第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210311

超高性能混凝土的冲击压缩性能及损伤演变规律

戎志丹[1,2]，王亚利[1,2]，焦茂鹏[1,2]，张佳奇[1,2]，陈 浩[1,2]

(1. 东南大学材料科学与工程学院，南京 211189；2. 江苏省土木工程材料重点实验室，南京 211189)

摘 要：掺 2 种不同形状的超细镀铜钢纤维，制备出性能优异的超高性能混凝土材料(UHPC)，采用分离式 Hopkinson 压杆装置对 UHPC 材料进行了多次高速冲击压缩实验，研究了应变率、冲击次数、纤维种类及其混杂对该材料抗多次冲击性能的影响规律，采用 X 射线 CT 测试技术研究 UHPC 在多次冲击荷载作用下的动态损伤演变规律并对材料的损伤程度进行定量分析。结果表明：端勾型钢纤维对 UHPC 材料的增强、增韧效果略优于平直型钢纤维，掺加 1%的平直型和 2%端勾型钢纤维的材料具有最优异的静态和动态力学性能，提出了改进的动态增长因子模型解析式，与实验结果具有很好的吻合度。

关键词：超高性能混凝土；Hopkinson 压杆；多次冲击；损伤程度；动态增长因子
中图分类号：O347.3　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2322–09
网络出版时间：2021–10–11



Impact Compressive Performance and Damage Evolution of Ultra-High Performance Concrete

RONG Zhidan[1,2], *WANG Yali*[1,2], *JIAO Maopeng*[1,2], *ZHANG Jiaqi*[1,2], *CHEN Hao*[1,2]
(1. College of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, Nanjing 211189, China)

Abstract: Ultra-high performance concrete (UHPC) with excellent performance was prepared with two kinds of ultra-fine copper-plated steel fibers with different shapes. The multiple high-speed impact compression experiments of UHPC were carried out by a split Hopkinson pressure bar. The effects of strain rate, impact times, steel fiber types and hybrid fibers on the impact resistance of UHPC were investigated. The dynamic damage evolution of UHPC under multiple impact was characterized by X-ray computed tomography and the damage degree of UHPC was quantitatively analyzed. The results show that the reinforcing effect of end hook steel fibers on UHPC is a slightly better than that of straight steel fibers, and the material with 1% straight steel fibers and 2% end hook steel fibers has the optimum static and dynamic mechanical properties. An improved dynamic increase factor model was proposed. It is indicated that the simulated data by this model are in reasonable agreement with the experimental results.

Keywords: ultra-high performance concrete; split Hopkinson pressure bar; multiple impacts; damage degree, dynamic increase factor

随着我国经济的飞速发展、大规模基础建设工程的不断推进，对混凝土建筑材料的强度、韧性、安全性和耐久性提出了越来越多的要求。继高强、高性能混凝土之后，超高性能混凝土(UHPC)应运而生，其以优异的力学性能、耐久性能和安全性能在土木、建筑、水利、隧道、核电、防护等工程中得到越来越广泛的应用[1–5]。这些结构在服役期间不仅承受不同强度的准静态荷载，而且还会承受诸如车辆动荷载、地震、龙卷风甚至冲击爆炸等作用，这些动荷载还会重复作用在混凝土结构和材料上，因此研究 UHPC 在多次冲击作用下的动态性能具有重要的理论和实际指导意义。

目前国内外研究 UHPC 材料在的动态性能的主流试验装置为分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)动力试验系统，许多学者采用 SHPB 装置对 UHPC 材料的动态性能开展了广泛的研究工作[6–8]。Rong 等[9]采

收稿日期：2021–04–25。　修订日期：2021–07–17。
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFC0705400)；国家自然科学基金项目(51678142)。
第一作者：戎志丹(1981—)，男，博士，副教授。

Received date: 2021–04–25.　**Revised date:** 2021–07–17.
First author: RONG Zhidan (1981–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: zdrong@seu.edu.cn

用 SHPB 研究了抗压强度达 200 MPa 的 UHPC 的动态压缩行为，研究发现：UHPC 具有明显的应变率硬化特性，随着应变率从 25 s^{-1} 增加至 100 s^{-1}，动态抗压强度、峰值应变也在不断增大；随着钢纤维掺量的增加，动态抗压强度、峰值应变呈增长趋势。Wu 等[10]研究了混杂钢纤维对 UHPC 动态性能的影响，结果表明：混杂钢纤维能提高 UHPC 的准静态力学性能与动态压缩性能，L1.5S0.5 (即掺加 1.5%长纤维与 0.5%短纤维)试样具有最优的静态与动态性能。作者认为长短纤维是在 2 个尺度上发挥增强作用并给出了解释示意图，但是并未表征其微观增强机理。Jiang 等[11]研究了采用风积砂取代河砂制备的 UHPC 材料的多次冲击压缩性能，结果表明：峰值应变随着冲击次数的增加而增加，峰值应力与动态弹性模量则呈下降趋势，材料损伤程度不断加速。

目前来看，现有研究表明 UHPC 在动态荷载下表现出明显的应变率效应。应变率敏感性可以采用动态增长因子(DIF，动态压缩强度与准静态抗压强度的比值)进行定量表征，相关学者通过试验探索拟合出了 DIF 定量结算解析式[12−16]。然而，现有 DIF 模型解析式与试验数据存在较为明显的偏差，不适用于 UHPC 材料。此外，UHPC 材料在多次冲击压缩作用下的动态损伤累积规律则鲜有报道，且大多学者只是通过照片定性表征 UHPC 的损伤形态演变，而通过 X 射线 CT 等技术三维定量表征损伤形态演变规律却未见报道。定量表征 UHPC 材料在冲击荷载作用的损伤程度能明晰其损伤发展规律，对评估 UHPC 的抗冲击性能有着重要的理论和实际指导意义。

在前期的研究基础上，采用大掺量矿物掺和料取代水泥熟料，通过材料组成与结构的优化设计，制备出性能优异的 UHPC 材料。使用 SHPB 装置研究了应变率、纤维掺量、种类及混杂对材料抗多次冲击压缩性能的影响规律，提出适用于 UHPC 材料的 DIF 模型解析式；采用 X 射线 CT 测试技术表征和重构了 UHPC 冲击后的损伤演变过程，并定量分析了不同冲击次数下 UHPC 材料的损伤程度。

1　实验

1.1　原材料

水泥：P·Ⅱ52.5R 硅酸盐水泥，密度 3.1 g/cm^3，化学组成如表 1 所示。粉煤灰：南京宏乾环保公司生产的 I 级超细粉煤灰，密度 2.1 g/cm^3，比表面积 400 m^2/kg，化学组成如表 1 所示。硅灰：由艾肯公司生产，比表面积为 22 000 m²/kg，化学组成如表 1 所示。细集料：最大粒径 2.36 mm 的普通黄砂，细度模数 2.57，连续级配，表观密度 2.53 g/cm^3。高效减水剂：西卡公司生产的聚羧酸高性能减水剂，固含量为 40%。钢纤维：选用 2 种形状不同的钢纤维，长度均为 13 mm，直径均为 0.2 mm，抗拉强度均大于 2 000 MPa。一种为平直型镀铜钢纤维(记为 SF1)，另一种为端勾型镀铜钢纤维(记为 SF2)。

UHPC 配合比如表 2 所示。

表 1　水泥、粉煤灰和硅灰的化学组成

Table 1　Chemical compositions (mass fraction *w*) of cement, FA and SF　　*w*/%

Raw material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LOI
Cement	20.56	4.82	3.85	65.84	0.78	1.26	0.37	1.15	1.37
Fly ash (FA)	55.68	27.53	6.21	3.01	1.27	1.10	1.42	0.95	2.83
Silica fume (SF)	95.79	0.31	0.62	0.59	0.51	0.73	0.17	0.32	0.96

LOI is loss on ignition.

表 2　UHPC 材料配合比

Table 2　Mix proportions of UHPC

Item	*w*/%				Sand binder ratio	Water binder ratio	*φ*/%	
	Cement	Fly ash	Silica fume	Superplasticizer			SF1	SF2
S0	50	40	10	2	1.25	0.18	0	0
S3	50	40	10	2	1.25	0.18	3	0
H3	50	40	10	2	1.25	0.18	0	3
S1H2	50	40	10	2	1.25	0.18	1	2
S2H1	50	40	10	2	1.25	0.18	2	1

φ is volume fraction. SF1 is straight steel fiber. SF2 is end hook steel fiber.

1.2 方法

UHPC 材料的制备采用湿拌工艺，即成型过程中先将原材料(水泥、粉煤灰、硅灰和砂)干拌均匀(约3～5 min)，然后在搅拌过程中将混合均匀的水和外加剂缓慢地倒入搅拌机内，湿拌 2～3 min。当混合料进入粘流状态后，均匀地撒入钢纤维，继续搅拌 2～3 min。之后在模具中浇铸成型，并适当加以振动以增进密实，1 d 后拆模，标准养护([(20±2)℃，相对湿度＞95%]到不同龄期后取样进行力学性能测试。

静态力学性能测试采用的是 40 mm×40 mm×160 mm 的试件，SHPB 实验采用的是 ϕ75 mm×37 mm 的圆柱体试件。测定标准养护 3、7、28 d 和 90 d 试件的静态力学性能并对标准养护 90 d 的试件进行 SHPB 试验。冲击试验前用高精度磨床对试件表面进行打磨加工，2 个端面不能有明显的孔缺陷，并使其表面不平度小于 0.1 mm。

冲击压缩试验采用直截面式 ϕ75 mm 的 SHPB 装置。装置由气枪、子弹、入射杆、透射杆、阻尼器、测速系统和数据采集系统组成。子弹长 500 mm，入射杆总长 5.5 m，透射杆总长 3.5 m。试件夹在入射杆和透射杆之间，应变片分别贴在入射杆上和透射杆上距离试件 1.2 m 处。

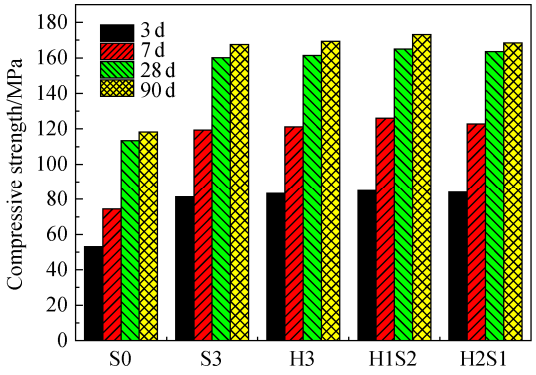
采用调节气枪气压来控制子弹速度的方式，对 S0 试件分别采用 0.2、0.3、0.4 MPa 和 0.6 MPa 4 种气压，对钢纤维增强的 UHPC 材料分别采用 0.4、0.6 MPa 和 0.8 MPa 3 种气压。UHPC 材料多次冲击压缩实验：对试件在第 1 次冲击之后，均采用 0.6 MPa 的气压进行多次冲击压缩实验，直至试件破坏。

2 结果与讨论

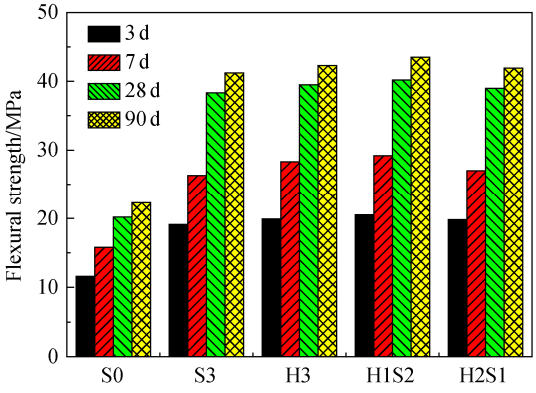
2.1 静态力学性能测试与分析

对不同养护龄期条件下 UHPC 材料的静态力学性能进行了测试分析，其结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出，不同系列 UHPC 材料的抗压强度与抗折强度均呈现出相同的变化趋势，即其强度随着养护龄期的延长而增大。未掺纤维的 S0 试件在 3 d 养护条件下的抗压强度与抗折强度分别为 53.2 MPa、11.6 MPa；标准养护 90 d 时，对应的强度分别达到了 116.5 MPa、22.3 MPa。掺加 3%平直型钢纤维 S3 试件在 90 d 时的抗压强度和抗折强度分别增加了 43.8%和 84.8%，分别高达 167.5 MPa 和 41.2 MPa，这主要归因于致密的颗粒堆积与较好的工作性保证了钢纤维分散均匀性。由对比还可以看出，端钩型钢纤维对 UHPC 力学性能的影响呈现与平直型钢纤维类似的规律，且端钩型钢纤维的增强效果略好。在 3%的掺量条件下，H3 的抗压强度和抗折强度比 S3 分别增加了 1.2%和 4.9%，可见端钩型钢纤维对抗折强度的改善更为明显，说明钢纤维在提高弯曲性能与韧性方面更为突出，与文献的研究结论一致[17–18]。相比于平直型钢纤维，端钩型钢纤维由于端部异型，导致其锚固摩擦作用更强，在受压过程中能传递更多的应力，延缓裂缝产生与扩展，提高极限荷载与挠度[17]。



(a) Compressive strength of UHPC



(b) Flexural strength of UHPC

图 1 UHPC 材料静态力学性能

Fig. 1 Static mechanical properties of UHPC

相比单掺钢纤维的试件，混杂钢纤维 UHPC 材料的性能都有提升，S1H2 系列 90 d 抗压强度达到 173.1 MPa，抗折强度达 43.5 MPa，说明混杂钢纤维能在不同尺度上发挥钢纤维的增强阻裂效应，两者协同作用最大限度地发挥钢纤维的增强增韧效果。

2.2 冲击压缩性能测试与分析

2.2.1 不同应变率下 UHPC 材料的冲击压缩性能

图 2 为多种 UHPC 试件的抗一次冲击压缩应力–应变曲线。表 3 为测试出的 UHPC 动态力学性能参数。

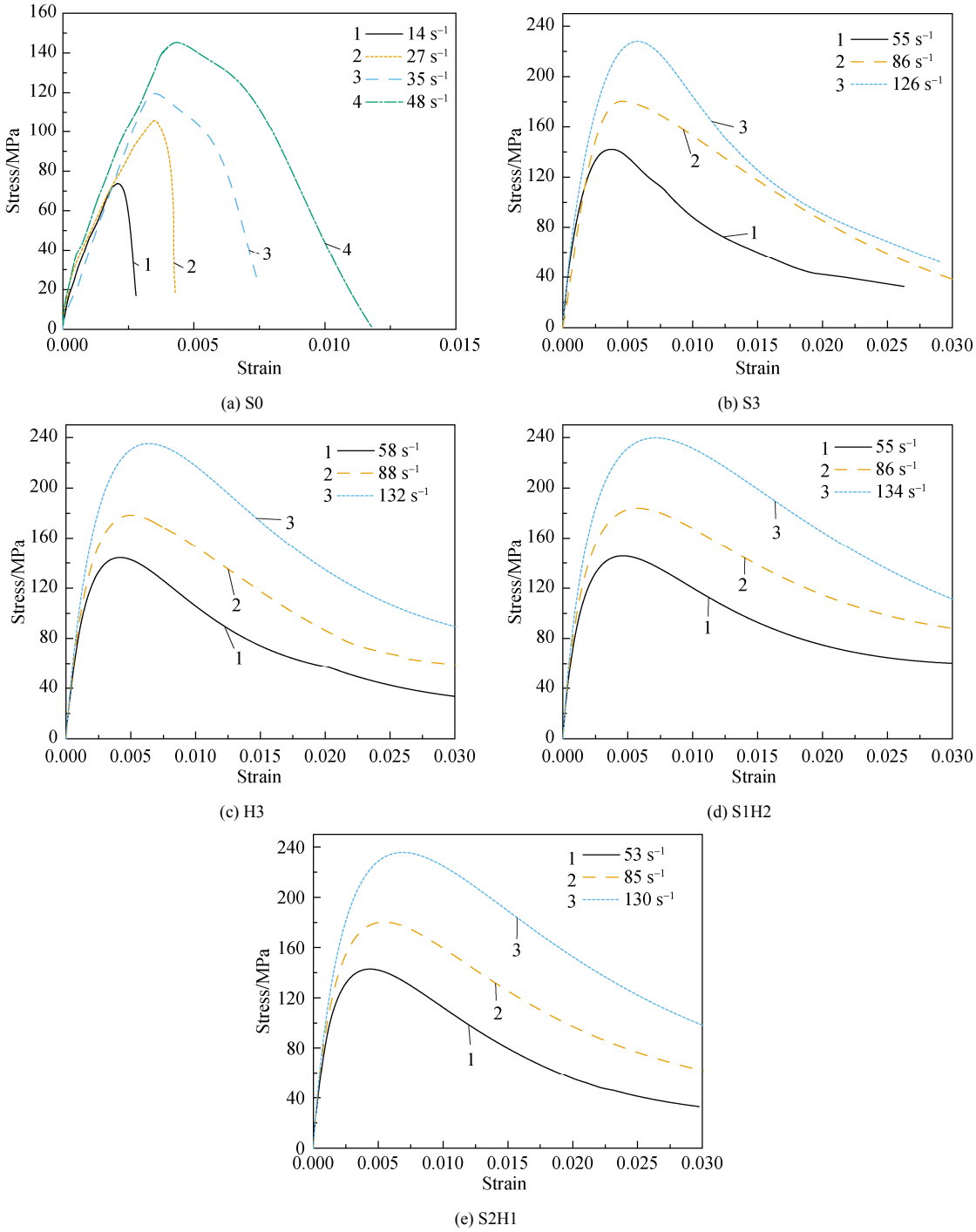


图 2　UHPC 材料在高速冲击作用下的应力-应变曲线

Fig. 2　Stress-strain curves of UHPC under high-speed impacts

从图 2 和表 3 可以看出，UHPC 材料具有明显的应变率效应，即随着应变率的增加，材料的峰值应力和峰值应变呈增加的趋势。在同一冲击气压下，掺加端钩型钢纤维 UHPC 的峰值应力比同掺量的平直型钢纤维的略高，但两者差值不是特别明显。纤维增强 UHPC 的动态峰值应力最高可以达到 240 MPa，但是 S3 和 H3 的峰值应变差别较为明显。从表 3 还可以得出，H3 试件能产生更大的变形，韧性更好，开裂时更易出现多缝开裂，有利于弯曲性能的改善。此外，对比图 2 可以看出，S1H2 具有最高的峰值应力与应变，其次是 S2H1、H3。对比表 3 可以分析出，混杂钢纤维能明显提高 UHPC 的峰值应变。在 0.8 MPa 的冲击气压下，与峰值应变为 0.00575 的 S3 相比，S1H2 与 S2H1 的峰值应变分别提高了 24.87%、20.35%，说明混杂钢纤维能进一步改善 UHPC 的韧性；与 S0 相比，

S1H2 与 S2H1 峰值应变增大更明显，最高可达 40%。

应力–应变曲线所包围的面积可以反映材料动态韧性，即在不同冲击速率下的能量吸收大小(EA)，从图 2 可以看到，钢纤维对应力–应变曲线的下降段影响较大，计算结果见表 3 所示。随着应变率的增加，EA 呈现增加的趋势，表明随着冲击荷载的增加，UHPC 材料吸收的冲击能越来越多。对比可以发现 H3 的 EA 值比 S3 更高，说明端钩型钢纤维对 UHPC 的增韧效果更好，与静态力学性能的结论一致。端钩型钢纤维与基体的端部锚固力更强，在动态荷载作用下，能吸收更多的冲击能，延缓裂缝的扩展，使试样的损伤程度降低。

表 3 不同应变率下 UHPC 冲击压缩实验结果

Table 3 Impact compression results of UHPC at different strain rates

Item	Strain rate/s^{-1}	Peak stress/MPa	Peak strain/10^{-3}	Area under curve
S0	14	74.20	2.10	0.1337
	35	119.49	3.51	0.5820
	48	145.20	4.14	1.0419
S3	55	142.13	3.72	1.9698
	86	180.40	4.54	3.5634
	126	228.77	5.75	3.7748
H3	58	144.29	4.18	2.3996
	88	178.44	5.02	3.5056
	132	235.18	6.35	5.7138
S1H2	55	145.64	4.65	3.1553
	86	183.84	5.76	4.4276
	134	239.74	7.18	6.6326
S2H1	53	142.87	4.38	2.4401
	85	180.30	5.41	3.8712
	130	235.58	6.92	6.4376

UHPC 在动态荷载作用下的 EA 主要有两部分作用：一部分用于破坏基体(W_1)，另一部分消耗在纤维拔出或拔断的过程中(W_2)。掺加钢纤维主要影响后者的大小。从表 3 可以看出，S1H2 具有最高的韧性值。与 EA 值为 1.0419 的对照组 S0 相比，S1H2 提高了 324.95%，S2H1 提高了 271.55%，说明混杂钢纤维具有更明显的增韧效果，发挥了 2 种纤维的协同作用，特别是端钩型钢纤维的端部锚固作用。在动态荷载作用过程中，桥接在裂缝两端，延缓微观裂缝的产生与扩展，增加 W_2 的能耗，使得破坏基体所需能量更高，增强了 UHPC 的性能。

2.2.2 UHPC 材料的抗多次冲击压缩性能 以第一次冲击气压为 0.6 MPa 为例，图 3 为试件在多次冲击压缩后的应力–应变曲线。

从图 3 可以看出，UHPC 材料随着冲击次数的增加，裂缝数量与扩展程度逐渐增加，材料损伤不断累积，主要表现为峰值应力明显降低，应变增加，加载段的斜率逐渐降低，即动弹性模量不断减少。从图 3a 和图 3b 可见，由于试样单位体积内的桥接纤维数量较多，能明显地延缓裂缝的扩展，增加 W_2 的能耗，因此其在第 2 次冲击压缩后，仍呈现出与第 1 次相当的动态压缩强度。H3 试样的动态性能较 S3 优异，其在 0.6 MPa 冲击气压重复作用下，仍能承受 4 次冲击压缩作用；4 次冲击压缩后的峰值应力与应变为 146.77 MPa、10.31，这主要得益于较优的钢纤维分散与取向。

混杂平直型、端钩型钢纤维能发挥两者的协同作用，明显改善 UHPC 的抗冲击压缩性能。如图 3c 和图 3d 所示，S1H2 与 S2H1 试样的应力–应变曲线随冲击次数的变化规律与 S3、H3 相似，即随着冲击次数的增加，损伤不断加剧，但两者仍能承受 4 次冲击荷载，表明混杂钢纤维具有比单掺钢纤维更优异的动态性能。在对试样进行 4 次冲击压缩作用后，与峰值应变为 0.0103 的 H3 相比，S1H2 和 S2H1 的峰值应变分别提高了 28.13%和 8.24%，S1H2 和的 S2H1 的 EA 值则分别提高了 35.19%和 6.57%。S1H2 具有最优的动态性能，能承受最多次

数的冲击压缩，具有最高的峰值应力、应变与 EA 值，其同样具有最高的准静态力学性能，说明混杂 1%的平直型钢纤维与 2%的端钩型钢纤维能更好地发挥两者的协同作用。

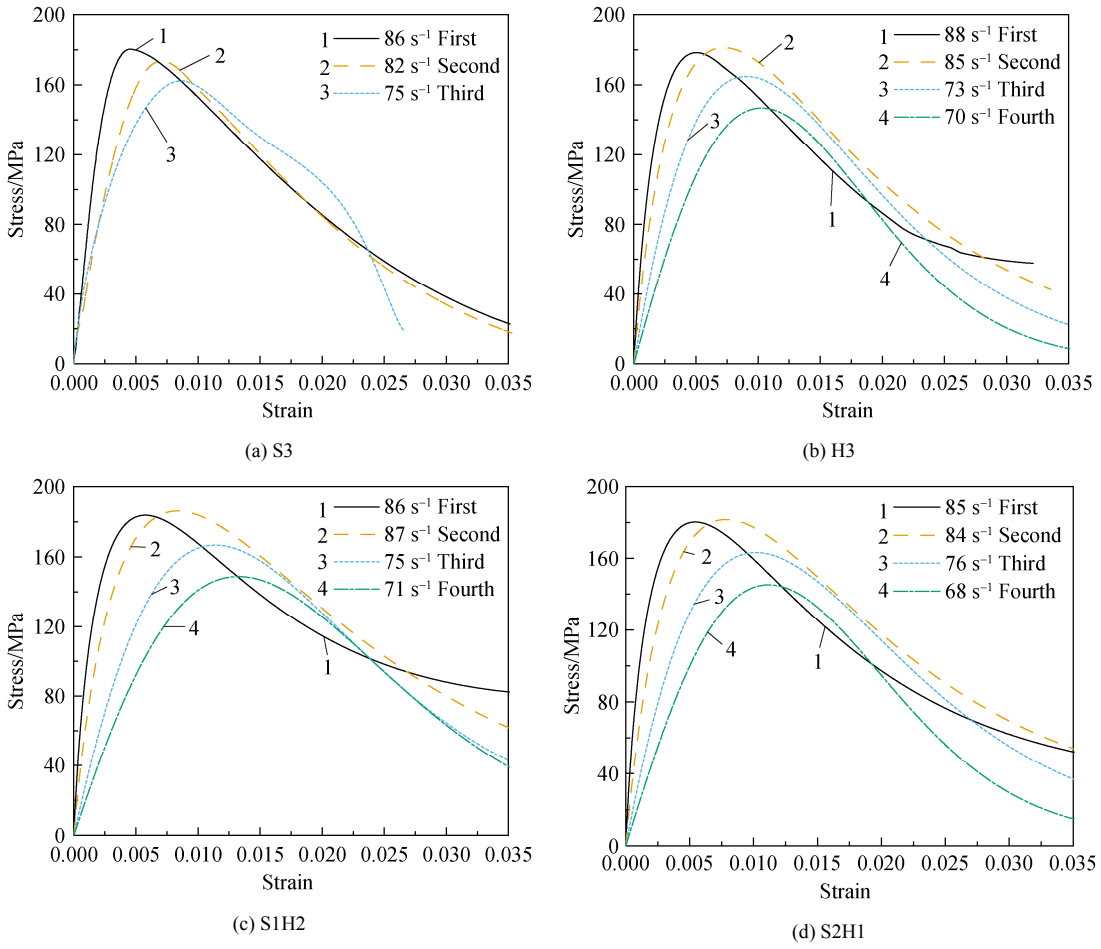


图 3　UHPC 在多次冲击压缩作用下的应力–应变曲线

Fig. 3　Stress-strain curves of UHPC under multiple impact compression

2.2.3　UHPC 材料的应变率敏感性　　UHPC 具有与陶瓷、岩石、钢等工程材料相似的应变率敏感特性，即 UHPC 的动态压缩强度随着冲击应变率增加而增加，国内外学者对 UHPC 应变率敏感性与应变率的关系进行了大量研究。

图 4 给出了不同应变率下 UHPC 材料的 DIF 值(S1 表示掺加 1%平直型钢纤维材料，其他标号类似)。由图 4 可以分析出，在相近的应变率冲击下，对照组(S0)的 DIF 值始终高于掺加钢纤维的 UHPC，即钢纤维的引入能降低 UHPC 对应变率的敏感性，这与文献的结论一致[19–22]，上述结果与文献[20]的结论相反的是，在相同体积掺量下，H 系列的 DIF 低于 S 系列的 DIF 值，S1H2 具有更低的 DIF，主要因为钢纤维对应变率的敏感性较低，加入钢纤维能降低整体的应变率敏感性且端钩型钢纤维能更明显改善基体的准脆性。

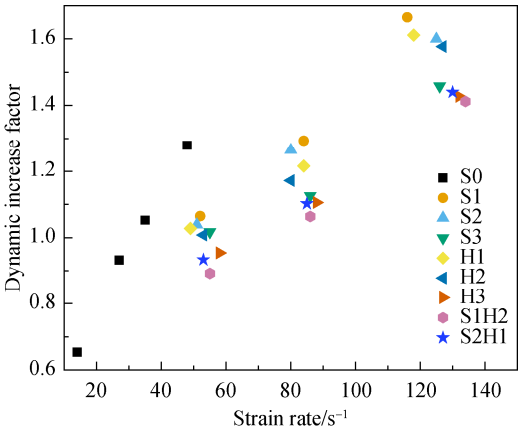


图 4　UHPC 的动态增长因子

Fig. 4　Dynamic increase factor (DIF) of UHPC

图 5 给出了本研究与相关学者试验的 DIF 值以及 5 个模型的函数。由图 5 可以看出，对于 DIF 与应变率的对数关系，存在一个转折点。在此转折点

之前，DIF 几乎没变化，应变率超过阈值后，动态压缩强度明显提高，这是由于 DIF 不是材料固有的属性，而是一个受横向惯性影响的物理量，会受到多种因素(如钢纤维类型、掺量、试样尺寸等)的影响[20]。

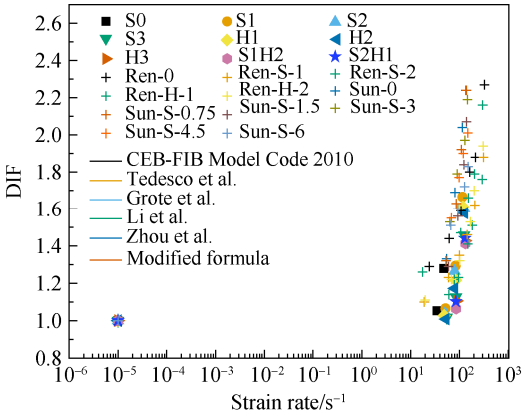


图 5 UHPC 的 DIF 与其他模型比较[12–16]

Fig. 5 Comparison of DIF of UHPC with other models[12–16]

由图 5 还可以看出，5 个模型与试验结果均存在较为明显的偏差，特别是 Li 等的模型，几乎没有数据点落在这 2 个函数范围内，说明这 5 个方程式不能较好地描述图 4 中 UHPC 的 DIF 演变规律。由于掺加钢纤维的 UHPC 的 DIF 值变化规律相似，且差值不是特别明显，因此提出了用于描述 UHPC 的应变率敏感性的改进的经验方程式，如式(1)所示。对试验数据进行拟合，得到的改进的经验解析式如式(2)所示。同时图 5 给出了函数图像，可以看出在应变率小于 134 s^{-1}时，拟合函数与 DIF 值具有较高的吻合度。

$$\mathrm{DIF}=\begin{cases}0.0016(\lg\dot{\varepsilon})+1.0073 & \dot{\varepsilon}\leqslant\dot{\varepsilon}_{\mathrm{tr}}\\ a(\lg\dot{\varepsilon})^2+b(\lg\dot{\varepsilon})+c & \dot{\varepsilon}>\dot{\varepsilon}_{\mathrm{tr}}\end{cases} \tag{1}$$

$$\mathrm{DIF}=\begin{cases}0.0016(\lg\dot{\varepsilon})+1.0073 & \dot{\varepsilon}\leqslant 56s^{-1}\\ 1.7864(\lg\dot{\varepsilon})^2-5.1864(\lg\dot{\varepsilon})+ & \\ \qquad 4.5815 & 56s^{-1}<\dot{\varepsilon}\leqslant 134s^{-1}\end{cases} \tag{2}$$

2.3 UHPC 的损伤演变规律及其损伤程度定量表征

为研究 UHPC 材料在多次冲击作用下的损伤演变规律，采用高分辨率 X 射线断层扫描仪来获取 UHPC 试样中钢纤维的三维空间分布与介观结构信息。X 射线 CT 的操作模式采用锥束扫描，由于水泥基材料内部组成多且复杂，为了提高分辨率与不同物质的灰度值差异，工作电压与电流分别取 195 kV、0.34 mA，每个三维体素的大小为 90 μm×90 μm×90 μm。扫描完成之后，可以获得大约 2 300 张二维灰度值图片(1 024×1 024 像素)，通过 VGStudio MAX 3.0 将二维图片重构为三维结构，对相关信息进行分析。

每张二维 CT 图中的灰度值与对应物相的密度有关，其中密度最高的钢纤维在图像中呈现白色(灰度值 215～255)，气孔或者裂缝灰度值最小，呈现黑色，中间灰度值是砂浆基体(灰色区域)。图像处理过程为：使用椭圆工具选取分析的总范围(圆柱体试样)，新建为感兴趣区域(ROI)，并提取出这个 ROI，通过滤波器对图像灰度值进行增强处理，提高钢纤维、裂缝与基体三者之间的灰度差；对 ROI 进行表面测定，通过控制阈值范围可以分别将钢纤维与气泡从基体中分离出来，新建为新的 ROI，对 ROI 渲染之后，可以直观地显示 ROI 的三维空间分布图。图像处理还可以给出气孔的孔径分布，以及钢纤维分布与裂缝的定量信息。

图 6 为重构的 UHPC 在 0.6 MPa 下多次冲击后的三维损伤分布，其中红色突显区域是裂缝或损伤区域，灰色区域表示 UHPC 基体。由图 6 可以看出，随着冲击次数的增加，红色区域越来越多，且大多集中在试件边缘，内部裂缝较少，这主要得益于钢纤维的桥接增韧，明显延缓了裂缝的扩展。S3 在 0.6 MPa 冲击压力下的损伤程度最明显，其次是 H3、S2H1。S1H2 试样的红色区域的体积最小，损伤程度最小。S3 在第 1 次冲击下的红色区域明显多于其它 3 个试样，且 S3 在第 3 次冲击下，已经产生明显的宏观贯通裂缝，而其余 3 个试样在第 3 次冲击后，没有产生贯通裂缝，因此 S3 的动态压缩性能较差，而 S1H2 具有最优的动态性能。

从图 6 还可以看出裂缝损伤的发展过程，试样在冲击压缩波的作用下，首先在边缘薄弱区域出现损伤，之后边缘损伤加剧，且在端面出现贯穿微裂缝，最后贯穿裂缝加剧扩展，试样边缘裂开，试样破坏。

通过对 ROI 进行定量统计分析，可以得出不同试样在不同冲击次数下的损伤程度，结果见图 7 所示。4 个试样的损伤程度随着冲击次数的增加而增加，其中 S3 试样的斜率最大，说明其损伤程度增加最明显。S3 在第 1 次冲击后有最大的损伤程度，其在后续冲击下，损伤扩展速率更快。S3 在第 3 次冲击后的损伤程度明显多于其它 3 个试样，而 S1H2 的裂缝扩展最慢，且总程度最低，说明 S1H2 试样的动态性能最优异，这归功于混杂钢纤维协同作用的发挥，在抵抗冲击荷载时能吸收更多的能量，从而增强了抗冲击性能。

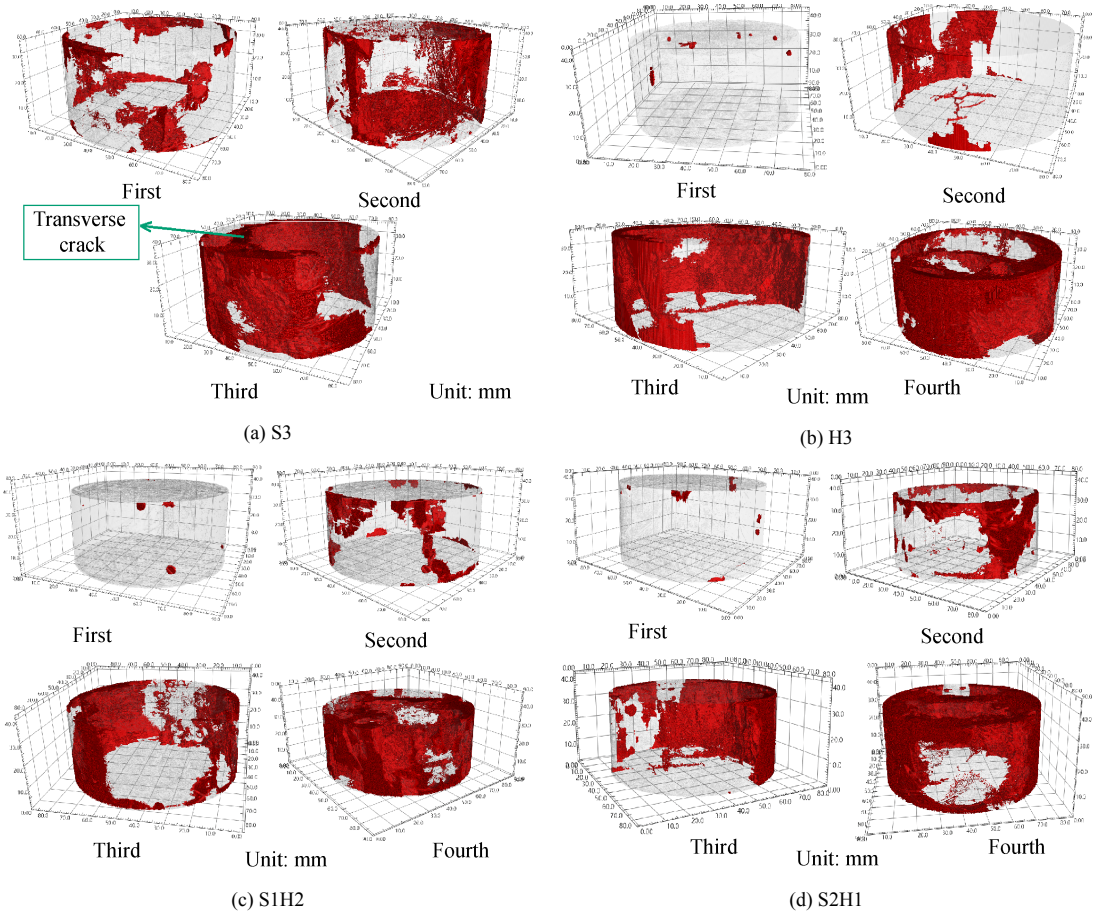


图 6　不同冲击次数下 UHPC 材料三维损伤形态

Fig. 6　Three dimensional damage morphologies of UHPC under different impact times

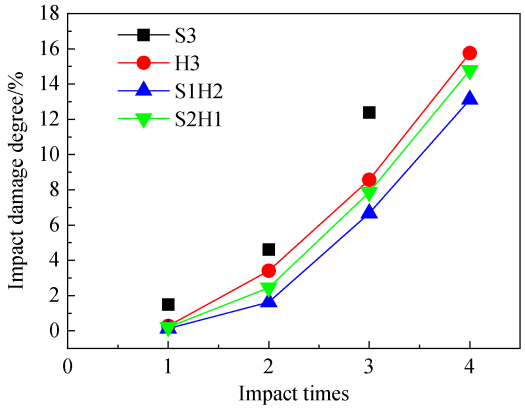


图 7　不同冲击次数下 UHPC 材料的损伤程度

Fig. 7　Damage degree of UHPC under different impact times

3　结论

1) 采用大掺量超细粉煤灰取代水泥，并掺加了 2 种不同形状的超细镀铜钢纤维，制备出性能优异的 UHPC 材料。静态力学性能测试表明，端勾型钢纤维对 UHPC 材料的增强、增韧效果略优于平直型钢纤维，掺加 1%的平直型和 2%端勾型钢纤维的材料具有最优异的力学性能。

2) UHPC 材料在高速冲击荷载作用下呈现出明显的应变率效应，即随着应变率的提高，材料的峰值应力和峰值应变也相应提高。掺加端勾型钢纤维的吸能效果要略好于平直型钢纤维。

3) 钢纤维能明显改善 UHPC 的冲击韧性(EA)，使其应变率敏感性降低，提出了一个改进的 DIF 模型解析式，与实验结果具有很好的吻合度。

4) 采用 X 射线 CT 定量表征了 UHPC 的损伤程度演变规律。结果显示 UHPC 材料损伤随着应变率的提高而增加，钢纤维能延缓其损伤扩展进程，混杂钢纤维的 UHPC 表现出优异的动态冲击压缩性能。

参考文献:

[1] KETAN R, WILLIAM F H, BRETT A W, et al. On enhancing the mechanical behavior of ultra-high performance concrete through multi-scale fiber reinforcement[J]. Cem Concr Compos, 2020, 105, 103422.

[2] 张云升, 张文华, 陈振宇. 综论超高性能混凝土: 设计制备、微观结构、力学与耐久性、工程应用[J]. 材料导报A:综述篇, 2017, 31(12): 1–16.

ZHANG Yunsheng, ZHANG Wenhua, CHEN Zhenyu. Mater Rev(in Chinese), 2017, 31(12): 1–16.

[3] KHAYAT K H, MENG W N, VALLURUPALLI K, et al. Rheological properties of ultra-high-performance concrete-An overview[J]. Cem Concr Res, 2019, 124, 105828.

[4] CAO Y Y Y, YU Q L, BROUWERS H J H, et al. Predicting the rate effects on hooked-end fiber pullout performance from ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Cem Concr Res, 2019, 120: 164–175.

[5] CHEN T F, GAO X J, REN M. Effects of autoclave curing and fly ash on mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 158: 864–872.

[6] SU Y, LI J, WU C Q, et al. Influences of nano-particles on dynamic strength of ultra-high performance concrete[J]. Compos Part B, 2017, 91: 595–609.

[7] HASSAN M, WILLE K. Comparative experimental investigations on the compressive impact behavior of fiber-reinforced ultra high-performance concretes using split Hopkinson pressure bar[J]. Constr Build Mater, 2018, 191: 398–410.

[8] CAO S J, HOU X M, RONG Q, et al. Effect of specimen size on dynamic compressive properties of fiber-reinforced reactive powder concrete at high strain rates[J]. Constr Build Mater, 2019, 194: 71–82.

[9] RONG Z D, SUN W, ZHANG Y S. Dynamic compression behavior of ultra-high performance cement based composites[J]. Int J Impact Eng, 2010, 37(5): 515–520.

[10] WU Z M, SHI C J, HE W, et al. Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements[J]. Cem Concr Compos, 2017, 79: 148–157.

[11] JIANG J Y, FENG T T, CHU H Y, et al. Quasi-static and dynamic mechanical properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete containing aeolian sand[J]. Cem Concr Compos, 2019, 97: 369–378.

[12] BETONBAU. Fib Model Code for Concrete Structures 2010[M]. Ernst & Sohn, 2013.

[13] TEDESCO J W, ROSS C A. Strain-rate-dependent constitutive equations for concrete[J]. J Press Vessel Technol, 1998, 120(4): 398–405.

[14] LI Q M, MENG H. About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test[J]. Int J Solids Struct, 2003, 40(2): 343–360.

[15] ZHOU X Q, HAO H. Modelling of compressive behaviour of concrete-like materials at high strain rate[J]. Int J Solids Struct, 2008, 45(17): 4648–4661.

[16] GROTE D L, PARK S W, ZHOU M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization[J]. Int J Impact Eng, 2001, 25(9): 869–886.

[17] WU Z M, SHI C J, HE W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 103: 8–14.

[18] LIU Y W, ZHANG Z H, SHI C J, et al. Development of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC): Influence of steel fiber on mechanical properties[J]. Cem Concr Compos, 2020, 112: 103670.

[19] SUN X W, ZHAO K, LI Y C, et al. A study of strain-rate effect and fiber reinforcement effect on dynamic behavior of steel fiber-reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 158: 657–669.

[20] REN G M, WU H, FANG Q, et al. Effects of steel fiber content and type on dynamic compressive mechanical properties of UHPCC[J]. Constr Build Mater, 2018, 164: 29–43.

[21] HOU X M, CAO S J, ZHENG W Z, et al. Experimental study on dynamic compressive properties of fiber-reinforced reactive powder concrete at high strain rates[J]. Eng Struct, 2018, 169: 119–130.

[22] ZHANG H, WANG L, BAI L Y, et al. Research on the impact response and model of hybrid basalt-macro synthetic polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 204: 303–316.