A. Effects of fiber spacing on interfacial layers [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1989, 17(3): 266–271. (In Chinese)
- [20] BACHE H. Compact reinforced composite: 979992 [P]. 1990-12-25.
- [21] MARKOVIĆ. High-performance hybrid-fiber concrete-development and utilization[D]. Delft: Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Department of Concrete Structures and Microlab, Technology University Delft, 2006: 14–18.
- [22] WESTMAN H, HUGILL R. The packing of particles [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1930, 10(13): 767–779.
- [23] JGJ/T 10–2011 混凝土泵送施工技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 5.  
JGJ/T 10–2011 Technical specification for construction of concrete pumping[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011: 5. (In Chinese)