长江科学院院报
Journal of Yangtze River Scientific Research Institute
ISSN 1001-5485,CN 42-1171/TV

《长江科学院院报》网络首发论文

题目：　回收钢纤维对超高性能混凝土工作性和力学性能的影响研究
作者：　南雪丽，陈浩，姬建瑞，王毅，陈广钊，李梅，唐维斌
收稿日期：　2021-07-26
网络首发日期：　2021-12-16
引用格式：　南雪丽，陈浩，姬建瑞，王毅，陈广钊，李梅，唐维斌．回收钢纤维对超高性能混凝土工作性和力学性能的影响研究[J/OL]．长江科学院院报．https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20211215.1422.024.html

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2021-12-16 09:36:22
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20211215.1422.024.html

长江科学院院报
Journal of Yangtze River Scientific Research Institute

doi:10.11988/ckyyb.20210762

回收钢纤维对超高性能混凝土工作性和力学性能的影响研究

南雪丽[1,2]，陈　浩[1,2]，姬建瑞[1,2]，王　毅[1,2]，陈广钊[1,2]，李　梅[1,2]，唐维斌[3]
（1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室，兰州 730050；
2. 兰州理工大学材料科学与工程学院，兰州 730050；3. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司，兰州 730000）

摘　要：为了探究回收钢纤维（RSF）在超高性能混凝土（UHPC）中替代工业钢纤维（SF）的可行性，以 SF 作为对比，采取流动度试验、流变试验、钢纤维分散度试验及抗折抗压试验，研究了 RSF 对超高性能混凝土工作性和力学性能的影响。结果表明：新拌 RSFUHPC 与 SFUHPC 流动性经过统计学分析无明显差异，由于 RSF 长径比不均，RSFUHPC 屈服应力及塑性粘度均大于 SFUHPC，但 RSFUHPC 剪切增稠程度明显降低，同时 RSF 在新拌及硬化 UHPC 中的分散度均明显大于 SF。当钢纤维掺量一定时，*P*-value＞0.05，表明相比于 SF，掺入 RSF 对 UHPC 荷载-位移曲线、抗折强度以及抗压强度没有显著影响。因此，掺入 RSF 可以在保证 UHPC 力学性能的同时，显著增强其在 UHPC 中的分散性，降低实际工程中人工振捣的施工难度，提高施工质量。

关键词：超高性能混凝土；回收钢纤维；工业钢纤维；工作性；力学性能
中图分类号：U414　　**文章标志码：A**　　**开放科学（资源服务）标识码（OSID）：**

Study on the Effect of Recycled Steel Fiber and Industrial Steel Fiber on Workability and Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete

NAN Xue-li[1,2], CHEN Hao[1,2], JI Jian-rui[1,2], WANG Yi[1,2], CHEN Guang-zhao[1,2], LI Mei[1,2], TANG Wei-bin[3]
(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Material Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Gansu Province Transportat Planning, Survey and Design Institute Co.,Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of replacing industrial steel fiber (SF) with recycled steel fiber (RSF) in ultra-high performance concrete (UHPC), the effects of RSF on the workability and mechanical properties of UHPC were studied by using SF as a comparison, including fluidity test, rheological test, steel fiber dispersion test and bending and compression test. The statistical analysis results indicated that there was no significant difference between the fluidity of freshly mixed RSFUHPC and that of SFUHPC. The yield stress and plastic viscosity of RSFUHPC were greater than those of SFUHPC, which can be attributed to the uneven aspect ratio of RSF. However, the shear thickening degree of RSFUHPC was significantly lower than that of SFUHPC, and the dispersion of RSF in freshly mixed and hardened UHPC was significantly greater than that of SF. Using the same mixed amount of RSF as that of SF, a *P*-value > 0.05 was obtained, indicating that, compared with SF, RSF had no significant effect on the load-displacement curve, flexural strength, or compressive strength of UHPC. Therefore, using RSF would ensure good dispersion in UHPC and excellent mechanical properties of UHPC. Moreover, it

收稿日期：2021-07-26 ；**修回日期：**2021-11-10
基金项目：甘肃省住房和城乡建设厅科技规划项目(JK2021-11);甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA170);甘肃省科技计划项目(18YF1GA036)
作者简介：南雪丽(1977—)，女，甘肃兰州人，副教授，硕士研究生，从事道路功能材料研究。**E-mail：**nanxueli@163.com

would reduce the construction difficulty associated with artificial vibrations in actual engineering structures and improve the construction quality.

Keywords: Ultra high performance concrete; Recycled steel fiber; Industrial steel fiber; Workability; Mechanical properties

1 研究背景

超高性能混凝土，简称 UHPC (ultra-high performance concrete)，是一种新型水泥基复合材料。UHPC 具有超高强度、高韧性及优异耐久性等特点，抗压强度一般在 120 MPa 以上，是传统普通混凝土的 3 倍以上[1-2]，但其基体脆性极大，易在较低应变水平下发生破裂[3]。掺入工业钢纤维是克服此问题的最有效途径，已在工程混凝土生产中被广泛采用，但工业钢纤维在生产过程中消耗大量自然资源并且由于 CO_2 排放而严重影响自然环境，研究人员已经在为寻求一种可持续和有效的替代高价工业钢纤维的方法上进行了大量研究工作[4]。近 15 年以来，在废旧轮胎中提取的回收钢纤维（RSF）被发现是工业钢纤维（SF）的最佳替代品，具有有限的环境影响和较低的回收成本[5]。

目前国内外学者针对 SF 对 UHPC 力学性能的影响进行了大量研究。Abbas 等[6]采用不同钢纤维掺量及长度，研究其对 UHPC 力学性能的影响，结果表明随着纤维掺量的增大，抗压强度略有增大，但钢纤维长度对抗压强度和耐久性无明显影响。Yang 等[7]采用五种类型钢纤维掺入 UHPC 中研究其对 UHPC 力学性能的影响，结果表明相比于 SF，RSF 的掺入对抗压强度的损失较少，损失率仅为 2.5%。这些研究工作表明 SF 的掺入可以改善 UHPC 的力学性能，有关 RSF 对 UHPC 工作性和力学性能的影响研究以及两种钢纤维之间的比较研究较少。本文通过在 UHPC 中掺入 SF 和 RSF 分别制备出 SFUHPC 和 RSEUHPC，采用流动度、流变参数、新拌及硬化后的纤维分布、抗压强度、抗折强度等性能指标，研究两种不同类型钢纤维对 UHPC 工作性和力学性能的影响，分析 RSF 替代 SF 的可行性，为进一步推广 RSF 在 UHPC 中的应用及 UHPC 的配合比设计提供依据。

2 原材料与试验方法

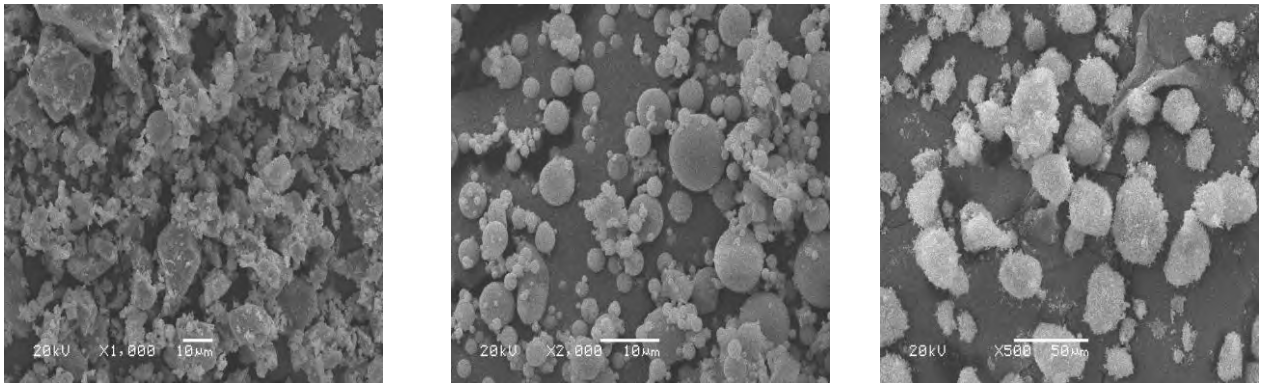
2.1 原材料

本研究中水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，矿物掺合料为 1 级粉煤灰和硅灰。主要化学成分如表 1 所示。原材料的微观形貌如图 1 所示。减水剂为聚羧酸系高效减水剂，减水率为 30%。所用砂为石英砂，控制 20～40 目、40～70 目和 70～120 目质量比为 1∶1.04∶0.85。工业钢纤维（SF）采用工业镀铜钢纤维，回收钢纤维（RSF）采用的废旧轮胎经过回收加工厂机械破碎及电磁筛分后的废旧钢纤维，并选取长径比为 50～70 的直钩形回收钢纤维进行试验，如图 2 所示，其技术指标及化学成分分别如表 2、表 3 所示。

表 1　原材料的主要化学成分

Table 1　The main chemical composition of a raw material　%

氧化物成分	水泥	粉煤灰	硅灰
SiO_2	26.55	49.43	96.04
Al_2O_3	9.62	22.96	0.539
Fe_2O_3	3.54	8.57	0.324
CaO	53.83	9.77	0.738
MgO	1.54	1.86	0.630
SO_3	2.22	1.61	0.195
Na_2O	0.505	1.62	0.444
K_2O	0.971	2.06	0.699
TiO_2	0.36	1.13	0.0133
P_2O_5	0.0784	0.329	0.121
MnO	0.410	0.149	0.0281
ZrO_2	0.0162	0.0518	0.0133



(a) Cement (b) Fly ash (c) Silica fume

图 1 原材料 SEM 图像

Fig.1 SEM image of raw materials

表 2 钢纤维性能参数

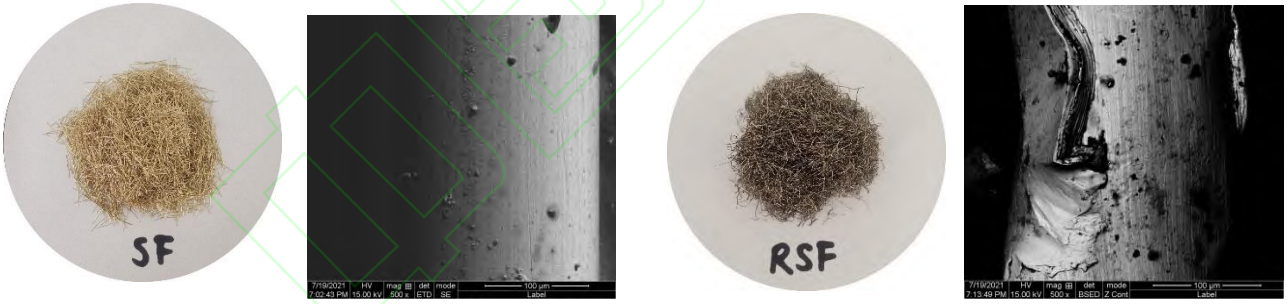
Table 2 Property parameters of steel fiber

性能参数		纤维长度（mm）	纤维直径（mm）	纤维长径比	抗拉强度（MPa）
钢纤维类型	工业钢纤维（SF）	13	0.22	59	2000
	回收钢纤维（RSF）	5～40	0.1～0.4	50～100	3500

表 3 钢纤维化学组成

Table 3 Chemical composition of steel fiber %

化学组成	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Br	Rb	Eu
工业钢纤维（SF）	0.092	0.44	89.03	6.49	3.03	0.2	0.17	0.55
回收钢纤维（RSF）	0.092	0.4	93.72	3.02	1.59	0.21	0.18	0



(a)工业钢纤维(SF) (b)回收钢纤维(RSF)

图 2 两种钢纤维图片及 SEM 图像

Fig.2 Pictures of two types of steel fibers

2.2 配合比设计

本试验采用可压缩堆积模型（CPM）进行配合比设计计算。UHPC 含有较多组分的超细颗粒，CPM 模型是建立粉体超细颗粒的最紧密堆积模型，共有 3 种交互模式，无交互和完全交互是两种极限的交互，无交互是某级颗粒间的堆积过程不受其他粒径存在的影响，完全交互是指不同级颗粒间完全交互[8]。实际堆积过程是大颗粒与小颗粒部分交互影响，小颗粒嵌入到大颗粒中的过程，小颗粒会影响大颗粒本身的堆积，产生“松动效应”，此时大颗粒占主导位置；当小颗粒占主导位置时，大颗粒会影响到小颗粒堆积，产生“壁面效应”[9]。为把实际情况转变为以上的两种极限情况以便于计算，根据三元混合料堆积过程推导出松开效应系数和壁效应系数。然后经过引入反应不同粒径颗粒占主导地位时压实程度的压实指数 K，经推导得到 K 与密实度的表达式（1），最后代入各个原料的占比求解方程即可得到 UHPC 的实际堆积密实度[8]。

$$K=\sum_{i=1}^{n}\frac{\gamma_i/\beta_i}{1/\Phi-1/\gamma_i} \tag{1}$$

其中 K 为压实指数，Φ为混合料体系实际堆积密实度，γ_i为混合料体系中第 i 粒级颗粒的虚拟堆积密实度，β_i为混合料体系中第 i 粒级颗粒剩余堆积密实度。利用颗粒堆积模型可以提高 UHPC 中超细颗粒的堆积密实度，进而提高 UHPC 颗粒结构致密性，减少混凝土颗粒堆积空隙体积[10]。

2.3 试件制备与养护

根据 CPM 模型计算得出各试验组配合比如表 4 所示。制备时，先将水泥、粉煤灰、硅灰和石英砂放入搅拌机中干拌 1 分钟，形成干混料，再将减水剂及水加入干混料中先慢搅 5 分钟，再快搅 1 分钟形成匀质浆体，最后加入钢纤维慢搅 2 分钟。搅拌结束后，立即进行流动度及流变性能测试，测试完成后成型于 100 mm×100 mm×100 mm 及 100 mm×100 mm×400 mm 的模具中，24 小时后脱模放入水中养护至力学性能测试龄期。

表 4　UHPC 实验配合比

Table 4　UHPC Mixed proportion design

编号	配合比（kg/m³）								钢纤维（%）
	水泥	粉煤灰	硅灰	石英砂			水	减水剂	
				20~40 目	40~70 目	70~120 目			
UHPC0	800	152	129	359	373	305	139	80	0
SFUHPC0.4	800	152	129	359	373	305	139	80	SF0.4
SFUHPC0.6	800	152	129	359	373	305	139	80	SF0.6
SFUHPC0.8	800	152	129	359	373	305	139	80	SF0.8
SFUHPC1.0	800	152	129	359	373	305	139	80	SF1.0
SFUHPC1.4	800	152	129	359	373	305	139	80	SF1.4
SFUHPC1.6	800	152	129	359	373	305	139	80	SF1.6
SFUHPC1.8	800	152	129	359	373	305	139	80	SF1.8
SFUHPC2.0	800	152	129	359	373	305	139	80	SF2.0
RSFUHPC0.4	800	152	129	359	373	305	139	80	RSF0.4
RSFUHPC0.6	800	152	129	359	373	305	139	80	RSF0.6
RSFUHPC0.8	800	152	129	359	373	305	139	80	RSF0.8
RSFUHPC1.0	800	152	129	359	373	305	139	80	RSF1.0
RSFUHPC1.4	800	152	129	359	373	305	139	80	RSF1.4
RSFUHPC1.6	800	152	129	359	373	305	139	80	RSF1.6
RSFUHPC1.8	800	152	129	359	373	305	139	80	RSF1.8
RSFUHPC2.0	800	152	129	359	373	305	139	80	RSF2.0

2.4 试验方法

2.4.1 工作性试验

由于 UHPC 中没有掺加粗骨料，故流动性试验根据《水泥胶砂流动度测定方法》（GB/T 0507—2005）进行。流变试验采用 HAKKE Viscotester iQ 流变仪对 UHPC 基体胶凝材料浆体的流变性能进行测试，测试容器为体积 500 mL、直径 85 mm、高 130 mm 的圆筒罐，测试程序参照 Viktor Mechtcherine[11]的试验方法，即连续剪切速率控制试验。

钢纤维分散度测定试验分为新拌 UHPC 钢纤维分散度测试和硬化 UHPC 钢纤维分散度测试。其中新拌 UHPC 钢纤维分散度测试采用磁吸法，其测试方法为：UHPC 搅拌均匀后，按照顺序倒出均匀分为四等份，将每份 UHPC 用水冲洗同时用磁铁吸取每份中的钢纤维，再将提取出的钢纤维进行烘干分离及称重。根据小林一辅[12]提出的纤维在水泥基材料中的分散度理论，本试验采用分散度β衡量纤维在 UHPC 中的分散情况，如式(2)、(3)所示。

$$\beta=e^{-\varphi(x)} \tag{2}$$

$$\varphi(x)=\sqrt{\frac{\sum(x_i-\mu)^2}{n}}\cdot\mu \tag{3}$$

其中x_i为试样中钢纤维含量，μ为等分试样中钢

纤维含量的平均值，n为等分试样的个数。当全部纤维集中在同一等份中，其他等份纤维含量为 0 时，$\beta=0$，当钢纤维完全均匀分布在每个等份中时，$\beta=1$，故β应在 0～1 之间取值，且分散度的结果越接近 1，钢纤维分散越均匀。

UHPC 硬化后进行硬化 UHPC 钢纤维分散度测试，首先对 UHPC 进行切割，然后拍照采集截面图像，利用 PS 软件进行二值化处理并划分区域，最后对截面钢纤维进行统计，运用式（2）、（3）计算其分散程度。

2.4.2 力学性能实验

根据规范《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》（GBT17671-1999）和《建筑砂浆基本性能试验方法标准》（JGJ/T70-2009）进行力学性能测试。

3 结果与分析

3.1 钢纤维掺量与类型对 UHPC 流动度的影响

各类型 UHPC 流动度如图 3 所示。由图 3 可知，随着两种钢纤维掺量的增加，UHPC 流动度均降低，这主要是因为 UHPC 中加入钢纤维后，原附着在细骨料上的水泥浆体量下降，导致 UHPC 流动度下降。由图 4 所示，对于两种钢纤维，在掺量低于 1.0%时，流动度损失率均低于 10%，这是由于钢纤维产量过少，不会对 UHPC 的紧密堆积结构产生影响，故流动度降低不大[13]。当钢纤维掺量从 1.0%增大到 2.0%时，UHPC 的流动度损失率增大 20%左右，这是主要由于钢纤维大量掺入导致 UHPC 的紧密堆积结构破坏，并对其基体产生极大束缚，并使骨料周围的水泥浆体减少，导致流动度下降。

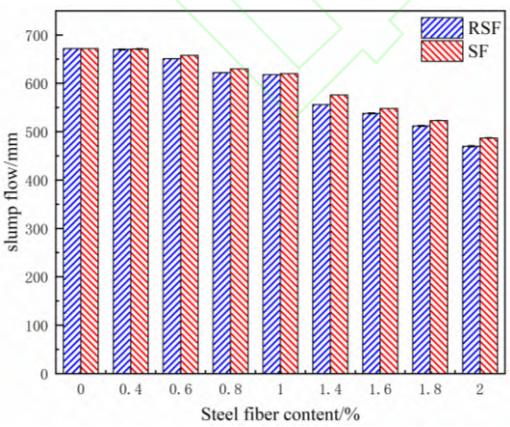


图 3 钢纤维掺量对 UHPC 流动度的影响

Fig. 3 Effect of steel fiber content on UHPC fluidity

从图 4 中还可以看出当钢纤维掺量增大到 1.0%以上时，RSFUHPC 流动度损失率明显大于 SFUHPC，这是因为相对于 SF，RSF 的长度和形状极不均匀，且表面粗糙，如图 2 所示，对 UHPC 基体的粘结能力更强，随着纤维掺量的增加，RSF 对基体的束缚作用愈发明显，进而导致 UHPC 流动度损失率增大。

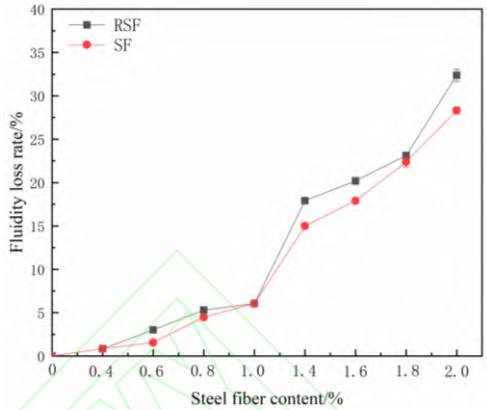


图 4 钢纤维掺量对 UHPC 流动度损失率的影响

Fig.4 Effect of steel fiber content on UHPC fluidity loss rate

针对影响 UHPC 流动度的两个因素——钢纤维类型及钢纤维掺量进行统计性试验方差分析，运算得到 $P-value$。$P-value$ 表示的是试验因素对试验结果无显著影响的概率[14]。当 $P-value$ ≤0.01 时，说明因素对试验结果的影响非常显著（＊＊）；当 0.01＜$P-value$≤0.05 时，说明因素对试验结果的影响显著（＊）；当 $P-value$＞0.05 时，说明因素对试验结果无显著影响（不用＊表示）。由表 5 可知，$P-value_{（钢纤维掺量）}$=0.40×10^{-13}＜0.01，故钢纤维掺量对 UHPC 的流动度有显著影响，而 $P-value_{（钢纤维类型）}$=0.82＞0.05，由此可知，加入 RSF 对 UHPC 的流动度没有显著影响，从而可以替代 SF[15]。

表 5 影响流动度因素的显著性分析

Table 5 The significance analysis of the factors affecting fluidity

因素	*P*-value	显著性
钢纤维类型	0.82	
钢纤维掺量	0.40×10^{-13}	＊＊

3.2 钢纤维类型对 UHPC 屈服应力及塑性粘度的影响

选取流动度变化明显的试验组 RSFUHPC2.0 及 SFUHPC2.0，并选取 UHPC0 作为对照组进行流变学试验，运用修正的宾汉姆模型（如式 3 所示）对试验结果进行拟合[16]，结果如图 5 所示。

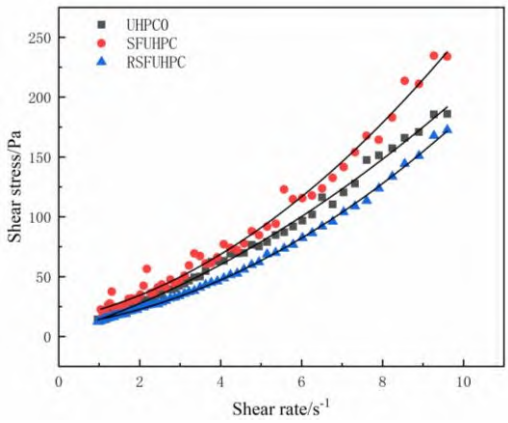


图 5 通过修正的宾汉姆模型拟合得到的剪切应力与剪切速率曲线

Fig. 5 The shear stress and shear rate curves were obtained by fitting the modified Bingham model

$$\tau=\tau_0+\mu\dot{\gamma}+c\dot{\gamma}^2 \tag{4}$$

式中 τ 为剪切应力（Pa），τ_0 为屈服应力（Pa），μ 为塑性黏度（Pa·s），$\dot{\gamma}$ 为剪切速率（s^{-1}），c 为该模型的二次项系数。

回归方程与流变学参数的结果如表 6 所示。屈服应力和塑性粘度是衡量新拌混凝土流变性能的重要参数，屈服应力主要是由于浆体内各颗粒之间的附着力与摩擦力产生的，主要受水泥基胶凝材料的各颗粒间距、粒径尺寸和电位电势的影响，是引起材料流动变形的最小剪切应力。因此屈服应力越小，水泥浆体越容易发生流动。塑性粘度是指材料内部结构阻碍浆体流动的性能，它受颗粒形状、颗粒大小和颗粒浓度等的影响，反映胶凝材料浆体体系变形的速度，塑性粘度小，相同外力作用下浆体流速大。但塑性粘度过小，会导致新拌水泥基复合材料浆体发生离析[17]。不同掺量及类型钢纤维掺入 UHPC 对屈服应力和塑性粘度的影响如图 6 所示，由图 6 可知，无论加入何种类型钢纤维，都会使得 UHPC 体系中各颗粒之间的摩擦力增强，导致 UHPC 的屈服应力明显增大。其中 RSFUHPC 的屈服应力及塑性粘度均大于 SFUHPC，主要是由于钢纤维在拌合物中的棚架作用能够阻碍拌合物的流动，RSF 的长径比不均匀，导致棚架效应越明显，流动阻力就会越大。c/μ 值均大于 0，呈现出剪切增稠的现象，其中 $c/\mu_{(RSFUHPC)}<c/\mu_{(SFUHPC)}$，说明加入 RSF 后剪切增稠的程度略有下降，从而应用 RSF 替代 SF 在实际工程中可以降低施工难度，保证施工质量。

表 6 回归方程与流变学参数的结果

Table 6 Results of regression equations and rheological parameters

编号	修正的 Bingham 模型			
	τ_0 /Pa	μ /Pa·s	c/μ	R^2
UHPC0	2.760	2.475	0.092	0.997
SFUHPC2	8.631	4.414	0.297	0.999
RSFUHPC2	14.557	6.539	0.267	0.989

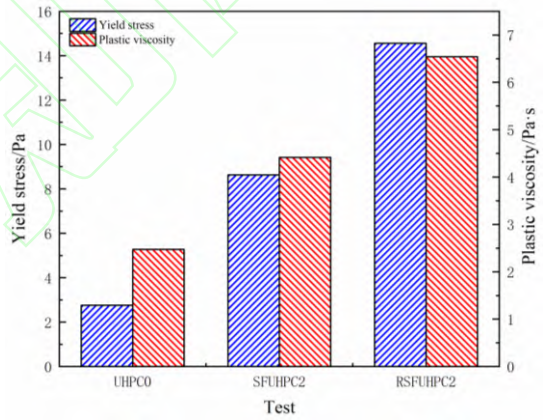


图 6 不同钢纤维种类及掺量对 UHPC 屈服应力及塑性粘度的影响

Fig.6 Effect of different types and content of steel fiber on yield stress and plastic viscosity of UHPC

3.3 钢纤维类型对新拌及硬化 UHPC 分散度的影响

新拌 UHPC 钢纤维的分散度运用磁吸法进行提取计算，对钢纤维掺量为 1.0%和 2.0%的 UHPC 进行提取对所得钢纤维进行称量计算分散度。硬化后的 UHPC 通过统计截面钢纤维数量进行钢纤维分散度计算，其二值化图像如图 7 所示。两种钢纤维分散度的计算结果如表 7 所示。由表 7 可知，RSFUHPC 的分散度在新拌及硬化状态均大于 SFUHPC，这是由于 SF 表面光滑且直径较小，并且 UHPC 中运用大量高性能减水剂使其凝结时间相对

延长，从而导致在拌合后 SF 由重力原因产生沉降，使硬化后的 SFUHPC 截面钢纤维分散极不均匀，图 7 中可以看出，SF 聚集在下表面或骨料周围，在实际工程中有不均匀破坏的风险。而 RSF 由于其长度及直径参差不齐，且在其周围粘结有橡胶颗粒，如图 2 所示，掺入后对新拌 UHPC 浆体有较强的约束作用，棚架效应更加明显，故 RSF 有更强的分散效果。

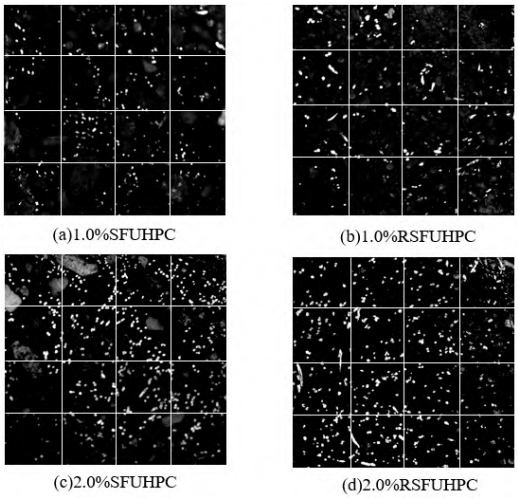


图 7　硬化 UHPC 截面中钢纤维二值化图像

Fig.7　Binary image of steel fiber in hardened UHPC section

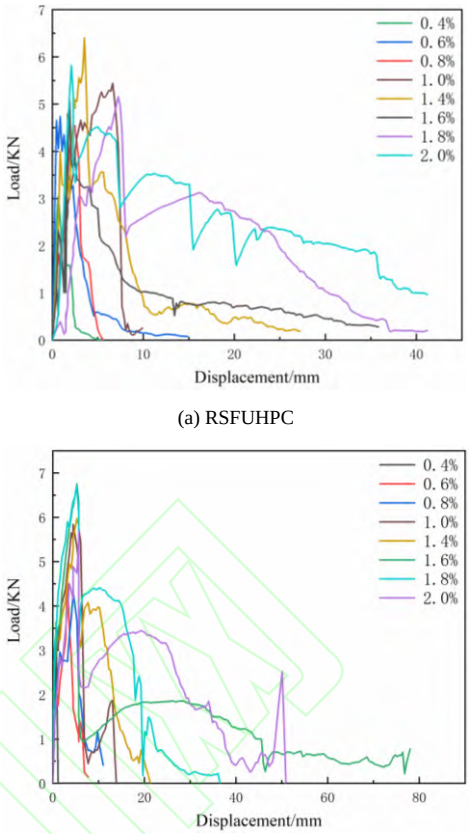
表 7　钢纤维分散度

Table 7　Dispersion of steel fiber

	分散度β			
	新拌 UHPC		硬化 UHPC	
钢纤维掺量	1.0%	2.0%	1.0%	2.0%
SFUHPC	0.7048	0.8532	0.7711	0.9118
RSFUHPC	0.8279	0.9233	0.8557	0.9408

3.4　钢纤维类型对 UHPC 荷载-位移曲线的影响

图 8 为 RSFUHPC 和 SFUHPC 荷载-位移曲线。由图 8、图 9 可知在三点抗折试验中，随着两种钢纤维掺量的增加，破坏荷载峰值逐渐升高，抗折强度增大，且在达到破坏荷载后，由于纤维含量的增加，后续曲线变得更加曲折且变化值更大，这主要源自于掺入钢纤维后，在抗折试验中达到破坏荷载后，继续加载，其中的钢纤维会逐根拔出，导致后续曲线更加曲折且位移更大[18]。



(a) RSFUHPC

(b) SFUHPC

图 8　UHPC 荷载-位移曲线

Fig.8　UHPC bending load-displacement curve

通过三点抗折试验，记录荷载-位移曲线。该曲线下面积越大，表明材料破坏过程中能够吸收的能量越多，材料抵抗断裂的性能越好[19]。因此，荷载-位移曲线下的面积可较好的表征材料的整体韧性。

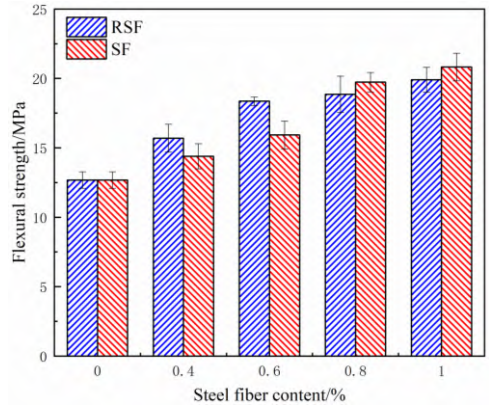


图 9　钢纤维掺量对 UHPC 抗折强度的影响

Fig.9　Influence of steel fiber content on area under UHPC displacement-load curve

如图 10 所示，随着两种钢纤维掺量的增加，位移—荷载曲线下的面积逐渐增大，说明掺加钢纤维可以显著提高 UHPC 断裂时的断裂能。其中

SFUHPC 的位移—荷载曲线下的面积相对于 RSFUHPC 更大，更难进行断裂，这是因为 RSF 长度及直径不一，分散度大，且 RSF 表面橡胶粘附较多，RSF 与 UHPC 基体连接不密实，UHPC 断裂时，一部分 RSF 由于表面橡胶颗粒的作用更易拔出，从而导致位移—荷载曲线下面积变小，断裂能随之变小[20]。但由表 8 及表 9 可知，经过方差分析，$P-value_{(钢纤维类型)}$分别为 0.14 和 0.15，均大于 0.05，钢纤维类型不同对 UHPC 抗弯荷载—位移曲线下面积及抗折强度的影响不显著，故 RSF 可以替代 SF 掺入 UHPC，且不影响抗断裂效果。

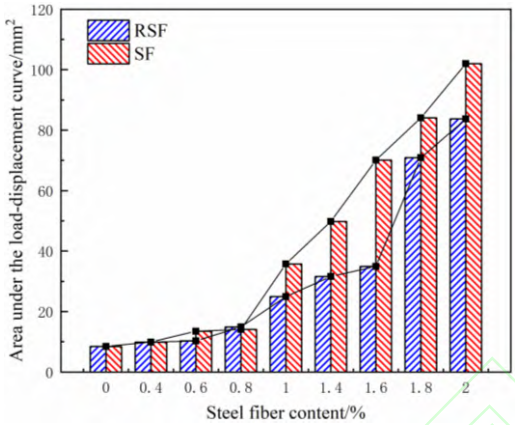


图 10　钢纤维掺量对 UHPC 荷载-位移曲线下的面积的影响

Fig. 10　Influence of steel fiber content on area under UHPC displacement-load curve

表 8　影响抗折强度因素的显著性分析

Table 8　The significance analysis of the factors affecting the bending strength

因素	*P*-value	显著性
钢纤维类型	0.14	
钢纤维掺量	0.41×10^{-5}	＊＊

表 9　影响荷载—位移曲线下面积因素的显著性分析

Table 9　The significance analysis of the factors affecting the bending strength

因素	*P*-value	显著性
钢纤维类型	0.15	
钢纤维掺量	0.14×10^{-16}	＊＊

3.5　钢纤维掺量及类型对 UHPC 抗压强度的影响

不同类型及掺量的钢纤维对 UHPC 抗压强度的影响如图 11 所示。相同掺量下，两种类型钢纤维对 UHPC 抗压强度几乎没有影响。当钢纤维掺量由 0%增大到 2.0%时，RSFUHPC 抗压强度从 129 MPa 增大到 148 MPa，SFUHPC 抗压强度从 129 MPa 增大到 149 MPa，两者钢纤维 28 d 抗压强度只差 1 MPa，且钢纤维掺量从 0%增大到 2.0%时，抗压强度只增加 20 MPa 左右，变化不明显。这是由于试件在受到竖向荷载作用时会发生横向变形，掺入钢纤维后，依靠纤维与水泥基体之间的黏结作用，内部的纤维能够起到一定的限制横向膨胀的作用[21-23]。因为纤维在基体中乱向分布，在其体积掺量较小(1.0%~1.5%)时，会在基体中形成相对均匀的网络搭接结构，随着掺量的增加会对基体产生更大约束力，从而提高抗压强度[24]。然而，由于钢纤维乱向分布，在限制横向变形时，仅有部分纤维发挥作用，所以纤维掺量的增加对材料的抗压强度提高较小，且两种类型的钢纤维变化趋势相同。

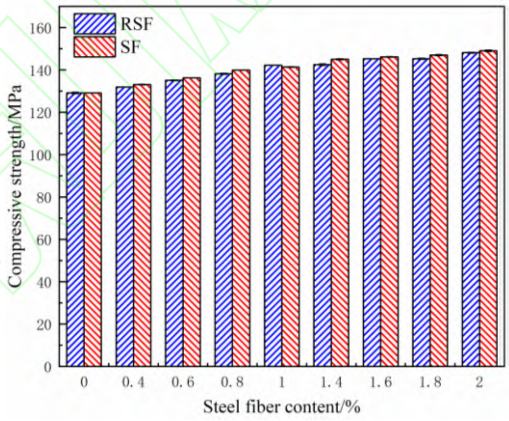


图 11　钢纤维掺量对 UHPC 抗压强度的影响

Fig.11　Effect of steel fiber content on the compressive strength of UHPC

4 结 论

（1）当钢纤维掺量在 1%及以下时，随着钢纤维掺量的增加，RSFUHPC 与 SFUHPC 流动度损失率均小于 10%，当掺量增加到 2.0%时，RSFUHPC 流动度损失率超出 SFUHPC 4.44%。但经过统计学显著性分析，钢纤维类型对 UHPC 流动性的影响并不显著。

（2）RSFUHPC 的屈服应力及塑性粘度均大于 SFUHPC，但 RSFUHPC 的剪切增稠程度（c/μ）较 SFUHPC 有所降低，表明掺入 RSF 可以改善 UHPC 在泵送过程中出现的离析、泌水等现象。

（3）当钢纤维掺量一定时，RSF 在新拌及硬化 UHPC 中的分散度（$0<\beta<1$）比 SF 高出 0.1 左右。故在实际工程中掺入 RSF 可以降低 UHPC 的施工难度，增强新拌 UHPC 匀质效果。

（4）当钢纤维掺量一定时，RSFUHPC 的抗弯强度、荷载—位移曲线下面积及抗压强度均小于 SFUHPC，但经过统计学显著分析，$P-value$ 均大于 0.05，钢纤维类型对其力学性能影响不显著，且 28d 抗压强度仅相差 1MPa。

（5）综上相对于 SF，RSF 的掺入对 UHPC 的流动性及力学性能没有显著影响，并可以使纤维分散度提高，剪切增稠程度降低，实际工程施工难度及成本降低，故 RSF 可以替代 SF 运用于 UHPC 中。

参考文献(References)：

[1] 陈庆,马瑞,蒋正武,王慧.基于 GA-BP 神经网络的 UHPC 抗压强度预测与配合比设计[J].建筑材料学报,2020,23(1):176-183,191.

[2] 王永霞.含白云石粗骨料超高性能混凝土的性能试验研究[J].长江科学院院报,2020,37(1):149-155.

[3] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 741-751.

[4] 邹勇. 我国超高性能混凝土(UHPC)的研究与应用进展[J]. 重庆建筑, 2019, 18(7):34-36.

[5] LIEW K M, AKBAR A. The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 232: 117232.

[6] ABBAS S, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages[J]. Construction and Building Materials, 2015,75(Jan.30):429-441.

[7] YANG J, PENG G F, SHUI G S, et al. Mechanical properties and anti-spalling behavior of ultra-high performance concrete with recycled and industrial steel fibers[J]. Materials, 2019, 12(5): 783.

[8] 曹荣奎. 基于 CPM 模型和比强度法的超高性能混凝土配合比设计研究[D].长沙：湖南大学,2008.

[9] QIAN D, YU R, SHUI Z, et al. A novel development of green ultra-high performance concrete (UHPC) based on appropriate application of recycled cementitious material[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 121231.

[10] DÍAZ J, GÁLVEZ J C, ALBERTI M G, et al. Achieving Ultra-High Performance Concrete by Using Packaging Models in Combination with Nanoadditions[J]. 2021.

[11] MECHTCHERINE V , SECRIERU E , SCHRÖFL C . Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars — Development of yield stress and plastic viscosity over time[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 67:52-65.

[12] 小林一辅.纤维补强混凝土.邹崇富译.第一版[M].北京:中国铁道出版社出版,1985,39-40

[13] 陈竞, 周红梅, 谢正元,等. 钢纤维直径及组合对 UHPC 性能的影响[J]. 广西科技大学学报, 2020(3):50-57.

[14] MARKOWSKI C A, MARKOWSKI E P. Conditions for the effectiveness of a preliminary test of variance[J]. The American Statistician, 1990, 44(4): 322-326.

[15] FEYS D, VERHOEVEN R, DE SCHUTTER G. Fresh self compacting concrete, a shear thickeningmaterial [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(7): 920-929.

[16] FEYS D, VERHOEVEN R, De Schutter G. Why is fresh self-compacting concrete shearthickening? [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(6): 510-523.

[17] 焦登武. 基于流变特性的混凝土组成设计方法[D].北京：中国建筑材料科学研究总院,2017.

[18] 高绪明. 钢纤维对超高性能混凝土性能影响的研究[D].长沙：湖南大学,2013.

[19] SHAFIEIFAR M, FARZAD M, AZIZINAMINI A. Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC)[J]. Construction and Building Materials, 2017, 156: 402-411.

[20] YAO Y, SILVA F A, BUTLER M, et al. Tensile and Flexural Behavior of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) under Impact Loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 153: 103866.

[21] LARSEN I L, THORSTENSEN R T. The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 256: 119459.

[22] MAGUREANU C, SOSA I, NEGRUTIU C, et al. Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete[J]. ACI Materials Journal, 2012, 109(2).

[23] 徐慎春, 吴成清, 刘中宪,等. 钢纤维及纳米材料对超高性能混凝土早期力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2014(3):542-546.

[24] 苟鸿翔,朱洪波,周海云,杨正宏.定向分布钢纤维对超高性能混凝土的增强作用[J].硅酸盐学报,2020,48(11): 1756-1764.

说明：该文为经编委会审查通过的录用文章，由于尚未确定具体刊出日期，其内容可能与最后的发表版本稍有差异，请以最后发表为准。