

文章编号: 1000-4750(2011)04-0138-07

纤维高强混凝土的动态力学性能试验研究

杜修力, *窦国钦, 李 亮, 田予东

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 为研究纤维高强混凝土材料在冲击荷载下的动态压缩性能, 采用大尺寸 $\phi 75\text{mm}$ Hopkinson 压杆, 对三种纤维含量的钢纤维高强混凝土、PVA 纤维高强混凝土试件进行了三种应变率范围的冲击压缩试验, 得到了它们在较高应变率范围内的动态应力-应变关系。试验表明纤维高强混凝土材料为应变率敏感性材料, 在较高应变率范围内纤维高强混凝土材料的动态应力-应变关系是与应变率相关的。纤维高强混凝土材料的破坏应力和破坏应变随应变率的增大而增大。钢纤维和 PVA 纤维对混凝土耗能能力的改善和提高表现在材料达到峰值应力后开始破坏的过程中。同时也对两种纤维高强混凝土材料的纤维增韧特性及耗能机理也进行了分析和探讨。

关键词: 分离式霍普金森压杆; 钢纤维高强混凝土; PVA 纤维高强混凝土; 动态力学特性; 冲击压缩试验

中图分类号: TU377; TU502 **文献标识码:** A

EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER REINFORCED HIGH STRENGTH CONCRETE

DU Xiu-li, *DOU Guo-qin, LI Liang, TIAN Yu-dong

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering (Ministry of Education), Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A large size Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) of 75mm was used to study the dynamic mechanical behavior of fiber reinforced high strength concrete under an impact loading. The impact compression experiments with three different strain rate ranges were conducted for steel fiber reinforced high strength concrete specimens and polyvinyl alcohol fiber (PVA) reinforced high strength concrete specimens with three fiber contents. The results show that at high strain rate, the dynamic stress-strain relationships are strain rate dependent. It means that the fiber reinforced high strength concrete is sensitive to the strain rate. The failure stress and failure strain increase with increasing the strain rate. The energy absorbing capability of the steel fiber and PVA fiber in concrete is exhibited in the process of the material failure only after the peak stress is reached. The mechanism of the toughness increasing effect and energy absorbing of fiber reinforced high strength concrete is also analyzed and discussed.

Key words: split Hopkinson pressure bar; steel fiber reinforced high strength concrete; polyvinyl alcohol fiber reinforced high strength concrete; dynamic mechanical properties; impact compression experiment

随着混凝土强度的提高, 其脆性更加明显, 在轴压作用下的应变软化性能微乎其微, 呈突然性的爆裂破坏。通过加入纤维以后, 可以明显提高混凝土

的韧性和抗开裂性能, 正是纤维混凝土(FRC)优异的性能, 使得 FRC 对防护工程以及军事工程有很大的意义。

收稿日期: 2009-10-10; 修改日期: 2010-01-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50638030); 国家“十一·五”科技支撑项目(2006BAJ13B02)

作者简介: 杜修力(1963—), 男, 四川人, 教授, 博士, 博导, 院长, 主要从事工程地震、结构抗震、抗爆等方面的研究(E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn);

*窦国钦(1983—), 男, 湖北人, 硕士, 主要从事结构抗爆方面的研究(E-mail: douguoqin@emails.bjut.edu.cn);

李 亮(1975—), 男, 山西人, 副教授, 博士, 主要从事土动力学理论、结构抗爆等方面的研究(E-mail: liliang@bjut.edu.cn);

田予东(1982—), 男, 河南人, 硕士, 主要从事结构抗爆方面的研究(E-mail: tiansheweng@yahoo.com.cn).

目前,钢纤维和普通合成纤维在实际工程中应用较多。由于普通合成纤维自身较低的弹性模量和强度,对于高强混凝土的增强增韧效果并不好;而钢纤维拥有较高的弹性模量和强度,在超强超高强混凝土中添加钢纤维,能够明显改善超强超高强混凝土的脆性,提高混凝土的抗冲击韧性,并提高结构的抗爆性与抗侵入能力。

聚乙烯醇纤维(PVA)是一种价格低廉、高强和高弹性模量的合成纤维,具有良好的亲水性,纤维表面能够吸附少量自由水,与水泥基体的粘结强度很高。由于PVA纤维本身具有较高的强度和弹性模量,它不但能够有效地抑制混凝土早期的塑性裂缝,而且可以提高混凝土的韧性及抗冲击性能,同时可改善混凝土的抗渗性、抗冻性、抗碳化性能、耐磨性能,从而提高混凝土的耐久性^[2-3]。目前PVA纤维在水泥混凝土中应用尚未受到重视,国内对此的研究也刚刚起步。

纤维超高强混凝土具有超高强度,良好的韧性和优异的耐久性,在军事防护工程领域有着很好的应用前景。防护工程要承受高速冲击与爆炸作用,其设计者迫切需要了解这类材料在动载作用下的力学性能,以确保工程设计的安全性。基于此目的,本文主要介绍有关纤维混凝土材料在无侧约束状态下的抗冲击压缩性能试验研究结果。

1 试验概况

研究纤维混凝土材料在爆炸与冲击作用下的响应问题,需要弄清楚这类材料在高应变率荷载作用下的动态行为。目前对纤维混凝土材料的动态力学性能还认识不清,需要探索研究。为满足工程应用要求,本文采用比较试验途径,利用分离式霍普金森压杆 SHPB 试验装置对 7 种强度等级的纤维混凝土材料进行了冲击试验。

1.1 试验装置

由于高强高性能混凝土材料的抗压强度很高,要研究这种材料在高应变率加载条件下的性能,要求加载设备同时具有高荷载幅值和高的加载变化速率。早期研究混凝土动态力学行为的试验装置主要是液压(含液气联动)试验机和落锤(含摆锤)装置。液压(液气联动)试验机的加载速度低,涉及的应变率只能达到准动态范围,因此不能算严格意义上的高应变率试验装置。落锤装置由于不考虑惯性效应,得到的抗压强度只能参考,同时应变测量困难,

实验精度低,很难得到材料的应力-应变关系。伴随着大尺寸分离式霍普金森压杆试验装置的出现,对混凝土动态力学行为的研究获得了快速的发展^[4-5]。由于 SHPB 装置能够实现单轴高应变率加载,应力、应变测量方法相对可靠、简单,试验技术和分析方法也较为成熟,因而本项冲击试验采用部队某学院车辆工程系冲击动力学实验室的 $\phi 75$ 霍普金森压杆试验装置完成。该试验装置由子弹及其发射系统、入射杆、透射杆、阻尼吸能杆、子弹行程测时与杆体应变测量系统、以及杆体承台组成,装置如图 1 所示,本次冲击压缩实验的试件尺寸为 $\phi 75 \times 50$ 。

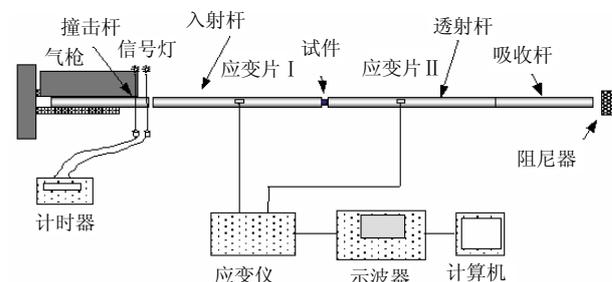


图 1 SHPB 的实验装置简图

Fig.1 Sketch map of SHPB experimental equipment

1.2 试验方法

先将试件两端面通过机械加工磨平,使两端面彼此的不平行度 $\leq 0.05\text{mm}$ 且与试件的轴线垂直,然后将试件置于用塑料套筒加固后的入射杆端和透射杆端之间。在入射杆中部贴应变片测量入射波和反射波信号;在透射杆中部贴应变片测量透射波信号(见图 2)^[6]。



图 2 输入杆、试件、输出杆及应变片的相对位置示意

Fig.2 Schematic of strain sensors layout on the incident bar and the transmitter bar

对纤维混凝土试件还在其中部两侧贴应变片直接测量试件受冲击作用后产生的应变波形。为了使试件在受冲击作用过程中处于均匀受力状态,同时减少压杆中的几何弥散效应^[7]。对发射子弹撞击入射杆产生的脉冲专门进行了整形,用于整形的材料为退火紫铜,形状为圆片状,尺寸依试件所要求的应变率而定,将其附贴于入射杆的打击端面上使用。通过运用整形技术,基本保证了入射波形为三角形,试件破坏前加载时间超过 $60\mu\text{s}-80\mu\text{s}$,这样

能够保证试件在破坏时已经达到了动态应力均匀。

由试件平整度所引起应力的不均匀将存在于试件变形至破坏的整个过程中,此外,在 SHPB 装置调试时使入射杆、透射杆的两个端面完全保持平行也是比较困难的。这些,将给实验测试结果带来较大的误差。为了弥补测试系统的这一不足,进一步提高实验精度与数据的可靠性,在试件与透射杆之间安装万向头装置来保证二者的均匀接触,万向头的安装位置如图 3 所示。试验时在万向头凹凸面涂抹少量润滑剂,将其放置于试件与透射杆之间,随着安装试件受到挤压,万向头将随之发生微调,从而保证入射杆、试件和透射杆端面的均匀接触。

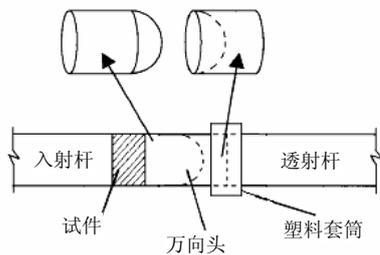


图 3 万向头装置简图

Fig.3 Sketch map of multi-aspect device

表 1 PVA 纤维高强混凝土配合比

Table 1 Concrete mixture ratio of PFRHSC

编号	胶结材料总量/(kg/m ³)	硅灰/(%)	粉煤灰/(%)	矿粉/(%)	水胶比	减水剂用量/(%)	砂率	PVA 纤维掺量/(kg/m ³)
PFRHSC0.5	650	5	10	20	0.22	1.5	0.4	6.5
PFRHSC1.0	650	5	10	20	0.22	1.5	0.4	13
PFRHSC1.5	650	5	10	20	0.22	1.5	0.4	19.5

材料编号含义为: 掺合料、外加剂的用量是相对于胶结材料的百分用量; PFRHSC0.5 表示为掺入体积率(V_f)0.5%PVA 纤维高强混凝土; 其他以此类推。

2 试验结果与分析

经测试, 钢纤维高强混凝土 $V_f=1\%$ 、 $V_f=2\%$ 、 $V_f=3\%$ 的静态抗压强度分别为 118.5MPa、123.7MPa、128.4MPa。PVA 纤维高强混凝土 $V_f=0.5\%$ 、 $V_f=1\%$ 、 $V_f=1.5\%$ 的静态抗压强度分别为 108.5MPa、106.5MPa、99.3MPa。本次共进行了 7 组试件的冲击压缩试验, 每组试件采用 3 个应变率 (25/s—40/s; 60/s; 100/s) 进行试验, 针对同一类试件, 从 3 个方面考虑选取 3 组—5 组有效数据: 试件大小尺寸相同; 在同一加载速率下, 试件的破坏模式相近; 同一类试件试验中每次试验总体的入射波、反射波和透射波的波动范围不大。在处理试验结果过程中, 对各应变率条件下范围内同组试件 3 组—5 组有效数据的应力和应变进行了平均处理, 表 2 给出了处理后得到的各组试件的平均应变率、

试验时, 万向头外还要套上轻质塑料套筒, 以防止撞击后万向头落地摔坏^[8]。

1.3 试验材料

用于冲击压缩试验的纤维高强混凝土试件为圆柱形, 公称尺寸为 75mm×50mm, 试样采用上海某公司生产的长径比为 45 的 30mm 长的 ZP305 端钩型(Dramix)钢纤维, 体积含量分别为 1%、2%和 3%; 日本某公司生产的抗拉强度为 1100MPa 的 12mm 长的 RECS100×12 型号的 PVA 纤维, 体积含量分别为 0.5%、1%和 1.5%; 粗骨料为 5mm—20mm 卵石和碎石, 细骨料为中粗天河砂, 大粒径 5mm, 细度模数为 2.3, 级配良好。以 PVA 纤维高强混凝土为例, 考虑到增加 PVA 纤维会降低混凝土拌合物的流动性及和易性, 因此在配制 PVA 纤维高强混凝土的配合比设计中, 将单方面混凝土的胶凝材料用量增大到 650kg/m³, 其水泥与活性矿物掺合料的比例不变, 采用配合比见表 1。本试验试件采用直径 75mm 的混凝土钻芯机钻取芯样, 之后用混凝土切割机将芯样切片, 采用卧轴矩台平面磨床对试件进行精细加工使之达到平行度要求。

平均峰值应力以及平均峰值应变。

表 2 试验结果汇总

Table 2 Sum up of experimental results

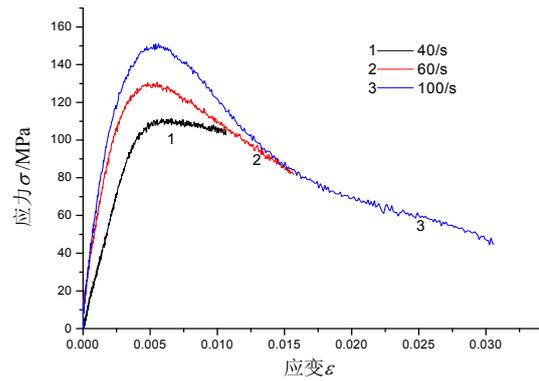
试件材料	纤维掺入 体积率/(%)	平均 应变率/s ⁻¹	平均 峰值应力/MPa	平均 峰值应变/(%)
高强混凝土 基体	0	25	86	0.31
		60	65	0.25
		100	120	0.53
钢纤维高强 混凝土 S1	1	63	102	0.35
		44	90	0.39
		100	140	0.53
钢纤维高强 混凝土 S2	2	65	120	0.40
		40	110	0.34
		104	150	0.51
钢纤维高强 混凝土 S3	3	63	130	0.43
		40	110	0.34
		100	140	0.40
PVA 纤维高强 混凝土 P0.5	0.5	60	120	0.33
		25	80	0.27

(续表)

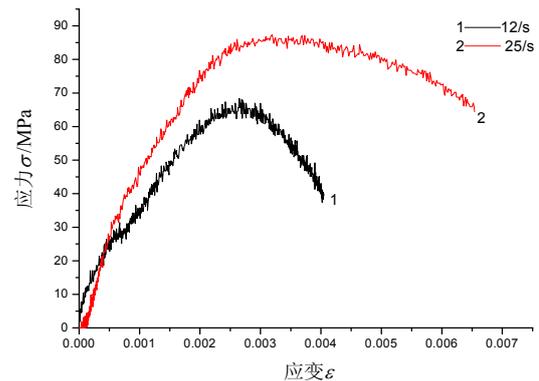
试件材料	纤维掺入 体积率/(%)	平均 应变率/s ⁻¹	平均 峰值应力/MPa	平均 峰值应变/(%)
PVA 纤维高强 混凝土 P1	1	96	135	0.53
		60	110	0.51
		28	82	0.50
PVA 纤维高强 混凝土 P1.5	1.5	98	138	0.53
		57	125	0.52
		30	85	0.34

2.1 材料的应变率效应

7 种不同纤维掺量的混凝土材料在不同应变率时的应力-应变曲线如图 4—图 5 所示。从图 4 和图 5 中可以看出, 3 种应变率条件下的应力-应变曲线在总体趋势上保持了很好的一致性。但随着应变率的提高, 应力-应变曲线变陡且初始直线段加长, 同时, 纤维高强混凝土屈服极限提高, 表明其脆性破坏随着应变率的提高而越加明显, 即快速加载引起混凝土材料的暂时硬化。在相同的应变下, 高应变率时的瞬时应力值一般高于低应变率时的应力值。在加载速率较低时, 应力-应变曲线呈应变硬化类型, 在加载速率较高时, 应力-应变曲线呈应变软化类型出现峰值强度和残余强度。图 4—图 5 明显表现出随着加载速率的增大, 应力-应变曲线呈现由硬化向软化过渡的趋势。



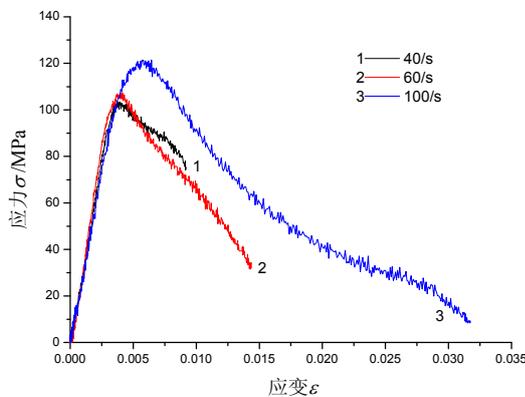
(c) $V_f=3\%$



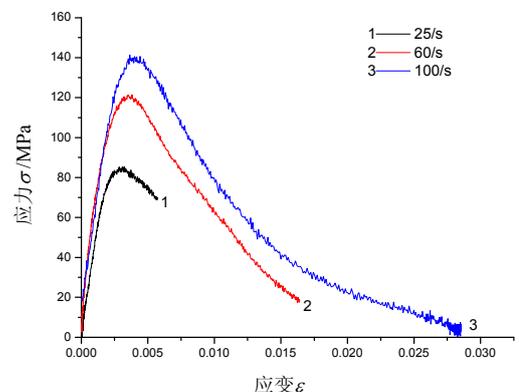
(d) $V_f=0\%$

图 4 钢纤维高强混凝土在不同应变率下的应力-应变曲线

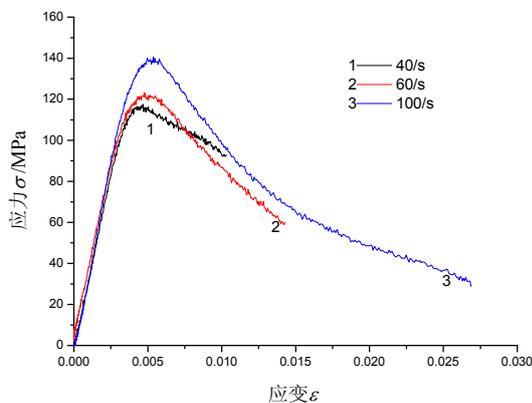
Fig.4 Stress-strain curves of steel fiber reinforced high strength concrete specimens under impact loading with three different strain rate ranges



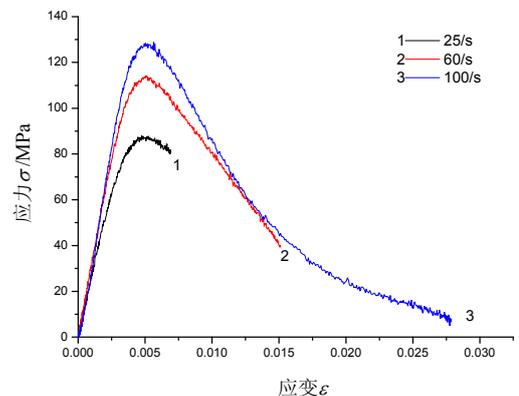
(a) $V_f=1\%$



(a) $V_f=0.5\%$



(b) $V_f=2\%$



(b) $V_f=1\%$

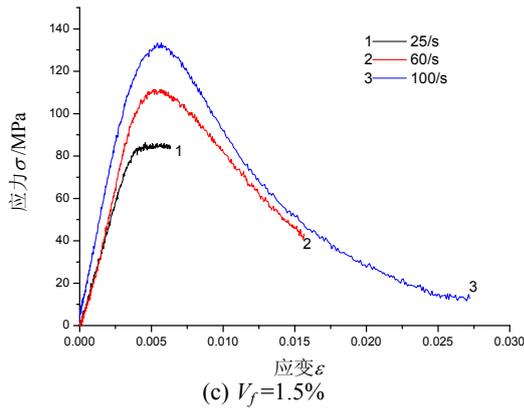


图5 PVA 高强混凝土在不同应变率下的应力-应变曲线汇总

Fig.5 Stress-strain curves of PVA high strength concrete specimens under impact loading with three different strain rate ranges

冲击荷载作用下,对于钢纤维高强混凝土的破坏应力首先表现出明显的应变率增强效应,例如 $V_f=3\%$ 系列 104/s 应变率下的平均破坏应力比 40/s 应变率条件下提高 36%, $V_f=2\%$ 系列 100/s 应变率条件下的平均破坏应力比 40/s 应变率条件下提高 27%。破坏应力随应变率的增加而增加,但二者不是线性关系,随应变率的增加,增强效应有所减弱。

其次在冲击荷载作用下,以 PVA 高强混凝土为例,其峰值应变 ε_{\max} (这里的 ε_{\max} 是指混凝土动态最大破坏应力值所对应的应变值,下同。)同破坏应力一样,表现出较强的应变率效应。从表 2 中看出: PVA 高强混凝土的峰值应变 ε_{\max} 随应变率的增加而增加,大致遵循线性规律变化。这是因为在材料受力过程中, PVA 纤维的存在,使得裂纹形成所需的能量比普通混凝土大很多,又因为冲击荷载加载时间短,材料来不及进行能量积累,只能通过增加应变值的办法达到增加能量的目的,从而促使 ε_{\max} 随应变率的增加而增加,表现出较强的应变率效应。

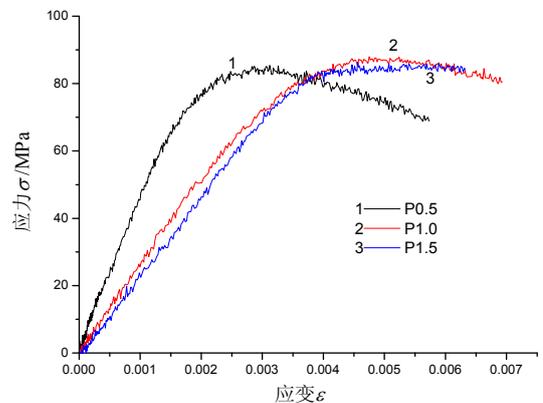
在冲击压缩荷载作用下,3 种 PVA 纤维高强混凝土在应变率为 90/s—100/s 条件下平均应力比应变率为 25/s—40/s 条件下的平均应力分别提高 75%、66%、62%。说明 PVA 纤维高强混凝土也具有较明显的应变率强化效应。

高强混凝土力学性质与其组分配比、施工过程、养护等因素有很大的关系,因此它的力学性能试验数据存在较大的离散性。尽管如此,仍可以从试验结果中看出一些规律性。对于素混凝土、钢纤维高强混凝土和 PVA 纤维混凝土 3 种材料,总体看,随应变率提高,其平均峰值应力有明显提高的

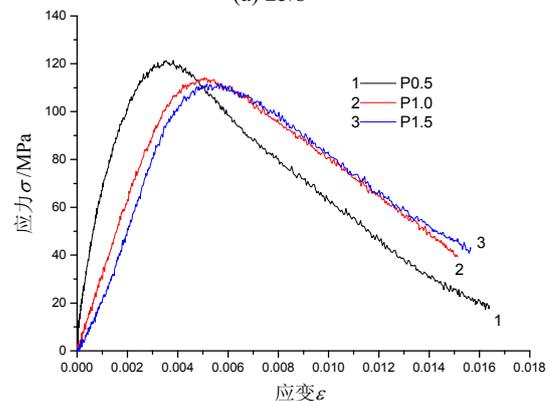
趋势。在应变率为 100/s 情况下,掺入体积率为 3% 的钢纤维高强混凝土的平均峰值应力最高。由此可见,高应变率的情况下,钢纤维高强混凝土的极限抗压强度明显高于素混凝土和 PVA 纤维高强混凝土。

2.2 纤维增强增韧效应

由试验结果可知,在低应变率 25/s 范围内, P0.5、P1、P1.5 的破坏应力基本上一致,但是 P1、P1.5 的破坏应变明显大于 P0.5,而 P1 和 P1.5 的破坏应变基本一致。在应变率 60/s 范围内, P0.5 的破坏应力高于 P1 和 P1.5,但是 P1、P1.5 的破坏应变明显大于 P0.5。在高应变率 100/s 范围内, P0.5 的破坏应力同样高于 P1 和 P1.5,而 P1 和 P1.5 的破坏应变也基本一致,且都大于 P0.5 的破坏应变,如图 6 所示。这说明:在应变率 25/s 范围内, PVA 纤维的含量可以明显的增大混凝土的破坏应变,但随着应变率的提高, PVA 纤维含量的增加,不能进一步增大破坏应变。同时提高 PVA 纤维的含量并不能提高混凝土的破坏应力。由图 7 给出的试验结果,在相同应变率下,钢纤维不仅能提高混凝土的破坏应力,而且可以增大混凝土的破坏应变。并且这种增大作用随纤维含量的增加而提高。这与文献[9]钢纤维超高强混凝土得出结论是一致的。



(a) 25/s



(b) 60/s

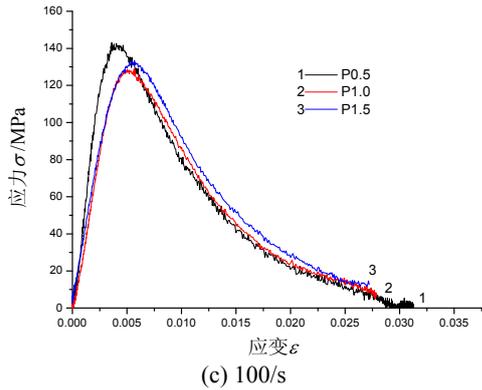
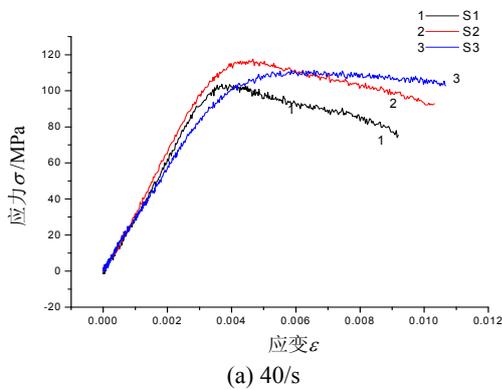
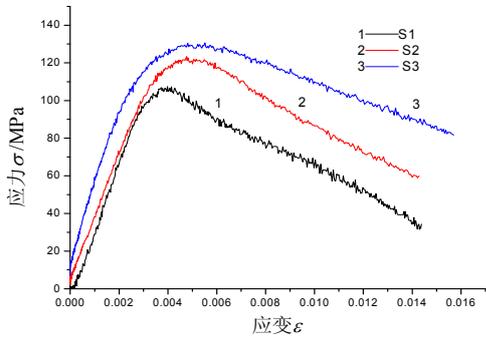


图6 三种纤维掺量的PVA纤维高强混凝土在不同应变率范围下的应力-应变曲线

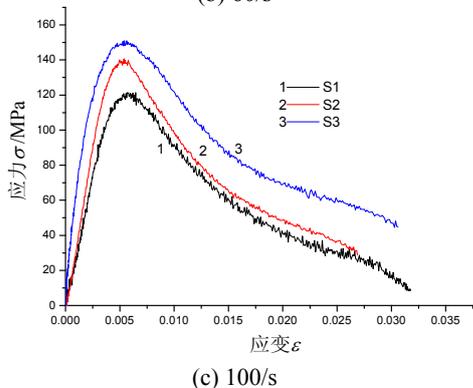
Fig.6 Stress-strain curves of PVA high strength concrete specimens under three different strain rate ranges



(a) 40/s



(b) 60/s



(c) 100/s

图7 三种纤维掺量的钢纤维高强混凝土在不同应变率范围下的应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of steel fiber reinforced high strength concrete specimens under three different strain rate ranges

图6—图7为同一应变率条件下，不同纤维掺量的混凝土试件的应力-应变曲线对比。

2.3 纤维混凝土材料的韧性分析

对于韧性材料，其应力-应变是非线性关系，应力-应变曲线所包围的面积为使材料发生变形破坏所做的功，因此它能够反映材料韧性的多少。为研究纤维混凝土材料的韧性性能，对本次试验 90/s—110/s 应变率条件下各种纤维混凝土材料的应力-应变曲线，分别在 0—0.005、0—0.010、0—0.015、0—0.020、0—0.025 应变范围内计算出了应力-应变曲线与应变轴所围面积 $R_{0.005}$ 、 $R_{0.010}$ 、 $R_{0.015}$ 、 $R_{0.020}$ 、 $R_{0.025}$ (韧性指标^[10])，各计算值列于表3中，各种材料韧性指标的对比如图8所示。

表3 各组材料的韧性指标

Table 3 Tenacity index values of each group

类别	$R_{0.005}$	$R_{0.010}$	$R_{0.015}$	$R_{0.020}$	$R_{0.025}$
S1	0.34	0.89	1.26	1.51	1.69
S2	0.41	1.02	1.41	1.7	1.91
S3	0.53	1.23	1.73	2.12	2.44
P0.5	0.48	1.02	1.33	1.48	1.56
P1.0	0.38	0.93	1.25	1.41	1.50
P1.5	0.39	0.98	1.32	1.52	1.63

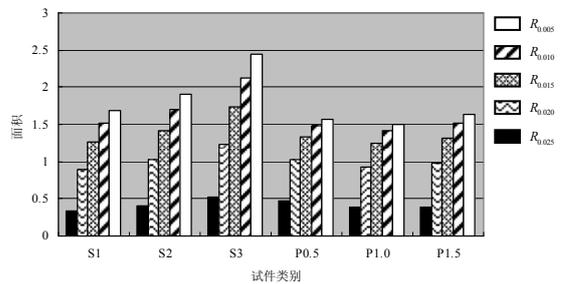


图8 各种纤维混凝土材料韧性指标对比

Fig.8 Comparison histogram of the tenacity indexes of six groups

由表3数据以及图8可以看出，在高应变率条件下，对于三种含量的钢纤维高强混凝土其韧性指标随纤维含量增加明显提高，说明钢纤维含量对于提高高强混凝土耗能能力有明显作用。对于三种含量的PVA纤维高强混凝土，在(0—0.010)低应变范围内，含量 6.5kg/m^3 PVA纤维高强混凝土韧性指标高于含量 13kg/m^3 和 19.5kg/m^3 PVA纤维高强混凝土；在(0—0.015)低应变范围内，各种纤维含量的PVA纤维高强混凝土韧性指标较为接近；在应变范围扩大后，PVA纤维高强混凝土韧性指标才随纤维含量的增加而有提高的趋势。

从6类试件整体情况看，在应变范围较小时，PVA纤维高强混凝土韧性指标要略高于钢纤维高

强混凝土, 而随应变范围增大, 钢纤维高强混凝土韧性指标提高幅度高于 PVA 纤维高强混凝土, 在应变范围较大时, 含量 $234\text{kg}/\text{m}^3$ (掺入体积率 $V_f = 3\%$) 钢纤维高强混凝土韧性指标最高, 含量 $13\text{kg}/\text{m}^3$ PVA 纤维高强混凝土韧性指标最小。

从韧性指标分析结果看, 随应变范围进一步加大, 纤维混凝土的韧性才逐渐得以体现, 这说明钢纤维和 PVA 纤维对混凝土耗能能力主要在达到峰值应力后, 材料开始破坏的过程中得以表现, 由此可见, 在高应变率条件下, 钢纤维高强混凝土随着纤维含量的增加, 韧性指标有明显提高, 纤维对于混凝土材料的增韧效果较明显。同时对于 PVA 纤维高强混凝土, 随纤维含量的增加, 韧性指标无太大差异。此外, 从试件的破坏形式: 高应变率下, 素混凝土、PVA 纤维低含量高强混凝土和钢纤维低含量高强混凝土粉碎破坏, 钢纤维高含量混凝土留芯或裂成块状。这一现象也定性地反映出钢纤维对混凝土的这种增韧效应。但 PVA 纤维高强混凝土与素混凝土完全粉碎破坏形式有所差别, 其中 PVA 纤维高强混凝土呈裂块状, 块与块之间存在大量 PVA 纤维连接, 且有部分试件裂而不散, 但素混凝土完全粉碎。这说明在高应变率下, PVA 纤维对混凝土的增韧效应。低应变率下, 低掺量的 PVA 纤维高强混凝土与低掺量的钢纤维高强混凝土都出现不同程度的周边裂纹, 但裂纹有所区别, 例如, 试件 S1 裂纹较粗大, 而试件 P1 虽然同样破裂, 但裂纹较细, 且有大量纤维连接。这说明低应变率下, 试件刚刚出现裂缝, 并未达到临界破坏状态, 此时 PVA 纤维的增韧效果好于钢纤维。

3 结论

(1) 钢纤维高强混凝土有显著的应变率增强效应; 其破坏应力、峰值应变都随应变率的增大而提高。钢纤维高强混凝土峰值应变与应变率之间大致呈线性关系。

(2) 高应变率的情况下, 钢纤维高强混凝土的极限抗压强度明显高于素混凝土和 PVA 纤维高强混凝土。钢纤维和 PVA 纤维对混凝土吸能能力主要在达到峰值应力后材料开始破坏的过程中得以表现。

(3) 同一纤维含量 PVA 高强混凝土, 其峰值应变随应变率的增加而增加, 大致遵循线性规律变

化。随 PVA 纤维的含量的增加, PVA 纤维高强混凝土的破坏应变逐渐增大。但是当 PVA 纤维含量增加到一定程度时, 不能进一步增大破坏应变。同时 PVA 纤维的含量的增加并不能提高纤维混凝土的强度。

(4) 在纤维混凝土抗冲击试验中, 高应变率下, 钢纤维高强混凝土随着纤维含量的增加, 韧性指标有明显提高, 纤维对于混凝土材料的增韧效果较明显。同时对于 PVA 纤维高强混凝土, 随纤维含量的增加, 韧性指标无太大差异。低应变率下, 低掺量的 PVA 纤维的增韧效果好于低掺量的钢纤维。

参考文献:

- [1] 赵国藩, 彭少明, 黄承逵. 钢纤维混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
Zhao Guofan, Peng Shaoming, Huang Chengkui. Structure of steel fiber reinforced concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese)
- [2] 沈荣熹, 崔琪, 李清海. 新型纤维增强水泥基复合材料[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
Shen Rongxi, Cui Qi, Li Qinghai. New type fiber reinforced cement-based composites materials [M]. Beijing: China Building-Material Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [3] 邓宗才. 高性能合成纤维混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Deng Zongcai. High performance synthetic fiber concrete [M]. Beijing: Sciences Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 王礼立, 王永刚. 应力波在用 SHPB 研究材料动态本构特性中的重要作用[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1): 17—25.
Wang Lili, Wang Yonggang. The important role of stress waves in the study on dynamic constitutive behavior of materials by SHPB [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(1): 17—25. (in Chinese)
- [5] 胡时胜, 王道荣. 冲击荷载下混凝土材料的动态本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 242—246.
Hu Shisheng, Wang Daorong. Dynamic constitutive relation of concrete under impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3): 242—246. (in Chinese)
- [6] 田志敏, 吴华杰, 姜锡权, 阎培渝, 冯建文. 超高性能混凝土 RPC 的抗冲击压缩特性[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(5): 463—469.
Tian Zhimin, Wu Huajie, Jiang Xiquan, Yan Peiyu, Feng Jianwen. Ultra high performance concrete RPC under compressive impact loading [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 8(5): 463—469. (in Chinese)

(参考文献[7]—[10]转第 150 页)

(4) 半刚性连接转动刚度的降低通常会引起结构楼层剪力的减小, 即结构的作用效应减小。

(5) 半刚性节点连接的框架, 其节点滞回曲线呈现梭形且形状比较饱满, 表现出较好的耗能性能。随着节点刚度的降低这种半刚性节点的耗能性能将得到进一步的提高。

参考文献:

- [1] Law S S, Lu Z R. Crack identification in beam from dynamic responses [J]. *Sound Vib*, 2005(4): 967—987.
- [2] Choudhury D, Nimbalkar S. Seismic passive resistance by pseudodynamic method [J]. *Geotechnique*, 2007(9): 699—702.
- [3] Choudhury D, Nimbalkar S. Seismic rotational displacement of gravity walls pseudo-dynamic method: passive case [J]. *Soil. Dyn. Earthquake Eng*, 2008(3): 242—249.
- [4] Lignos D G, Krawinkler H, Whittaker A. Shake table collapse tests of a 4-story moment resisting steel frame [C]. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, 2008: 12—17.
- [5] Fu Feng, Lam Dennis, Ye Jianqiao. Parametric study of semi-rigid composite connections with 3-D finite element approach [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(6): 888—898.
- [6] 完海鹰, 王建国, 王秀喜. 半刚性连接钢框架的拟动力实验研究[J]. *实验力学*, 2009, 24(4): 125—136.

- Wan Haiying, Wang Jianguo, Wang Xiuxi. The pseudo-dynamic test of the semi - rigid connection overall steel frame [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(4): 125—136. (in Chinese)
- [7] JGJ101-96, 建筑抗震实验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- JGJ101-96, *Building seismic experimental methods* [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 1997. (in Chinese)
- [8] 胡文源, 邹晋华. 时程分析法中有关地震波选取的几个注意问题[J]. *南方冶金学院学报*, 2003(4): 98—102.
- Hu Wenyuan, Zou Jinhua. A few questions of seismic records choice for time-travel analyzing method [J]. *Journal of Southern Institute of Metallurgy*, 2003(4): 98—102. (in Chinese)
- [9] 宗周红, 林东欣, 邱法维. 钢管混凝土组合框架结构拟动力抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2002, 23(2): 55—58.
- Zong Zhouhong, Lin Dongxin, Qiu Fawei. Experimental research on seismic behavior of a concrete filled steel tubular composite frame [J]. *Journal of Building Structures*, 2002, 23(2): 55—58. (in Chinese)
- [10] 张波, 盛和泰. ANSYS 有限元数值分析原理与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- Zhang Bo, Sheng Hetai. *ANSYS finite element numerical analysis theory and engineering application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)

(上接第 144 页)

- [7] 孟益平, 胡时胜. 混凝土材料冲击压缩试验中的一些问题[J]. *实验力学*, 2003, 18(1): 106—112.
- Meng Yiping, Hu Shisheng. Some problems in the test of concrete under impact compressive loading [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, 18(1): 106—112. (in Chinese)
- [8] 胡金生, 周早生, 唐德高, 陈向欣. 聚丙烯纤维增强混凝土分离式 Hopkinson 压杆压缩试验研究[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(6): 12—15.
- Hu Jinshen, Zhou Zaosheng, Tang Degao, Chen Xiangxin. Test study of SHPB compression experiment for polypropylene fiber reinforced concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(6): 12—15. (in

- Chinese)
- [9] 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, 23(8): 86—89, 85.
- Jiao Chujie, Sun Wei, Gao Peizheng. Dynamic mechanical properties of steel-fiber reinforced ultra high strength concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(8): 86—89, 85. (in Chinese)
- [10] ASTM. C-1018-98 Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third point loading) [S]. Philadelphia: American Society of Testing and Materials, 1998: 1—7.