

钢纤维增韧超高性能混凝土动态冲击性能研究

马怡彤¹, 张楷¹, 甄慧聪¹, 王鑫鹏¹, 侯东帅^{1,2,*}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 青岛 266525)

摘要: 使用分离式霍普金森压杆技术, 对 0%、1% 与 2% 体积掺量的钢纤维增韧超高性能混凝土 (UHPC) 进行动态冲击压缩试验, 以探究其在不同应变率下的动态力学性能。结果表明: 钢纤维增韧 UHPC 的动态抗压强度具有显著的应变率效应, 随着应变率的增加动态抗压强度增加; 钢纤维的加入可以显著提高 UHPC 的动态力学性能, 且能保证试块在动态冲击破坏下的完整性。UHPC 的动态冲击应力可达到 231.5 MPa, 最大吸能为 1.92 MJ/m³, 基于此, 提出钢纤维增韧 UHPC 动态增长因子经验公式。

关键词: 钢纤维增韧混凝土; 动态冲击压缩; 超高性能混凝土; 动态力学性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)05-0040-07

Study on the dynamic impact behavior of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete

MA Yitong¹, ZHANG Kai¹, ZHEN Zhicong¹, WANG Xinpeng¹, HOU Dongshuai^{1,2,*}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in

Shandong Blue Economic Zone, Qingdao 266525, China)

Abstract: Dynamic impact compression tests on steel fiber reinforced ultra-high performance concrete (UHPC) with 0%, 1% and 2% volume admixture were carried out by using the Split-Hopkinson pressure bar technique to investigate its dynamic mechanical properties at different strain rates. The results indicate that the dynamic compressive strength of steel fiber reinforced UHPC exhibits a significant strain rate effect, with an increase in the dynamic compressive strength as the strain rate rises. The addition of steel fibers can significantly enhance the dynamic mechanical properties of UHPC while ensuring the integrity of specimens under dynamic impact. The dynamic impact stress of UHPC can reach 231.5 MPa, with a maximum absorption energy of 1.92 MJ/m³. Based on these findings, an empirical formula for dynamic increase factors of steel fiber reinforced UHPC is proposed.

Key words: steel fiber reinforced concrete; dynamic impact compression; ultra-high performance concrete (UHPC); dynamic mechanical properties

收稿日期: 2024-01-17

基金项目: 国家自然科学基金 (52008220); 山东省自然科学基金青年项目 (ZR2020QE045)

作者简介: 马怡彤 (1999—), 女, 河南南阳人。硕士, 研究方向为超高性能混凝土。E-mail: mayt698@163.com。

* 通信作者: 侯东帅 (1986—), 男, 山东东营人。博士, 教授, 主要从事超高性能混凝土以及分子动力学模拟等方面的研究。E-mail: dshou@outlook.com。

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)因其高强度、高耐久性^[1-3]在海洋工程^[4]、军事设备^[5]、地下建设^[6]等领域具有广泛的应用前景。因此,UHPC结构面临着严苛的应用环境:承受地震、爆炸、海啸、海浪冲击、船舶冲撞等动态冲击作用。

传统UHPC脆性大,实际应用中需要引入钢纤维^[7-8]。基体产生裂缝时,钢纤维在基体内部形成“桥联”作用,有效阻滞裂缝扩展^[9],相较于未添加纤维的UHPC,钢纤维增韧UHPC在动态冲击荷载作用下展现出更好的韧性与抗裂能力。现有研究对钢纤维增韧UHPC进行了大量静态力学性能的研究^[10-12],发现钢纤维的加入显著提高了UHPC的应变硬化能力^[13-14],力学性能增强优势明显,然而对其动态冲击荷载下的力学性能尚未充分研究。

基于此,本文使用分离式霍普金森压杆(Split-Hopkinson Pressure Bar, SHPB)技术系统地研究了钢纤维增韧UHPC的动态力学性能,同时对比静态力学性能。通过MAA模型确定基体UHPC胶凝材料的比例以构建致密UHPC基体,使用钢纤维作为增韧材料提升基体韧性,揭示钢纤维增韧UHPC抵抗动态冲击破坏时的应用潜力,为抗冲击性能优良的UHPC应用提供数据支撑。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

水泥:山东山水水泥有限公司生产的P·O 42.5水泥,比表面积为360 m²/kg;硅灰:上海埃肯有限公司生产的940等级硅灰,密度为2200 kg/m³,比表面积为19 800 m²/kg;石英砂:粒径范围为0.075~0.6 mm。水泥和硅灰作为胶凝材料,石英砂作为骨料,其化学成分如表1所示。水:采用青岛本地自来水作为拌和用水;减水剂:聚羧酸系高效减水剂;纤维:上海真强牌钢纤维,相关参数如表2所示,形态如图1所示。

表1 原材料化学组成

组成	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	P ₂ O ₅	LOI	%
水泥	64.93	19.20	4.18	3.32	0.78	0.09	3.31	1.61	0.09	2.49	
硅灰	0.36	94.65	0.25	0.15	0.84	0.13	0.69	0.47	0.17	2.29	
石英砂	0.02	90.66	6.41	0.36	1.70	0.08	0.15	0.25	0.02	0.35	

注:LOI(Loss of Ignition)为烧失量。

表2 钢纤维物理参数及力学性能

纤维类型	长度/mm	直径/mm	长径比	密度/(kg·m ⁻³)	抗拉强度/MPa
钢纤维	13.0	0.2	65	7.8	2000

1.2 配合比设计

根据先前研究^[15]确定本试验的配合比,如表3所示。

1.3 成型与养护

1.3.1 成型方法

钢纤维增韧UHPC样品依据表3混合物配合比进行制备,制备流程如图2所示。制备完成后,将浆体装入模具并在表面铺覆保鲜膜,防止水分蒸发,浆体硬化后拆模,养护至所需龄期进行相应测试。

1.3.2 养护制度

本文采用2种养护制度,具体如下:

1) 标准养护:将试块放置于标准养护室,依照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行养护,直至测试龄期取出。



图1 钢纤维形态

表3 混合物配合比

组别	水泥	硅灰	石英砂	水	减水剂	钢纤维
Ref.	880	188	900	180	30	0
SF1	880	188	900	180	30	78
SF2	880	188	900	180	30	156

注:Ref.为基准组,钢纤维掺量为0;SF1表示钢纤维掺量为1%;SF2表示钢纤维掺量为2%。

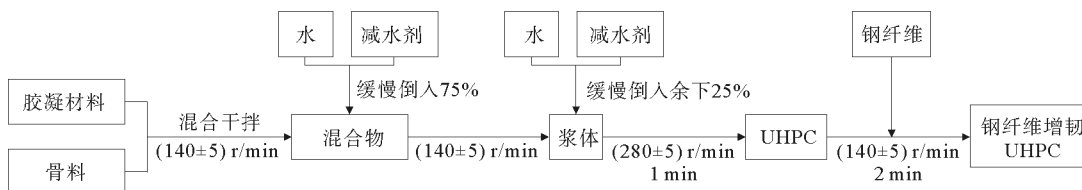


图2 钢纤维增韧 UHPC 制备流程

2) 蒸汽快速养护:将试块放置养护箱内,以 $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的升温速率从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热至 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$,而后恒温蒸养 14 h ,随后以 $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的速度降温,直至室温,蒸汽养护结束。

1.4 静态力学性能

成型试块根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—1999)进行静态力学性能测试,具体包括抗压强度测试和抗折强度测试。

1.5 动态力学性能

通过分离式霍普金森压杆技术探究不同应变速率、钢纤维不同体积掺量下 UHPC 的动态压缩性能。待测试块经切割、打磨等程序加工成尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 的试块,保证试块的上下表面平行度小于 0.02 mm ,且表面平整、无裂缝划痕。此外,试验前在试块上下表面涂抹凡士林,以减小测试过程中试块端面与测试设备杆件间摩擦效应的影响。动态冲击速度分别选用 $6、8、10\text{ m/s}$,对应应变速率范围为 $52.5\sim 94.2\text{ s}^{-1}$ 。

将制作好的试块放置于入射杆与透射杆之间,调整气压机,保证试块夹持在杆件中间不掉落。随后设置子弹初速度,利用高压气体驱动杆膛内子弹发射,冲击子弹以一定的速度撞入入射杆,随着加载的进行,入射波沿入射杆向试件方向传递到达试块表面。由于试块和杆件对入射波抗阻不同,因此,在试块表面入射波发生透射和反射现象。随着荷载持续,一部分入射波通过试块向透射杆传递,另一部分反射,向入射方向的反方向传播,即产生透射波与反射波。入射杆与透射杆分别贴敷应变片,连接信号收集装置,2个应变片分别收集入射波 $\epsilon_i(t)$ 、反射波 $\epsilon_r(t)$ 、透射波 $\epsilon_t(t)$,最后基于“三波法”获得应力 $\sigma_s(t)$ 、应变 $\epsilon_s(t)$ 、应变率 $\dot{\epsilon}_s(t)$,对应计算公式如下:

$$\sigma_s(t) = \frac{A_0 E_0}{2A_s} [\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_t(t)] \quad (1)$$

$$\epsilon_s(t) = \frac{c_0}{l_s} \int_0^t [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{c_0}{l_0} [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] \quad (3)$$

式中: A_0 和 A_s 分别为杆件和试块横截面面积, m^2 ; l_s 为试块初始长度, m ; E_0 为杆件弹性模量, GPa ; c_0 为纵波波速, m/s 。

2 结果与讨论

2.1 静态抗压强度和抗折强度

钢纤维不同体积掺量 UHPC 的静态抗压、抗折强度如图3所示。结果表明,在各龄期,钢纤维的加入

均可带来 UHPC 力学性能的增强。以 28 d 为例,对于抗压强度来说,未掺加钢纤维的基准组抗压强度为 121.5 MPa,掺入 1%和 2%的钢纤维后,抗压强度分别提升了 32.8%和 46.6%;对于抗折强度来说,基准组的抗折强度为 18.5 MPa,在钢纤维掺量为 1%和 2%时,抗折强度分别提升了 14.1%和 30.3%。这是因为钢纤维在基体内部形成纤维网络结构,发挥“桥联”作用,进而对基体破坏起约束作用,抑制裂纹萌生扩展。破坏应力由裂缝向钢纤维传递,沿钢纤维传播,随着掺量增加,纤维的“桥联”作用增大,宏观表现为力学强度的提升。

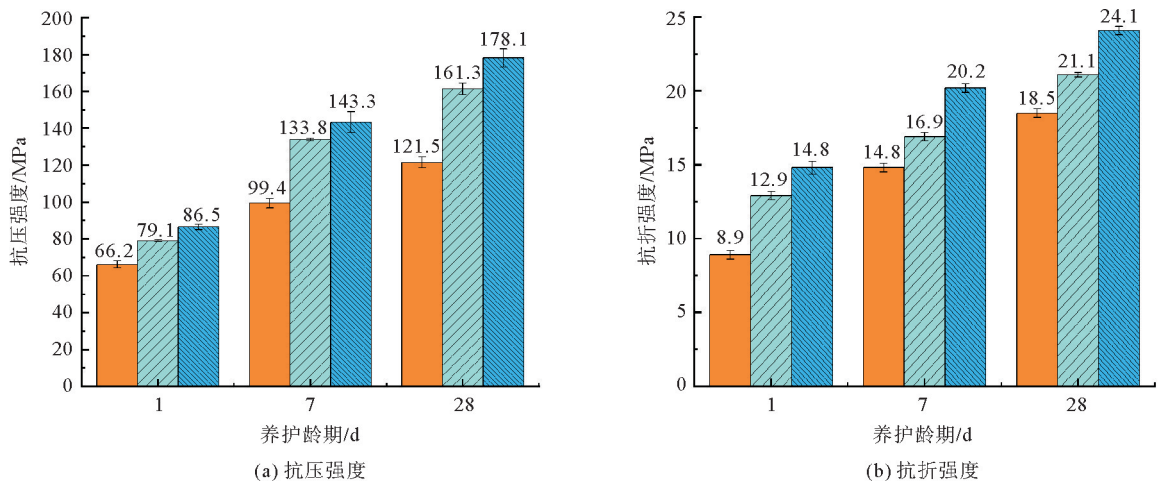


图 3 钢纤维掺量对UHPC静态力学强度的影响

■ Ref.; ■ SF1; ■ SF2

2.2 动态应力-应变曲线

图 4 为不同应变率下,钢纤维在 0%及 2%掺量时 UHPC 应力-应变曲线,可以看出,应力-应变曲线都经历 3 个变化阶段,变化趋势相似:①线性上升的弹性阶段,在此阶段内,随着应变的增加,应力线性提升,斜率基本保持不变,即此阶段试块的动态压缩模量不变。此时,入射波到达试块内部,试块吸收聚集能量,在此阶段仍可抵抗应力,不发生破坏,入射波传递达到稳定状态。②塑性强化阶段,此阶段,对于基准组,应力直接上升达到极限;加入钢纤维后,出现 1~2 个屈服点。这是因为,基准组没有钢纤维约束,呈现脆性破坏;加入钢纤维后,当试块到达屈服极限后,内部纤维阻裂效应启动,约束裂缝扩展,破坏应力由裂缝向钢纤维传播,沿钢纤维传递,并逐步诱导新裂缝产生,UHPC 韧性提升。随着冲击压力继续增加,裂缝损伤加剧,直至达到应力极限。③软化下降阶段,此时,试块达到屈服应力,试块破坏失去承载能力。

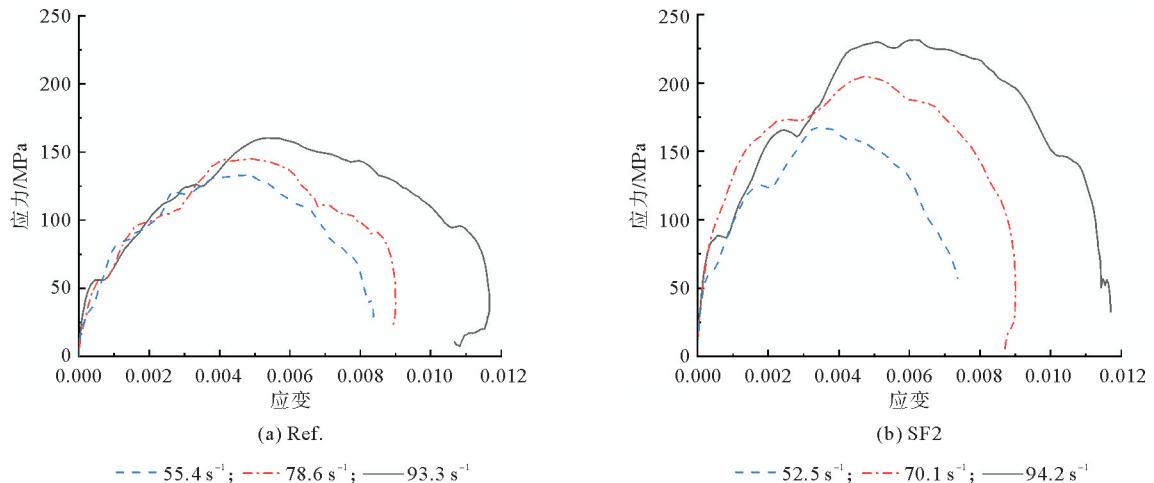


图 4 不同速率下 UHPC 应力-应变曲线

2.3 动态抗压强度

在不同应变率下,钢纤维不同体积掺量 UHPC 的动态抗压强度如图 5 所示。由图 5 可知,UHPC 和钢纤维增韧 UHPC 都具有应变率效应,随着应变率的增加,动态抗压强度增高,在同一应变率范围下,随着钢纤维掺量的提高,钢纤维增韧 UHPC 动态抗压强度提高。应变率在 $52.5 \sim 55.4 \text{ s}^{-1}$ 时,Ref.、SF1、SF2 的动态抗压强度分别为 133.3、152.7、168.3 MPa,在此较低应变率范围内,相较于 Ref.,钢纤维的加入使得 UHPC 动态抗压强度分别提升了 14.6%、26.3%;当应变率达到 $92.5 \sim 94.2 \text{ s}^{-1}$ 时,Ref.、SF1、SF2 的动态抗压强度分别为 160.3、208.2、231.5 MPa,在此较高应变率范围内,相较于 Ref.,钢纤维的加入使得 UHPC 动态抗压强度分别提升了 29.9%、44.4%。与静态抗压强度类似,钢纤维增韧 UHPC 面对较快速度下的冲击时,由于内部钢纤维自身抗拉性能优异、弹性模量较高,且在基体内部搭接形成纤维网络,充当混凝土内部骨架,宏观上表现为动态抗压强度的提升。同时,在钢纤维同体积掺量下,提高应变率,动态抗压强度增强效果提升,这是因为在高应变率下,UHPC 将承受更快速的加载和变形,相应应变时间变短,钢纤维的优异力学性能及在基体内部“桥联”发挥的纤维网络骨架作用使得钢纤维增韧 UHPC 在动态压缩作用下具有更好的对抗能力,有效阻滞裂缝的萌生与扩展。

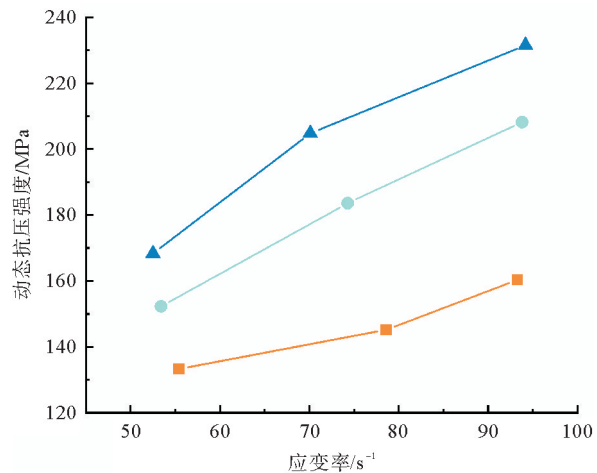


图5 钢纤维不同体积掺量UHPC动态抗压强度
—■— Ref.; —●— SF1; —▲— SF2

2.4 动态破坏形式

在不同应变率下,钢纤维体积掺量为 0%及 2%时 UHPC 冲击压缩后的破坏形貌如表 4 所示。可以看出,Ref. 在动态压缩冲击后,试块完全破碎,呈脆性破坏,应变率越大,试块破碎程度越严重。特别在应变率为 $92.5 \sim 94.2 \text{ s}^{-1}$ 时,试块破碎碎块更小,有较多碎屑产生,整体破坏更严重。钢纤维的加入大幅度提高了试块的完整度,在应变率较低时,试块几乎没有破坏,仅试块侧边出现表层轻微掉落;随着应变率增大,出现轻微龟裂,裂缝未进一步扩展;当应变率达到 $92.5 \sim 94.2 \text{ s}^{-1}$ 时,钢纤维增韧 UHPC 侧边出现大块表层剥离现象,这是在浇筑过程中,由于边壁效应,钢纤维取向发生偏转,对表层混凝土的约束能力降低,在受到外界冲击时,表层更易剥落。当混凝土结构面临动态冲击作用时,钢纤维增韧 UHPC 可以更好地维持结构完整,保障结构运维。

2.5 能量吸收

试块的吸收能根据式(4)计算:

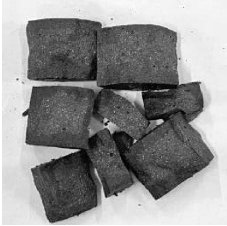
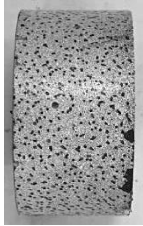





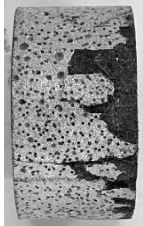

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (4)$$

式中:W 为吸收能,即应力-应变曲线所围面积; ϵ 为应变; σ 为应力。

根据式(4)得到钢纤维不同体积掺量的 UHPC 在不同应变率下吸收能的变化趋势,如图 6 所示。可以看出,吸收能随应变率的增加而增加。与基准组相比,应变率范围为 $52.5 \sim 55.4 \text{ s}^{-1}$ 、钢纤维掺量为 1%与 2%时,UHPC 在动态压缩破坏下的吸收能分别提升了 5.1%、10.2%;应变率范围为 $92.5 \sim 94.2 \text{ s}^{-1}$ 、钢纤维掺量为 1%与 2%时,UHPC 在动态压缩破坏下的吸收能分别提升了 23.5%、41.2%。应变率提升以及钢纤维加入可使吸收能提升幅度上升,这是由于掺入钢纤维后,试块在抵抗破坏的过程中,将吸收更多的能量用于钢纤维与基体的脱粘、钢纤维相对于基体的滑移以及钢纤维本身的牵拉断裂,因此能量吸收更多。同时,对比表 4 中试块在动态冲击后的破碎情况可知,当钢纤维掺量为 0%时,试块在冲击压缩作用下破碎严重,加入钢纤维后,试块的完整度提高。钢纤维作为增韧材料,吸收并分散能量,吸收的能量被消耗于裂纹扩展直至裂纹贯通,在动态冲击压缩作用下,UHPC 受到快速压缩时,钢纤维迅速承受应

力并将能量分散到周围,阻滞裂缝的形成和扩展,从而提升基体的抗裂性能和韧性。

表 4 钢纤维不同体积掺量 UHPC 在不同应变率下冲击压缩后的破坏形貌

应变率 $\dot{\epsilon}/s^{-1}$	Ref.	SF2	
		侧面	正面
52.5~55.4			
70.1~78.6			
92.5~94.2			

2.6 动态增长因子

动态增长因子 (Dynamic Increase Factor, DIF) 为同一样品动、静态力学强度的比值。不同应变率下,钢纤维不同体积掺量 UHPC 的 DIF 结果如表 5 所示。为了进一步评估钢纤维增韧 UHPC 动态冲击荷载作用下的应变率敏感性,做出 DIF 与对数应变率 $\lg \dot{\epsilon}$ 的关系曲线,如图 7 所示。

钢纤维增韧 UHPC 的破坏源于内部裂缝的萌生与扩展,当试块承受更大的冲击压应力时,需要在更短的时间产生更多的微裂缝来抵抗试块破坏,此时,需要耗散更多的能量促进裂缝的萌生与扩展。加载速度增大时,外部载荷增速远快于裂缝扩展速度,导致裂缝来不及扩展就承受更大的应力,因此,瞬时强度增强,宏观表现为动态冲击下的抗压强度增大,即应变率效率显著。掺入钢纤维后,试块的 DIF 值均有所下降,这是因为钢纤维本身为应变率不敏感材料,掺入 UHPC 基体后使得 UHPC 整体 DIF 值降低。钢纤维自身抗拉性能优异、弹性模量较高,且表面更光滑,在破坏过程中,多表现出滑出而非断裂,基体与钢纤维接触界面被破坏,在各段应变率范围内下降幅度不显著。DIF 拟合式如式(5)~(7)所示。

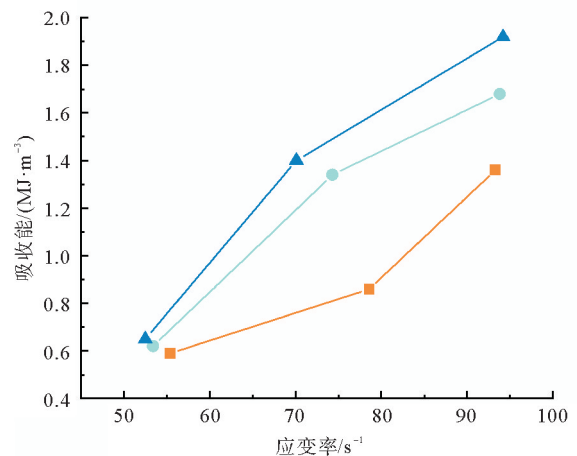


图 6 UHPC 能量吸收能力与应变率的关系

— Ref.; — SF1; — SF2

表5 SHPB 动态压缩结果

组别	应变率/s ⁻¹	动态抗压强度/MPa	DIF
	55.4	133.3	1.10
Ref.	78.6	145.2	1.21
	93.3	160.3	1.32
SF1	53.4	152.3	0.98
	74.3	183.6	1.19
	93.8	208.2	1.29
SF2	52.5	168.3	0.94
	70.1	204.8	1.15
	94.2	231.5	1.30

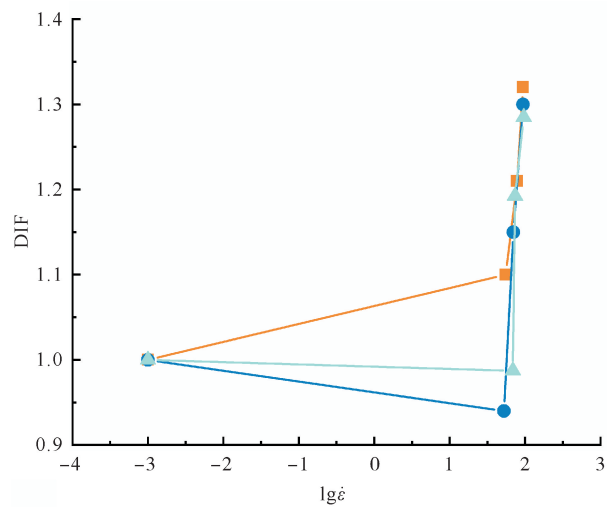


图7 动态增长系数DIF与lgε̇的关系

—■— Ref.; —▲— SF1; —●— SF2

$$\text{Ref. : } K_{\dot{\varepsilon}} = 0.09015 + 0.25202 \lg \dot{\varepsilon} + 0.18510 (\lg \dot{\varepsilon})^2 \quad R^2 = 0.9575 \quad (5)$$

$$\text{SF1 : } K_{\dot{\varepsilon}} = -0.82210 + 0.40342 \lg \dot{\varepsilon} + 0.33693 (\lg \dot{\varepsilon})^2 \quad R^2 = 0.9859 \quad (6)$$

$$\text{SF2 : } K_{\dot{\varepsilon}} = -0.50788 + 0.35647 \lg \dot{\varepsilon} + 0.28636 (\lg \dot{\varepsilon})^2 \quad R^2 = 0.9657 \quad (7)$$

3 结论

1) 在静态力学试验中,超高性能混凝土(UHPC)抗压、抗折强度随钢纤维掺量的增加而增加;掺入1%和2%的钢纤维,抗压强度分别提升了32.8%和46.6%,抗折强度分别提升了14.1%和30.3%。

2) UHPC在动态冲击荷载下呈典型的脆性破坏,加入钢纤维后,出现明显的应变硬化阶段,钢纤维增韧UHPC动态抗压强度随应变率的增加而增加,具有应变率效应。钢纤维在基体内部搭接形成纤维网格,起内部骨架作用,使得钢纤维增韧UHPC在动态冲击作用下相对完整,钢纤维加入有利于UHPC的韧性提升。

3) UHPC在动态压缩作用下的能量吸收能力随钢纤维掺量的增加而提高。在最大应变率下,掺入1%和2%的钢纤维,吸收能分别提升了23.5%、41.2%,相较于基准组,钢纤维增韧UHPC吸收更多能量用于钢纤维与基体的脱粘、钢纤维相对于基体的滑移以及钢纤维自身的牵拉断裂,延缓基体本身的破坏,具有更大的冲击韧性。

4) 钢纤维属于应变率不敏感材料,UHPC基体掺入钢纤维后,应变率敏感性降低。基于此提出了钢纤维增韧UHPC动态增长因子DIF的经验公式。

参考文献(References):

- [1] DOO-YEOL Y, BANTHIA N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 73: 267-280.
- [2] LI J Q, WU Z M, SHI C J, et al. Durability of ultra-high performance concrete: A review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 255: 119296.
- [3] SAFEER A, AHMED M, SOLIMAN M L, et al. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 429-441.
- [4] CHEN Y X, YU R, WANG X P, et al. Evaluation and optimization of ultra-high performance concrete(UHPC) subjected to harsh ocean environment: Towards an application of layered double hydroxides(LDHs)[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177: 51-62.
- [5] YAN J B, LIU Y, BAI F, et al. Dynamic response of GFRP-reinforced UHPC beams under close-in blast loading[J]. Materials & Design, 2022, 223: 111140.

(下转第81页)