

文章编号: 1001-1455(2008)06-0532-07

# 活性粉末混凝土在多次冲击荷载下的力学行为<sup>\*</sup>

赖建中<sup>1,3</sup>, 孙 伟<sup>2,3</sup>, 戎志丹<sup>2,3</sup>

(1. 南京理工大学材料科学与工程系, 江苏 南京 210094;

2. 东南大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189;

3. 江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 采用 60% 的超细工业废渣取代水泥制备了抗压强度达 200 MPa 的生态型活性粉末混凝土 (RPC), 采用分离式霍普金森压杆装置对不同纤维掺量的 RPC 材料进行了 4 种方式的多次冲击压缩实验。定义了材料多次冲击压缩标准化强度, 揭示了冲击次数、冲击方式、纤维掺量对材料抗多次冲击性能的影响规律。研究表明随着纤维掺量的提高, 材料抗多次冲击的能力不断提高。随着冲击次数的增加, 材料的损伤程度不断增大, 标准化强度不断下降。随着冲击方式的改变, 材料首次冲击的损伤增加, 第 2 次和第 3 次冲击下材料峰值应力下降速度提高。

**关键词:** 固体力学; 活性粉末混凝土; 霍普金森压杆; 多次冲击

**中图分类号:** O347.3      **国标学科代码:** 130·15      **文献标志码:** A

## 1 引 言

活性粉末混凝土是一种抗压强度达 200MPa 的超高性能水泥基复合材料, 具有很好的耐久性能和施工性能, 在石油、核电、市政、海洋、人防工程及军事设施中有广泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>。材料和结构在使用中常常受到 1 次和多次冲击荷载的作用, 研究材料的多次冲击性能十分重要。分离式霍普金森压杆 (SHPB) 装置可以方便地记录材料在冲击荷载下的动态应变-时间、应力-时间、应变率-时间曲线, 因此 SHPB 被广泛用于研究应变率敏感材料的动态特性。经过 50 多年的演变, SHPB 技术已比较成熟, 研究对象从金属、高分子材料发展到岩石、水泥基材料和各种复合材料<sup>[3-9]</sup>。胡时胜等<sup>[10]</sup>通过 SHPB 装置对混凝土长杆形试件进行了低速重复加载, 结果表明在试件内部存在损伤演化, 而且这种演化还有个累计过程。潘景龙等<sup>[11]</sup>采用电液伺服实验机进行了 FRP 约束混凝土圆柱体试件多次打击实验, 应变率为  $0.2 \text{ s}^{-1}$ , 结果表明经每次打击后的材料的刚度逐渐衰减, 但有收敛趋势, 经受多次打击后的试件与未经受多次打击的试件相比, 其准静载下的初始弹性模量降低, 强度基本不变, 极限应变提高。文献中的混凝土多次冲击实验均在较低的应变率下进行, 且没有给出材料在多次冲击下应力-应变曲线的变化过程。本文中通过 SHPB 装置研究一种采用大掺量工业废渣制备的生态型活性粉末混凝土 (RPC) 在受到多次冲击荷载作用下的动态力学行为, 试图得到冲击次数、冲击方式、纤维掺量对材料抗多次冲击性能的影响规律。

## 2 材料制备

原材料包括 P·II52.5R 硅酸盐水泥, 超细工业废渣 (粉煤灰、矿粉、硅灰), 最大粒径 2.5 mm 的黃砂, 聚羧酸型高效减水剂, 为增强材料的韧性, 采用钢纤维 (直径 0.2 mm、长 13 mm) 增强技术。材料的配合比和静态抗压强度  $f_c$  如表 1 所示, 表中  $w$  和  $\varphi$  分别表示材料的质量分数和体积分数。

\* 收稿日期: 2007-05-22; 修回日期: 2007-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50808101); 江苏省基础研究计划项目 (BK2008417);

中国博士后科学基金项目 (20080431100)

作者简介: 赖建中 (1978—), 男, 博士, 讲师。

成型过程中先将原材料(超细工业废渣、水泥、砂)干拌均匀,然后在搅拌过程中将混合均匀的水和外加剂缓慢倒入搅拌机内,湿拌 3 min。当混合料进入粘流状态后,均匀地撒入钢纤维,继续搅拌 3 min。然后在模具中浇铸成型,并振动 30 s 以使试件更密实。标准养护 1 d 后拆模,试件标准养护 30 d 后进行实验。试件是直径 70 mm、高 35 mm 的圆柱体,实验前试件表面采用高精度磨床加工,使表面不平度小于 0.02 mm。

表 1 RPC 的配合比  
Table 1 Mix proportion of RPC

代号	w(水泥)/%	w(硅灰)/%	w(粉煤灰)/%	w(矿粉)/%	水胶比	胶砂比	w(外加剂)/%	φ(纤维)/%	f <sub>c</sub> /MPa
RPCV <sub>0</sub>	40	10	25	25	0.15	1 : 1.2	2	0	143
RPCV <sub>3</sub>	40	10	25	25	0.16	1 : 1.2	2	3	186
RPCV <sub>4</sub>	40	10	25	25	0.16	1 : 1.2	2	4	204

### 3 实验方法

冲击压缩实验采用直锥变截面式∅74 SHPB 装置(图 1)。装置由气枪、子弹、入射杆、透射杆、阻尼器、测速系统和数据采集系统组成,子弹和入射杆小端尺寸为 37 mm,入射杆大端、透射杆直径为 74 mm,所用子弹长度为 0.4 m,入射杆总长 3.2 m,透射杆总长 1.8 m。入射杆上应变片贴在距打击端 1.00 m 和 1.25 m 处,透射杆上应变片贴在距打击端 0.6 m 处,每一距离处对称贴 2 个应变片,实验结果由 2 片的平均值计算。试件被夹在入射杆和透射杆之间,由高压气体推动枪膛中的子弹撞击入射杆,产生一个弹性波(入射波)并在入射杆中传播。当入射波传到试件时,整个试件将被压缩。同时,由于杆与试件之间的波阻抗差异,入射波被部分反射为反射波重新返回入射杆,而另一部分则透过试件作为透射波进入透射杆。借助于数据采集系统分别将入射波、反射波以及透射波记录下来,通过专业 SHPB 软件对波形进行处理得出试件的动态应力-应变曲线。

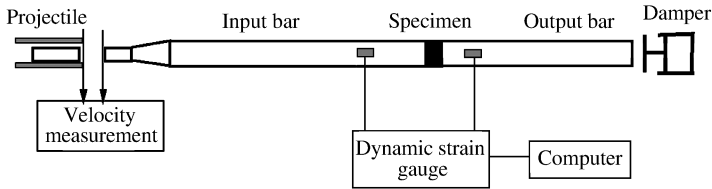


图 1 SHPB 装置示意图

Fig.1 SHPB test set-up

实验采用 4 种不同强度的入射波对试件进行多次冲击压缩加载(图 2),应变率范围为 10 ~ 100 s<sup>-1</sup>。多次冲击荷载的作用方式有 4 种:方式 1:第 1 次冲击为入射波 1,其余冲击为入射波 2;方式 2:第 1 次冲击为入射波 2,其余冲击为入射波 2;方式 3:第 1 次冲击为入射波 3,其余冲击为入射波 2;方式 4:第 1 次冲击为入射波 4,其余冲击为入射波 2。

从方式 1 到方式 4,第 1 次冲击的入射波逐渐提高,使材料产生不同程度的初始损伤,此后采用中等强度的入射波 2 对试件进行 2 次和多次加载,研究材料各项动态性能的变化过程。

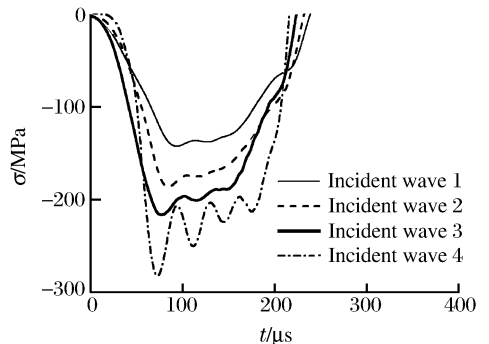


图 2 多次冲击压缩实验的入射波

Fig.2 Incident waves on repeated impact

## 4 实验结果和分析

### 4.1 多次冲击压缩实验波形

图3是同一材料在不同冲击方式作用下,多次冲击的波形图,入射波从1.25 m处应变片测得。本文中实验采用的是变截面杆,入射波卸载为拉伸波。试件通过摩擦力夹在入射杆和透射杆之间,当入射波卸载为拉伸波后,由于试件和杆的界面不能承受拉应力,试件将自然落下,掉入其下的纸盒中。因此在实验过程中,拉伸波对试件没有影响。将试件重新装好后,就可进行下一次冲击了。从图3中可以看出,随着第1次冲击速度的提高,第1次冲击的入射波和透射波不断提高,同时材料第1次冲击损伤也随之增加。第2次和第3次的冲击速度相同,因而入射波相同,但透射波随着材料损伤的积累而降低。材料第1次冲击的损伤越大,在随后冲击过程中其损伤发展的速度越快,因而透射波幅值降低的速度也越快。在透射波降低的同时,反射波有所增加。在图3(b)中,随着冲击次数的增加,材料的损伤增加,试件中的波速降低,应力波在试件中传播的时间增加,因此透射波的起点向后平移。

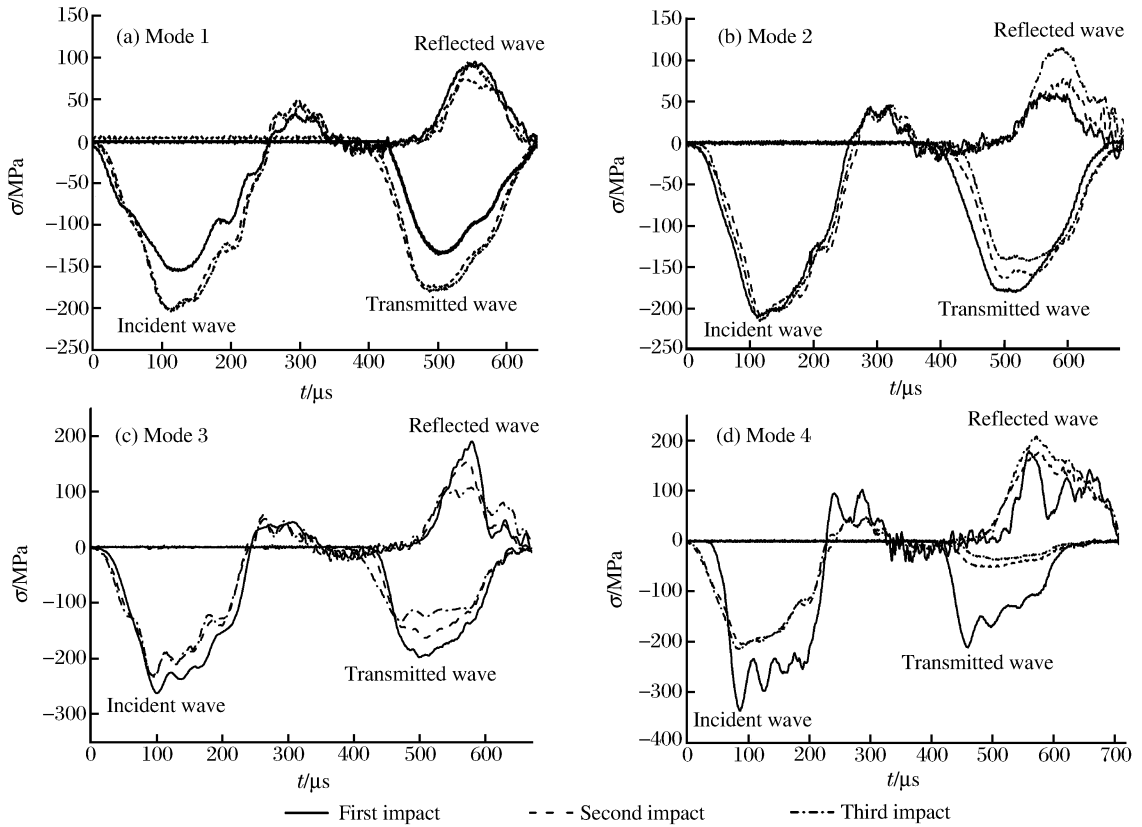


图3 不同冲击次数下RPCV<sub>4</sub>的波形图

Fig. 3 Different waves transmitted through RPCV<sub>4</sub> in case of different impact times

### 4.2 冲击次数对RPC动态性能的影响

图4是RPC在多次冲击下的应力-应变曲线,图中曲线上的数字1~5代表冲击次数。从图中可以看出,RPC基体的抗多次冲击能力较弱,在第2次冲击后试件就完全损坏,无法再进行继续冲击。在RPC基体中加入纤维后,材料的抗多次冲击能力明显提高,且随着纤维掺量的提高,在相同的入射波作用下,峰值应力下降的速度减慢,因此抗冲击的能力也有所提高。在方式1的作用下,第2次的冲击速度高于第1次,因此第2次的峰值应力高于第1次,此后随着冲击次数的增加,材料的损伤程度不断提高,峰值应力逐渐下降。通过提高纤维掺量,可以降低各系列材料峰值应力下降的速度。特别是纤维掺量为4%的RPCV<sub>4</sub>,其第2次和第3次冲击的峰值应力几乎相等,第4次和第5次冲击的峰值应力均在100 MPa以上,说明材料具有优异的抗多次冲击能力。从图中可见,在第1次冲击时,以弹性变形为

主,材料损伤较少,应力-应变曲线在峰值荷载后向原点回缩。随着冲击次数的提高,应力-应变曲线上段斜率逐渐降低,在峰值荷载后出现类似金属材料的屈服阶段,在这一阶段,材料的应力变化较小而应变显著增长,材料的损伤累积增加。从曲线的变化可以看出,当应变超过 0.01,应变率超过  $60 \text{ s}^{-1}$ ,随着冲击次数的提高峰值应力出现明显下降。RPCV<sub>4</sub>在连续 5 次冲击下应变均在 0.01 内,应变率不超过  $50 \text{ s}^{-1}$ ,其峰值应力下降在 15% 之内。从图 4 中还可以看出,随着冲击次数的提高,材料的应变率和峰值应变逐渐提高,峰值应力和动态弹性模量逐渐下降,反映了材料在多次冲击下损伤逐渐累积的过程。

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增加而对应的应变减小,即所谓的“动脆”现象,而水泥基材料的实验结果有所不同,这是因为水泥基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。在第 1 次冲击时,材料损伤较小,应变率硬化占主导地位,动态应力-应变曲线上段近似为线性段,初始弹性模量随应变率提高而增大。随着冲击次数的增加和材料损伤演化的加剧,大量微裂纹的产生和扩展形成损伤过程区,增加了能量耗散,推迟了裂纹的不稳定扩展,增加了材料的韧性。

4.3 冲击方式对 RPC 动态性能的影响

图 5 是不同冲击方式下 RPC 2 次冲击应力-应变曲线,图中曲线上的数字 1~2 代表冲

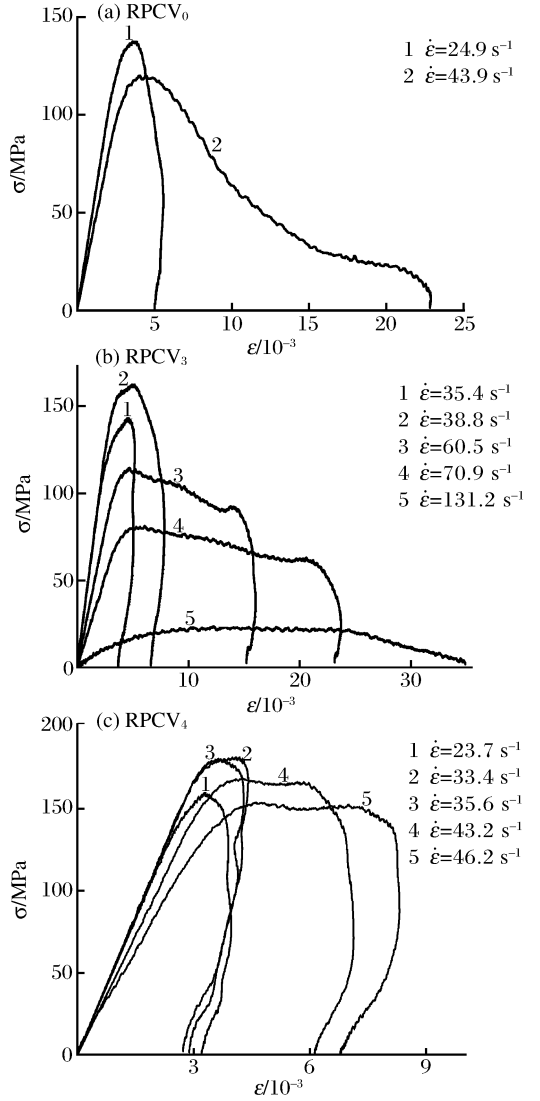


图 4 不同冲击次数下 RPC 的应力-应变曲线(方式 1)

Fig. 4 Stress-strain curves of RPC at different impact times in the mode 1

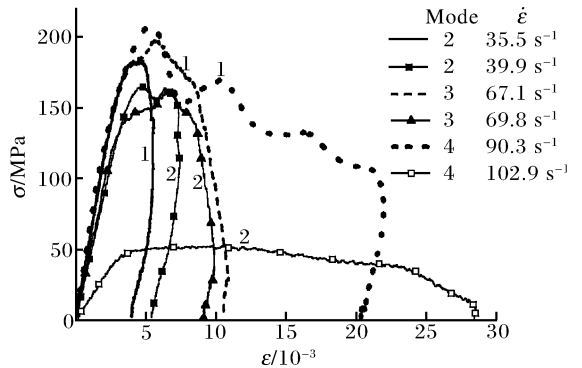
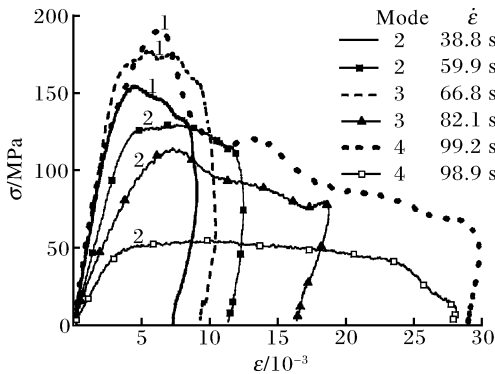


图 5 冲击方式对 RPC 应力-应变曲线的影响

Fig. 5 Effect of impact modes on the stress-strain curves of RPC

击次数。从图中可以看出,随着冲击方式的改变,第1次冲击的入射波强度不断提高,因此第1次冲击应力-应变曲线的应变率、弹性模量、峰值应力和峰值应变随之不断提高,材料的损伤程度也相应提高。第2次冲击的入射波强度相等,由于材料的损伤程度不同,第2次冲击的应力-应变曲线呈现出与第1次相反的变化规律,即弹性模量、峰值应力随着冲击方式的改变逐渐降低。在相同作用方式下,随着冲击次数的提高,弹性模量、峰值应力逐渐降低,应变率和峰值应变逐渐提高。在方式2和方式3作用下,随着纤维掺量的提高,第2次冲击的弹性模量和峰值应力下降的程度有所降低。在方式4的作用下,各纤维掺量的材料第1次冲击的应变率达到 $90\text{ s}^{-1}$ 以上,应变超过了0.02,第2次冲击的弹性模量和峰值应力均有明显降低,且降低到一个相近的层次,纤维掺量对2次冲击性能的影响不明显了。因此在高应变率下,当材料第1次冲击的损伤超过一定程度时,2次冲击的结果就趋向一致了。

#### 4.4 多次冲击下 RPC 标准化强度的变化

定义材料多次冲击的标准化强度

$$I_n = F_n / F_1 \quad (1)$$

式中: $I_n$ 为试件第 $n$ 次冲击的标准化强度, $F_n$ 和 $F_1$ 分别为试件第 $n$ 次冲击和第1次冲击的峰值荷载。

图6反映了多次冲击荷载作用下 RPC 标准化强度的变化过程。RPC 基体一般在第1次冲击荷载后试件就损毁,无法进行第2次冲击,仅在方式1的作用下进行了2次冲击。在方式1的作用下,RPCV<sub>0</sub>的第2次标准化强度 $I_2$ 下降到86%;而加入纤维后材料的 $I_2$ 较 $I_1$ 增加了10%以上,此后随着冲击次数的增加, $I_n$ 逐渐下降,纤维掺量高的材料较纤维掺量低的材料 $I_n$ 下降得更缓慢。在方式1下,RPCV<sub>4</sub>的标准化强度在5次冲击荷载后仅下降了10%,显示了优异的抗多次冲击能力。随着冲击方式的改变,材料的初次冲击损伤不断提高,试件标准化强度的下降速度也逐渐增大,高纤维掺量的材料 $I_n$ 下降速度比低纤维掺量材料的慢。在方式2的作用下,RPCV<sub>3</sub>的 $I_2$ 以及RPCV<sub>4</sub>的 $I_3$ 下降均不超过20%,显示了良好的抗2次和

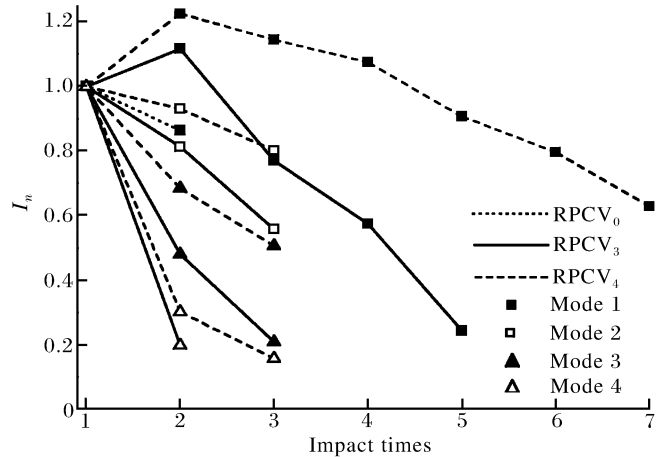


图6 钢纤维掺量对 RPC 标准化强度的影响

Fig. 6 Effect of steel fiber fraction on the standard strength of RPC

3次冲击能力。在方式3的作用下,RPCV<sub>4</sub>和RPCV<sub>3</sub>的 $I_2$ 分别在70%和50%左右,材料依然具有一定的抗2次冲击能力。在方式4的作用下,材料的 $I_2$ 在20%~30%之间, $I_3$ 已下降到15%。由此可见,随着纤维掺量的提高,材料抗多次冲击的能力也不断提高。材料的初始冲击损伤对其抗2次冲击能力影响很大,初始损伤小的材料抗2次和多次冲击能力较大。

#### 4.5 多次冲击下 RPC 的破坏形态

图7反映了冲击次数对 RPC 破坏形态的影响。RPC 基体在前2次冲击荷载作用下试件破坏严重,而且随着第1次冲击荷载的提高,破坏程度提高,从边缘脱落到碎成小块。加入纤维后,RPC 抗多次冲击破坏的能力大大提高。在方式2作用下,RPCV<sub>3</sub>和RPCV<sub>4</sub>试件在前2次冲击下的损伤很小。从破坏过程看,掺纤维的试件首先在边缘出现细微裂纹,此后裂纹逐渐向试件中部扩展,由于纤维的阻裂作用,这一扩展过程缓慢。经过多次冲击后,出现了横贯试件中部的裂缝,但试件仍保持一定的完整性。随着初始破坏程度的提高,材料在第2次和第3次冲击下的破坏程度明显增加。在方式4的作用下,RPCV<sub>3</sub>和RPCV<sub>4</sub>试件在第2次冲击后出现明显的边缘裂缝,在第3次冲击后出现中部裂缝。在相同的冲击次数下,RPCV<sub>4</sub>的破坏程度小于RPCV<sub>3</sub>的情况。

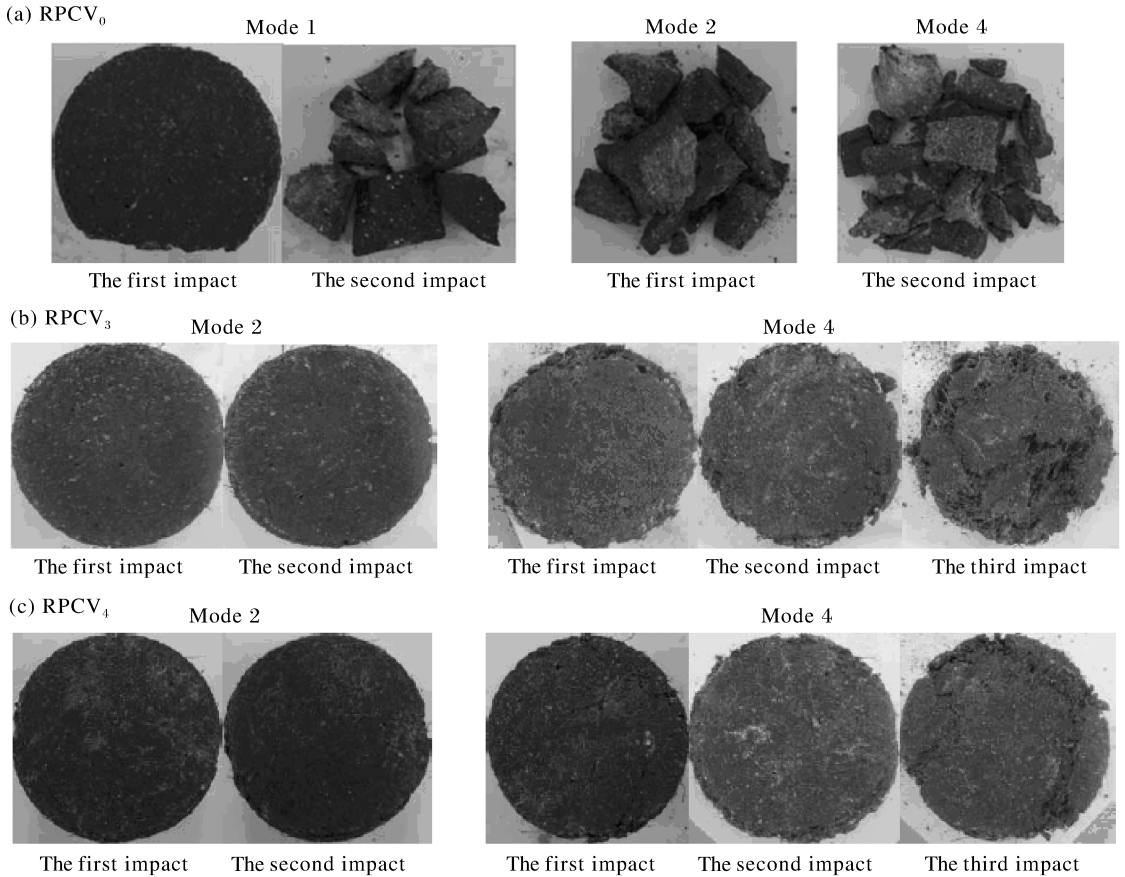


图 7 多次冲击下 RPC 的破坏形态

Fig. 7 Fracture patterns of RPC under repeated impact

## 5 结 论

(1) 针对材料和结构在使用中受到多次冲击荷载作用的情况,采用 4 种不同方式对生态型活性粉末混凝土进行了多次冲击压缩实验。随着纤维掺量的提高,各系列材料的抗多次冲击的能力不断提高。(2) 随着冲击次数的增加,RPC 材料的应力-应变曲线上升段斜率逐渐降低,应变率和峰值应变逐渐提高,峰值应力逐渐下降,反映了材料在多次冲击下损伤逐渐累积的过程。通过提高纤维掺量,可以降低峰值应力下降的速度。(3) 定义了 RPC 材料多次冲击压缩的标准化强度,随着纤维掺量的增加,材料在多次冲击下标准化强度下降的速度降低,损伤的发展速度减缓,抗多次冲击的能力提高。(4) 由于钢纤维的增强、增韧和阻裂作用,RPC 材料在高速冲击下的破坏形态从基体材料的粉碎性破坏转变为裂缝逐步扩展、裂而不散的破坏模式。

感谢中国科技大学胡时胜教授和合肥工业大学巫绪涛博士及孟益平博士对实验的建议和帮助。

## 参考文献:

- [1] Bonneau O, Poulin C, Dugat J. Reactive powder concrete; From theory to practice[J]. Concrete International, 1996,18(4):47-49.
- [2] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1995,25(7):1501-1511.
- [3] Tay T E, Ang H G, Shim V P W. An Empirical strain rate-dependent constitutive relationship for glass-fibre reinforced epoxy and pure epoxy[J]. Composite Structures, 1995,33(4):201-210.
- [4] Chen W, Song B, Frew D J, et al. Dynamic small strain measurements of a metal specimen with a split Hopkinson pressure bar[J]. Experimental Mechanics, 2003,43(1):20-23.

- [5] Chen W W, Wu Q, Kang J H, et al. Compressive superelastic behavior of a NiTi shape memory alloy at strain rates of 0.001-750 s<sup>-1</sup>[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001,38(50-51):8989-8998.
- [6] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. A split Hopkinson pressure bar technique to determine compressive stress-strain data for rock materials[J]. *Experimental Mechanics*, 2001,41(1):40-46.
- [7] Song B, Chen W, Weerasooriya T. Quasi-static and dynamic compressive behaviors of a S-2 glass/SC15 composite [J]. *Journal of Composite Materials*, 2003,37(19):1723-1743.
- [8] Song B, Chen W. One-dimensional dynamic compressive behavior of EPDM rubber[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME*, 2003(3),125:294-301.
- [9] Chen W, Lu F, Winfree N. High-strain-rate compressive behavior of a rigid polyurethane foam with various densities[J]. *Experimental Mechanics*, 2002,42(1):65-73.
- [10] 胡时胜,张磊,武海军,等. 混凝土材料层裂强度的实验研究[J]. *工程力学*,2004,21(4):128-132.  
HU Shi-sheng, ZHANG Lei, WU Hai-jun, et al. Experimental study on spalling strength of concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2004,21(4):128-132.
- [11] 潘景龙,张宝超,马晓儒,等. 武器间接命中条件下 FRP 约束混凝土抗多次打击能力[J]. *复合材料学报*,2004,21(5):128-133.  
PAN Jing-long, ZHANG Bao-chao, MA Xiao-ru, et al. Experimental study of resisting multi-hitting capacity on FRP confined concrete on condition of indirect damage by weapons[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004,21(5):128-133.

## Dynamic mechanical behaviour of reactive powder concrete subjected to repeated impact

LAI Jian-zhong<sup>1,3,\*</sup>, SUN Wei<sup>2,3</sup>, RONG Zhi-dan<sup>2,3</sup>

(1. *Department of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*

2. *College of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;*

3. *Jiangsu Key Laboratory of Civil Engineering Materials, Nanjing 211189, Jiangsu, China)*

**Abstract:** Reactive powder concrete (RPC) with a compressive strength of 200MPa was prepared by substitution of ultra-fine industrial waste powders for 60% cement by weight. The dynamic mechanical behaviour of RPC with different fiber volume fraction was researched on repeated compressive impact in four kinds of impact modes with the split Hopkinson pressure bar. Standard strength of repeated impact was defined. The effects of impact times, impact modes and fiber volume fraction on the properties of RPC subjected to repeated impact were explored. Results show that the ability of repeated impact resistance of RPC is increases with fiber volume fraction. With the increase of impact times, the damage of material increases and the standard strength decreases. With the change of impact modes, the damage of material on the first impact and the reduction rates of the peak stresses on the second and third impact increase.

**Key words:** solid mechanics; reactive powder concrete; split Hopkinson pressure bar; repeated impact

---

\* Corresponding author: LAI Jian-zhong  
E-mail address: jzh-lai@163.com  
Telephone: 86-25-84303881