

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.012



# 超高韧性水泥基材料的制备技术

张翼, 王冲, 张超, 张进, 唐清远

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 分别采用活性粉末混凝土(RPC)和渗浇钢纤维混凝土(SIFCON)两种制备工艺, 根据水泥基材料结构的多尺度特征, 研究了由碳酸钙晶须和微钢纤维复合增强的超高韧性水泥基材料(Ultra-High-Toughness Cementitious Composite, 简称 UHTCC)的制备技术, 测试 UHTCC 不同配比的抗压强度、抗折强度、抗弯强度以及单轴拉伸性能, 采用折压比、韧性指数等多个指标对 UHTCC 的韧性进行了评价。试验表明: UHTCC 的抗压强度、抗折强度、抗弯强度以及延性和韧性都远高于普通钢纤维混凝土, 其抗弯强度最高达 65.1 MPa, 韧性指数  $I_{20}$  最高达 49.21, 单轴拉伸试验时呈现明显的假应变硬化行为, 极限拉应变可达 4%~8%。相对而言, 利用 SIFCON 工艺制得的水泥基材料韧性更高。

**关键词:** 超高韧性水泥基材料; 拉伸应变; 韧性指数; 碳酸钙晶须; 钢纤维

**中图分类号:** TU528.572 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)01-0083-07

## Preparation technology of the ultra-high-toughness cementitious composite

Zhang Yi, Wang Chong, Zhang Chao, Zhang Jin, Tang Qingyuan

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The preparation technology of reactive powder concrete (RPC) and slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON) were adopted respectively, according to the multi scale structure characteristic of cementitious composites, the preparation technology of the ultra-high-toughness cementitious composite (UHTCC) reinforced by calcium carbonate whisker and micro steel fiber were studied, and the compressive strength, flexural strength, bending strength and mechanical properties uniaxial tension of different mixture proportions were tested. The ratio of flexural-compressive strength, toughness index and other more index were used to evaluate the toughness of the UHTCC. The experimental results indicate that the compressive strength, flexural strength, bending strength, ductility and toughness of UHTCC are much higher than those of general steel fiber concrete. The bending strength of UHTCC and the toughness index  $I_{20}$  are up to 65.1 MPa and 49.21 respectively. False strain-hardening behavior of UHTCC are achieved under uniaxial tension. The ultimate tensile strain of UHTCC can reach 4%~8%. Compared to RPC technology, higher toughness are obtained using SIFCON technology.

**收稿日期:** 2017-05-12

**基金项目:** 国家重点研发计划(2017YFB0310003)

**作者简介:** 张翼(1995-), 男, 主要从事高性能混凝土研究, E-mail: 842805054@qq.com。

王冲(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wangchnx@126.com。

**Received:** 2017-05-12

**Foundation item:** National Key Research & Development (R & D) Plan(No. 2017YFB0310003)

**Author brief:** Zhang Yi(1995-), main research interest: high performance concrete, E-mail: 842805054@qq.com.

Wang Chong(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: wangchnx@126.com.

**Keywords:** ultra-high-toughness cementitious composite; tensile strain; toughness index; calcium carbonate whisker; steel fiber

现代建筑逐渐向高层化、大跨化方向发展,因此,高强高韧化成为混凝土的主要发展方向之一。水泥基复合材料具有多尺度的结构特征<sup>[1-2]</sup>,包括由水泥水化产物(水化硅酸钙凝胶、氢氧化钙晶体、钙矾石等)构成的微观结构,由骨料、水泥水化产物、孔隙、界面等构成的细观结构以及由水泥基材料与纤维材料等构成的宏观结构。此外,水泥基材料破坏过程实质是内部裂缝产生及发展的过程。因此,从全尺度对混凝土的脆性进行改善是增韧的最佳方式。

Lankard<sup>[3]</sup>于 1983 年研制出了 SIFCON。通过将流动的砂浆或水泥浆注入提前铺满钢纤维的模具中硬化成型制得的 SIFCON,钢纤维掺量可达 3%~27%<sup>[4-7]</sup>。根据钢纤维体积掺量的不同,SIFCON 抗压强度可达 26~207 MPa,抗弯强度可达 13~137.9 MPa,且受拉韧性指标可达普通混凝土的 600~1 000 倍,即表面能高于素混凝土 2~3 个数量级<sup>[8]</sup>。SIFCON 所具有的优越性能,使其已经广泛应用于道路、修补、加固等工程及一些抗震、防爆结构中。

法国 Bouygues 公司在 20 世纪 90 年代末研制出了 RPC<sup>[9]</sup>。RPC 主要通过 5 个措施来减少混凝土的内部缺陷(裂缝和空隙):1)不使用粗骨料以改善均匀性;2)提高组分细度,优化颗粒级配提高堆积密度;3)在混凝土凝结过程中加压提高密实性;4)提高组分活性,在混凝土凝结后热处理改善微观结构;5)利用小尺寸的钢纤维提高韧性。由于内部缺陷的减少,RPC 抗压强度可达 200~800 MPa、抗拉强度可达 25~150 MPa,断裂能可达 30 kJ/m<sup>2</sup><sup>[7]</sup>。虽然 RPC 性能优异,但因为制备时采用了加压和

热处理等特殊工艺,所以,目前在应用上受到很大限制。

本文分别采用 RPC 与 SIFCON 两种制备工艺,并以碳酸钙晶须和微钢纤维复合对水泥基材料微观、细观和宏观结构进行全尺度增韧,按照两个方案制备 UHTCC:1)根据 RPC 制备原理,采用常规材料(水泥、矿粉和硅灰作为胶凝材料,石英砂作为骨料)制备基体,并采用中高掺量微钢纤维增加基体韧性,再以不同掺量的碳酸钙晶须对其进一步改性增韧;2)采用渗浇钢纤维混凝土的制备工艺,并以不同掺量的碳酸钙晶须进行改性。对两个方案制备的 UHTCC 进行了性能测试和韧性评价。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原料和配合比

原材料:1)水泥(P·O 42.5R)、矿粉和硅灰的主要化学成分见表 1;2)石英砂(级配 II 区,细度模数:2.9);3)微钢纤维及碳酸钙晶须的部分性能如表 2 所示;4)聚羧酸高性能减水剂(固含量:59.5%)。

表 1 胶凝材料主要化学成分

Table 1 Chemical components of cementitious materials %

材料名称	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LOI
水泥	22.78	53.26	5.15	8.26	1.85	0.36	0.86	2.33	4.1
硅灰	87.96		0.7	0.85	1.41	0.52			4.9
矿粉	31.63	61.22	2.98	4.8	3.27	0.18	0.88		3.52

表 2 微钢纤维及碳酸钙晶须性能

Table 2 Properties of micro steel fiber and calcium carbonate whisker

名称	长度	直径	长径比	极限抗拉强度/MPa	莫氏硬度	纯度/%	相对密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	表面性状
微钢纤维	13 mm	0.175 mm	74.3	3 008			7.8	平直、镀铜
碳酸钙晶须	20~30 μm	1~2 μm	20.0~30.0		3	98	2.8	白色粉末

为研究微钢纤维、碳酸钙晶须对水泥基材料协同增韧作用,设置了多组配合比。方案 1 和方案 2

的试验配合比分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 方案 1 配合比

Table 3 Mix proportions of scheme 1

编号	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	硅灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	矿渣/ (kg·m <sup>-3</sup> )	石英砂/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水/ (kg·m <sup>-3</sup> )	钢纤 维/%	晶须/ %	减水 剂/%
J	700	100	200	1350	160	0	0	2
S1~S3	700	100	200	1350	160	3~5	0	2
S1W03/04	700	100	200	1350	160	3	0.6/0.8	2
S1W1/2	700	100	200	1350	160	3	1/2	2
S2W03/04	700	100	200	1350	160	4	0.6/0.8	2
S2W1/2	700	100	200	1350	160	4	1/2	2
S3W03/04	700	100	200	1350	160	5	0.6/0.8	2
S3W1/2	700	100	200	1350	160	5	1/2	2

表 4 方案 2 配合比

Table 4 Mix proportions of scheme 2

编号	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	硅灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	矿渣/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水/ (kg·m <sup>-3</sup> )	钢纤 维/%	晶须/ %	减水 剂/%
Y2S	1640	240	470	470	12.2	0	2
Y2SW03	1640	240	470	470	12.2	0.6	2
Y2SW1	1640	240	470	470	12.2	1	2

1.2 试件的制备

方案 1:首先,将胶凝材料(包括水泥、矿粉及硅灰)、石英砂和晶须投入搅拌机中,干拌 1 min,然后,加水和减水剂再搅拌 5~8 min,此时的砂浆基体具有良好的流动性和适宜的粘聚性,最后,人工加入微钢纤维搅拌 12~18 min,得到均匀的拌合物,装模后在振动台上振捣 5~10 min 成型,在室温下静置 1 d 拆模,放入湿度≥95%、温度 20±2℃的养护室中养护,测试龄期时取出进行试验。

方案 2:首先,将胶凝材料和晶须投入搅拌机中,干拌 1 min,然后,加水和减水剂再搅拌 5~8 min,最后,在振动台上将水泥浆倒入均匀铺满微钢纤维的模具中抹面成型。养护方式同方案 1。

试验中,每一力学性能试件为 3 组,试验用棱柱体模具为钢模,其余为亚克力模具。

1.3 性能测试方法

1.3.1 抗折与抗压性能 试验参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—1999),采用 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体试件。

1.3.2 抗弯性能 用 400 mm×100 mm×15 mm

的薄板试件进行四点弯曲测试。采用新三思 CMT5305(300 kN 精度 0.5 级)万能试验机,测试跨度为 300 mm,加载速度恒为 0.4 mm/min,直至试件上某一裂缝出现局部化扩展破坏时试验停止,加载速度及数据收集皆由计算机完成。

1.3.3 直接拉伸性能 直接拉伸性能采用图 1 所示试件,测试仪器为新三思 CMT5504(100 kN 精度 0.5 级)万能试验机。为避免试件在变形监测区以外开裂或破坏,试件设置过渡区且使用 AB 胶粘接碳纤维布对过渡区增强,待胶水固化达一定强度后进行测试。试验时加载速率恒为 0.4 mm/min,直至试件上某一裂缝出现局部化扩展破坏时试验停止,加载速度及数据收集皆由计算机完成。

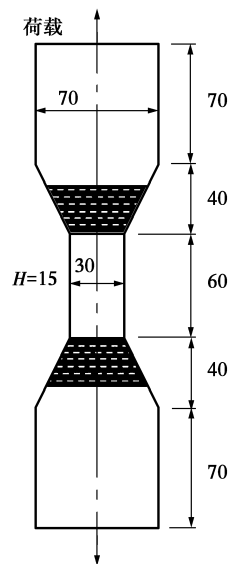


图 1 拉伸试件形状及尺寸(单位:mm)

Fig. 1 shape and size of tensile specimen

2 结果与讨论

对 UHTCC 的抗压、抗折、四点弯曲及直接拉伸性能进行了研究,并采用折压比、初始裂缝强度、韧性指数(按 ASTM C1018—97 标准计算韧性指数  $I_5$ 、 $I_{10}$  及  $I_{20}$ )以及荷载作用下的能量吸收能力来表征其韧性。能量吸收能力为荷载作用下达到特定变形值时荷载-变形曲线下的面积。试验以压头位移代替试件跨中挠度值,以位移达到 6 mm 时的弯曲荷载-位移曲线下面积及拉应变达 4% 时的直拉应力-应变曲线下面积表征能量吸收能力。

2.1 抗压、抗折性能

从表 5 中可以看出,方案 1 制备的 UHTCC 的抗压、抗折强度与 J 组相比有较大提升,其中,S3W1

组的 28 d 抗压强度、抗折强度较 J 组分别提升了 69.4%、94.2%。UHTCC 与对应同钢纤维掺量的 S1~S3 组相比早期抗压强度有所下降,但是随着龄期增长差距逐渐减小甚至反超,可能是水泥基体早期水化产物较少,晶须的掺入引入更多界面,因此,影响了微钢纤维与水化产物的粘接,随龄期增长,水化不断进行水化产物增多,其与纤维的粘接增强。此外,当钢纤维体积一定时,随着晶须掺量的增加,混凝土抗折、抗压强度都是先增加后下降,且基本都在晶须掺量为 1% 时达到极值,这说明,混掺时晶须掺量不宜过高,过高时晶须分散不均匀而难以达到理想的增强增韧效果。

表 5 UHTCC 抗压、抗折性能测试结果

Table 5 The performance results of compressive and flexural experiment

编号	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		折压比	
	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d
J	78.3	112	15.2	19.1	0.19	0.17
S1	136	152.8	24.6	26.6	0.18	0.17
S2	138	160.1	32.2	33.6	0.23	0.21
S3	154.7	186.1	32	39.4	0.21	0.21
S1W03	126.2	155.6	22.3	28.7	0.18	0.18
S1W04	131.9	159.4	23.8	27.3	0.18	0.17
S1W1	138.6	165.9	27	28.5	0.19	0.17
S1W2	132.2	159.6	27.3	27	0.21	0.17
S2W03	139.2	162	26.2	32.4	0.19	0.20
S2W04	134.8	165.5	26.6	30.5	0.20	0.18
S2W1	147.7	176.2	29.3	35.5	0.20	0.20
S2W2	148.8	173.1	30.8	33.2	0.21	0.19
S3W03	157.4	166.1	29.7	32.4	0.19	0.20
S3W04	150.8	164.5	28.1	33.2	0.19	0.20
S3W1	154.3	189.7	32.8	37.1	0.21	0.20
S3W2	150.1	184	27.3	31.6	0.18	0.17
Y2S			33.2	43.8		
Y2SW03			39.1	47.7		
Y2SW1			43.4	50.8		

方案 2 制备的 Y2SW03、Y2SW1 两组 UHTCC 试件的 7、28 d 抗折强度较未掺晶须的 Y2S 组提升明显,说明钢纤维及晶须发挥了多尺度协同增韧作用。此外,由于方案 2 制得的试件微钢纤维掺量高达 12.2%,所以,受压时已具备可与金属比拟的塑性,如图 2 所示。试件受压时主要表现为塑性变形,

抗压强度测试已无意义。

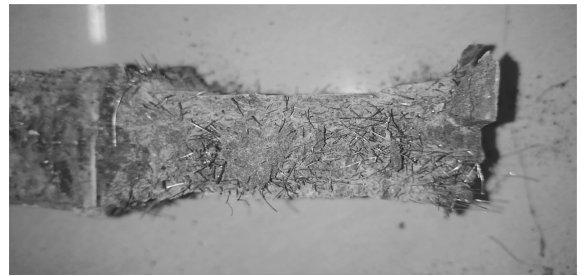


图 2 UHTCC 试件受压时发生明显塑性变形(方案 2)

Fig. 2 Obvious plastic deformation of UHTCC specimen under compressive experiment (Scheme 2)

## 2.2 四点弯曲性能

方案 1 和方案 2 的弯曲荷载-位移曲线分别如图 3 和图 4 所示。可以发现,两种方案制备的 UHTCC 在弯曲试验时均产生了假应变硬化现象,即试件初裂后仍具有抵抗变形的能力,随位移增大荷载-位移曲线继续上升。方案 1 制得 UHTCC 的弯曲荷载-位移曲线与 J 组相比更加丰满、极限弯曲位移也更大,此外,从表 7 可以看出方案 1 制得 UHTCC 荷载-位移曲线投影面积比 J 组高一个数量级,即 UHTCC 的能量吸收能力高于 J 组,当晶须掺量一定时,荷载-位移曲线投影面积即能量吸收能力有随微钢纤维掺量增加先上升后下降的趋势。这说明,微钢纤维与晶须混掺时存在适宜掺量。方案 2 制得 UHTCC 荷载-位移曲线投影面积又比方案 1 高一个数量级,即方案 2 所得 UHTCC 受弯时,能量吸收能力要高于方案 1 所得 UHTCC。并且,当钢纤维掺量不变时,随着晶须掺量在一定范围内增加,荷载-位移曲线投影面积即能量吸收能力也随之增加。

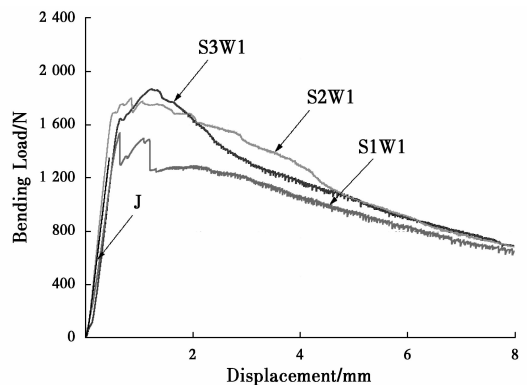


图 3 UHTCC 四点弯曲试验时的荷载-位移曲线(方案 1)

Fig. 3 Load-displacement curve of UHTCC under four-point bending test (Scheme 1)

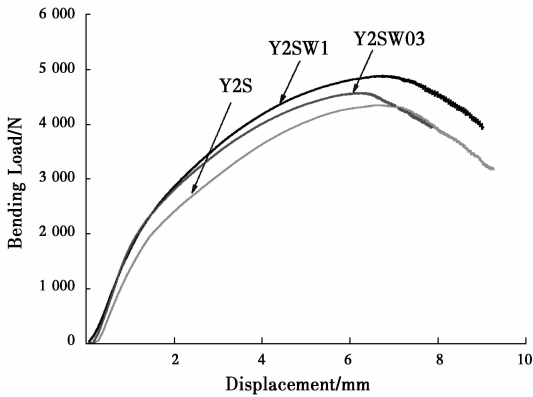


图 4 UHTCC 四点弯曲试验时的荷载-位移曲线(方案 2)  
Fig. 4 Load-displacement curve of UHTCC under four-point bending test (Scheme 2)

如表 6 所示,无论是方案 1 还是方案 2 制得的 UHTCC,其 28 d 抗弯强度及峰值位移都较 J 组有不同程度的提高。方案 1 所得 UHTCC 抗弯强度约为 J 组的 1.2~1.4 倍,峰值位移约为 J 组的 1.4~2.8 倍,UHTCC 的抗弯强度及相应峰值位移随钢纤维掺量的增加而增加;而方案 2 所得 UHTCC 抗弯强度约为 J 组的 3.2~3.6 倍,峰值位移约为 J 组的 14.3~15.5 倍,且随着晶须掺量的增加,抗弯强度及相应峰值位移均有上升的趋势。方案 1 制得的 UHTCC 峰值位移随着钢纤维掺量增加而提升,此外,方案 2 制备的试件峰值位移远高于方案 1,说明纤维掺量的增加有利于抑制裂缝的发展,延缓荷载峰值的出现,从而提升其韧性。

表 6 部分试件弯曲韧性参数

Table 6 Bending toughness parameters of some specimens

编号	初始裂缝强度/MPa	抗弯强度/MPa	峰值位移/mm	$I_5$	$I_{10}$	$I_{20}$
J		18.0	0.44			
S1W1	10.8	20.5	0.63	8.20	17.15	33.77
S2W1	18.6	24.0	0.85	6.41	13.07	24.44
S3W1	19.8	24.9	1.23	5.42	10.68	18.62
Y2S	15.8	58.0	6.68	6.94	18.31	49.15
Y2SW03	18.8	61.0	6.28	7.10	18.45	47.91
Y2SW1	20.2	65.1	6.81	8.97	23.99	49.21

普通钢纤维混凝土的初始裂缝强度一般低于 10 MPa,从表 6 可看出,方案 1 制得超高韧性混凝土初始裂缝强度均在 10 MPa 以上。方案 2 制得 UHTCC 的初始裂缝强度高达 18.8 MPa 以上,且

其韧性指数  $I_{20}$  可达 47 以上,远高于普通钢纤维混凝土。初始裂缝强度的提高表明 UHTCC 抗裂能力的提高,也说明晶须能够抑制微细观裂缝的产生及发展。韧性指数大幅提升说明 UHTCC 在初始裂缝产生后没有马上发生脆性破坏,而是存在明显的裂缝扩展阶段,发生了明显的塑性变形。

### 2.3 直接拉伸性能

方案 1 和方案 2 部分试件应力-应变曲线分别如图 5 和图 6 所示,从图中可以看出,两方案所得 UHTCC 在直接拉伸时已经明显具有假应变硬化现象。方案 1 制得 UHTCC 的极限拉应变可达 4%~8%,是普通钢纤维混凝土的 8~20 倍,当晶须掺量一定时,抗拉强度随钢纤维掺量的增加有上升的趋势。方案 2 所得的 UHTCC 的极限拉应变也可达 4% 以上,且拉伸曲线在峰值附近有一段半径很大的圆弧段,且随着晶须掺量增加,圆弧段变长,该段有明显位移产生但是拉伸强度变化不大,这是因为,此时钢纤维间的连锁作用及与基体间的拔出作用消耗了大量能量。此外,当钢纤维掺量不变时,UHTCC 抗拉强度则随晶须掺量增加而提高。从表 7 可知 Y2SW1 组试件抗拉强度最高可达 21.1MPa,分别较 S3W1、Y2S 两组试件提高了 174.0%、61.1%,若与普通纤维混凝土相比则是其 4 倍以上。

表 7 部分试件抗拉强度

Table 7 Tensile strength of some specimens

编号	抗拉强度/MPa	编号	抗拉强度/MPa
S1W1	6.3	S2W1	8.5
S3W1	7.7	Y2S	13.1
Y2SW03	18.3	Y2SW1	21.1

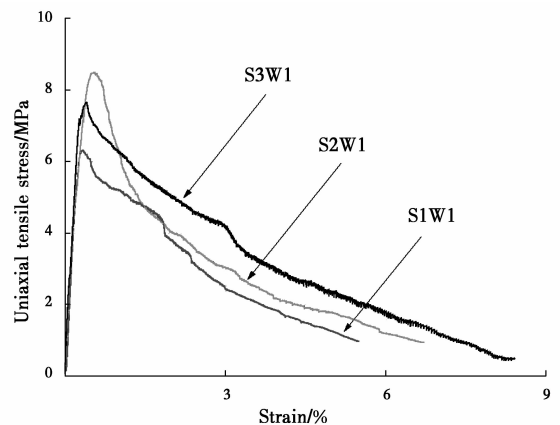


图 5 UHTCC 直接拉伸时的应力-应变曲线(方案 1)  
Fig. 5 Stress-strain curve of UHTCC under uniaxial tension (Scheme 1)

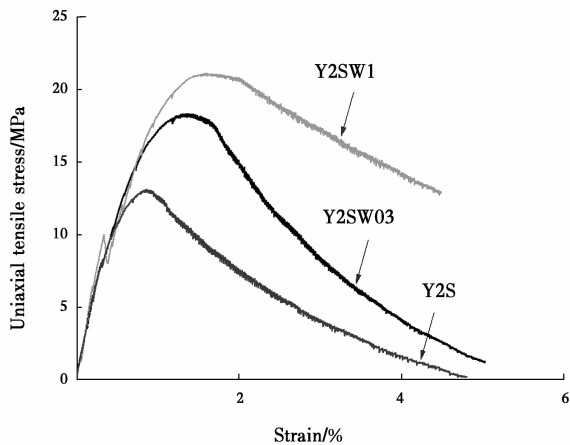


图 6 UHTCC 直接拉伸时的应力-应变曲线(方案 2)

Fig. 6 Stress-strain curve of UHTCC under uniaxial tension (Scheme 2)

从表 8 不难看出,方案 1 当晶须掺量一定时,应力-应变曲线投影面积随微钢纤维掺量增加而增加,即能量吸收能力随微钢纤维掺量增加而增加;方案 2 当微钢纤维掺量一定时,应力-应变曲线投影面积随晶须掺量增加而增加,即能量吸收能力随晶须掺量增加而增加,且方案 2 制得 UHTCC 投影面积高于方案 1,约为后者的 2~5 倍,这表明方案 2 制得 UHTCC 能量吸收能力要高于方案 1。

表 8 弯曲荷载-位移曲线、拉伸应力-应变曲线投影面积

Table 8 The Projection areas of bending load-displacement curve and tensile stress-strain curve

编号	四点弯曲/(N·mm)	直接拉伸/( $10^{-2}$ MPa)
J	281.79	
S1W1	6 548.41	14.86
S2W1	8 080.63	17.40
S3W1	7 637.81	19.68
Y2S	16 627.04	27.61
Y2SW03	18 690.76	45.33
Y2SW1	19 382.56	65.64

### 3 结论

1)两种方案所研制的 UHTCC 包括抗压强度、抗折强度、抗拉强度以及抗弯强度,相较于普通钢纤维混凝土都得到大幅提升。尤其是方案 2 通过渗浇工艺制备的 UHTCC 抗弯强度可达 61 MPa 以上,抗拉强度最高可达 21.1 MPa。

2)UHTCC 表现出远高于普通钢纤维混凝土的韧性和延性。方案 1 制得的 UHTCC 极限拉应变可

达 4%~8%,而方案 2 极限拉应变也可达 4%以上。此外,方案 2 制得的 UHTCC 受压时具备可与金属比拟的塑性变形,韧性指数  $I_{20}$  也可达 47 以上。

3)试验证明多尺度优化增韧设计所得 UHTCC 的韧性明显要优于单一手段增韧所得混凝土。碳酸钙晶须能与微钢纤维性能互补协同增强水泥基材料,改善其韧性,且增韧适宜的掺量为 1%。

### 参考文献:

- [1] 张聪,曹明莉,许玲. 混凝土多尺度特征与多尺度纤维增强理论研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(3): 44-48.  
ZHANG C, CAO M L, XU L. Progresses in multi-scale characteristic of concrete and multi-scale fiber reinforcing theory [J]. China Concrete and Cement Products, 2014(3):44-48. (in Chinese)
- [2] 夏正兵,蒋东升. 多尺度超高韧性水泥基复合材料力学性能试验[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(12):62-66.  
XIA Z B, JIANG D S. Experimental study on mechanical properties of multi-scale ultra-high toughness cementitious [J]. China Concrete and Cement Products, 2015(12):62-66. (in Chinese)
- [3] LANKARD D R. Slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON): Properties and applications [C]. Mrs Online Proceeding Library, 1984:42.
- [4] IPEK M, AKSU M, UYSAL M, et al. Effect of pre-setting pressure applied flexure strength and fracture toughness of new SIFCON + RPC composite during setting phase [J]. Construction & Building Materials, 2015, 79:90-96.
- [5] IPEK M, AKSU M, YILMAZ K, et al. The effect of pre-setting pressure on the flexural strength and fracture toughness of SIFCON during the setting phase [J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 515-521.
- [6] BEGLARIGALE A, YALCINKAYA C, YIGITER H, et al. Flexural performance of SIFCON composites subjected to high temperature [J]. Construction and Building Materials, 2016, 104: 99-108.
- [7] 刘香云. 混凝土及其增强材料的发展与应用[J]. 中国新技术新产品, 2012(4):177.  
LIU X Y. Development and applications of concrete and its reinforcing materials [J]. New Technologies and Products, 2012(4):177. (in Chinese)
- [8] 呼素娟. 砂浆渗浇钢纤维混凝土(SIFCON)[C]//全国

- 土木工程研究生学术论坛,2004.
- HU S J. Slurry infiltrated steel fiber concrete (SIFCON) [C]// National Civil Engineering Forum for Graduate Students, 2004. (in Chinese)
- [9] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement & Concrete Research, 1995, 25(7):1501-1511.
- [10] 王冲, OMOORE L. 超高强微钢纤维增韧混凝土的制备及其力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(6):1-7.
- WANG C, O'MOORE L. Preparation and mechanical properties of super high-strength steel micro-fiber toughened concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(6):1-7. (in Chinese)
- [11] 徐世焱, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9):32-41.
- XU S L, LI H D. Uniaxial tensile experiments of ultra-high toughness cementitious composite [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9):32-41. (in Chinese)
- [12] LI V C, WU C, WANG S, et al. Interface tailoring for strain-hardening PVA-ECC [J]. Aci Materials Journal, 2011, 99:463-472.
- [13] WILLE K, EI-TAWIL S, NAAMAN A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading [J]. Cement & Concrete Composites, 2014, 48(2):53-66.
- [14] JUN P, MECHTCHERINE V. Behaviour of Strain-hardening Cement-based Composites (SHCC) under monotonic and cyclic tensile loading [J]. Cement & Concrete Composites, 2010, 32(10):801-809.
- [15] TUYAN M, YAZICI H. Pull-out behavior of single steel fiber from SIFCON matrix [J]. Construction & Building Materials, 2012, 35(10):571-577.
- [16] KAMAL A, KUNIEDA M, UEDA N, et al. Evaluation of crack opening performance of a repair material with strain hardening behavior [J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30(10): 863-871.
- [17] FARNAM Y, MOOSAVI M, SHEKARCHI M, et al. Behaviour of slurry infiltrated fibre concrete (SIFCON) under triaxial compression [J]. Cement & Concrete Research, 2010, 40(11):1571-1581.
- [18] BEGLARIGALE A, YALCINKAYA C, YIGITER H, et al. Flexural performance of SIFCON composites subjected to high temperature [J]. Construction and Building Materials, 2016, 104: 99-108.

(编辑 王秀玲)