

# 钢纤维高强混凝土材料的气体炮试验研究\*

蒋国平<sup>†</sup> 浣石 郝洪 杜永峰 焦楚杰

(广州大学工程抗震中心, 广州 510405)

(2012 年 7 月 3 日收到; 2012 年 8 月 10 日收到修改稿)

采用一级气炮设备对 C100 钢纤维混凝土进行了高应变率冲击压缩实验, 对一维应变状态下的混凝土冲击特性进行了分析. 试验中采用锰铜压力计测量得到了混凝土中不同拉格朗日位置处的压力波形, 利用拉格朗日分析得到了应力应变曲线, 冲击波峰值随传播距离而衰减, 在钢纤维混凝土中衰减较慢. 分析探讨了钢纤维对混凝土的增强作用.

**关键词:** 冲击, 高强混凝土, 气体炮, 钢纤维

**PACS:** 62.50.-P, 62.20.-x, 81.70.Bt

**DOI:** 10.7498/aps.62.016201

## 1 引言

由于防护工程的首要考虑因素是在爆炸、冲击、侵彻等高应变率荷载作用下材料与结构的性能特点<sup>[1-8]</sup>, 因此, 目前防护工程应用最广泛的是高强混凝土. 然而, 混凝土的脆性较大, 高强混凝土的脆性更大, 限制了其在防护工程中的应用, 因此, 对改性混凝土本身的改性技术及其动态特性的研究将是今后的一个热点. 目前对高强混凝土最主要的改性手段就是采用钢纤维混凝土. 研究钢纤维混凝土 (steel fiber reinforced high strength concrete, SFRHSC) 在高应变率下的冲击性能, 对于建筑物的抗爆设计, 降低建筑物抗爆加固的成本, 提高重要建筑物防御意外爆炸、恐怖袭击和战争打击的能力, 具有重要的理论意义与广泛的应用前景. 分离式霍普金森压杆 (SHPB) 试验中的应变率较低, 属于中应变率, 对于较高的应变率, 通常要用到气体炮试验, 气体炮试验能达到很高的应变速率. 因此, 近年来许多学者都对混凝土材料进行了气体炮试验研究, 王永刚等<sup>[1]</sup> 利用气体炮对 C30 混凝土进行试验, 严少华等<sup>[3]</sup> 利用气体炮对钢纤维高强混凝土进行试验, 蒋国平等<sup>[5]</sup> 对高强混凝土进

行了研究, 并得到了其高压状态方程. 然而, 钢纤维的增强机理仍然不明确, 学术争论一直存在. 本文采用一级气体炮装置, 利用同一弹速对纤维体积率为 0 与 5% 的 C100 级混凝土进行了高应变率冲击压缩试验, 研究 SFRHSC 的动态效应, 分析其动态力学响应, 为防护工程的设计、计算与数值模拟提供依据.

## 2 试验材料与装置

### 2.1 原材料与配合比

原材料: 水泥、粉煤灰、硅灰、钢纤维、河砂、玄武岩碎石 (5—10 mm 连续级配)、Sika 减水剂. 其中, C100V0 表示 C100 级基体混凝土, C100V5 表示基体为 C100,  $v_f$  (纤维体积含量) 为 5% 的 SFRHSC. 配合比见表 1.

试件尺寸为  $\phi 90 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  的 4 个组合靶片, 混凝土采用钢模具浇注, 在试件养护 28 d 后, 将试件切割成厚度为 8 mm 的混凝土片, 再对两个端面进行磨床精密磨削加工, 使其表面不平度小于 0.1 mm.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51078094) 和广州市白云区科技计划项目 (批准号: 2012-KZ-58) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: lp2002999@yahoo.com.cn

表 1 混凝土配合比

| 命名 | 钢纤维/% | 水泥/% | 粉煤灰/% | 硅灰/% | 胶砂比   | 水灰比  | 水胶比   | 外加剂/% |
|----|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| V0 | 0     | 55   | 35    | 10   | 1:1.2 | 0.30 | 0.165 | 5.0   |
| V5 | 5     | 55   | 35    | 10   | 1:1.2 | 0.30 | 0.165 | 5.5   |

2.2 试验装置与原理

试验装置见图 1. 抽真空后, 将高压气体的突然释放、弹丸在高压气体的推动下沿真空的炮管运动进行加速; 在靶板处, 弹丸与靶板进行高速碰撞; 锰铜压阻传感器记录一组压力脉冲, 利用锰铜压阻传感器的特性, 将电压信号转化为压力信号, 得到压力时程曲线.

对于试验而言, 在量计的测量范围内要满足两个条件: 1) 冲击波是平面波; 2) 冲击波是均匀的 (波阵面后参量不随时间及距离变化). 因此在设计试件和靶板时, 必须考虑它们的宽厚比和追赶比, 以

消除边侧稀疏效应和追赶稀疏波的影响. 其原理和过程如下.

1) 试件宽厚比的估计 (侧向稀疏影响范围)

当一个平面冲击波进入靶板之后, 由于实际靶板的横向尺寸不可能无限大, 因此, 在靶板边侧自由面上将发生侧向膨胀现象 (因为在傍侧自由面上要保持压力为零的界面压力连续). 侧向膨胀现象对靶板的平面冲击波是一个稀疏干扰, 它将以声速向靶板内部传播, 在它到达的范围内, 会导致冲击波强度的衰减, 并使得原来的平面冲击波阵面变弯曲. 显而易见, 测量用的锰铜压阻计所在的区间应悬在边侧稀疏波未到达的平面波区间内.

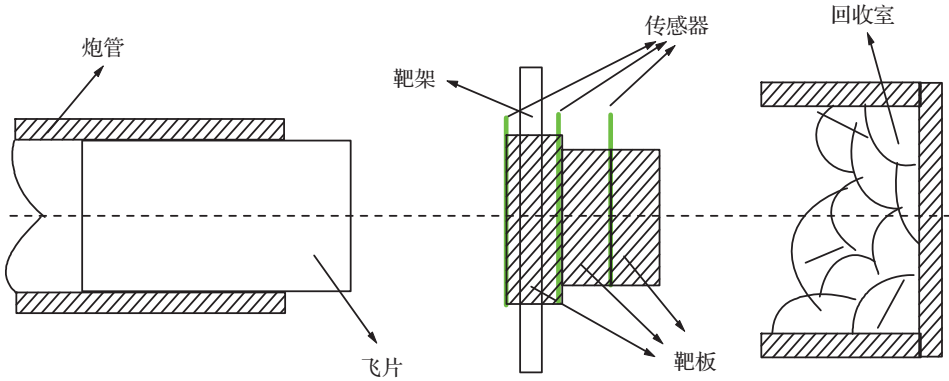


图 1 试验装置

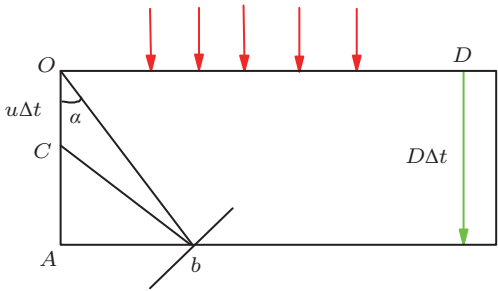


图 2 侧向稀疏示意图

稀疏扰动相对于物质以声速传播, 而冲击波阵面后的  $u + c > D$ , 所以冲击波阵面后的任何稀疏扰动都将赶上冲击波阵面, 并引起冲击波强度下降. 靶板中侧向稀疏扰动的影响范围如图 2 所示. Ob

线及其延长线就是冲击波传播过程中侧向稀疏扰动的影响边界. OA 线与 Ob 线的夹角  $\alpha$  称为卸载角. 显然, 在卸载角的范围内不应该放置锰铜传感器.

2) 追赶比 (追逐稀疏波的影响)

飞片与靶碰撞后, 飞片内传播的冲击波到达飞片后界面时, 又将反射一个中心稀疏波. 这个中心稀疏波传入靶内, 最终将赶上靶内的冲击波阵面, 并引起该冲击波强度的下降. 显然, 测量靶材料中冲击波速度的探针应该布置在中心稀疏波波头尚未赶上靶中冲击波阵面的距离上. 本次实验选取的飞片厚度为 10 mm, 而前 3 片靶片的总厚度只有 24 mm, 这个条件很容易满足.

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 实验曲线

试验采用了组合靶板(图3). 根据气体炮的弹速与气室压力曲线关系, 可以控制弹速, 于是得到了弹速在 325 m/s 下的混凝土中的压力时程曲线(图4, 图5). B, D, F 分别表示拉氏位置为 0, 8, 16 mm 位置的混凝土中的压力时程曲线, 实验照片见图6.



图3 组合靶板

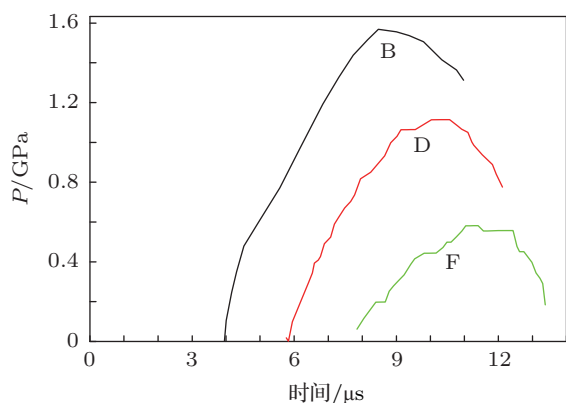


图4 C100V0 混凝土试验曲线

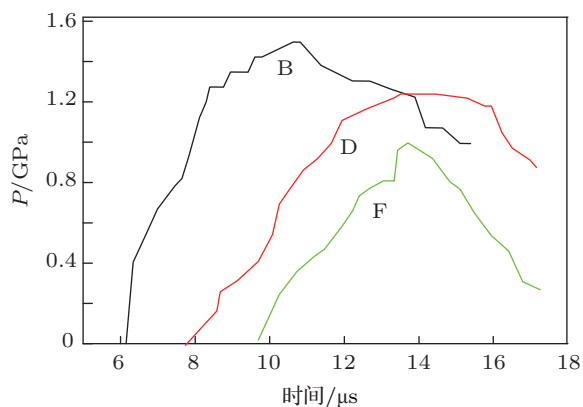


图5 C100V5 混凝土试验曲线

#### 3.2 SFRHSC 的压力时程曲线与应力应变关系分析

根据图4和图5混凝土中的压力时程曲线, 描绘出不同位置处的压力峰值曲线(图7). 试验结果表明, 在冲击的初始阶段, 两种压力峰值几乎是相等的, 只是随着冲击波的传播, 钢纤维混凝土的压力衰减明显要少于不含钢纤维的混凝土.

实例计算表明, 冲击作用下混凝土会出现裂缝, 而裂缝的分布具有分形的统计自相似性, 如肖波齐等[2,4,6,9,10]用分形理论计算流体进行了大量开拓性工作, 取得了一系列重大进展. 同时, 冲击作用下 SFRHSC 不同的拉格朗日应力与应变关系是研究 SFRHSC 本构关系的基础, 然而, 气体炮试验中, 不同的拉格朗日应力与应变关系曲线不是简单地就可以得到的. 通常的办法是对拉格朗日应力时程曲线进行拉格朗日分析[9-17], 得到应变时程曲线, 然后与应力时程曲线约去时间, 得到应力与应变关系曲线(图8), 其中实线部分为 C100V0 在拉格朗日位置 0, 8, 16 mm 位置处的应力应变关系曲线, 虚线部分为 C100V5 在拉格朗日位置 0, 8, 16 mm 位置处的应力应变关系曲线.

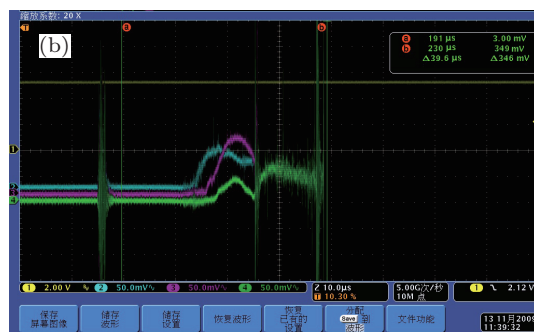
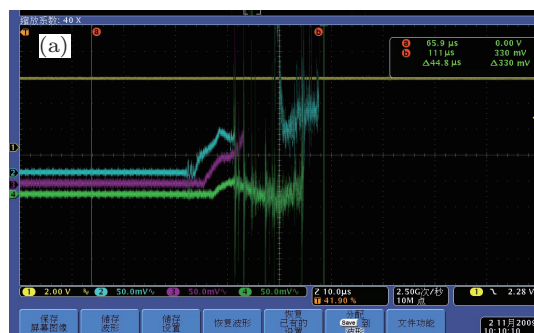


图6 波形照片 (a) C100V0; (b) C100V5

从图8可以看出, 同一拉格朗日位置处的应力峰值对应的应变增大, 只是由于冲击波的衰减, 在

较远处不是很明显.

现已公认混凝土材料在静载荷与动载荷下性能截然不同. 混凝土材料的强度和模量在某一应变率范围之上会随着动态加载速率的增加而迅速提高, 并且增加的比例视受拉和受压等受力方式不同而有所区别. 通常定义动态强度放大因子 (DIF) 来定量描述这种强度增长程度.

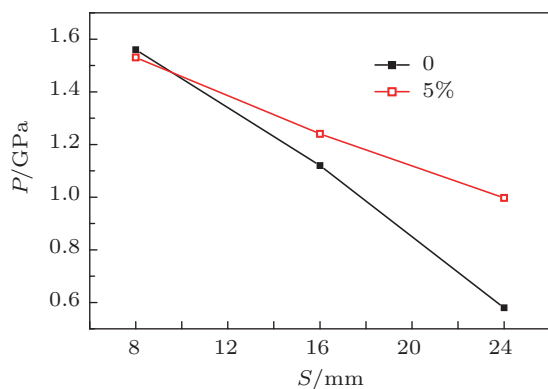


图7 不同拉格朗日位置压力峰值曲线

为了克服试件中应力波传播和轴向惯性力效应的影响, SHPB 实验装置通常被用来进行材料动态本构关系的研究, 因为该装置的原理和构造特点可以忽略试件中的应力波传播效应并且采用平均

应力 - 应变 (直接测量输入杆和输出杆应变) 来研究实验对象的应变率效应. 在其他的高速冲击实验条件下, 例如落锤实验, 轴向惯性力和应力波传播效应或者被无法确保精度的主观忽略或者只能对其做近似处理, 目前还没有文献论及关于此类实验方法在处理实验结果方面具有合理客观的解释或者给出系统且量化的评价方法, 因此关注更多的仍然是 SHPB 实验. 然而, SHPB 实验的应变率较低, 对于高应变率问题 [6-10], 仍然需要通过气体炮试验.

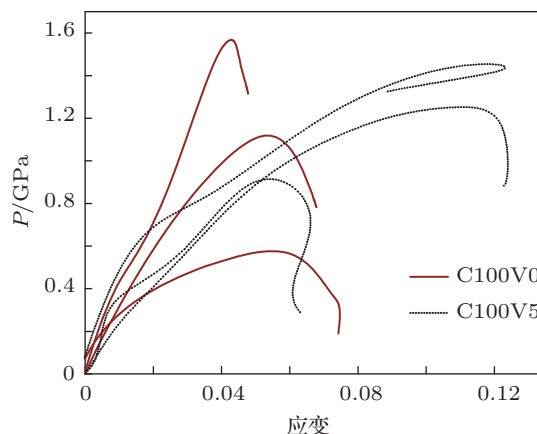


图8 混凝土应力与应变关系曲线

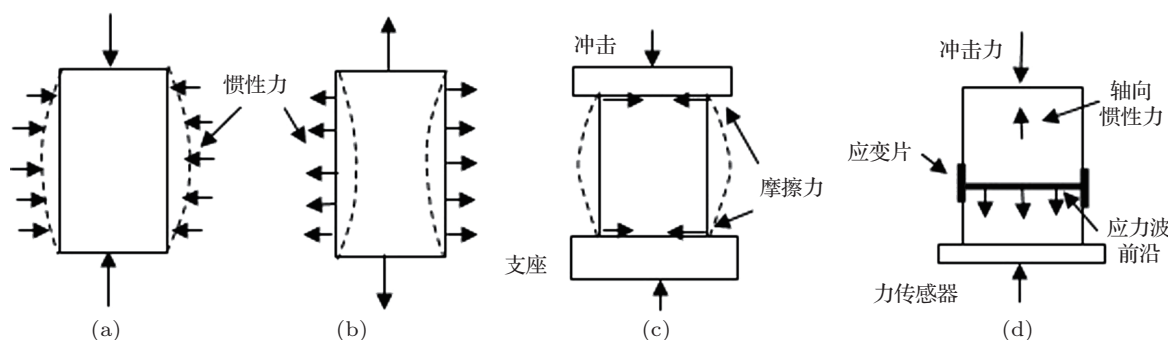


图9 材料的动态效应机理 (a) 轴向压缩时的横向惯性约束; (b) 轴向拉伸时的横向惯性约束; (c) 边缘摩擦效应; (d) 轴向惯性和应力波传播示意图

材料的动态效应机理, 主要有下面几种 (见图9), 混凝土材料的动态强度究竟是一种材料特性还是一种结构效应? 目前尚无定论. 通过其增强机理, 动态效应可以由材料增强得到, 同时也可以由材料的尺寸效应得到. 本实验得到的动态效应, 其机理可以由图 6(a) 进行解释, 钢纤维的加入增加了横向惯性约束效应. 图 7 和图 8 的压力衰减表明, 虽然在试验中考虑了侧向稀疏、追赶比等因素, 由于混凝土本身就是具有许多的微裂纹与微孔洞, 侧向稀疏还是使得压力随着时间快速减少, 钢纤维的加入,

对混凝土的抗冲击阻抗影响并不大, 使得两种混凝土在撞击初始压力基本相同. 然而, 与静态单向受压不同的是, 在冲击作用下, 由于惯性作用, 试件中间部位的侧向变形受到了限制, 压缩进行的过程中, 限制作用越来越大, 同时, 轴向冲击压缩还将引起环向膨胀, 试件母线方向的裂缝迅速产生并增宽、延长与贯通, 并且导致试件破坏; 三向分布的钢纤维将基体紧紧揽系住, 减少了环向膨胀裂纹的产生, 并阻碍其快速扩展, 从而使试件在轴向产生更大压缩, 也就使试件在相同拉格朗日位置压力峰值增加.

由图 7 和图 8 可见, 在压力卸载阶段, C100V5 明显要比 C100V0 下降得慢, 表明了纤维在卸载阶段的阻裂作用非常明显.

## 4 结 论

1) 混凝土均存在一定的孔隙度, 受压缩时会产生复杂的非线性力学性能, 混凝土在静态压缩时存在一个压紧的平台阶段, 这个平台对混凝土的性能至关重要, 而在动态压缩中这个现象也存在, 由压

力时程曲线可以看出, 此时, 平台退化为一个拐点, 设计较厚靶片能较好地研究冲击作用下的压缩阶段.

2) 本文通过一级气体炮加载, 得到了高应变率下混凝土中的时程曲线, 通过拉格朗日分析, 得到了混凝土应力与应变关系曲线, 比较得到了钢纤维的加入对相同拉格朗日位置处的应力峰值的影响, 分析了钢纤维对混凝土的增强作用.

3) 研究了钢纤维的加入对混凝土材料的动态效应的影响, 对动态效应的机理进行了探讨.

- 
- [1] Wang Y G, Zhang Y P, Wang L L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7789 (in Chinese) [王永刚, 张远平, 王礼立 2008 物理学报 **57** 7789]
  - [2] Xiao B Q, Yu B M, Wang Z C 2008 *Fractals* **16** 1
  - [3] Yan S H, Qian Q H, Zhou Z S 2000 *Journal of PLA University of Science and Technology* **1** 49 (in Chinese) [严少华, 钱七虎, 周早生 2000 解放军理工大学学报 **1** 49]
  - [4] Xiao B Q, Yu B M, Wang Z C, Chen L X 2009 *Phys. Letts. A* **373** 4178
  - [5] Jiang G P, Jiao C J, Xiao B Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 026701 (in Chinese) [蒋国平, 焦楚杰, 肖波齐 2012 物理学报 **61** 026701]
  - [6] Xiao B Q, Fan J T, Jiang G P, Chen L X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 154401 (in Chinese) [肖波齐, 范金土, 蒋国平, 陈玲霞 2012 物理学报 **61** 154401]
  - [7] Liu H F, Ning J G 2009 *Mechanics of Materials* **41** 1298
  - [8] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H 1993 *Proc. 14th Int. Symp. Ballistics* (Netherlands: American Defense Preparedness Association) p591
  - [9] Xiao B Q, Gao S H, Chen L X 2010 *Fractals* **18** 409
  - [10] Xiao B Q, Jiang G P, Chen L X 2010 *Sci. China G: Physics Mechanics, Astronomy* **53** 30
  - [11] Grady D 1996 *Computational Mechanics, Botton (Structures under Shock and Impact IV)* pp405–414
  - [12] Ji S Y, Li P F, Chen X D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184703 (in Chinese) [季顺迎, 李鹏飞, 陈晓东 2012 物理学报 **61** 184703]
  - [13] Yu Y, Wang W Q, Yang J, Zhang Y J, Jiang D D, He H L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 048103 (in Chinese) [喻寅, 王文强, 杨佳, 张友君, 蒋冬冬, 贺红亮 2012 物理学报 **61** 048103]
  - [14] Xiao B Q 2010 *Mod. Phys. Lett. B* **24** 1229
  - [15] Wang F, Peng X S, Mei L S, Liu S Y, Jiang X H, Ding Y K 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 0135201 (in Chinese) [王峰, 彭晓世, 梅鲁生, 刘慎业, 蒋小华, 丁永坤 2012 物理学报 **61** 0135201]
  - [16] Zhao X T, Li J Y, Li S T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 0153103 (in Chinese) [赵学童, 李建英, 李盛涛 2012 物理学报 **61** 0153103]
  - [17] Xiao B Q, Wang Z C, Jiang G P, Chen L X, Wei M J, Rao L Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2523 (in Chinese) [肖波齐, 王宗簏, 蒋国平, 陈玲霞, 魏茂金, 饶连周 2009 物理学报 **58** 2523]

# Performance of steel reinforced high strength concrete investigated in the gas gun experiment\*

Jiang Guo-Ping<sup>†</sup> Huan Shi Hao Hong Du Yong-Feng Jiao Chu-Jie

(*Earthquake Engineering Research Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China*)

(Received 3 July 2012; revised manuscript received 10 August 2012)

## Abstract

The shock properties of C100 concrete are investigated by gas gun planar impact technique. The manganin pressure gauge is used to measure the pressure-time curves of the samples. The physical quantities are all obtained by the Lagrange method. Moreover, it is observed from the measured pressure-time curves that the decay factor is smaller in the steel reinforced high strength concrete. The dynamic response is analyzed.

**Keywords:** impact, high strength concrete, gas gun, steel fiber

**PACS:** 62.50.-P, 62.20.-x, 81.70.Bt

**DOI:** 10.7498/aps.62.016201

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51078094) and the Science and Technology Project of Baiyun District, Guangzhou, China (Grant No. 2012-KZ-58).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: lp2002999@yahoo.com.cn