

文章编号: 1001-1455(2005)02-0125-07

# 钢纤维高强混凝土冲击压缩的试验研究\*

巫绪涛<sup>1</sup>, 胡时胜<sup>1</sup>, 陈德兴<sup>1,2</sup>, 余泽清<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学中科院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 介绍了利用 $\varnothing 100$  mm SHPB装置获得钢纤维高强混凝土冲击压缩应力-应变曲线的试验研究。同一类试样在静态和动态共4个不同应变率下的试验结果揭示混凝土是应变率敏感材料, 其破坏应变、峰值应变和弹性模量表现出显著的应变率强化效应。从静态和动态压缩下混凝土损伤演化的不同形式对这种应变率强化效应进行了详细讨论。从相近应变率下不同钢纤维含量试样的试验结果中, 发现冲击压缩下钢纤维对混凝土的增强效应随应变率的增大而减弱。从钢纤维对混凝土静态和动态压缩下损伤演化形式的影响, 讨论了钢纤维对混凝土的这种增强效应。

**关键词:** 固体力学; 动态力学性能; 应变率效应; 钢纤维高强混凝土; SHPB技术

**中图分类号:** O347.4

**国标学科代码:** 130·15

**文献标志码:** A

## 1 引言

钢纤维高强混凝土具有抗冲击、抗爆炸、抗侵彻等优良的动力性能, 从普通建筑领域到重要的工程领域(如核电厂、大型水库的大坝、飞机场跑道等)都有广泛的应用。开展钢纤维高强混凝土冲击压缩下力学性能的试验研究, 可以获得其动力特性的客观规律和数值模拟所必须的力学参数, 因此具有重要的理论意义和军事、民用价值。

系统研究混凝土动态力学性能仅20多年, 为开展这方面的研究, 欧美等发达国家已先后建起了 $\varnothing 51$  mm、 $\varnothing 76$  mm和 $\varnothing 100$  mm的SHPB(split Hopkinson pressure bar)试验装置<sup>[1~2]</sup>。J. W. Tedesco等<sup>[1]</sup>利用 $\varnothing 51$  mm SHPB装置对混凝土进行动态试验, 认为混凝土是应变率敏感材料, 而且应变率有临界值, 超过该值, 材料强度对应变率非常敏感, 强度随应变率成线性增长, 文中给出的应变率阈值为 $40\text{ s}^{-1}$ 。胡时胜等<sup>[3~4]</sup>利用自行研发的变截面 $\varnothing 74$  mm SHPB装置进行了混凝土动态力学性能试验, 发现混凝土是应变率敏感材料, 而且其高应变率的敏感性远大于低应变率(准静态试验)的敏感性; 还发现混凝土材料在冲击加载条件下的损伤软化效应十分明显, 并讨论了混凝土材料的损伤演化过程, 给出了损伤演化方程。严少华等<sup>[5~6]</sup>对钢纤维含量为0.3%、6%的高强混凝土进行了静态和冲击压缩试验研究, 结果表明钢纤维增强混凝土的抗压强度和弹性模量与应变率及钢纤维含量有较大关系, 而峰值应变随应变率和钢纤维含量变化很小。但从文献<sup>[5~6]</sup>中给出的应力-应变曲线和试验数据对比可发现, 由于波形振荡和数据处理产生的错误并没有解决。董毓利等<sup>[7]</sup>利用MTS电液伺服试验机对普通素混凝土进行了应变率 $10^{-5}\sim 10^2\text{ s}^{-1}$ 之间的受压全过程试验, 得到混凝土破坏应力和峰值应变随应变率提高而提高、弹性模量基本不变的结论, 给出了较理想的拟合曲线。但文中采用长度、直径分别为110、55 mm的高试样和MTS电液伺服试验机进行混凝土高应变率试验的方法是否可行还需探讨。

总之, 对混凝土动态力学性能的研究尚处于起步阶段, 大多数试验数据离散大, 具有可比较价值的并不多, 关于各力学参数变化规律的争论很大。本文中系统地研究钢纤维高强混凝土冲击压缩下的力学特性。讨论率相关性和钢纤维对混凝土的增强增韧效果。

\* 收稿日期: 2004-06-23; 修回日期: 2004-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(10372097)

作者简介: 巫绪涛(1971—), 男, 博士研究生。

## 2 试验简介

### 2.1 试样制备

冲击压缩试验所用的圆柱形混凝土试样公称尺寸为 $\varnothing 98 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 和 $\varnothing 98 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ,用钢模具浇注而成,圆柱母线方向为浇注方向。试样浇注后经过标准养护,对两端面再进行磨削处理(不平整度 $\leq 0.05 \text{ mm}$ )。试样基体混凝土强度取 C60、C80 和 C100 三种,增强纤维选用长径比为 50 的 15 mm 长扭曲型钢纤维,体积分数  $\varphi_f$  分别为 0、2%、4% 和 6%,采用尺寸 5~8 mm 卵石及碎石作为粗骨料。以 C100 系列为例,具体配合比如表 1 所示。

表 1 C100 钢纤维高强混凝土配合比

Table 1 Mixture of C100 specimen

$\varphi_f / \%$	每立方米混凝土材料用量/kg						
	钢纤维	水泥	粗骨料	砂	水	硅灰	减水剂
0	0	525	1 123	528	145	79	9
2	156	525	1 123	528	145	79	9
4	312	525	1 073	578	145	79	9
6	468	525	991	660	145	79	9

### 2.2 试验设备及方案

冲击压缩试验利用洛阳工程兵三所的 $\varnothing 100 \text{ mm}$  SHPB 装置,该设备为目前国内尺寸最大的 SHPB 装置,尺寸及试验原理简图如图 1 所示。为了比较,还利用该所的 400 t 液压试验机进行了静态试验。由于混凝土类材料的峰值应变只有千分之几,为使应力脉冲在混凝土试样破坏前有足够的来回反射以获得试样内应力的均匀分布,在入射杆的被撞击端加垫了波形整形器(见图 1),它既可消除应力脉冲的波头过冲和波形震荡,又可将上升沿拉长。另外,对于岩石、陶瓷和混凝土等峰值应变很小的脆性材料,试样两端和压杆端面之间不贴合的影响非常明显<sup>[8]</sup>。因此,一方面在试验前每个试样都经过严格打磨处理,表面不平整度控制在 0.05 mm 以内;另一方面在试验中采用万向头技术,即在入射杆(或透射杆)和试样之间加一万向头,以确保混凝土试样两端与压杆端面达到完全贴合的面接触,试样受力均匀,消除了因接触不平给试验带来的误差。

混凝土材料 Hopkinson 压杆试验中的数据处理非常困难,原因在于应力波的波头选取对最终求得的应力-应变曲线影响很大。为减少波头选取的随意性产生的误差,在试样的侧面直接贴应变片,利用实测的试样应变,并采取新的数据处理方法,可较好地求得混凝土材料的应力-应变曲线。上述直接法

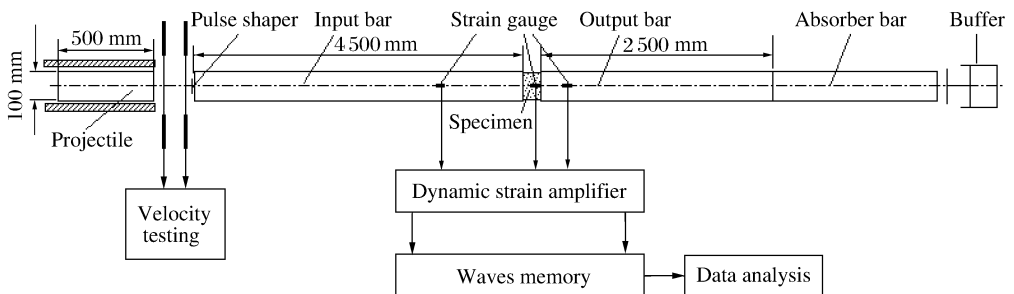


图 1  $\varnothing 100 \text{ mm}$  SHPB 装置

Fig. 1  $\varnothing 100 \text{ mm}$  SHPB setup

与传统的间接法相比,具有更高的可靠性。为了减少试样中各种材料组分的变形差异及表面的空洞、裂缝等对应变片记录信号的影响,在该横截面处均匀地贴两个应变片并进行数据比较与平均。典型的入射杆、透射杆和试样的应变片记录信号如图 2 所示。

### 2.3 试验内容

利用  $\varnothing 100$  mm SHPB 装置对 3 种混凝土基体强度,4 种钢纤维含量的混凝土试样分别进行了静态压缩和 3 个高应变率的冲击压缩试验。每个高应变率各进行 6 次冲击压缩试验,每次试验得到的应力-应变曲线光滑无振荡,且重合性很好。试验结果表明, $\varnothing 100$  mm SHPB 装置及上面提出的技术方案是可行的。静态的进行 3 次压缩试验。典型的应力-应变曲线如图 3 所示,图中的峰值点表明试样材料已进入损伤破坏阶段。图中的动态曲线是六条试验曲线的平均,静态曲线是 3 条试验曲线的平均。图 4 则给出了同一种应变率( $80 \text{ s}^{-1}$ )下 4 种不同钢纤维含量的应力-应变曲线。

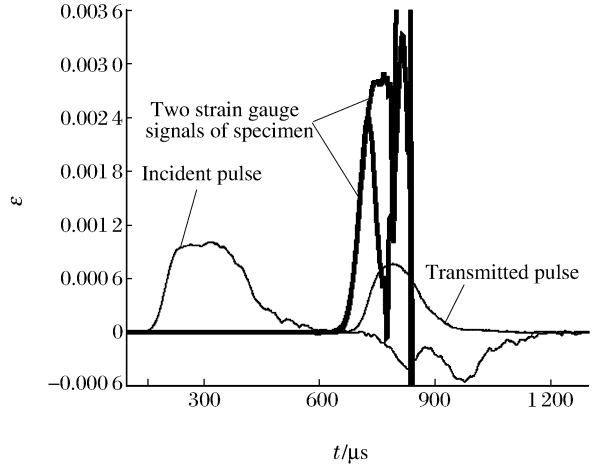


图 2 典型入射杆、透射杆和试样应变片记录信号  
Fig. 2 Typical signals of the strain gauge measured from input bar, output bar and specimen

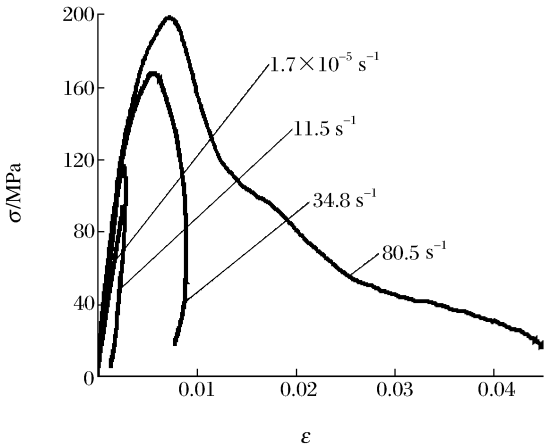


图 3 不同应变率下 C100V4 试样应力-应变曲线  
Fig. 3 Stress-strain curves of C100V4 specimen under different strain rates

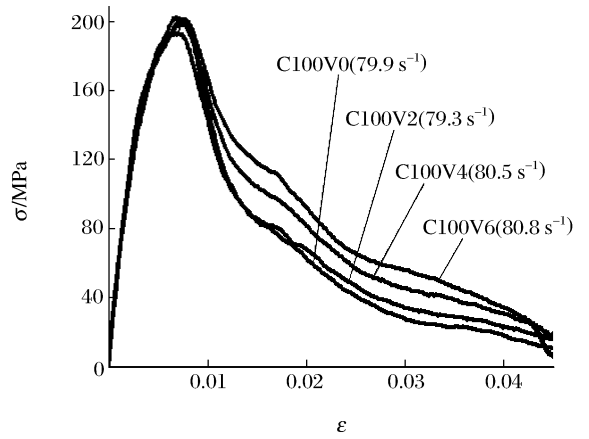


图 4  $80 \text{ s}^{-1}$  应变率下 C100 试样应力-应变曲线  
Fig. 4 Stress-strain curves of C100 specimen under strain rate of  $80 \text{ s}^{-1}$

## 3 分析

### 3.1 应变率效应

冲击载荷作用下,混凝土表现出显著的应变率效应。首先,破坏应力表现出应变率增强效应,如图 5 所示。C80 系列  $80 \text{ s}^{-1}$  应变率下的破坏应力是静态下的 1.6~2.2 倍,C100 系列  $80 \text{ s}^{-1}$  应变率下的破坏应力是静态下的 1.5~2.0 倍。破坏应力随应变率的增加而增加,但不是线性关系,随着应变率的增加,增强效应有所减弱。其次,峰值应变表现出应变率的线性增强效应,如图 6 所示。C80 系列  $80 \text{ s}^{-1}$

应变率下的峰值应变是静态下的 2.0~2.3 倍, C100 系列  $80 \text{ s}^{-1}$  应变率下的峰值应变是静态下的 2.0~2.5 倍。第三, 应力应变曲线初始上升段的弹性模量也有应变率增强效应, 如图 7 所示。

一般应变率敏感的均匀材料在冲击压缩下表现出随应变率提高破坏应力(流动应力)增加而对应的应变减小, 即所谓的“动脆”现象。而混凝土材料的试验结果有所不同, 这是因为, 混凝土材料并不是一般意义的均匀材料, 而是存在大量的微裂纹等缺陷, 因而其破坏受到应变率硬化(动脆)和损伤软化(增韧)两种效应的共同作用结果, 在加载的初始阶段, 损伤较小, 应变率硬化起主导地位, 单轴压缩应力-应变曲线为近似的线性段, 初始弹性模量增大。随着载荷的增加, 损伤演化的加剧, 大量微裂纹的成核和扩展形成损伤过程区, 增加能量耗散, 推迟裂纹的不稳定扩展, 增加了混凝土材料的韧性<sup>[9]</sup>, 单轴压缩应力-应变曲线成为上凸的非线性曲线, 如图 3、4 所示。从图 7 也能发现, 高应变率下混凝土的弹性模量变化剧烈, 应力超过一定范围后, 3 种高应变率下混凝土材料的切线弹性模量相差不大。其次, 静态和动态下混凝土材料的损伤演化的方式显著不同, 在缓慢的加载情况下, 宏观裂纹的萌生来源于缺陷最多的区域——过渡相区, 扩展主要沿集料和砂浆的界面进行, 最终的破坏是由 1 条或数条主裂纹的失稳扩展导致, 而高应变率下, 加载的开始段在集料相、砂浆相和过渡相同时萌生大量的微裂纹, 更有利于提高材料的韧性, 同时, 由于变形的速度很快, 裂纹的扩展也来不及沿最薄弱的界面贯通, 而在各自的区域进

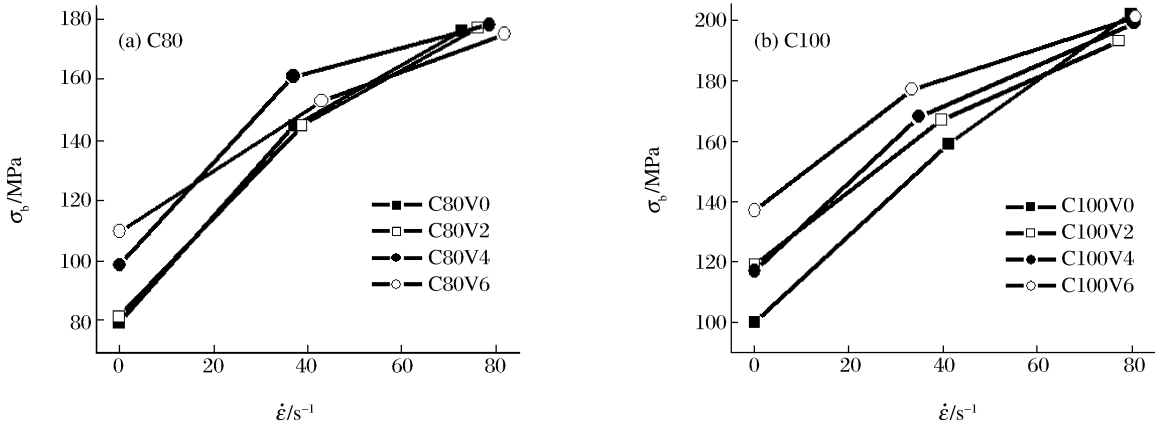


图 5 C80 和 C100 试样破坏应力-应变率曲线

Fig. 5  $\sigma_b-\dot{\epsilon}$  curves of C80 and C100 specimen

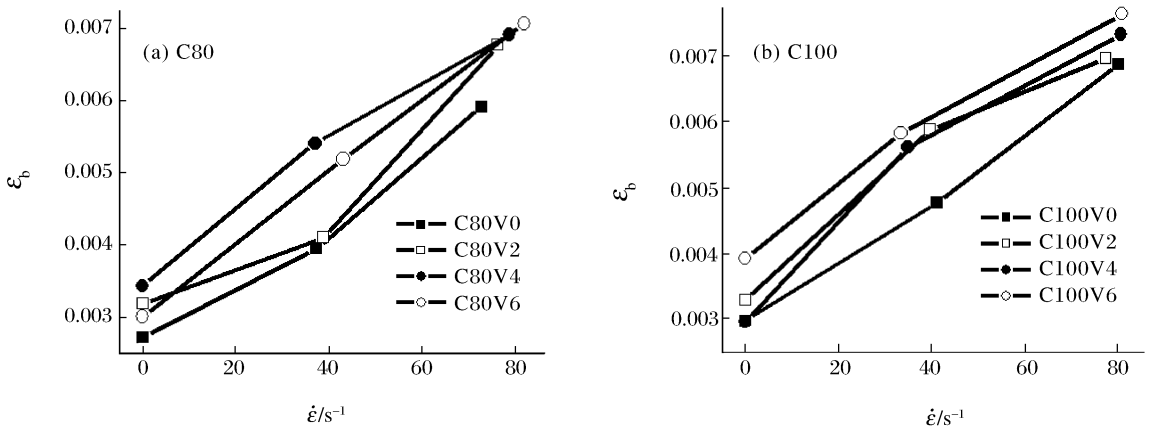


图 6 C80 和 C100 试样峰值应变-应变率曲线

Fig. 6  $\epsilon_b-\dot{\epsilon}$  curves of C80 and C100 specimen

行,从而导致材料的破坏应力和峰值应变的增加。文献[5~6]由于数据处理的原因,得出混凝土弹性模量在不大的应变率范围内增加 4 倍的结论,从而导致计算峰值应变变化不大,同时由于试验波形振荡的影响,基本掩盖了峰值应变的范围,从而很难得到正确数值。文献[7]得到的结论与本文类似,但是在高应变率试验方法上存在缺陷。本文中利用混凝土试样贴应变片测量其应力-应变曲线弹性段,利用传统 SHPB 方法测量应力-应变曲线损伤演化段和卸载段,在试验技术和数据处理两方面保障了试验数据的可靠性。

### 3.2 尺寸效应

在应变率为  $35\sim 45\text{ s}^{-1}$  的情况,对厚度 50 mm 和 40 mm 的 2 种试样进行了对比试验,部分试验结果如表 2 所示。在相近撞击速度下,大部分小厚度试样的应变率高于大厚度试样,而破坏应力相差不大。因此,如果考虑破坏应力的应变率增强效应,可以认为,在相同应变率下小厚度试样的破坏应力低于大厚度试样,而不同厚度试样的峰值应变体现不出这种尺寸效应。

表 2  $35\sim 45\text{ s}^{-1}$  应变率下厚度 40 mm 和 50 mm 试样的  $\sigma_b, \epsilon_b$

Table 2  $\sigma_b, \epsilon_b$  of specimen with thickness of 40 mm and 50 mm under strain rate of  $35\sim 45\text{ s}^{-1}$

混凝土	$\varphi_f/\%$	50 mm			40 mm		
		$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\epsilon_b$	$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\epsilon_b$
C80	0	37.2	145	3 960	37.2	139	4 000
	2	38.8	145	4 110	38.0	146	4 080
	4	37.0	161	5 420	37.8	157	5 444
C100	0	41.1	159	4 770	45.6	158	5 150
	2	39.6	167	5 880	45.1	165	6 670
	4	34.8	168	5 620	49.4	162	6 990
	6	33.4	177	5 830	33.4	184	6 344

### 3.3 钢纤维增强增韧效应

由图 5 可以发现,钢纤维对高强混凝土破坏强度的增强效应突出体现在静态试验中,随钢纤维含量的增加而增强效果增加;但随着应变率的增加,这种增强效果逐渐减弱。对于 C100 试样,静态试验下,含 6% 钢纤维混凝土的破坏应力是素混凝土的 1.37 倍,而在  $80\text{ s}^{-1}$  应变率下,两者破坏应力相同。这种试验现象的产生也是由于静动态下混凝土材料的损伤演化方式不同,混凝土中钢纤维的作用是细化裂纹,减少缺陷,因而更有利于改善静态下主裂纹萌生、沿薄弱界面扩展的损伤演化方式。然而混凝土中钢纤维对于动态下各相区同时产生大量微裂纹并在各自相区同时扩展的损伤演化方式改善有限。

由图 6 可以发现,钢纤维对高强混凝土具有一定的增韧效应,即随着钢纤维含量的增加,峰值应变增加。对于 C100 试样,静态试验下,含 6% 钢纤维混凝土的峰值应变是素混凝土的 1.32 倍,在  $80\text{ s}^{-1}$  应变率下,比值为 1.11。

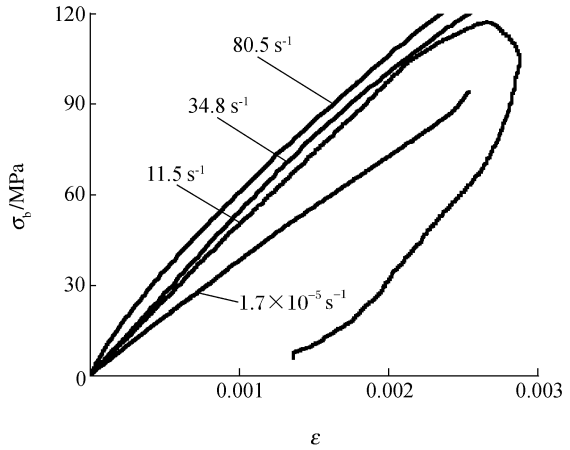


图 7 C100V4 试样应力-应变曲线初始段

Fig. 7 Initial segment of stress-strain curves of C100 specimen



由图 4 可以发现,钢纤维含量的多少对混凝土应力-应变曲线的上升段影响较小,而对下降段的影响较大,随着钢纤维含量的增加下降段趋缓,反映了韧性增加脆性降低的趋势。为了更系统地考察钢纤维的这种增韧效应,采用应力-应变曲线围成的面积——韧度  $R$  来进行衡量。分别计算了峰值应变处的  $R_1$ 、应力下降到反弯点处的  $R_2$ 、应力下降到 3 倍峰值应变残余强度处的  $R_3$ ,如表 3 所示。可以发现两系列峰值应变处的  $R_1$  相差较小,而  $R_2$ 、 $R_3$  的差值依次增大。此外,高应变率下相同基体强度混凝土的破坏形式:素混凝土和钢纤维低含量混凝土粉碎破坏,钢纤维高含量混凝土留芯或碎成块状。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。

表 3 C80 和 C100 试样的韧度  
Table 3 Temper of C80 and C100 specimen

C80				C100			
$\varphi_f/\%$	$R_1/(\text{MJ}/\text{m}^3)$	$R_2/(\text{MJ}/\text{m}^3)$	$R_3/(\text{MJ}/\text{m}^3)$	$\varphi_f/\%$	$R_1/(\text{MJ}/\text{m}^3)$	$R_2/(\text{MJ}/\text{m}^3)$	$R_3/(\text{MJ}/\text{m}^3)$
0	0.711	1.548	2.145	0	0.926	1.852	2.566
2	0.864	1.658	2.514	2	0.955	1.797	2.629
4	0.875	1.673	2.682	4	0.997	2.226	3.083
6	0.901	1.868	3.170	6	1.065	2.616	3.597

## 4 结 论

钢纤维高强混凝土具有较强的应变率效应,由于应变率硬化和损伤软化两种效应共同作用结果以及动静态损伤演化的不同方式造成其破坏应力、峰值应变随应变率增加而显著增加,初始段弹性模量也随应变率的增加而增加。由于损伤演化的方式不同,钢纤维对混凝土的增强效果突出体现在低速加载情况中,随应变率的增加,增强效果减弱。对于本文中试验的试样,在  $80 \text{ s}^{-1}$  应变率下,钢纤维几乎没有增强效果。钢纤维对混凝土具有一定的增韧效应,同一应变率下,峰值应变随钢纤维含量的增加而增加。从应力-应变曲线可以直观地看出钢纤维含量对上升段影响较小,对下降段影响较大,利用韧度  $R$  可以更好地定量分析这种增韧效应。

## 参考文献:

- [1] Tedesco J W, Ross C A, Hughes M L. Load rate effects on concrete compressive strength[A]. Merkle D H. Proceedings of the sixth International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures[C]. Florida, USA, 1993:194-197.
- [2] Bhargava J, Rhrnstrom A. Dynamic strength of polymer modified and fiber-reinforced concrete[J]. Cement & Concrete Research, 1977,7:199-208.
- [3] 胡时胜,王道荣,刘剑飞. 混凝土材料动态力学性能的实验研究[J]. 工程力学, 2001,18(5):115-118.  
HU Shi-sheng, WANG Dao-rong, LIU Jian-fei. Experimental study of dynamic mechanical behavior of concrete [J]. Engineering Mechanics, 2001,18(5):115-118.
- [4] 胡时胜,王道荣. 冲击载荷作用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 Shi-sheng, WANG Dao-rong. Dynamic constitutive relation of concrete under impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(3):242-246.
- [5] 严少华,钱七虎,姜锡全. 超短钢纤维高强混凝土静力与动力抗压特性对比试验及分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2001,(1):33-35.  
YAN Shao-hua, QIAN Qi-hu, JIANG Xi-quan. Contrast and analyze on the coppressive properties of ultra-short steel fiber high-strength concrete under dead loading and dynamic loading[J]. China Concrete and Cement Products, 2001(1):33-35.

- [6] 严少华, 李志成, 王明洋, 等. 高强钢纤维混凝土冲击压缩特性试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 237-241.  
YAN Shao-hua, LI Zhi-cheng, WANG Ming-yang, et al. Dynamic compressive behaviour of high-strength steel fiber reinforced concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3): 237-241.
- [7] 董毓利, 谢和平, 赵鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程的实验研究及其本构模型[J]. 水利学报, 1997, (7): 72-77.  
DONG Yu-li, XIE He-ping, ZHAO Peng. Experimental study and constitutive model on concrete under compression with different strain rate[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, (7): 72-77.
- [8] 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.  
MENT Yi-ping, HU Shi-sheng. Some problems in the test of concrete under impact compressive loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(1): 106-112.
- [9] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 319-325.

## Impact compression experiment of steel fiber reinforced high strength concrete

WU Xu-tao<sup>1\*</sup>, HU Shi-sheng<sup>1</sup>, CHEN De-xing<sup>1,2</sup>, YU Ze-qing<sup>2</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;  
2. General Staff Engineer Third Academe, Luoyang 471023, Henan, China)

**Abstract:** In this paper, the impact compression tests of the stress-strain curves of steel fiber reinforced high strength concrete got by  $\varnothing 100$  mm SHPB setup are introduced. From the compression strength, peak strain and the elastic modulu etc., the effects of strain rate on the impact compression of steel fiber reinforced concrete are discussed with the results of the same specimens under different strain rate. From the compression strength, peak strain and the toughness, the reinforcing effect and toughening effect of steel fiber are discussed.

**Key words:** solid mechanics; dynamic properties; effects of strain rate; steel fiber reinforced high strength concrete; SHPB technique

---

\* Corresponding author: WU Xu-tao  
E-mail address: wuxvtao@sina.net  
Telephone: 0551-3601249