

# 聚丙烯纤维增强混凝土分离式 Hopkinson 压杆压缩试验研究

胡金生      周早生   唐德高      陈向欣

(总参工程兵第四设计研究院)      (解放军理工大学)      (第二炮兵工程设计研究所)

**摘要:** 采用改进后的变截面大尺寸 Hopkinson 压杆, 对直径 62mm 的聚丙烯纤维混凝土和素混凝土试件进行了三种应变率范围的冲击压缩试验, 得到了不同应变率下试件的动态压缩强度及应力应变全过程曲线。结果表明, 在冲击压缩的高应变率加载条件下, 聚丙烯纤维混凝土的破坏强度与素混凝土的大致相同, 但其韧性要明显好于素混凝土。

**关键词:** 分离式 Hopkinson 压杆; 聚丙烯纤维增强混凝土; 动态本构关系

**中图分类号:** O348 TU528.572      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-131X (2004) 06-0012-04

## STUDY OF SHPB COMPRESSION EXPERIMENT FOR POLYPROPYLENE FIBER REINFORCED CONCRETE

*Hu Jinsheng*

(The 4th Engineering Design & Research Institute of Engineer)

*Zhou Zaosheng   Tang Degao*

*Chen Xiangxin*

(People's Liberation Army University of Science and Technology)

(Engineering Design Institute of Second Artillery)

**Abstract:** Using the larg-size improved Hopkinson pressure bar with variable cross-sections, that a shock compression test within three kinds strain rates range of the 62mm diameter plain concrete and polypropylene fiber reinforced concrete specimens have been carried out, then the dynamic compression strengths and the overall-process curves for stress-strain of specimens under different strain rates are obtained. The experimental results indicate that under the shock compression with high strain rate loading condition, The collapsing strength of polypropylene fiber reinforced concrete is roughly same with plain concrete, but the tenacity of polypropylene fiber reinforced concrete is obviously better than plain concrete.

**Keywords:** Split-Hopkinson Pressure-Bar (SHPB); polypropylene fiber reinforced concrete; dynamic constive relation

## 1 引 言

聚丙烯纤维是继尼龙纤维、维纶、涤纶发明后的又一合成高分子材料, 1957 年意大利首先实现了聚丙烯纤维的工业化生产。随着复合材料科学的发展, 聚丙烯纤维开始被运用于土木工程中。1965 年 Gold-fein 建议用聚丙烯纤维作为混凝土的掺合料, 建造美军工兵部队的防爆建筑。他的研究包括在砂浆及水泥净浆中掺入各种天然纤维及人造纤维, 研究结果表明纤维的加入可以明显提高试件的抗冲击性<sup>[1]</sup>。消息的发表给正在进行混凝土中加入聚丙烯薄膜纤维早期试验的谢尔 (Shell) 国际化学有限公司很大鼓舞, 他们把这种材料称为 Caricrete。20 世纪 70 年代美国开始

大力开发丝束相连的膜裂聚丙烯纤维, 用来代替钢筋网片以控制混凝土的收缩。80 年代中期, 美国工兵 ROBERT 工程协会为解决其军事工事的混凝土结构在炮弹、炸弹的轰击下易碎裂的问题, 研制开发了聚丙烯纤维混凝土, 并申请了产品专利, 由美国纤维网公司投入生产并推向全球, 目前已在 60 多个国家和地区推广应用<sup>[2]</sup>。目前, 美国以聚丙烯纤维为主体的合成纤维混凝土的使用量已占混凝土总量的 7%, 数量已远远超过先期开发的钢纤维混凝土 (3%)<sup>[3]</sup>。

我国自 20 世纪 90 年代开始对聚丙烯纤维增强混凝土的特性进行研究, 并且逐渐将其运用于实际工程中。目前多用于道路、水利工程中, 在民用建筑工程中也有少量应用, 将其应用于地下防护工程领域上的实践在我国尚属空白。本文对聚丙烯纤维混凝土、混凝土两种材料试件进行了 SHPB (Split Hopkinson Pres-

sure Bar) 试验, 并对试验结果进行了分析, 其结果对低弹模纤维混凝土结构在高速冲击以及爆炸条件下动力响应等问题的数值模拟研究具有一定意义。

混凝土 SHPB 试验中, 为了保证试件材料的均匀性, 必需使用大杆径的 SHPB 装置。近一二十年来, 欧美等国相继出现了  $\phi 51\text{mm}$ 、 $\phi 76.2\text{mm}$ 、 $\phi 100\text{mm}$  杆径的 SHPB 装置<sup>[4,5]</sup>, 美国的 Jerome 还曾针对建立  $\phi 150\text{mm}$  杆径 SHPB 装置的可行性进行过讨论<sup>[6]</sup>。在国内, 中科院首先于 20 世纪 70 年代末在国内建立 SHPB 装置, 对金属等进行冲击试验; 中国科技大学的胡时胜等人于 1998 年将原  $\phi 37\text{mm}$  装置改进为  $\phi 74\text{mm}$  变截面 SHPB 装置<sup>[7]</sup>, 并与刘剑飞、孙宇新等人对预留间隙、加装波形整形器的试验改进方法进行过研究<sup>[8]</sup>; 总参工程兵第三研究所目前正在对  $\phi 100\text{mm}$  SHPB 装置进行调试研究。本文对  $\phi 74\text{mm}$  变截面 SHPB 装置进行了两点改进, 并首次采用改进后装置进行了试验研究。

## 2 SHPB 装置及其改进

### 2.1 SHPB 装置原理

典型的变截面大尺寸 SHPB 装置的布置简图如图 1 所示。试验时, 高压气体在弹膛迅速膨胀推动子弹 (又称撞击杆) 加速运动, 使其以一定的速度 (速度可由光电转换器测出) 撞击入射杆, 在入射杆中产生入射波  $\epsilon_1$ , 波传播到达试件后在入射杆中产生反射波  $\epsilon_R$ , 透射杆中产生透射波  $\epsilon_T$ 。贴于入射杆和透射杆中部的应变片可以记录入射杆、透射杆中应变随时间变化的曲线, 也就得到试件两端的应力、应变随时间变化的过程, 通过简单的程序计算, 可以反算试件材料的应力-应变关系曲线。

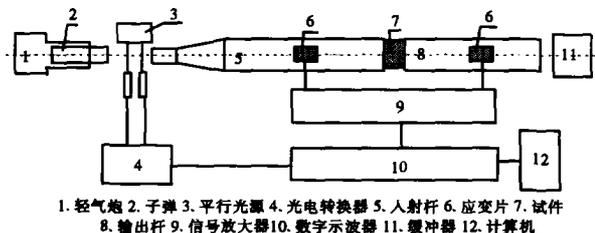


图 1 SHPB 实验装置示意图

Fig.1 Sketch map of SHPB experimental equipment

SHPB 试验技术是建立在两个基本假定基础上的, 一个是—维假定, 另一个是均匀假定。根据—维应力波理论可以确定出试件材料的应变率  $\dot{\epsilon}_S(t)$ 、应变  $\epsilon_S(t)$ 、应力  $\sigma_S(t)$ , 进而可以得到试件材料的动态应力应变关系。根据均匀性假定, 可认为  $\epsilon_1 + \epsilon_R = \epsilon_T$ , 代入应力应变关系式后可得

$$\sigma_S = E \left( \frac{A}{A_S} \right) \epsilon_T \quad (1)$$

$$\epsilon_S = - \frac{2c_0}{l_0} \int_0^t \epsilon_R dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_S = - \frac{2c_0}{l_0} \epsilon_R \quad (3)$$

上式中  $E$ 、 $c_0$ 、 $A$  分别为压杆的弹性模量、波速和横截面积,  $l_0$ 、 $A_S$  分别为试件的厚度和横截面积。

### 2.2 应力不均匀的消除

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。因此, SHPB 试验中入射杆、试件和透射杆的非平面均匀接触将给实验测试带来较大的误差。为了弥补测试系统的这一不足, 进一步提高实验精度, 研制了万向头装置来保证其平面均匀接触, 其装置如图 2 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, 随着放置试件时杆对试件的挤压, 万向头将随之微调, 从而保证入射杆、试件和透射杆的平面均匀接触。试验时, 万向头外还要套上轻质塑料套筒, 以防止试验撞击后万向头被摔坏。

### 2.3 弥散振荡的削减

在入射杆打击端贴附一层柔性介质是减少弥散振荡的有效方法, 为此, 在实验系统调试完成后选用紫铜片, 泡沫铝片, 铝片, 胶布作为柔性材料进行测试, 结果表明三种金属片无法有效削减弥散振荡, 而在入射杆打击端贴上 1~3 层胶布能有效减少弥散振荡。测试结果表明由于滤去了入射波中的部分高频谐波, 贴胶布后的加载波形明显地得到了改善, 波头的弥散振荡显著减小, 波形相对较为平滑。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 试件制作

本次试验共加工圆柱试件 30 个, 采用特制孔径  $\phi 62\text{mm}$  的钢模浇筑, 振动成型, 拆模后试件放入养护室标准养护 28d, 最后对其两个端面进行了打磨。

表 1 试件几何及力学参数

Table 1 Geometrical and mechanical parameters of specimens

试块类别	试件数量	试件尺寸 $d \times h$ (mm)	平均抗压强度 (MPa)
素混凝土	10	62 × 35	49.3
聚丙烯纤维混凝土 (0.6kg/m <sup>3</sup> )	10	62 × 35	54.8
聚丙烯纤维混凝土 (1.2kg/m <sup>3</sup> )	10	62 × 35	60.1

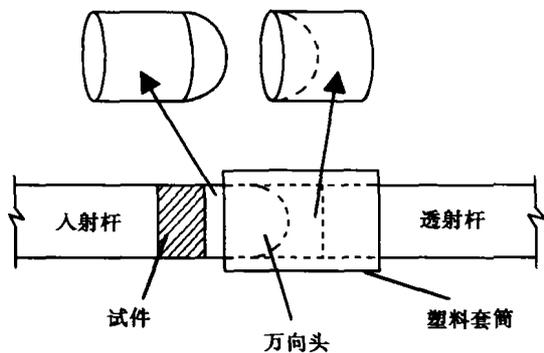


图2 万向头装置示意图

Fig.2 Sketch map of multi-aspect device

每种类型试件中取两个在 MTS 试验机上进行了准静态压缩试验,测得的平均强度如表 1 所示。试件材料情况如下:水泥为江南水泥厂生产的金宁羊 525<sup>#</sup> 水泥;粗骨料为南京白云石矿生产,骨料粒径 5~10mm;减水剂为南京水泥科学院生产;聚丙烯纤维为江苏省丹阳市合成纤维厂生产,平均长度 30mm。

### 3.2 试验结果

图 3 给出了 8 个素混凝土试件的应力应变测试曲线,其中,1~3 号曲线为低应变率组(平均应变率为 25/s),7、8 号曲线为中应变率组(平均应变率为 51/s),4~6 号曲线为高应变率组(平均应变率为 78/s)。从图中可以看出,三种应变率范围的应力应变曲线在总体趋势上保持了很好的一致性。图 4、图 5 给出了平均后不同应变率范围三种材料的应力应变曲线,其应变率平均值、最大应力及其对应的应变如表 2 所示。

表 2 试验结果汇总

Table 2 Sum up of experimental results

试件组材料	应变率 (s <sup>-1</sup> )	最大应力对应的 应变(‰)	最大应力 (MPa)
素混凝土	25	1.2	63.9
素混凝土	51	3.0	110
素混凝土	78	3.6	120
聚丙烯纤维混凝土 (0.6kg/m <sup>3</sup> )	23	1.8	55
聚丙烯纤维混凝土 (0.6kg/m <sup>3</sup> )	47	2.7	93
聚丙烯纤维混凝土 (0.6kg/m <sup>3</sup> )	98	5.3	107.2
聚丙烯纤维混凝土 (1.2kg/m <sup>3</sup> )	28	1.3	64.5
聚丙烯纤维混凝土 (1.2kg/m <sup>3</sup> )	51	3.1	110
聚丙烯纤维混凝土 (1.2kg/m <sup>3</sup> )	82	4.9	122

由表 1、表 2 可以看出,与准静态试验压缩强度相比,素混凝土试件三种应变率下压缩应力峰值分别

提高了 29.6%、123.1% 和 143.4%, 0.6kg/m<sup>3</sup> 的聚丙烯纤维混凝土试件提高了 0.36%、69.7% 和 95.6%, 而 1.2kg/m<sup>3</sup> 的聚丙烯纤维混凝土试件则分别提高了 7.3%、83% 和 103%, 由此可见从破坏强度的应变率敏感性看,素混凝土要强于聚丙烯纤维混凝土。在准静态加载情况下,聚丙烯纤维混凝土破坏强度要大于素混凝土破坏强度,在动载下,随应变率的提高,素混凝土破坏强度的提高幅度要大于聚丙烯纤维混凝土,在 78s<sup>-1</sup>~98s<sup>-1</sup> 范围的应变率下,素混凝土与聚丙烯纤维混凝土的破坏强度大致相同。

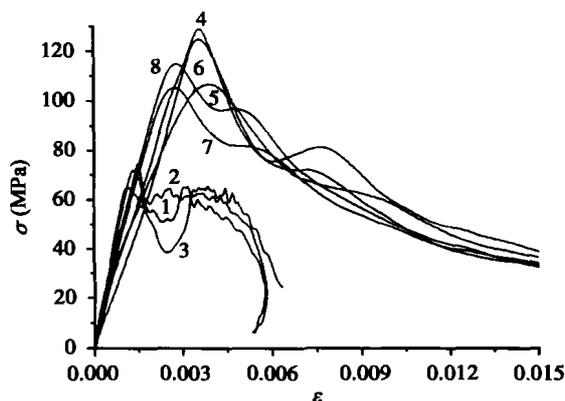


图 3 素混凝土试件应力应变测试曲线

Fig.3 Tested stress-strain curves of plain concrete specimens

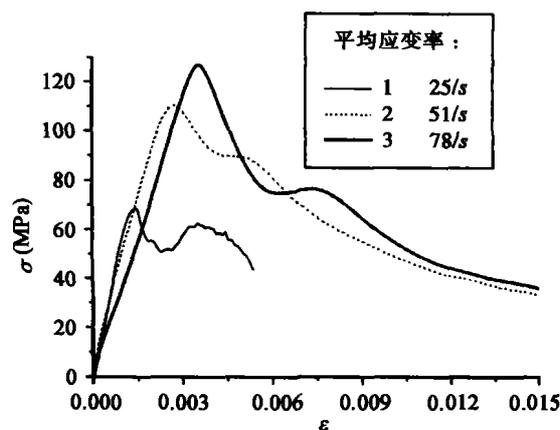


图 4 平均后的素混凝土试件应力应变曲线

Fig.4 Averaged stress-strain curves of plain concrete specimens

由表 2 还可以看出,在 78s<sup>-1</sup>~98s<sup>-1</sup> 范围的应变率下,素混凝土试件的平均破坏应变为 3.6‰,而两种含量的聚丙烯纤维混凝土试件的平均破坏应变分别为 5.3‰ 和 4.9‰,比素混凝土试件分别提高了 47.2% 和 36.1%。此外,由图 4~图 6 中高应变率的三条应力应变曲线还能看出,素混凝土在达到峰值应变后的曲线段较为陡峭,而聚丙烯混凝土的则相对平缓。由此可见,聚丙烯纤维的加入能够有效增加混凝土的变形能力,并且在一定程度上减轻其破坏的脆

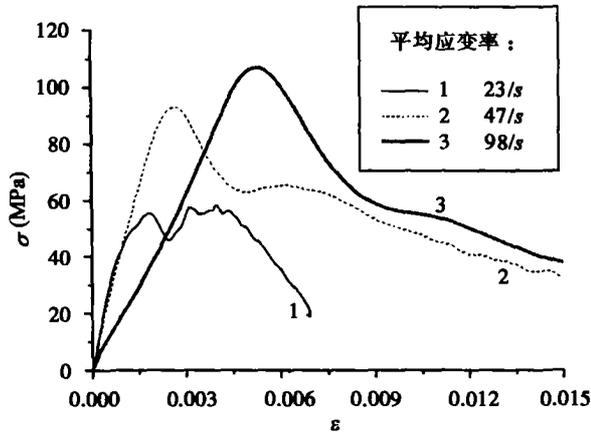


图 5 平均后的聚丙烯纤维混凝土  
( $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ ) 试件应力应变曲线

Fig.5 Averaged stress-strain curves of polypropylene  
fiber reinforced concrete ( $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ ) specimens

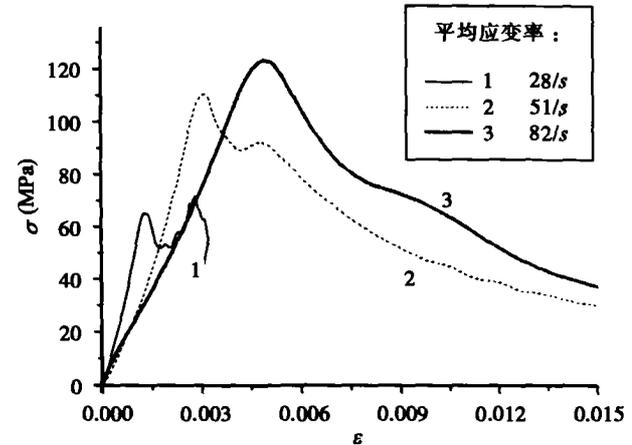


图 6 平均后的聚丙烯纤维混凝土  
( $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ ) 试件应力应变曲线

Fig.6 Averaged stress-strain curves of polypropylene  
fiber reinforced concrete ( $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ ) specimens

性,从而提高其韧性。

#### 4 结束语

混凝土材料的破坏应变仅为 0.3% 左右, SHPB 试验中当载荷较高,作用时间较短时,试件常常在波未经历一个来回就已经破坏,其应力均匀性假定很难满足。因此,利用 SHPB 试验技术得到较高应变率下的混凝土  $\sigma - \epsilon$  曲线,其初始段的可信度并不高,有鉴于此,本文讨论范畴没有涉及到动态弹性模量。

此外,混凝土 SHPB 试验中大杆带来的弥散升时以及混凝土试件的平整度与脆性导致的试件应力不均匀问题均限制了试验应变率的提高,并使得试验存在一定误差。如何解决以上问题以进行更高应变率试验仍是今后要进一步研究的课题。

#### 参考文献

[1] 冷发光,邢锋等.合成纤维增强混凝土的特性及其在工程中的应用[J].混凝土与水泥制品,2001,4(2):167~173

- [2] 陈锋.聚丙烯纤维喷混凝土在黎南复线的试验应用[J].西部探矿工程,2001(3):3~5
- [3] 谷章昭,倪梦象等.合成纤维混凝土的性能及其工程应用[J].建筑材料学报,1999,2(2):159~162
- [4] Ross C A, Thompson P Y, Tedesco J W. Split-Hopkinson Pressure-Bar tests on concrete and mortar in tension and compression[J].ACI Material Journal.1989,86(5):475~481
- [5] Pullen A D, Sheridan A J, Newman J B. Dynamic Compressive Behavior of Concrete at Strains Rates up to 103/s - Comparison of Physical Experiments with Hydrocode Simulations [C]. Proceedings of the Sixth International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures, Florida, 1993:182~187
- [6] Jerome E L. Feasibility of a 6 - inch Split Hopkinson Pressure Bar [C]. AD - A243473, 1991
- [7] 刘孝敏,胡时胜.应力波在变截面 SHPB 锥杆中的传播特性[J].爆炸与冲击,2000,20(2):110~114
- [8] 孙宇新.混凝土抗贯穿问题研究[D].合肥:中国科技大学,2002

胡金生 工学博士,主要从事地下结构抗常规武器破坏效应方向的研究工作,参与了多项军队科研项目。通讯地址:100850 北京太平路 24 号 总参工程兵第四设计研究院

周早生 教授,博士生导师,政府特殊津贴获得者,长期从事防护工程、岩土工程、计算力学方向的科研及教学工作,主持开发了我国大型岩土工程非线性静、动力响应有限元数值计算软件 RSEAP,主持、参加了军队和地方项目 20 多项,获军队科技进步一等奖 1 项,二等奖 6 项,三等奖 1 项,发表学术论文近百篇。

唐德高 教授,博士生导师,主要从事防灾减灾及防护工程方向的研究工作,主持参与了多项军队科研项目。

陈向欣 高级工程师,第二炮兵工程设计研究所副总工程师,主要从事防护工程科研及设计工作。