第 48 卷第 8 期
2020 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 8
August，2020

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

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200222

机制砂超高性能混凝土的冲击压缩力学性能

冯滔滔[1]，蒋金洋[1]，刘志勇[1]，岳承军[2]，王凤娟[1]，吴宜锐[1]，褚洪岩[3]

(1. 东南大学材料科学与工程学院，江苏省土木工程材料重点实验室，南京 211189；
2. 南京航空航天大学土木工程系，南京 211100；3. 南京林业大学土木工程学院，南京 210037)

摘　要：采用机制砂等质量替代河砂用于制备超高性能混凝土(UHPC)，替代率分别为 0%，25%，50%，75%以及 100%，研究了机制砂对 UHPC 动静态力学性能的影响。结果表明：机制砂替代河砂后，所制备的 UHPC 抗压强度与仅用河砂配制的 UHPC 抗压强度相近；机制砂 UHPC 具有优异的抗冲击性能，可以承受多次冲击行为，此外机制砂 UHPC 具有明显的应变率效应，动态增强因子 DIF 与应变率呈对数函数关系。采用有限元法(LS-DYNA)模拟了机制砂 UHPC 的冲击过程，数值模拟结果表明应力应变曲线和破坏形态均与试验较为吻合。

关键词：超高性能混凝土；机制砂；动态压缩强度；数值模拟
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)08–1177–11
网络出版时间：2020–06–23



Impact Compression Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete with Manufactured Sand

FENG Taotao[1], *JIANG Jinyang*[1], *LIU Zhiyong*[1], *YUE Chengjun*[2], *WANG Fengjuan*[1], *WU Yirui*[1], *CHU Hongyan*[3]
(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, Nanjing 211189, China; 2. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China; 3. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Ultra-high performance concrete (UHPC) was designed with different replacement percentages of manufactured sand, *i.e.*, 0%, 25% 50%, 75%, and 100% (in mass fraction). The properties of the UHPC, including the quasi static and dynamic mechanical properties, were examined. The results show that the compressive strength of UHPCs with manufactured sand as fine aggregates is similar to that of the reference mixture with only river sand. The UHPC with manufactured sand has superior dynamic mechanical properties. The UHPC with manufactured sand has an effect on its strain rate, and the dynamic increase factor has a logarithmic function relation with the strain rate. In addition, the finite element method was also employed to simulate the impact process of the UHPC with manufactured sand.

Keywords: ultra-high performance concrete; manufactured sand; dynamic compressive strength; numerical simulation

天然河砂由于其性质稳定以及形貌良好等特征被用作混凝土的主要原材料。随着基础建造的快速发展，河砂的大量开采导致了资源匮乏等一系列问题[1−2]，因此，亟需采用新的建筑材料来替代传统河砂。机制砂是岩石破碎过程中的副产品，许多学者对其作为混凝土细集料的可行性进行了研究。Ding 等[3]采用机制砂作为细集料，制备出抗压强度超过 50 MPa 的机制砂混凝土。Li 等[4]研究了机制砂石粉含量以及表面粗糙度等特征对混凝土力学性能的影响规律，结果表明石粉含量在 4.3%~20%之间可以改善混凝土强度，且表面粗糙度对力学性能起到增强作用。然而，Shen 等[5]发现石粉含量是影响机制

收稿日期：2020–03–29。　修订日期：2020–04–18。
基金项目：国家重点研发计划项目。
第一作者：冯滔滔(1990—)，男，博士研究生。
通信作者：蒋金洋(1974—)，男，教授，博士研究生导师。

Received date: 2020–03–29.　**Revised date:** 2020–04–18.
First author: FENG Taotao (1990–), male, Doctoral candidate.
E-mail: Taotao_F@126.com
Correspondent author: JIANG Jinyang (1974–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: jiangjinyang16@163.com

砂混凝土强度的主要因素，而形貌特征影响较小。Zhao 等[6]研究了机制砂混凝土的拉伸强度，并建立了机制砂混凝土的长期抗拉强度预测模型。目前关于机制砂混凝土的研究主要是普通混凝土或高性能混凝土，Shen 等[7]利用了级配优化方法制备出抗压强度为 120 MPa 的机制砂混凝土，证明了采用机制砂作为细集料制备超高性能混凝土(UHPC)的可行性。

UHPC 指抗压强度超过 150 MPa 的混凝土，具备优异的力学性能以及耐久性能[8]。传统 UHPC 主要由河砂(或石英砂)、减水剂、钢纤维以及大量胶凝材料组成，由于 UHPC 价格较高，学者们尝试选用新的材料以降低制造成本。Zhang 等[9]利用再生砂替代河砂，成功制备出抗压强度达到 150 MPa 的 UHPC，随着替代量的增加，混凝土强度呈下降趋势。Pyo 等[10]采用最大粒径为 5 mm 的白云石作为细集料，相比与普通河砂，白云石的掺入降低了 UHPC 强度。Zhao 等[11]探索了铁尾矿作为 UHPC 细集料的可行性，研究发现，当取代量为 40%时，UHPC 强度可以达到 140 MPa。Soliman 等[12]采用玻璃砂替代石英砂制备 UHPC，结果表明，热养护条件下 UHPC 强度可以达到 182 MPa。以上研究结果表明，采用绿色集料是降低 UHPC 成本的有效方法，此外，废弃资源的合理应用有助于建筑材料的可持续发展。UHPC 由于其优异的力学性能，因此常被用做为军事防护材料[13]，许多学者对 UHPC 动态力学性能进行了研究。Wu 等[14]研究了掺加混杂纤维 UHPC 的抗冲击特性并对纤维增强机理进行了分析。Zhang 等[15]研究了玄武岩、花岗岩以及铁尾矿 3 种粗集料对 UHPC 动态强度的影响规律，掺加赤铁矿 UHPC 的峰值应力高于另外两种集料，随着粗骨料掺量的增加混凝土强度逐渐下降。Su 等[16]研究了纳米碳酸钙对 UHPC 动态增强因子(DIF)的影响，结果表明，纳米碳酸钙可以显著增强 UHPC 动态强度。UHPC 抗冲击性能已取得了较大进展，然而，关注点主要针对于纤维或掺合料等对力学特性的影响，关于不同细集料对 UHPC 动态力学性能影响的报道仍较少。

因此，采用分离式霍普金森压杆系统(SHPB)，系统研究了不同机制砂掺量 UHPC 的动态力学行为，并且采用有限元法(LS-DYNA)模拟了机制砂 UHPC 的冲击过程，提出了机制砂 UHPC 动态力学模拟参数。

1 实验

1.1 原材料

水泥：大连小野田公司生产的 P·II 52.5 型硅酸盐水泥，化学组成见表 1。粉煤灰：南京某电厂 I 级粉煤灰，化学组成见表 1。硅灰：埃肯国际贸易(上海)有限公司生产的微硅粉，化学组成见表 1。钢纤维：采用镀铜圆直钢纤维，纤维尺寸为 ϕ 0.2 mm×13 mm，弹性模量为 203 GPa，拉伸强度为 2.0 GPa。减水剂：西卡公司生产的聚羧酸高效减水剂，固含量为 40%。细集料：采用天然河砂以及机制砂两种集料，图 1 为两种集料粒径分布，细度模数、吸水率等物理性质见表 2，由于机制砂由玄武岩破碎而成，因此含有较多石粉。水：南京市自来水。

1.2 制备

所制备的超高性能混凝土见表 3，以 M0N100 作为基准配合比，以机制砂等质量替代河砂作为细集料，M0N100、M25N75、M50N50、M75N25、M100N0 分别表示替代率为 0%，25%，50%，75%以及 100%。采用强制式搅拌机，先将水泥、粉煤灰、硅灰以及细集料投入搅拌机种搅拌 3 min，然后将混合好的水与减水剂逐渐倒入混合料中搅拌 5 min，最后将钢纤维加入浆体中并均匀搅拌 3 min。搅拌完毕后，将拌合好的 UHPC 浆体装入试模，模具尺寸分为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件以及 ϕ70 mm×35 mm 的圆柱体试件，室内自然养护 2 d 后脱模，然后将试件进行标准养护，养护温度为(21±1) ℃，相对湿度≥95%。

表 1 原材料化学组成

Table 1 Chemical compositions of raw materials *w*/%

Composition	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5
Cement	63.62	4.45	19.70	2.93	1.28	2.93	0.68	0.12	0.27	
Fly ash	17.60	6.84	65.67	0.06	0.08		0.04	0.035	0.015	0.021
Silica fume	0.2	0.3	95.4	0.8	0.2					

w is mass fraction.

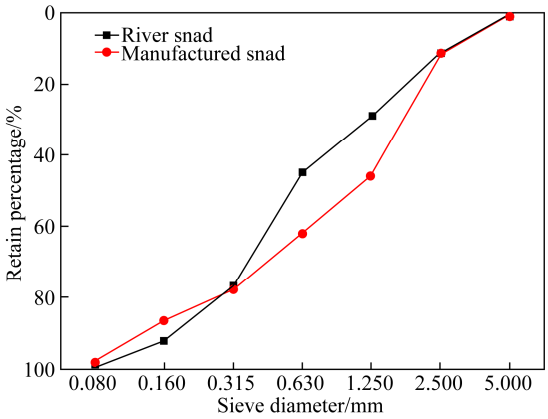


图 1　机制砂与河砂粒径分布

Fig. 1　Particle size distribution of river sand and manufactured sand

表 2　河砂与机制砂物理特性对比

Table 2　Physical properties of river sand and manufactured sand

Type	Fineness modulus	*w* (water adsorption)/%	Apparent density/ (g·cm^{-3})
River sand	2.5	0.8	2.600
Manufactured sand	2.8	1.2	2.955

表 3　UHPC 的配合比

Table 3　Mix proportion of UHPC　kg/m^3

Sample	Cement	Fly ash	Silica fume	River sand	Manufactured sand	Water	Water reducer	Steel fiber
M0N100	606	303	101	1 111	0	131.3	50.5	195
M25N75	606	303	101	833	278	131.3	50.5	195
M50N50	606	303	101	555	555	131.3	50.5	195
M75N25	606	303	101	278	833	131.3	50.5	195
M100N0	606	303	101	0	1 111	131.3	50.5	195

1.3　表征

试件养护 28 d 后进行力学性能测试，机制砂 UHPC 抗压强度参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)[17]执行，抗压强度采用 100 mm×100 mm×100 mm 的试件，试验设备采用量程为 3 000 kN 的万能试验机，加载速率为 1.0 MPa/s，取 3 个试件测试强度的平均值作为最终强度。机制砂 UHPC 动态压缩力学性能测试采用 ϕ70×35 mm 的圆柱体试件，试验设备为分离式霍普金森压杆，杆件直径为 100 mm，密度为 7 850 kg/m^3，弹性模量为 210 GPa，入射杆长 5 000 mm，透射杆长 3 000 mm，子弹长 600 mm。通过式(1)~式(3)[18]计算出应力、应变与应变率。

$$\sigma(t)=\frac{EA_0}{2A}[\varepsilon_{\mathrm{i}}(t)+\varepsilon_{\mathrm{r}}(t)+\varepsilon_{\mathrm{t}}(t)] \tag{1}$$

$$\varepsilon(t)=\frac{c_0}{L}\int_0^t[\varepsilon_{\mathrm{i}}(t)-\varepsilon_{\mathrm{r}}(t)-\varepsilon_{\mathrm{t}}(t)]\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon}(t)=\frac{c_0}{L}[\varepsilon_{\mathrm{i}}(t)-\varepsilon_{\mathrm{r}}(t)-\varepsilon_{\mathrm{t}}(t)] \tag{3}$$

式中：$\sigma(t)$为试件平均应力；$\varepsilon_{\mathrm{i}}(t)$为压杆入射应变；$\varepsilon_{\mathrm{r}}(t)$为压杆反射射应变；$\varepsilon_{\mathrm{t}}(t)$为压杆透射应变；$A_0$ 为压杆横截面积；A 为试件横截面积；L 为试件长度；E 为压杆弹性模量；$\varepsilon(t)$为试件应变；c_0 为一维应力波在杆件中传播速度；$\dot{\varepsilon}(t)$ 为应变率。

2　结果与讨论

2.1　机制砂 UHPC 抗压强度

机制砂 UHPC 的抗压强度如图 2 所示。M0N100、M25N75、M50N50、M75N25 以及 M100N0 配合比标准养护 28 d 后抗压强度分别为 156.4、158.5、153.7、153.6 MPa 以及 162.6 MPa。可以看出，当机制砂部分或完全替代河砂后，不同配合比 UHPC 强度与基准试样较为接近，且与文献中采用高品质细集料制备的 UHPC 力学性能相当[11, 19]。采用机制砂作为细集料并不会显著降低 UHPC 的强度。相对于河砂，机制砂棱角更加突出且颗粒表面附着大量石粉。一方面，不规则形貌导致浆体在搅拌过程中颗粒间的摩擦力较大，造成浆体工作性能下降，此外，由于含有大量石粉，机制砂吸水率较河砂更高(见表 2)，导致浆体粘度较大，从而新拌浆体中更容易引入气泡，增大了 UHPC 基体孔隙率，对强度造成不利影响[5, 20]。另一方面，微石粉的填充效应使微结构更加致密化，并且可以改善集料与基体的界面过渡区，同时，机制砂的粗糙形貌可以增大骨料与基体间的机械咬合力，在一定又程度上可以改善混凝土强度[7, 21]。因此机制砂在 UHPC 中正负两种协同效应下，致使替代河砂后混凝土力学强度差异不大。

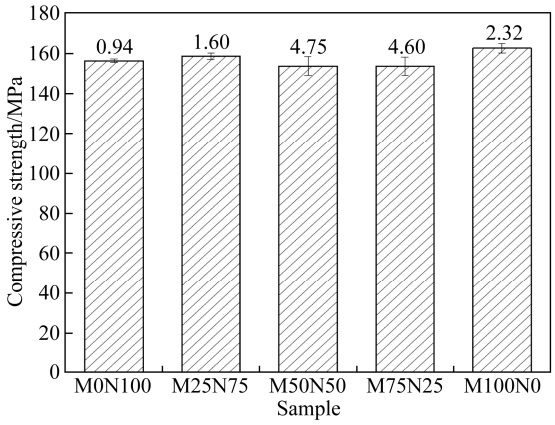


图 2　UHPC 的抗压强度

Fig. 2　Compressive strength of UHPC

2.2 机制砂 UHPC 单次冲击力学性能

图 3 为不同机制砂替代量的 UHPC 样品的冲击压缩应力–应变曲线，应变率范围约在 155 s^{-1}~293 s^{-1} 之间，设置 3 种应变率范围。表 4 为每组曲线对应的动态力学性能参数。从图 3 和表 4 可以看出，各配合比 UHPC 均具有明显的应变率效应，即随着应变率的提高，峰值应力不断提高。以 M100N0 为例，当混凝土应变速率由 166 s^{-1} 增大到 293 s^{-1} 时，峰值应力由 166.1 MPa 增大到 312.1 MPa。材料具有应变率效应的主要原因是由于高速冲击瞬间，混凝土的裂缝发展速度远小于应力波的加载速度，短时间内试件内部冲击能无法耗散，因而混凝土表现出较高的应力水平，随着应变率的增大，混凝土内部积聚的冲击能进一步增大，致使混凝土产生更高的应力值[22]。此外，各配合比的峰值应变也随着应变率的增大呈增大趋势，随着冲击速率的增大，试件的损伤范围随之变大，因此增大了混凝土峰值应变，这与其他学者的研究结果相一致[23–24]。

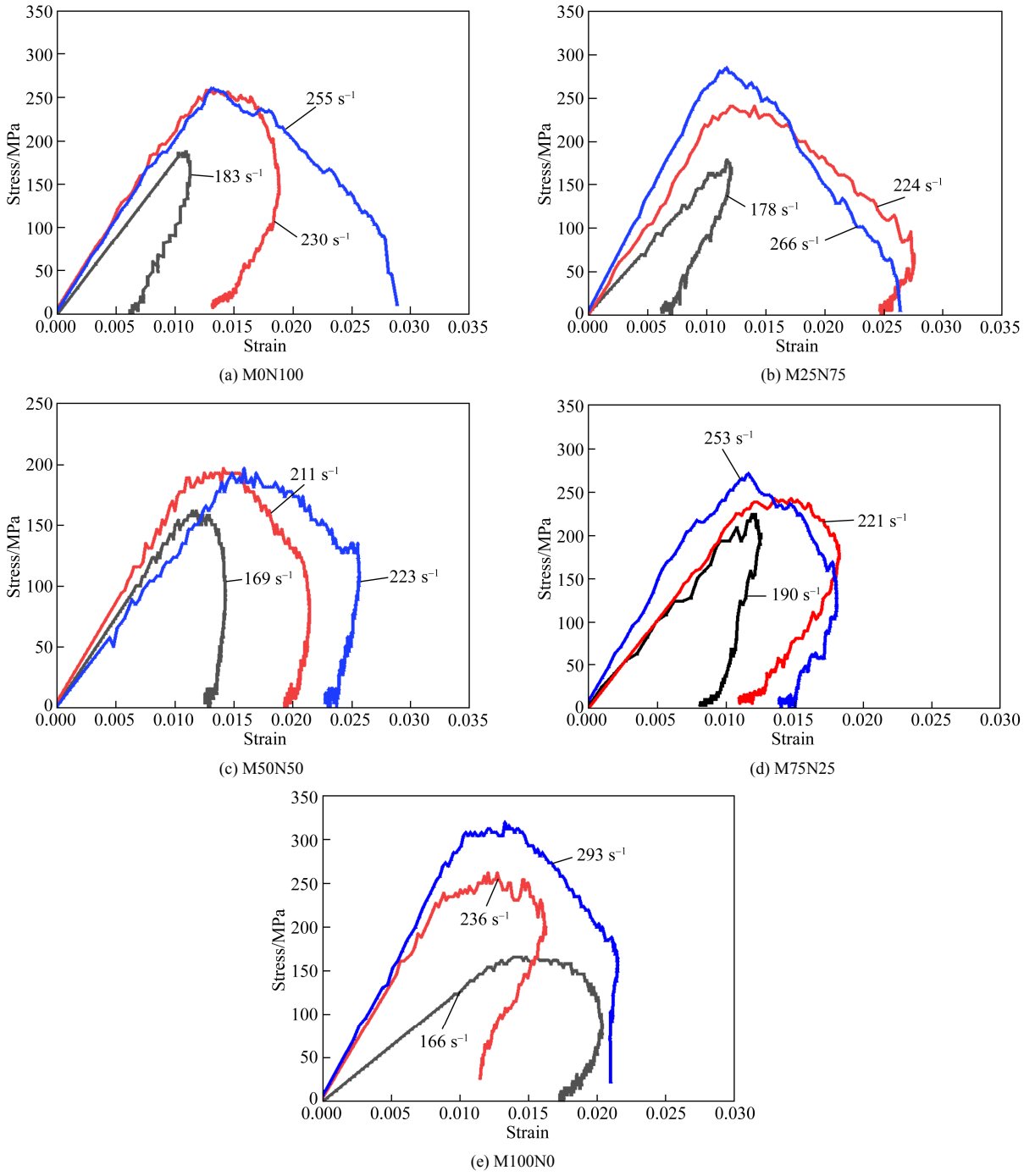


图 3 UHPC 的冲击压缩应力–应变曲线

Fig. 3 Impact compression stress-strain curves of UHPC

表 4　冲击压缩力学参数

Table 4　Mechanical parameters of impact compression

Sample	Compressive strength/MPa	Strain rate/s^{-1}	Peak stress/MPa	Peak strain/%	DIF
M0N100	156.4	183	187.8	1.10	1.20
		230	258.1	1.28	1.65
		255	260.0	1.33	1.66
M25N75	158.5	178	178.9	1.16	1.13
		224	240.7	1.20	1.52
		266	285.1	1.18	1.80
M50N50	153.7	169	158.4	1.15	1.03
		211	193.1	1.41	1.26
		233	189.3	1.59	1.23
M75N25	153.6	190	221.0	1.20	1.44
		221	238.8	1.22	1.55
		253	271.6	1.17	1.77
M100N0	162.6	166	166.1	1.43	1.02
		236	254.2	1.20	1.56
		293	312.1	1.39	1.92

DIF is difference.

对比不同配合比，采用机制砂部分或完全替代河砂后，UHPC 动态力学强度并未出现明显降低，且动态压缩强度与文献[25–28]中采用高品质细集料制备出的 UHPC 相接近。UHPC 强度主要取决于材料组分的堆积密实度[29]，由于机制砂细度模数较低，包含更多的细颗粒，其填充效应可以提高基体密实度。此外，机制砂棱角多且颗粒表面粗糙，增大了集料与基体间的机械咬合力[30]。两种作用有助于改善混凝土力学性能，因此，机制砂可以作为一种绿色细集料用于制备 UHPC 军事防护材料。

2.3　机制砂 UHPC 应变率效应

动态增强因子(δ)指混凝土动态压缩强度与准静态抗压强度之比，表征材料在动态荷载作用下引起的强度变化[31]。图 4 比较了本实验和国内外研究的 UHPC 冲击压缩 δ 随应变率的变化的统计结果[14–16, 23, 25, 32–50]，由变化趋势可以看出试验结果与多数学者得出的试验数据规律类似，即 δ 呈现出应变率效应，δ 值随应变率的增加呈增大趋势，UHPC 的 δ 计算结果位于统计数据的上边界与下边界之间，表明机制砂 UHPC 具有良好的动态力学性能。对本实验 15 组试验数据进行拟合分析，如图 5 所示，可以发现机制砂 UHPC 的 δ 与应变率呈对数函数关系，与普遍规律相一致，机制砂 UHPC 的 DIF 值具有明显的应变率效应，经过回归分析，得到机制砂 UHPC 的 δ 与应变率相关关系如下：

$$\delta = 1.560\,6\ln(\dot{\varepsilon}) - 6.945\,4 \quad (R^2 = 0.855) \tag{5}$$

式中，$\dot{\varepsilon}$ 为试件的应变率。

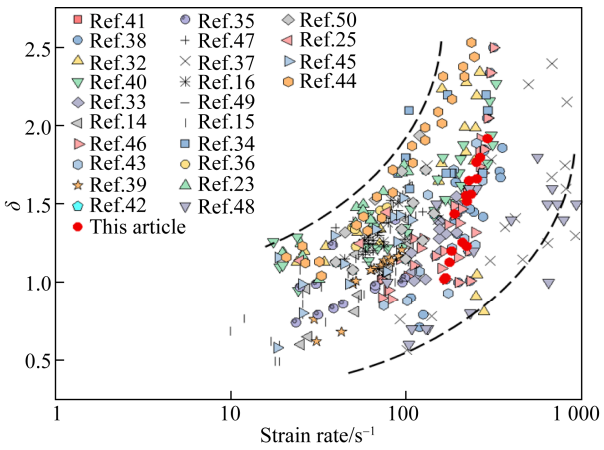


图 4　UHPC 冲击压缩动态增强因子 δ 与应变率关系汇总

Fig. 4　Summary diagram of relation between impact compression δ and strain rate

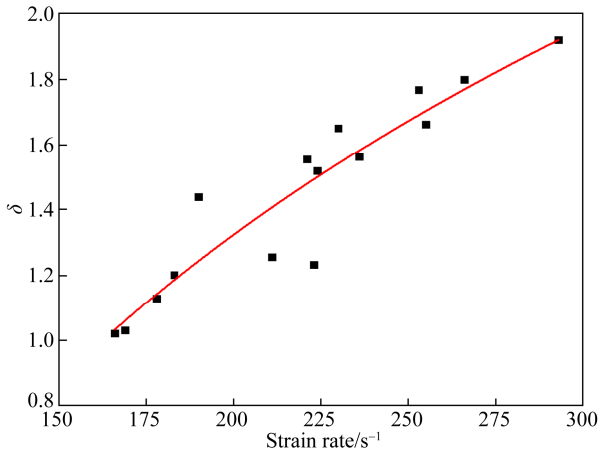


图 5　机制砂 UHPC 冲击压缩 δ 与应变率关系

Fig. 5　Relation between impact compression δ and strain rate of manufactured sand UHPC

2.4　机制砂 UHPC 多次冲击力学性能

图 6 为机制砂 UHPC (M100N0)在多次冲击下的应力–应变曲线，随着冲击次数的提高，由于材料的损伤程度不断累积，大量微裂纹扩展形成损伤过程区，机制砂 UHPC 动态力学参数整体发展趋势为：峰值应力逐渐下降而峰值应变逐渐增大。机制砂 UHPC 在相对低应变率时(132 s^{-1}~199 s^{-1})抗多次冲击的能力非常强，总冲击次数可达 13 次。由图 6 可以看出，在前 9 次冲击时，UHPC 试件以弹塑性变形为主，应力-应变曲线达到峰值后表现出向原点回缩的趋势，表明此时材料损伤程度较低。当试件的冲击次数在 10 次的时候，峰值应力仍能达到 150 MPa 以上，展现出优异的抗多次冲击能力。随着冲击次数的增加，材料损伤演化加剧，当冲击次数达到第 13 次时，机制砂 UHPC 峰值应力已不足 50 MPa，而峰值应变达到 0.05，试件基本丧失力学

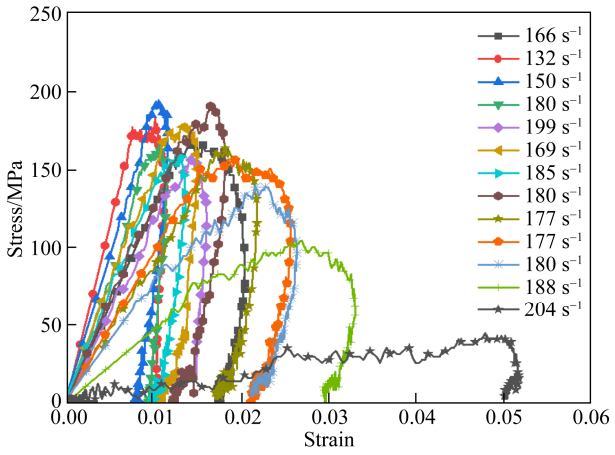


图 6 低应变率条件下 M100N0 配合比多次冲击动态力学性能

Fig. 6 Repeated dynamic impact compressive tests of M100N0 mixture under low strain rate

性能。张文华[25]、赖建中[51]采用河砂制备出不同强度等级的 UHPC，并研究了多次冲击作用下的动态力学行为，与机制砂 UHPC 的演变规律一致，随着冲击次数的增加，混凝土内部损伤累积增大，进而峰值应力逐渐降低而峰值应变逐渐增大。通过图 6 可以看出机制砂 UHPC 可以承受多次连续冲击作用并且保持较高强度，因此采用机制砂作为细集料用于制备抗冲击 UHPC 是可行的。

图 7 为较高应变率条件下(236 s^{-1}~250 s^{-1})机制砂 UHPC 抗多次冲击压缩的试验结果，相比于低应变率，机制砂 UHPC 在较高应变率抗多次冲击能力有明显的降低。由于应变率效应，第 1 次冲击时混凝土动态压缩强度高于 250 MPa，第 2 次冲击的峰值应力也达到 200 MPa，但由于高应变率冲击条件下混凝土内部损伤累积更加迅速，导致机制砂 UHPC 力学性能骤降，第 3 次冲击峰值应力已不足 50 MPa，基本丧失力学性能。

图 8 为机制砂 UHPC 在低应变率(132 s^{-1} 和 199 s^{-1})下的破坏形貌，由图 8 可见破坏形态演化主要经历了以下 4 个过程：(1) 未开裂形态，冲击前期(1~3 次)，由于混凝土内部拉伸应力较小，未达到导致微裂纹发展的阈值应力，因而试件没有出现明显损伤，可以保持完整的形态；(2) 边角破坏形态，当冲击次数达到 5 次，由于损伤累积效应，试件边角开始出现裂纹；(3) 初裂破坏形态，随着冲击次数的增加，试件裂纹逐渐延伸扩展，边角逐渐轻微脱落，当冲击次数达到第 9 次时，试块剥落已较为明显，但由于纤维的阻裂作用，试块仍能够保持较

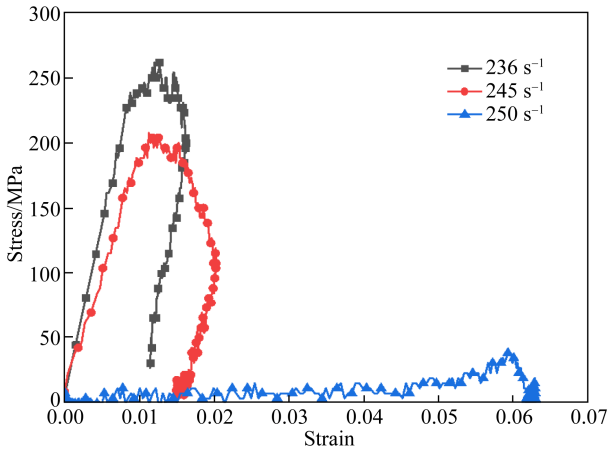


图 7 高应变率条件下 M100N0 配合比多次冲击动态力学性能

Fig. 7 Repeated dynamic impact compressive tests of M100N0 mixture under high strain rate

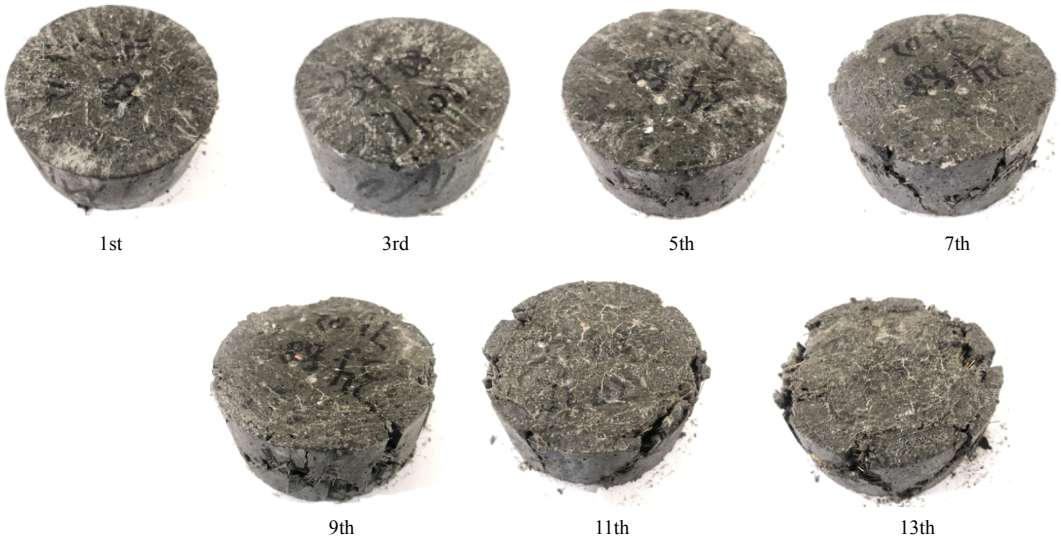


图 8 M100N0 配合比在不同冲击次数下破坏形态

Fig. 8 Damage morphology characteristics of M100N0 at different impact times

好的完整性；(4) 整体开裂破坏形态，随着冲击次数进一步增加，混凝土内部损伤进一步累积，导致试件破坏形态更加明显，当冲击次数达到 13 次时，混凝土破坏形式由边缘剥落变为裂纹向试件内部扩展，试件基本丧失力学性能。谭永山[52]将超高性能水泥基材料的多次冲击破坏形态演变过程划分为未开裂形态、边角破坏形态、初裂破坏形态、整体开裂破坏形态以及粉碎性破坏形态，之所以出现粉碎性破坏这一状态，主要是由于纤维掺量较低导致。混凝土试件的冲击破坏形态与钢纤维掺量直接相关[53]，较高掺量的纤维使得 UHPC 内部形成一个纵横交错的网状结构，可以有效抑制基体的拉伸破坏。可以看出，当纤维掺量为 2.5%时，尽管冲击次数多达 13 次，由于机制砂 UHPC 内部钢纤维的粘结、阻裂作用，能够有效的阻碍混凝土发生粉碎性破坏，从而可以呈现出一种裂而不散的破坏形态。

3　数值模拟

在混凝土材料的冲击、侵彻等动态力学性能分析中，通常采用 HOLMQUIST-JOHNSON-COOK 材料模型(HJC 模型)进行研究，HJC 模型能够较为准确地反映混凝土材料在高应变率条件下的动态力学特征，因此，基于 HJC 模型，采用动力有限元软件 LS-DYNA 对机制砂 UHPC 的冲击行为进行数值模拟。

3.1　模型建立

采用 ls-prepost 前处理软件建立机制砂 UHPC 的冲击试验模型，模型单位使用国际单位制，采用八节点六面体 Solid 164 体单元入射杆、试件、透射杆均按实际尺寸进行建模。杆件及子弹为同种类型的钢材，采用理想的弹性材料本构模型模*MAT_ELASTIC，钢材密度为 7 840 kg/m^3，弹性模量为 210 GPa。杆与试件的接触方式按面面接触进行定义，关键字为 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE TO SURFACE。采用对称罚参数法，罚参数因子取 2.0，不计摩擦。机制砂 UHPC 冲击数值模拟有限元模型如图 9 所示，UHPC 试件网格划分见图 10。

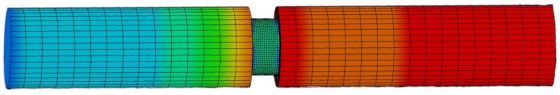


图 9　SHPB 数值模拟模型

Fig. 9　SHPB impact numerical model

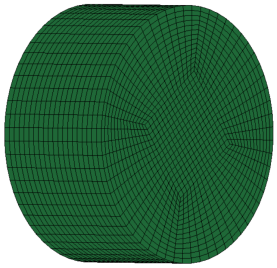


图 10　试件网格划分示意图

Fig. 10　Schematic diagram of meshing

3.2　HJC 模型参数的确定

针对 M100N0 配合比，对其动态压缩力学行为进行数值模拟。模拟参数包括基本参数(ρ，f_c，G)，强度参数(A，B，C，N，T 和 S_{fmax})，损伤参数(D_1，D_2，$\varepsilon_{f,min}$)以及压力参数(K_1，K_2，K_3，P_{crush}，U_{crush}，P_{lock}，U_{lock}) 4 种类型参数。参数中，ρ 为混凝土的材料密度，这里取值 ρ=2 540 kg/m^3；f_c 为混凝土抗压强度，取值 f_c=160 MPa；G 为剪切模量，T 为静水压力下的最大拉伸强度，分别取值 10.4 GPa 与 6.53 MPa；S_{fmax} 为归一化的最大应力，取值 7.0；损伤参数参照文献[54]，其中 D_1=0.04，D_2=1.0，$\varepsilon_{f,min}$=0.01；压力参数 P_{crush}=f_c/3，U_{crush}=P_{crush}/$K_{elastic}$，μ_{lock}=ρ_{grain}/ρ_0−1，其中 ρ_{grain} 为机制砂 UHPC 压实密度，ρ_0 为表观密度，计算可得，P_{crush}=53.3 MPa，U_{crush}=0.001 5，U_{lock}=0.1；K_1，K_2，K_3 均以及 P_{lock} 参考文献[52]中的取值，即 K_1=12 GPa，K_2=135 GPa，K_3=698 GPa，P_{lock}=1.2 GPa；E_{sp0} 为相对应变率，F_s 为破坏类型，参照文献[25]，分别取值为 1.0 与 0。

3.3　模拟结果

对 M100N0 3 种工况条件下冲击行为进行模拟，应变率分别为 166、236 s^{-1} 及 293 s^{-1}，为了验证模型可靠性，将由试验采集到的入射波数据作为入射杆端部载荷进行加载，模拟计算分析可以得到模拟入射波形，与试验入射波形进行对比，如图 11 所示，

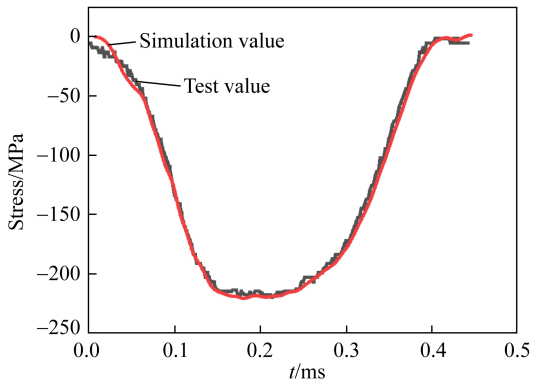


图 11　试验入射波与模拟入射波对比

Fig. 11　Comparison of test incident wave and simulated incident wave

可以看出二者吻合程度较高，说明所采用的模型具有有效性。参照文献[55]中的方法对强度参数 A，B，C，N 进行调试，得到与试验值较为吻合的应力应变曲线，如图 12 所示。最终确定的机制砂 UHPC 损伤参数取值 A=0.79，B=1.85，C=0.006，N=0.9。

表 5 为 M100N0 配合比试验与模拟所得的动态力学性能参数，从对比的结果可以看出，在应变率为 166、236 s^{-1} 和 293 s^{-1} 时，动态冲击强度试验值与模拟值的误差在 4.2%~6.9%之间，误差范围较小。动态峰值应变的试验值与模拟值的误差在 8.5%~44.6%之间，此外下降段形式与试验误差较大。造成误差较大主要有两方面，首先是试验与模拟的失效模式并非完全一致，其次是在峰值点后，试件出现不同程度的损伤，试件应力已不在平衡，从而导致峰值应变和下降段形式与试验结果误差较大[56]。

为了能够模拟试件在冲击过程的破坏形态，在定义混凝土材料参数时添加关键字*MAT__ADD__EROSION 来计算混凝土的侵蚀失效单元，在 3 种应变率条件下的试验冲击破坏形态图与模拟冲击破坏形态见图 13。可以看出，两者状态相似，在 166、236 s^{-1} 两种应变率条件下，机制砂 UHPC 保持完整，

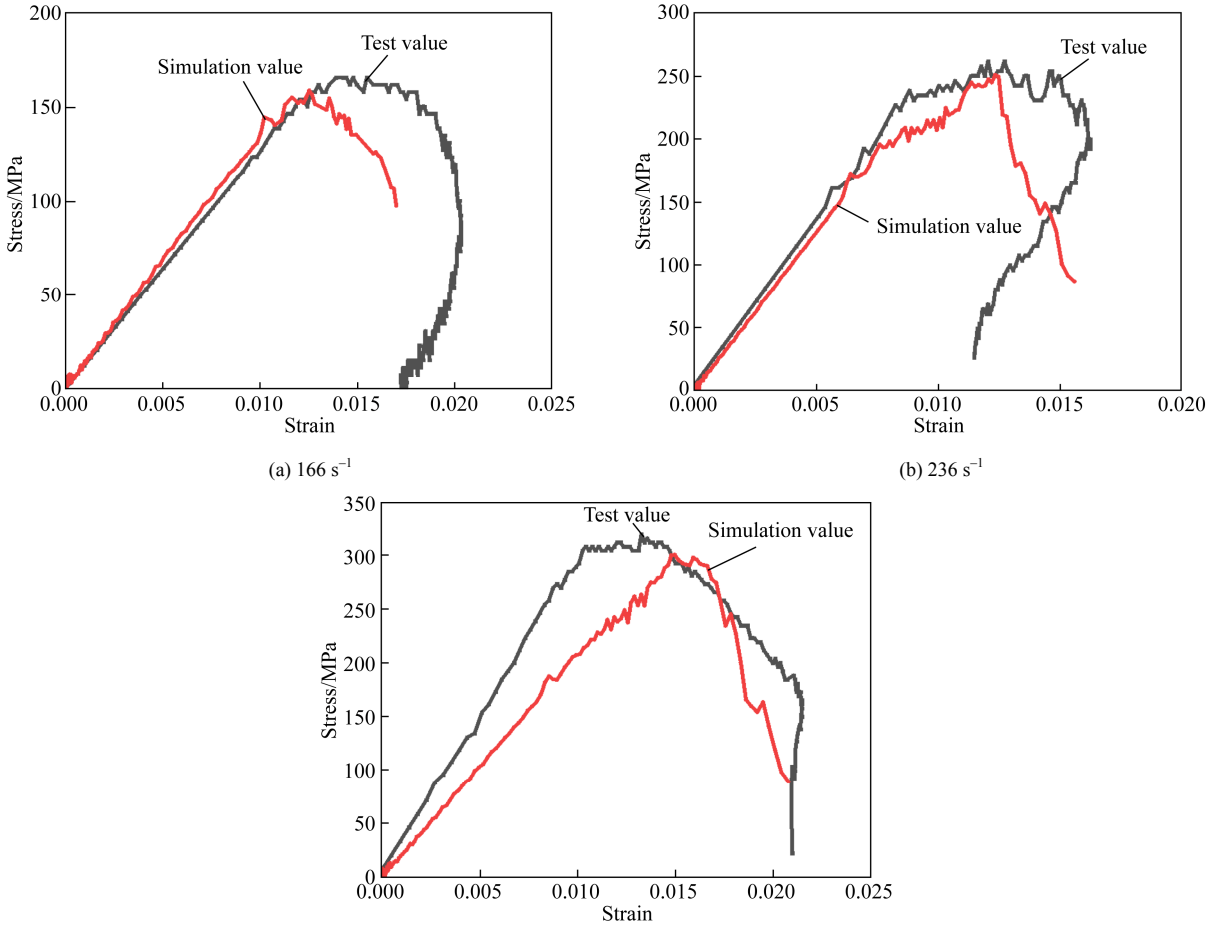


图 12 数值模拟值与试验值对比

Fig. 12 Comparison between numerical simulation value and test value

表 5 试验结果与模拟结果对比

Table 5 Comparison of test results and simulation results

Strain rate/s^{-1}	Static compressive strength /MPa	Dynamic impact strength/MPa		Error/%	Dynamic peak strain/10^{-2}		
		Experimental	Simulation		Experimental	Simulation	Error/%
166	162.6	166.1	159.1	4.2	1.48	1.25	15.5
236	162.6	258.0	249.5	3.3	1.17	1.27	8.5
293	162.6	319.9	297.9	6.9	2.87	1.59	44.6

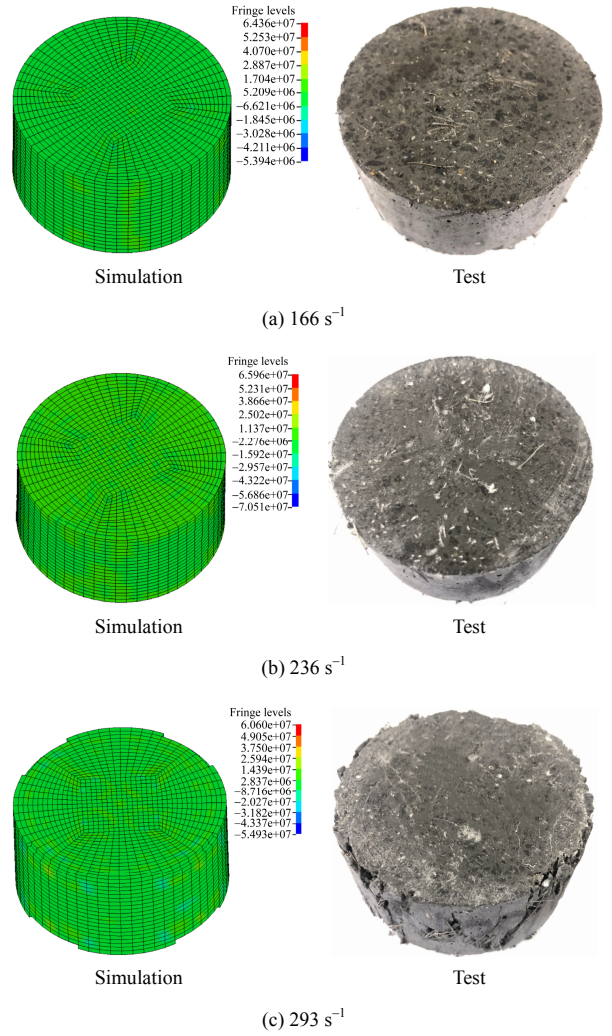


图 13　不同应变率下模拟破坏形态图及试验破坏形态图

Fig. 13　Simulated failure pattern and experimental failure pattern under different strain rate

无明显破坏现象，而当应变率增加至 293 s^{-1} 时，试件边缘出现失效单元，但芯部仍旧完好，说明机制砂 UHPC 抗冲击性能优异。

4　结论

1) 采用机制砂以 0%，25%，50%，75%以及 100%等质量替代河砂制备 UHPC，结果表明机制砂 UHPC 与仅用河砂作为细集料的 UHPC 抗压强度接近，采用机制砂作为细集料并不会显著降低 UHPC 的强度；

2) 机制砂 UHPC 具有明显的应变率效应，峰值应力随着应变率的提高而增大，动态增强因子 DIF 与应变率呈对数函数关系；

3) 机制砂 UHPC 具有优异的抗冲击性能，在较低应变率时，抗冲击次数可达 13 次，随着冲击次数的增加峰值应力逐渐降低而峰值应变呈增加趋势，混凝土损伤形态经历了开裂状态、边角破坏状态、初裂破坏状态以及整体开裂破坏状态 4 种形式；

4) 采用有限元分析软件 LS-DYNA 对机制砂 UHPC 冲击行为进行数值模拟，确定了机制砂 UHPC 的 HJC 模型参数，模拟应力应变曲线和破坏形态图均与试验结果较为吻合。

参考文献:

[1] GONCALVES J P, TAVARES L M, TOLEDO FILHO R D, et al. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(6): 924–932.

[2] KOU S C, POON C S. Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate[J]. Cem Concr Compos, 2009, 31(2): 107–113.

[3] DING X X, LI C Y, XU Y Y, et al. Experimental study on long-term compressive strength of concrete with manufactured sand[J]. Constr Build Mater, 2016, 108: 67–73.

[4] LI B X, KE G J, ZHOU M K. Influence of manufactured sand characteristics on strength and abrasion resistance of pavement cement concrete[J]. Constr Build Mater, 2011, 25(10): 3849–3853.

[5] SHEN W G, LIU Y, WANG Z W, et al. Influence of manufactured sand's characteristics on its concrete performance[J]. Constr Build Mater, 2018, 172: 574–583.

[6] ZHAO S B, DING X X, ZHAO M S, et al. Experimental study on tensile strength development of concrete with manufactured sand[J]. Constr Build Mater, 2017, 138: 247–253.

[7] SHEN W G, LIU Y, CAO L H, et al. Mixing design and microstructure of ultra high strength concrete with manufactured sand[J]. Constr Build Mater, 2017, 143: 312–321.

[8] PARK S H, KIM D J, RYU G S, et al. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete[J]. Cem Concr Compos, 2012, 34(2): 172–184.

[9] ZHANG H R, JI T, ZENG X P, et al. Mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) using recycled fine aggregate cured under different conditions and the mechanism based on integrated microstructural parameters[J]. Constr Build Mater, 2018, 192: 489–507.

[10] PYO S, KIM H, LEE B Y. Effects of coarser fine aggregate on tensile properties of ultra high performance concrete[J]. Cem Concr Compos, 2017, 84: 28–35.

[11] ZHAO S J, FAN J J, SUN W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2014, 50: 540–548.

[12] SOLIMAN N A, TAGNIT-HAMOU A. Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC[J]. Constr Build Mater, 2017, 145: 243–252.

[13] LAI J Z, YANG H R, WANG H F, et al. Properties and modeling of ultra-high-performance concrete subjected to multiple bullet impacts[J]. J Mater Civ Eng, 2018, 30(0401825610).

[14] 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.

[15] ZHANG W H, ZHANG Y S, ZHANG G R. Static, dynamic mechanical properties and microstructure characteristics of ultra-high performance cementitious composites[J]. Sci Eng Compos Mater, 2012,

19(3): 237–245.

[16] SU Y, LI J, WU C Q, et al. Influences of nano-particles on dynamic strength of ultra-high performance concrete[J]. Compos Pt. B-Eng, 2016, 91: 595–609.

[17] GB/T 50081-2002. 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50081-2002. Standard test methods for mechanical properties of ordinary concrete[S].

[18] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rares of loading[J]. Proc Phys Soc B, 1949, 62(11): 676–700.

[19] AMBULY P S, UMARANI C, RAVISANKAR K, et al. Studies on ultra high performance concrete incorporating copper slag as fine aggregate[J]. Constr Build Mater, 2015, 77: 233–240.

[20] GUPTA L K, VYAS A K. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder[J]. Constr Build Mater, 2018, 191: 155–164.

[21] KABEER K I S A, VYAS A K. Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes[J]. Constr Build Mater, 2018, 165: 321–332.

[22] 岳承军. 珊瑚混凝土高速冲击力学性能的实验研究与数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
YUE Chengjun. Research on experiment and numerical simulation of high-speed impact mechanical properties of coral aggregate seawater concrete (in Chinese, dissertation). Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[23] LOK T S, ZHAO P J. Impact response of steel fiber-reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar[J]. J Mater Civ Eng, 2004, 16(1): 54–59.

[24] KHOSRAVANI M R, WEINBERG K. A review on split Hopkinson bar experiments on the dynamic characterisation of concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 190: 1264–1283.

[25] 张文华. 超高性能水泥基复合材料微结构形成机理与动态力学行为研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
ZHANG Wenhua. Investigation of microstructure formation mechanism and dynamic mechanical behaviour of UHPCC (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2013.

[26] 焦楚杰, 孙伟, 高培正. 钢纤维超高强混凝土动态力学性能[J]. 工程力学, 2006(8): 86–89.
JIAO Chujie, SUN Wei, GAO Peizheng. Eng Mech (in Chinese), 2006, 23(8): 86–89.

[27] 戎志丹，孙伟，张云升，等. 高与超高性能钢纤维混凝土的抗侵彻性能研究[J]. 弹道学报,2010, 22(3): 63–67.
RONG Zhidan, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. J Ballistics (in Chinese), 2010, 22(3): 63–67.

[28] 任兴涛, 周听清, 钟方平, 等. 钢纤维活性粉末混凝土的动态力学性能[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(5): 540–547.
REN Xingtao, ZHOU Tingqing, ZHONG Fangping, et al. Expl Sch Wav (in Chinese), 2011, 31(5): 540–547.

[29] SHERIF, EL-TAWIL, KAY. Optimizing ultra-high performance fiber reinforced concrete[J]. Concr Int, 2011, 33(9): 35–41.

[30] SHEN W G, YANG Z G, CAO L H, et al. Characterization of manufactured sand: Particle shape, surface texture and behavior in concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 114: 595–601.

[31] JIAO C J, SUN W. Impact resistance of reactive powder concrete[J]. J Wuhan Univ Technol-Mater Sci Ed, 2015, 30(4): 752–757.

[32] 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.

[33] KRAHL P A, SALEME GIDRAO G D M, CARRAZEDO R. Compressive behavior of UHPFRC under quasi-static and seismic strain rates considering the effect of fiber content[J]. Constr Build Mater, 2018, 188: 633–644.

[34] WANG S S, ZHANG M H, QUEK S T. Mechanical behavior of fiber-reinforced high-strength concrete subjected to high strain-rate compressive loading[J]. Constr Build Mater, 2012, 31: 1–11.

[35] LAI J Z, SUN W. Dynamic behaviour and visco-elastic damage model of ultra-high performance cementitious composite[J]. Cem Concr Res, 2009, 39(11): 1044–1051.

[36] HAO Y, HAO H. Dynamic compressive behaviour of spiral steel fibre reinforced concrete in split Hopkinson pressure bar tests[J]. Constr Build Mater, 2013, 48: 521–532.

[37] DONG S F, HAN B G, YU X, et al. Dynamic impact behaviors and constitutive model of super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 184: 602–616.

[38] 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.

[39] HOU X M, CAO S J, RONG Q, et al. Effects of steel fiber and strain rate on the dynamic compressive stress-strain relationship in reactive powder concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 170: 570–581.

[40] 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.

[41] SU Y, LI J, WU C Q, et al. Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC[J]. Constr Build Mater, 2016, 114: 708–718.

[42] WANG Y H, WANG Z D, LIANG X Y, et al. Experimental and numerical studies on dunamic compressive behavior of reactive powder concretes[J]. Acta Mech Solida Sin, 2008, 21(5): 420–430.

[43] 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.

[44] LI Q H, ZHAO X, XU S L, et al. Influence of steel fiber on dynamic compressive behavior of hybrid fiber ultra high toughness cementitious composites at different strain rates[J]. Constr Build Mater, 2016, 125: 490–500.

[45] XU Z, HAO H, LI H N. Mesoscale modelling of fibre reinforced concrete material under compressive impact loading[J]. Constr Build Mater, 2012, 26(1): 274–288.

[46] ZHANG W H, ZHANG Y S. Research on the static and dynamic compressive properties of high performance cementitious composite (HPCC) containing coarse aggregate[J]. Arch Civ Mech Eng, 2015, 15(3): 711–720.

[47] GUO Y B, GAO G F, JING L, et al. Response of high-strength concrete to dynamic compressive loading[J]. Int J Impact Eng, 2017, 108(SI): 114–135.

[48] TAI Y S. Uniaxial compression tests at various loading rates for reactive powder concrete[J]. Theor Appl Fract Mech, 2009, 52(1): 14–21.

[49] 仵鹏涛, 刘中宪, 吴成清, 等. 纳米材料对超高性能混凝土动态力

学特性的影响实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(11): 3546–3555.
WU Pengtao, LIU Zhongxian, WU Cchengqing, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2016, 35(11): 3546–3555.

[50] 孟益平. 钢纤维增强混凝土冲击压缩的实验技术、本构关系、损伤机理和数值模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
MENG Yiping. Experimental technique, constitutive relation, damage mechanism and numerical simulation of steel fiber reinforced concrete impact compression (in Chinese, dissertation). Hefei: University of Science and Technology of China, 2005.

[51] 赖建中. 超高性能水泥基复合材料的制备及动态性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
LAI Jianzhong. Preparation and dynamic behaviour of ultra-high performance cementitious composites (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2007.

[52] 谭永山. 碱式硫酸镁水泥及其超高性能水泥基材料的制备、性能与机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
TAN Yongshan. Research on preparation, properties and mechanism of basic magnesium oxysulfate cement and its high performance cement-based materials (in Chinese, dissertation). Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[53] 戎志丹. 超高性能钢纤维砼防护材料的动态行为及数值模拟[D]. 南京: 东南大学, 2010.
RONG Zhidan. Dynamic behaviour and numerical simulation of ultra-high steel fiber reinforced concrete used in defense works (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2010.

[54] 张凤国, 李恩征. 混凝土撞击损伤模型参数的确定方法[J]. 弹道学报, 2001(4): 12–16.
ZHANG Fengguo, LI Enzheng. J Ballistics (in Chinese), 2001(4): 12–16.

[55] 吴赛, 赵均海, 王娟, 等. 基于砼SHPB试验数值分析的HJC模型参数研究[J]. 计算力学学报, 2015, 32(6): 789–795.
WU Sai, ZHAO Junhai, WANG Juan, et al. Chin J Comput Mech (in Chinese), 2015, 32(6): 789–795.

[56] MA H Y, YUE C J, YU H F, et al. Experimental study and numerical simulation of impact compression mechanical properties of high strength coral aggregate seawater concrete[J]. Int J Impact Eng, 2020(137): 103466.