



# 钢纤维对超高性能混凝土性能的影响

王成启, 郭玉林, 梁远博

(中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 钢纤维的几何尺寸是超高性能混凝土(UHPC)的增强和增韧的关键因素。采用不同长径比的钢纤维, 通过试验研究钢纤维长径比对 UHPC 的工作性能和力学性能, 并分析钢纤维长径比对 UHPC 的影响机理。结果表明, 随着钢纤维长径比的增加, UHPC 的坍落度和扩展度均不断降低, 含气量增大; 随着钢纤维长径比的增加, UHPC 的抗压强度、抗折强度、弯曲韧性系数和抗冲击性能均不断增加, 但增加幅度呈现不断降低趋势; 钢纤维的长径比宜控制在 60~100, 可配制出工作性和力学性能优异的 UHPC。该 UHPC 在某码头工程桩基修复加固中获得应用, 取得了良好的应用效果。

**关键词:** 超高性能混凝土(UHPC); 钢纤维; 长径比; 工作性能; 力学性能

中图分类号: TU 528; U 654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0022-05

## Effect of steel fiber on properties of ultra high performance concrete

WANG Cheng-qi, GUO Yu-lin, LIANG Yuan-bo

(CCCC Shanghai Third Harbor Engineering Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** The geometric dimension of steel fiber is a key factor for the reinforcement and toughening of ultra high performance concrete (UHPC). In this paper, the working and mechanical properties of UHPC with different length diameter ratio are experimentally studied, and the influence mechanism of steel fiber length diameter ratio on UHPC is analyzed. The results show that with the increase of the length diameter ratio of steel fiber, the slump and expansion of UHPC continue to decrease and the gas content increases. With the increase of steel fiber aspect ratio, the compressive strength, flexural strength, flexural toughness coefficient and impact resistance of UHPC are increasing, but the increasing range shows a decreasing trend. The length diameter ratio of steel fiber should be controlled at 60~100, and UHPC with excellent construction and mechanical properties can be prepared. The developed UHPC has been applied in the repair and reinforcement of pile foundation of a wharf project and achieved good application results.

**Keywords:** ultra high performance concrete(UHPC); steel fiber; length diameter ratio; working performance; mechanical property

众所周知, 混凝土是应用最为广泛的建筑材料。随着我国基础设施建设进程加快, 2019 年混凝土用量近 24 亿  $m^3$ 。但普通混凝土存在结构质量大、抗拉强度低、易开裂、耐久性低等弱点, 在工程结构向大型化和高耐久性方向发展凸显。超高性能混凝土(ultra high performance concrete, UHPC)是由水泥、矿物掺合料、细集料、高强短

纤维和减水剂等加水拌和而成的一种具有超高强度、高韧性和高耐久性的水泥基复合材料<sup>[1]</sup>, 可有效减小工程结构尺寸, 提高混凝土结构耐久性。因此, 世界各国开始逐渐重视 UHPC 的研究和应用, 各国的学者也大规模开展配制技术与应用研究, 并已编制相关的设计指南。

在 UHPC 中加入纤维可以起到控制裂缝宽度、

改善韧性和提高延性的作用, 从而具有超高抗拉强度和高韧性。相比其他材质的纤维, 钢纤维具有弹性模量大和抗拉强度高等特点, 对混凝土性能的改善效果较为明显<sup>[2]</sup>。钢纤维几何外形及掺量对 UHPC 的力学性能产生显著影响, UHPC 在荷载作用下的破坏模式基本为纤维拔出, 与平直纤维相比, 在 UHPC 中掺加异型纤维能获得更好的极限拉伸强度<sup>[3]</sup>, 端钩型钢纤维的外形构造可提供较大的抗拔脱力, 增加了 UHPC 的力学性能<sup>[4-5]</sup>。然而, 现有文献资料关于端钩型钢纤维长径比对 UHPC 的性能影响还缺乏系统研究。为充分发挥钢纤维在 UHPC 中的作用和配制出性能优异的 UHPC, 本文开展端钩型钢纤维长径比对 UHPC 工作性和力学性能影响的研究, 为 UHPC 配合比设计提供依据。研制的 UHPC 可应用于码头工程桩基裂缝或破损加固修复, 替代传统钢套筒中灌浆材料, 可省去钢筋网片, 从而简化施工和加快灌注施工。

# 1 试验

## 1.1 原材料

### 1.1.1 UHPC 基体原材料

海螺水泥厂生产的 P·Ⅱ52.5 水泥; 上海宝田新型建材有限公司生产的 S95 级高炉矿渣粉; 埃肯国际贸易(上海)有限公司生产的 940 硅灰; 浙江江山博士龙建材有限公司生产的硫铝酸钙类Ⅱ型膨胀剂; 洞庭湖河砂, 级配范围为 0.15~2.36 mm; 苏州市兴邦建材有限公司生产的高性能聚羧酸减水剂, 减水率大于 30%; 符合 JGJ 63—2006《混凝土用水标准》的混凝土拌和用水。

### 1.1.2 钢纤维

采用端钩型钢纤维, 其抗拉强度为 3.1 GPa, 长径比选用 57、60、73 和 100, 几何尺寸参数见表 1。

表 1 钢纤维主要参数		
直径/mm	长度/mm	长径比
0.22	11	50
0.22	13	60
0.22	16	73
0.22	22	100

## 1.2 配合比

为保证 UHPC 的强度和耐久性, 采用水泥、矿渣粉和硅灰组成胶凝材料, 并掺入膨胀剂保证其体积稳定性, 水胶比为 0.18, UHPC 基体配合比见表 2, 并采用长径比为 57、60、73 和 100 的钢纤维, 纤维的体积掺量为 2.0%, 研究钢纤维的几何尺寸对 UHPC 性能的影响。

表 2 UHPC 基体配合比						
水泥	矿粉	硅灰	膨胀剂	集料	减水剂	水
0.85	0.1	0.05	0.045	1	0.01	0.18

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 工作性能

工作性能试验按 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌和物性能试验方法标准》相关规定进行。

### 1.3.2 抗压强度和抗折强度

抗压强度和抗折强度试验按 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》相关规定进行。

### 1.3.3 弯曲韧性

弯曲韧性试验按照日本混凝土协会 JCI SF4 韧性评价方法进行测试<sup>[6]</sup>, 采用 100 mm×100 mm×400 mm 的长方体, 跨度为 300 mm, 采用三分点加载, 测试荷载与挠度曲线, 当试件挠度变形至  $\delta_b$ (跨度的 1/150) 时, 由荷载-挠度曲线下的面积和试件尺寸等参数确定的弯曲韧性系数来衡量材料的弯曲韧性。 $\overline{\delta_b}$ 表达式为:

$$\overline{\delta_b} = \frac{T_b l}{\delta_b b h^2}$$

(1)

式中:  $\overline{\delta_b}$  为弯曲韧性系数 (MPa);  $\delta_b$  为特征挠度值, 数值上等于跨度的 1/150;  $T_b$  为到达  $\delta_b$  之前荷载-挠度曲线的面积 (N·mm);  $l$  为试件跨度 (mm);  $b$  为宽度 (mm);  $h$  为高度 (mm)。

### 1.3.4 抗冲击性能

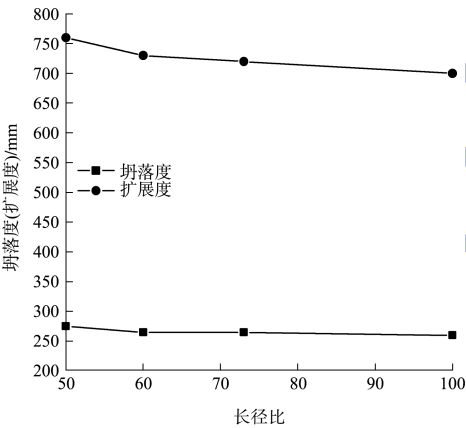
抗冲击试验采用落锤法, 采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的 DTM1000 落锤冲击试验机, 制作 400 mm×100 mm×50 mm (长×宽×厚) 的 UHPC 板, 跨度为 300 mm, 落锤在跨中冲击 UHPC 板, 落锤质量为 3 kg, 落锤高度为 120 mm, 记录冲击 UHPC 板的初裂次数和断裂次数; 在板

的底部粘贴应变片，以应变突变时的冲击次数作为初裂次数，以 UHPC 板出现贯穿裂缝的次数为断裂次数。

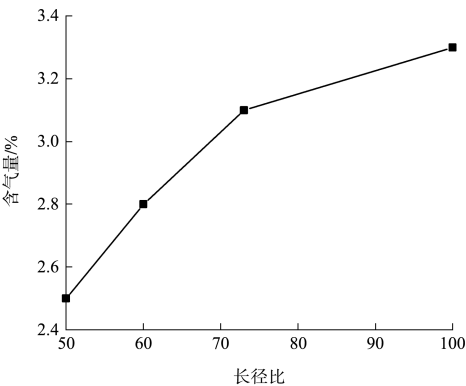
2 试验结果与分析

2.1 工作性能

钢纤维长径比与 UHPC 拌和物性能关系如图 1 所示。可以看出，随着长径比的增大，UHPC 坍落度和扩展度均不断减小，含气量不断增大。在同等体积纤维掺量下，随着纤维长径比增大，UHPC 拌和物中纤维的长度增大，数量较少，由此导致纤维与拌和物间发生的黏结和摩擦作用增大，纤维对 UHPC 扩展阻力影响较大，从而使得 UHPC 拌和物的坍落度和扩展度减小<sup>[7]</sup>，同时 UHPC 浆体气泡不易排出，含气量有所增大。



a) 坍落度和扩展度



b) 含气量

图 1 长径比对 UHPC 拌和物性能影响

UHPC 新拌浆体流动的过程中，浆体会对钢纤维施加力和力矩，钢纤维根据流动速度不同而发生旋转并垂直于浆体流动的方向，最终导致 UHPC 拌和物的流动困难，发生边壁效应<sup>[8]</sup>，如图 2 所示。因此随着钢纤维长径比的增加，钢纤维长度相对较大，UHPC 对钢纤维的旋转阻力增加，导致 UHPC 浆体扩展相对困难，导致钢纤维长径比较大的 UHPC 扩展度下降，工作性能下降。

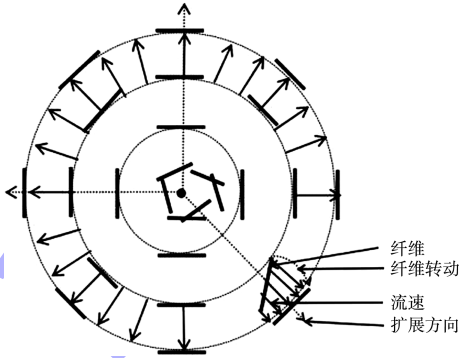
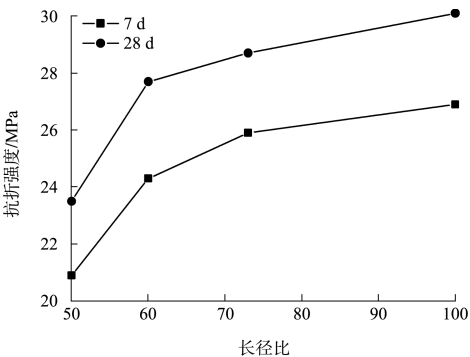


图 2 UHPC 拌和物边壁效应

2.2 力学性能

2.2.1 抗压强度与抗折强度

钢纤维长径比与 UHPC 强度关系如图 3 所示。可以看出，随着长径比的增大，UHPC 抗压强度和抗折强度均不断增大。当纤维长径比从 50 增加到 60 时，UHPC 的 28 d 抗折、抗压强度分别增长了 17.9%、3.0%；当纤维长径比从 60 增加到 73 时，UHPC 的 28 d 抗折、抗压强度分别增长了 6.3%、2.8%；当纤维长径比从 73 增加到 100 时，UHPC 的 28 d 抗折、抗压强度分别增长了 4.9%、2.2%。由此可见随着长径比的增大，纤维对 UHPC 强度增长率逐渐下降。



a) 抗折强度

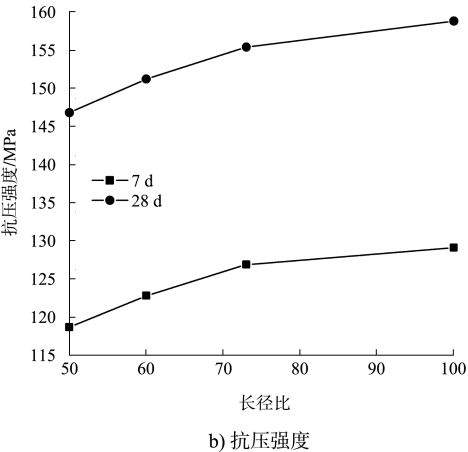


图 3 长径比对 UHPC 强度影响

2.2.2 弯曲韧性

超高强混凝土伴随着高脆性, 应改善其脆性和变形性能。超高性能混凝土中掺入钢纤维可有效地降低其脆性和改善其弯曲韧性, 而弯曲韧性可表征超高性能混凝土的韧性和耗能能力。进行不同长径比钢纤维 UHPC 弯曲韧性试验, 弯曲韧性系数的测试结果见表 3。可以看出, 随着钢纤维长径比的增加, UHPC 的弯曲韧性系数不断增加, 表明 UHPC 的韧性增加。钢纤维长径比对 UHPC 弯曲韧性系数的影响见图 4。可以看出, 当纤维长径比从 57 增加到 60 时, UHPC 的弯曲韧性系数增长了 6.5%; 当纤维长径比从 60 增加到 73 时, UHPC 的弯曲韧性系数增长了 3.9%; 当纤维长径比从 73 增加到 100 时, UHPC 的弯曲韧性系数增长了 2.7%。因此, 钢纤维长径比对 UHPC 弯曲韧性系数影响较大, 且随长径比的增加, 弯曲韧性系数增长率呈现降低的趋势。

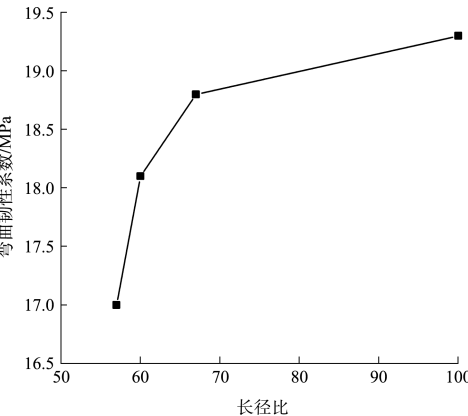


图 4 钢纤维长径比对 UHPC 弯曲韧性系数的影响

表 3 不同长径比钢纤维 UHPC 弯曲韧性测试结果

钢纤维长径比	<i>l</i> /mm	<i>b</i> /mm	<i>h</i> /mm	$\delta_b$ /mm	$T_b$ /(kN·m)	$\overline{\delta_b}$ /MPa
57	300	100	100	2	114.2	17.0
60	300	100	100	2	120.6	18.1
73	300	100	100	2	125.1	18.8
100	300	100	100	2	128.9	19.3

2.2.3 抗冲击性能

进行不同长径比钢纤维的 UHPC 抗冲击试验, 结果见表 4。可以看出, 不同长径比的钢纤维 UHPC 均具有良好的抗冲击性能, 随着钢纤维长径比的增加, UHPC 的抗冲击的初裂次数、初裂能耗、断裂次数和断裂能耗均不断增加, 表明 UHPC 的抗冲击性能不断增强; 当纤维长径比从 57 增加到 60 时, UHPC 的初裂能耗和断裂能耗分别增长了 60.0%和 11.1%; 当纤维长径比从 60 增加到 73 时, UHPC 的初裂能耗和断裂能耗分别增长了 25.0%和 8.0%; 当纤维长径比从 73 增加到 100 时, UHPC 的初裂能耗和断裂能耗分别增长了 10.0%和 1.8%。因此, 钢纤维的长径比对 UHPC 抗冲击性能也产生明显影响, 且随长径比的增加, 抗冲击初裂能耗和断裂能耗增长率呈现降低的趋势。

表 4 不同长径比钢纤维 UHPC 抗冲击测试结果

钢纤维长径比	初裂次数/次	初裂能耗/(N·m)	断裂次数/次	断裂能耗/(N·m)
57	5	17.6	45	158.8
60	8	28.2	50	176.4
73	10	35.3	54	190.5
100	11	38.8	55	194.0

2.2.4 讨论分析

纤维增强水泥基复合材料在外力作用下, 纤维与基体将产生相对滑移, 通过基体与纤维之间剪切应力将荷载传给纤维。纤维的拉力与剪切力达到平衡时有:

$$\pi d_f \cdot \frac{l_f}{2} \tau = f_f \pi \cdot \frac{d_f^2}{4} \tag{2}$$

即: 
$$\frac{l_f}{d_f} = \frac{f_f}{2\tau} \tag{3}$$

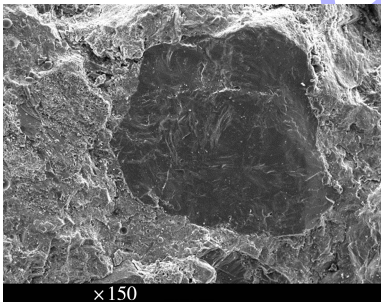
$$f_f = 2\tau \cdot \frac{l_f}{d_f} \tag{4}$$



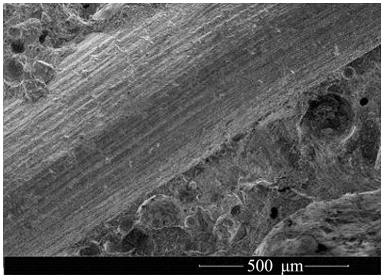
式中： $f_f$ 为纤维的应力； $l_f$ 为纤维的长度； $d_f$ 为纤维的直径； $\tau$ 为纤维与基体间界面黏结强度。

由式(4)可以看出，纤维长径比和纤维与UHPC基体界面的黏结强度是充分发挥纤维增强和增韧的关键因素。适当增大纤维长径比可有效提高UHPC的强度、韧性和抗冲击性能，但纤维长度不能过长，因为长度较长的纤维易于相互搭接团聚而产生结团，难以在UHPC中均匀分散，在搅拌过程中也易结团，且钢纤维长度对钢筋间距较小的构件浇筑产生一定的影响。因此，为了保证UHPC的工作性和施工性能，并使纤维在UHPC中发挥作用和保证强度，钢纤维应具有合适的长径比，一般控制在60~100。

除钢纤维长径比外，纤维与基体界面黏结强度是有效发挥纤维作用的关键因素。测试了UHPC基体及钢纤维与UHPC基体界面的微观形貌，其扫描电子显微镜结果如图5所示。可以看出，UHPC基体集料与水化产物间形成紧密结构，钢纤维与UHPC基体界面致密，有效提升了钢纤维与UHPC基体间黏结强度，可使钢纤维紧密地镶嵌在UHPC浆体中，加强浆体和集料的连接，进而提高了UHPC的抗折、抗压强度、弯曲韧性和抗冲击性能等宏观性能。



a) UHPC基体



b) 钢纤维与UHPC基体界面

图5 UHPC微观形貌

3 工程应用

UHPC可应用于码头工程桩基裂缝或破损加固修复。某码头工程桩基为后张法预应力混凝土大管桩，由于码头受外力作用，大管桩出现裂缝和破损，采用钢套筒压力灌浆法进行修复，钢套筒与大管桩环形空间的间隙为50 mm。采用UHPC进行灌注，采用长径比为60的钢纤维，按照表2的配合比拌制UHPC进行灌注施工，测得坍落度为270 mm、扩展度为700 mm、3 h竖向膨胀率为0.15%、24与3 h膨胀率之差为0.08%，满足灌注施工要求；测得UHPC的7、28 d的抗压强度为121.8、145.9 MPa，测得7、28 d的抗折强度为22.5、26.5 MPa，具有较高的抗压强度和抗折强度，UHPC的28 d抗压强度显著高于60 MPa的常规要求，且大于管桩本体的抗压强度。采用UHPC灌浆加固，可省去常规加固在钢护筒环形空腔中放置的钢筋网片，简化施工和加快灌注施工，加固效果良好。

4 结论

1) 钢纤维长径比对UHPC工作性能产生一定影响，随着钢纤维长径比增加，UHPC坍落度和扩展度降低，流动性下降，且钢纤维易于相互搭接团聚而产生结团现象，钢纤维长径比不宜大于100。

2) 钢纤维长径比对UHPC的抗压、抗折强度、弯曲韧性和抗冲击等力学性能产生显著影响，且随着钢纤维长径比增加，UHPC抗压、抗折强度、弯曲韧性和抗冲击性能均不断增大，但增大幅度均呈现不断降低趋势。

3) 对钢纤维在UHPC中的作用机理进行分析，UHPC基体具有良好的密实性和强度，钢纤维与UHPC基体具有良好的黏结强度，钢纤维的长径比是纤维增强作用的关键因素，钢纤维的长径比宜控制在60~100，可有效保证UHPC的施工性能和力学性能。

4) UHPC在某码头工程桩基修复加固中获得应用，UHPC工作性满足灌注施工要求，并具有较高的抗压和抗折强度，加固效果良好。